

# 令和4年度 研究発表会

## 講演論文集

2022年10月13日～10月14日

関西大学千里山キャンパス 100周年記念会館  
およびオンライン

一般社団法人 **日本応用地質学会**

〒101-0062 東京都千代田区神田駿河台 2-3-14  
お茶の水桜井ビル 7F

TEL 03-3259-8232

一般社団法人 日本応用地質学会 令和4年度研究発表会

協 賛： 一般社団法人 全国地質調査業協会連合会  
 一般社団法人 関西地質調査業協会  
 協同組合 関西地盤環境研究センター

共 催： 公益社団法人 地盤工学会

※特別セッション「理学と工学の融合における都市開発」

日 時： 令和4年10月13日（木） 9：40～18：40  
 10月14日（金） 9：20～18：10

会 場： 関西大学千里山キャンパス 100周年記念会館およびオンライン

費 用： 参加登録料（講演論文集のダウンロード権を含む） ※当日参加は+2,000円  
 一般会員：8,000円，学生会員：1,000円  
 一般非会員：10,000円，学生非会員：3,000円

発表プログラム：

【第1日】10月13日（木）

日程	時間	第1会場 (ホール1)	第2会場 (ホール2)	ポスターセッション
午前	9:40～10:40	災害地質(1) 座長：西山賢一 [1-4]	地形地質一般(1) 座長：野々村敦子 [23-26]	ポスター展示 (10:00～)
	10:50～12:00	災害地質(2) 座長：井上直人 [5-9]	地形地質一般(2) 座長：矢田 純 [27-31]	
昼休み				
午後	13:00～14:10	開会式・特別講演	—	ポスター展示
	14:20～16:10	災害地質(3) 座長：藤井幸泰 [10-17]	地下水 座長：風見健太郎 [32-39]	
	16:20～17:25	災害地質(4) 座長：鶴澤貴文 [18-22]	環境地質 座長：大谷具幸 [40-44]	
	17:00～18:40	ポスターセッション コアタイム		

※ [ ] は論文番号

【第2日】10月14日（金）

日程	時間	第1会場 (ホール1)	時間	第2会場 (ホール2)	ポスターセ ッション
午前	9:50~11:10	土木地質 (1) 座長：西金佑一郎 [45-50]	9:20~11:10	特別セッション 地質屋から Geologist へ！海外事情最前線 ～応用地質学の国際化 とアジアの諸事情～ 座長：加地広美 [74-78]	ポスター 展示
	10:20~12:40	土木地質 (2) 座長：奥澤康一 [51-56]	10:20~12:40	特別セッション 理学と工学の融合にお ける都市開発 座長：北田奈緒子 [79-83]	
昼休み					
午後	13:40~15:00	土木地質 (3) 座長：梶山敦司 [57-62]	13:40~15:00	地層処分 座長：堀川滋雄 [84-89]	ポスター 展示 (~15:00)
	15:10~17:33	特別セッション 自然災害伝承碑による地 域災害の応用地質とアウ トリーチ (1) 座長：稲垣秀輝／ 千田敬二 [63-73]	15:10~16:30	測量・計測 (1) 座長：升元一彦 [90-95]	
	17:40~18:10	特別セッション 自然災害伝承碑による地 域災害の応用地質とアウ トリーチ (2) 総合討論 (自然災害伝承碑の応用 地質的活用方法と今後の 展望) 座長：稲垣秀輝／ 千田敬二	16:40~18:00	測量・計測 (2) 座長：佐藤 稔 [96-100]	

※ [ ] は論文番号

# 研究発表会プログラム (○印は講演者)

## 【 特 別 講 演 】

### 第1日 [10月13日 (木)] 第1会場

【特別講演 13:10~14:10】

「6～7世紀における土構造物の特性 —飛鳥地域の後・終末期古墳の様相—

西光 慎治 氏 (明日香村教育委員会文化財課 課長補佐・関西大学非常勤講師)

## 【 口 頭 発 表 】

### 第1日 [10月13日 (木)] 第1会場

#### 〔 災害地質 (1) 〕

- 1 比抵抗モニタリングによる斜面崩壊警報システムの開発 ..... 1  
○上原 大二郎, 王寺 秀介(中央開発), 上田 匠, 與田 至門(早稲田大学理工学術院)
- 2 風化・崩壊様式を規制する断裂構造 ..... 3  
○吉村 辰朗, 照井 剛(第一復建)
- 3 火山体周辺の大規模地すべりの変動メカニズムについて ..... 5  
○柴崎 達也(国土防災技術)
- 4 礼文島北部高山における周氷河性斜面堆積物の地質工学的性質 ..... 7  
○吉野 恒平, 坂本 尚弘, 川又 基人, 倉橋 稔幸(土木研究所寒地土木研究所)

#### 〔 災害地質 (2) 〕

- 5 「自然災害ラボ」における人材育成の取り組み ..... 9  
○大沼 和弘, 荒尾 眞成, 軍司 健太, 周 士統, 羅 子彬, 中村 美千彦 (東北大学)
- 6 火山噴火に伴う河川溶存ヒ素の移流分散リスク評価に用いる簡易解析ツールの製作 ..... 11  
○小野 秀史, 渡辺 俊一(エイト日本技術開発), 山本 優介, 細野 賢一(地層科学研究所)
- 7 熊本県阿蘇立野地区黒川河岸斜面崩壊地で発見した貫入岩とそのK-Ar年代測定値 ..... 13  
○梅崎 基考(アバンス), 長谷中 利昭, 鳥井 真之(熊本大学), 山下 隆之(アバンス)
- 8 集水井の機能低下をもたらす現場条件について ..... 15  
○木村 耕治, 鈴木 孝明, 山根 祐太朗(日本基礎技術)
- 9 2021年熱海市逢初川土石流の地質的要因 ..... 17  
○千木良 雅弘(深田地質研究所), 北村 晃寿(静岡大学), 木村 克己(深田地質研究所)

#### 〔 災害地質 (3) 〕

- 10 大規模山体崩壊地内で発生した斜面変形 ..... 19  
○伊東 陽希(ダイヤコンサルタント), 前嶋 美希, 赤松 伸弥(兵庫県西播磨県民局光都農林振興事務所), 松村 法行, 鏡原 聖史, 岡崎 敬祐(ダイヤコンサルタント)
- 11 美濃帯における深層崩壊危険斜面と断層帯との関係～長野県辰野町の事例～ ..... 21  
○松澤 真, 木村 克己(深田地質研究所)
- 12 水抜きボーリング工点検方法の種類と特徴について ..... 23  
○鈴木 孝明, 木村 耕治, 山根 祐太朗(日本基礎技術)
- 13 廃棄物混じり土による谷埋め盛り土の降雨履歴に伴う崩壊と土石流の発生機構の検討 ..... 25  
○打木 弘一, 黄 はお, 林 三男(基礎地盤コンサルタンツ), 大野 博之(地質工学社), 磯部 有作(IMAGEi)

Consultant), 八村 智明(日本環境衛生センター), 登坂 博行(地圏環境テクノロジー)	
14 バランス断面法の考え方を取り入れた弾塑性有限要素法による岩盤地すべりの解析.....	27
○瀬崎 章太郎(環境地質), 岡安 祥安, 若井 明彦(群馬大学), 小坂 英輝, 稲垣 秀輝(環境地質)	
15 マルチモーダル深層学習を用いた 2011 年台風 12 号による深層崩壊の山体重力変形抽出 .....	29
○菊地 輝行(J-POWER 設計コンサルタント), 西山 哲(岡山大学大学院), 高橋 謙一(電源開発)	
16 岩盤の風化と土層の発達および表層崩壊の発生に関する水文地形プロセスモデリングと斜面災害予測.....	31
○松四 雄騎(京都大学)	
17 花山カルデラに関連したスプレッド地形と地震の影響.....	33
○高見 智之(国際航業)	
[ 災害地質(4) ]	
18 2018 年の耶馬溪斜面崩への地下水についての研究.....	35
○仙石 南々海, 太田 岳洋(山口大学)	
19 土石流とその後続流の到達距離と被害.....	37
○小坂 英輝, 生沼 洋祐(環境地質)	
20 最新の技術と経験に対応した「道路防災点検の手引き」の改訂.....	39
○佐々木 靖人, 浅井 健一(土木研究所), 道路防災点検の手引き編集 WG (全国地質調査業協会連合会)	
21 中央構造線断層沿いで発生した施工時の表層崩壊と電気探査・法面補強対策の事例.....	41
○谷垣 勝久, 森山 将斗, 高尾 遼太(タニガキ建工), 橋本 義之(橋本地質事務所), 坂田 直人(和歌山県), 木下 篤彦(国土交通省)	
22 和歌山県日高川町弥谷地区において昭和の紀伊半島大水害時に発生した土砂災害とその伝承.....	43
○秋山 晋二(国際航業), 谷垣 勝久(タニガキ建工), 田内 裕人, 後 誠介(和歌山大学)	

## 第 1 日 [10 月 13 日 (木)] 第 2 会場

[ 地形地質一般(1) ]	
23 微小な標高変化を捉える剰余地図の活用—2016 年熊本地震の例.....	45
○黒木 貴一(関西大学)	
24 四万十帯大井川水系の土砂動態に関する応用地質学的研究 砂岩泥岩互層を対象に.....	47
○藤井 幸泰(名城大学), 鈴木 志信, 大森 巧規, 小島 貴大(元名城大学)	
25 AR 砂場を用いた集水域と流下方向の可視化.....	49
○猪股 雅美(広島大学)	
26 地すべり対策における地質リスクの発現要因の分析.....	51
○矢田 純(カミナガ)	
[ 地形地質一般(2) ]	
27 活断層調査におけるボアホールカメラ画像解析の活用—奈良盆地東縁断層帯・黄檗断層の事例.....	53
○小松原 琢(産業技術総合研究所), 富浦 裕司(レアックス), 郡谷 順英(パスコ)	
28 段丘・丘陵地の盛土地における液状化発生地点の地形・地質と年代.....	55
○高田 協平(関西大学大学院), 黒木 貴一(関西大学)	
29 紀伊半島熊野川流域の付加体山地に認められる変成・変質作用の違いを反映した差別削剥地形とその形成機構.....	57
○木村 克己, 金子 誠(深田地質研究所), 竹村 貴人(日本大学), 菊地 輝行, 杉山 直也(J-POWER 設計コンサルタント), 栗田 将一(大洋エンジニアリング)	
30 変形-水圧連成解析による CO <sub>2</sub> 貯留サイトの強振動時安定性評価 ～地質構造の違いによる局所安全率応答の比較～.....	59
○堀川 滋雄, 佐々木 猛, 橋本 励(サンコーコンサルタント), 楠瀬 勤一郎(元 産業技術総合研究所地質調査所), 橋本 涼太(広島大学大学院工学研究科)	

31	讃岐山脈における古期地すべり移動体の分布特性.....	61
	○長谷川 修一(香川大学), 菅原 大介(四電技術コンサルタント), 野々村 敦子(香川大学), 千葉 達朗(アジア航測)	

〔 地下水 〕

32	固定4電極電気探査で推定された地下水面の潮汐変動.....	63
	○中里 裕臣, 白旗 克志, 土原 健雄, 吉本 周平, 福元 雄也(農研機構), 石田 聡(農業農村工学会)	
33	阿寺断層を貫くトンネル坑内湧水の水質と地質との関連性評価.....	65
	○山下 慧, 升元 一彦, 白鷺 卓, 松下 智昭(鹿島建設), 太田 岳洋(山口大学), 福山 拓郎(JRIT)	
34	ミャンマーの地熱資源活用に向けて(第二報) —地熱発電計画と非火山性温泉の地熱流体特性に関するレビュー—.....	67
	○須藤 宏(G&S フィールド), 斎藤 健志(産総研地質調査総合センター), 藤野 毅(埼玉大学大学院)	
35	適正管理と持続可能な利用にむけた地下水流動場の可視化技術.....	69
	○長谷川 怜思, 緒方 陸, 佐藤 怜, 井川 尚之, 吉田 広人, 鈴木 広美, 佐々木 理弦, 杉江 美織(八千代エンジニアリング)	
36	断層沿いに分布する河川・温泉の水質調査による深部流体の混入状況に関する研究.....	71
	○井上 颯太, 太田 岳洋(山口大学)	
37	亀裂性岩盤の3次元透水テンソルの推定方法と異方応力下での透水性に関する検討.....	73
	○竹村 貴人(日本大学), 細野 日向子, 作道 悠(日本大学大学院), 川北 章悟, 鈴木 健一郎(大林組)	
38	福島県南相馬市の堆積岩分布域における放射性セシウムの移行挙動の検討.....	75
	○木目沢 弓都, 張 豊瑞, 竹内 真司(日本大学)	
39	オープンループ方式地中熱利用システムにおける還元井の目詰まり形成の進展.....	77
	○大谷 具幸, 米田 真由(岐阜大学)	

〔 環境地質 〕

40	九重山における九州山頂帯の形成要因の検討—九重山と祖母山を比較して—.....	79
	○野口 祐弥, 太田 岳洋(山口大学)	
41	脱気水上向流カラム試験を用いた盛土内貧酸素環境における重金属溶出傾向の評価.....	81
	○山崎 秀策, 田本 修一, 川又 基人, 倉橋 稔幸(寒地土木研究所)	
42	地域特性を踏まえたトンネル湧水の対応事例.....	83
	○佐々木 理弦, 杉江 美織, 堀内 瀬奈, 長谷川 怜思, 山本 晃(八千代エンジニアリング), 常陸 正(国土交通省)	
43	硫化鉄鉱体に含有する黄銅鉱による酸性水の発生機構について.....	85
	○昆 周作, 品川 俊介(土木研究所)	
44	盛土内環境および浸透水量の計測実験.....	87
	○品川 俊介, 昆 周作(土木研究所), 田本 修一, 山崎 秀策(土木研究所寒地土木研究所)	

**第2日 [10月14日(金)] 第1会場**

〔 土地地質(1) 〕

45	(欠)	
46	ダム再生における基礎岩盤評価の事例分析.....	89
	○多田 一晴, 梶山 敦司, 矢島 良紀, 品川 俊介(土木研究所)	
47	山岳トンネル施工に係るラムサール条約登録湿地の環境保全に向けた取組み.....	91
	○柏木 亮, 高垣 裕彦(鉄道・運輸機構)	
48	画像解析によるダム基礎地盤の地質不均質性評価.....	93
	○宇田川 義夫(清水建設), 小高 茂治(国土交通省近畿地方整備局足羽川ダム工事事務所), 山下 哲一(清水建設)	
49	テキストマイニングと対話システムを用いた施工に関する地質情報の要約技術.....	95

○戸邊 勇人, 升元 一彦, 松川 剛一(鹿島建設)	
50 土工事における地質体毎の地質リスク事象.....	97
○大岩 和暉, 中島 亮, 片山 政弘(熊谷組)	
〔 土地地質(2) 〕	
51 フィールドにおける3次元地質・土質モデルを活用したBIM/CIMの実施.....	99
○中島 亮, 中須賀 大樹, 石濱 茂崇, 天下井 哲生(熊谷組)	
52 FEM解析による岩盤亀裂進展のモデル化方法の検討.....	101
○日外 勝仁, 坂本 尚弘, 倉橋 稔幸(土木研究所寒地土木研究所)	
53 標準貫入試験のN値とコーン貫入試験qc値の関係.....	103
○向井 和行, 佐高 裕之(レアックス)	
54 岩石の乾湿繰り返しによる強度低下モデルの構築と斜面安定解析への適用.....	105
○浦越 拓野, 河村 祥一, 嶋本 敬介, 久河 竜也(鉄道総合技術研究所)	
55 温度および湿度の変動に対する自然岩石のひずみ応答に関する検討.....	107
○久河 竜也, 浦越 拓野, 河村 祥一(鉄道総合技術研究所)	
56 トンネル坑口急崖斜面で実施した「のり面CIM」.....	109
○石濱 茂崇(熊谷組)	
〔 土地地質(3) 〕	
57 トンネル掘削後の地山の飽和度変化に関する解析的検討および飽和度変化が盤ぶくれに与える影響の検討.....	111
○西金 佑一郎, 浦越 拓野, 嶋本 敬介, 鈴木 雅之(鉄道総合技術研究所)	
58 凹状の弾性波速度から判明した火砕岩類による埋没谷でのトンネル調査事例.....	113
○田中 慎吾(基礎地盤コンサルタンツ)	
59 合成開口レーダを用いた変状検知システムの開発.....	115
○中谷 匡志, 井ノ口 拓郎(安藤ハザマ)	
60 ハイパースペクトルデータとAI画像認識による阿蘇火砕流堆積物の判別手法の構築.....	117
○福岡 航治(地圏総合コンサルタント), 大和田 済熙(秋田大学), 中村 真一郎(北海道大学大学院), 中川 清森, 佐藤 真(地圏総合コンサルタント)	
61 安山岩地山を対象とした原石山調査事例.....	119
○吉田 至良, 田中 慎吾, 西島 正範(基礎地盤コンサルタンツ)	
62 橋梁基礎における亀裂の発達した岩盤の強度定数設定に関する検討事例.....	121
○佐藤 静流, 中川 智博, 夏目 隆弘(基礎地盤コンサルタンツ)	
〔 特別セッション1：自然災害伝承碑による地域災害の応用地質とアウトリーチ(1) 〕	
63 自然災害伝承碑に関する地図情報の整備と活用の可能性.....	123
○栗栖 悠貴, 宮下 妙香(国土地理院)	
64 自然災害伝承碑調査票とその活用.....	125
○稲垣 秀輝(環境地質), 下村 博之(パスコ)	
65 北海道における自然災害伝承碑と北海道自然災害史研究ワーキンググループの取り組み.....	127
○倉橋 稔幸(寒地土木研究所), 北海道自然災害史研究ワーキンググループ	
66 東北地方の事例 気仙沼大島の津波“MEMORIAL”.....	129
○橋本 修一(東北開発コンサルタント), 杉山 直人(基礎地盤コンサルタンツ), 新山 雅憲(ダイヤコンサルタント)	
67 関東地方の事例 一主に埼玉県と東京都の洪水と地震.....	131
○千田 敬二(八州), 金山 健太郎(大日本コンサルタント)	
68 新潟県における自然災害伝承碑の分布とその特徴.....	133
○堀松 崇(興和), 末武 晋一(日本工営), 佐藤 壽則(日さく)	
69 中部地方の災害伝承碑の分布と代表的な災害.....	135

○加藤 靖郎(川崎地質), 日野 康久(KANSO テクノス), 藤井 幸泰(名城大学理工学部), 居川 信之(エイト日本技術開発), 佐々木 信剛(静環検査センター), 赤嶺 辰之介(サンコーコンサルタント), 太田 尚(応用地質), 篠田 繁幸(国際航業)	
70 関西地域における自然災害伝承碑.....	137
○塚本 峻一(アジア航測), 北田 奈緒子(地域地盤環境研究所)	
71 中国四国地方における自然災害伝承碑の分布とその特徴.....	139
○西山 賢一(徳島大学), 木村 一成(ケイジオ), 加藤 弘徳(荒谷建設コンサルタント), 野々村 敦子(香川大学)	
72 九州地方の事例.....	141
○池見 洋明(日本文理大学), 梅崎 基考(アバンス), 矢野 健二(ジオテック技術士事務所), 新谷 俊一(ダイヤコンサルタント), 矢田 純(カミナガ), 山田 好之助(藤永地建), 松崎 達二(サンコーコンサルタント)	
73 海外における自然災害伝承碑.....	143
○西村 智博(国際航業), 上野 将司(応用地質)	

## 第2日 [10月14日(金)] 第2会場

### [ 特別セッション2 : 地質屋から Geologist へ! 海外事情最前線 ~応用地質学の国際化とアジアの諸事情~ ]

74 (招待講演) Current activities and research issues of engineering geology in Korea.....	145
○Yong-Seok Seo (Chungbuk National University, President of the Korean Society of Engineering Geology)	
75 国内地質技術者が海外業務で戸惑う点について.....	147
○徳楠 充宏(ニュージェック)	
76 シンガポールの広域地質調査と地質図の改訂 ~45年ぶりの大幅な層序改訂とインタラクティブ地質図の発行~.....	149
○安田 智広(基礎地盤コンサルタンツ)	
77 海外プロジェクトにおける地質技術者の役割.....	151
○百瀬 泰(日本工営)	
78 ネパール人から見た日本のコンサルタント事情.....	153
○プラダシ オム(応用地質)	

### [ 特別セッション3 : 理学と工学の融合における都市開発 ]

79 地盤情報を活用した関西国際空港基礎地盤モデルの構築と地盤変形解析への適用について.....	155
○三村 衛(京都大学大学院), 田中さち(関西エアポート)	
80 三次元地質・地盤モデルの不確実性の評価と明示.....	157
○和田 里絵(応用地質)	
81 理学と工学の協働作業を行って設計施工を行った事例について.....	159
○北田 奈緒子(地域地盤環境研究所)	
82 応用地質学と地盤工学の協働を考える.....	161
○末岡 徹(キタック顧問, 地盤工学会)	
83 地盤構造物の設計における応用地質学の役割の重要性について.....	163
○栗原 則夫(地盤工学会)	

### [ 地層処分 ]

84 コンクリーション化による EDZ および水みち割れ目の自己シーリング実証試験研究.....	165
○吉田 英一, 山本 鋼志, 浅原 良浩(名古屋大学), 刈茅 孝一, 齊藤 朱音(積水化学工業), 松井 裕哉(日本原子力研究開発機構)	
85 (欠)	
86 形成環境が異なる炭酸塩コンクリーションの工学特性について.....	167
○竹内 真司, 後藤 慧(日本大学), 中村 祥子, 吉田 英一(名古屋大学)	

87 地質年代の異なる炭酸塩コンクリーションの工学的特性について .....	169
○後藤 慧, 竹内 真司(日本大学), 吉田 英一(名古屋大学)	
88 坑道の掘削損傷領域(EDZ)評価のための割れ目調査.....	171
○大泉 涼, 加藤 猛士, 木方 建造, 窪島 光志(川崎地質), 宮良 信勝(日本原子力研究開発機構)	
89 割れ目ネットワークモデルにおける割れ目長さを考慮した透水量係数分布の推定.....	173
○石橋 正祐紀, 田川 陽一, 並川 正(鹿島建設), 尾上 博則(原子力発電環境整備機構)	

### 〔計量・測量(1)〕

90 岩石の点載荷試験の利用についての一考察.....	175
○大山 朝之, 向井 和行(レアックス)	
91 砂型積層 3D プリンターで作製した模擬試料を用いた力学特性評価の確認—真三軸試験手法の例—.....	177
○佐藤 稔(電力中央研究所), 朝比奈 大輔(産業技術総合研究所), 竹村 貴人(日本大学)	
92 花崗岩類分布地域における土石流の要注意溪流の抽出手法.....	179
○長谷川 淳, 西金 佑一郎(鉄道総合技術研究所)	
93 空中写真測量を用いた飛騨変成岩斜面の地形変化に関する研究.....	181
○山内 滉大, 藤井 幸泰(名城大学), 日野 康久(KANSO テクノス), 加藤 歌那子(元名城大学)	
94 衛星写真から読み解くメカニカルレイヤーの特徴に関する研究.....	183
○作道 悠(日本大学大学院), 朝比奈 大輔(産業技術総合研究所), 遠藤 稜尚, 細野 日向子(日本大学大学院), 竹村 貴人(日本大学)	
95 ドローンレーザ計測による落石が懸念される斜面の調査事例.....	185
○喜 里美(JR 東日本コンサルタンツ), 神谷 弘志, 佐藤 洋平, 秋山 保行(東日本旅客鉄道), 今村 駿志(JR 東日本コンサルタンツ), 原 太一(中日本航空)	

### 〔計量・測量(2)〕

96 (欠)	
97 土木材料を用いた伝統的たたき工法の力学的特性に関する研究.....	187
○竹内 幸輝, 藤井 幸泰(名城大学)	
98 加熱冷却による粘板岩中の人工亀裂の発生と弾性波速度測定による異方性の検討.....	189
○細野 日向子, 竹村 貴人, 加藤 直子(日本大学大学院)	
99 分布型光ファイバ計測技術によるダム基礎グラウチングの評価.....	191
○升元 一彦, 野中 隼人, 黒川 紗季, 宮嶋 保幸, 奈須野恭伸, 小林 弘明(鹿島建設)	
100 三軸圧縮応力下における岩石試料の可視化計測システムの開発.....	193
○遠藤 稜尚(日本大学大学院), 朝比奈 大輔(産業技術総合研究所), 竹村 貴人(日本大学), 作道 悠(日本大学大学院)	

## 【ポスターセッション】

### 〔特別セッション1：自然災害伝承碑による地域災害の応用地質とアウトリーチ〕

P1 北海道津別町, 1953 年本岐地ごと造林殉難者慰霊碑.....	195
○田近 淳(ドーコン), 北海道自然災害史研究ワーキンググループ	
P2 東北地方の事例—安達太良火山の2つの災害碑—.....	197
○村上 智昭(復建技術コンサルタント), 橋本 修一(東北開発コンサルタント)	
P3 自然災害伝承碑の立地する地形種と地形場.....	199
○下河 敏彦(環境地質)	

### 〔地層処分〕

P4 外気圧の周期的変動に対する岩石ブロック内の気圧応答.....	201
○長田 昌彦(埼玉大学大学院), 大沢 光司, クリスティーナ・プツリ(埼玉大学), 野澤 海人(元埼玉大学)	

〔 土木地質 〕

P5 山岳トンネルにおける地質調査の留意点 (断層破碎帯) .....	203
○阿部 徳和(日本工営), 土木地質研究部会課題事例分析ワーキング	
P6 山岳トンネルにおける地質調査の留意点 (地すべり地帯) .....	205
○永井 誠二(日本国土開発), 土木地質研究部会課題事例分析ワーキング	
P7 X線CT画像解析と鉱物同定による堆積岩中の変形・破碎組織の定量的検討.....	207
○濱田 藍, 大山 隆弘, 田中 姿郎(電力中央研究所)	
P8 山岳トンネルの地質・地盤リスクに関する基礎的研究: 地形・地質と支保パターンの相関性検討 (予察) .....	209
○荒谷 忠, 品川 俊介(土木研究所)	

〔 地形地質一般 〕

P9 第四紀テフラの U-Th-Pb 年代測定 (その 8): 近畿のテフラへの適用 .....	211
○伊藤 久敏(電力中央研究所)	
P10 島尻層群泥岩における粘土鉱物・黄鉄鉱の形成.....	213
○鈴木 茂之(岡山大学), 木村 隆行, 後根 裕樹, 嶋 将志, 石川 敦代(エイト日本技術開発), 伊佐 真幸, 備瀬 知康, 安里 隆, 中園 幸樹(内閣府沖縄総合事務局)	
P11 島尻泥岩の色彩特性と鉱物区分.....	215
○木村 隆行(エイト日本技術開発), 鈴木 茂之(岡山大学), 後根 裕樹, 嶋 将志, 石川 敦代(エイト日本技術開発), 伊佐 真幸, 備瀬 知康, 安里 隆, 中園 幸樹(内閣府沖縄総合事務局)	
P12 島尻泥岩の地すべり地帯における 100 年間の地すべり拡大傾向.....	217
○後根 裕樹, 木村 隆行, 嶋 将志, 石川 敦代(エイト日本技術開発), 鈴木 茂之(岡山大学), 伊佐 真幸, 備瀬 知康, 安里 隆, 中園 幸樹(内閣府沖縄総合事務局開発建設部 河川課)	
P13 六甲山地における表層土層厚と地形量の関係の一考察.....	219
○小寺 凌, 梶山 敦司, 浅井 健一(土木研究所)	
P14 火山層序と火口移動の検討 —那須火山群南月山火山の調査例—.....	221
○杉山 直也(J-POWER 設計コンサルタント), 田中 学, 八代 正和(電源開発), 荒井 融(地圏科学研究所), 池田 正道(J-POWER 設計コンサルタント)	
P15 シュードタキライト形成温度の測定の試み—熱重量示差熱同時測定によるアプローチ .....	223
○二馬 大海, 竹村 貴人, 水越 雄太, 藤森 裕基, 野口 真理子(日本大学大学院)	
P16 紀伊半島東部北山川流域の付加体山地斜面に認められる遷急線の地質制約.....	225
○栗田 将一(太洋エンジニアリング), 木村 克己, 金子 誠(深田地質研究所), 菊地 輝行, 杉山 直也(J-POWER 設計コンサルタント)	
P17 地盤情報データベースを用いて復元した構造運動像と 3 次元地質構造: 大阪平野の表層地質の例.....	227
○櫻井 皆生(ハイテック)	
P18 長野県上高地大正池の水質形成と褐色沈殿物の成因について.....	229
○伊藤 由紀, 大山 隆弘, 田中 姿郎, 平野 伸一, 足立 佳子(電力中央研究所)	
P19 (欠)	
P20 日本全国の数値標高モデルを用いた谷の抽出結果.....	231
○平田 康人(電力中央研究所)	
P21 アナログ実験による縦ずれ断層で形成される副断層に関する基礎的検討.....	233
○井上 直人, 北田 奈緒子(地域地盤環境研究所), 渡辺 高志, 登柳 正夫(構造計画研究所), 渋谷 典幸, 小俣 雅志(パスコ)	

〔 地下水 〕

P22	多変量解析による羊蹄火山麓地下水の分類と水質形成モデルの推定.....	235
	○太田 岳洋(山口大学大学院), 久保 佑佳(山口大学, 現: アサノ大成基礎エンジニアリング), 川上 千尋(山口県環境保健センター, 現: 山口県環境政策課), 金子 伸生(鉄道・運輸機構北海道新幹線建設局)	
P23	トンネル施工に伴う地下水流動変化予測結果の一考察.....	237
	○風見 健太郎, 原 伸匡, 澤田 弦一郎(エイト日本技術開発)	
〔 環境地質 〕		
P24	地表の水銀蒸気の挙動に着目した水銀探査法の提案.....	239
	○板井 秀典(ジオクロノロジージャパン), 野田 徹郎(産業技術総合研究所)	
P25	トンネル掘削ずりを封じ込めた盛土内を想定した溶出試験方法に関する一考察.....	241
	○田本 修一, 山崎 秀策, 川又 基人, 倉橋 稔幸(土木研究所寒地土木研究所), 昆 周作, 品川 俊介(土木研究所)	
P26	濁水解析による伏流水取水施設の原水濁度の現況再現.....	243
	○西山 浩平, 松浦 祐樹, 山本 晃(八千代エンジニアリング), 渡邊 修(水文企画), 鷺見 浩司, 吉川 修一, 原 昌成(八千代エンジニアリング)	
〔 測量・計測 〕		
P27	福島県沖地震に伴う薬師堂石仏の劣化とその評価.....	245
	○朽津 信明, 白石 明香(東京文化財研究所)	
〔 災害地質 〕		
P28	衛星干渉 SAR 解析による静岡県内の地すべり調査.....	247
	○杉本 惇, 下村 博之, 柴山 卓史(パスコ), 杉本 敏彦, 芹澤 啓, 大石 理智, 木ノ内 楨(静岡県)	
P29	道路に接する斜面上の転石等の安定性評価事例.....	249
	○西川 大亮, 五反田 光彦(パスコ), 向井 淳, 上山 暁一(神戸市), 土佐 信一(国土防災技術)	
P30	竹林斜面における土層強度検査棒による表層厚さの空間分布.....	251
	○鶴澤 貴文(環境地質), 竹村 貴人, 谷 野々香(日本大学), 稲垣 秀輝(環境地質)	
P31	QGIS を用いた表層崩壊危険度評価ソフトウェアの開発.....	253
	金澤 瑛, 木下 篤彦, 中谷 洋明(国土技術政策総合研究所), 山本 武文, ○土屋 絵菜, 佐々木 達哉(応用地質)	
〔 社会貢献 〕		
P32	防災まち歩きにおける地域住民の地図活用に関する検討	
	○野々村 敦子(香川大学), 高尾 則光, 佐藤 豊(富熊校区コミュニティ協議会) .....	255

# 1. 比抵抗モニタリングによる斜面崩壊警報システムの開発

Development of Slope Failure Alert System using Resistivity Monitoring

○上原大二郎・王寺秀介（中央開発株式会社），上田匠・奥田至門（早稲田大学理工学術院）

Daijiro Uehara, Shusuke Oji, Takumi Ueda and Shimon Yoda

## 1. はじめに

地盤の比抵抗は間隙水の飽和度に敏感な物性であり，これを常時モニタリングすることができれば，斜面崩壊警報システムの指標として利用可能であると考えられる．比抵抗 2 次元探査を用いて降雨前後の地盤の比抵抗を比較する調査・研究は数多く実施されているが，同手法は地下の比抵抗分布を高解像度で可視化できるものの，大掛かりな測定装置や電源を必要とし，測定や解析に多大な時間を要することから，常時モニタリングとしての利用は難しい．

そこで筆者らは，斜面崩壊警報システムとしての利用を前提として，高密度測定や高次元解析を行わない比抵抗モニタリング装置の開発を進めている．

## 2. 「逆」シュランベルジャー法による比抵抗モニタリング装置

比抵抗モニタリングによる斜面崩壊警報システムに求められるものは，高解像度可視化ではなく，地下水位や間隙水飽和度に関連する比抵抗の変化を検知することである．したがって筆者らの装置は，(1)高頻度で比抵抗構造の解析結果が得られること，(2)電源を含めて小型の装置であること，(3)遠隔操作が可能であることの 3 点をコンセプトとしている．

このうち(1)と(2)は比抵抗 2 次元探査では達成困難であり，原理的に今後も飛躍的な向上は期待できない．一方，目的を異常の検知に特化すれば，モニタリング地点の地下構造を斜面と平行な層構造と仮定する比抵抗法 1 次元探査，1 次元解析で十分と考えられる．

一般的に比抵抗法 1 次元探査ではシュランベルジャー法が用いられるが，電流電極の間隔を変えながら，その中心における電位勾配を測定するため，測定器に電極切替装置が必要となり，大型になる．また，測定時間が長く，消費電力も大きくなる．そのため，本システムでは，電極系の中心で電流を流し，その外側で電位差を測定する「逆」シュランベルジャー法を採用した．この方法では，多チャンネルの測定装置を使用し，一度の通電で複数の電位電極での同時測定が可能である．なお，電気探査では相反則が成り立つため，電位電極と電流電極を入れ替えるシュランベルジャー法と逆シュランベルジャー法は理論的に等価である．

地下水位や飽和度のモニタリング手法として，水位観測孔や土壌水分率計などがあるが，これらは原位置（点）での測定であるため，仮にその観測点が周囲の

変化を代表しない点であった場合，異常の検出は遅くなる可能性がある．電気探査の場合，電極系の周辺に高感度領域が広く分布するため，地下水の挙動に局所性があつたとしても，周辺の平均的な比抵抗構造を捉えることができる．また，電気探査は十数 cm の電極を挿すだけの非破壊手法であり，機器埋設のためのボーリング孔などを必要としないというメリットもある．

## 3. 降雨浸透過程のモデル化と電気探査のシミュレーション

谷田ほか<sup>1)</sup>の鉛直一次浸透試験を参考にし，図-1 のような降雨浸透過程を考える．すなわち，浸透する雨水により飽和度が一定な湿潤帯が形成され，それが地表から下方に向かって拡大，湿潤帯の下面が基盤に達すると，飽和帯が形成されて地下水位が上昇する．

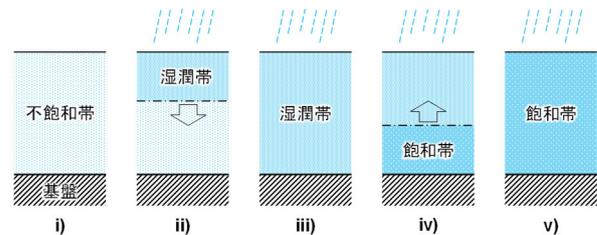


図-1 降雨の浸透から地下水位上昇までのモデル  
i)~v)は時間経過に相当

地盤の比抵抗  $\rho$  は，間隙水の比抵抗  $\rho_w$ ，間隙率  $\phi$ ，飽和度  $S$  を用いて下記のアーチーの式で表される．

$$\rho = F\rho_w, F = a\phi^{-m}S^{-n}$$

ここで  $a, m, n$  は地盤に固有の定数で， $a=0.5\sim 2.5$ ， $m=1.3\sim 2.5$ ， $n=2$  程度になることが知られている．降雨による比抵抗変化を考える場合，地盤の間隙率や間隙水の比抵抗は変化しないと考えることができるので，地盤の比抵抗は飽和度のマイナス 2 乗に比例する．

小杉ほか<sup>2)</sup>の電気探査結果は，乾燥状態の土層と基盤では，前者の方が高比抵抗であることを示している．それぞれの比抵抗を  $2,000\Omega\text{m}$  と  $1,000\Omega\text{m}$  とし，土層各相の間隙水飽和度を，乾燥状態（不飽和帯）で 30%，湿潤帯で 60%，飽和帯（帯水層）で 90% と仮定すると，湿潤状態および飽和帯の比抵抗は前述アーチーの式からそれぞれ  $500\Omega\text{m}$ ， $222\Omega\text{m}$  と求まる．

斜面と平行な多層構造における電気探査は，座標を回転させることで水平多層構造と等価であることから，理論応答は円筒座標系の Poisson 方程式で計算することができる．筆者らは地下も含めた任意の 3 次元電極配置に対応した 1 次元構造のインバージョン解析コー

ドを開発した<sup>3)</sup>。数値実験は、土層の厚さを2.5mとし、逆シュランベルジャー法（電流電極間隔 AB/2=0.25m, 印加電流 50mA, 電位電極間隔 MN/2=0.75~12m）の電位差（単位:mV）を理論計算し、これに標準偏差 0.2mV（最大 2%程度に相当）となるランダムノイズを加えて、見掛比抵抗に換算したものを模擬観測値とした。

インバージョンはマルカート法を採用し、層数は 3 に固定し、各層の層厚と比抵抗をパラメータとして求める。初期比抵抗は各層とも 100Ωm とした。図-1 の iii)および iv)（ただし、飽和帯の厚さが土層の 20%, 40%, 60%）について、上述の模擬観測値をインバージョン解析して得られた比抵抗構造を図-2 に示す。

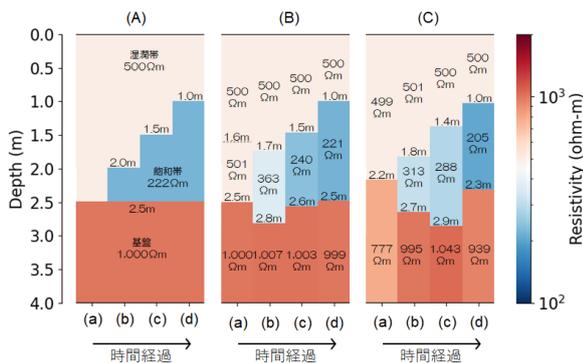


図-2 模擬観測値のインバージョン解析結果。(A)真の比抵抗構造, (B)理論計算値を模擬観測値としたときの解析結果, (C)ノイズを加えた模擬観測値の解析結果。それぞれの(a)~(d)は湿潤帯が基盤まで達したあとの地下水位上昇の過程に相当。

この結果から、飽和帯が形成されて、土層の下部 40% を占めるまでになると ((c)のタイミング)、低比抵抗層の上面として地下水位をほぼ正確に捕捉できることがわかる。電気探査では相似則が成り立つことから、土層の厚さに応じて電極間隔を調整することにより、この「40%則」は土層の厚さによらず成り立つ。

なお、比抵抗のコントラストが小さく、かつ層厚が過大になっているものは、等価層の問題と考えられ、解析方法における課題である。

#### 4. 斜面崩壊警報システムとしての適用性

図-3 のような無限長斜面の土層と基盤の境界で崩壊が発生すると想定し、斜面の安全率  $F_s$  を抵抗力  $T$  とせん断応力  $W_t$  の比で定義する<sup>4)</sup>。このとき、土粒子密度、間隙率、粘着力、内部摩擦角を与件とすれば、安全率  $F_s$  は土層深度、水深、斜面傾斜角をパラメータとして求めることができる。

$$F_s = T/W_t$$

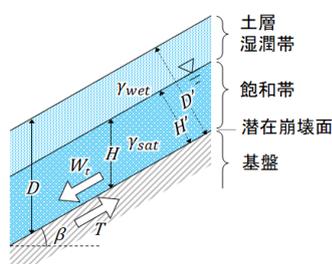


図-3 無限長斜面のせん断応力と抵抗力

安全率  $F_s$  は土層深度、水深、斜面傾斜角をパラメータとして求めることができる。

$$= \frac{\{(D-H)\gamma_{wet} + H(\gamma_{sat} - \gamma_w)\} \cos^2 \beta \tan \phi + c}{\{(D-H)\gamma_{wet} + H\gamma_{sat}\} \cos \beta \sin \beta}$$

$H$ : 水深	$\phi$ : 内部摩擦角
$c$ : 粘着力	$\gamma_{wet}$ : 湿潤帯の単位体積重量
$D$ : 土層深度	$\gamma_{sat}$ : 飽和帯の単位体積重量
$\beta$ : 斜面傾斜角	$\gamma_w$ : 水の単位体積重量

地下水位を捕捉できるタイミング、すなわち土層の下部 40%が飽和帯になったときの安全率を図-4 に示す。ここでは、電気探査のシミュレーションと対比するため、土層深度の代わりに土層厚  $D'$  (斜面に垂直な方向)

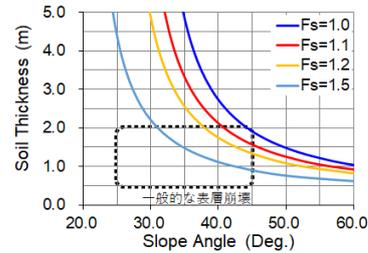


図-4 地下水位捕捉時の安全率 各地の花崗岩類起源のまき土に関する地盤特性値の集計から、土粒子密度 2.66g/cm<sup>3</sup>, 間隙率 45.3%, 粘着力 10.7kN/m<sup>2</sup>, 内部摩擦角 35.1 度を与件とした。

をパラメータとした。一般的な表層崩壊は斜面の傾斜角度 25~45 度、土層の厚さ 0.5~2.0m で生じるとされている。図-4 より、そのほとんどは地下水位捕捉時の安全率が 1.1 以上であり、斜面が崩壊する前に警報を发出することが可能と考えられる。

#### 5. 装置の開発と今後の展望

現在製作中の装置は、363×282×120mm の防水ケースに格納され、バッテリーとモデムを内蔵し、重量約 5kg である。一度の通電で 10 深度（電位電極 10 組）の逆シュランベルジャー測定ができる。測定間隔は可変で、5分から 24 時間の範囲で遠隔操作により設定可能である。測定データはサーバに転送され、サーバ上でインバージョン解析が行われる。一回当たりの解析時間は 10 秒程度であるため、測定から比抵抗構造を得るまでほとんどタイムラグはない。バッテリーはフル充電状態から 24 時間は無給電で測定可能な容量である。装置の完成後はフィールド試験でデータを蓄積し、危険度評価の基準の検討を行う。

なお、本件開発については特許出願中（特願 2021-151280）である。

#### 文献

- 1) 谷田ほか (2009) : 降雨による表層崩壊の発生時間予測のための鉛直次元浸透調査, 日本応用地質学会中国四国支部平成 28 年度研究発表会, pp.1-6.
- 2) 小杉ほか (2012) : 降雨による山体地下水の水位変動について, 京都大学防災研究所特定研究集会「深層崩壊の実態, 予測, 対応」, pp.56-63.
- 3) 與田ほか (2022) : Python を用いた水平多層構造・3D 任意電極配置に対応した電位応答解析手法, 物理探査学会第 146 回学術講演会論文集, pp.19-22.
- 4) 佐々 (1992) : “斜面崩壊の力学”, 砂防学講座第 3 巻 斜面の土砂移動現象, 山海堂, pp.109-132.

## 2. 風化・崩壊様式を規制する断裂構造

Fracture Structures that Regulate Weathering and Collapse

○吉村辰朗（第一復建），照井 剛（第一復建）

Tatsuro Yoshimura, Takeshi Terui

### 1. はじめに

近年「記録的な大雨」が毎年のように降り、豪雨による斜面崩壊もどこかで発生し、これによる社会的損失は計り知れない。従来、同じような地形・地質であっても崩壊する斜面としない斜面があり、崩壊発生危険箇所の予測を困難にしてきた。斜面崩壊では特徴的な「断裂構造」が見られる。今回は、斜面崩壊に関わる「断裂構造」と風化・崩壊様式の対応を述べ、断裂群の違いに留意した斜面崩壊危険度評価について考察した。

### 2. 「断裂構造」を形成する断裂線の描き方

線状をなす基準地形線（稜線、河谷の谷筋）が線状模様（リニアメント）を境に屈曲している場合、このリニアメントを「断裂線」と定義する。「断裂線」を描く上でのポイントである「谷の屈曲点、尾根の屈曲点」の抽出は、「活断層の認定方法」（地形判読）の着目点と同じである。「断裂線」の方向は、断層運動が現地地形に反映されていると考えられる河川の流下方向を参考にする。

### 3. 表層崩壊と大規模崩壊における断裂群

「断裂構造」は、「岩石の破壊条件（地質）」と「応力配置（構造応力）」によって異なる。特定の造構的応力場のもとで生じた断裂の集合体を断裂群とした場合、その構成グリッドを断裂ユニットと定義する（図-1）。本章では、表層崩壊と大規模崩壊における断裂群の様相を述べる。

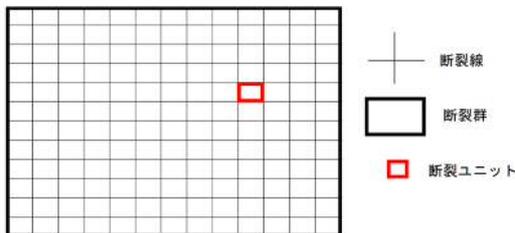


図-1 断裂群と断裂ユニット

#### (1) 表層崩壊（朝倉市）

平成 29 年 7 月九州北部豪雨によって、福岡県朝倉市では表層崩壊・土石流が多発した。基盤岩は花崗閃緑岩で、風化しマサとなっている。豪雨による表層崩壊・土石流によって発生した土砂の流出箇所を黒色で

明示したのが図-6（左）である。図-6（右）は断裂分布図である。断裂ユニットの規模が大きい区域（断裂が少ない区域）では、豪雨による土砂流出はほとんど見られなかった。



図-2 表層崩壊と土石流による土砂流出箇所図(左)と断裂分布図(右)

#### (2) 大規模崩壊（大隅半島）

調査区間は、佐多伊座敷から南大隅町大浜の国道 265 号沿いである（図-3，左上）。調査地に分布する基盤岩は、新第三紀の花崗岩類で大隅花崗岩と称される。断層密度に留意して、調査地域の断裂線を描いたのが図-8 である。図-3 より、3 区間では分布地質は花崗岩で同じであるが、断裂の走向が異なり、断裂群は異なることが判明した。断裂ユニットの規模は、「亀裂が多い区間(Ⅲ)」より「大規模崩壊が見られた区間(Ⅰ)」のほうが大きい結果が得られた。

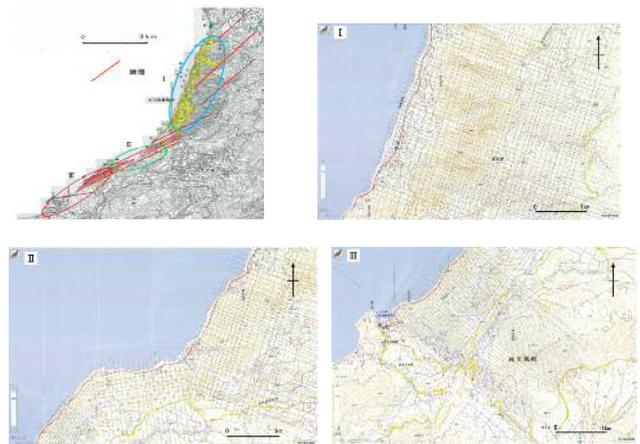


図-3 断層分布図(左上)と断層密度が異なる地域の断裂分布図(下)

### 4. 風化・崩壊様式を規制する断裂構造

3 章の崩壊事例に示した断裂群の特性は、断裂群の方向性と断裂ユニットの規模によって異なっている。ここでは、断裂群の捉え方に応じて、風化・崩壊様式に差異が生じる現象について検討した。

(1) 小区域を調査対象とした場合 (単一断裂群)

朝倉市の調査範囲は小区域 (単一断裂群) であるため、断裂群の方向性や面の性質は共通しているものと考えられ<sup>1)</sup>、図-4に示す風化様式となる。図-4より、一般に考えられている「亀裂の多いほうが風化しやすく、亀裂が少ないほうが風化しにくい」が成り立ち、断裂 (割れ目) が多いほど風化がすすみ斜面崩壊が増加すると考えられる。

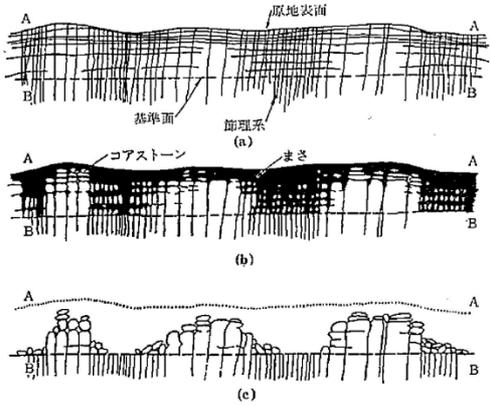


図-4 Dartmoor 風化進行と浸食による地形変化<sup>2)</sup>

(2) 大区域を調査対象とした場合 (複合断裂群)

大隅半島の調査範囲は大区域で、異なる断裂群が隣接する「複合断裂群」地域である。本項では、「断裂幅の関係式より導かれる風化様式」と断裂ユニットとの対応より、断裂ユニットの規模が風化・崩壊様式に影響することを示す。

(断裂幅の関係式より導かれる風化様式)<sup>3)</sup>

断裂幅(FW)と断層数(N)には下記のべき乗関係式が認められる。

$$N=150 \cdot w^{-1.73}, \quad w=(FW+1)/3 \dots \dots \dots \textcircled{1}$$

断裂幅[FW(m)]と断層長[L(km)]には下式の関係が認められる。

$$L=0.36FW+0.62 \dots \dots \dots \textcircled{2}$$

上記の2式より、「断層密度が低い (断裂ユニットの規模が大きい) ほど、地下深部まで破断面が分布することによって厚層風化帯を形成しやすくなり大規模崩壊が発生しやすい」と考えられる。断裂ユニット規模・亀裂数と風化帯形成の関係を図-5にまとめた。

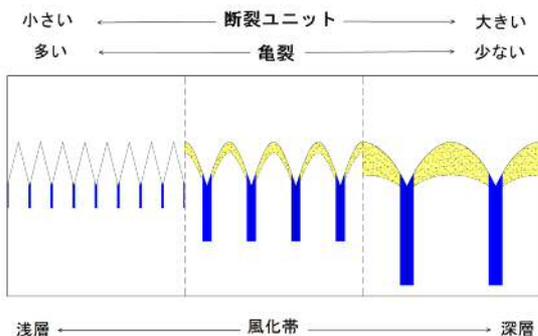


図-5 断裂ユニット規模・亀裂数と風化帯形成の対応

以上のように、断裂ユニットの規模が風化・崩壊様式に影響することから、調査地域が単一断裂群か複合断裂群かの判別が斜面崩壊危険度評価において重要となる。分布地質は同じであるが、断裂の走向が異なる複合断裂群における「風化進行と浸食による地形変化様式のモデル」を図-6に示す。

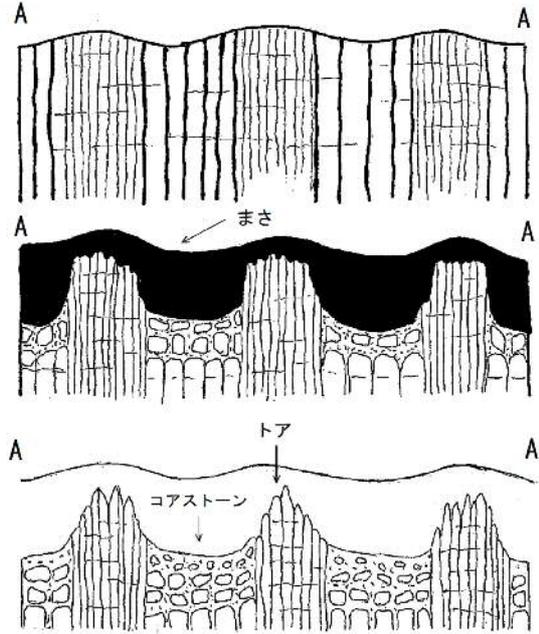


図-6 複合断裂群での風化進行と浸食による地形変化様式のモデル図

5. まとめ

従来、同じような地形・地質であっても崩壊する斜面としない斜面があり、崩壊発生危険箇所の予測を困難にしてきた。斜面崩壊では特徴的な「断裂構造」が見られる。「断裂構造」は、「岩石の破壊条件 (地質)」と「応力配置 (構造応力)」によって異なる。特定の造構的応力場のもとで生じた断裂の集合体を断裂群とした場合、風化・崩壊様式は断裂ユニットの規模が影響することから、調査地域が単一断裂群か複合断裂群かの判別が斜面崩壊危険度評価において重要となる。この状況から、「災害発生場所の予測」には従来の地形・地質調査に「断裂 (地質構造)」を調査項目に加える必要があり、断裂構造に関する構造地質学上の知識を斜面崩壊と関連づけて検討することが重要である。

文献

- 1) 垣見俊弘(1968)：断裂系の調査と第四紀テクトニクス，第四紀研究，Vol.7，No.4，pp.212-216.
- 2) 土質工学会編(1979)：風化花崗岩とまさ土の工学的性質とその応用，pp.13.
- 3) 吉村辰朗・縄田徳広・古城輝夫(2017)：断層分布と大規模崩壊の関連性，地形，Vol.38，No.3，pp. 235-248.

### 3. 火山体周辺の大規模地すべりの変動メカニズムについて

Mechanism of large landslides around volcanoes

○柴崎達也 (国土防災技術)

Tatsuya Shibasaki

#### 1. はじめに

斜面変動の誘因の多くは降雨・融雪であり、地震が影響する場合もある。低頻度ではあるが、火山体の山体崩壊のメカニズムについては、水蒸気爆発による山体の飛散や、地震動や熱水活動の影響など、過去の個々の災害で多くの論争がある。最近筆者らが取り組んできた実験により、スメクタイトを含むような高塑性粘土は、急激な温度上昇を受けると強度低下する挙動を確認している(柴崎, 2021, 柴崎ほか, 2022)。例えば、東北地方の火山周辺には大規模な地すべり地形が多く、かつて山体崩壊を起こした鳥海山や、巨大な地すべり地形が分布する八幡平火山の基盤には泥質岩が分布している。本発表では、このような火山体周辺の大規模な斜面変動場において、スメクタイトを含むような透水性の低い泥質岩や変質岩が急激な火山活動によって熱圧化することに加え、火山活動の鎮静化などによって地温が長期的に漸減することも巨大斜面の不安定化に影響を及ぼしている可能性を指摘したい。

#### 2. スメクタイトを含む粘土の熱圧化による強度低下と残留強度の温度依存性

スメクタイトに富む粘土の残留強度は温度に敏感で、低歪速度の排水条件では低温ほど強度低下する(柴崎・山崎, 2010, Shibasaki et al., 2017)。この温度に依存するスメクタイト含有粘土の特異なレオロジー特性が、寒候期に発生する浅い地すべりの不安定化要因になる可能性が指摘されている(Shibasaki et al., 2016)。また、斜面崩壊や地すべりのすべり面強度に及ぼす温度の影響について視野を広げていくと、火山体周辺のいわゆる温泉地すべりなどでは、すべり面付近が高温環境にあることが注目される。八幡平の澄川地すべり、箱根の大涌谷地すべり、草津白根山の万座地すべりなどでの調査報告によれば、基盤地質が広く熱水変質作用を受け、スメクタイト化が進んでいる。火山活動の消長に伴い、すべり面の温度環境が長期～短期で変動することが、斜面変動に影響を及ぼす可能性もある。

図-1は、Ca ベントナイト (WL=166.5, IP=120.0) を用いて、リングせん断試験を実施中に、せん断箱水槽に貯めた水を熱媒体として急激に試料に温度上昇を与えた実験結果である(柴崎, 2021)。垂直応力は640kPaとし、室温で0.02mm/minの低速で定常せん断状態を確認後、70~80℃に急激な温度上昇を与えた。

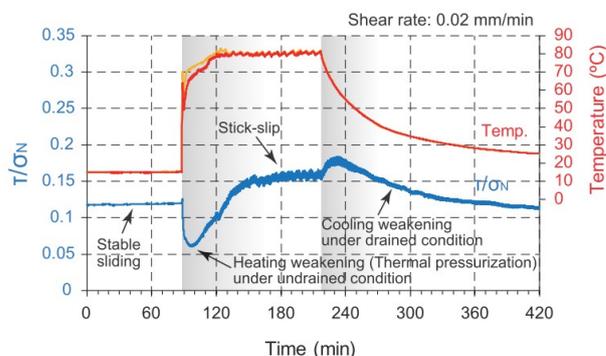


図-1 Ca ベントナイトの残留せん断状態における急激な加熱実験の結果(柴崎, 2021に追記)

急激な温度上昇に伴い、一気にせん断強度が低下し、徐々に強度回復する挙動が確認された。飽和した粘土の土粒子と間隙水の2相を比較すると、鉱物などの固体粒子よりも水の膨張率は非常に大きい。粘土が急激な温度上昇を受けると、間隙水の熱膨張によって過剰間隙水圧が発生し、せん断強度が一時的に低下したと考えられる。せん断箱は排水を許す構造となっていることから、その後間隙水の排水が進んで強度が回復したと考えられる。排水条件では先述した先行研究の結果同様、室温に比べ高温下でのせん断強度が大きくなる。以上の実験より、スメクタイトを含む粘土の残留強度状態では、①非排水条件での急激な温度上昇、②排水条件での緩やかな温度低下、がせん断強度低下に影響する。以上の知見が、斜面の不安定化機構を考える上で重要と考える。

#### 3. 火山体の斜面変動メカニズムに関する議論

##### 3.1. すべり面の熱圧化による山体崩壊

日本における火山体の大規模崩壊・岩屑なだれは60年に1回程度の発生頻度と言われている(井口, 2006)。その発生要因として、火山爆発、地震動、熱水の影響などが議論されてきた。1792年の雲仙眉山の山体崩壊、1997年5月の八幡平澄川地すべりでは、地すべり発生後に水蒸気噴火が発生している。斜面移動によって封圧が除荷されることで水蒸気噴火が発生する場合もあることから、水蒸気噴火は斜面変動の誘因ではないこともある(大場, 2011)。澄川地すべりでは、崩壊発生の前年から噴気・噴湯の活発化があり、1か月前に源泉の山手側斜面の膨張が確認されていたとの報告がある(窪田, 2003)。また、2000年の有珠山の噴火では、

周辺で地下水の自噴現象や水位の上昇が確認されており、西麓斜面で軟弱地盤が地すべりのために斜面下方に滑動した事例が報告されている（廣瀬・田近, 2002）。地表からの融雪水供給による地盤内の間隙水圧上昇や、基盤側からの地下水（熱水）供給による間隙水圧上昇に加え、原位置での地温上昇による熱圧化もすべり面強度の低下に複合的に影響した可能性が考えられる。

1888年の磐梯山の山体崩壊は、熱水活動による山体の熱圧化を誘因としたことが議論されている（Reid, 2004）。崩壊地内のボーリング調査より、スメクタイトを含む凝灰岩層がすべり面を形成したことが報告されている（田中ほか, 1995）。この巨大崩壊は断面的に椅子型を呈し、低角な凝灰岩層に規制された translational なすべりであったと指摘されている。底面に分布するこのスメクタイト化した凝灰岩層が火山活動によって熱圧化した可能性が考えられる（柴崎ほか, 2022）。紀元前 466 年に山体崩壊を起こした鳥海山では、基盤の新第三系海成泥岩と火山岩との地層境界付近で大規模なすべりを生じた可能性が高い（加藤, 1978）。この第三系が分布する鳥海山の北側に位置する丘陵地では地すべり地形が密集しており、スメクタイトを含んだ地層である可能性が高い。鳥海山の基盤をなす粘土化した泥質岩や変質岩の熱圧化が山体崩壊の誘因として指摘できる。

東北地方の八幡平、吾妻山などでは、山麓の広大な緩斜面に巨大な地すべり地形を抱えている。大八木・池田（1998）は、八幡平東部の巨大地すべりのすべり面は、古いカルデラ内に堆積した湖成堆積物に形成されていると考察している。地熱開発促進調査で実施された大深度ボーリングによる調査孔での温度検層によれば、地すべり地内は、火山活動の影響を受けて高い地温環境にある。粘土・シルト主体の湖成堆積物が急激な温度上昇を受けることで巨大地すべりが発生した可能性が考えられる。吾妻山の荒川上流にも巨大地すべり地形が分布し、末端の土湯温泉の河川沿いには新第三系の堆積岩が露岩し、高温の温泉湧出がある。過去の火山活動による熱圧化現象が巨大地すべり発生に影響した可能性を推察する。また、近隣の安達太良山でも、沼ノ平爆裂火口の火口壁に地すべり地形や線状凹地などの斜面変動が確認される。火口深部では熱水活動が推定されており（山本ほか, 2008）、熱圧化現象の関与が示唆される。

### 3.2. 火山体の冷却と大規模地すべり

火山の寿命はマグマ溜りの規模などから一般に数万～数十万と推定されており、多くの火山が 60～50 万年以下とされている。そして、火山活動は活動期や静穏期を繰り返す。先述した先行研究によると、スメクタイトに富む粘土の残留強度は、排水条件では低温ほど強度低下する。つまり、火山活動の静穏期や鎮静

化によって火山体の冷却が緩やかに進むと、スメクタイトに富むすべり面粘土を持つ地すべりは、不安定化しやすくなることが予想される。約 30 万年前の最後の噴火から時間経過した山形県の月山周辺には巨大な地すべり地形が数多く分布しており、山体の冷却化とも関係している可能性はないであろうか。また、平野部での深さ数百 m までの地下地温は、過去数百年間の地表面の温度変化の影響を受けるとされる（内田・佐倉, 2007）。熱圧化による強度低下は急激で強度低下幅も甚大であることから、岩屑なだれなどの高速長距離移動を伴う大災害につながりやすそうである。一方、冷却に伴う強度低下は長期的に緩慢に進行すると考えられる。地すべり移動の積極的な誘因としては降雨・融雪に伴う間隙水圧上昇が強く影響すると推察されるが、氷期・間氷期サイクルを含めた長期の気候変動が深層地温に影響を与え、寒冷期の地すべり発生のポテンシャル増加に影響しているかもしれない。

以上のように、火山体の崩壊機構や周辺の巨大地すべりの地形発達などを考える上で、火山活動や気候変動を含め、地質時間スケールでの地温環境の変化にも目を向けていく必要があることを指摘したい。

### 文献

- 1) 柴崎（2021）：第 60 回日本地すべり学会研究発表会講演集, 14-15
- 2) 柴崎・山田・井口（2022）：第 61 回日本地すべり学会研究発表会講演集, 投稿中
- 3) 柴崎・山崎（2010）：日本地すべり学会誌, 47, 5, 255-264
- 4) Shibasaki et al. (2017): Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 122, 2, 1449-1469
- 5) Shibasaki et al. (2016): Geophysical Research Letters, 43, 13, 6975-6984
- 6) 井口（2006）：日本地すべり学会誌, 42, 5, 29-40
- 7) 大場（2011）：地質学雑誌, 117, 6, 344-356
- 8) 窪田（2003）：日本地すべり学会誌, 40, 1, 84-87
- 9) 廣瀬・田近（2002）：火山, 47, 5, 571-586
- 10) Reid M.E. (2004) : Geology, 32, 5, 373-376
- 11) 田中ほか（1995）：磐梯火山－防災研究の進展に向けて－, 69-78
- 12) 加藤（1978）：日本地質学会学術大会講演要旨, 271
- 13) 大八木・池田（1998）：地すべり, 35, 2, 1-10
- 14) 山本・高木・福井・大和田（2008）：気象研究所研究報告, 59, 39-64
- 15) 内田・佐倉（2007）：日本水文科学会誌, 37, 4, 253-269

## 4. 礼文島北部高山における周氷河性斜面堆積物の地質工学的性質

Geotechnical Property of Periglacial Slope Deposit at Takayama Area within Northern Rebun Island

○吉野恒平, 坂本尚弘, 川又基人, 倉橋稔幸 (土木研究所寒地土木研究所)  
Kohei Yoshino, Naohiro Sakamoto, Moto Kawamata, Toshiyuki Kurahashi

### 1. はじめに

北海道では、最終氷期に形成された周氷河性斜面が広く分布する。これらは角礫まじりの未固結砂層（周氷河性斜面堆積物）から構成されることが多い。

近年の気候温暖化の影響によって全国的に大雨の発生頻度が増加し、これまで被災することが少なかった北海道の周氷河性斜面においても斜面災害が発生している。例えば、周氷河性斜面堆積物が厚く分布する礼文島において、2014年8月24日に豪雨に伴う地すべり性崩壊が発生し、民家が被災した<sup>1)</sup>。今後、周氷河性斜面における災害に対して適切な防災対策の確立が求められる。

それには、周氷河性斜面堆積物の崩壊メカニズムを解明する必要がある。その上で、周氷河性斜面堆積物の地質工学的性質はそのヒントになり得る。

そこで本報告では、礼文島北部においてPS検層、孔径検層、密度検層を実施し、周氷河性斜面堆積物等のP波速度及びS波速度、密度を測定し、ポアソン比( $\nu$ )、剛性率( $G_d$ )、ヤング率( $E_d$ )を算出した。さらに、P波速度について既存研究の沖積層の物性値と比較した。

### 2. 調査方法

本報告では、2021年に地方独立行政法人北海道立総合研究機構産業技術環境研究本部エネルギー・環境・地質研究所が礼文島北部高山で掘削したボーリング孔<sup>1)</sup>を利用した(図-1)。



図-1 礼文島における調査位置

ボーリングの掘削径は86mmであり、深度0.00~0.05mに表土、深度0.05~21.40mに周氷河性斜面堆積物と礫を主体とする段丘堆積物、そして深度21.40~23.48mに基盤岩のドレライトが確認された。周氷河性斜面堆積物と段丘堆積物は指交関係であった。また、検層実施時の地下水位は深度9.60mであった。ただし、孔壁の大部分が未固結であったため、ボーリング孔に塩ビ管を挿入して各検層を行った。

本報告ではPS検層としてダウンホール法で実施し、深度0.00~23.00mにかけて1.00m間隔で起震・受振した。孔径検層では孔径変化、密度検層では<sup>60</sup>Cを使用し、ガンマー線の1秒間のカウント数を5cm間隔で記録した。PS検層結果を整理する際、起震点で発生したP波及びS波が受振点に到達するまでの時間を読み取り、受振点深度を縦軸に初動到達時間を横軸にとってプロットし、走時曲線を作成した。走時曲線から各傾斜区間のP波速度( $V_p$ )、S波速度( $V_s$ )を算出した。また、密度検層結果を整理する際、現地計測した孔径とガンマー線のカウント数から密度に換算した。その上で各傾斜区間の平均密度( $\rho$ )を求めた。続いて $\nu$ 、 $G_d$ 、 $E_d$ を算出した。また、P波速度については周氷河性斜面堆積物と沖積層の従来の物性値と比較した。

### 3. 検層結果

PS検層を実施した結果、 $V_p$ は320~2,240m/s、 $V_s$ は170~1,010m/sであった。走時曲線の傾きの変化から8区間に区分することができた(図-2)。主に周氷河性斜面堆積物に相当する深度2.00~18.90mでは、 $V_p$ は460~1,520m/s、 $V_s$ は230~460m/sであった。大局的には深度が深くなるにつれて $V_p$ と $V_s$ が速くなる傾向を示した。ただし、深度8.00~13.30mと深度16.50~18.90mでは上位区間よりも遅くなった。

塩ビ管を挿入して孔径検層を実施したため、孔径は67.3~68.0mmと大きな変化は見られなかった。

密度については1.15~2.89g/cm<sup>3</sup>を示した。周氷河性斜面堆積物中では1.17~2.12を示し、値の増減が確認された。18.50m以深から増加傾向となり、最下位の23.00mで最大値である2.89g/cm<sup>3</sup>を示した。走時曲線の傾きから区分された8区間において $\rho$ を算出した。

### 4. 物性値の算出

計測した $V_p$ 、 $V_s$ 、 $\rho$ から $\nu$ 、 $G_d$ 、 $E_d$ を算出した(図-2)。 $\nu$ は0.303~0.466を示した。次に $G_d$ を算出した結果、37.9~2,830MN/m<sup>2</sup>を示した。深度2.00~18.90mでは大局的には深度が深くなるにつれて $G_d$ が大きくなる傾向を示した。しかしながら、深度8.00~13.30mと深度16.50~18.90mは上位区間よりも $G_d$ が小さくなることを確認された。続いて、 $E_d$ は98.7~7,760MN/m<sup>2</sup>を示した。 $E_d$ も深度2.00~18.90mでは大局的には深くなるにつれて値が大きくなるが、深度8.00~13.30mと深度16.50~18.90mでは上位区間より値が小さかった。

深度 m	岩相	P波速度 (Vp) m/s		S波速度 (Vs) m/s		平均密度 ( $\rho$ ) g/cm <sup>3</sup>	ポアソン比 ( $\nu$ )	剛性率 ( $G_d$ ) MN/m <sup>2</sup>	ヤング率 ( $E_d$ ) MN/m <sup>2</sup>
		1000	2000	500	1000				
1	表土	320		170		1.31	0.303	37.9	98.7
2	周氷河性斜面堆積物	460		230		1.46	0.333	77.2	206
3									
4									
5									
6		930		460		1.70	0.338	360	963
7									
8									
9									
10									
11		650		310		1.42	0.353	136	369
12									
13									
14									
15		1520		460		1.98	0.450	419	1,210
16									
17									
18		1420		360		1.86	0.466	241	707
19									
20	周氷河性斜面堆積物及び段丘堆積物								
21									
22	ドレライト(基盤岩)	1830		620		2.16	0.435	830	2,380
23									
			2240		1010	2.77	0.372	2,830	7,760

図-2 礼文島北部高山における PS 検層結果と各種物性値

### 5. 考察

周氷河性斜面堆積物は大局的には深度が深くなるにつれて  $\rho$ ,  $G_d$ ,  $E_d$  が大きくなる傾向を示した。しかしながら、深度 8.00~13.30m と深度 16.50~18.90m では、上位区間よりも小さくなることから、変形しやすく柔らかい区間だといえる。両区間の岩相を確認した結果、砂質シルト～粗礫から成り、淘汰が悪かった。こうした砂礫層が弱層となり、斜面のすべりや崩壊を生じさせた可能性があるのかもしれない。このことを検証する上で、両区間の透水係数を確認する必要がある。

また、得られた周氷河性斜面堆積物と既存研究による沖積層<sup>2)</sup>のそれぞれの P 波速度を比較した。比較にあたり、表土及び段丘堆積物が混合する深度 0.00~2.00m と深度 18.90~21.60m を除外した。加えて地下水位から、深度 2.00~8.00m は不飽和状態の周氷河性斜面堆積物であり、一方深度 13.30~18.90m は含水状態の周氷河性斜面堆積物だと考えられる。不飽和状態の周氷河性斜面堆積物は崖錐堆積物よりも最大速度と最小速度は小さく、完全には一致しなかった(図-3)。

周氷河性斜面堆積物は岩相上の特徴から、崖錐堆積物

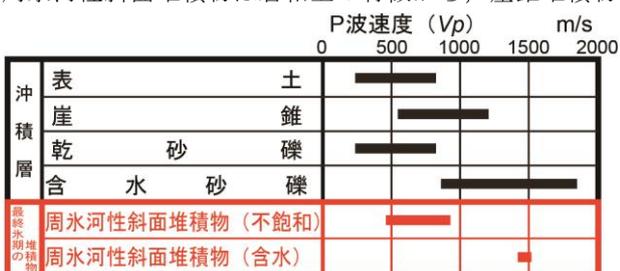


図-3 沖積層と周氷河性斜面堆積物の P 波速度 (物理探査学会 (2008)<sup>2)</sup> に加筆)

と記載されることがある。P 波速度は、地盤を構成する土質自体の粒子構成や固結度、空隙率などを反映するとされる<sup>2)</sup>。以上のことは、周氷河性斜面堆積物は崖錐堆積物と異なる地質工学的性質を持つ可能性を示唆する。今後は他地域の周氷河性斜面堆積物の P 波速度の計測結果も比較、分析する必要がある。

### 6. まとめ

礼文島北部高山において、PS 検層、孔径検層、密度検層により P 波速度及び S 波速度と密度を測定し、8 区間の  $\rho$ ,  $\nu$ ,  $G_d$ ,  $E_d$  を算出した。それらの物性値の変化から、上位よりも変形しやすく柔らかい区間が確認された。これらの区間が斜面のすべりや崩壊に関連しているのかもしれない。また、周氷河性斜面堆積物と既存研究による沖積層のそれぞれの P 波速度を比較した。不飽和状態の周氷河性斜面堆積物は崖錐堆積物よりも最大速度と最小速度は小さかった。このことは、両者は異なる地質工学的性質を持つ可能性を示唆する。

### 文献

- 1) 石丸 聡, 仁科健二, 加瀬喜洋, 小安浩理, 高見雅三, 輿水健一, 雨宮和夫 (2022): 礼文島の大雨による斜面崩壊と発生場の特徴 —2014 年, 2020 年災害の事例より—, 令和 4 年度 (公社) 日本地すべり学会北海道支部・北海道地すべり学会特別講演および研究発表会予稿集, pp.13-16.
- 2) 物理探査学会 (編) (2008): 新版 物理探査適用の手引き —土木物理探査マニュアル 2008—, 物理探査学会, 539p.

## 5. 「自然災害ラボ」における人材育成の取組み

Efforts to develop human resources in the "Natural Disaster Laboratory"

○大沼和弘, 荒尾眞成, 軍司健太, 周士統, 羅子彬, 中村美千彦 (東北大学)

Kazuhiro Onuma, Masanari Arao, Kenta Gunji, Zhou Shitong, Luo Zibin, Michihiko Nakamura (Tohoku Univ.)

### 1. はじめに

卓越大学院プログラム (WISE Program: Doctoral Program for World-leading Innovative & Smart Education) は、各大学が自身の強みを核に、これまでの大学院改革の成果を生かし、国内外の大学・研究機関・民間企業等と組織的な連携を行いつつ、世界最高水準の教育力・研究力を結集した5年一貫の博士課程学位プログラムを構築することで、あらゆるセクターを牽引する卓越した博士人材を育成するとともに、人材育成・交流及び新たな共同研究の創出が持続的に展開される卓越した拠点を形成する取り組みを推進する事業であり、文部科学省において平成30(2018)年度より開始され、現在までに30件のプログラムが採択されている。

「変動地球共生学卓越大学院プログラム」は令和元(2019)年度に採択され、幅広い研究科からなる文理融合教育、民間企業・団体や研究機関との協働による問題解決型の実習ならびに海外の学術・研究機関と連携した教育を通じて、地球から人間までをシームレスに捉える先見性、高度な知見と柔軟な思考力、コミュニケーション能力などを併せ持つ“知のプロフェッショナル”の育成に取り組んでいる。博士課程前期・後期を一貫する5年間で、多様な言語と価値観を待つ仲間とともに学び、リアルでタフな“現場”で課題解決力を鍛え、世界をフィールドに研鑽を積むことにより、一人ひとりの可能性が拓くことを目的としている。

### 2. 変動地球共生学卓越大学院プログラム

「変動地球共生学 (SyDE: Sustainability in the Dynamic Earth)」は、地球と地球環境の変動現象を統合的に理解し、そこに営む人間にとって、よりよい社会を構築し、よりよく生きる「知」を生み出す学問である。SyDEプログラムでは、地球変動現象に関する国際的に卓抜した研究実績、ならびに多くの産学官連携実績に基づき、災害発生メカニズムの知見を高め、予測技術のさらなる向上を図るとともに、社会・人間への深い理解を基に、行動する“知のプロフェッショナル”を輩出することを使命と目標に掲げている。専門力を核に、俯瞰力・コミュニケーション能力・実践力・倫理観・国際性・探求力・リーダーシップなどの多角的能力を樹枝のように伸びやかに広げる“スノークリスタル型人材”の育成を目指している。

この目的の実現のため、「仲間に学び、現場で鍛えられ、世界で磨かれる」という SyDE プログラムの3つの教育方針によって、“スノークリスタル型人材”を育成し、社会の期待と産官学の要請に応じていく計画である。SyDEプログラムのカリキュラム体系を図-1に示す。

### 3. 課題解決型研修「自然災害ラボ」

SyDEプログラムでは、参画専攻および連携企業・団体との協働により研修ラボ (Integrated-science laboratory: I-ラボ) を構成し、産学連携を意識した課題解決型研修 (Project-Based Learning) として I-ラボ研修を実施している。2021年度は9課題を設定し、I-ラボ研修を実施した。

「自然災害ラボ」は、地学や土木工学等を専攻する学生と専攻としない学生 (地学, 応用情報科学, 先端環境創成学, 土木工学より各1名) が参加し、産業技術総合研究所の協力により実施した。本研修では、「国・地方自治体などの意思決定に資する科学的情報の収集及び発信の実践」を目的として、火山噴火および地震の解析を行い、模擬報告書を作成する研修を実施した。火山噴火については、火山灰の結晶構造の観察や衛星画像の解析を通じ噴火活動の仕組みや種類、規模を見極めに努めた。また、地震については、SSE (Slow slip events) 解析を通じてスロー地震の発生位置と発生時刻を推定し、これらの結果を報告書としてまとめた。



図-1 変動地球共生学プログラムのカリキュラム<sup>2)</sup>

## 報告書の作成 Report making

### 目的：国や地方自治体等の意思決定に資する科学的情報の提供

Objective : Providing scientific information contributes to national and local government decision-making

### 作成時のポイント (Key Point)

- ・ **読み手を意識して、作成する**  
Write sentences that are conscious of the reader  
→文章は簡潔にする  
The text is easy to understand
- ・ **意思決定のための情報の提供**  
Providing information to make decisions  
→内容の全体像をイメージできることが重要  
It's important to be able to imagine the whole picture
- ・ **内容**  
Contents  
→観察・分析結果から言えることを明確にする  
Clarify what can be said from the observation and analysis results

### 要旨

#### 2018年新燃岳噴出物の構成粒子の特徴

#### Summary

新燃岳は2018年3月1日より灰噴火を開始した。噴出物の構成粒子は2018年3月3日の火山灰は無色鉱物に富んでおり、岩片は一部熱水による変質を受けているものも確認できた。3月6日の火山灰は岩片に富んでおり変質の影響はみられなかった。4月5日の火山灰は岩片に富んでおり熱水などによる変質が確認できた。5月14日の火山灰は岩片に富んでおり変質の影響はみられなかった。2018年新燃岳噴出物の構成粒子は、鉱物に富んだものから、変質した岩片に富み、最後に変質を受けていない岩片に富むという変遷がみられた。これらの火山灰の構成粒子の特徴は、灰噴火開始→溶岩流出の開始→静穏期からの爆発的噴火開始→爆発的噴火の継続といった活動様式の変遷を表している。

#### 手法

2018年3月1日から始まった新燃岳噴火によって堆積した火山灰を、洗浄・ふるい分けし、光学顕微鏡で観察した。なお採取された火山灰の日時と場所は試料ごとに異なり、観察に使用した粒子サイズも試料ごとに異なるものを用いた。

地点① 日時：2018年3月3日14時03分

採取場所：ひなもり台駐車場ポスト上 (3.5m上に屋根あり)

粒子サイズ：125-250 $\mu\text{m}$ <sup>1)</sup>

試料は、約6割が透明・半透明の無色鉱物から構成されるほか、黒色岩片を約3割、残りに灰色～白色岩片および有色鉱物を含む。粒子サイズは細粒のものが多く、岩片は黒色と灰色～白色岩片があり、前者は気泡をほとんど含まず緻密な構造であり、噴火に関与したマグマまたは火道や火口付近の火山岩破片、後者は火山体内部で岩片が熱水変質を受けていると考えられる。

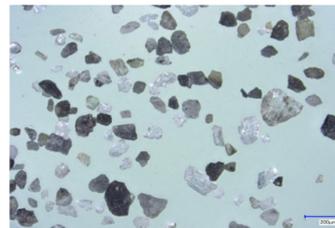


図1 3月3日噴出物構成粒子(125-200 $\mu\text{m}$ )

詳細  
Detail

図-2 自然災害ラボの成果例

さらに参加した学生からは、報告書の作成を通じ、「読み手が専門家でないであることを意識し、文章は簡潔にする」、「地方自治体などの意識決定に用いる情報であることから、内容の全体像をイメージできることが重要」、「報告内容においては、観察・分析結果から言えることを明確にする」など、研究論文との違いについての気づきが報告された(図-2)。

#### 4. 産官学連携による協育

SyDEプログラムでは、プログラム連携企業のほか、SyDEプログラムの趣旨に賛同して頂いた企業・団体が「サステナビリティスタディコンソーシアム」に参加し、産官学連携による持続可能な社会の構築に向けた未来像の創出と研究の振興、人材育成・学生の進路指導支援を目的とした取り組みを実施している。「企業フォーラム」は、コンソーシアムに参加する企業・団体とSyDEプログラムに所属する学生を中心となつて、情報交換の場を提供するものであり、地質・資源、建設、水環境、宇宙技術など幅広い分野の企業と学生・教職員が参加することにより、情報交換を行うものである。令和3(2021)年11月12日に第2回を開催し、第1部としてZoomによる学生による研究発表と企業等からの参加者によるディスカッション、第2部として企業ブース展示において参加企業の技術者や人事担当者から会社が求める人材や入社後のキャリアパスの説明を受けるとともに、OB・OG等の体験に基づくアドバイスを受け、学生の今後のキャリアパスを検討する上で選択を広げる機会を提供することができた(図-3)。令和4(2022)年度末にはSyDEプログラムより初めての修了生を予定しており、国内民間企業のほか、大学・研究機関、官公庁、グローバル企業、国際機関



図-3 第2回企業フォーラム開催状況

などの幅広い分野で活躍することを期待している。

#### 謝辞

SyDEプログラムの実施にあたり、プログラム連携企業・団体およびサステナビリティスタディコンソーシアムよりご支援・ご協力を頂きましたことを感謝申し上げます。

#### 文献

- 1) 文部科学省・日本学術振興会(2022):卓越大学院プログラムパンフレット, [https://www.jsps.go.jp/j-takutsu-pro/data/WISEbrochure\\_jp.pdf](https://www.jsps.go.jp/j-takutsu-pro/data/WISEbrochure_jp.pdf), (2022年6月6日閲覧)。
- 2) 東北大学(2020):東北大学変動地球共生学卓越大学院プログラムパンフレット, [https://syde.tohoku.ac.jp/SyDE\\_Pamphlet/SyDE\\_pamphlet\\_2020.pdf](https://syde.tohoku.ac.jp/SyDE_Pamphlet/SyDE_pamphlet_2020.pdf), (2022年6月6日閲覧)。

## 6. 火山噴火に伴う河川溶存ヒ素の移流分散リスク評価に用いる

### 簡易解析ツールの製作

Fabrication of Simple Analysis Tool for Evaluation of River Dispersion Risk of River Dissolved Arsenic due to Volcanic Eruption

○小野秀史, 渡辺俊一 (エイト日本技術開発), 山本優介, 細野賢一 (地層科学研究所)  
Hidefumi Ono, Shunichi Watanabe, Yusuke Yamamoto, Kenichi Hosono

#### 1. 背景と目的

2018年4月に発生した霧島火山硫黄山(えびの高原)の噴火に伴い、噴気孔から逸出した熱水起源泥水が付近の河川(えびの川)に流入し、下流の赤子川・長江川まで白濁が確認された。水質検査の結果、ヒ素など複数の項目について環境基準を超過する値が示された。

同様な噴火・熱水活動に因んだ溶存ヒ素等の河川環境への悪影響が危惧される地域は、国内に潜在的に多数存在する。噴火発生後の被害状況の迅速な把握と対策検討の支援、対策後の環境影響評価の支援に有用な評価スキームについて検討を行った。本稿では、支援方法のうち、河川溶存物質の移流分散リスク評価に用いるために製作した簡易解析ツールについて説明する。

#### 2. 概要

支援方法のスキームは現地調査パートと解析評価パートで構成される。現地調査パートではストリップングボルタンメトリーによる溶存ヒ素の迅速なスペシエーション分析等<sup>1)</sup>などを行い、解析評価パートでは、現地調査や水文観測結果を用いて河川中のヒ素等溶存物質の輸送現象の予測評価を行う。本稿では、後者である溶存物質の移流分散リスク評価について述べる。

河川における溶存物質の輸送をモデル化する方法として、移流分散方程式を解く方法を採用した。移流分散方程式では、河川の乱流や、流速の非一様性による溶存物質の分散は拡散現象としてモデル化され、分散の程度は分散係数を介してコントロールされる。これらの分散係数は、実際にトレーサー試験を実施して逆解析的に求めるか、あるいは一般的な経験式を用いて決定する。また、この移流分散方程式の求解にあたり、運動方程式などを解いて、あらかじめ河川の流速場を求めておくことが必要となる。

今回の解析ツールの製作にあたっては、プログラム作成の簡易化もはかり、Microsoft Excelをフォーマットとして使用した。

#### 3. 解析プログラム

本検討では簡易な予測計算を目的としており、モデルを簡略化するために4つの仮定を導入した。①河川を1次元でモデル化する。②河川の流水断面形状を矩形とする。③地表流の流入、および地下水の流入出を省略する。④溶存物質の河床への吸着や生成消滅を省略する。③は、管路のように周辺地盤と水のやり取り

を一切行わないことを示す。2018年霧島えびの高原の発災状況に関する現地調査結果から、地下水・浸透流の影響はごく限られ、噴気孔から湧出した熱水・泥水の経路も限定できることから、この仮定を採用した。また、④については詳細な議論を要するが、ここではモデルを単純化するための仮定として採用した。

解析プログラムの実行手順は、はじめに各時刻、各地点における非定常水位を求め、次に非定常移流分散解析を実行する。

#### (流れの場：非定常水位計算の支配方程式)

非定常水位計算の支配方程式を(1)式～(3)式に示す。各々、流体の質量保存則、運動方程式(拡散波近似)、マンニングの平均流速式である。運動方程式には、慣性項などを厳密に解くダイナミックウェーブモデルや、慣性項・水深勾配を省略するキネマティックウェーブモデル等があるが、本プログラムでは必要な解析精度と計算負荷のバランスを考慮して、中間的なディフュージョンウェーブ(拡散波)モデルを用いた。

(1)式～(3)式を陽解法有限差分で離散化し、各時刻における水深 $h$ を求める。

$$\frac{\partial A}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} = 0 \quad (1)$$

$A$ :断面積[m<sup>2</sup>],  $t$ :時間[s],  $Q$ :流量[m<sup>3</sup>/s],  $x$ :位置[m]

$$\frac{\partial h}{\partial x} = I_f - i_0 \quad (2)$$

$h$ :水深[m],  $I_f$ :摩擦損失勾配,  $i_0$ :河床勾配

$$U = \frac{1}{n} R^{2/3} \sqrt{|I_f|} \quad (3)$$

$U$ :断面平均流速[m/s],  $R$ :径深[m],  $n$ :粗度係数

#### (溶存物質輸送の支配方程式)

(4)式～(6)式に非定常移流分散解析の支配方程式を示す。それぞれ、汚染物質の質量保存則、縦分散係数の経験式<sup>2),3)</sup>、摩擦速度算出式である。(4)式～(6)式を陽解法有限差分法で離散化し断面平均濃度 $C$ について解くことで、着目している断面の濃度変化を得ることができる。

$$\frac{\partial(AC)}{\partial t} + \frac{\partial(AUC)}{\partial x} = \frac{\partial}{\partial x} \left( AD \frac{\partial C}{\partial x} \right) + L \quad (4)$$

$C$ :断面平均濃度[g/m<sup>3</sup>],  $D$ :縦分散係数[m<sup>2</sup>/s],

L:単位距離・単位時間あたりの汚染物質投入量[g/m/s]

$$\frac{D}{hu^*} = 2.0 \left( \frac{W}{h} \right)^{1.5} \quad (5)$$

D:縦分散係数[m<sup>2</sup>/s], u\*:摩擦速度[m/s], W:川幅[m]

$$u^* = \sqrt{gR|f|} \quad (6)$$

g:重力加速度[m/s<sup>2</sup>]

#### 4. プログラム内部の解析フロー

プログラム内部の解析フローを図-1 に示す。本プログラムは降雨等による河川の水位変動を考慮し、定常/非定常水位解析ステージで求めた水位をもとに、非定常移流分散解析ステージにおいて溶存物質の濃度変化を計算する。各解析ステージ間の移動はプログラ

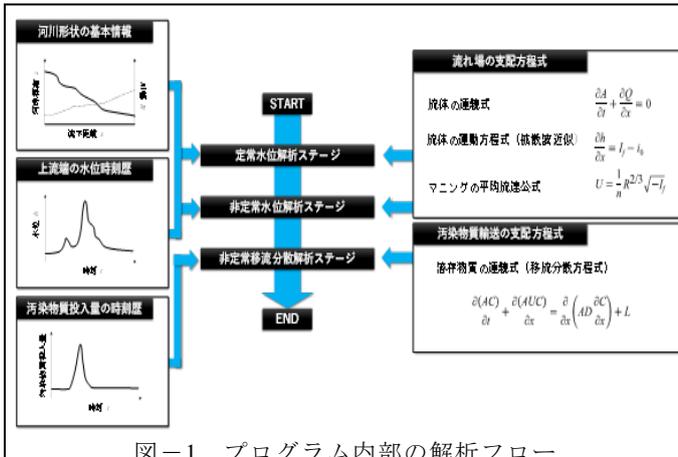


図-1 プログラム内部の解析フロー

ム内部で処理されるため、ユーザーは解析ステージを特に意識する必要はない。

本プログラム(Excel)は4つのシートで構成される。

- [入力]: データ入力および解析の実行決定
- [定常水位出力]: 定常水位計算結果の水位を出力
- [非定常水位出力]: 非定常水位計算結果の水位を出力

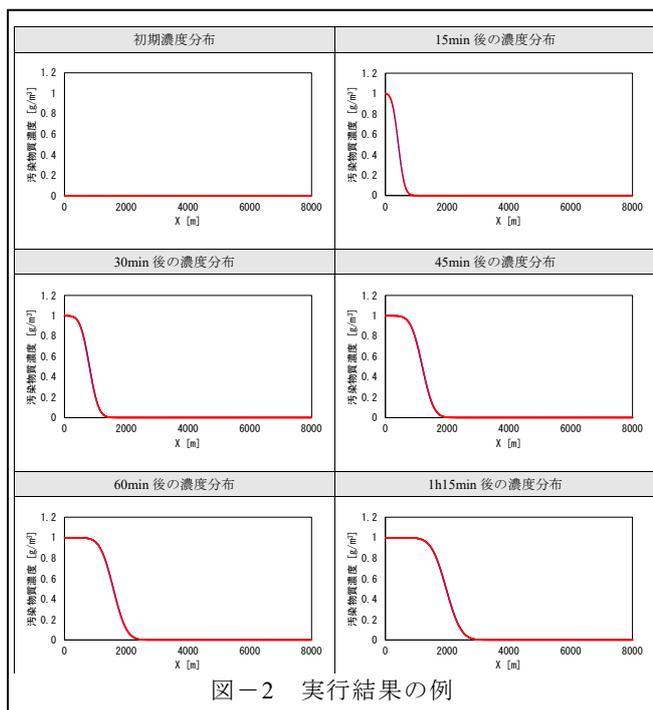


図-2 実行結果の例

[非定常濃度出力]: 非定常移流分散解析結果の出力プログラム実行に際し、流下向きを正とするX座標[m], 河床標高[m], 川幅[m], および設定条件値のマニングの粗度係数, 出力時間間隔(s)を入力する。

#### 5. 表示アプリケーション(ユーザーインターフェース)

簡易解析結果を使用するユーザーの利便性を高めるため、以下の目的でユーザーインターフェースを配慮した表示アプリケーションを準備した。

- ・解析プログラムの計算結果の地図上表示での確認
  - ・時間経過に伴う溶存濃度の変化の地図上可視化
- 表示アプリケーションプログラムは解析プログラムとは処理を独立させ、解析プログラムの改修の自由度を高くしている。アプリケーション構成と表示例を各々

図-3, 図-4 に示す。

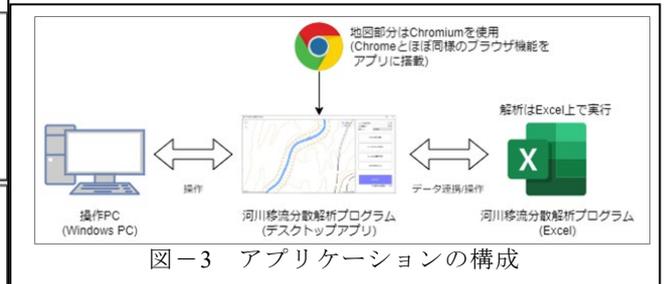


図-3 アプリケーションの構成

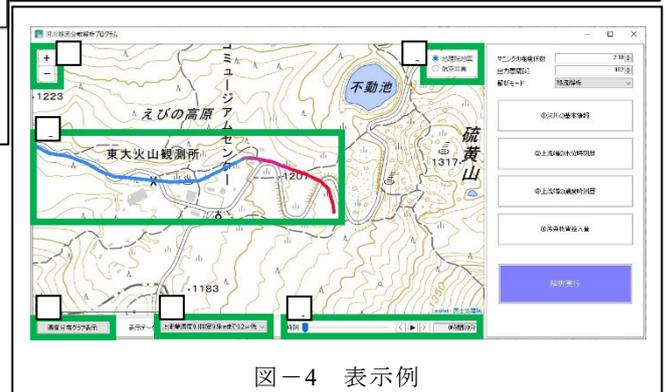


図-4 表示例

#### 6. 課題と改善目標

解析に用いた与条件・パラメータは、簡易化が目的とはいえ準備が不十分なところもある。パラメータの修正を踏まえ、計算事例を増やしながら実行プログラムの改良を行う必要がある。今後の展開として、目的・必要性に応じて2次元解析への展開も考慮している。

#### 文献

- 1) 小野,渡辺,天野 (2021): 災害調査を目的としたストリップングボルタンメトリー法によるヒ素分析, 令和3年度日本応用地質学会研究発表会, 講演予稿集.
- 2) 土木学会 (1999): 水理公式集, 平成11年度版, p.630.
- 3) Cunge, Holly and Verwey (1980): Practical Aspects of Computational River Hydraulics, Iowa Institute of Hydraulic Research, pp.312-320.
- 4) 綾 (1997): 河川流における混合現象, ながれ, 16, pp.22-27.

# 7. 熊本県阿蘇立野地区黒川河岸斜面崩壊地で発見した貫入岩とその K-Ar 年代測定値

Discovered in the Kurokawa Riverbank Slope Collapse Area, Aso Tateno District, Kumamoto Prefecture  
Intrusive rocks and their results of K-Ar age

○梅崎基考 (アバンス), 長谷中 利昭, 鳥井 真之 (熊本大学), 山下 隆之 (アバンス)  
Noritaka Umezaki, Toshiaki Hasenaka, Masayuki Torii, Takayuki Yamashita

## 1. はじめに

阿蘇火山は、約 27 万年前から約 9 万年前に 4 回の大規模な火砕流噴火を繰返し、南北約 25km、東西 18km のカルデラを形成した<sup>1)</sup>。阿蘇火砕流堆積物は、Aso-1(0.27Ma), Aso-2(0.14Ma), Aso-3(0.12Ma), Aso-4(0.089Ma) という 4 つのユニットに区分される<sup>2)</sup>。その阿蘇カルデラは、比高 300~600m 程度の急崖からなるカルデラ壁で囲まれて、その西端部にカルデラ内の水を排出する唯一の峡谷「立野火口瀬」が存在する(図-1)。その立野火口瀬において、2016 (平成 28) 年熊本地震による地表地震断層が新たに出現し、布田川断層がカルデラ内部まで延長することが明らかとなった<sup>3)</sup>。また地震動により断層周辺部の黒川河岸斜面において、大規模な斜面崩壊が多数発生している(図-3)<sup>4)</sup>。

筆者らは、旧阿蘇大橋の落橋箇所である数鹿流崩れから約 200m 下流の黒川右岸の河岸斜面の崩壊地内で、布田川断層とほぼ同一方向に貫入する岩脈を発見した(図-2, 図-3, 写真-1~4)。本報告では、その貫入岩の産状と今回測定した K-Ar 年代測定値を報告する。



図-1 対象地位置案内図<sup>5)</sup>



図-2 貫入岩発見位置と活断層の関係<sup>3)</sup>



図-3 貫入岩発見位置と熊本地震の斜面崩壊状況<sup>4)</sup>

## 2. 斜面崩壊地の地質と貫入岩の産状

貫入岩が発見された崩壊地では、2016 年 4 月 16 日の熊本地震本震動により、国道 57 号の片側 2 車線を含めた黒川右岸の河岸斜面が、幅 80~100m、比高差 80m、崩壊厚約 10~20m の規模で崩壊している<sup>6)</sup>。また崩壊地の下部は、平成 24 年九州北部豪雨でも崩壊している。

貫入岩が発見された崩壊地には、阿蘇カルデラ壁を形成する先阿蘇火山岩類 (80~50 万年前) の凝灰角礫岩と安山岩溶岩 (58 万年前: 年代測定結果<sup>6)</sup>) が主に分布する。後カルデラ期の立野溶岩 (4.6 万年前)、赤瀬溶岩 (3 万年前) がアバットしていたが、今回の地震よりそのほとんどが崩壊している。貫入岩は、走向 N50E 方向、60~70° 北西傾斜で幅約 10m で岩脈状に先阿蘇火山岩類へ貫入している。貫入方向を北東方向に延長した位置に地表地震断層が位置する(図-2, 3)。

貫入岩は、比較的新鮮で亀裂の少ない中硬岩質であり、断層による破砕などは認められない。貫入岩には、N50E の高角亀裂が端部に認められる程度である(写真-2)。一方で貫入岩の外側周縁部は、赤色火山灰質砂が見られ、破砕帯のようである(写真 3, 4)。なお顕微鏡観察及び年代測定試料の採取位置は、32 度 52 分 52.16 秒 130 度 59 分 11.45 秒である(写真 1, 2)。



写真-1 対象地の斜面状況と貫入岩の産状  
(北東側より南西側を望む・2017年撮影)



写真-2 貫入岩サンプリング箇所

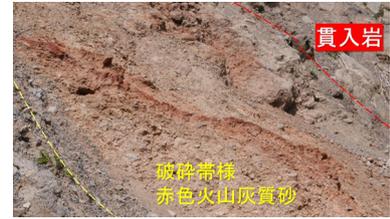


写真-3 貫入岩周縁部の破碎帯様岩の赤色火山灰質砂 (近景)

表-1 貫入岩 K-Ar 年代測定結果

試料名	測定物 (粒径)	カリウム含有量 (wt.%)	放射性起源 <sup>40</sup> Ar (10 <sup>-8</sup> cc STP/g)	K-Ar年代 (Ma)	非放射性起源 <sup>40</sup> Ar (%)
貫入岩 安山岩	石基 (187-250 μm)	3.868 ± 0.077	4.08 ± 0.22	0.27 ± 0.02	75.4

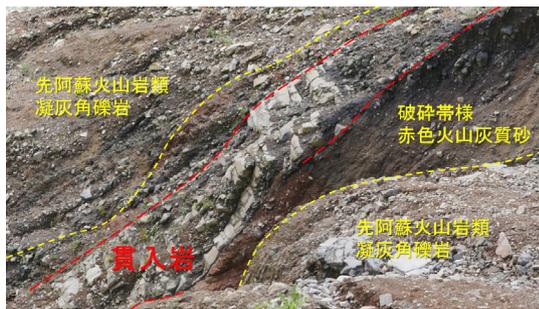


写真-4 貫入岩脈を崩壊地上方より望む。

### 3. 貫入岩の顕微鏡観察結果

貫入岩を顕微鏡観察した結果、直方輝石単斜輝石安山岩と判別される。斜長石の巨晶(4~8 mm)が目立つ斑状組織を示す。斑晶、石基とも新鮮で、変質は認められない。斑晶鉱物は斜長石、単斜輝石、直方輝石である。斜長石は自形、虫食い状組織である。ガラス中に針状鉱物が認められ、急冷組織の可能性はある。

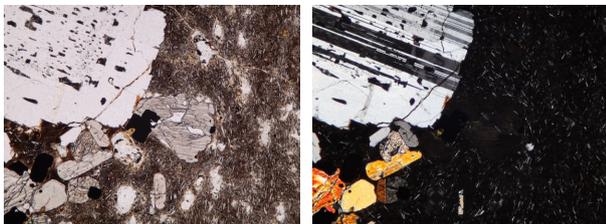


写真-5 貫入岩顕微鏡写真(斜長石の巨晶、単斜輝石・直方輝石の斑晶。石基に気泡が点在する。)写真の横幅=3 mm. 左:開放ニコル, 右:直交ニコル)

### 4. K-Ar 年代測定結果

貫入岩について、K-Ar 年代測定を実施した。測定は、株式会社蒜山地質年代学研究所に依頼し、<sup>38</sup>Ar をスパイクとする同位体希釈法で測定した。得られた年代値

は、0.27±0.02 Ma (27 万年前) であった (表-1)。

### 5. 考察

これまで立野峡谷の形成は、Aso-4 火砕流噴火(9 万年)後に立野を通る布田川断層活動や浸食作用の結果、形成されたと考えられてきたが、1) 立野峡谷の南北壁を埋める Aso-2 火砕流(14 万年前)の存在、2) その下位の阿蘇火山のマグマ組成を有する輝石安山岩質の外牧溶岩(27 万年前)の存在、3) さらにその下位の砂礫層中の Aso-1 礫の含有から、27 万年前の Aso-1 噴火後には立野峡谷原型が存在したとされている<sup>7)</sup>。

今回発見した貫入岩は、その貫入方向や分布位置、周辺部の破碎帯様の産状から、布田川断層系の活動により発生した亀裂に貫入したと推測される。その貫入年代は 27 万年前であることが明らかとなった。

発見した貫入岩は、阿蘇カルデラの発達史、斜面崩壊のメカニズム等を考える上で重要である。貫入岩と外牧溶岩<sup>7)</sup>の関係性の解明が今後の課題である。

### 文献

- 1) 小野晃司・渡辺一徳(1985):阿蘇火山地質図(5 万分の1)。火山地質図4, 地質調査所。
- 2) 渡辺一徳(2001):阿蘇火山の生い立ち,一の宮町。
- 3) 国土地理院(2017):1:25,000 活断層図「阿蘇」。
- 4) 地理院地図(4/16 撮影熊本地震正射画像)
- 5) 地理院地図(アジア航測株式会社の赤色立体地図作成手法(特許3670274, 特許4272146)を使用)
- 6) 株式会社アバンス(2017):熊本河川国道管内緊急地質調査(その1)業務,熊本河川国道事務所。
- 7) 渡辺一徳ほか(2021):阿蘇カルデラ西端,立野峡谷の地質と形成年代。火山第66巻第1号 p.21-34。

## 8. 集水井の機能低下をもたらす現場条件について

Field condition that causes performance degradation of drainage well

○木村耕治, 鈴木孝明, 山根佑太郎 (日本基礎技術(株))

Koji Kimura, Takaaki Suzuki, Yutaro Yamane

### 1. はじめに

社会インフラの維持管理として、地すべり対策施設の点検が実施され始めている。何種類かある地すべり対策施設のうち集水井について点検した結果から、機能低下を生じているものに共通する現場条件が認められたので、それを報告する。

### 2. 点検方法

地すべり対策施設の点検は、目視観察を主体とする概査とその後必要に応じて行う詳細調査に分かれている。概査の点検方法については、農林水産省から地すべり防止施設の機能保全の手引き～統合版～(2017)<sup>1)</sup>が提示されており、今回の報告ではこの書式を用いて点検している。

集水井は点検対象の構造物が、井戸本体・集水ボーリング・排水ボーリングの3つに大きく分かれ(図-1)、それぞれを点検して評価する。

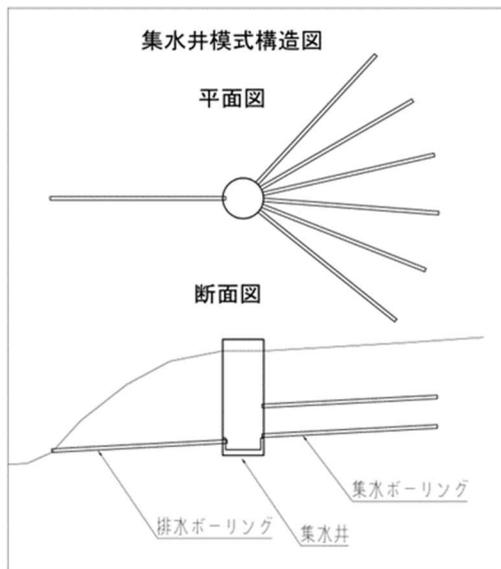


図-1 集水井の構成

概査で確認する項目を整理すると以下のようになる(表-1)。

集水井：破損・欠損・変位・変形・腐食

集水ボーリング：破損・腐食・閉塞(孔口)

排水ボーリング：破損・腐食・閉塞・異常湛水

点検を実施した現場は兵庫県の農村振興局管轄の地すべり防止区域内にあり、南部(北神戸)<sup>2)</sup>で31箇所、北部(香美町)<sup>3)</sup>で3箇所の計34箇所である。

表-1 集水井点検書式の一部

工種・部位	項目	状況(異常な状況がない場合は0とする。複合的な状況その他の場合は9とする)	
集・排水機能	集水ボーリング	破損・欠損	1.欠損・2.ひび割れ・3.抜け・4.折れ曲がり
		腐食	1.発錆
		閉塞(孔口状況)※	1.細菌類付着・2.植物・藻類侵入・3.その他
	排水ボーリング <small>(井外の出口にて目視確認。異常湛水は地表より水面を遠望目視)</small>	破損・欠損	1.欠損・2.ひび割れ・3.抜け・4.折れ曲がり
		腐食	1.発錆
		閉塞(孔口状況)	1.細菌類付着・2.植物・藻類侵入・3.その他
	異常湛水	1.異常湛水(井内水面高>底巻コンクリート天端高)	
井筒本体	ライナープレート・補強リング・バーナカルステイフナー/ラテラルストラット	破損・欠損	1.欠損・2.亀裂・3.破断・4.ボルト等の緩み(脱落)
		変位・変形	1.屈曲(傾き、ねじれ、折れ曲がり)
	腐食	1.発錆	
底部	底張コンクリート	破損・欠損	1.欠損・2.ひび割れ・3.摩耗
		変位・変形	1.ずれ・2.傾倒
		閉塞・埋没	1.土砂堆積・2.落葉等堆積・3.植物侵入・4.その他
地表	地表コンクリート	破損・欠損	1.欠損・2.ひび割れ・3.摩耗
		変位・変形	1.ずれ・2.傾動・3.沈下
付帯施設	天蓋	破損・欠損	1.欠損・2.ひび割れ・3.摩耗
		腐食	1.発錆
	点検梯子	破損・欠損	1.欠損・2.亀裂・3.破断・4.ボルト等の緩み(脱落)
		腐食	1.発錆
	安全柵	破損・欠損	1.欠損・2.亀裂・3.破断・4.ボルト等の緩み(脱落)
		変位・変形	1.屈曲・2.傾倒
腐食	1.発錆		

### 3. 点検結果

点検の結果を整理すると以下のようにまとめられる。

表-2 集水井点検結果

集水井点検結果			
点検箇所数	機能低下がみられた箇所	対策優先度の高い箇所	排水ボーリングの機能低下
34	13	8	6
点検箇所数	機能低下がみられた箇所	対策優先度の高い箇所	排水ボーリングの機能低下
	機能低下がみられた箇所	対策優先度の高い箇所	対策優先度の高い箇所
	38.2%	61.5%	75.0%

上記のように、点検箇所全体の4割近くで機能低下が認められ、このうちの6割程が対策の優先度が高く、そのうちの8割近くが排水ボーリングであることが判る。

### 4. 考察

点検結果に示したように、集水井の機能低下をもたらす構造物は井戸本体や集水ボーリングよりも排水ボ

ーリングとなることが多い。

これは井戸本体や集水ボーリングでの破損や腐食および閉塞（目詰まり）は、部分的なものであれば対策は急がずに経過観察とすることもありますが、排水ボーリングの場合はここで生じた閉塞（目詰まり）や破損等の現象が、集水井全体としての機能に影響するからである。また、排水ボーリングに生じる機能低下は、閉塞等であれば異常湛水という形で確認することができるが、排水ボーリング内の破損だと、管内カメラを入れて観察しなければ発見できない。この点検は概査ではなく詳細調査となるため、機能低下が見過ごされる確率が高くなる。

集水井の点検で、特に排水ボーリングの閉塞についてその要因を考えると、集水井の天蓋の種類は重要となる。標準的な製品としては、よくエキスバンドメタル（写真-1）が使われているが、この製品は網目なので浅い深度であれば集水井の中が常に確認できるというメリットがある一方で、落葉が集水井内に入り排水ボーリング閉塞物質の原因となっている（写真-2 写真-3）。加えて、直射日光が入り込むことで井戸内での植物の生長を促しており、これも閉塞物質を生成する原因となっている（写真-4 写真-5）。したがって、これらの点検後には対策として天蓋を縞鋼板（写真-6）に変更することを提案した。



写真-1



写真-2



写真-3

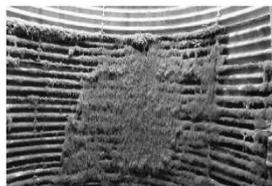


写真-4



写真-5



写真-6

（写真-1～5 は兵庫県神戸土地改良センターより、写真-6 は兵庫県豊岡土地改良センターより提供）

排水ボーリングが閉塞を起こす要素としては、落葉等の植物以外に、細粒分を排出し易い性状の土砂かどうか、つまり地質も重要と思われる。またこういった物質が管を閉塞するには、一定量以下の排水量や緩い管勾配、排水ボーリング延長が原因となることが考えられ、点検項目として整理すると以下ようになった。

点検書式	点検項目	判定区分案		
		エキスバンドメタル		縞鋼板
☆	天蓋の種類	エキスバンドメタル		縞鋼板
☆	井戸内の植生	繁茂	有り	ほとんど無し
☆	地上部周囲の植生	繁茂	有り	ほとんど無し
☆	地質	泥岩または凝灰岩		砂岩・礫岩または花崗岩
	★施工後の年数	40年以上	20年以上40年未満	20年未満
	★排水量	滴水以下	滴水～10L/min	10L/min～
☆	排水ボーリング勾配	2%より緩い		2%以上
	★延長	60m以上	20m以上60m未満	20m未満

★点検書式に項目あり

☆点検書式に項目なし

また、表-3 の点検項目に配点を独自に設定して評価点を集計したところ、機能低下の大きい施設に対して対策優先度の高い評価点が得られた。

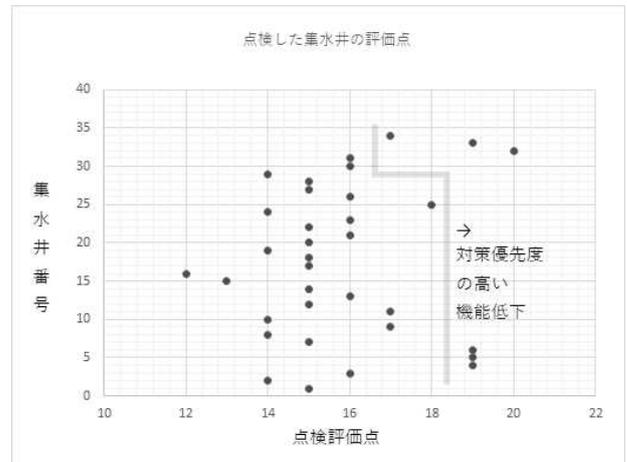


図-2 点検した集水井の評価点

## 5. まとめ

地すべり対策施設のうち、集水井の機能低下をもたらす現場条件については、いくつかの共通項目があることが確認された。今後、さらにデータを蓄積して吟味することで、これらの傾向はより詳しく把握されることが考えられる。

## 文献

- 1) 農林水産省農村振興局（2017）：地すべり防止施設の機能保全の手引き～統合版～
- 2) 兵庫県（2017）：神戸地区 機能診断調査・個別施設計画策定業務
- 3) 兵庫県（2019）：板仕野地区集水井実施設計業務

## 9. 2021年熱海市逢初川土石流の地質的要因

Geological background of the 2021 Aizome River debris flow in Atami

○千木良雅弘（公財深田地質研究所），北村晃寿（静岡大学），木村克己（公財深田地質研究所）  
Masahiro Chigira, Akihisa Kitamura, Katsumi Kimura

### 1. はじめに

静岡県熱海市逢初川上流部では、2021年7月3日に盛土が崩壊して土石流(泥流)となり、下流の伊豆山地区を襲い、死者26名、災害関連死1名、行方不明者1名、全・半壊家屋64棟の被害を生じた。流下する泥流の目撃証言や記録映像によって、土砂とともに非常に大量の水が流下したことが指摘されている。その概要と地質的背景を木村(2021)がまとめている。本報告は、千木良他(2022)で報告した結果の概要版である。

盛土崩壊地と周辺の地形図を図1a, bに示す。及川・石塚(2011)によれば、盛土周辺の基盤の地質は、第四紀の湯河原火山噴出物の城山溶岩類からなり、これは、溶岩が卓越する地層で、玄武質安山岩から安山岩の溶岩・火砕岩からなり、緑色に変質している場合がある。

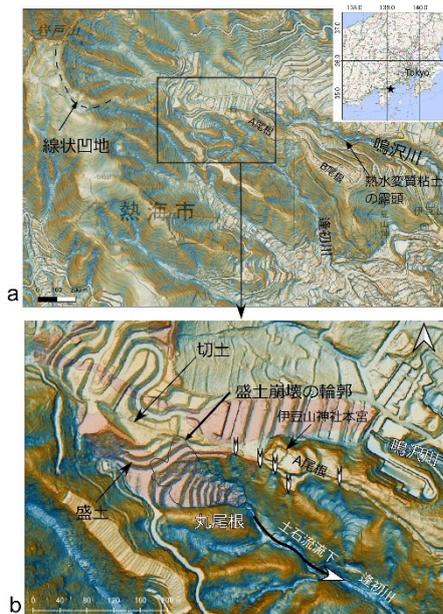


図1 盛土崩壊箇所周辺の盛土崩壊前の地形イメージ(千木良他, 2022)。a:位置図(基図は、朝日航洋株式会社, 2021)。挿入図の★がa図の位置。b:盛土崩壊部近傍の拡大図。切土と盛土の分布は静岡県(2021a)による。白矢羽根印は小崩壊地形を示す。

### 2. 調査結果

#### 人工的な地形改変前の地形と沖積錐

逢初川上流から鳴沢川上流の切土や盛土などの人工的な地形改変は、2002年に始まり、2011年には終了した(静岡県, 2022)。人工的な地形改変前の地形は、1962年の空中写真によって良く観察できる(図2)。岩戸山東斜面の複数の谷は、下流側で合流し、その下流側では河谷は埋積され、A尾根をまたいで、その両側の鳴沢川

と逢初川の上流部を覆う変則的な沖積錐が形成されている。この二股に分かれた沖積錐の中央部を鳴沢川が侵食し小規模なV字型の谷を形成していた。2005年には鳴沢川が埋め立てられ、また、その流路の両側のV字谷の肩が切り取られ、沖積錐の形が認められなくなっている。逢初川の盛土はこの後、2007年から開始された(静岡県, 2021a)。

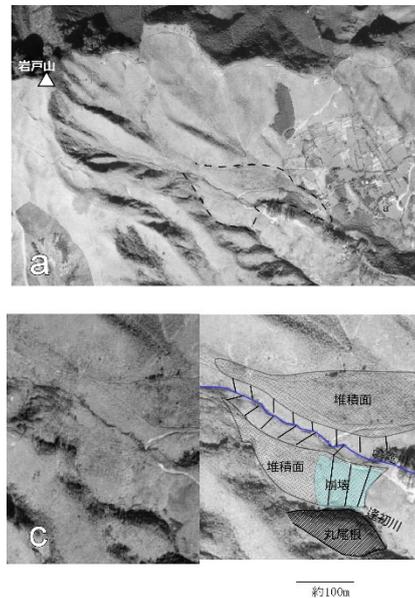


図2 逢初川および鳴沢川上流の人工改変前の地形(千木良他, 2022)。a:1962年撮影の空中写真(国土地理院撮影, MKT-62-8X C9-8)。破線は沖積錐の輪郭。c:盛土予定地付近の拡大ステレオペア(MKT-62-8X C9-8, C9-9)。

A尾根をまたいで広がる沖積錐の構成物は、盛土崩壊後に行われたボーリング調査によって確認された。掘削された5本のボーリング孔のいずれにおいても、褐色の砂質な基質と数mmから最大径1m程度のサイズと垂角礫状の安山岩片からなり、所々に円磨礫を含む砂礫層を薄く挟む堆積物(乱雑堆積物と呼称する)が表層部に確認されている。乱雑堆積物は、主に、鳴沢川上流から繰り返し流出した土石流の堆積物であり、それが前述した沖積錐の構成物であることがわかる。その中に挟まれる円磨された礫を含む砂礫層は土石流の流出の間の静かな時期に堆積したものと考えられる。

#### 崩壊地内の地質

崩壊後の崩壊地の特徴を図3に示す。崩壊地の上縁の中央部に道路が部分的に残存しており、崩壊地はこの道路から南東に延びる高まり(中央尾根)によって北側と南側とに分かれる。北側崩壊地の中央部では盛土は

ほとんど失われ、その下の褐色の地山が露出している。この地山は、その特徴と位置から考えて、前述の沖積錐を構成する乱雑堆積物である。

北側崩壊地および中央尾根下部には、地山と判断され、スメクタイトからなる熱水変質粘土（溶岩・火砕岩起源）が露出していた（図3）。

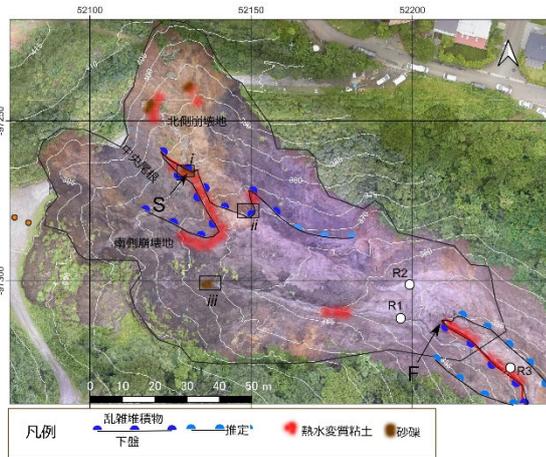


図3 盛土崩壊地の地質概略図（千木良他，2022）。Sは地すべり1の基底部の観察箇所。Fは地すべり2の基底部の観察箇所（図7）。基図は盛土崩壊地の2cm解像度オルソ画像に50cmのDEMデータから作成した傾斜図と等高線を重ね合わせたもの。オルソ画像とDEMデータは、静岡県（2021）による。

北側崩壊地の乱雑堆積物の下位には、植物片の濃集したゾーンが観察され（図3のS）、地層の変形から、この部分の乱雑堆積物は、過去に熱水変質粘土の上で地すべりを起こしていたことがわかった（地すべり1）。この植物片は<sup>14</sup>C年代測定の結果、約700年前（西暦1950年を基準とする）のものであることがわかった。

盛土崩壊地下端付近の谷底には高さ3m程度の滝状の窪みが形成され、そこから下流側はガリーとなっていた（図3のF）。この窪みの側面で地質構造が観察でき、ここでも乱雑堆積物が熱水変質粘土との境界をすべり面として過去に地すべりを起こしていたことがわかった（地すべり2）。これは、巻き込まれていた木片から、約8000年前の地すべりである。

### 3. 考察

乱雑堆積物層は、現在地形的に鳴沢川の流域となっている範囲の南部では逢初川に向かって傾斜している。したがって、尾根Aの西方延長よりも北側部分からも地下水が逢初川方向に流れると推定される。そして、この乱雑堆積物は熱水変質粘土の上に乗っており、地点Sと地点Fでは、それぞれ北側から南側に向かって地すべりを起こしていた。この熱水変質粘土は、軟弱かつ難透水性で、主にスメクタイトからなる。

盛土崩壊後の地形からは、大きく2か所から出水があり、それが土砂を洗い流したことが示唆される（図4）。これらは、F地点とS地点である。前者は、地す

べり基底で細粒分が地中侵食された岩塊集積部からの出水であると推定され、盛土の末端付近で生じた。乱雑堆積物内の水位が上昇して、ある限界を超えたところで急激に出水したことも考えられる。後者も、古い地すべり基底からの出水であり、盛土の厚い部分の下の出水であった。ただし、乱雑堆積物基底は崩土に覆われているところもあり、これらのすべり面がどの程度まで広がっているのかは、不明確である。

謝辞 公財深田地質研究所の金子誠氏には、調査に協力いただいた。静岡県交通基盤部河川砂防局砂防課、熱海市市民生活部危機管理課には調査を許可していただいた。本研究には静岡大学防災総合センターおよび深田地質研究所の経費を使用した。X線回折分析は東京大学理学系研究科地球惑星科学専攻の装置を使用した。

### 引用文献

木村克己（2021）、深田地質研究所年報，22，185-202。  
千木良雅弘他（2022）、静岡大学地球科学研究報告，49，45-59。

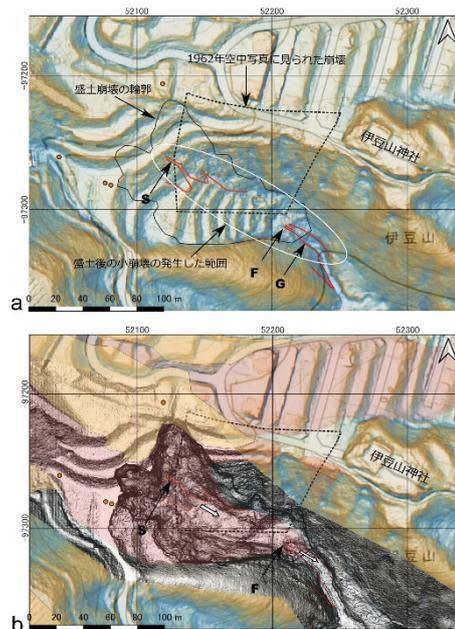


図4 盛土崩壊発生前後の地形と1962年以前の沖積錐の崩壊と今回の崩壊、および乱雑堆積物下面（一部地すべり面）のトレースの関係。a: 盛土崩壊前。基図は朝日航洋株式会社(2021)の陰陽図。白楕円で囲んだ範囲内の盛土小段に数m大の小崩壊が複数見える。この範囲は盛土崩壊後に乱雑堆積物下面のトレースが露出した位置に符合する。また、1962年以前の沖積錐の崩壊斜面の下部ともほぼ重なる。b: 盛土崩壊後の傾斜図を発生前の陰陽図に重ねた図。盛土崩壊範囲の最下部にF地点、つまり地すべり2の基底部が露出した窪みが位置する。この窪みは盛土崩壊前にa図のG地点にあったガリー頭部が後退したものと考えられる。F地点よりも下流は周辺部分よりも数m低いガリーになっており、また、S地点の下流部には平滑な扇型斜面があり、これらの地形は、それぞれ地すべり2および地すべり1の基底部からの地下水の突出によって形成されたものと考えられる。

# 10. 大規模山体崩壊地内で発生した斜面変形

Slope deformation that has occurred within past large mountain collapse area

○伊東 陽希 (ダイヤコンサルタント),  
前嶋 美希, 赤松 伸弥 (兵庫県 西播磨県民局 光都農林振興事務所)  
松村 法行, 鏡原 聖史, 岡崎 敬祐 (ダイヤコンサルタント)

## 1. はじめに

近年、記録的な豪雨により土砂災害が頻繁に発生しており、2次災害を防止するため各地で対策工の検討がされている。地すべり地では対策工検討において変形メカニズムの特定が重要なため、詳細な調査及び観測が必要である。

本稿では、平成30年7月豪雨災害(累積468.5mm 7日間)を受けて過去の大規模山体崩壊地内で発生した2つの移動ブロックに対してボーリング調査、比抵抗二次元探査、多点温度検層等の詳細な現地調査やパイプ式歪計、地表伸縮計、地下水水位計による継続観測を実施し地盤構造、すべり面深度、地下水流動層(水ミチ)深度を把握しそれぞれのブロックの変形メカニズムの特定を行った。その事例について報告する。

## 2. 調査地の概要

調査地は標高757.3mの山地の北東部を流れる渓流部の浸食前線に位置する。調査地の上流側では不自然凹凸地形の緩斜面(図-1 橙色破線部)となっており、谷筋は不明瞭となる。また、集水面積は27ha(図-1 青色破線部)と広大であり、調査地の渓流部に表流水が集中しやすい地形となっている。

空中写真判読の結果を図-2に示す。過去の大規模山体崩壊(幅:0.9km,長さ:1.8km)により土塊が北東方向へ移動していることが確認された。末端部の押し出しが確認でき、それに伴う天然ダム形成の痕跡が認められた。大規模山体崩壊地内では土塊移動に伴う陥没帯が形成されており、緩やかに凹凸した不自然な緩斜面が認められた(図-2 赤線部)。

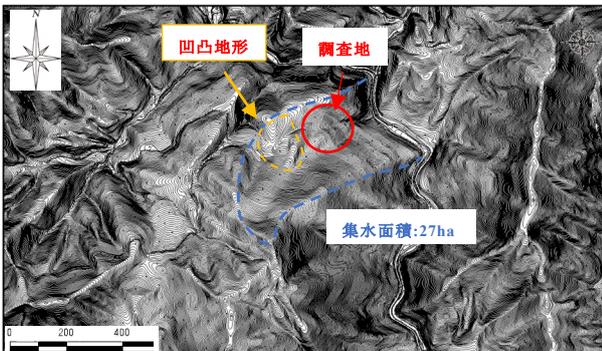


図-1 調査地周辺の地形 1)に加筆

調査地周辺の地質を図-3に示す。兵庫の地質 2)によ

るとペルム紀に形成されたとされる舞鶴層群の緑色岩類(輝緑凝灰岩、一部黒色粘板岩をはさむ)や粘板岩と夜久野岩類の変斑レイ岩や変花崗岩が分布するとされており、多様な地質の地層境界や断層が入り組んでいる。調査地は舞鶴層群と夜久野岩類の地質境界付近に位置する(図-3)。

調査地は崩壊以前より、地質・地形的な崩壊のリスクを抱えており、平成30年7月豪雨の影響をうけて崩壊及びブロック変形が発生したと考えられる。

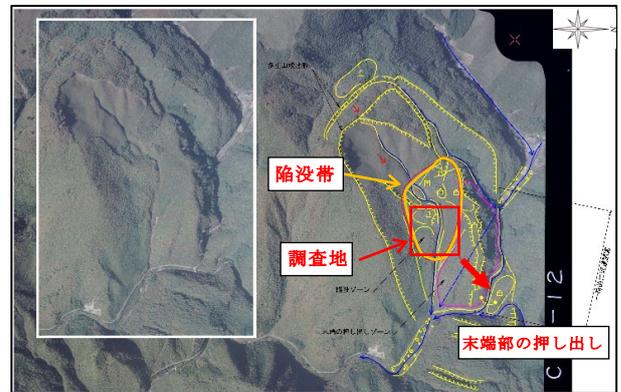


図-2 調査地周辺の空中写真判読結果

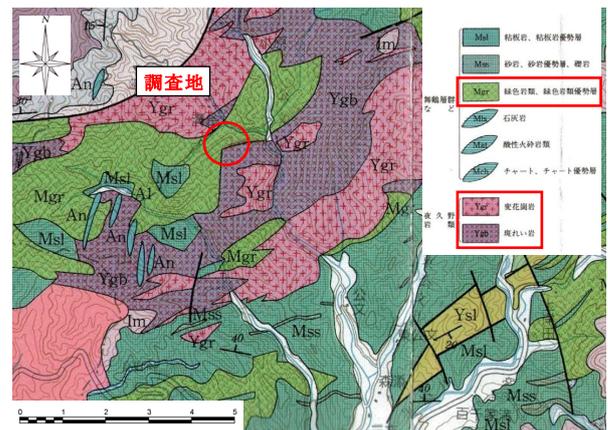


図-3 調査地の地質 2)に加筆

## 3. 現地踏査結果

本調査の調査平面図を図-4に示す。AブロックならびにBブロックにて現地踏査を実施した。それぞれの現地状況を下記に示す。

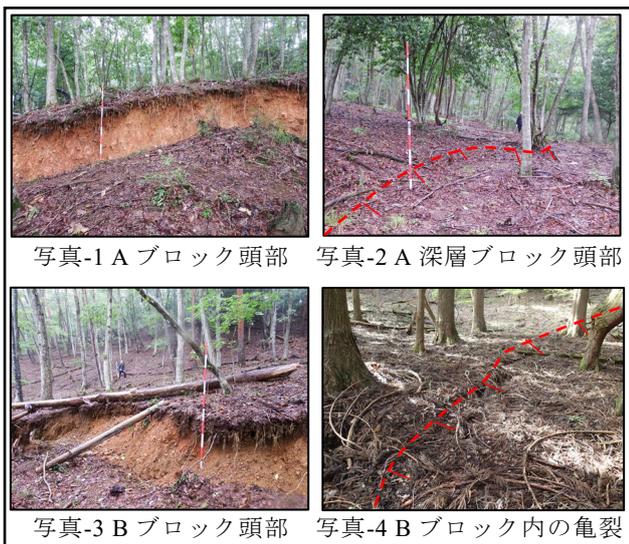
### (1)A ブロック

地すべり頭部に高さ1m程度の明瞭な滑落崖や階段状の陥没地形が認められた(写真-1)。末端部は渓流部の崩壊により大部分が消失する。またAブロック背

後には地形的な鞍部が認められ、開口性のクラックが発生している(写真-2)。その背後は緩斜面が広がっており、潜在的な不安定土塊であると推定した。

## (2)B ブロック

地すべり頭部に高さ 1.5m 程度の明瞭な滑落崖や陥没地形が見られ、側部では 0.5~1m 程度の明瞭な段差地形や側方亀裂が認められた。ブロック中央部において明瞭な開口性の亀裂が認められたことからブロックの分離変形が考えられた(写真-4)。また末端部では押し出しによる沢部の閉塞が認められた。



## 4. 詳細調査結果

詳細な地質構造及び地下水特性やすべり面深度を把握するため比抵抗二次元探査 6 測線、調査ボーリング 9 箇所、多点温度検層 4 箇所を実施した。さらに、動態観測として伸縮計 6 基、パイプ式歪計 6 孔、地下水位観測 11 孔を実施した。A ブロックならびに B ブロックそれぞれの調査結果を下記に示す。

### (1)A ブロック

すべり土塊はボーリング調査結果より強風化(DL~DH 級)変斑レイ岩が主体であり、GL-40m 以深まで過去の大規模山体崩壊の陥没帯形成に伴う破碎構造が認められた。比抵抗二次元探査結果より GL15~30m において 100~300Ω 程度の中~低比抵抗部が帯状に分布することから特に脆弱な地質構造であると考えられた。さらに、動態観測により GL-20m 付近に累積変位(準確定変動相当)が認められることから GL-20m 付近が活動中のすべり面であると考えた。また、A ブロック頭部背後に設置したパイプ式歪計において累積変位を確認していることから A ブロック背後の鞍部(写真-2)を頭部とした地すべり変形の可能性が考えられた。

### (2)B ブロック

すべり土塊はボーリング調査結果より強風化(DL~DH 級)変斑レイ岩が主体であり、GL-20m 付近で粘土混じり砂礫を伴う面構造が確認された。さらに動態観測により GL-15~20m で累積変位(準確定変動相当)が

確認されたことから GL-20m 付近が活動中のすべり面と考えた。また、すべり面付近より下位は緑色岩類が確認でき、すべり面から 3m 以深では緑色岩の良好岩盤(CM~CH 級)が認められた。多点温度検層結果から、すべり面付近に地下水流動層が認められた。

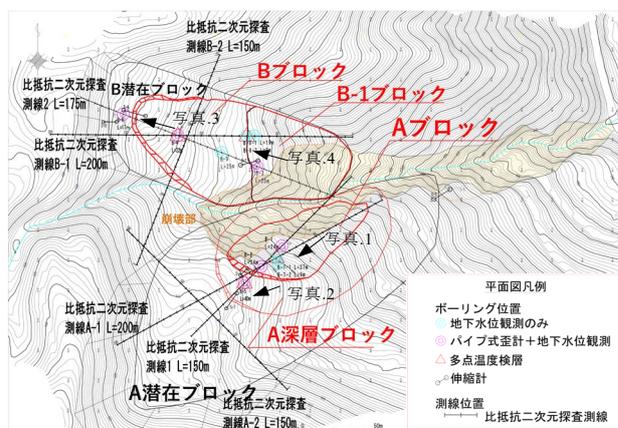


図-4 調査結果(A ブロック地質断面図)

## 5. ブロックの変形メカニズム

地すべり変形は過去の大規模山体崩壊により形成された陥没帯の緩斜面で発生している。陥没帯は深部まで風化・破碎した脆弱な地質構造であり、地形・地質的な崩壊のリスクが高かったと考えられる。また、調査地の集水面積は 27ha と広大であることから平成 30 年 7 月豪雨の影響を大きく受け、土塊内の地下水位上昇及び溪流部崩壊に伴う脚部の喪失が起因となり地すべり変形が発生したと考えられる。

## 6. まとめ

本稿では過去の大規模山体崩壊地内で発生した地すべり変形について、地盤構造及び特異的な地形を素因とする地すべり変形であると考察した。

詳細なボーリング調査や比抵抗二次元探査を併用することにより、詳細な地質構造やすべり面深度を把握することができた。さらに多点温度検層を実施することにより地下水流動層の深度を把握することが出来た。すべり面深度や地下水流動層の深度分布の把握は対策工検討において重要であることから、多様な現地調査の併用は必要であり、特に多点温度検層は抑制工検討の上で非常に有効であった。

今後は A ブロック及び B ブロック背後斜面の安定度評価及び A ブロックの地下水流動層を継続業務で調査・観測で明らかにし、抑制工及び抑止工の検討をする予定である。

## 7. 文献

- 1) 宍粟市地図情報 HP : <http://gis-openweb.city.shiso.lg.jp/menu/index.html>
- 2) 兵庫県土木地質図編纂委員会, 兵庫の地質, 1996

# 11. 美濃帯における深層崩壊危険斜面と断層帯との関係

## ～長野県辰野町の事例～

Relationship between deep-seated landslide hazard slopes and fault zones in the Mino Terrane

: Case of Tatsuno Town, Nagano Prefecture

○松澤 真, 木村 克己 (深田地質研究所)

Makoto Matsuzawa, Katsumi Kimura

### 1. はじめに

深層崩壊は、特有の地質構造の場で斜面が重力によって変形した場に発生することが明らかになってきており (Chigira et al., 2013), これらを鍵にして発生場を予測できる可能性がある。2011年に四万十帯で発生した多数の深層崩壊は、事前にわずかに重力変形した斜面で生じ、これらは四万十帯の地質構造に強く支配されていることが明らかになっている (Arai and Chigira, 2019)。しかしながら、深層崩壊とそれに先立つ重力による斜面変形は、様々な地質環境に応じて特有と考えられているが、共通の一般的特性についての研究は十分ではない。

そこで本研究では、四万十帯よりも古く後生的な変形が大きいと想定されるジュラ紀の付加体である美濃帯が分布する長野県辰野町を対象に微地形判読による重力変形斜面などの抽出と地質踏査により、地質構造と崩壊発生場の関係を検討した。

### 2. 調査地および調査方法

本研究の調査地は、長野県辰野町の横川川の下流である (図-1)。調査地には、航空レーザ測量データを用いた予察的な微地形判読により重力変形斜面が複数分布することが明らかになっていた。横川川には、上流に抜ける道路が無いと、深層崩壊により通行止めとなると、孤立集落となる可能性が高い。既往研究により調査地内の活断層分布の指摘はないが、調査地の北部の小野川沿いに牛首峠断層、東部には南北方向の

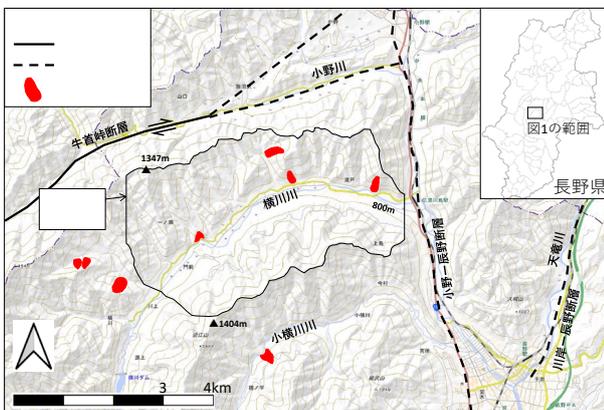


図-1 調査地域の概要 (断層は松島ほか(1995), 重力変形斜面は松澤ほか(2021), 背景は地理院地図より)

小野一辰野断層が分布する (松島, 1995)。調査地の地質は、ジュラ紀の付加体である美濃帯である。領家変成作用を受けているが変成の程度は弱い (片田・礒見, 1964)。

調査は、まず、航空レーザ測量データ (長野県林業総合センターの 0.5mDEM) から傾斜量図を作成し、重力変形により段差が生じている箇所を段差地形、周囲と分離し滑動した形跡がある斜面を重力変形斜面として判読した。次に、地質踏査を行い、地質構造を把握した。最後に、深層崩壊の危険性が高い変形斜面と地質構造との関係を検討した。

### 3. 結果と考察

#### 3.1 微地形分布

段差地形、重力変形斜面ともに、横川川の左岸に集中していることが分かった (図-2)。また、調査地では、谷を埋めるように緩く堆積する谷埋堆積物が分布していた。この堆積物は、淘汰の悪い礫混じり砂を主体としていること、調査地周辺の森林限界は、最終氷期前期に 780m まで降下しているとの指摘 (松島, 1995) から、標高 800m 以上に堆積する谷埋堆積物は、周氷河堆積物の可能性が高いと想定される。

#### 3.2 地質構造

地質踏査の結果、調査地には北東-南西方向の最大 300m の幅をもつ断層帯が泥岩の卓越する層準に発達することが明らかとなった (図-3)。この断層帯は、付加体形成時の境界である横山層と奈良井層のユニッ

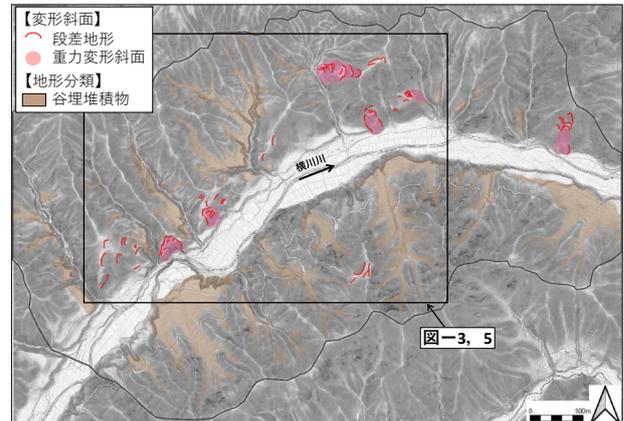


図-2 微地形分類図

ト境界（片田・礪見，1964）の北側に平行して分布していた。調査地域には，北部に泥岩優勢の泥岩砂岩互層が卓越する奈良井層，南部に，砂岩と層状チャートが卓越する横川層が，北東-南西走向で，南傾斜北上位をなして分布する。ユニット境界付近では，厚い断層帯以外にも多くの断層が確認された（図-3）。

北東-南西方向の断層帯の例を図-4に示す。ここでは，重力変形斜面の西側の沢で300m，東側の沢で200mにわたり連続的に北東-南西方向の断層帯が分布している。断層帯では，北東-南西方向の断層が主体であるが，一部では，北西-南東方向の断層も認められた。断層は，泥岩が鱗片状に破砕されているものが多く，一部では石英脈が砕かれ粉末化していた。図-4の範囲内では，基盤岩である砂岩泥岩互層は南傾斜であるが，重力変形斜面内では北傾斜となっていることから重力変形によるトップリングが想定された。

### 3. 3 変形斜面と地質構造との関係

変形斜面と地質構造との関係を見ると，破砕帯付近とその延長方向に変形斜面が集中していることが分かった（図-5）。特に断層帯が斜面の変形に影響を及ぼしていると想定された。深層崩壊の危険性が高い重力変形斜面 a, b は斜面上部を，c では斜面裾部を断層帯が横断していた。重力変形斜面 d は，ユニット境界から派生する断層が斜面上部を横断することにより変形が生じたと想定された。

### 4. まとめ

ジュラ紀の付加体である美濃帯が分布する長野県辰野町を対象に変形斜面と地質構造との関係を調査した結果，深層崩壊の危険性が高い重力変形斜面は，付加体ユニット境界付近で，泥岩優勢の層準に発達する最大幅300mの断層帯付近に集中している事が分かった。今後，地質踏査の継続による地質構造の解明，および危険性が高い重力変形斜面における現地での斜面変動観測を実施予定である。

### 文献

- 片田正人，礪見博（1964）：5万分の1地質図幅 塩尻  
M. Chigira, C.-Y. Tsou, Y. Matsushi, N. Hiraishi and M. Matsuzawa（2013）：Topographic precursors and geological structures of deep-seated catastrophic landslides caused by Typhoon Talas, *Geomorphology*, Vol. 201, pp. 479-493.  
松島信幸（1995）：伊那谷の造地形史：伊那谷の活断層と第四紀地質，飯田市美術博物館報告書，p145.  
N. Arai and M. Chigira（2019）：Distribution of gravitational slope deformation and deep-seated landslides controlled by thrust faults in the Shimanto accretionary complex, *Engineering Geology*, Vol. 260, pp.105236.

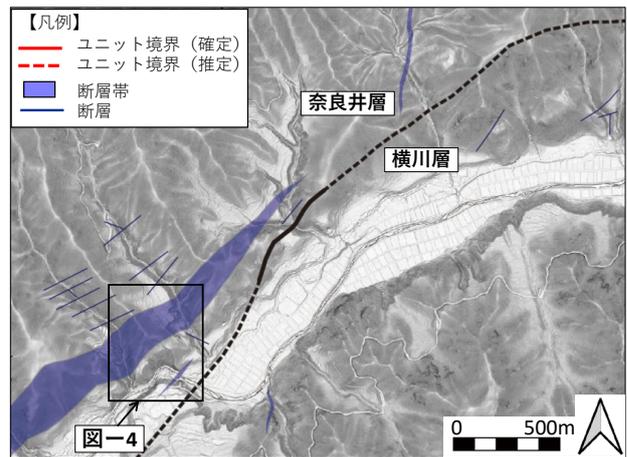


図-3 地質構造の調査結果（ガウジを伴う断層が連続するものを断層帯、連続しないものを断層とした）

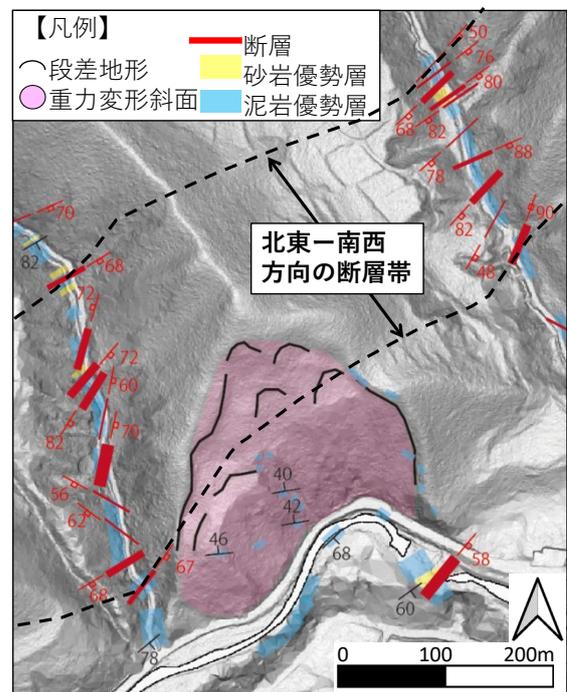


図-4 北東-南西方向の断層帯の例  
（図の範囲は図-3に示す）

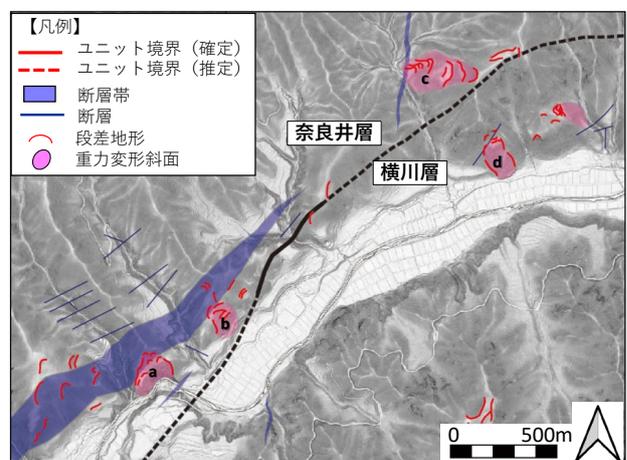


図-5 地質構造と変形斜面との関係  
（a～dは、深層崩壊危険斜面）

## 12. 水抜きボーリング工点検方法の種類と特徴について

### About the Types and Features of the Drainage Boring Inspection Method

○鈴木 孝明, 木村 耕治, 山根 佑太郎 (日本基礎技術(株))  
Takaaki Suzuki, Koji Kimura, Yutaro Yamane

#### 1. はじめに

近年、社会インフラの維持管理として、地すべり対策施設の点検が実施され始めている。地すべり対策施設のうち水抜きボーリング工点検方法の種類及び特徴の概略についてまとめるとともに、これまで実施した点検結果をもとに、孔内部の目詰まりを確認する2種類の点検方法から得られた情報の比較とそれぞれの特徴について報告する。

#### 2. 点検方法の種類とその特徴について

水抜きボーリングの一般的な点検方法を表-1に示す。そのうち孔内部の目詰まりを確認する手法は検尺棒計測、孔内カメラ調査の2種類である。

表-1 水抜きボーリング工の点検方法一覧

点検方法	概略
(1) 集水管孔口付近の目視調査	孔口部を露出させ、閉塞、破損、変形状況を目視で確認する。
(2) 排水量計測	個々の集水管の排水量を測定する。
(3) 検尺棒計測	検尺棒を使用し、集水管の延長を計測する。
(4) 孔内カメラ調査	カメラを使用し、孔内部の閉塞や破断等を直接確認する。
(5) 水質分析調査	孔内部の目詰まり、閉塞等の根本的な原因究明と今後の予測のために実施。

##### (a) 検尺棒計測

検尺棒計測は、検尺棒を挿入し、挿入可能深度を調査するものである。途中で挿入困難となった場合は、その深度とそのときの手応えを記録する。

検尺棒計測は、検尺棒のみで行えることから、準備が容易でかつ安価に実施できる点検方法である。しかし、目詰まりの確認は点検者の手応えで、感覚的なものであるため管の破損を見逃す可能性がある。

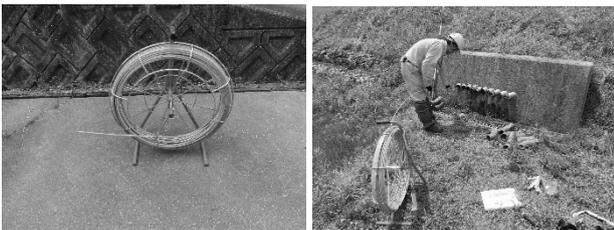


写真-1 検尺棒 (左) 及び計測状況 (右)

##### (b) 孔内カメラ調査

孔内カメラ調査は、孔口から小型のカメラを挿入し、水抜きボーリング孔内部の閉塞や破断等を直接目視で確認するものである。

孔内カメラ調査は使用する機材が高価であり、検尺棒に比べて機材の重量も重いことから、準備に手間がかかり、高価な手法である。また、孔内水が濁っている場合やカメラに土砂が付着した場合は映像が不鮮明となり(写真-3右)、孔内部の状況が確認できなくなることがあるため、コストに対して確実に成果が得られない可能性がある。



写真-2 孔内カメラ (左) 及び調査状況 (右)

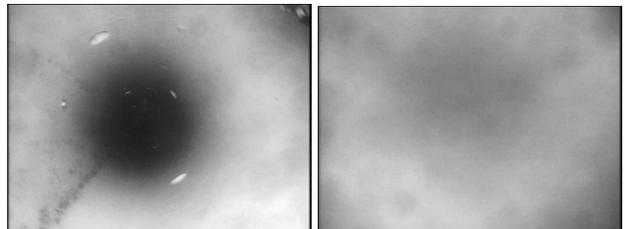


写真-3 孔内部の映像 (左: 正常, 右: 不鮮明)

表-2 に検尺棒計測と孔内カメラ調査に必要な機材及び各手法のメリット・デメリットをまとめる。

表-2 検尺棒計測、孔内カメラ調査の特徴

	検尺棒計測	孔内カメラ調査
使用機材	 ・検尺棒	 ・孔内カメラ ・モニター ・バッテリー (もしくは小型発電機)
重量	約10kg (100m巻, リール含む)	約15kg (60m巻)
メリット	・準備が容易である。 ・安価に実施できる。	・目詰まりの状況を映像で直接確認できる。
デメリット	・目詰まりの確認は点検者の手応えで感覚的なものであるため、管の破損を見逃す可能性がある。	・準備に手間がかかる。 ・検尺棒計測に比べて高価。 ・孔内水の濁り等により映像が不鮮明となる恐れがある。

### 3. 孔口と孔内部の目詰まり状況の関係性について

兵庫県内で農地地すべり対策として施工された水抜きボーリング工の点検データ<sup>1) 2) 3) 4)</sup>をもとに、水抜きボーリング工の孔口と孔内部の目詰まり状況の関係性について整理した。対象とした施設は、淡路市（64施設）、神戸市北区（22施設）、美方郡香美町（12施設）の計98施設である。

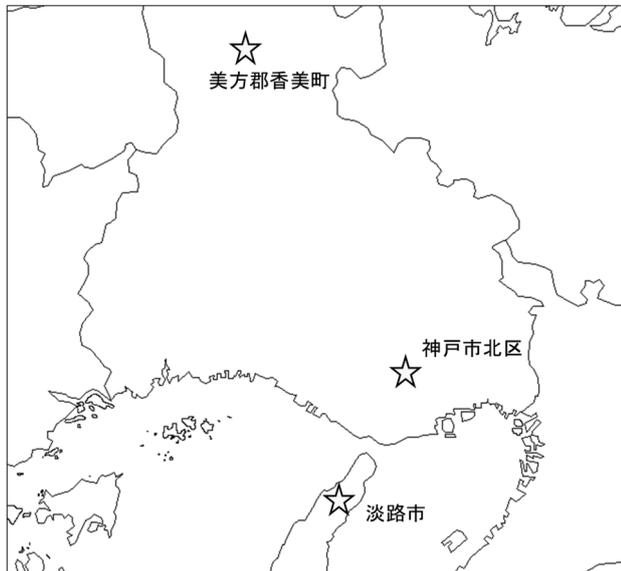


図-1 点検実施地域

表-3 各地域における点検実施施設及び点検項目

項目	(施設)			合計
	淡路市	神戸市北区	美方郡香美町	
点検施設数	64	22	12	98
目視による孔口部の目詰まり確認	64	22	12	98
検尺棒計測	64	22	12	98
孔内カメラ調査	0	3	12	15

点検した98施設のうち、孔口の目詰まりが認められたのは55施設であった。その55施設の中で、孔内部に目詰まりが認められたものは21施設（21.4%）であった。口元に目詰まりが認められたものの、孔内部の目詰まりが認められなかった施設は27施設（27.6%）であった。また、口元に目詰まりが認められたが、孔内部に検尺棒が挿入できず、孔内部の目詰まり状況が不明な施設が7施設（7.1%）であった。検尺棒が挿入できなかった原因として、施工時に孔口付近で塩ビ管を曲げていたためである。

一方、孔口の目詰まりが認められなかったが、孔内部に目詰まりが認められた施設は9施設（9.2%）であった。

以上の結果から、孔口と孔内部の目詰まり状況には相関関係は薄いものと考えられる。

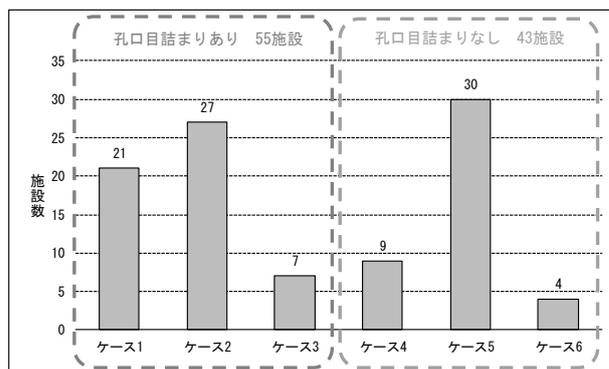


図-2 孔口部と孔内部の目詰まり状況

孔内カメラ調査を実施した15施設のうち、検尺棒計測で目詰まりが確認されなかったが、孔内カメラ調査にて目詰まり等の異常を確認した施設は4施設（26.7%）であった。異常の内訳は、植物根や土砂による目詰まり、塩ビ管の破損や継ぎ目部でのズレであった。この結果から、データ数が少ないものの、検尺棒計測のみでは孔内部の異常を見逃す可能性があることが分かった。

### 4. まとめ

水抜きボーリング工の孔内部の点検方法とその特徴についてまとめた。また、これまでの点検データより、口元と孔内部の目詰まり状況は相関性が薄いことから、点検時には孔口だけでなく孔内部の点検も必要だと考えられる。

### 5. 謝辞

本報告で用いたデータは兵庫県淡路県民局洲本土地区改良事務所、神戸県民センター神戸土地改良センター、但馬県民局豊岡土地改良センターより提供していただいた。ここに御礼申し上げます。

### 文献

- 1) 兵庫県（2018）：神戸地区 機能診断調査・個別施設計画策定業務報告書
- 2) 兵庫県（2020）：淡路地区 施設機能診断調査・個別施設計画策定業務報告書
- 3) 兵庫県（2021）：板仕野地区 地すべり防止施設調査設計業務報告書
- 4) 兵庫県（2021）：神戸地区 長寿命化対策詳細調査・設計業務報告書

# 13. 廃棄物混じり土による谷埋め盛り土の降雨履歴に伴う

## 崩壊と土石流の発生機構の検討

According to Mechanism of collapse and debris flow due to rainfall history of embankment mixed with waste that filled the valley

○打木弘一, 黄はお, 林三男 (基礎地盤コンサルタンツ), 大野博之 (地質工学社), 磯部有作 (IMAGEi Consultant), 八村智明 (日本環境衛生センター), 登坂博行 (地圏環境テクノロジー)

Koichi Utsugi, Hao Howan, Mitsuo Hayashi, Hiroyuki Ohno, Yusaku Isobe, Tomoaki Hachimura, Hiroyuki Tosaka

### 1. はじめに

2021年7月に熱海で発生した土砂災害は、2022年6月29日に開催された「第4回逢初川土石流の発生原因調査検証委員会」の資料<sup>1)</sup>によると、谷源頭部に不均質な少量であるが廃棄物の混じった建設残土により盛り土(もりつつ)をしたこと、盛り土の場合は降水時に地下水が集中しやすい場であること、崩壊部にパイピングホールが見られたこと、2および3日間雨量が盛り土以降過去最大であったことから崩壊が発生し、複数回の土石流が段波となって流下したことが報告され、当初筆者らが推定した崩壊機構と概ね同様であった。そこで筆者らは豪雨履歴に伴う自然および盛り土斜面崩壊は、単に地下水位上昇による有効応力の低下だけでなく、地下水圧による限界水圧の低下と斜面の内部強度低下と考え崩壊機構について考察した。

### 2. 熱海の盛り土崩壊と土石流発生機構

#### 2-1. 盛り土材料の特殊性

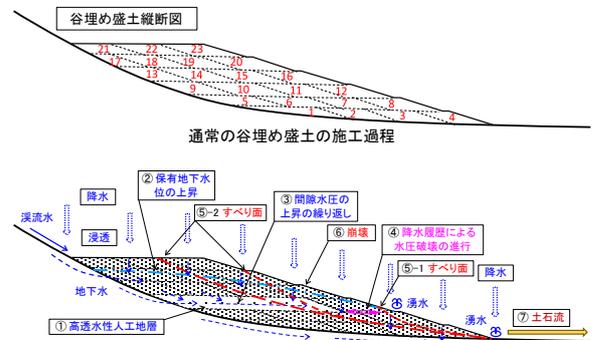
構造物解体等に伴う地盤掘削では、廃棄物混じりの土砂が発生しやすく含有する人工異質物が多ければ廃棄物として最終処分場で管理されるが、少なれば異質物が混じるものの盛り土等の地盤材料としての利用を妨げていない。一方、主に残土処分を目的とした「残土条例」では、盛り土材料の有害性や盛り土高さ等の制約があるものの盛り土する場の規制はなかったが、令和4年3月1日に宅地造成等規制法を抜本的に改正して、土地の用途にかかわらず、危険な盛り土等を包括的に規制する通称「盛り土規制法」が、令和4年5月27日に公布され1年以内に施行される予定になっている。

廃棄物混り土のうち、とくに細粒・細片化した廃棄物は、完全に除去することは処理コスト等から難しく、その残渣は、異質物混り土となり搬出現場ごとに粒度、含水、含有異質物の種類や量が異なり地盤材料としての品質が異なる。処分目的の異質物混り土の谷埋め盛り土は、多くの搬出先により異なる品質の材料が順次搬入され敷き均し盛り立てるため、盛り土の密度管理が難しく多様な透水性地盤となるものと考えられる。

#### 2-2. 推定される崩壊と土石流発生機構

不均質な盛り土構造のうち、図-1にしめすように盛り土内部に高透水性の材料が層状に取り込まれた場合

は、降雨に伴う保有水や盛り土基盤から供給された地下水等により盛り土内に貯留しやすくなるものと考えられ、その盛り土は長年の降水履歴によりしだいに盛り土内部が破壊(限界水圧の低下)され不安定化し崩壊に至る可能性がある。さらにこのような崩壊が谷埋め盛り土で発生すると多量の保有水が盛り土材とともに流出し土石流の段波となって流下しやすくなる。



推定される高透水性人工地層を挟む盛り土の降雨履歴に伴う不安定および崩壊過程  
図-1 廃棄物混じり土による谷埋め盛り土の施工過程とその不安定化の要因の一例

### 3. 豪雨履歴による盛り土内部の水圧破碎と崩壊機構

豪雨履歴による斜面崩壊の研究の一つとして凝灰質砂質堆積軟岩を基礎岩盤とする既設ダム調査において同一孔内区間で最大圧力に達しない2回のルジオン試験を行い、限界圧力が1回目に比べて2回目は低下した経験から図-2のような水圧破碎機構を推定し豪雨履歴による限界水圧の低下に伴う斜面崩壊機構の研究<sup>2)</sup>がある。これを踏まえ固結の違いによる水圧破碎過程の違いとして図-3を想定し、豪雨履歴に伴う盛り土崩壊機構として図-4のように考えた。

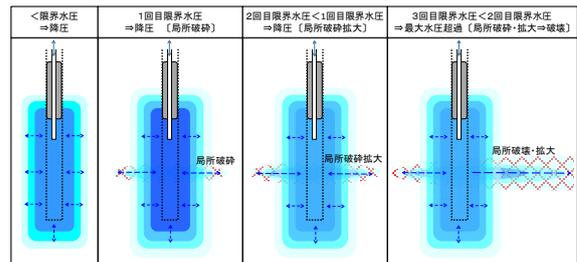


図-2 ルジオン試験による砂質堆積軟岩の水圧破碎  
盛り土の水圧破碎では、土砂粒子間の水圧上昇によるかみ合わせの解除および細粒分流出による地中パイ

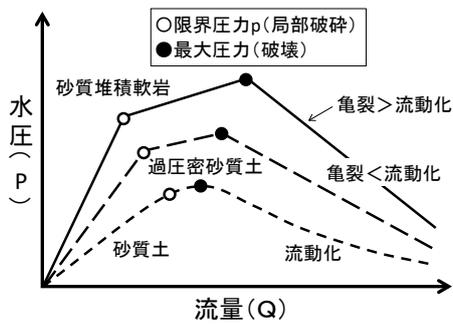


図-3 固結の違いによる水圧破碎過程  
ほとんど回復しない可能性がらある。

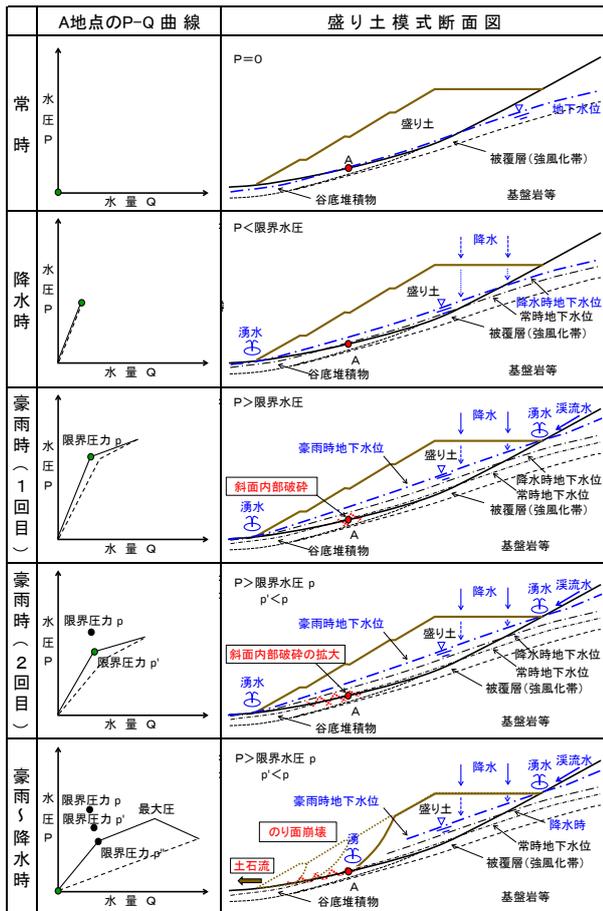


図-4 豪雨履歴による水圧破碎と崩壊機構

#### 4. 豪雨履歴を考慮した斜面・盛土の安定

自然斜面や盛土斜面の崩壊機構は、図-5 にしめす

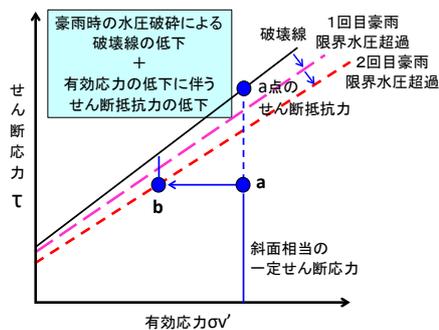


図-5 豪雨履歴による破壊線の段階的な低下および有効応力の低下による斜面および盛土等の崩壊機構の概念図

プの形成により地盤の強度が低下すると考えた。また解除された土砂粒子間のかみ合わせは、水圧が下がっても

しやすくなるものとする。これに廃棄物が混じると廃棄物の種類（柔軟性、透水性、腐食性等）と混入量により安定性は異なるが谷部盛土では、豪雨履歴に伴いいずれにしても不安定化していくものとする。

#### 5. 異方圧密注水三軸試験

##### 5-1. 試験内容

豪雨履歴を想定した盛り土の強度低下を検証するために表-1 にしめす材料の供試体を 12 ケース作成し、飽和供試体を用いて原位置の応力状態を想定した異方圧密を行い、雨水浸透を模擬した供試体内部の水圧を上げて破壊する異方圧密注水三軸試験を行った。

表-1 試験ケース

項目	区分	試験ケース												
		A-1	A-2	A-3	B-1	B-2	B-3	C-1	C-2	C-3	D-1	D-2	D-3	
供試体 (φ50×100) 材料	珪砂5号	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
	カオリン(10%)				○	○	○							
	廃棄物 (PP-100片)							○	○	○	○	○	○	○
異方圧密注水三軸試験	限界水圧超過履歴	なし	1回	3回	なし	1回	3回	なし	1回	3回	なし	1回	3回	

##### 5-2. 試験結果

この報文ではケース A-1~2 について報告する。珪砂の供試体では、限界水圧を超える注水の繰り返し履歴 1 回では、図-6 にしめすように内部摩擦角が低下することを確認した。繰り返し履歴が増すとさらに内部摩擦角は低下する可能性がある。

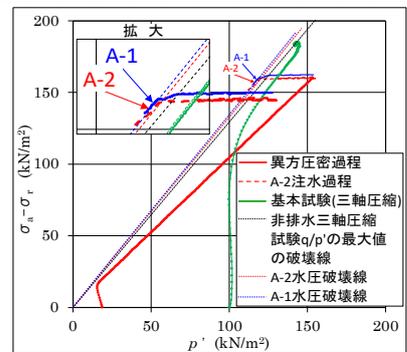


図-6 異方圧密注水三軸試験結果  
内部摩擦角が低下することを確認した。繰り返し履歴が増すとさらに内部摩擦角は低下する可能性がある。

#### 6. まとめ

不均質な内部構造の盛り土の谷部埋立では、豪雨履歴等により盛り土内部がしだいに強度低下し過去の最大雨量以下でも崩壊に至る可能性があり、さらに保有水の流出で土石流となる可能性もあるため古い盛土等の安定性を再評価する必要がある。

#### 謝辞

基礎地盤コンサルタント (株) の山田慎一氏、佐竹秀一氏、若杉謙氏には室内試験等での協力を、また日本応用地質学会の廃棄物処分・利用における地質環境に関する研究小委員会 (第四期) では、議論および助言をいただいた。ここに厚くお礼申し上げる。

#### 引用文献

- 1) 静岡県 HP (2022): 7.最終報告書 (案), 第4回逢初川土石流の発生原因調査検証委員会
- 2) 打木弘一 (1989): 斜面の風化状況と表層崩壊における地下水の役割についての検討, 日本地質学会第96年学術大会講演要旨, pp.679.

# 14. バランス断面法の考え方を取り入れた弾塑性有限要素法による

## 岩盤地すべりの解析

Analysis of Rock Slopes by Elasto-Plastic Finite Element Method incorporating Balanced Cross Section

○瀬崎章太郎 (環境地質), 岡安祥克 (群馬大学), 若井明彦 (群馬大学),  
小坂英輝 (環境地質), 稲垣秀輝 (環境地質)

Shotaro Sezaki, Shoma Okayasu, Akihiko Wakai, Hideki Kosaka, Hideki Inagaki

### 1. はじめに

近年、豪雨による斜面崩壊が多発しており、表層崩壊のみではなく岩盤地すべりのような深層崩壊の発生も増加している。深層崩壊が発生する箇所を予測するには地すべり地形に至る前の斜面地形が重要であり、その内部構造を把握する必要がある。

しかし、内部構造を把握し、岩盤斜面の変形の進行度を評価するには、ボーリング等の調査を行う必要があり、増加する斜面災害に対応するには時間と技術が必要になる。岩盤地すべりのトップリングのような重力変形からすべり面形成に至るプロセスは、構造地質学で発達した幾何学的解析ツールであるバランス断面法によって再現可能となりつつある<sup>2)</sup>。

一方、有限要素解析の進展も近頃目覚ましく、Lagrange 法による大変形問題の解析も可能となり、地すべりの数値シミュレーションも現実味をおびたものとなってきた。筆者らは、岩盤斜面のすべり面形成前後を含めたプロセスを幾何学・力学的に把握することを目的とし、バランス断面法による岩盤斜面変形の変形プロセスを弾塑性有限要素法 (以下、弾塑性 FEM) に適用した岩盤解析手法の開発を行った。

本研究では、バランス断面法のプロセスを適用した改良弾塑性 FEM を用いて、岩盤変形様式のうち流れ盤斜面で座屈褶曲、受け盤斜面でトップリング変形の解析を行い、バランス断面法により得られる斜面変動の再現を試みる。

### 2. バランス断面法の岩盤地すべりへの適用

バランス断面法は、変形前後の地層の長さ・厚さが不変、あるいは面積が一定であると仮定して断層を作図することで、地表の変形形状と断層やすべり面との関係を示すことが可能な幾何学的な手法であり、Suppe<sup>3)</sup>により体系化されている。小坂<sup>2)</sup>は断層による変位地形を地すべり地形に適用させ、斜面内部のすべり面と斜面地形の関係を流れ盤斜面と受け盤斜面を用いてバランス断面法で表現した。

その結果、流れ盤斜面では、座屈褶曲の主な面は、上部、中部、底面に認められ、ずれは中部から底面にかけて大きく、軸面の傾斜角は頭部で大きくなるという特徴を示した。受け盤斜面では、変形部の形状や変形の程度に応じて高角度な面に沿ってずれや隙間が生じ部分的に変形面の底部に沿ってすべり面が形成された (図-1)。

これによりバランス断面法は、岩盤斜面での変形程度を把握することに有用であることが示された。本研究では、このバランス断面法の作図プロセスを弾塑性 FEM で再現することで、より迅速な斜面内部の構造と力学状態を把握できるとして、その改良に取り組んだ。

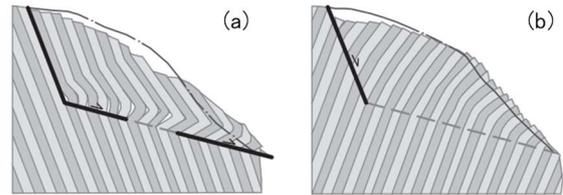


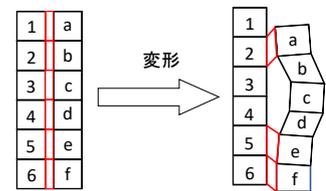
図-1 バランス断面法による流れ盤斜面・受け盤斜面の変形形状  
(a)流れ盤斜面(b)受け盤斜面

### 3. バランス断面法を取り入れた弾塑性 FEM

本研究では、図-1 に示すような節理の発達した岩盤斜面を対象とし、既存の弾塑性 FEM 解析コードを改良して、バランス断面法による解 (変形性状) を再現することのできる解析手順の開発を試みた。バランス断面法では変形前後の長さ・厚さが不変であるため、変形の進行に伴いすべり面や節理面に沿ってずれや隙間が生じる。従来の弾塑性 FEM では、要素間を移動させる大変形やずれや隙間を表現することが出来ない問題がある<sup>4)</sup>。

そこで本研究では、要素群間の接触の問題に対し、要素群同士の接近時に要素群間に接触するための要素 (以下、接触要素) を生成する手法を採用した。ここでの接触要素は、隣り合う要素同士が設定した接触判定値より接近した際に要素間に生成、判定値より離れた場合は削除される。そして、地層のずれや剥離を表現し、かつ接触の際の力の伝播を表現する要素である (図-2)。また各ステップにメッシュの更新を行い次のステップに伝達させている。これにより、従来の弾塑性

FEM では表現できなかった、大きく変形が生じる場合の要素群同士の剥離や再接触に伴う接触要素の生成、削除に対応が可能になる。



1-a削除 2-b削除 3-c削除 4-d削除 2-a生成

図-2 接触要素の生成・削除

### 4. 斜面モデルの解析

本研究では、よりバランス断面法で表現される岩盤変形に近づくため、バランス断面法で作図された流れ盤、受け盤斜面 (図-1) を基にそれぞれの斜面モデル (図-3) を作成した。底部すべり面は要素間

に生成される接触要素として設定し、変形に伴ってすべりが生じるようにした。また、高角度の節理にも接触要素を挿入し、変形に伴うずれや隙間を再現する。斜面モデルには、長期で発生する重力変形の時間を考慮するため、斜面高さに応じた斜面上部からの鉛直下向きの強制外力を1ステップごとに0.01kNをかけた。

また、斜面内部の力学的状態を把握するために、変形図と、斜面内部の等方応力成分、最大せん断ひずみ、せん断応力を Gauss 点毎に計算してコンター図を作成した。等方応力分布は、自重による影響を受けるため、自重による垂直応力を引いたものを使用した。

その結果を図-4、図-5に示す。解析の結果、図-4に示す流れ盤斜面のモデルでは、バランス断面法で作図されたのと同様に、底部すべり面を境に上下でずれが生じた箇所の上で緩斜面が形成された。また斜面末端部では座屈褶曲が発生している。これらの変形は、流れ盤斜面のモデルで、バランス断面法が示す変形が再現されたことを示している。等方応力成分

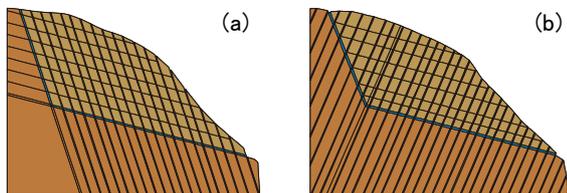


図-3 解析斜面モデル  
(a)流れ盤斜面(b)受け盤斜面

は、岩盤変形部の圧縮側で正、引張側で負の値を示し、せん断変形が生じている斜面末端底部では0に近い値となり、具体的な応力分布が明らかとなった。最大せん断ひずみは斜面末端側で大きく、頭部側にかけて小さくなる。せん断応力成分は逆に末端側でやや小さく、頭部側にかけて大きくなる。これは、底部すべり面上端側で座屈変形が生じ、大きなせん断変形が生じているためと考えられ、変形図と整合した分布傾向を示している。

図-5に示す受け盤斜面のモデルにおいても底面すべり面ですべりが発生している箇所の上で低崖群が形成され、頭部では滑落崖の形成が確認された。斜面中央部では、底部のすべりに合わせてトップリングが形成されている。受け盤斜面においても、底部すべり面を設定することによって、バランス断面法で示した岩盤変形を、同位置で形成することが可能になった。

等方応力分布は短冊状の変形部の圧縮側で正、引張側で負の値を取り、末端側に向かうにつれトップリングの発生に伴い正の値を示している。最大せん断ひずみは斜面末端側の底部に集中し、頭部では小さくなる。これは斜面末端付近でトップリングが発生し、頭部付近のすべり面では底部すべりが発生している事と整合的である。

せん断応力分布についても、変形部底部すべり面で大きくなる事が確認されており、いずれも変形に伴う応力分布傾向を示している。

以上のように、バランス断面法で作図された、斜面における岩盤変形に対して、本研究の弾塑性 FEM 解析は変形部の応力・ひずみ分布を示すことを可能にした。

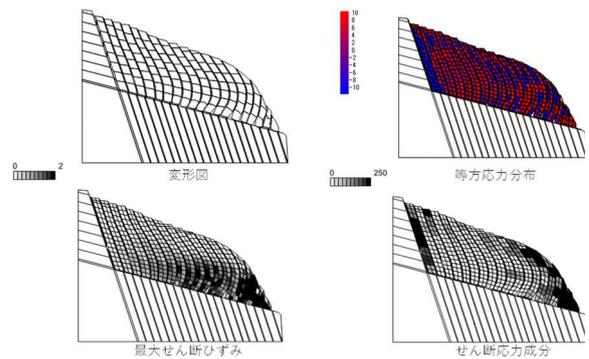


図-4 流れ盤斜面における解析結果  
変形図(左上)等方応力分布図(右上)  
最大せん断ひずみ(左下)せん断応力成分(右下)

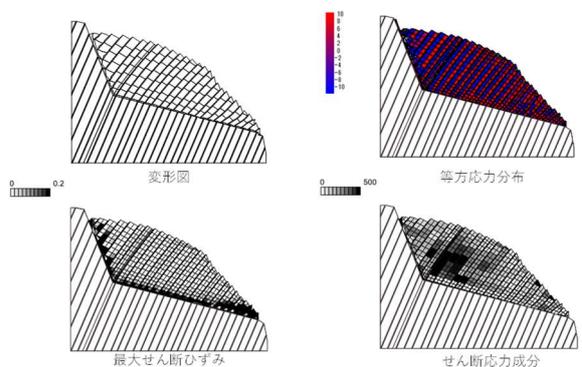


図-5 受け盤斜面における解析結果  
変形図(左上)等方応力分布図(右上)  
最大せん断ひずみ(左下)せん断応力成分(右下)

## 5. 考察

本研究により、バランス断面法で示される岩盤変形を、流れ盤・受け盤斜面の両方で弾塑性 FEM 解析により変形メカニズムを検討でき、その変形を再現することが可能になった。実斜面では、斜面構造が複雑になるため、今後は、斜面変形が明らかになっている他の斜面をモデル化し、その再現を行い、斜面変動予測ツールとしての本研究の弾塑性 FEM を向上させたい。今後は、実際の岩盤斜面での解析と併せて、表層崩壊を含めた様々な斜面変動解析に適用できるように研究開発を進めていく。それによりすべり面形成前後の斜面内部の変形過程を明らかにし、斜面災害の防災に約立たい。

## 参考文献

- 1) 大八木規夫(2004): 地すべり構造, 地すべりに関する地形地質用語委員会編「地すべり—地形・地質的認識と用語」, 日本地すべり学会, pp29-45.
- 2) 小坂英輝(2015): バランス断面法による岩盤斜面の初生地すべり地形とその変位率, 応用地質, Vol.56, No.5, pp.219-229.
- 3) Suppe.J(1983): Geometry and kinematics of fault-bend Folding, Amer. Jour. Sci., 283, pp.684-721.

# 15. マルチモーダル深層学習を用いた 2011 年台風 12 号による 深層崩壊の山体重力変形抽出

Verification of deep-seated gravitational slope deformations at the location of Deep-seated landslide using multimodal deep learning.

○菊地 輝行(J-POWER 設計コンサルタント), 西山 哲(岡山大学大学院), 高橋 謙一(電源開発)

Teruyuki Kikuchi, Satoshi Nishiyama, Kenichi Takahashi

## 1. はじめに

深層崩壊発生箇所を予察して災害を軽減するためには、過去の崩壊事例を理解し、同じ事象が発生した場合に備える事が重要である。今回の深層学習の目的は、深層崩壊特有の山体重力変形を自動認識する可能性を見極めることである。

本研究は、仮説として、“崩壊した箇所が類似した地形を有しているとすれば、その地形は同規模の条件下で次回崩壊する”とした場合、発生した崩壊発生前の地形を多数学び、周辺において同じ地形を見つけることで、次回同じ事象が発生した場合に崩壊する箇所を予測することができるとし、ケーススタディを試みた。

## 2. 災害発生箇所と地形地質

2011年9月2日から5日にかけて西日本を横断した台風第12号は、紀伊山地に2000mmを超える降雨をもたらし、Chigira et al (2013)によれば50箇所以上の深層崩壊が発生した。この地域の地質分布は、紀伊半島西部の四万十帯であり、御坊―萩構造線によって、白亜系の付加コンプレックスからなる北帯と主に古第三系の付加コンプレックスからなる南帯に区分される。本研究の対象となる十津川上流域は、北帯に相当し日高川帯と呼ばれ、ENE-WSW方向に帯状配列をなす5つの層―北から花園層、湯川層、美山層、竜神層、丹生ノ川層に区分される。

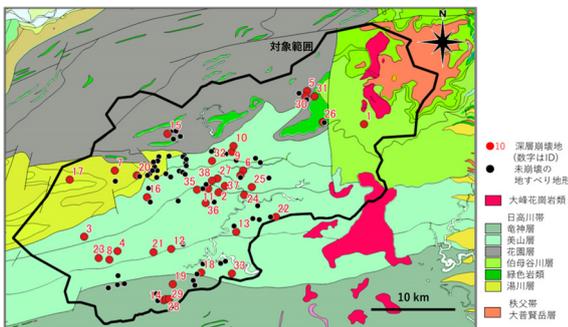


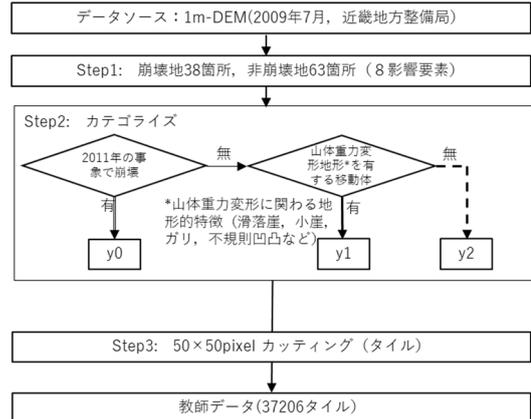
図-1 調査位置と教師データに用いた崩壊・非崩壊箇所（産総研シームレス地質図に追記）

## 3. データセットと深層学習

### 3.1 カテゴリライズ

崩壊の発生箇所は、奈良県災害データベース(2012)で確認した1,000m<sup>2</sup>以上の崩壊面積を有する38箇所

### (1)教師データ作成



### (2)モデル構築

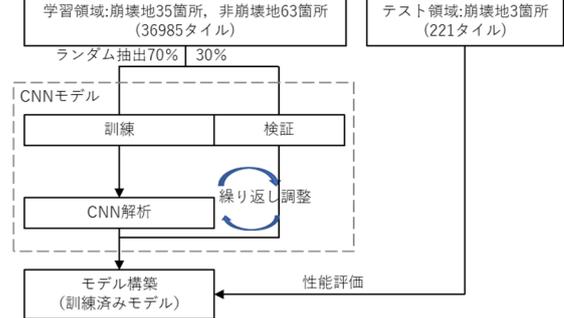


図-2 深層学習の作業フロー

である(図-2参照)。この領域は崩壊(y0)とカテゴリ分けした。次に、崩壊発生箇所の周縁には、非崩壊でありながら山体重力変形の地形的特徴を有する箇所が認められた。この地形を非崩壊(y1)とし63箇所を領域抽出した。この領域外のカテゴリとして崩壊に関係しない地形(y2)を設定し、合計3つのカテゴリとした。

### 3.2 教師データの作成とモデルの構築

山体重力変形を対象とした深層学習による画像認識は、多数ある画像の中から正解を選ぶような単純な判別ではない。複雑な履歴を持つ地表面の特徴量の違いは、一枚の画像では判断できない可能性が有る。そこで本研究は、同じ座標を有する画像に対して異なる解析図(影響因子と呼ぶ)を用いた。影響因子は、山体重力変形を表現可能な画像の種類で、以下の8種類からなる。①傾斜量, ②固有値比, ③曲率, ④地上開度, ⑤地下開度, ⑥地形的湿潤指数, ⑦ウェーブレット, ⑧標高である。これらは、北東角を原点として50x50pixelのjpg画像(以降タイルと呼ぶ)に切り分けた。

50pixel は 50m に相当し、微地形を判読するうえで最低限の範囲を含んでいると判断した。各タイルは、90°に回転させたものと、鏡像反転させたものも作成した。最終的な崩壊(y0)タイルは 20,651、非崩壊(y1)、これら以外(y2)についても同様の処理を行い、タイル数は、4,041 枚、12,293 枚となり、合計 36,985 枚を使用した。

### 3.3 畳み込みニューラルネット (CNN)

CNN は第一に、入力画像の全体に対して畳み込み層でフィルタ処理を行って特徴量を算出する。第二に、プーリング層で画像の解像度を下げる処理を行う。複数のデータを活用する方法は、マルチモーダル手法と呼ぶ。モデル構築は、訓練と検証からなるブートストラップ法を用いた。訓練では、タイルの 7 割を用いて、重みづけパラメータを調整しモデル構築を行う。次に検証は、タイルの残り 3 割を使い検証する。すなわち、新たに与えたタイルが正しく判断されるか模擬試験を行いながら各パラメータおよび層構造の再構築を行う。

## 4. 結果

学習済みモデルの評価は、混同行列で示す。混同行列は、多クラス分類の結果をまとめたマトリクスで、機械学習モデルの性能を測る指標として使われる。表-1 に示すように崩壊地において再現率は、それぞれ説

表-1 学習済みモデルの精度評価(混同行列)

Data Type	予測値			再現率
	y0	y1	y2	
真値 y0: 崩壊	5811	178	80	95.7%
y1: 非崩壊	391	658	220	51.9%
y2: 崩壊に関係しない地形	464	236	3058	81.4%
正解率(Accuracy)	0.856			

明変数項目ごとに 95.7%, 51.9%, 81.4%, 全体の正解率 (Accuracy) は 85.6% となった。(y'1) の再現率が低いのは、教師データの数に依存したと考えられる。(y'0)(y'2) については、良好な再現率を得ることができた。

## 5. まとめ

“2011 年深層崩壊と同様の地形を有している箇所” は、解析結果を周囲の 5 タイル分 (直径 250m に相当) 平均化させ地すべり感受性マップとして図-3 に示した。全体的には、一定の標高より上位で(y'0) が判定されている傾向がある。この傾向は、Tsou et al (2017) が主張する遷急線の緩斜面を中心に深層崩壊が発生していることと整合する。教師データである赤枠 7 箇所のうち赤谷 (ID35) と長殿谷 (ID37) は、尾根から河床まで、これらの地形が連続している。大規模な深層崩壊事例は、尾根から河床まで、崩壊と学習した地形が連続していることが一つの指標となる。一方、新規に(y'0) となった箇所は、誤判読となるが、“崩壊する可能性のある箇所” として今後の崩壊発生候補とできる。

## 文献

- 1) Chigira, M., Tsou, C.Y., Matsushi, Y., Hiraishi, N., Matsuzawa, M. (2013): Topographic precursors and geological structures of deep-seated catastrophic landslides caused by Typhoon Talas, *Geomorphology*, Vol.201, No. 1, pp.479–493.
- 2) Tsou, C.Y., Chigira, M., Matsushi, Y., Hiraishi, N., Arai, N. (2017): Coupling fluvial processes and landslide distribution toward geomorphological hazard assessment: a case study in a transient landscape in Japan. *Landslide*, Vol.14, pp.1901–1914.

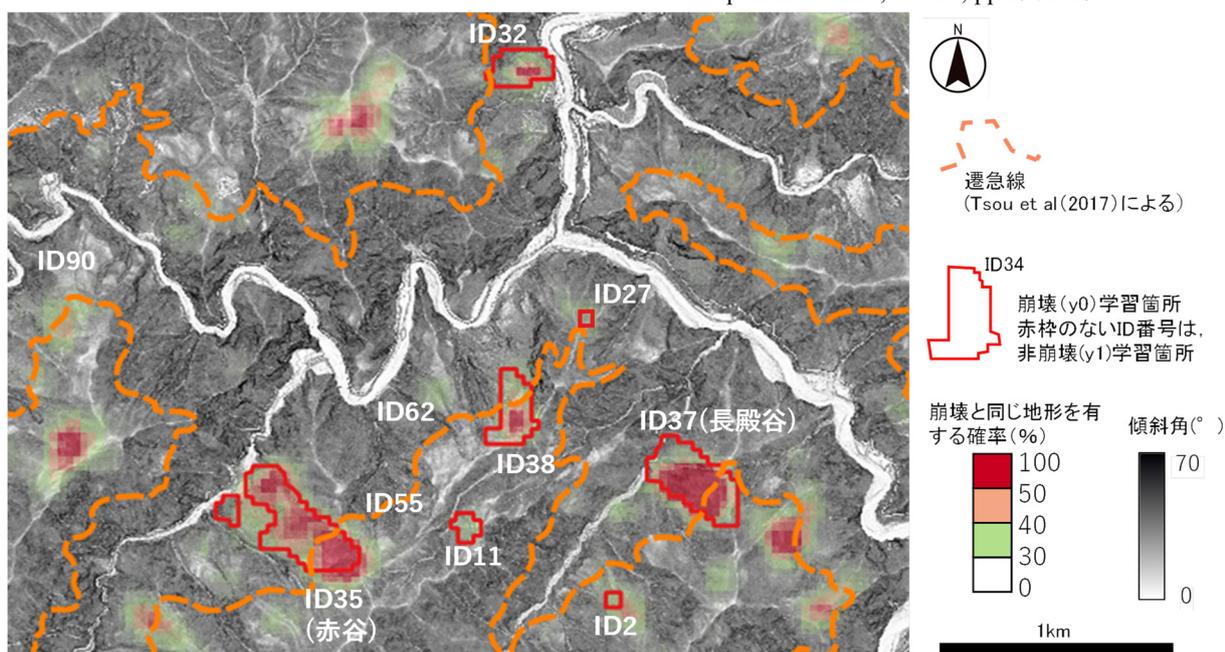


図-3 地すべり感受性マップ(Landslide susceptibility map). 背景は 2009 年撮影の崩壊前 DEM (近畿地方整備局) を用いた傾斜量図。赤枠は教師データに用いた範囲で、それ以外は未知領域の解析結果である。

# 16. 岩盤の風化と土層の発達および表層崩壊の発生に関する水文地形プロセスモデリングと斜面災害予測

Hydro-geomorphological modeling of bedrock weathering, soil formation, and rainfall-induced shallow landsliding for dynamic hazard mapping toward disaster mitigation

○松四雄騎（京都大学）

Yuki Matsushi

## 1. はじめに

湿潤変動帯における山地斜面では、風化岩と土層からなる風化帯が発達し、それを生存基盤とする森林生態系の生物相と合わせて、地表近傍における気圏・水圏・岩石圏・生物圏の境界域（Critical zone）を構成している。地表近傍境界域では、岩盤の物理・化学風化による風化帯の形成、土粒子の生成と輸送・集積による土層の発達、森林の成立に伴う植物根系の伸展、降水の浸透による地中水分変動など、多様な時空間スケールでの水文地形過程が生じている。これらが素因条件と誘因作用をつくりだし、豪雨時には、表層崩壊のような地盤の破壊と土砂移動を伴う地形変化が生じる。表層崩壊の発生場所・崩土量・降雨閾値の三要素を予測するには、地表近傍境界域システムにおける要因と過程の相互作用をそれぞれ定量化・定式化し、カップリングさせて、現象を一定以上の確度と精度で再現できるモデルが必要となる。本発表では、そのような水文地形学的モデリングの試みを提示する。

## 2. 研究方法

西南日本における近年の発災地を対象として、現地踏査と水文観測、採取した試料の同位体分析と土質試験、空間情報解析などによって、モデリングとモデルパラメータの取得を進めた。選定した地域の基盤岩石は花崗岩類である。表層崩壊の発生位置や崩土量は、発災前後の航空レーザー測量ベースの地形モデルの比較および空中写真判読などから把握した。

表層崩壊の群発した各地域内の代表的な斜面を選定し、動的貫入試験や試孔の掘削により地盤の浅層構造を調べたうえ、風化岩や土層の試料を採取した。水文観測はテンシオメータや土壌水分計を用いて行い、降雨に対する間隙水圧や体積含水率の応答を調べた。また、斜面浅部における樹木根の分布を調べ、根系伸展による付加的粘着力による土層の補強効果をモデル化した。

次に、風化岩中の宇宙線生成核種  $^{10}\text{Be}$  を分析することで土層の生成速度を推定し、土層の厚みの空間分布データと合わせてソイルクリープによる土粒子の輸送係数を経験的に決定した。これに基づき、風化岩盤の厚みの空間分布を推定するとともに、谷頭凹地での崩

壊予備物質となる土層の長期的な発達をシミュレートした。

さらに、乱れの少ない試料を用いた水理・力学試験により、透水性、保水性、せん断強度定数などのパラメータを取得した。観測された間隙水圧応答を再現できる水文モデルを検討するとともに、発災時のハイエトグラフを入力とした水文斜面安定解析により、豪雨時の斜面ハザードの時空間変化を地理情報システム上で定量化・可視化した。

## 3. 結果および考察

時空間解像度を 5 m メッシュ、10 年ステップとした土層発達シミュレーションの結果、土層の厚みは、経時的に斜面尾根部で 0.5 m 以下程度の定常状態となる一方、谷頭凹地では時間とともに増大し、数百年程度相当の計算ステップを経過した時点で、実際の表層崩壊による削剥深相当の値が再現された。この土層の厚みを場の条件として、水文斜面安定解析を行うと、発災時の降雨ピークとほぼ同時に、流域内で樹枝状に不安定領域が広がる表層崩壊の一般的特徴を良く再現する出力が得られた。ただし、実際の表層崩壊場や生産土砂量をもっともよく説明できるパラメータと、実測パラメータとの間には系統的な残差があり、今後、パラメータ群の代表性の確保やモデルの改良による精度・確度の向上にはさらなる余地があるものと考えられる。

## 4. まとめと今後の展開

本研究では、表層崩壊をターゲットとした斜面ハザード評価のためのプロセスベースモデルのプロトタイプを構築することができた。モデリングとその検証および適用のフレームワークは図 1 に示すとおりである。このモデルでは、地形・地盤・植生踏査と水文観測および必要な試料の分析や土質試験を重ねることでパラメータを取得し、表層崩壊の発生状況をおおむね再現できる。そして、現在では、モデルの出力を、実際の発災事例と対照することで、予測の精度・確度を検証する段階に至っている。ただし、予測の精度と確度にはまだ向上の余地があり、モデルの改良や適用の方法論の検討も課題として残されている。

ここで開発されたモデルは、表層崩壊によって斜面から生産される土砂の量的評価に用いることができるものと期待される。しかし、実際に地域住民の居住地がある山麓部で被害が生じる過程には、河道部を流下した土石流や、河道の埋積による濁水の氾濫といった現象が関わってくる。斜面プロセスと河川プロセスのカップリングが今後の課題となる。

もう一つの重要な課題は、決定論的モデリングの出力を確率的な中長期予測へと転換してゆく方法論である。モデルに内在するパラメータは、観測や分析・試験のデータに基づいて経験的に決定されるものが多い。その値の時空間代表性を検証することは難しく、一定の不確かさを常に内包している。よって、将来予測においては、計算に用いるパラメータ値を不確かさの範

囲で変化させ、多数回のシミュレーションを実行するアンサンブル解析の実施が望ましい。さらには、検討対象地域における降雨の強度-継続時間-頻度曲線に基づき、同一再現周期ではあるが異なる波形を持つ降雨を入力として、生産土砂量を算出し、各再現周期での降雨イベントに対する土砂生産量超過確率を算出する方向性が実用的と考えられる(図2)。今後、人為的な気候変動に伴って、流域圏で土砂災害を発生させるような規模の降雨イベントの再現周期はより短くなってゆくだらう。すなわちこうしたアプローチより、流域からの土砂流出が将来どれほど増大する可能性があるのかについて、地形、地質、水文、植生環境を考慮したうえでの中長期的な定量評価が実現するものと予想される。

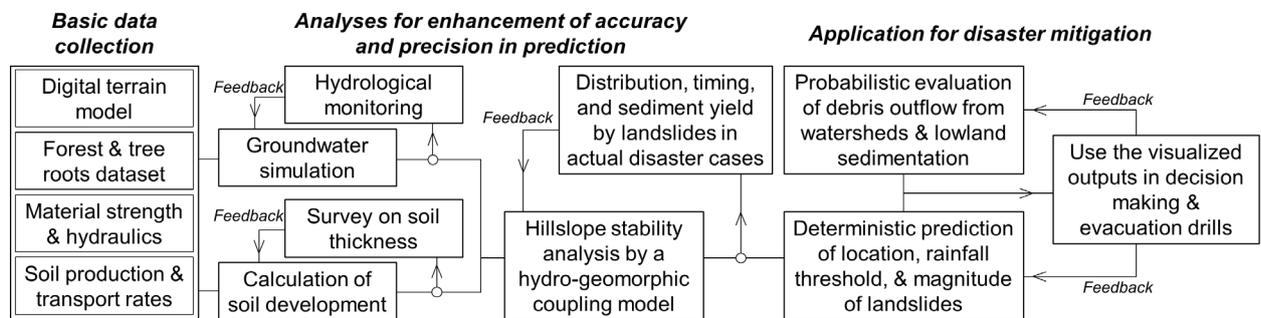


図1. 斜面ハザード評価システムのフレームワーク

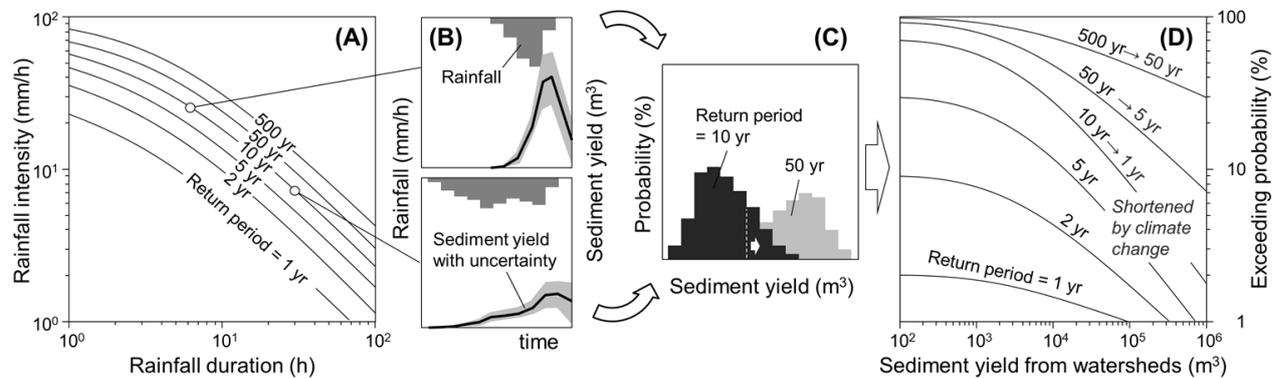


図2. 決定論的な土砂生産モデルを用いた土砂災害将来予測の確率論的評価の手順。

# 17. 花山カルデラに関連したスプレッド地形と地震の影響

## Spread-type Landslides related Hanayama Caldera and Influence of Earthquake

○高見智之 (国際航業)  
Tomoyuki Takami

### 1. はじめに

東北脊梁山脈には新第三紀末から第四紀に形成されたカルデラが多く分布することが知られている<sup>1)</sup>。その地質的特徴は、軽石質の大規模火砕流堆積物とカルデラ湖沼成堆積物の分布である。この組み合わせや火砕流噴火に先立つ降下軽石・火山灰が大規模地すべり地形形成の素因と考えられる。宮城県栗原市花山地区には、花山カルデラ<sup>2)</sup>と呼ばれる潜在陥没構造があり、鬼首カルデラ起源とされる火砕流堆積物に覆われている。付近には低角度すべり面が推定されるスプレッドタイプ<sup>2)</sup>の地すべり地形が分布する。その中で特徴的な地形から引張亀裂地形を認定し、地形地質条件を考察する。また、2008年と2011年の地震時に干渉SARにより解析された地表変動との関係を考察する。さらに、上流の栗駒山南麓カルデラなどに関連する周辺のスプレッド地形の特徴を比較検討する。

### 2. 対象地域の概要と研究方法

花山地区は宮城県北部にある地形的に明瞭な鬼首カルデラの東側に位置する。花山カルデラ付近は鬼首カルデラを起源とする大規模火砕流堆積物の池月凝灰岩(0.25Ma)<sup>3)</sup>に覆われていて地形の特徴はないが、重力異常からその位置と規模が推定されている(図-1)。カルデラの基盤は中新統細倉層(緑色凝灰岩類など)で、その陥没構造を埋めて花山沢層(砂岩泥岩凝灰岩)が分布する<sup>3)</sup>(図-2)。



図-1 プーゲー異常図とカルデラ位置図  
(地質図 Navi より作成・加筆)

国土地理院の公開する数値標高モデル(5mDEM)を用いて、ELSAMAPや地形断面図、鳥観図を作成した。

空中写真判読は、1947年米軍撮影写真、1976年国土地理院撮影空中写真を用いて地形判読を行った。これ

らの地形解析により、亀裂状の微地形やスプレッドタイプの地すべり地形を抽出した。さらに2008年岩手・宮城内陸地震の1年後の空中写真を用いて、変動の有無を確認した。

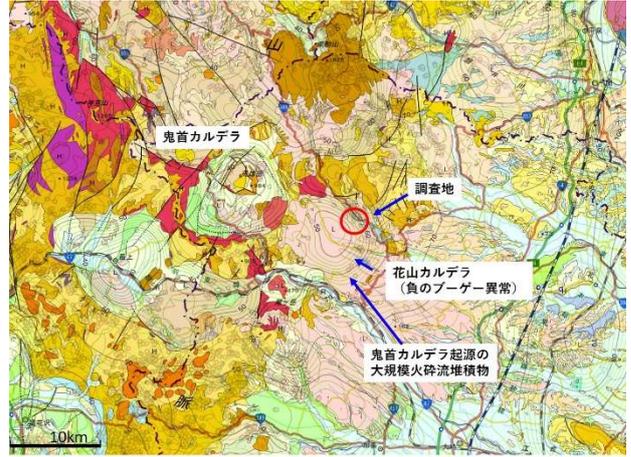


図-2 地質概要図  
(地質図 Navi より作成・加筆)

### 3. 結果

一迫川右岸には北西方向の多数の平行する小崖地形や凹地、線状凹地が分布し、北東方向の支尾根の分離が見られた(図-3)。また、シャープな亀裂状の微地形が見られた(写真-1)。これらの線状の微地形は北東への引張(展張)と考えられ、一迫川の作る谷に平行であり、想定される移動体の先端部は河川浸食による急斜面となっている(図-4, 5)。この特徴的な地形を花山スプレッドと呼ぶこととする。

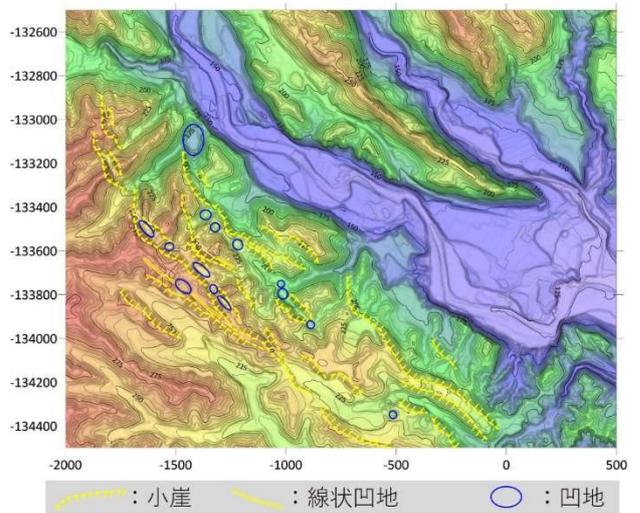


図-3 微地形分布図(基図は国土地理院 5mDEM より作成したカラー標高傾斜図 ELSA MAP)

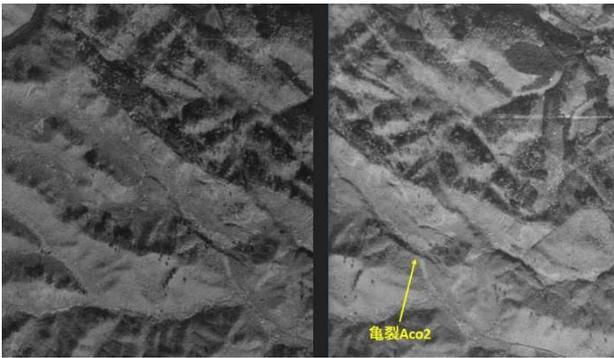


写真-1 亀裂状の小崖地形 (1947年米軍写真実体視)



図-4 北東方向から見た地形鳥観図

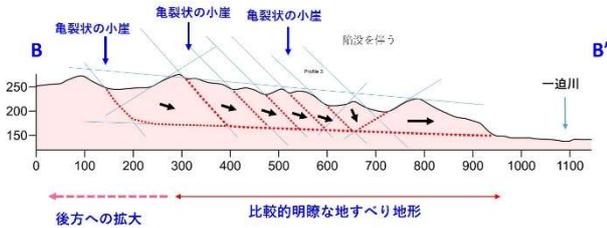


図-5 推定断面図 (地形は国土地理院 5mDEM より)

2009年撮影空中写真からは、花山スプレッド付近に斜面崩壊や地表陥没、地表亀裂などが見いだされた(図-6)。この地表変状は2008年地震によって生じたと考えられ、スプレッドの変動に関連した可能性がある。



図-6 2008年地震時と推定される地表変状

#### 4. 考察

花山地区の地すべり地形は、尾根を分離する平行亀裂群によるリッジとグラベンからスプレッドタイプの移動が想定される。地質構造からは、25万年前と推定される大規模火砕流堆積物(池月凝灰岩:低溶結)の下位に分布するカルデラ湖沼成堆積物もしくは降下火山灰を滑動面とする変動が推定される。シャープな亀裂状の微地形から、比較的新しい変動が想定される。

2008年岩手・宮城内陸地震および2011年東北地方太平洋沖地震時に、衛星データによる干渉SAR解析から花山カルデラに対応する変動が検出されている<sup>4)</sup>。花山地区スプレッドは検出された変動域内の北東縁に位置する。2009年に撮影された空中写真から花山スプレッド付近に崩壊、亀裂、陥没などの地表変状が見られた。この地表変状は、2008年地震時の変動と推定され、花山スプレッドの微小な変動を示している可能性がある。以上のことから、花山スプレッドは花山カルデラの地質構造に起因して、地震時に微小な変動が生じた可能性がある。

また、一迫川上流には類似のスプレッド型の地すべり地形が分布しており、類似の地形地質条件で過去の地震時に変動して形成された可能性がある。

#### 5. まとめ

花山地区の地すべり地形はスプレッドタイプを示し、尾根を分離する亀裂群が発達する。花山カルデラの湖沼成堆積物をすべり面として池月凝灰岩が北東方向に分離しつつ移動したと考えられる。2008年と2022年の地震時の干渉SAR解析から花山カルデラの変動が検出され、地震時に花山スプレッドで微小な変動が生じた可能性があり、2009年空中写真では付近で崩壊など地表変動が見られた。スプレッドタイプの地すべりは、地震時に変動する可能性があり、一迫川上流の類似のスプレッド地形は地震時に変動して形成された可能性がある。

#### 文献

- 1) 吉田武義・高嶋礼詩・工藤健・前田純伶・吉田圭佑・岡田知己・三浦 哲・高橋友啓・長橋良隆・片岡香子(2020): 東北日本弧における後期新生代の火成活動と地殻構造-内陸地震活動の背景-, 地学雑誌, Vol.129, No.4, pp.529-563.
- 2) 大八木規夫(2003): 日本におけるスプレッドタイプ地すべりの事例, 深田地質研究所年報, No.4, pp.133-153.
- 3) 土谷信之・伊藤順一・関 陽児・巖谷敏光(1997): 岩ヶ崎地域の地質, 地域地質研究報告(5万分の1地質図幅), 96.
- 4) 村上 亮.(2013): 4-4 干渉SARの発展の軌跡と今後への展望: みえる世界を拓げることの威力. SAR研究の新時代に向けて, 一般研究集会 24K-05.

# 18. 2018年の耶馬溪斜面崩壊に関する地下水についての研究

Study of groundwater influence on the occurrence of the 2018 Yabakei slope failure

○仙石南々海 (山口大学), 太田岳洋 (山口大学)

Nanami Sengoku, Takehiro Ohta

## 1. はじめに

2018年4月に大分県中津市耶馬溪町金吉区で発生した斜面崩壊は地すべり性の深層崩壊である。耶馬溪地域は主に下位より新第三紀宇佐火山岩類の凝灰角礫岩層、水中堆積物層、第四紀耶馬溪火砕流堆積物が分布し、金吉川沿いに地すべり地形が多数みられる(防災科学技術研究所, 2013)。2018年の崩壊は宇佐火山岩類の凝灰角礫岩と崩積土層の境界をすべり面として発生し、すべり面付近の宇佐火山岩類凝灰角礫岩は強風化を受けており、湧水も認められた(下川ほか, 2018)ことから、地下水による風化に伴う強度低下が崩壊の素因であることが考えられる。そのため崩壊斜面周辺における地下水による風化について検討する必要があると考えられる。

## 2. 研究手法

2018年の崩壊が発生した山体を調査地とし、集水ボーリングで得られた水や沢水の採水と水質分析、主に宇佐火山岩類層の露頭調査と岩石試料の採取、およびその試料の薄片観察、X線回折を行った

## 3. 結果

調査を行った山体の陰影図と調査地点を図1に示す。

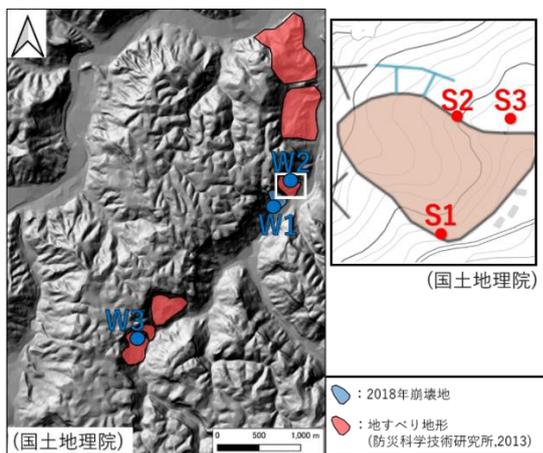


図1 調査地点マップ

### 3-1. 水質分析

W1~W3の地点で採水を行い、水質分析を行った結果を図2に示す。W1では2018年の崩壊斜面付近の宇佐火山岩類層中に設置された集水井からの排水を採水した。W2では崩壊地に近接する溶結凝灰岩露頭から標高約20m下の標高233m地点の崖錐堆積物から湧出する水を採水した。W3では崩壊地から約3km離れた標高約310m地点の沢水を採水した。

3地点すべてpH8以上のアルカリ性を示した。W1とW3はW2と比較してECが高い値を示し、ヘキサダグラムからもそれぞれのイオン濃度が高いことが分かった。またW1とW3を比較すると、W1は $\text{HCO}_3^-$ 濃度と $\text{Mg}^{2+}$ 濃度が高く、W3では $\text{Ca}^{2+}$ 濃度と $\text{SO}_4^{2-}$ 濃度が高いことが分かった。

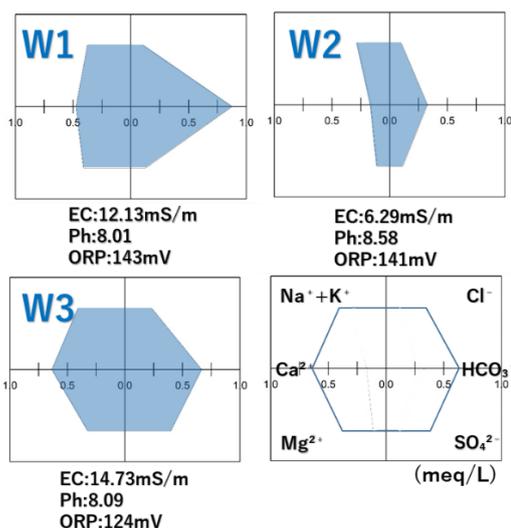


図2 水質調査結果

### 3-2. 露頭調査

本地域では崖錐堆積物が広く分布しているため宇佐火山岩類層の露頭が確認できる地点は少ない。2018年の崩壊斜面の北東側に隣接する地すべり地形を呈する斜面(防災科学技術研究所,2013)で確認された宇佐火山岩類層の露頭S1~S3の3地点についての観察結果を以下に記す。

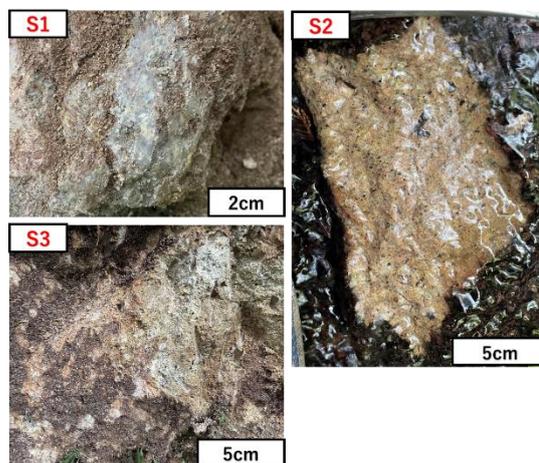


図3 露頭写真

S1(標高約174m)では図3に示すように粘土化していることが確認できた。約1×2mの露頭が全体的に粘

土化していた。この露頭の上部は崖錐堆積物が堆積しており、宇佐火山岩類層と崖錐堆積物の境界の直下が粘土化していると考えられる。S2(標高約 195m)には比較的新鮮な宇佐火山岩類の凝灰角礫岩が分布していた(図 3)。露頭写真は凝灰角礫岩の礫の部分と推定され、肉眼で角閃石と斜長石を確認することができた。S3では強風化を受け、土壌化が進んだと考えられる宇佐火山岩類層が分布していた。

### 3-3 薄片観察

S3で採取した凝灰角礫岩の礫部分の薄片を作成し、偏光顕微鏡による観察を行った。オープンニコルとクロスニコルの写真をそれぞれ図 4 に示す。

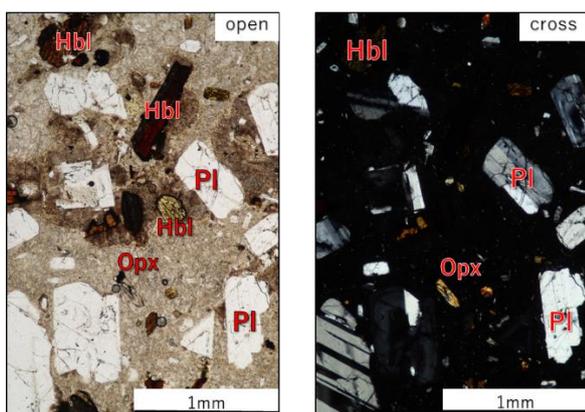


図 4 S2 地点凝灰角礫岩 顕微鏡写真

斑晶として斜長石(Pl)、角閃石(Hbl)、少量の斜方輝石(Opx)を含み、石基は火山ガラスから成るデイサイト～安山岩質の火山岩である。また、火山ガラスからなる基質部分はオープンニコルで球状の割れ目が発達しており、真珠状組織を形成していることが分かる。

### 3-4 X線分析

S1～S3の3試料について定方位法を、S2とS3の2試料については不定方位法によるX線分析も行った。定方位法による分析を行った試料についてはエチレングリコール処理と加熱処理(110℃)を施した分析も行った。

定方位法によるX線分析では、S1の粘土部分からモンモリロナイト、S2とS3の岩石からは緑泥石/モンモリロナイト不規則混合層鉱物が同定できた。モンモリロナイトについては、S1試料は1, 3~5次ピークまで見られ、S2とS3試料は1次ピークのみ確認できた。不定方位法による分析では、S2の比較的新鮮な試料ではアノーサイト((Na,Ca)(Si,Al)<sub>4</sub>O<sub>8</sub>)とアルバイト((Na,Ca)Al(Si,Al)<sub>3</sub>O<sub>8</sub>)が主に同定できた。一方風化が進んだS3の岩石ではクリストバライトが同定され、アノーサイトアルバイトも確認された。

## 4. 考察

水質分析結果より、W1とW3で採水した水は、アノーサイトおよびアルバイトに含有されるNa<sup>+</sup>,Ca<sup>2+</sup>濃

度が高いことから、宇佐火山岩類層と接することで主にXRD分析で確認できたアルバイトやアノーサイト成分が溶脱していると考えられる。XRD分析においても、強風化が進んだ凝灰角礫岩(S3)よりも新鮮なもの(S2)の方がアルバイトやアノーサイトのピークが明瞭かつ強度が高い。一方で、W2はイオン濃度が低く、岩石との反応があまり生じていないと考えられる。W2は溶結凝灰岩の露岩部直下の崖錐中の湧水であるため、溶結凝灰岩の冷却節理を短時間で浸透してきた雨水起源の湧水と推定される。

W1で採水した水は、宇佐火山岩類層に集水ボーリングが挿入されている(大分県北部振興局, 2018)ため宇佐火山岩類層内の地下水と考えられる。W3の沢水は宇佐火山岩類中の地下水と考えられるW1と類似した水質を示すことから、宇佐火山岩類層内の地下水の湧水を起源とする沢水と考えられる。2018年の崩壊発生の際、崩壊後の斜面において宇佐火山岩類が分布する標高約220mで湧水が確認された(下川ほか, 2018)ため、崩壊を考える上で同火山岩類中からの湧水は重要であると考えられる。

2018年の崩壊では宇佐火山岩類層と崩積土層の境界が強風化により粘土化しており、そこが地すべり面となっていた(下川ほか, 2018)。また、S1で見られた崖錐直下の粘土化している宇佐火山岩類層は湧水による風化によって形成されたものであると考えると、この山体の地下水は宇佐火山岩類層の上面を主に流動し、流動面はS1露頭のように粘土化していることが予測される。そのため今後は粘土化による強度低下を定量的に評価し、斜面崩壊の力学的検証を行う必要があると考えられる。

## 5. まとめ

2018年に大規模な斜面崩壊が発生した大分県耶馬溪地域で地下水による岩石の風化について調査した。その結果から、地下水による宇佐火山岩類層の凝灰角礫岩の風化が推定された。この風化による強度低下が2018年の崩壊の素因であったと考えられる。

## 文献

- 1) 大分県北部振興局(2018): 水位観測結果, 参照先 [https://www.pref.oita.jp/uploaded/life/2030665\\_26387\\_62\\_misc.pdf](https://www.pref.oita.jp/uploaded/life/2030665_26387_62_misc.pdf) 閲覧日(2022,1,29)
- 2) 防災科学技術研究所、清水文健・井口隆・大八木規夫(2007)「1:50,000 地すべり地形分布図」第28集 閲覧日,2022.1.30
- 3) 耶馬溪町金吉地区 山地崩壊原因究明等検(2018): 平成30年(2018年)4月に中津市耶馬溪町で発生した山地崩壊について 最終報告概要

# 19. 土石流とその後続流の到達距離と被害

The Runout Distance Analysis of a Debris Flow and a Subsequent Sediment Flow for Disaster Mitigation

小坂 英輝, 生沼 洋祐 (環境地質)

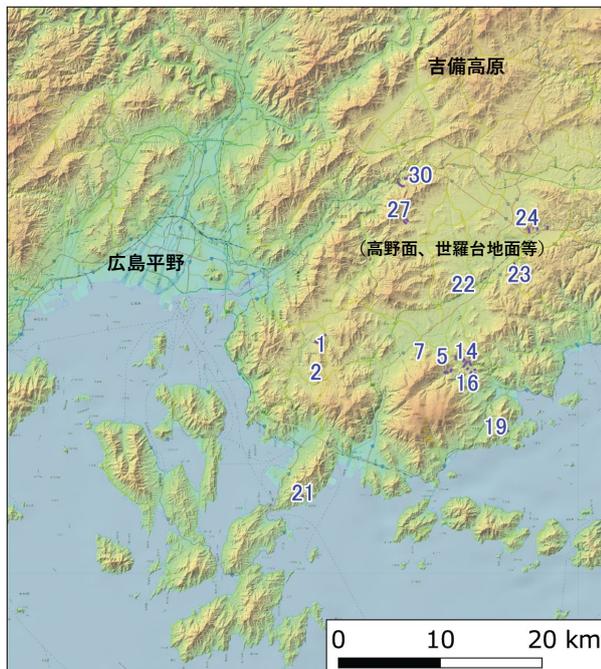
Hideki Kosaka, Yousuke Oinuma

## 1. はじめに

平成30年7月豪雨災害(西日本豪雨)では、豪雨に伴い土石流が多発した<sup>1)</sup>。国や自治体により土砂災害警戒区域が整備されてきたが、区域が広い土石流では、垂直避難が有効なところも多く、いつどこに避難するかが問題となった。指定された区域内で有効な避難を行うには、土石流がどこまで到達し、その後続流がどこを流下するか再検討を要する。

土石流の到達範囲や流速等の予測計算は、土砂量、氾濫基準地点、主流路等の想定が必要で、それらの想定が異なれば、計算結果も大きく変わる。また、扇状地を開析する谷、縦横断道路、ため池等の地形や人工改変の影響も大きく受ける。そこで、本研究では、開析谷や人工改変等による土砂到達距離の違いを明らかにするために、崩壊の崩土到達距離予測<sup>2)</sup>に有効な動摩擦係数(H/L)と土石流発生域の勾配(tanθ)の関係に注目した。

調査対象は、西日本豪雨で土石流が多発した東広島地区周辺である(図-1)。東広島地区は風化が厚い吉備高原で、地質は花崗岩(マサ)あるいは流紋岩である。



風化の厚い吉備高原、地質は主に花崗岩類(マサ土)及び流紋岩類  
数字は調査ID; 調査結果一覧表は省略(30地点抽出)  
背景図は国土地理院の色別標高図を表示

図-1 調査位置図

## 2. 調査方法

調査は、国土地理院の正射画像(7/15撮影呉東部, 7/9,11撮影広島坂町地区, 7/10,11,14撮影東広島地区)と現地調査情報<sup>1)</sup>を参照し、土石流とその後続流を抽出した(図-2)。土石流末端は、後続流により残されていないことが多いが、氾濫基準地点から下流へ幅の広がりが終わるところまでとした。抽出した土石流と後続流を対象とし、図-3に示す土石流発生域の勾配(tanθ)や動摩擦係数(H/L)等を測定した。併せて、堆積勾配を測定し、地形(扇状地、開析扇状地、谷底平野、河川氾濫原等)、人工改変(縦横断道路、農地や駐車場、ため池等)による影響を記載した。

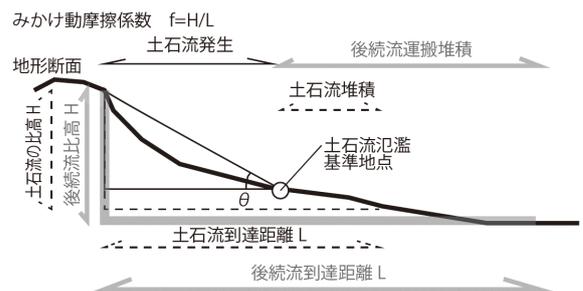
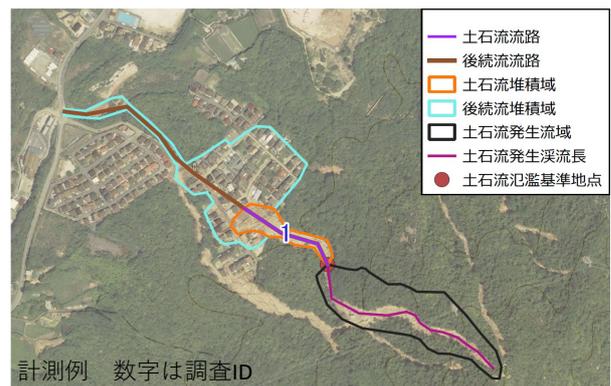


図-2 土石流と後続流の抽出例と諸元測定法

## 3. 結果

土石流と後続流の堆積勾配(見通し角; 末端点と氾濫基準地点間の直線勾配)の関係は、土石流の堆積勾配の大きさに応じて、後続流の勾配が大きくなる傾向が認められる(図-3)。花崗岩と流紋岩で堆積勾配の傾向が異なる。土石流は、花崗岩の方が風化残留物の玉石を含み高エネルギー型である。一方、後続流では流紋岩の方が礫の割合が高いため堆積勾配が大きくなった可能性が高い。

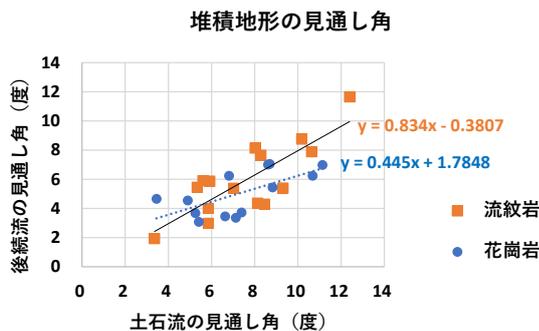
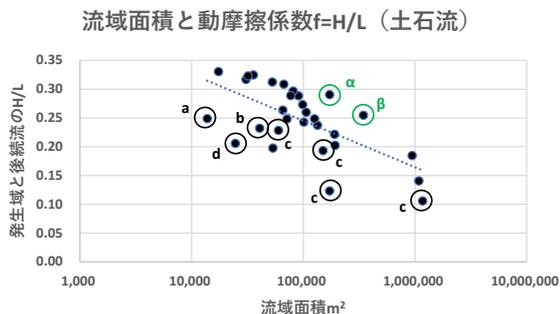
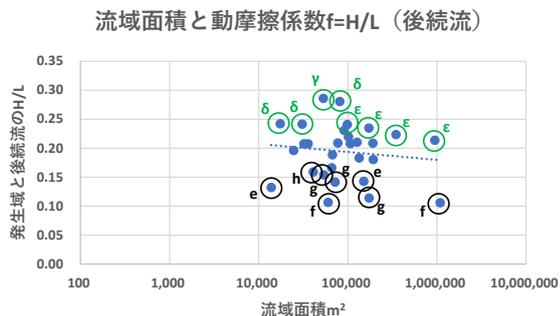


図-3 堆積地形の見通し角の傾向

崩壊の動摩擦係数 (H/L) は、崩壊が大規模であるほど小さく、崩土到達距離が大きくなりやすいことが知られている<sup>2)</sup>。土石流とその後続流でも同様な傾向がある(図-4)。H/L が傾向から外れるところをみると、泥流型の土石流、ため池の決壊、河道あるいは縦断道路での流下があるところで、H/L が小さい (L が大きい)。一方、横断道路や人家が多いところ、土石流の扇状の広がりが大きいところ、扇状地の段々畑があるところで H/L が大きい (L が小さい)。



a: 赤色粘土風化岩で泥流型, b: ため池や沈砂池, c: 河道流下マニング型  
d: 縦断道路, alpha: 横断道路と人家, beta: 扇状の広がりが大きい



e: 河道を流下, f: ため池や沈砂池, g: 縦断道路, h: 赤色粘土風化岩で泥流型  
gamma: 扇状地段々畑, delta: 横断道路, epsilon: 流下能力の高い河川へ流入

図-4 流域面積と H/L の関係

崩壊崩土の動摩擦係数 (H/L) は崩壊発生勾配 (静摩擦係数  $\tan \theta$ ) と比例関係 ( $H/L=0.73\tan \theta -0.07$ ) にある<sup>2)</sup>。土石流で人工改変や河道への流入による影響が小さな地点のデータをみると、崩壊崩土と同様に、H/L は  $\tan \theta$  と比例関係にある (図-5)。直線回帰式

の傾きは、堆積物と接する面積が狭いマニング型で小さいと考えられる。マニング型と非マニング型の傾きの違いは土石流で殆どなく、後続流で顕著である。非マニング型の土石流は、谷口付近で直進性が強く、幅の広がりが小さいために、マニング型と同様な傾向を示したものと考えられる。後続流では、流路が分散し複雑で、ばらつきが大きい。そのため、被害範囲予測では、到達距離と併せて地形・人工改変と流路の関係をみる必要がある。

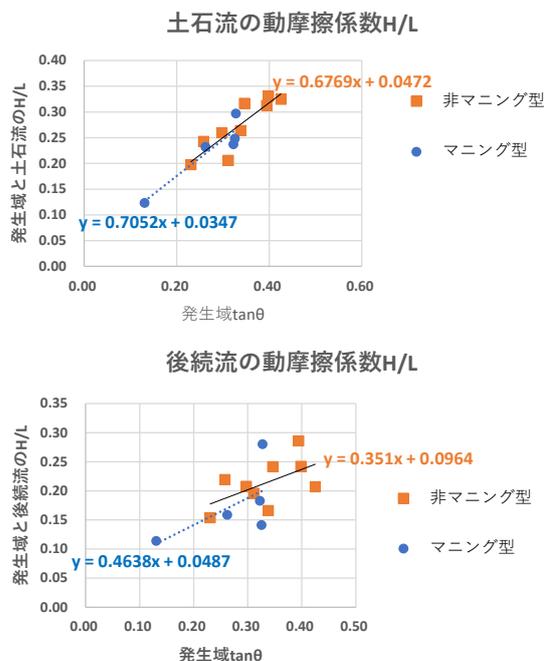


図-5 発生域  $\tan \theta$  と H/L の関係 (人工物や河川の影響が小さいもの)

#### 4. 減災へ向けて

本論では、扇状地内の開析谷や河道を流下したか否か(マニング型であるか否か)、人工改変の影響により、H/L の傾向が明らかに異なることを示した。人工改変の中には横断道路や段々畑等に減災効果があることが分かった。一方、扇状地開析谷のため池決壊や扇状地縦断道路があれば、土砂到達距離が大きくなる (H/L が小さくなる) ことも示された。現在では、ハザードマップの整備と普及が進み、各個人、事業者等がそれぞれの確に行動することが求められる。各自が的確な行動をする上で重要な地形や人工改変の影響を、今後さらに明らかにしたい。

#### 文献

- 1) 平成 30 年 7 月豪雨災害調査団 (2019) : 平成 30 年 7 月豪雨災害 (西日本豪雨災害) 調査団報告書, 日本応用地質学会, 308p.
- 2) 森脇 寛 (1987) : 崩土の到達距離予測, 地すべり, Vol. 42, No. 2, pp. 10-16.

# 20. 最新の技術と経験に対応した「道路防災点検の手引き」の改訂

Revision of 'Inspection Guidebook for the Prevention of Road Disaster' Corresponding to the Newest Technology and Experience

○佐々木靖人（土木研究所）、浅井健一（土木研究所）、  
道路防災点検の手引き編集WG（全国地質調査業協会連合会）\*

Yasuhiro Sasaki, Ken-ichi Asai,

Working Group for Editing 'Inspection Guidebook for the Prevention of Road Disaster'\*

## 1. はじめに

平成18年の道路防災点検の際に作成された「道路防災点検の手引き」<sup>1)</sup>は、道路防災点検を包括的に解説した参考書として実務者に広く活用されてきた。本書は講習会資料として全国地質調査業協会連合会（以降、全地連）が何度か小改訂したが、初版から15年が経過し、その間の航空レーザ測量やデジタル技術の進展、災害等を通じた最新技術の活用経験の蓄積などを踏まえて大きく改訂する必要が生じた。そこで点検実務経験が豊富な熟練技術者と土木研究所が参加するWGを全地連に設け、最新の技術や経験を踏まえた道路防災点検のあるべき姿を示す全面改訂<sup>2)</sup>を行った。本稿では今回の改訂の重要な点を報告する。

## 2. 主な改訂事項

### 2.1 DXへのチャレンジ

平成18年9月に国土交通省から通知された道路防災点検の「点検要領」自体は改訂されていないが、近年のデジタル技術の進展を受けて、令和3年10月に国土交通省から「三次元点群データを活用した道路斜面災害リスク箇所の抽出要領(案)」<sup>3)</sup>（以降、抽出要領(案)）が通知された。これは航空レーザ測量等により取得された三次元点群データ等を用いた災害リスク箇所の抽出方法や評価方法等を示したものであり、「点検要領」の中の第1絞り込み、第2絞り込み、および安定度調査の一部に活用することを想定したものである。すなわち防災点検を実施する際は、抽出要領(案)もセットで活用すべきものとなっている。このため、今回の手引きは、副題を「DX時代に向けたチャレンジ」とし、

表-1 道路防災点検におけるDXとその効果の例<sup>2)</sup>

段階	DX活用例	見込まれる効果
①点検全体	・道路防災点検に関連する各種デジタルデータの整備（地形情報（三次元点群データ）、地質情報、道路台帳、道路防災点検結果、道路土工構造物点検結果、現場写真、踏査ルート、結果、降雨情報、地震情報、災害履歴等） ・重複を避けつつデータを順次蓄積・高精度化していくデータ蓄積型の点検	・防災管理全体の効率化 ・点検の精緻化・高精度化
②点検対象区間の選定	・デジタル化情報（下記の地形情報、点検結果、災害履歴等）に基づく対象区間選定	・対象区間選定の効率化 ・見逃しのない対象区間選定
③地域特性の把握及び災害要因の判読	・GISを用いた各種情報の重ね合わせ、分析等 ・三次元点群データを用いた地形判読 ・AIを用いた地形判読支援	・地域特性の把握の効率化 ・作業結果（地形判読結果等）のデジタル化によるデータベース構築の促進
④安定度調査箇所の選定	・三次元点群データに基づく地形判読結果、災害履歴等を用いた安定度調査箇所の選定 ・三次元点群データ・衛星データ等を用いた斜面解析・変動箇所抽出 ・変位計測データによる斜面安定度の評価を活用した安定度評価箇所の選定 ・AIを用いた安定度調査箇所の選定支援	・安定度調査箇所の選定の効率化 ・見逃しのない安定度調査箇所の選定 ・作業結果のデジタル化によるデータベース構築の促進
⑤安定度調査の実施	・タブレット端末を活用した安定度調査 ・GPS内蔵の端末による対象箇所への誘導 ・タブレット上へ点検項目の指示、前回点検との変化、累積変化傾向等の表示による調査の支援 ・AIを用いた評価（診断）支援 ・箇所別記録表及び安定度調査表の作成支援 ・三次元点群データからの断面図の自動作成 ・データ、写真等の端末入力からの様式の自動作成 ・5Gを用いた遠隔での点検、遠隔臨場による専門家判断	・点検作業の効率化と精度向上 ・近接目視が困難な箇所・状況における点検支援 ・点検データ整理の効率化 ・点検結果のデジタル化によるデータベース構築の促進
⑥防災カルテの作成・修正	・タブレット端末を活用した防災カルテ点検 ・GPS内蔵の端末による対象箇所への誘導 ・タブレット上へ点検項目の指示、前回点検との変化、累積変化傾向等の表示による防災カルテ点検の支援 ・AIを用いた評価（診断）支援 ・防災カルテの作成・修正支援 ・端末入力からの様式の自動作成 ・5Gを用いた遠隔での点検、遠隔臨場による専門家判断	同上
⑦データベースの構築	・点検データを集約したデータベースシステムの構築 ・管内全域の点検対象箇所の評価システムの構築 ・対策工の効果評価の支援システムの構築 ・安定度調査・防災カルテ点検結果のデータベースへの自動反映	・データベースの精度向上 ・点検結果の自動反映によるデータベース作成・更新の効率化 ・管内全体の危険度把握の効率化 ・データベースを活用した調査表・記録表作成の効率化
⑧道路防災点検結果の発信、共有、活用	・関連データ統合型シミュレーションによる道路防災点検結果の活用 ・災害情報、予報、警報、迂回情報等へ役立てる ・対策工事の優先順位付け ・周辺情報と統合化した評価・意思決定の支援 ・降雨情報、地震情報と組み合わせた災害時の緊急点検箇所の抽出 ・関係自治体等との防災情報の共有 ・スマートフォン、道路防災サイト等を活用した道路管理者・道路利用者双方の方向の情報発信・情報共有 ・危険斜面へのばらまき型センサー等の設置による日常管理時（パトロール時等）の危険度把握、通行規制の精度向上（適正な時刻における規制解除） ・構造物点検、橋梁点検等を含めた広域のデータ統合による各事業の進捗状況、道路ネットワーク全体の災害リスク等の把握	・管内事業の意思決定の効率化 ・災害時対応の効率化・迅速化 ・日常パトロールの高度化 ・道路利用者へのサービス向上
⑨その他	・道路防災点検・防災カルテ点検から監視、設計、対策までの手順の自動化 ・上記データベース及び他の周辺データに基づくデータマイニング（大量のデータを分析して、問題解決、リスクの軽減、新たなビジネス機会の創出に役立つ知見を獲得するための技術） ・RPA（ロボティック・プロセス・オートメーション）による道路管理者・技術者支援 ・河川・砂防等の他事業のデータベース・システムとの連携による国土全体の防災管理のシステム化	・管内の道路管理全体の合理化・効率化 ・管内の事業計画、政策立案の合理化・効率化 ・他事業と一体化した国土全体の防災管理の合理化・効率化

点検実務者が実効性をもって三次元点群データ等を活用できるように基本的な技術や様々な活用事例を紹介した。また、防災点検や道路防災全般のDXに関して、将来的にあるべき姿をWGで議論し例示した（表-1）。

また、抽出要領(案)では、調査・評価結果はレーザ測量地形図等を基図として整理するものとしており、その具体的な方法は、「GISを利用した道路斜面のリスク評価に関する共同研究報告書」（平成18年8月、土木研究所共同研究報告書）<sup>4)</sup>に基づくこととしている。このため手引きもこれを前提とした。これは防災点検結果のハザードマップ（道路防災マップ）化も意図している。なお、この共同研究報告書は平成18年の防災点検

\*道路防災点検の手引き編集WG：佐々木靖人，浅井健一，泉水友裕，安藤伸，上野将司，小野田敏，小俣新重郎，座間俊男，末武晋一，杉崎友是，高見智之，高山陶子，永川勝久，林浩幸，福井謙三，三浦健一郎，宮本浩二，土屋彰義，中川直

にも活用すべく作成したが、当時は GIS の普及が不十分でデータ整備にも多額の予算を要することからあまり活用されなかった。今回の手引き編集 WG メンバーの約半数は上記共同研究の参加者でもあり、今般、15年の歳月を経て、共同研究報告書がそのままの形で公的に活用されるに至ったことは感慨深い。

## 2.2 近年経験した多様な災害形態への対応

近年、地球温暖化の影響等により豪雨災害や融雪災害が激甚化・頻発化し、これに伴い多様な道路災害が発生したこと、また東日本大震災や熊本地震、北海道胆振東部地震等で多くの地震災害が発生したことなどを踏まえ、近年経験した災害事例を紹介するとともに、点検における留意点の記述を充実した。

例えば落石・崩壊の点検時の着目点として表-2 のような点があげられており、熊本地震や北海道胆振東部地震で多発したような比較的勾配が緩い火山灰斜面での崩壊等も留意点の一つとしている。

表-2 落石・崩壊の点検時の着目点の例<sup>2)</sup>

落石・崩壊の点検時の着目点
・小規模な凹状の集水地形では降雨時の表層崩壊が発生しやすいが点検では見逃されやすい。
・対象区間の山側にある道路は多量の雨水を集めて斜面崩壊の原因となるため注意が必要である。
・のり面表層の不安定化を示す凹凸・段差などの微地形に注意するとともに、のり面部だけでなく変状が良く現れるのり肩部での確認が必要である。
・落石や小崩壊が大崩壊や地すべりの前兆となることもあるので、空中写真や微地形表現図等での広域地形の判読により、その可能性がないか検討するとよい。
・尾根や斜面の凸部は地震動が増幅され、落石・崩壊が発生しやすい。
・崩壊しやすい流れ盤などの地質構造に注意する。
・火山灰に被覆された斜面などでは必ずしも斜面勾配が急でなくても崩壊しやすい場合がある。
・落石防護施設の裏の小崩壊や小石の落下などは見逃さず、発生源を確認する。
・点検対象区域内や近傍での地形変化や樹木伐採には注意する。また、樹木の成長による強風時や地震時に根元から落石や崩壊が誘発されることがあるので注意する。
・対象区間だけでなく隣接箇所の施工時の変状や小崩壊の情報、供用後の災害履歴を参考にする。
・既設対策工の効果に関する評価は、想定災害の形態や規模と道路との位置関係など、道路への影響を十分に考慮する。

## 2.3 道路土工構造物点検をはじめとする近年のインフラメンテナンスの動向への対応

笹子トンネルの天井板落下事故等を契機に主要な道路施設の点検が法的にも位置付けられ、道路土工構造物点検が行われるようになったことも改訂の重要な背景である。これにより道路土工構造物点検と道路防災点検で点検作業が一部重複することとなった。また、近年はカルテ点検を主体に行っている路線も多いため、道路土工構造物点検、道路防災点検、カルテ点検等の諸点検の関係を整理した。

道路土工構造物点検と道路防災点検で点検作業が一部重複していることについては、両点検で内容が重複している道路区域内の土工構造物（切土、盛土、擁壁）の点検は今後道路土工構造物点検として行う方向

で整理する方針を国土交通省が打ち出している<sup>5)</sup>。また、カルテ点検についても同様に、道路区域内の土工構造物については道路土工構造物点検の経過観察として行う方向で整理する方針を国土交通省が打ち出している<sup>5)</sup>。しかしながら、これまでの道路防災点検及び防災カルテ点検における着目点は道路土工構造物点検として行う場合であっても引き続き重要な着目点であることから、道路防災点検・カルテ点検のみならず道路土工構造物点検にも役立つよう着目点の記載を充実させた。

## 3. まとめと今後の展望

DX に資するべく手引きを改訂した。しかし道路防災点検は単にデジタル技術を使えば良いわけではなく、災害経験による知見や教訓と融合させることで初めて緻密で効率的な点検が可能となるため、点検実務者にはこのような取り組みを期待する。また、防災点検にとどまらず、表-1 に示すように他の様々な道路管理業務とデータ等の共有・融合・活用を図ることで業務の効率化やさらに安全な道路管理も実現できる。これが道路防災やさらには国土管理における真の DX につながる。折しもデジタル庁が 2021 年に設置され、点検・検査業務等についても「デジタル原則に照らした規制の一括見直し」（デジタル臨時行政調査会、令和 4 年 6 月 3 日）が行われると考えられるので、これに資するような包括的な提案も期待したい。

## 文献

- 1) 道路防災点検の手引き編集委員会（編）（2007）：道路防災点検の手引き（豪雨・豪雪等）、（財）道路保全技術センター、179p.
- 2) （一社）全国地質調査業協会連合会 道路防災点検技術委員会「道路防災点検の手引き」編集ワーキンググループ（2022）：道路防災点検の手引き（豪雨・豪雪等）改訂版-DX 時代に向けたチャレンジ、145p.
- 3) 国土交通省（2021）：社会資本整備審議会 道路分科会 道路技術小委員会（令和 3 年 10 月 25 日開催）参考資料 1 三次元点群データを活用した道路斜面災害リスク箇所抽出要領（案）18p. <https://www.mlit.go.jp/policy/shingikai/content/001428664.pdf>（令和 4 年 7 月 27 日閲覧）
- 4) 道路斜面防災 GIS 共同研究グループ（2006）：道路防災マップ作成要領（案）、GIS を活用した道路斜面のリスク評価に関する共同研究報告書、独立行政法人土木研究所共同研究報告書第 350 号、130p.
- 5) 国土交通省（2022）：社会資本整備審議会 道路分科会 道路技術小委員会（令和 4 年 3 月 22 日開催）資料 3-1 道路土工構造物点検要領の改訂（暫定版）の概要、10p. <https://www.mlit.go.jp/policy/shingikai/content/001472416.pdf>（令和 4 年 7 月 27 日閲覧）。

# 21. 中央構造線断層沿いで発生した施工時の表層崩壊と

## 電気探査・法面補強対策の事例

Introduction of surface failures in construction working, electrical prospecting and slope-protections around Median Tectonic Line

○谷垣勝久 (タニガキ建工), 森山将斗 (タニガキ建工), 高尾遼太 (タニガキ建工),  
橋本義之 (橋本地質事務所), 坂田直人 (和歌山県), 木下篤彦 (国土交通省)

Katsuhisa Tanigaki, Masato Moriyama, Ryota Takao, Yoshiyuki Hashimoto, Naoto Sakata, Atsuhiko Kinoshita

### 1. はじめに

府中地区の急傾斜地斜面で、簡易吹付法枠工施工のための切土による表層崩壊が発生した。表層崩壊後に急傾斜地斜面の末端部が解放されたことで、上部斜面がクリープ変形し、間もなく後退性の二次崩壊・三次崩壊が発生、表層崩壊が上部と側部に順次拡大した。

調査ボーリングを行ってパイプ歪計測管を設置し、パイプ歪計と自記水位計の観測を実施した。その後、変形する可能性のある箇所を特定するため、電気探査を実施した。電気探査の結果、この崩壊斜面は、中央構造線派生断層の可能性のある「粘土状の泥岩破碎帯」によって地下水が溜まりやすい箇所になっていることが判明した。この脆弱箇所を補強するため、法枠工(F300:2m×2m)と鉄筋挿入工(5m:12段)を計画した。

### 2. 崩壊の経緯

府中地区の急傾斜地斜面で、簡易吹付法枠工施工のための切土による応力開放と、繰り返される降雨で徐々に変位が生じ、5月22日に一次崩壊が発生した。一次崩壊は、幅8m、斜面長10mの範囲で発生した。一次崩壊後に急傾斜地斜面の末端部が解放されたことで、間もなく二次崩壊が発生し、表層崩壊が拡大した。二次崩壊は、幅13m、斜面長15mの範囲で発生した。また、滑落崖には粘土化した泥岩優勢層が確認され、湧水も多いことから、更なる表層崩壊が懸念された。

8月17日の午前10時に41.5mm/時間、午後3時に32.5mm/時間の豪雨で、翌日に三次崩壊が確認された。

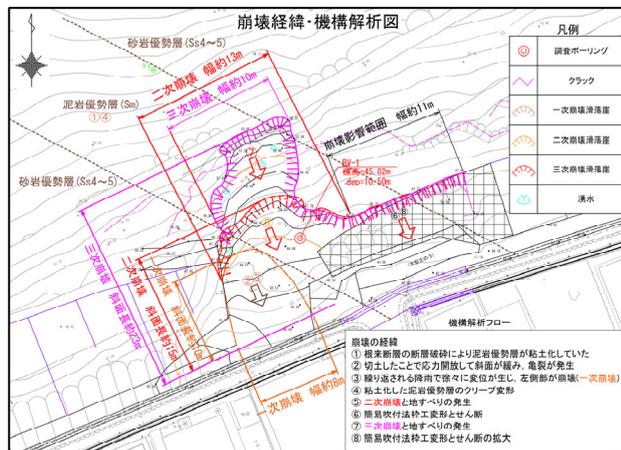


図-1 崩壊経緯・機構解析図

### 3. 地形・地質概要

府中地区には西南日本内帯・外帯の境の中央構造線が東西方向に走っている。中央構造線は世界第1級の大断層で、陸地を1,000km以上も追跡できる大断層である。また、それに付随して、中央構造線活断層系の根来断層、磯ノ浦断層が東西方向に延びる(図-2)。調査地周辺は根来断層(右横ずれ断層)の運動によって引っ張られる形で、河川の流路や谷線、尾根線が時計回りに回転して北東-南西方向の軸に変化している。

また、周辺に分布する和泉層群の信達累層は下部層と上部層とに分けられる。調査地は下部層に位置し、岩種は主に「砂岩優勢の砂岩泥岩互層」が分布する。

### 4. 現地調査

周辺には遷緩線、遷急線が多くみられ、過去の斜面変動を示唆する地形がみられる。広域的には、主断層(根来断層)の“右横ずれ”に伴い、谷線、尾根線が北東-南西方向の軸となっている。また、北西の溪流には溪流床に断層破碎帯があり、“断層谷”と考えられる。



図-2 中央構造線活断層系ストリップマップ(1)

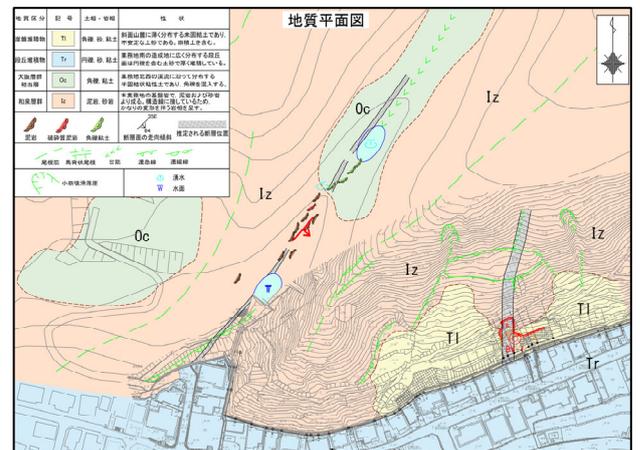


図-3 地質平面図

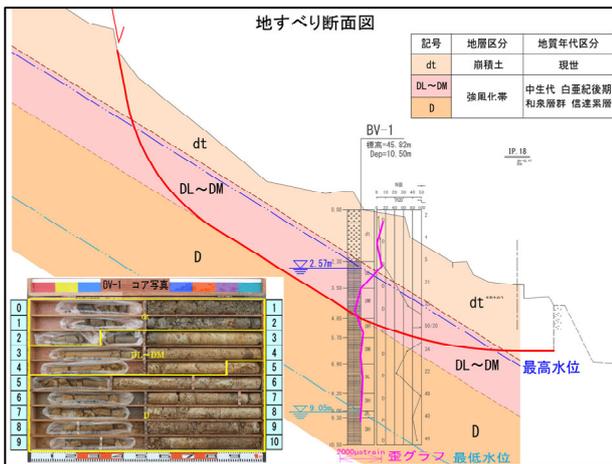


図-4 地すべり断面図

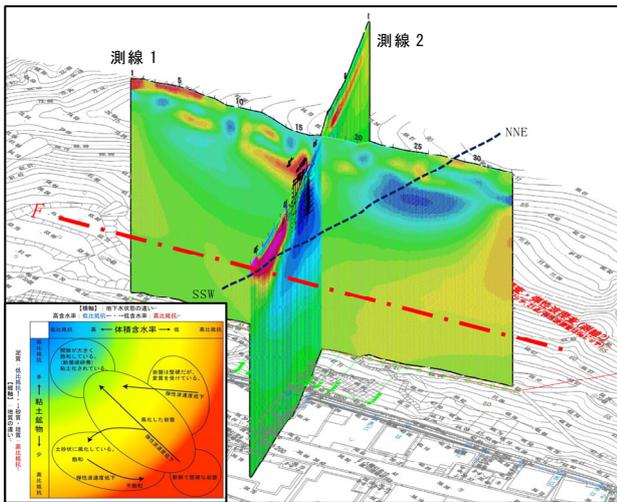


図-5 電気探査結果図

## 5. 地質調査と地すべり観測

令和3年8月17日～22日に307.0mm/6日の豪雨があり、8月18日に三次崩壊が確認された。この崩壊時に、深度4.5m以浅で「変動B～C」が確認されたため、DM/DH級岩盤の境界「GL-4.85m」をすべり面とした。

## 6. 電気探査とX線回折分析

高密度電気探査(比抵抗二次元探査)とX線回折分析を行った。その測定結果を以下にまとめる。

- ① 解析比抵抗の平均値は50Ωm以下で、風化帯部のマトリックスは湿潤し、細粒分が多いと推察される。
- ② 測線1(縦断-東西測線)では、表層から深度5m程度の比抵抗分布は、一様ではないが、これ以下の深度20mまでは低比抵抗域が強調される【強風化帯】である。さらに深部は徐々に高比抵抗へ漸移した。
- ③ 測線2(横断-南北測線)に鉛直に広がる低比抵抗域が認められ、断層の影響によるものと推察される。

断層粘土において実施したX線回折の結果は、石英、斜長石は本来の岩体成分であり、風化鉱物とし緑泥石、雲母-スクメタイトの混合層鉱物が検出されている。粘土鉱物量比は微量又はきわめて微量であることより、破碎帯の膨張・膨潤特性は比較的小さく、今回の崩壊に対する関与はほとんど無いものとみられる。

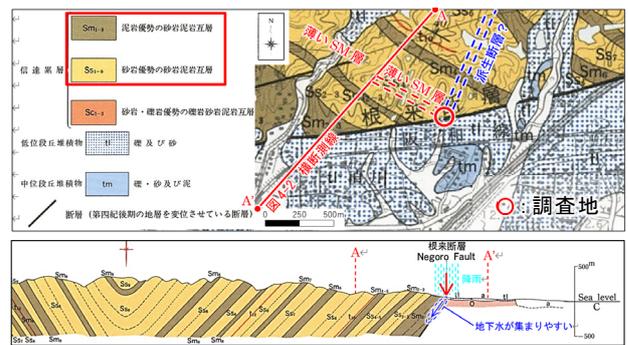


図-6 地質図幅(5万分の1【和歌山及び尾崎】)<sup>3)</sup>

## 7. 地質構造と崩壊の素因

想定される地質構造と崩壊の素因を以下にまとめる。

- ① 調査ボーリングの結果から、和泉層群の基盤岩は、【崩積土-強風化帯-風化帯】の順に対比される。
- ② 測線2に強調される低比抵抗の垂直脈は根来断層又はその派生断層(文献<sup>2)</sup>)と推察される。
- ③ 両測線の同様程度の低比抵抗分布から、その方向性として北北東-南南西と推察され、主断層に対する派生断層、又は粘土化帯となっている可能性がある。
- ④ 根来断層の派生断層かどうかは不明であるが、相当近くに位置する派生断層の可能性が疑われる。
- ⑤ 想定断層位置で、「低比抵抗」が顕著になっており、地下水を堰き止めるタイプの断層が存在している。
- ⑥ 北北東-南南西の断層、北西-南東の泥岩優勢層が大量の“宙水”を形成し、崩壊の素因となった。

## 8. 応急対策工と斜面对策工の選定

台風時期にこれ以上、表層崩壊が拡大しないよう、10月に【応急横ボーリング工】を崩壊地東側で低比抵抗ゾーンに向かって、4孔(L=30.0m)施工した。

また、崩壊斜面の「拡大崩壊すべりの対策」として【法枠工(F300,2000×2000)と鉄筋挿入工(D25,L=5.00m,縦横間隔2000×2000,段数12段)】を計画・施工した。

## 9. おわりに

府中地区のような現場での今後の課題を以下に示す。

- ① 中央構造線に隣接する府中地区のような急傾斜地対策斜面では、電気探査や調査ボーリングを行い、派生断層の可能性などを検討することが望ましい。
- ② 電気探査や調査ボーリングで強い低比抵抗ゾーンが確認された場合には、その強い低比抵抗ゾーンに向かい、横ボーリング工で水抜きを行うことが重要。

## 文献

- 1) 山田直利・滝沢文教(編)(1996):日本地質図大系 [6] 近畿地方, pp.94-95.
- 2) 岡田篤正他(1999):中央構造線活断層系根来断層の性状と最新活動-和歌山市今滝(仁王谷)でのトレンチ調査-活断層研究18, pp.37-54.
- 3) 地質調査所(1993):5万地質図幅(和歌山及び尾崎)

## 22. 和歌山県日高川町弥谷地区において昭和の紀伊半島大水害時に発生した土砂災害とその伝承

Debris flow and Disaster tradition in Iyadani, Hidakagawa Town, Kii Peninsula in 1953

○秋山晋二（国際航業），谷垣勝久（タニガキ建工），田内裕人（和歌山大学），後 誠介（和歌山大学）  
Shinji AKIYAMA, Katsuhisa TANIGAKI, Hiroto TANOUCHI, Seisuke USHIRO

### 1. はじめに

紀伊半島中西部における洪水・土砂災害としては、昭和の紀伊半島大水害と呼べる1953（昭和28）年7月18日の豪雨災害が有名である。有田川上流では、大規模な崩壊が多発し、甚大な被害をもたらしたため、これまで多くの調査研究がなされてきたが、日高川上流の和歌山県日高川町弥谷地区でも85名の方が犠牲となる土砂災害が発生し、自然災害伝承碑の役割もある慰霊塔が建立されていることはあまり知られていない。

本研究では、弥谷地区周辺の地形・地質調査を行い、地区に残る災害時の記録や伝承をもとに土砂災害発生メカニズムについて検討した結果、二次災害の発生が多数の犠牲につながったことがわかった。

### 2. 地形・地質調査結果

昭和28年7月18日の土砂災害は日高川支流の弥谷川右岸に面する斜面で発生した（図-1）。斜面下部は弥谷川の水衝部にあたり、標高約470mの稜線付近には幅約200m・高さ約40mの滑落崖があり、過去に繰り返し大規模崩壊（深層崩壊）が発生したことがわかった。この大規模崩壊の滑落崖西端部が崩壊し、長さ約600m・最大幅約130mの土石流（山津波）が発生した。

調査地には、四万十帯に属する白亜紀後期の美山付加コンプレックス八斗蔭ユニットが分布する<sup>1)</sup>。

調査地の斜面頭部付近には、細粒～中粒砂岩・砂岩優勢砂岩頁岩互層（以下、砂岩優勢互層）を主体とし、一部に緑色凝灰質頁岩や砂岩ブロックを挟む頁岩・頁岩優勢砂岩頁岩互層（以下、頁岩優勢互層）が分布し、ブーディン・膨縮等の剪断構造を呈する。土石流の頭部滑落崖には、東西走向で北に60°傾斜の小断層がスラストに概ね平行に認められる。斜面中部付近には、緑色の変質した玄武岩からなる枕状溶岩や海洋性の鉄マンガン堆積物を伴うチャート及び赤色頁岩や極細粒～細粒砂岩・砂岩優勢互層が分布する。斜面末端付近には、砂岩のブロックを挟む頁岩・頁岩優勢互層や極細粒～細粒砂岩・砂岩優勢互層が分布する。部分的に褶曲構造を呈しており、全体的に破碎質な部分が多く、特に頁岩優勢互層が分布する県道沿いの斜面には小規模な崩壊跡地が複数箇所で見られる。全体に層理面は北西-南東～東西走向で北に50°～85°傾斜の流れ盤構造を呈している。また、北北東-南南西走向の節理が発達している。

なお、災害前に弥谷集落があった斜面中腹部には、災害後に建設された養鶏場（最近休業）、その周辺には旧耕作地や人家跡地、避難場所となった釈迦堂跡地があり、流路工や複数の谷止工が施工されている。

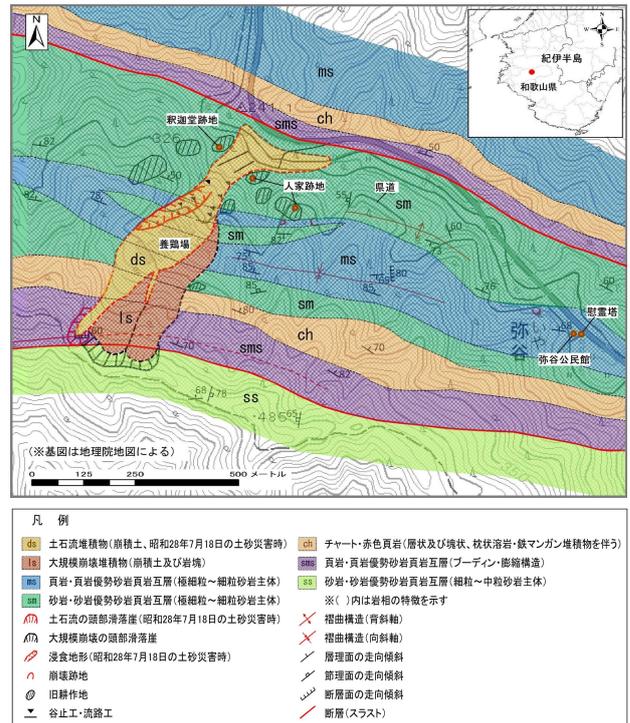


図-1 弥谷地区周辺の地形・地質

### 3. 災害記録の収集と整理

弥谷地区の土砂災害に関する史料<sup>2)</sup>、調査報告<sup>3)</sup>、災害写真集<sup>4)・5)</sup>、慰霊塔の碑文及び地元住民ヒアリングなどから当時の災害状況を整理した。

土砂災害の発生時刻や犠牲者数など内容に多少の相違はあるものの、概ね以下の通りと考える。

- (1) 当時の弥谷集落は上手と下手（現在の集落）に分かれており、被災した上手集落は23戸、100人ほどの大きな集落であった。
- (2) 前日から降り続いた豪雨により、7月18日午前4時頃に県道より下方斜面が崩壊、その5時間後の午前9時頃に県道より上方の中腹斜面が崩壊、さらに5時間後の午後2時頃に山頂部が崩壊し、集落西側の県道付近にかたまっていた避難していた30数人の方が土石流に巻き込まれた。釈迦堂に避難していた人たちがこれを目撃している。
- (3) 県道より上方にあった人家12戸と下方にあった3

戸の計 15 戸が流出し、下手集落から救援に向かった 4 名と上手集落 81 名の計 85 名の方が犠牲となった。

#### 4. 土砂災害発生メカニズム

土砂災害発生メカニズムを図-2に示す。剪断構造を呈する頁岩優勢互層（剪断帯）が分布する稜線付近で、長さ約 450m・幅約 200m・深さ約 30m（推定）の大規模崩壊が発生し、その後西側の部分が再崩壊した。再崩壊した大規模崩壊地の頭部下方にある滑落崖は、「200 年ほど前にも今回と同じような崩壊があったといわれる<sup>3)</sup>」に相当するものかも知れない。

その後、崩積土が堆積し、やや緩やかになった斜面中腹に集落が形成された。当初は再崩壊した大規模崩壊地を含めて土砂災害範囲と考えていたが、滑落崖にある石積群が戦前からあるイモ畑であることがわかり、土石流は西端部の比較的新しい滑落崖を源頭部として発生したもので、層厚も約 2・3m 程度であると考えられる。

午前 4 時頃に破碎質の頁岩優勢互層が分布する県道下の斜面、午前 9 時頃にチャートや赤色頁岩の岩塊が分布する中腹斜面、午後 2 時頃に小断層を有する剪断帯が分布する稜線部と、少なくとも 3 回以上繰り返し崩壊が発生した。

弥谷地区の土砂災害は、いわゆる付加体に特徴的な大規模崩壊によるものではなく、古い大規模崩壊地に残る厚い崩積土が、繰り返し崩壊・再移動したことにより、下手集落からの救援者を含めた多くの住民が逃げ場を失い、一次的に避難した場所で土石流に巻き込まれるという二次災害が発生したことがわかった。

なお、西側にある侵食地形は土石流発生後に谷からの表流水の流入・浸食により形成されたものと考えられる。

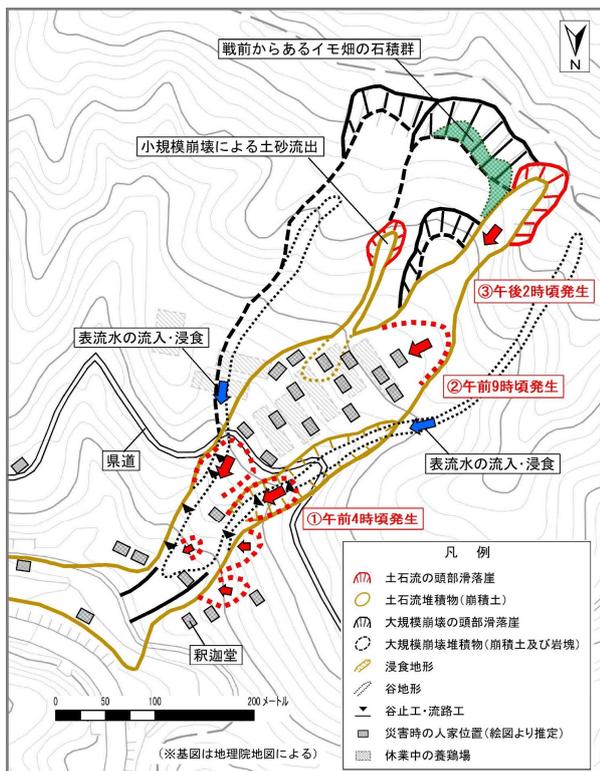


図-2 弥谷地区の土砂災害状況図

#### 5. 災害の伝承

災害から 3 年後の昭和 31 年に現在の集落入口に慰霊塔が建立された。以来、地元の方々には花を欠かさないなどのお世話を続けながら災害を伝承してこられた。建立から 65 年もの歳月が経ち、慰霊塔の碑文がかなり不明瞭になっていたが、本研究がきっかけとなり、令和 3 年 10 月 16 日に慰霊塔の墨入れ式と慰霊祭が行われた（写真-1）。

また、慰霊塔の隣にある弥谷公民館内には、土砂災害で被災しなかった釈迦堂（現在は跡地）の釈迦三尊像などが安置され大切に守られている<sup>6)</sup>。



写真-1 慰霊塔の墨入れ式

#### 6. おわりに

土砂災害リスクの高い斜面を抽出するためには、流れ盤や断層（破碎帯）などの地質構造も重要であるが、繰り返し発生する土砂災害の危険性について鑑み、古い大規模崩壊地に残る厚い崩積土の分布にも目を向けるべきであると考えられる。

本研究にあたり、日高川町在住の小畑貞夫氏には現地調査でお世話になりました。また、和歌山大学の江種伸之教授並びに一般財団法人砂防フロンティア整備推進機構の井上公夫氏には多大なるご助言・ご指導をいただきました。ここに記して感謝いたします。

#### 文献

- 1) 紀州四万十帯団体研究グループ (2012) : 美山付加コンプレックスの再定義—チューロニアン～下部マーストリヒチアンの付加体—, 地団研専報 59 号, pp.35-41.
- 2) 龍神村 (1985) : 龍神村誌, 上巻, pp.104-105.
- 3) 川口武雄・難波宣士 (1954) 山崩と治山対策, 昭和 28 年近畿水害調査報告 (第 2 次調査報告), 林業試験場研究報告, 第 74 号, pp.67, Plate8.
- 4) 和歌山県知事公室規格広報課 (1954) : 和歌山県水害記録写真集 (1953 年).
- 5) 砂防図書館蔵 (1953) : 日高川流域の災害写真帳 (赤木正雄顕彰会蔵書)
- 6) 井上公夫 (2020) : いさばうネット歴史的な大規模土砂災害地点を歩く (その III), 丸源書店, pp94-109.

## 23. 微小な標高変化を捉える剰余地図の活用-2016年熊本地震の例

Application of Surplus Map for Small Elevation Change: A Case Study of 2016 Kumamoto Earthquake

○黒木貴一（関西大学）

Takahito Kuroki

### 1. はじめに

航空機によるレーザー計測や SfM による写真計測を 2 回実施し、その間の標高変化を捉え地形形成を考えることは今日容易になった<sup>1) 2)</sup>。しかし被災地の踏査では、薄く残る氾濫土砂や地表変位の 10cm に満たない僅かな凹凸等、DEM の高さ精度よりも微小な標高変化も確認される。そして DEM の差分では、そのような現象の広がりとは適切に表現しにくい。一方、微小な標高変化の広域での視覚化は、地殻変動に関し SAR 干渉画像を使って今日実現され<sup>3)</sup>、この技術は火山活動<sup>4)</sup>や地盤沈下<sup>5)</sup>に伴う標高変化にも適用された。そして 2016 年熊本地震では、これまで見過ごされてきた小さな亀裂に関して、それが広域的な地殻変動の意味<sup>6)</sup>を持つことが理解された。ただ熊本地震で著しい被害の生じた益城町中心街に関しては、この画像解析では非干渉地域とされ、実際に生じた微小な標高変化の広がりとは判然としない<sup>7)</sup>。本発表では、DEM の差分を加工することで、狭い範囲で、微小な標高変化の広がりとは量を可視化する剰余地図の作成や活用<sup>8) 9)</sup>と、2016 年熊本地震の被災地を例に試行した地形変化を生む地表変動の解釈について紹介する。

### 2. 剰余地図の作成と確認

#### 1)対象地域と現地確認

2016 年熊本地震で被災した熊本県益城町の中心市街地の約 1.5km 四方を対象とした。2016 年～2017 年に実施した現地調査では、地震断層他の亀裂<sup>10)</sup>とともに微小な標高変化による地表変動の痕跡を記録した。

#### 2)使用したデータと剰余地図の加工

OpenTopography のサイトから熊本地震前後で、2016 年 4 月 15 日及び 23 日取得のフリーの LAS データをダウンロードした。それらより解像度 50cm の DEM を作成した。2 時期の DEM から標高差分図を作成した。次に標高差分を 100 倍して cm(1000 倍では mm)の整数値に変換した。続いて 4～20 それぞれで除算した剰余から、分母数の区分を持つ段彩による剰余地図を作成した。例えば 10 で除算する剰余の 0-9 は標高変化 10cm で 1 段彩になるため、標高変化 1m の範囲が 10 縞の段彩で表現される剰余地図となる。

### 3. 剰余地図と地形変化との対応付け

#### 1)現地確認と DEM の標高差分の特徴

地形変化を生む地表変動として、斜面崩壊による土

砂移動及び地震断層での上下・水平の地盤変位を現地確認した。加えて地震断層近傍で緩やかな傾斜を生む微小な標高変化も観察された。この地表変動は数 10m の広がりを持つ、10cm 程度の沈下や隆起又は双方によるうねりとして識別される。

#### 2)地表変動の確認場所と剰余地図

調査時に地表の沈下・隆起・うねりを確認した多くの地点に対し、分母 18 による剰余地図に「広がりのある緩やかな地表の微小な凹凸」を示す段彩が最も鮮明に現れた。図-1 に、その剰余地図の一部範囲を示す。また写真-1 は矢印方向の微小な標高変化に伴い畑にうねりが生じた地点 5 付近の景観を示す。

図-1 では色がざらつき段彩の現れない周囲に対し、地点 5 の約 50m 四方に規則的な段彩が表現されている。このように剰余地図では、何らかの地表変動から地形変化が生じた範囲に規則的な段彩が現れ、それとは無関係の場所では段彩が形成されない。この地図の特性から、地形変化の広がりとは量が識別しやすい。この特性は、標高差分図にはほとんど期待できない。さらに図-1 に現れた規則的な段彩の範囲は、地震断層沿いによく追跡できるので、地形形成に関わるそれら地表変動は断層活動に由来することが明らかである。

また分母が異なると地表変動を示す段彩は不鮮明となり、その範囲は周囲と区別しにくくなる。これは熊本地震の地震断層を生じた地表変動が、固有の波長と振幅を持っていたことを意味する。そして結果となる地形変化の広がりとは量の確認には、規則的な段彩が現れる適切な分母による剰余地図が必要なことを示す。

### 4. 地表変動と剰余の関係

現地確認された微小な標高変化を生じた地表変動 1 は、より大きな波長と振幅を持つ広域の地表変動 2 に内在する。地表変動 2 を示す階級区分による標高差分図では、地表変動 1 は少数の階級に内包され、その広がりとは量を地図表現できない。剰余地図作成では、地表変動 2 の標高差分を除算で細分し、その剰余に着目し、地表変動 1 を細分範囲内で多くの階級で表現する工夫をしている。結果、剰余地図では「広がりのある緩やかな微小な」地表変動範囲を捉えられた。

剰余地図では、LAS データの標高差分から、実際に合う高さ精度より微小な標高変化に基づく地表変動を議論できた。これは点群データ個々が誤差を持ちながらも、空間関係は相対的に正しく、現実に近い相対地

形モデルは構築されていたことが背景にある。このため標高差分は絶対的ではなく相対的に正しい値となり、剰余地図では、「広がりのある緩やかな微小な」地表変動の広がりと量を正確に可視化できたと考えられる。

## 5. まとめ

DEM の差分データから求める剰余地図を 2016 年熊本地震の被災地に適用し現地観察結果と対照した結果、以下のことが分かった。

- 1) 益城町では地震に伴う広がりのある緩やかな地表の微小な凹凸として、沈下・隆起・うねりが観察された。
- 2) 剰余地図は地表変動の広がりや量を識別できるが、作成では変動の持つ固有の波長と振幅に合う識別しやすい剰余を選定する必要がある。
- 3) 「広がりのある緩やかな微小な」地表変動範囲は、地震断層付近に連続するため、その地形形成は断層活動に由来する。
- 4) 精度よい地形モデルからの DEM によれば、剰余地図では DEM の高さ精度を越える地表変動を相対的にとらえ地形変化が議論できる。

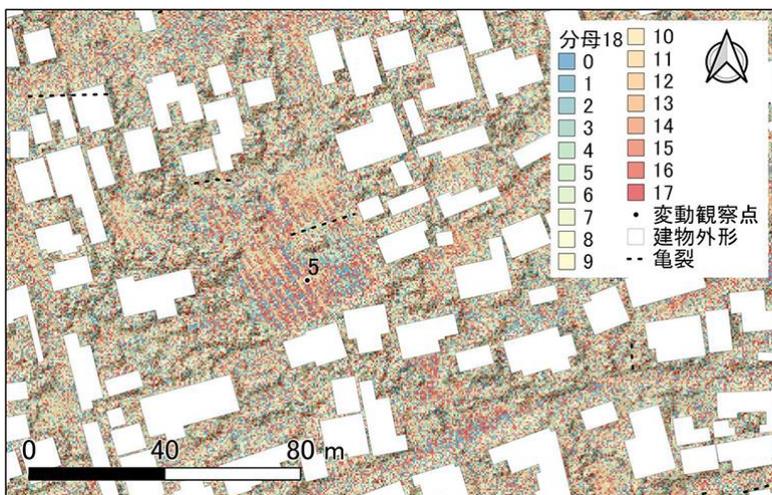


図-1 分母 18 による剰余地図の例



写真-1 畑に現れたうねり

## 謝辞

現地調査では西南学院大学の磯望教授に多くの助言を頂戴した。熊本地震に関わるレーザー計測データのフリー使用可能な仕組み構築に支援協力された機関や皆様に、記して謝意を表す。

## 文献

- 1) 鈴木雄介・杉本直也・増田慎一郎・原口強 (2021) : 土砂災害時の点群データ活用と地形画像診断の提案-2021年7月熱海土石流災害を例として-, 都市防災研究論文集, No.8, pp.13-18.
- 2) 黒木貴一・後藤健介・池見洋明 (2020) : GNSS 受信機による座標計測と SfM の写真解析試験, 福岡教育大学紀要, Vol.69, No.2, pp.1-11.
- 3) 飛田幹男 (2003) : 合成開口レーダー干渉法の高度化と地殻変動解析への応用, 測地学会誌, Vol.49, No.1, pp.1-23.
- 4) 山田晋也・森下遊・和田弘人・吉川忠男・山中雅之・藤原智・飛田幹男・矢来博司・小林知勝 (2015) : だいち 2 号 SAR 干渉解析による御嶽山噴火に伴う地表変位の検出, 国土地理院時報, No.127, pp.11-15.
- 5) 藤原 智・仲井博之・飛田幹男 (2005) : 干渉 SAR による全国の地盤沈下検出に向けて, 国土地理院時報, No.108, pp.11-19.
- 6) 宇根 寛・中埜貴元・藤原 智・小林知勝・森下 遊・岩田和美・佐藤 浩・八木浩司 (2017) : 平成 28 年熊本地震に伴い阿蘇外輪山北西部に現れた「地震断層」の分布とその性質, 日本地理学会発表要旨集, No.92, p103.
- 7) 藤原智・矢来博司・小林知勝・森下遊・中埜貴元・宇根寛・宮原伐折羅・仲井博之・三浦優司・上芝晴香・攪上泰亮 (2016) : だいち 2 号干渉 SAR による熊本地震で生じた小変位の地表断層群の抽出, 国土地理院時報, No.128, pp.147-162.
- 8) 黒木貴一・磯望 (2021) : 標高変化データを用いた地震による地表変動範囲の可視化, 日本地形学連合 2021 年秋季大会, 日本地形学連合発表要旨集, Vol. 2, No. 1, p12.
- 9) 黒木貴一・池見洋明 (2022) : 桜島東麓の標高変化データによる地形形成場の表示, 自然災害研究協議会西部地区部会報・論文集, No.46, pp.1-4.
- 10) 黒木貴一・磯望 (2022) : 益城町での亀裂調査に基づく熊本地震の被害記録, 月刊地球, 号外 No.71, pp.10-18.

# 24. 四万十帯大井川水系の土砂動態に関する応用地質学的研究 砂岩泥岩互層を対象に

Research of Engineering Geology on Sediment Dynamics of Oi river system in Shimanto terrain: alternated layers of sand and mud stones

○藤井幸泰 (名城大学), 鈴木志信, 大森巧規, 小島貴大 (元名城大学)  
FUJII Yukiyasu, SUZUKI Shinobu, OMORI Takumi, KOJIMA Takahiro

## 1. はじめに

豪雨等による斜面災害が例年のように発生している。斜面を流れ下った土砂は河川に流入し、堆積と運搬を繰り返し、いずれは海洋に到る。途中にダムなどの土木構造物がある場合、堆砂といった問題を引き起こす。河床堆積が顕著になれば洪水の危険性が高まる。近年は山地から海岸部までの土砂動態をまるごと管理する「総合的な土砂管理」が重要視されている<sup>1)</sup>。総合的な土砂管理では、地質別の土砂生産や流出形態の把握など、応用地質学的の視点も期待されている。

ここでは大井川の一支流である榛原川を対象に、源流となる崩壊地から大井川合流点までの土砂粒度分布の変化を追い、崩壊地と合流点での礫の強度も比較して土砂動態について一考察を述べたい。

## 2. 調査地の地形・地質と崩壊地

本調査の対象地は、大井川中流部の榛原川流域である(図-1)。流域面積 24 km<sup>2</sup> 中に、1627~254m までの標高が存在する急峻な地形である。後期白亜紀から古第三紀の付加体である四万十帯の堆積岩が分布している(図-2)。榛原川流域の地質別分布面積は、砂岩泥岩互層 33%、混在岩 60%、その他が 7%である。流域内崩壊地の面積は 0.6 km<sup>2</sup> 程度であるが、砂岩泥岩互層 69%、混在岩 28%、その他が 3%と砂岩泥岩互層の割合が非常に高い<sup>2)</sup>。源流域に分布するホーキ蘿やゴボウ蘿といった大規模崩壊地は、砂岩泥岩互層にあたる。

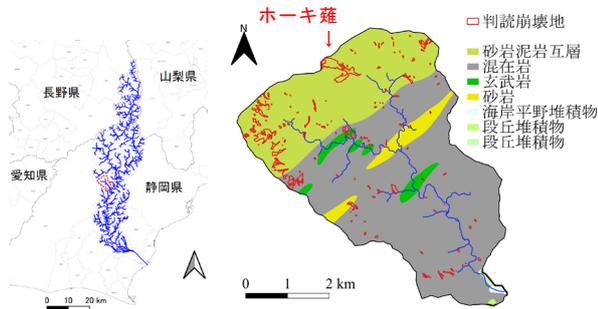


図-1 大井川水系 図-2 榛原川流域の地質図  
赤枠が榛原川流域 1/20 万シームレス地質図に追記

## 3. 調査方法と結果

### 3.1 砂岩層における節理面と層理面間隔

榛原川源流域の最大崩壊地であるホーキ蘿は砂岩

泥岩互層で構成される。崩壊地は治山工事で立入困難であるが、周辺には露頭が存在する。砂岩泥岩互層は砂岩層の層理面、ならびに層理面に直交する節理系が明瞭に認められる(図-3)。砂岩層は層理面と節理面によってブロック形状に分離されうる構造を示しており、崩壊と共に砂岩礫に転じると考えられる。そこで砂岩層を対象に、層理面間隔(L)と節理面間隔(J)の計測を実施した。L-Jの関係を図-4に示す。過去研究<sup>3)</sup>の通り、比例関係があることがわかる。



図-3 砂岩泥岩互層の正射投影図(上写真)と層理面間隔(L)と節理面間隔(J)(下図)

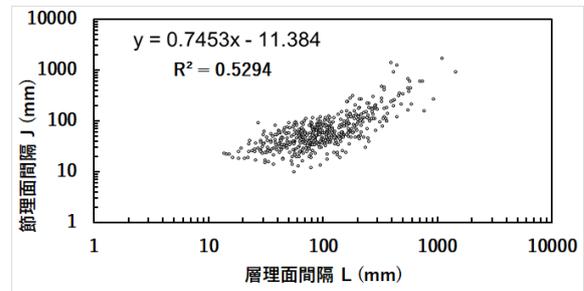


図-4 砂岩層の層理面と節理面間隔の関係

### 3.2 河床での粒度分布と岩種比率

河床に堆積した土粒子を対象に、河道に沿った直線 100m 沿いに 1m 間隔で土粒子を抽出し、粒径を測定する線格子法を用いた。さらに粒径を測定する際、目視での岩種判別を行い、岩種の比率も算出した。粒度分布と岩種比率は、大井川との合流点から 0 km, 1km, 2.5km, 4km, 9km の 5 地点で実施した。合流点の 0km ならびに源流に近い 9km 地点での砂岩と泥岩の礫を対象にした粒径加積曲線を図-5 に示す。それぞれの 50%粒径 D<sub>50</sub> は表-1 となる。泥岩よりも砂岩の方が土粒子径が大きいこと、どちらも流下と共に土粒子径が減少していることがわかる。

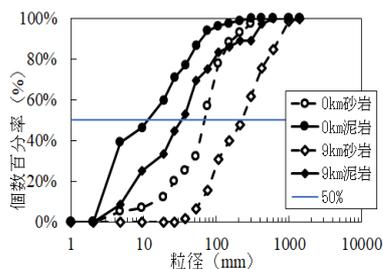


図-5 岩種別粒径加積曲線

表-1 各位置の泥岩と砂岩の50%粒径

	0km 泥岩	9km 泥岩	0km 砂岩	9km 砂岩
D <sub>50</sub> (mm)	12	35	70	250

### 3.3 砂岩泥岩互層と河床礫の強度比較

ホーキ薙周辺の露頭で採取した砂岩ならびに泥岩試料と、大井川合流点から 0km と 9km の河床で採取した河床の砂岩ならびに泥岩の土砂試料（河川礫）を対象に、点載荷試験を実施した。試験は地盤工学会基準の「岩石の点載荷試験方法」JGS3421-2012 に従って実施した。試験結果の一例を図-5 に示す。

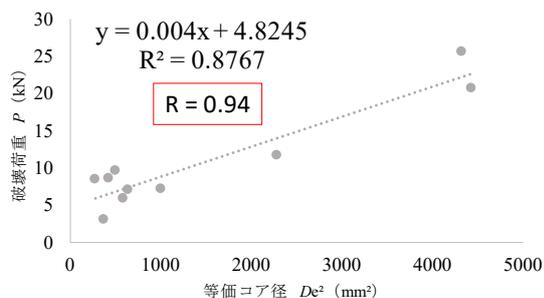


図-5 合流点から 0km 地点の砂岩礫の点載荷試験結果

点載荷強度指数  $I_{s(50)}$  は、等価コア径  $D_e^2 = 2500 \text{ mm}^2$  での点載荷強さ (MPa) を代表値とする。相関係数  $R$  がおよそ 0.5 程度以上のケースについて  $I_{s(50)}$  を求めた結果を表-2 に示す。

表-2 崩壊地ならびに河床礫の点載荷強度指数

場所	崩壊地 (互層)		河床 (礫)			
	砂岩	泥岩	9 km		0 km	
岩種			砂岩	泥岩	砂岩	泥岩
$I_{s(50)}$ (MPa)	5.62	1.89	5.47	2.56	5.93	5.98
R	0.46	0.39	0.54	0.49	0.94	0.04

どの場所においても、砂岩の点載荷強度指数はほぼ同じ値の 5.5~6.0MPa を示している。一方の泥岩はバラつきが多いうえに、崩壊地では破壊荷重と等価コア径の関係が反比例を示して  $I_{s(50)}$  を求められない。0km 地点の泥岩は同サイズの 20~30mm 径の礫ばかりで相関係数が低い。そこで GS3421-2012 に従って寸法補正係数を用いて  $I_{s(50)}$  を求めて平均値を算出した。これらの値を表-2 の青数値で示している。

## 4. 考察

崩壊源の砂岩泥岩互層において、砂岩層中の層理面 (L) と節理面 (J) の間隔は比例関係を示し (図-4)、10~1000 mm に分布している。崩壊源からこの程度のサイズの砂岩礫が供給されていると仮定もできる。

河床での砂岩礫の粒度分布をみると (図-5)、9km では 50~1000 mm ( $D_{50}=250 \text{ mm}$ )、0km では 5~300mm ( $D_{50}=70 \text{ mm}$ ) 程度のサイズである。すなわち崩壊源から供給される砂岩礫は、河床までの距離による選択的運搬によって粒度分布は異なるものの、崩壊源でのサイズを維持して運搬されていると考えられる。実際に崩壊地から河床までの砂岩の点載荷強度指数をみるとほとんど変化が無く、供給源から風化を起こすことなく運搬されているようである。

一方の泥岩は 9km 地点には 200~300 mm の巨礫も存在するが、0 km 地点では 20~30 mm 以下のサイズが主体である。泥岩層や混在岩の基質をなす泥岩は粘土鉱物が多くスレーキング等の風化を起こしやすく、点載荷強度も砂岩より低いため、サイズのより小さな土砂を供給していると考えられる。また大井川との合流点である 0 km 地点では砂岩と同程度の強度を示しているが、破碎・摩耗と選択的運搬によって強度の高い泥岩礫のみが 0 km 地点に存在すると考えられる。

## 5. まとめ

「総合的な土砂管理」を目指し、大井川の一支流である榛原川を対象に、崩壊源から合流点までの土砂動態を、土粒子サイズと点載荷強度指数で比較した。榛原川全域を通じた破碎・摩耗作用と選択的運搬作用などの検討はまだこれからであるが、砂岩には選択的運搬作用の影響が大きい可能性を示すことができた。

本研究は国土交通省河川砂防技術研究開発公募地域課題分野 (河川)「大井川流砂系土砂管理に向けた支川土砂流入評価方法の提案」(代表: 溝口敦子) の研究費を一部利用した。関係者に深くお礼申し上げる。

## 文献

- 1) 大井川流砂系協議会 (2020) : 大井川流砂系総合土砂管理計画【第一版】原案, 110p.
- 2) 鈴木志信・藤井幸泰 (2021) : 大井川水系榛原川の土砂生産過程に関する基礎的研究, R3 年度日本応用地質学会研究発表会, 発表番号 17.
- 3) Bai, T., D.D.Pollard, D., Gao, H. (2000) : Explanation for fracture spacing in layered materials, nature, Vol.403, pp.753-756.

## 25. AR 砂場を用いた集水域と流下方向の可視化

A method for visualizing drainage basins and flow directions with the Augmented Reality sandbox.

○猪股雅美 (広島大学)

Masami Inomata

### 1. はじめに

AR 砂場とは、カルフォルニア大学の Oliver Kreylos 氏が開発した Augmented Reality (拡張現実) の技術を用いた体験型地形モデルのデバイスである。実在する砂箱に入った砂の立体形状をセンサーカメラで読み取り、数値化したのち、等高線で表現されるカラーマップをプロジェクターで再び砂上に投影することで、リアルタイムの地形変化を追従することができる。また、水流シミュレーションアルゴリズムによって仮想的な雨を降らすことも可能である。これまでは主に低年齢向けのアウトリーチ教材として利用されてきた AR 砂場であるが、今回はコンターを一致させた実在の地形改変モデルを用いて、集水域の変化や降雨時の流下方向などを可視化することで、実際の災害についての検証と今後の防災についての指針を示すデバイスとして使用することを目的とした。

Key words; Augmented Reality sandbox, drainage basins, flow directions

### 2. 研究対象

本研究の対象は広島県東広島市鏡山に位置する鏡山城跡である。鏡山城は西条盆地中央の標高 335m に 300m 四方の城域を持つ、比高約 100m の山城で南北朝時代の 14 世紀後半に築城されたと考えられている。平成 30 年 7 月豪雨の際には、7 月 5 日から 8 日までの 4 日間の雨量記録<sup>2)</sup>が 379mm であった。このとき鏡山城では複数の土石流が発生しており、その中でも主郭北側の空堀跡下部より発生した土石流は最も崩壊規模が大きい (図 1)。中世山城跡には外敵の侵入を防ぐために尾根を数 m の深さに掘り下げた「堀切」などの空



図-1 主郭北側の空堀跡下部より発生した土石流

堀が遺構となって残存している。地形改変によるこれら空堀の築城時の深さは、現在は土壌の堆積により地形に反映していない。そのため、現在の地形データで土石流シミュレーションを実施しても、実際の流下方向とは異なる結果となっていた。

### 3. 研究方法

空堀遺構が土砂移動に与える影響を確認するため、文献や絵図に基づいた測量図である遺構図<sup>3)</sup>より鏡山城の模型を製作し、AR 砂場の機能で集水域の変化や降雨時の流下方向などの可視化を試みた。

#### 3-1. AR 砂場の設置と設定

周辺機器類は表 1 のように揃え、図 2 のように設置した。設定<sup>3)</sup>はデフォルト値から等高線間隔や標高カラーなどを変更した。

表-1 周辺機器類

①	PC	Linux mint (OS)
②	センサーカメラ	Xbox360 Kinect sensor
③	短焦点プロジェクター	BenQ MW632ST
④	モニター	DELLu-2711b
⑤	キャスター付き架台	ものづくりプラザ <sup>※</sup> 製作

※ものづくりプラザ; 広島大学構成員専用の研究支援施設

①~③については法政大学澤柿教伸准教授より借用。

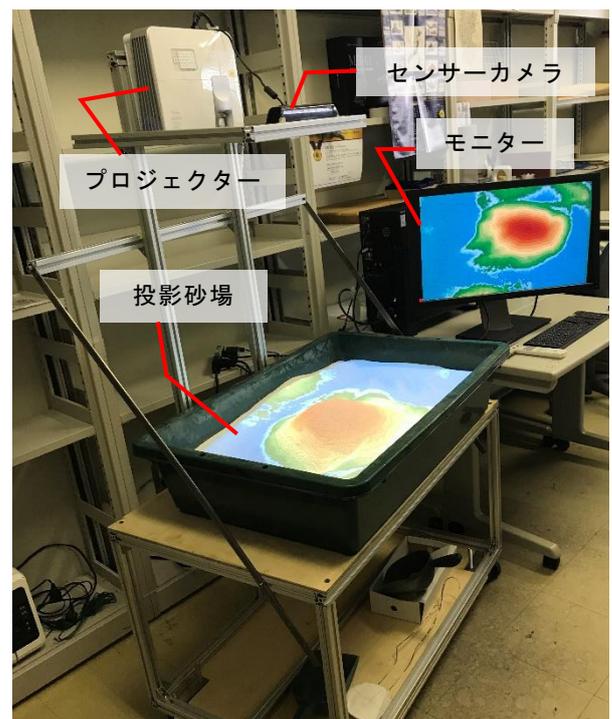


図-2 設置した AR 砂場

### 3-2. 山城模型ジオラマ

災害前の地形である 2016 年計測の 1mDEM の数値標高データ (広島県砂防課提供) より, 鏡山城の 1/1,000 ジオラマ模型の製作を依頼した。地形改変部については, 遺構図りに基づき設定した (図 3)。



図-3 1/1,000 鏡山城跡ジオラマ模型

## 4. 結果

遺構である空堀部が反映した模型 (図 4) と空堀部を地形データ値 (標高数値) に合わせて砂で埋めた模型 (図 5) で比較すると, 空堀部が反映した模型で降雨シミュレーションを実施した場合に, 平成 30 年 7 月豪雨時の土石流と同じ流下方向 (赤枠) が確認できた。

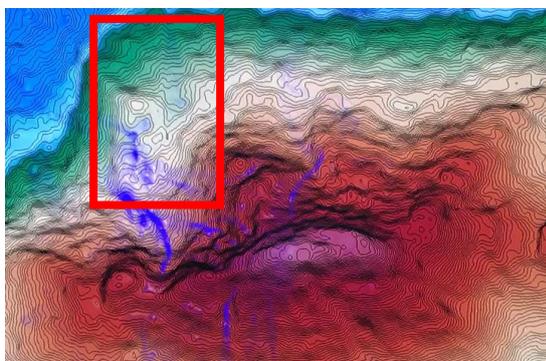


図-4 空堀部が反映した模型

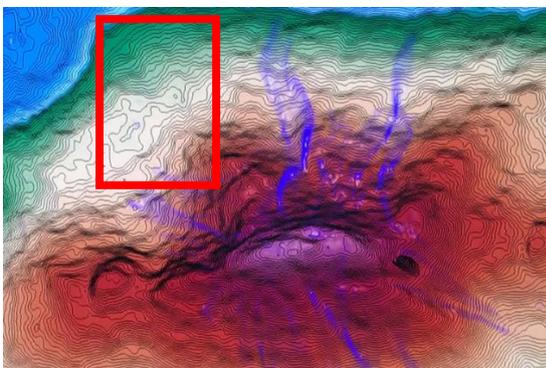


図-5 実際の地形データ値(2016年)での模型

## 5. 考察

今回は降雨強度の設定変更はおこなっていないが, 平成 30 年 7 月豪雨時の土石流発生のトリガーとして

推定できる 1 時間雨量は, 降雨シミュレーションの設定よりも多い約 30mm<sup>2</sup>)であったことから, 実際にはより多くの雨水が流下したと考えられる。

## 6. まとめと今後の課題

降雨シミュレーションの結果より, 空堀遺構が反映した模型では, 地形データに基づいた模型の谷部に流れ込んだ水流とは異なる流れが確認できた。これは平成 30 年 7 月豪雨時の流下方向と一致した。このことにより空堀部が未固結堆積土で埋まり, 周囲の土壌と比較して透水性が大きいことが推測される。筆者は他の数か所の山城跡を調査し, 空堀部が未固結の堆積土で埋まっていることを確認している。掘削調査に規制のある指定遺跡などでは, 遺構図模型を用いて AR で災害メカニズムの推定をおこない, 山裾の防災対策に活用する今回のような手法が, AR の新たな活用方法として提案できる。

今後の課題として, センサーカメラの特性を利用して土壌の透水性を反映させる方法についても試行中である。Kinect センサーカメラは, 特定のパターンを赤外線レーザーで照射し, 反射光のパターンを解析して距離を測定している。カメラの最大解像度は 1280×1024 ピクセル, 距離画像センサ最大解像度は 640×480 ピクセル, フレームレートは 30fps (1 秒間に 30 回) である<sup>5)</sup>。赤外線が透明フィルムを透過する性質を利用して, 未固結堆積土で埋まり透水性が大きいと考えられる山城の地形改変部分を, 加工したフィルムで覆うことより透水性を表現できないかと考えている。

## 謝辞

法政大学の澤柿教伸准教授には機材の借用やシステムの設定など, 大変お世話になりました。また本研究の一部は令和 3 年度広島大学理工系女性リサーチフェロー及び令和 4 年度広島大学総合科学部学生独自プロジェクトにより支援されたものです。

## 引用文献

- 1) 小都隆 : 安芸の城館, ハーベスト出版, 328p, 2020
- 2) データ統合・解析システム(DIAS) : C バンド MP レーダ・X バンド MP レーダ合成雨量データ, 2018.6.28-7.8
- 3) 法政大学社会学部澤柿ゼミ : <https://wiki.sawagaki.0j0.jp/?FrontPage>, 2021 年 4 月 1 日
- 4) Oliver Kreylos Web Site : Project Augmented Reality using Kinect Camera (AR Sandbox), [http://www.joeguillaume.com/AR\\_Sandbox/index.htm](http://www.joeguillaume.com/AR_Sandbox/index.htm), 2022 年 3 月 28 日
- 5) 西林孝 : 映像情報メディア学会誌 Vol.66, No.9, pp.755-759, 2012

## 26. 地すべり対策における地質リスクの発現要因の分析

### Analysis of Geo-Risk Manifestation Factors in Landslide Control

○矢田 純 ((株)カミナガ)

Jun Yada

#### 1. はじめに

近年、建設工事において地盤・地質や地下水等の不確実性に起因するトラブルを未然に防止するための取組として、地質リスクマネジメントの重要性が強調されている。事業関係者全員で地質リスクを共有しかつ対応するための体制の構築が求められており、地質技術者の役割が期待されている。本報告では、事業費の増額となりやすい地すべりや掘削斜面の不安定化において、想定と実際の乖離が生じる背景の具体例を挙げ、地質リスクマネジメントに取り組んだ一例を紹介する。

#### 2. 地質リスクの発生要因

多くの地質技術者が経験していると思われるが、想定と実際の乖離がしばしば発生し、これが建設工事トラブルの背景にある。ここでは、乖離が生じる背景の具体例を取り上げる。

##### (1) ボーリングコアの品質（見え方）

近年は、高品質なボーリングコアを採取する技術が飛躍的に向上し、ありのままに近い状態での採取が可能になりつつある。しかし、その適用はダムなど大型重要構造物に限られている感もあり、全ての建設事業で実施されているとは言い難い。

図-1 は、同じ地すべり斜面で実施した掘削方法の異なる2本のボーリングコアを比較したものである。このボーリングコアを用いて、地すべり移動体の深さを判定するケースを考えてみたい。

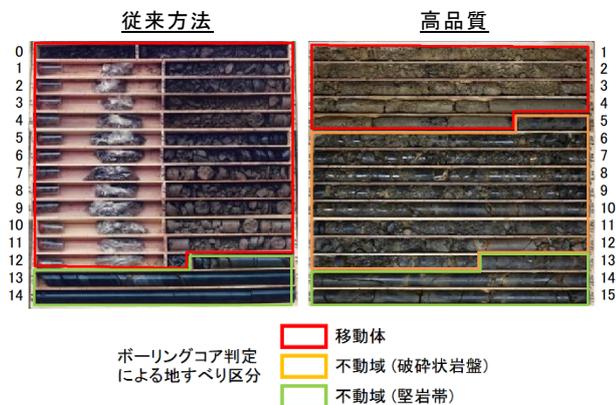


図-1 同一斜面で採取したボーリングコアの掘削方法による見え方の違い

高品質ボーリングで採取したコアでは(図-1の右),

泥岩砂岩互層は深度 12.7m 付近まで破碎状を示すものの、破碎帯に特徴的な規則性のある面構造が確認されること、基質は全て再固結していること、すべり面に該当するような脆弱部は観察されないことなどから、最大でも深度 4.8m までの崩積土を下端とする地すべりであることが読み取れる。

一方、従来方法で採取されたボーリングコアでは(図-1の左)、破碎状岩盤の部分が全て礫状～岩片状を呈し、崩積土と岩盤との境界すら判然としない状態にある。安全側に配慮すると、深度 12.6m の堅岩帯への逢着深度までを地すべり移動体とする風化岩すべりを想定せざるを得ず、地中変動計測に委ねるまで地すべり機構解析が十分に実施できない状況に陥ってしまう。このようにボーリングコアの品質や見え方(判定技術)だけですべり面の想定深度が数mもずれてしまい、対策工事費に大きく影響する要因となりうる。

##### (2) 想定限界

調査ボーリングの削孔径は、一般にφ66mm～86mmが多用される。地質調査業務では、地表踏査やボーリング結果等をもとに地質断面図が作成(モデル化)される。しかしながら、そもそも地層の解釈を間違っていたり、ボーリングでは捉えきれない局所的な弱面が存在するなど様々な不確実性が常に潜在し、モデルを踏まえた設計どおりに施工が進まないケースも起こりうる。

図-2 に示す切土法面の施工事例では、事前のボーリング調査において、ある深度から中硬岩相当の結晶片岩が確認されていたが、実際の掘削面を見ると、細粒化した脆弱面が連続的に分布していた。

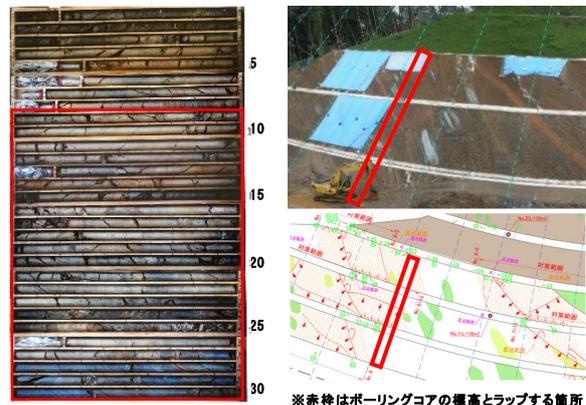


図-2 施工前のボーリングコアと実際の掘削面(写真およびスケッチ)

この法面は、切り下がる過程で小規模な崩落や押し出し等の変状が繰り返し発生し、最終的に道路面まで切り下がった段階で地すべりが誘発され、工事が完全にストップした。この影響で約半年工程が遅延し、工事費も当初から大きく増加した。直近のボーリングコアの性状からは、ここまでの事態になることを想像しがたいが、ボーリング調査による想定限界を常に意識しておきたい事例といえる。

### 3. 地質リスクマネジメントの取組事例

ここでは、ある地すべり防止工事において、発注者および施工者らと地質リスクを認識・共有し、対応した事例を紹介したい。この事例は、地すべり対策工法として、アンカー工が計画されていたが、施工段階で地質リスクが発現したものである。

アンカー工の設計では、下式<sup>2)</sup>のとおり周面摩擦抵抗（以下、 $\tau$ 値）をもとにアンカー定着長が決定される。

$$l_a = \frac{T_d \cdot 10^3 \cdot F_s}{\pi \cdot d_A \cdot \tau}$$

$l_a$  : アンカー定着長(m)…最大 10m まで

$T_d$  : 設計アンカー力(kN) …予め設定

$F_s$  : 引き抜きの安全率…永久の場合 2.50

$d_A$  : 削孔径(mm) …一般に 90, 115, 135mm

$\tau$  : アンカー体の周面摩擦抵抗(N/mm<sup>2</sup>) …地質により決定

設計段階では $\tau$ 値を求めるための基本試験が行われていないこともあり、その場合は地盤性状（⇨地盤の硬軟）をもとに設定を行う<sup>3)</sup>。これによれば、 $\tau$ 値を大きく設定するとアンカー定着長が短くなり経済的な設計となる反面、施工時に引き抜ける可能性が高くなる。逆に $\tau$ 値を小さく設定すると、引き抜ける可能性は小さくなるが、アンカー定着長が長くなって不経済な設計となる場合がある。施工前には必ず基本試験を実施する必要があるが、本事例では基本試験用の先進ボーリング（斜め）の結果と、設計段階の鉛直ボーリングで把握していた地質性状が著しく異なる事象が発生した（図-3）。

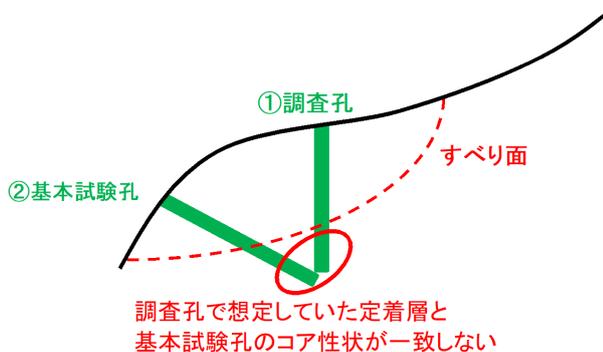


図-3 鉛直ボーリングと先進ボーリング（基本試験孔）の位置関係の概念図

そのため、アンカー定着層の $\tau$ 値をどう評価するかが課題となった。特に現場条件の制約によって段数を増やせないため、 $\tau$ 値=0.10 N/mm<sup>2</sup>以下だとアンカー工が適用できず工法そのものを見直す必要に迫られていた。

先進ボーリングのコアを詳細に観察すると、黒色片岩(Sch)と超塩基性岩(Um)が互層をなし、超塩基性岩では完全に細粒化した部分とわずかに岩芯を残す部分が不均質に混在している状況であった（図-4）。そのため、細粒化した軟質部で基本試験を実施した場合、期待される $\tau$ 値が得られない可能性も十分に想定された。

そこで、発注者や施工者も含めてこの事実を認識し、あらゆるリスク（試験時・本施工時の引き抜け、引き抜けた場合の対応など）を事前に共有した。そのうえで、次のような方針を決定した。一般的な基本試験では定着区間を1mとすると、岩盤の硬軟の不均質性を踏まえ、過度に小さい $\tau$ 値にならないよう2mの試験区間を選定した（図-4）。また、試験荷重の載荷ステップを細かく設定し、ロスなく $\tau$ 値を求められるよう試験を実施することとした。

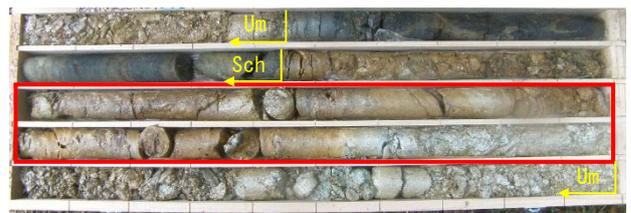


図-4 基本試験孔のボーリングコアと選定した試験区間（赤枠）

以上の結果、 $\tau = 0.12 \text{ N/mm}^2$ が得られ、アンカー工の仕様や諸条件の変更により対応できた。実際の本施工においてもアンカーが引き抜けるような懸念を回避することができた。

### 4. おわりに

地質リスクへの対応としては、地質調査の段階において、地質技術者が「想定と実際の乖離」を常に意識し、リスクを正しく認識しておきたい。また、事業関係者へわかりやすく伝え、共有していくための一体的な取り組みが求められる。

### 文献

- 1) 佐々木康人 (2022): 土木事業における地質・地盤リスクマネジメント - 関係者が ONE-TEAM でリスクに対応するために -, 日本応用地質学会九州支部会報, No.43, p.18-26.
- 2) 地盤工学会 (2012): グラウンドアンカー設計・施工基準, 同解説, 224 p.
- 3) 日本道路協会 (2009): 道路土工指針 - 切土工・斜面安定工指針, 570 p.

# 27. 活断層調査におけるボアホールカメラ画像解析の活用-奈良盆地東縁断層帯・黄檗断層の事例

Application of borehole camera image analysis for active fault research, an example in the Oubaku Fault, Nara-bonchi-toen-fault zone.

○小松原琢（産業技術総合研究所），富浦裕司（株式会社レアックス），郡谷順英（株式会社パスコ）  
Taku Komatsubara, Yuji Tomiura and Yorihide Koriya

## 1. はじめに

活断層の活動履歴調査にあたっては、第四系の地質構造を詳細に検討することが不可欠である。しかし活断層調査を意図して開発されてきたトレンチ調査やジオスライサー調査法は、経費や用地制約の点から適用困難な場合が少なくない。そこで、市街地における撓曲帯の調査にあたり、外径 86mm のオールコアボーリングとレアックス社開発の円錐鏡方式ボアホールカメラ (BIPS) による孔壁画像解析を組み合わせて、第四系の構造解析を行った。

## 2. 調査対象

調査対象は奈良盆地東縁断層帯・黄檗断層である。この断層周辺は開発が進み、自然の地形と表層地質が残されている地区は、事実上山科区の 1 地区周辺に限られる。しかし、この地区においても、都市的土地利用が進んでおり、駐車場の一画や細分化された畑地の一部を借用して調査を実施することになった。最終的には、1 地点で撓曲崖基部に分布する沖積層から段丘堆積物相当を対象として、オールコアボーリングとボアホールカメラ画像の取得による調査を実施した。ボーリング孔の水位は深度約 1m であった。コアの肉眼観察より作成した柱状図とボアホールカメラ画像を図-1 に示す。

## 3. 画像取得手順

今回の調査では、孔壁が崩れやすいと予想されたため、1m 掘進ごとに清水による孔内洗浄→ボアホールカメラ 1m 区間撮影→ケーシング挿入→掘進を繰り返し、かつ全長 (7.5m) 掘削後全ケーシング抜き取り→孔内洗浄→全区間ボアホールカメラ撮影、の往復撮影を実施した。円錐鏡方式のプロープでは先端約 20cm 区間が撮影できないため、孔底部の撮影は行わなかった。掘進時の 1m 区間ごとの孔内洗浄からケーシング挿入開始までの所要時間は約 1 時間、全ケーシング抜き取り後の孔内洗浄からカメラ撮影所要時間は約 2 時間であった。

## 4. 結果

孔壁の崩落によって孔底部が撮影できなかった区

間があるものの、全体に良好な画像が得られ、無定方位コアの観察では得られない正確な走向傾斜の測定や初生的堆積構造と変形構造の識別が可能という点で、当初想定していた以上の良い成果を得ることができた。しかし、孔壁崩壊によって欠測区間が生じたという問題も残された。

## 5. 留意点

ボアホールカメラ画像取得は用地の制約が厳しい場所や幅広い撓曲帯など、現行の活断層調査手法の適用が難しい調査対象について、軟弱な堆積層の構造調査を行う際に、大変有効な手法であるものの、いくつか留意すべき問題がある。

今回の調査で気づいた点を列挙する。

1) ケーシング抜き取り後の全層撮影では、孔壁に付着した泥の影響により明瞭な画像が取得できないことがあった。このため、掘進後撮影を繰り返すことを基本とし、なるべく細かい区間ごとに撮影することが望ましい。

2) 孔壁の自立が困難な場合、透明管ごし撮影することが有効と考えられるが、孔壁が崩壊した場合には透明管の回収が困難となる恐れがある。

3) 今回調査に用いた円錐鏡方式では歪みの小さい画像が得られる反面、プローブ先端の約 20cm 区間が死角となり、孔底部を撮影することができない。このため、図 2 に示す作業手順により、オーバーラップ区間を設けて撮影する必要がある。

## 6. 謝辞

本調査は文科省研究開発局の委託により京都大学が主担当となって実施した「奈良盆地東縁断層帯における重点的な調査観測」の一環として行った。調査にあたっては、地権者各位・学区長・山科区地域力推進室および京都市防災危機管理室の皆様のご協力を賜った。関係者の皆様方に感謝申し上げます。

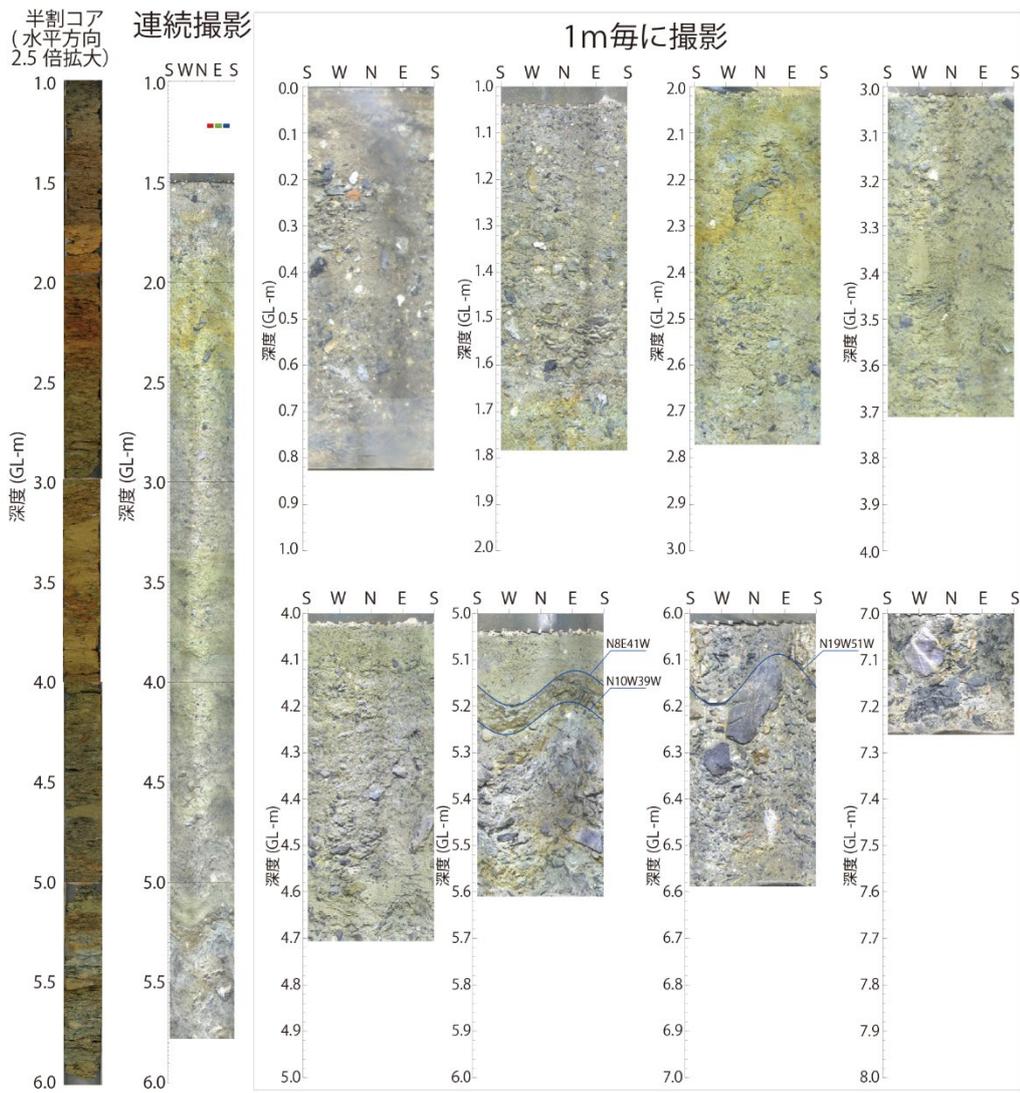


図-1 今回の調査で得られたボーリングコアの半割写真(左端)とボアホールカメラ画像

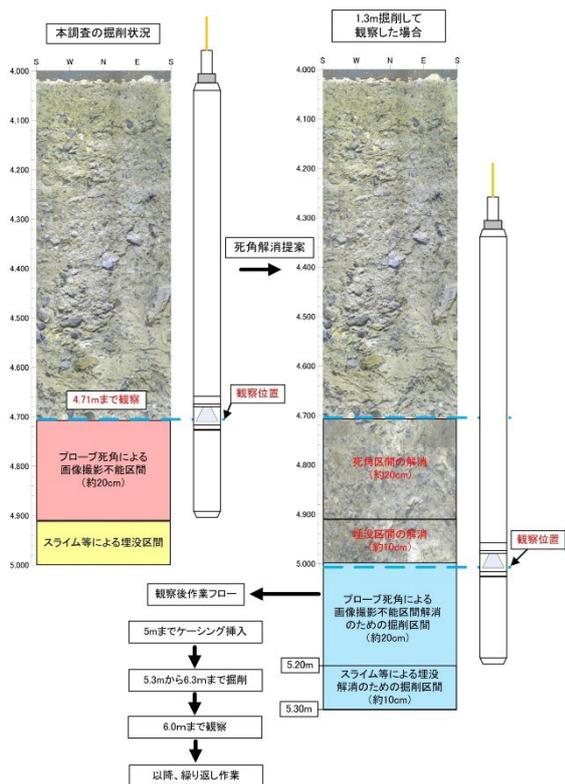


図-2 円錐鏡方式プローブを用いる場合の画像欠如区間をなくするための作業手順

## 28. 段丘・丘陵地の盛土地における液状化発生地点の地形・地質と年代

Liquefaction Occurrence Areas of Landform, Geology, and Period in Embankments of Terraces and Hills

○高田協平（関西大学大学院），黒木貴一（関西大学）

Kyohei Takada, Takahito Kuroki

### 1. はじめに

変動帯である日本では，古来より地震による被害を多く受けてきた．その被害を及ぼす現象には斜面崩壊や液状化があり，地形・地質を背景とした要因の検討が多数行われている．低地や埋立地では，1964年新潟地震で構造物の液状化被害が注目された<sup>1)</sup>．これまで傾斜地である段丘・丘陵地では，斜面崩壊に注目されることが多かった<sup>2), 3)</sup>など．しかし近年，それらの人工改変地でも時折，液状化発生の記録が見られるようになった<sup>4), 5)</sup>など．

ただ，段丘・丘陵地の人工改変地を対象とする液状化被害についての総合的な検討はまだ少ない．そこで，本研究では段丘・丘陵地の人工改変地での液状化地点について，地形・地質と開発年代から発生条件を明らかにすることを目的とする．

### 2. 研究方法

#### 2.1. 研究対象地域

若松（2011）<sup>1)</sup>の液状化発生地点を全国ベースで参照し，2地域を研究対象に選定した．それらは，2004年新潟中越地震で被災した新潟県長岡市と小千谷市（18箇所），2011年東北地方太平洋沖地震で被災した

宮城県仙台市（計26箇所）である．

#### 2.2. 現地調査方法

液状化発生地点の人工構造物を中心とする周囲の景観や，地図では読み取れない起伏，亀裂，微地形を観察した．また観察結果から地下水の位置を推定し，地形・地質型をまとめた．

#### 2.3. 地形解析方法

仙台市では，泉区南光台周辺，宮城野区鶴ヶ谷周辺，泉区高森周辺，太白区松が丘周辺の液状化発生地点S1～26（図-1）でそれぞれの集水域を求めた．集水域は，QGIS3.16で国土地理院の基盤地図情報の5mメッシュDEMを用いて計算した．その時，外部流域の最小サイズは5とした．また，液状化地点の盛土厚と造成年代を仙台市都市整備局開発調整課（2020）<sup>6)</sup>より求めた．

### 3. 結果

#### 3.1. 液状化が発生する地形・地質条件

##### 1) 長岡市と小千谷市

段丘・丘陵地で液状化発生地点に共通する地形・地質型をA～Eに整理できた．A型は，傾斜がある盛土地で構造物が地下水の流れを遮断する条件を持つ（図-2）．B型は，段丘・丘陵地を刻む谷の谷頭が盛土された条件を持つ．C型は，段丘を地すべり末端部が覆う条件を持つ．D型は，周囲で最低位の段丘という条件を持つ．E型は，段丘・丘陵地を刻む谷底平野が盛土された条件を持つ．

したがって，いずれの型でも液状化被害は，地下水が比較的地表に近い場所で生じている傾向がある．

##### 2) 仙台市

仙台市では，長岡市と小千谷市のA型，B型，E型が確認された．A型は図-1のS-4, 8, 9, 10, 12, 17, 18（写真-1），20, 22，B型は図-1のS-1, 2, 3, 13, 14, 16, 23，E型は図-1のS-5, 6, 7, 19, 21で観察された．そのほかに仙台市では2つの型が確認された．遷緩線の下位付近の条件を持つF型（図-1のS-11, 13, 15）と，微かな凹地の条件を持つG型（図-1のS-24, 25, 26）である．前者は水が滞留しやすい場所，後者は水が周囲より集まりやすい場所と考えられる．

したがって，仙台市でも液状化被害は，地下水が比較的地表に近い場所で生じている傾向がある．

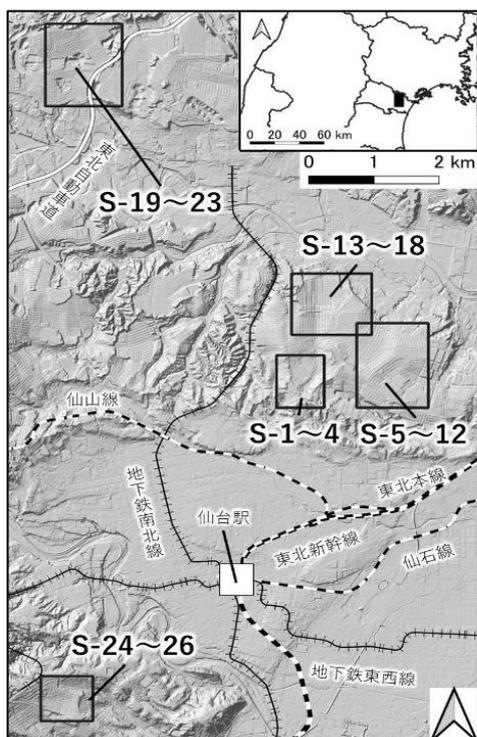


図-1 仙台市の調査地域

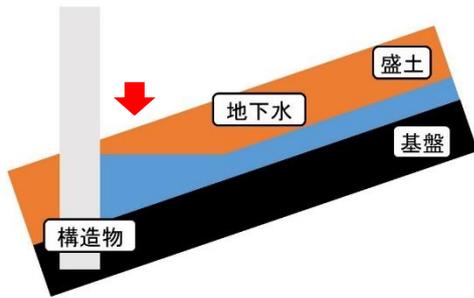


図-2 A型の液状化発生イメージ



写真-1 A型に区分できた地点 S-18の様子

### 3.2. DEMを用いた解析

#### 1) 集水域と液状化発生地点

図-3は南光台5丁目周辺の各液状化発生地点の集水域を示し、等高線と陰影起伏図を重ねた。S-13は11,826m<sup>2</sup>、S-14は2,584m<sup>2</sup>、S-15は1,039m<sup>2</sup>、S-16は365m<sup>2</sup>、S-17は139,025m<sup>2</sup>、S-18は45,817m<sup>2</sup>となった。そして、26箇所の液状化発生地点の集水域を5,000m<sup>2</sup>刻みに集計すると、5,000m<sup>2</sup>未満は11箇所、5,000m<sup>2</sup>以上10,000m<sup>2</sup>未満は2箇所、10,000m<sup>2</sup>以上15,000m<sup>2</sup>未満は1箇所、15,000m<sup>2</sup>以上20,000m<sup>2</sup>未満は2箇所、20,000m<sup>2</sup>以上25,000m<sup>2</sup>未満は0箇所、25,000m<sup>2</sup>以上30,000m<sup>2</sup>未満は0箇所、30,000m<sup>2</sup>は10箇所となり、液状化が発生しやすい集水域の面積が5,000m<sup>2</sup>未満と30,000m<sup>2</sup>以上で二極化した。5,000m<sup>2</sup>未満では液状化発生条件のB型とG型が卓越し、30,000m<sup>2</sup>ではA型が卓越している。

#### 2) 盛土厚と液状化発生地点

液状化発生地点を盛土厚別に集計すると、盛土が1m未満は4箇所、1~3mは2箇所、3~5mは3箇所、5~7mは0箇所、7~10mで7箇所、10~15mで8箇所、15~20mで0箇所、20~30mで2箇所となり、盛土厚が5m以下と7~15mの範囲に液状化発生地点は多く、発生しやすい盛土厚が二極化した。特に、盛土厚が5m以下では液状化発生条件のA型とG型が卓越し、7~15mではA型とB型が卓越している。

#### 3) 造成年代と液状化発生地点

液状化発生地点を造成年代別に集計すると、1960年代に造成された場所では19箇所、1970年代では2箇所、

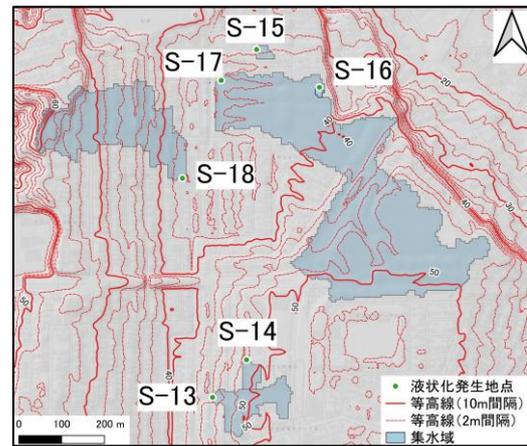


図-3 地点S13~18の集水域と等高線

所、1980年代では5箇所となり、1990年代以降に造成された場所で液状化の発生はなかった。造成年代が1960年代の場所では仙台で観察された5つの型全てが記録されたが、1970年代ではA型のみ、1980年代ではA型2箇所、B型1箇所、E型2箇所が記録され、1970年以降はA型が卓越し、F型とG型が発生していないことが分かった。

### 4. おわりに

本研究から明らかになった点を以下に記述する。

- 1) 長岡市・小千谷市での現地調査では、液状化の発生条件をA~Eの5つの型に整理できた。
- 2) 仙台市の現地調査では、1)のA、B、E型に加え、F型とG型が新たに整理できた。
- 3) 液状化被害が見られたA~G型は、いずれも比較的地下水と地表が近い条件であると推定される。
- 4) A~G型は、集水域・盛土厚・造成年代と関連があることが伺われる。3.2. 1), 2), 3)の対応関係については今後検討を進める。

### 文献

- 1) 若松加寿江 (2011) : 日本の液状化履歴マップ 745-2008, 東京大学出版会。
- 2) 新澤直治 (1952) : 今市地震による崩壊について, 砂防学会誌, vol.8, pp.7-10。
- 3) 釜井俊孝 (1988) : 1987年千葉県東方沖地震による上総丘陵の斜面崩壊, 応用地質, vol.29, pp.285-294。
- 4) 釜井俊孝 (2005) : 2004年新潟県中越地震による都市域の斜面災害, 応用地質, vol.46, no.3, pp.138-144。
- 5) 森友宏・風間基樹・佐藤真吾 (2014) : 東日本大震災における仙台市の大規模造成宅地の地震被害調査, 地盤工学ジャーナル, vol.9, no.2, pp.233-253。
- 6) 仙台市都市整備局開発調整課 (2020) : 仙台市宅地造成履歴等情報マップ, <http://www.city.sendai.jp/ka-ihatsuchose-chose/kurashi/anzen/saigaitaisaku/kanren/joho/index.html> (最終閲覧日2022年7月26日)。

## 29. 紀伊半島熊野川流域の付加体山地に認められる変成・変質作用

### の違いを反映した差別削剥地形とその形成機構

Metamorphosed-level controlled Geomorphology on the accretionary complexes of the Kumano-gawa drainage basin

○木村克己, 金子 誠 (深田地質研究所), 竹村貴人 (日本大学), 菊地輝行, 杉山直也 (J-POWER 設計コンサルタント), 栗田将一 (大洋エンジニアリング)

Katsumi Kimura, Makoto Kaneco, Takato Takemura, Teruyuki Kikuchi, Naoya Sugiyama, and Shoichi Kuwada

#### 1. はじめに

紀伊半島東部の熊野川水系の中・上流部は、中期中新世の大峯花崗岩類が貫入する南北トレンドの大峰山脈で、西部の十津川と東部の北山川の両支流域に分かれる(図-1)。両支流域ともに ENE-WSW ないし EW 走向で北傾斜の地質構造が卓越する白亜紀の四万十帯付加体堆積岩から構成される。広域的に採取した泥岩試料から求めたイライト結晶度のデータ(IC 値)から、大峯花崗岩の接触変成帯<sup>1)</sup>(図-1の赤破線枠内)だけでなく、北山川流域の大半が黒雲母帯およびそれに近い熱変成を受けていることが判明し、その熱源として広帯域 MT 探査で得られた高比抵抗値帯として想定された伏在深成岩<sup>2)</sup>が考えられている(図-2)<sup>3)</sup>。

北山川流域の岩石は、熱変成と珪化変質の影響で亀裂や層理面が癒着し均質・硬質な岩石に変化している。北山川流域では、露岩が多く急峻な斜面地形が発達しており、従来から、斜面崩壊や地すべり移動体の分布が十津川流域に比べて極めて少ないことが注目されていた。山地の削剥量の指標となるダムの堆砂量でも1965年-2002年の38年間の比堆砂量で見ると、十津川流域に比べて半分ほどと少ない<sup>4)</sup>。

本報告では、十津川流域と同一の付加体堆積岩から構成されながら熱変成の影響で岩石強度が増加した北山川流域の両者において、地形的特徴の違いを記述し、その地形形成のメカニズムを考察する。

#### 2. 地形・地質の特徴

十津川流域と北山川流域との比較において、全域の概略的な地形的特徴を図-1の傾斜量図で表現する。代表的な事例としては、十津川流域の風屋ダム付近(図-3a)、大峯山脈の行仙岳付近(図-3b)、北山川流域の池原ダム付近(図-3c)をとりあげ、それぞれ傾斜量図と地形断面図(図-4)で地形的特徴を示す。

接触変成を受けていない十津川流域では、付加堆積岩の地質構造を反映して、ENE-WSW ないし EW 走向の尾根筋(図-1の白破線)と北傾斜の緩斜面と南傾斜の急斜面からなるケスタ地形が発達する(図-1, 図-3a, 図-4C-D 断面)。ケスタ地形の緩斜面は地層の傾斜に平行な流れ盤をなし、数多くの滑落崖・地すべり移動体

が分布している<sup>5)</sup>。その広がりには十津川流域の東縁をなす大峯山脈付近まで続く(図-1)。

一方、大峯花崗岩が貫く大峯山脈付近(図-3b)および北山川流域(図-3c)では、ケスタ地形に代わって、南北方向の尾根線が発達し(図-1の黄色破線)、尾根線や遷急線を境に緩斜面と急斜面が相接して広がる地形的特徴を示す(図-1, 図-3b,c, 図-4E-F,G-H 断面)。また、滑落崖・地すべり移動体の分布は十津川流域に比べて著しく少ない<sup>5)</sup>。

#### 3. まとめと考察

十津川流域に発達する ENE-WSW ないし EW 走向の

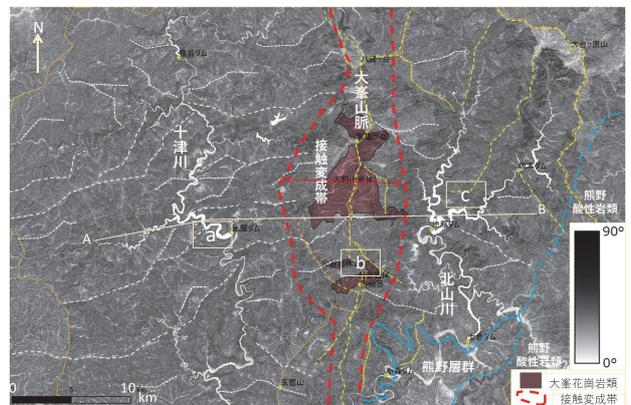


図-1 紀伊半島東部の傾斜量分布と尾根線(傾斜量図の出典:地理院地図) 十津川流域と北山川流域:赤線枠, A-B:図-2の断面図位置,地形検討地域の区画:a, b, c,白破線:ENE-WSW ないし EW 方向の尾根,黄色破線:NS方向の尾根

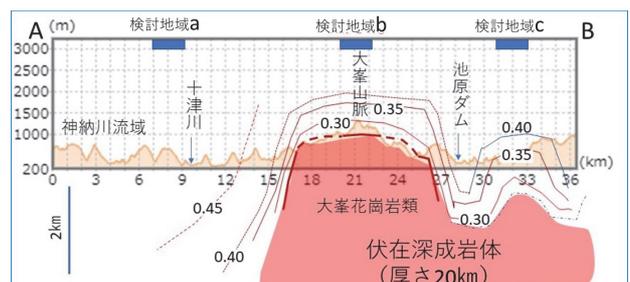


図-2 東西地質断面図とイライト結晶度等値線モデル(細野ほか, 2022<sup>3)</sup>, 一部加筆)

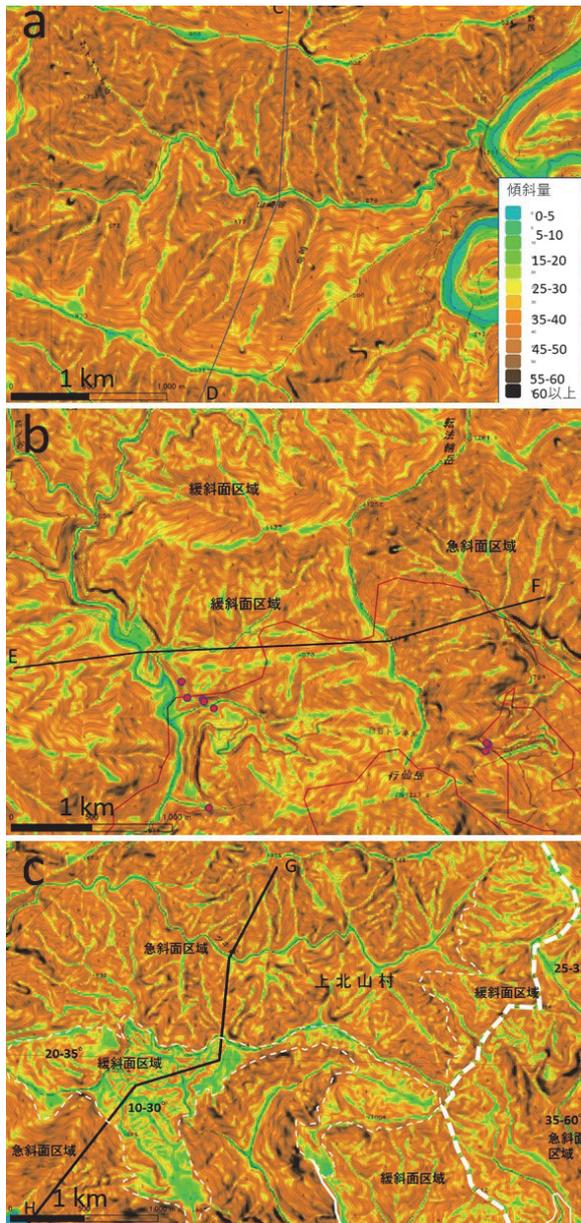


図-3 代表的な地域の傾斜量図（地理院の10mDEBから作成）

ケスタ状の地形は、平野ほか(1984)<sup>6)</sup>が指摘しているように、四万十付加体の地質構造を反映した差別削剥地形である。堆積岩が卓越する付加体は、逆断層で岩相が繰り返す覆瓦構造をなし、層理面や逆断層は同一方向に傾斜し、せん断されやすく風化されやすい泥質岩の層準とともに、流れ盤におけるすべり面として機能しやすい<sup>7)</sup>。

一方、北山川流域では、付加体岩石は黒雲母帯ないしその近くまで接触熱変成を受け、一部珪化変質を被っているため、層理面や逆断層面・破碎帯、せん断された泥質岩はいずれもゆ着し、均質で硬質な接触変成岩に変化している。その結果、層理面・逆断層などの面構造も開離しにくくなるため、ケスタ状の差別削剥地形がほとんど形成されなかったと考えられる。

北山川流域に発達する南北方向の尾根の規制要因

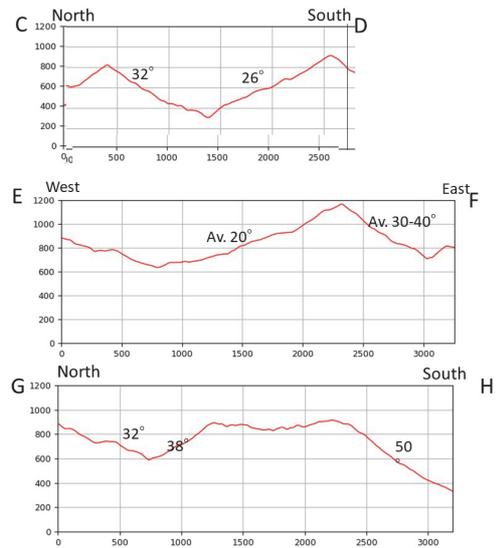


図-4 代表的な地域の地形断面図  
断面図の位置は図-3 参照

としては、大峯山脈に貫入し南北方向の接触変成帯をなす大峯花崗岩類の方向、およそ第四紀以降の東西圧縮で形成された曲隆山地の軸方向の反映が推定される。また、山頂部の緩斜面は、大峯花崗岩類の分布域では同岩体の頂部が平坦ないし緩斜面で側方が急傾斜のストック状の形状をなすこと<sup>1)</sup>に起源が求められるが、大台ヶ原や図-3cなどの山頂緩斜面は花崗岩との関係はなく、周囲が遷急線で急斜面区域と接することから、削り残された古地形面にあたると思われる。

#### 4. 引用文献

- 1) 佐伯 宏・古藤次郎(1972)：紀伊半島中央部の地質および鉱床，鉱山地質，Vol.22, pp.437-447.
- 2) 梅田浩司ほか(2003)：広帯域 MT 法による紀伊半島の中新世珪長質火成岩体の深部構造，火山，Vol.12, 461-470.
- 3) 細野日向子ほか (2022)：紀伊半島南部の四万十帯と熊野層群の泥質岩におけるイライト結晶度と反発硬度の空間分布特性，応用地質，Vol.63, No.2, pp.42-48.
- 4) 熊野川河床調査委員会(2005)：熊野川河床調査委員会報告書概要版，25p，和歌山県。
- 5) 防災科学技術研究所(2014)：地すべり地形分布図 WMS サービス，防災科学技術研究所。
- 6) 平野昌繁ほか(1984)：1889年8月豪雨による十津川災害の再検討—とくに大規模崩壊の地質構造規制について—，京都大学防災研究所年報，Vol.27, B-1, pp.369-386.
- 7) 木村克己(2000)：四万十帯の付加体地質—奈良県南部を例にして—，十津川災害 111 周年記念集会，pp5-11, 京都大学防災研究所研究集会 12S-3.

# 30. 変形-水圧連成解析による CO<sub>2</sub> 貯留サイトの強振動時安定性評価

## ～地質構造の違いによる局所安全率応答の比較～

A study on stability evaluation under strong seismic motion of CO<sub>2</sub> storage site using hydraulic-mechanical coupled analysis

- Comparison of local safety factor response for Flat model and Anticline model-

○堀川滋雄・佐々木 猛・橋本 励 (サンコーコンサルタント株式会社)

楠瀬勤一郎 (元 産総研地質調査所), 橋本涼太 (広島大学大学院工学研究科)

Shigeo HORIKAWA, Takeshi SASAKI, Tsutomu HASHIMOTO, Kinichiro KUSUNOSE, Ryota HASHIMOTO

### 1. はじめに

CO<sub>2</sub> 貯留サイトの適地選定作業にあたっては、地質の特性値・層序・構造および断層の存在などの地質的評価に加えて、排出源からの距離や立地条件などの採算性・経済性など、様々な問題が十分に配慮され、検討されている<sup>例え</sup>ば<sup>1)</sup>。貯留層に対する強震動の影響について、例えば東北地方太平洋沖地震のような長周期の強い運動が深部流体飽和層に対して与える地盤変形とそれに伴う間隙水圧の影響については、これまでほとんど知識がなく、評価が難しい問題とされている。

これまで筆者らはマニフォールド法 (以下 NMM) を用いて変形-水圧連成を考慮した強振動時の CO<sub>2</sub> 貯留サイトの安定性評価を弾性解析で実施してきた<sup>例え</sup>ば<sup>2)</sup>。本発表ではドラッカー・プラーガーの降伏基準に基づく弾塑性構成則を導入した弾塑性 NMM を用いて、地質構造の違いによる遮蔽層、貯留層の強振動時の安定性評価を試みた事例を紹介する。

### 2. NMM による変形-水圧連成解析の概要

NMM は不連続性も考慮可能な連続体の解析手法である。基盤ブロックの局所的な変形の大きな動きや剛体の回転も扱え、褶曲構造にも対応可能な手法である。

#### 2.1 不連続面を含む変形-水圧連成解析の基本方程式

本検討では NMM による変形-水圧連成を考慮した<sup>3)</sup> 解析を行った。均一物性の場合の有限要素法における力学的および流体連成方程式<sup>4), 5)</sup>は、式(1)で表される。

$$\tau_{ij} = 2\mu\epsilon_{ij} + \lambda\delta_{ij}\epsilon_{kk} + \alpha_B\delta_{ij}P_s \quad (1)$$

流体の連続条件は、式(2)で表される。

$$\zeta = -\alpha_B\epsilon_{kk} + P/M + \gamma(P_s - P_J)S \quad (2)$$

ここに、

$\tau_{ij}$ : 固体の応力テンソル	$\alpha_B$ : Biot の連成係数
$P_s$ : 固体の流体圧力	$M$ : Biot の統計性係数
$\zeta$ : 流体の体積ひずみ	$P_J$ : ジョイントの流体圧力
$\epsilon_{ij}$ : 固体のひずみテンソル	$\gamma$ : 固体とジョイントの連成係数
$\mu, \lambda$ : Lamé の定数	$S$ : 接触面積
$\delta_{ij}$ : Kronecker のデルタ	

弱形式による流体-変形連成解析の基本運動方程式<sup>6)</sup> は、式(3)で表される。

$$\int_{\Omega} (\rho_s \ddot{u}^s) \cdot \delta u^s d\Omega + \int_{\Omega} (\sigma - S_r p_w I) \cdot \delta \epsilon^s d\Omega - \int_{\Gamma} \bar{t} \cdot \delta u^s d\Gamma - \int_{\Omega} \bar{b} \cdot \delta u^s d\Omega - \int_{\Gamma_j} p_n g_n \cdot \delta u d\Gamma - \int_{\Gamma_j} p_s g_s \tau \cdot \delta u d\Gamma - q_N \int_{S_j} p_n g_n \cdot (P_s - P_j) dS = 0 \quad (3)$$

ここに、

$\Omega$ : NMM要素の面積	$\bar{t}_k$ : 要素の表面摩擦
$\rho_s$ : 固体の密度	$\delta u_k^s$ : 要素の変位増分
$\ddot{u}_k^s$ : 固体の加速度	$\bar{b}_k$ : 要素の物体力 (acceleration)
$\sigma_k$ : 固体の有効応力	$P_n$ : 軸方向のペナルティ係数
$S_k$ : 要素の飽和度	$P_s$ : せん断方向のペナルティ係数
$P_{wk}$ : 要素の間隙水圧	$g_n$ : 軸方向の流体勾配ベクトル
$I$ : 単位行列	$g_s$ : せん断方向の流体勾配ベクトル
$\delta \epsilon_k^s$ : 固体のひずみ増分	$n_k$ : 軸方向の方向余弦
	$\tau_k$ : せん断方向の方向余弦

### 2.2 ダルシーの法則による間隙水圧

要素の間隙水圧は式(4)で、間隙水圧の有限被覆<sup>7)</sup>は式(5)で、要素節点の間隙水圧は式(6)で表される。

$$\hat{p}_{we}(x, y) = \sum_{l=1}^4 (w_{e(l)}(x, y) \cdot \hat{p}_{we(l)}) = [\hat{T}_{pe}] \{\hat{p}_{we}\} \quad (4)$$

$$[\hat{T}_{pe}] = [\hat{T}_{pe}(x, y)] = [N] \quad (5)$$

$$\{\hat{p}_{we}\} = \{p_{we(1)} \ p_{we(2)} \ p_{we(3)} \ p_{we(4)}\}^T \quad (6)$$

### 3. ハミルトンの運動方程式による変形-水圧連成解析

#### 3.1 支配方程式

ハミルトンの運動方程式の支配方程式<sup>8), 9), 10)</sup>は式(7)で表される。

$$\begin{bmatrix} [M_s] & 0 \\ 0 & [M_p] \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \{\Delta \ddot{u}\} \\ \{\Delta \dot{p}\} \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} [\bar{C}_s] & 0 \\ [A] & [E] \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \{\Delta \dot{u}\} \\ \{\Delta p\} \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} [K_s] & [C] \\ 0 & [H] \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \{\Delta u\} \\ \{\Delta p\} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \{\Delta F\} \\ \{\Delta Q\} \end{Bmatrix} \quad (7)$$

ここに、

$[M]$ : 固体の質量マトリックス	$[K_s]$ : 固体の剛性マトリックス
$[M_p]$ : 流体の質量マトリックス	$[H]$ : 流体の透水マトリックス
$\{\Delta \ddot{u}\}$ : 固体の加速度増分ベクトル	$[C]$ : 固体の連成マトリックス
$\{\Delta \dot{p}\}$ : 流体の加速度増分ベクトル	$\{\Delta u\}$ : 固体の変位増分ベクトル
$[\bar{C}_s]$ : 固体の粘性減衰マトリックス	$\{\Delta p\}$ : 流体の圧力増分ベクトル
$[E]$ : 流体の貯留マトリックス	$\{\Delta F\}$ : 地震の加速度外力ベクトル
$[A]$ : 流体の連成マトリックス	$\{\Delta Q\}$ : 流体の外力流量ベクトル
$\{\Delta \dot{u}\}$ : 固体の速度増分ベクトル	
$\{\Delta p\}$ : 流体の速度増分ベクトル	

#### 3.2 ニューマークの $\beta$ , $\gamma$ 法による時間積分

式(8)は、流体圧力は中心差分、時間積分の動的応答式はニューマークの  $\beta=0.5$  と  $\gamma=1.0$  を用いて変形-水圧連成方程式を表している<sup>6)</sup>。

$$\begin{bmatrix} [\bar{K}] & [C] \\ [A] & [\bar{H}] + [E] \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \{\Delta u\} \\ \{\Delta p\} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \{\Delta F\} + [C]\{p_t\} \\ \{\Delta Q\} + [E] - \frac{\Delta t}{2}[H]\{p_t\} \end{Bmatrix} \quad (8)$$

$$[\bar{K}] = \frac{2}{\Delta t^2}[M_s] + \frac{1}{\Delta t}[\bar{C}_s] + [K_s] + [K_c]$$

$\Delta t$ : 時間増分	$[K_s]$ : 固体の剛性マトリックス
$\{\Delta \dot{u}\}$ : 固体の変位増分ベクトル	$[K_c]$ : 固体の接触マトリックス
$\{\Delta p\}$ : 流体の変位増分ベクトル	$[M_s]$ : 固体の質量マトリックス
$[\bar{C}_s]$ : 粘性減衰マトリックス	$\{\Delta F\}$ : 地震の加速度

#### 4. モール・クーロンの破壊基準と局所安全率応答

局所安全率は(9)式で表される。

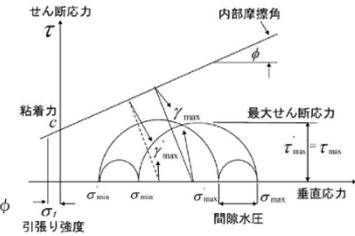
$$f'_s = \frac{\tau'_{\max}}{\tau'_{\max}} \quad (9)$$

ここに

$$\tau'_{\max} = c \cos \phi + \frac{(\sigma'_x + \sigma'_y)}{2} \sin \phi$$

$$\tau'_{\max} = (\sigma'_{\max} - \sigma'_{\min}) / 2$$

$f'_s$  : 局所安全率  
 $c$  : 粘着力  
 $\phi$  : 内部摩擦角



$\sigma'_{\max}$  : 有効最大主応力  
 $\sigma'_{\min}$  : 有効最小主応力

#### 5. 地盤の強度・変形特性

本解析はドラッカー・プラーガーの降伏基準に基づく弾塑性構成則を導入した。降伏関数は(10)式である。

$$F = \alpha J_1 + \sqrt{J_2 - \bar{\sigma}} / \sqrt{3} = 0 \quad (10)$$

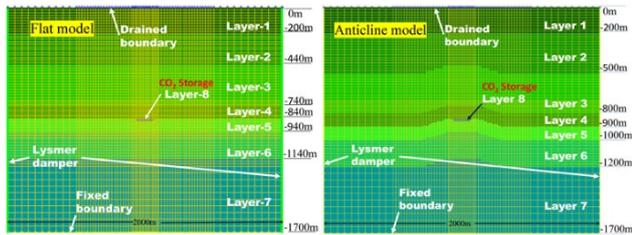
$$J_1 = \sigma_{ij}, J_2 = S_{ij} S_{ij}$$

$$\alpha = \sqrt{\frac{\sin^2 \phi_c}{3(3 + \sin^2 \phi_c)}}, \quad \bar{\sigma} = c_e \{3(1 - 2\alpha^2)\}$$

ここに、 $\sigma_{ij}$  :  $\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3$ : 主応力,  
 $S_{ij}$  : 偏差応力,  
 $J_1, J_2$  : 偏差応力の不変量,  
 $c_e$  : 要素の粘着力,  
 $\phi_c$  : 要素の内部摩擦角,  
 $E_p$  : 弾性係数,  
 $H'$  : ひずみ硬化指数

#### 6. 解析モデルと入力物性値

解析モデルでは深さ 1700m, 幅 2000m の 7 層区分, 水平構造と背斜構造を仮定した。境界条件は下端は固定境界, 左右端は粘性境界, 上面は排水境界とした。

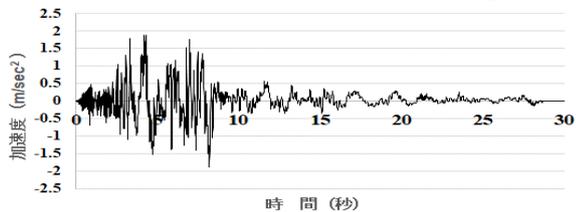


地層名	動弾性係数 (kN/m <sup>2</sup> )	動ポアソン比	単位体積重量 (kN/m <sup>3</sup> )	透水係数 (m/sec)	粘着力 (kN/m <sup>2</sup> )	せん断抵抗角 (度)	
第1層	0.52*10 <sup>6</sup>	0.479	19.0	1.0*10 <sup>-5</sup>	0.2*10 <sup>3</sup>	5.0	← 第四系完新統
第2層	2.36*10 <sup>6</sup>	0.443	19.0	1.0*10 <sup>-6</sup>	0.8*10 <sup>3</sup>	22.0	
第3層	6.75*10 <sup>6</sup>	0.367	20.0	1.0*10 <sup>-9</sup>	0.6*10 <sup>3</sup>	4.0	← 第四系更新統 (遮蔽層)
第4層	8.09*10 <sup>6</sup>	0.357	21.0	1.0*10 <sup>-9</sup>	2.7*10 <sup>3</sup>	31.0	
第5層	10.63*10 <sup>6</sup>	0.319	22.0	1.0*10 <sup>-6</sup>	0.8*10 <sup>3</sup>	11.0	← 新第三系鮮新統 (貯留層)
第6層	7.64*10 <sup>6</sup>	0.407	22.0	1.0*10 <sup>-6</sup>	2.2*10 <sup>3</sup>	15.0	
第7層	14.59*10 <sup>6</sup>	0.382	23.0	1.0*10 <sup>-7</sup>	2.1*10 <sup>3</sup>	24.0	← (CO <sub>2</sub> 貯留層)
第8層	8.08*10 <sup>6</sup>	0.319	20.0	1.0*10 <sup>-6</sup>	0.8*10 <sup>3</sup>	11.0	

各層の入力物性値は一般値を採用し, 粘着力とせん断抵抗角は星野・加藤<sup>11)</sup>から再計算した。

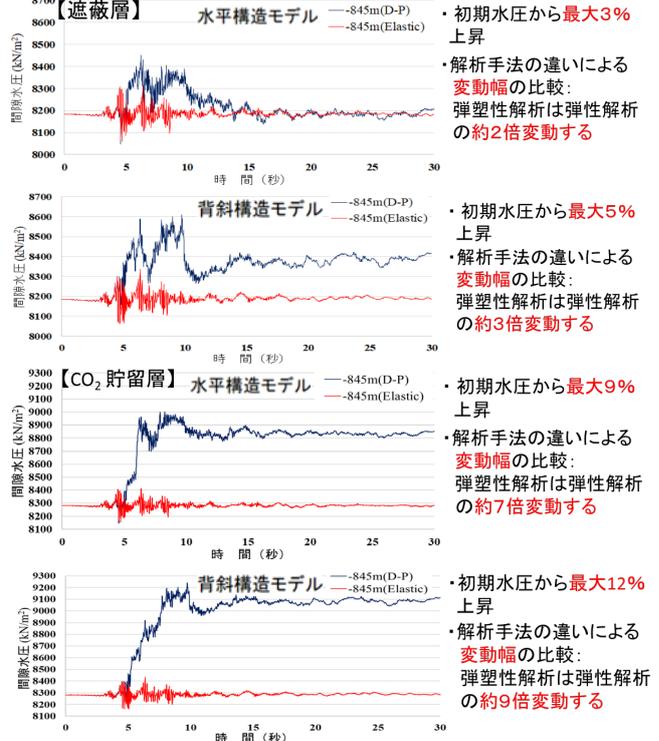
#### 7. 入力加速度

原種波形は K-NET 小千谷(新潟県中越地震(2004))。SHAKE により深度 50m まで引き戻し, その波形を底面から入力して地表面で 600gal 程度になるように加速度を調整した。さらにその加速度を駒田<sup>12)</sup>や NUMO<sup>13)</sup>の結果を踏まえて 50%に調整して入力加速度とした。



#### 8. 解析結果

##### 8.1 間隙水圧応答



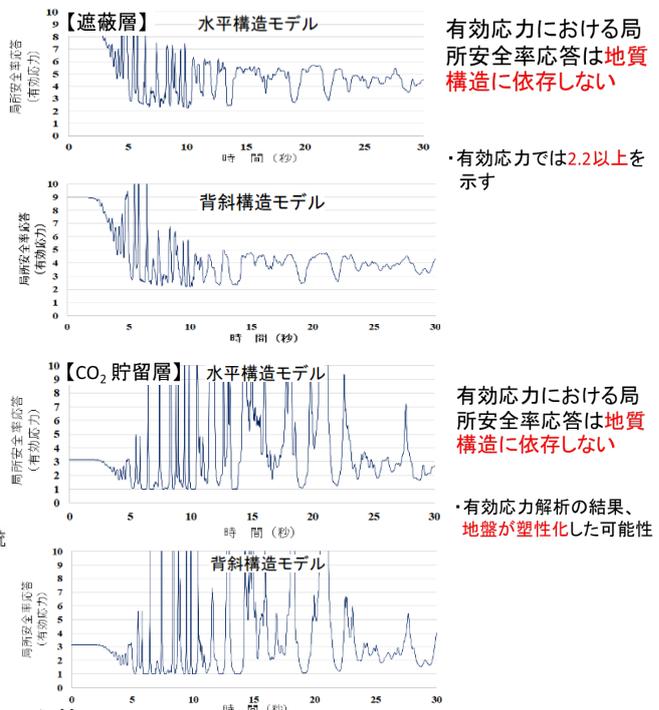
初期水圧から最大3%上昇  
 解析手法の違いによる変動幅の比較: 弾塑性解析は弾性解析の約2倍変動する

初期水圧から最大5%上昇  
 解析手法の違いによる変動幅の比較: 弾塑性解析は弾性解析の約3倍変動する

初期水圧から最大9%上昇  
 解析手法の違いによる変動幅の比較: 弾塑性解析は弾性解析の約7倍変動する

初期水圧から最大12%上昇  
 解析手法の違いによる変動幅の比較: 弾塑性解析は弾性解析の約9倍変動する

##### 8.2 局所安全率応答



有効応力における局所安全率応答は地質構造に依存しない

有効応力では2.2以上を示す

有効応力における局所安全率応答は地質構造に依存しない

有効応力解析の結果、地盤が塑性化した可能性

#### 文献

1) RITE(2022):CO<sub>2</sub> 地中貯留技術事例集(02 貯留サイト選定), 50p. 2) Horikawa et al. (2021): AGU, S15B-0252. 3) Hashimoto et al. (2019): Tunneling and Underground Space Technology, Special Issue, Vol.92, 103047, Elsevier. 4) Ghaboussi et al. (1973):J. Soil Mech. Eng. 5, pp.419-442. 5) Khaled (1980):Ph. D. Thesis, Univ. of Illinois, Urbana, Illinois. 6) Hashimoto et al. (2017): Journal of JSCE, A2, Vol.73, No2, I\_199-I\_210 (in Japanese). 7) Sandhu et al. (1969): Journal of Engineering Mechanics, Div. 1, Am. Soc. Civ. Engineers.95, pp.285-312. 8) Zienkiewicz et al. (1984): International Journal for numerical and Analytical Method in Geomechanics, Vol.8, pp.71-96. 9) Ohnishi et al. (1986): Journal of Japan Society for Civil Engineer, Vol. 370, III-5, pp.151-158. (in Japanese) 10) Sasaki et al.(1996):International Journal for Engineering Computations, Vol. 13, Special Issue 7, pp.70~86. 11) 星野一男ほか(2001):独立行政法人産業技術総合研究所,地質調査総合センター,479p. 12) 駒田広也 (1986):電力中央研究所報告, 385043, 43p. 13) NUMO (2014): NUMO-TR-14-02,244p.

# 31. 讃岐山脈における古期地すべり移動体の分布特性

Distribution of Early to Middle Pleistocene Giant Mass Movements in of the Sanuki Mountain Range

○長谷川修一（香川大学），菅原大介（四電技術コンサルタント）

野々村敦子（香川大学），千葉達郎（アジア航測）

Shuichi Hasegawa, Daisuke Kanbara, Atsuko Nonomura, Tatsuro Chiba

## 1. はじめに

四国の中央構造線活断層系に沿って大規模な地すべり地形が集中していることから、大規模地すべりは中央構造線活断層系による直下型地震が誘因になった可能性が高いと推定されている<sup>1)</sup>。防災科学技術研究所の地すべり地形分布図<sup>2)</sup>によれば、石鎚山脈北麓には大規模な地すべり地形が集中しているが、讃岐山脈では地すべり地形は、南麓と北麓の、讃岐山脈の中軸部に集中している。讃岐山脈南麓の中央構造線活断層系に沿っては、切幡丘陵<sup>3)</sup>のような1Ma以前に形成され、地すべり地形が完全に開析された地すべり移動体が報告されているが、切幡丘陵には地すべり地形がほとんど分布していない。これまでの地すべり地形判読では地すべり地形が開析された古期地すべり移動体が認定できなため、古期地すべり移動体の分布が見逃されている可能性が高い。

地すべり地形が完全に開析された古期地すべり移動体は、赤色立体地図を活用して尾根の不連続を手掛かりに抽出することが可能である<sup>4)</sup>。そこで、尾根の不連続を手掛かりに古期地すべり移動体を抽出した。その結果、讃岐山脈南麓の中央構造線活断層系に沿って大規模な古期地すべり移動体が集中していることが明らかになったので、報告する。

## 2. 讃岐山脈周辺の地形と地質

### 2.1 地形

讃岐山脈は、東北東方向に600~1000mの標高で定高性の良い尾根を連ねて香川県と徳島県の境界を形成している。讃岐山脈の南麓では中央構造線活断層系が急斜面の断層崖を形成し、その南側には吉野川の低地が広がっている<sup>5)6)</sup>。また讃岐山脈北麓では更新世前期に活動した江畑断層等が讃岐山脈とその北側の丘陵との地形境界を形成している<sup>7)</sup>。

### 2.2 地質

讃岐山脈を構成する和泉層群は、北縁では領家花崗岩類を不整合に覆い、南縁は中央構造線によって断たれて、三波川変成岩類と接している。和泉層群は東にプランジする向斜構造を形成しているため、流れ盤が緩傾斜、受盤が急傾斜となっている。地すべり地形は流れ盤斜面に集中しているが、受盤斜面にも形成されている。

讃岐山脈の南側に広がる吉野川低地は、新鮮新世後期から更新世中期に堆積した土柱層から構成され、土柱層は讃岐山脈の南麓の丘陵にも分布している。讃岐山脈北側の丘陵から讃岐平野の地下には鮮新世後期から更新世中期に堆積した三豊層群が分布している。

## 3. 古期地すべり移動体の抽出法

菅原ら（2021）<sup>4)</sup>は、①地すべり発生によって不動山体から分離することで生じる尾根の不連続、②不動山体から切り離された移動体の下へ滑動することによって背後の不動山体より低くなる標高、③移動体が滑動した結果、周辺へ広がることによって緩斜面となる傾斜量を地すべり移動体を認定する3要素とした。またこの3要素によって地すべり地形が完全に開析された古期地すべり移動体も抽出することが可能なので、この3要素を視覚的に認識可能な赤色立体地図を利用して古期地すべり移動体の候補を抽出した（図1）。

図2に古期地すべり移動体候補の抽出例を示す。図2によれば、讃岐山脈南麓には、巨大な古期地すべり移動体が普遍的に分布する可能性が高く、そこでは地すべり地形の分布が少ない。すなわち、新期の地すべり地形と古期地すべり移動体は住み分けているように見える。これは、地すべりによって緩んだ厚い岩盤が短周期の強震動を減衰した結果、中央構造線活断層系による直下型地震による地すべりの発生を抑制している可能性を示している<sup>8)</sup>。



図1 尾根の不連続を手掛かりにした古期地すべり移動体の抽出方法（国土地理院地理院地図赤色立体地図タイルに尾根の不連続を追記）

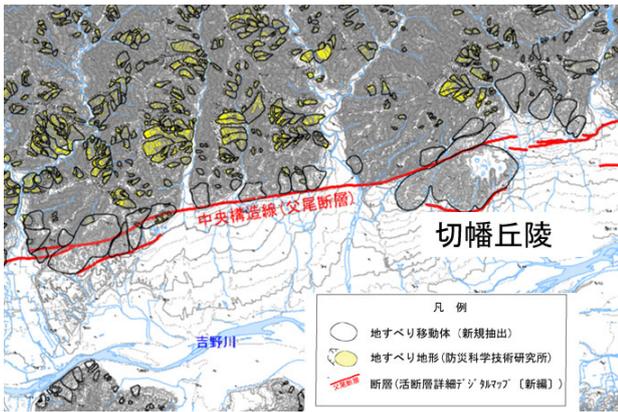


図 2 讃岐山脈南麓における新时期地すべり地形と古期地すべり移動体の分布（新时期地すべり地形は防災科学技術研究所の地すべり地形分布図を表示）

#### 4. 讃岐山脈における古期地すべり移動体の分布特性

讃岐山脈における古期地すべり移動体の分布の予察図を図3に示す。これによると古期地すべり移動体は南麓の中央構造線活断層系沿いに集中している。このような古期地すべり移動体、これまで和泉層群の丘陵として認識され、一部は中央構造線による衝上地塊とし報告されている<sup>9)</sup>。

#### 文献

1) 稲垣秀輝・小坂英輝・大久保拓郎 (2007) : 四国, 中央構造線沿いの地すべりの発生と安定化. 地すべり学会誌, 44, 241-247.

- 2) 国立研究開発法人防災科学技術研究所ホームページ：防災科学技術研究所地すべり地形 GIS データ [https://dil-opac.bosai.go.jp/publication/nied\\_tech\\_note/landslidemap/gis.html](https://dil-opac.bosai.go.jp/publication/nied_tech_note/landslidemap/gis.html) (2022年8月10日閲覧)
- 3) 長谷川修一 (1992) : 讃岐山脈南麓における中央構造線沿いの大規模岩盤すべりと第四紀断層運動. 地質学論集 (40), p143-170.
- 4) 菅原大介・長谷川修一・野々村敦子・千葉達朗・木村祭 (2021) : 中央構造線沿いの開析された大規模地すべり移動体の識別方法. 応用地質, 62, 296-307.
- 5) 岡田篤正 (1968) : 阿波池田付近の中央構造線の新时期断層運動. 第四紀研究, 7, 15-26.
- 6) 岡田篤正 (1970) : 吉野川流域の中央構造線の断層変位地形と断層運動速度. 地理学評論, 43, 1-21.
- 7) Sangawa A. (1978): Geomorphic Development of the Izumi and Sanuki Ranges and relating Crustal Movemen. Science reports of the Tohoku University. 7th series, Geography,28, 313-338.
- 8) 菅原大介・長谷川修一・山中稔・荒木裕行・野々村敦子・伏見和真・千葉達郎 (2020) : 古期地すべり移動体の抽出方法. 日本応用地質学会令和2年度研究発表論文集, 11-12.
- 9) 中川典・中野光雄 (1964) : 讃岐山脈中部南麓に発達する"中央構造線". 地質学雑誌, 70, 52-58.

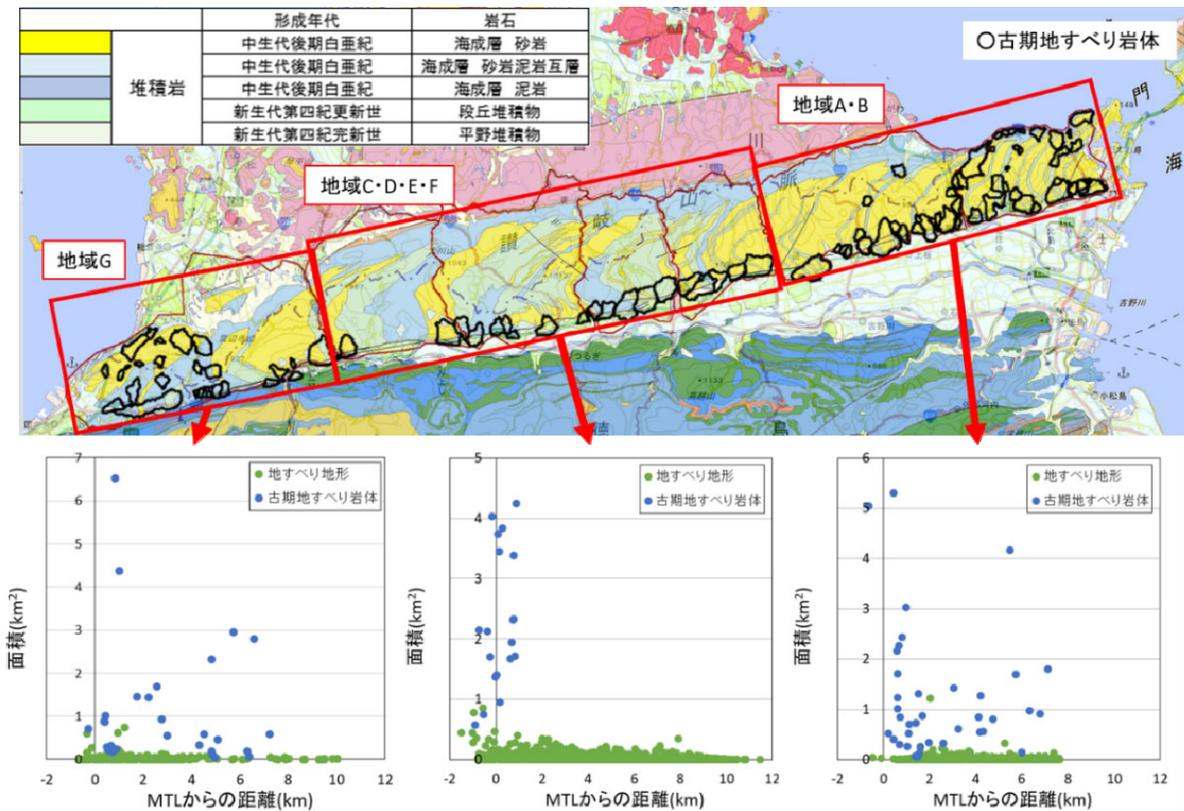


図 3 讃岐山脈における大規模古期地すべり移動体の分布（地質図 Navi）に加筆）と中央構造線からの距離と地すべり地形および古期地すべり岩体の面積との関係（予察図）

## 32. 固定4電極電気探査で推定された地下水面の潮汐変動

Tidal fluctuations in groundwater level estimated by fixed 4-electrodes electrical exploration

○中里裕臣, 白旗克志, 土原健雄, 吉本周平, 福元雄也 (農研機構), 石田聡 (農業農村工学会)  
Hiroomi Nakazato, Katsushi Shirahata, Takeo Tsuchihara, Shuhei Yoshimoto, Yuya Fukumoto, Satoshi Ishida

### 1. はじめに

中里ほか<sup>1)</sup>では, 地表付近の比抵抗変化が Wenner 電極配置の電極間隔に応じて見かけ比抵抗値に及ぼす影響について検討し, 表層の比抵抗変化層厚等に応じて見かけ比抵抗値への影響が小さい電極間隔があることを指摘し, これを浅層不感電極間隔と呼んだ。そして, この特性を利用して地下水面の変動を省力的に把握することを目的とした, 送信・受信用の4電極の電極間隔を固定して時系列探査を行う電気探査手法について紹介した。本発表では沖縄県糸満市の琉球石灰岩を帯水層とする沿岸部を試験地として本手法を適用し, 電気探査データから潮汐によると推定される周期的な変動を検知した事例について報告する。

### 2. 調査手法

試験地における浅層不感電極間隔の設定に当たっては, まず比較対象となる地下水位観測孔が近傍に存在する測線予定地において垂直電気探査を行い, 得られた比抵抗構造と地下水位観測孔における水位観測データを基に, 上位からI層(表層比抵抗変化部)を  $100\ \Omega\text{m} \pm 30\%$ , II層(不飽和琉球石灰岩)を  $500\ \Omega\text{m}$ , III層(飽和琉球石灰岩)を  $10\ \Omega\text{m}$  とし, II層とIII層の境界を地下水面として  $GL-8.3\text{m} \pm 0.3\text{m}$  に変化させ, I層の層厚を1mと2mにした場合のそれぞれについて, 初期値(I層が  $100\ \Omega\text{m}$ , 地下水面が  $GL-8.3\text{m}$ ) に対する電気探査測定値の変化率を電極間隔毎に求めた。こ

れらの解析及びモデル計算には1次元探査解析ソフトIX1D(Interpex社製)を用いた。その結果, 浅層不感電極間隔としてはI層の層厚が1mの場合は約13.5m(図-1), 2mの場合は約16mが得られたことから, 時系列探査は電極間隔15mで実施した。

沿岸域の地下水面の潮位変動については周期12.4時間のM2分潮の成分が大きい事が知られており, M2分潮抽出のためのフーリエ解析に推奨されるデータ長は29日とされている<sup>2)</sup>。さらにM2分潮を含む半日周期周辺の成分(ここでは約11~13時間周期)を取り出すためのデジタルバンドパスフィルタを適用するためには, 解析対象期間の前後に5日分のデータを必要とする<sup>3)</sup>ため, 時系列探査は少なくとも39日間行う必要がある。本調査では, Geo5製GeoVES-1を用いて, カーバッテリーを電源として20分間隔で2022年1月24日~3月14日に50日間の時系列探査を実施した。

### 3. 結果

図-2(a)に時系列探査による抵抗値と近傍観測孔水位の変化, (b)にバンドパスフィルタ適用後の電気探査データ, (c)に近傍アメダスの10分間雨量を示す。図-2(a)では抵抗値データは降雨毎に段階的に低下する変化を示し, 電極間隔15mでも測定値に降雨の影響があることを示すが, 近傍観測孔地下水位に見られる潮位変動の振幅が大きいときにはわずかに周期的な変動が認められる。そして, 図-2(b)では約半日周期

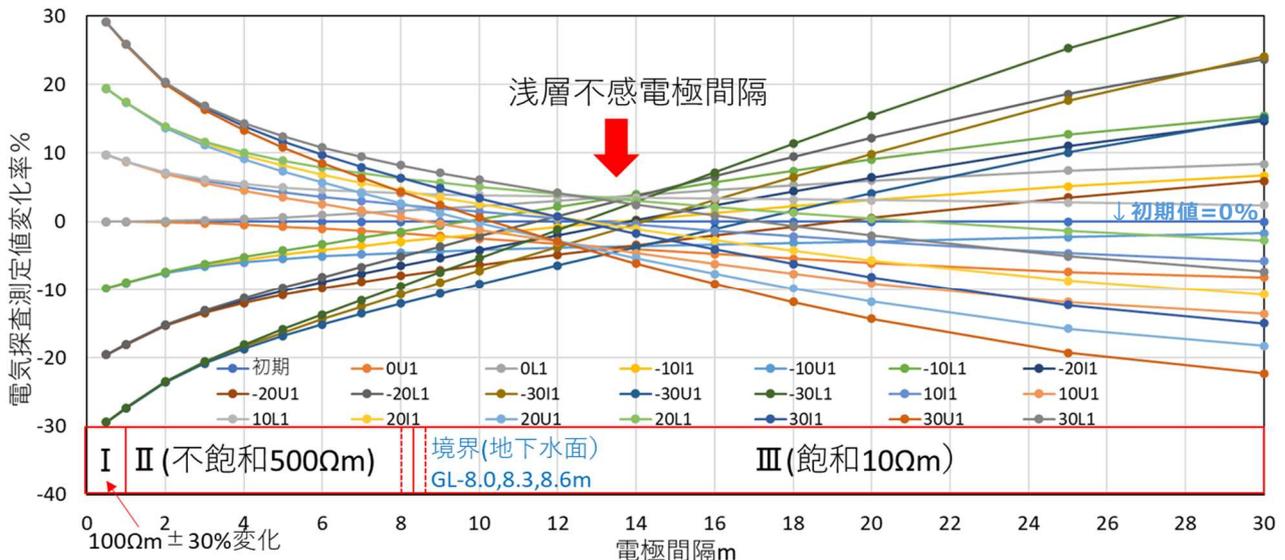


図-1 試験地の比抵抗構造に基づく浅層不感電極間隔の検討 (I層層厚1mの場合)

グラフ凡例: -30~30: I層比抵抗変化率, I,U,L: 水位8.3,8.0,8.6m, 1: I層層厚1m

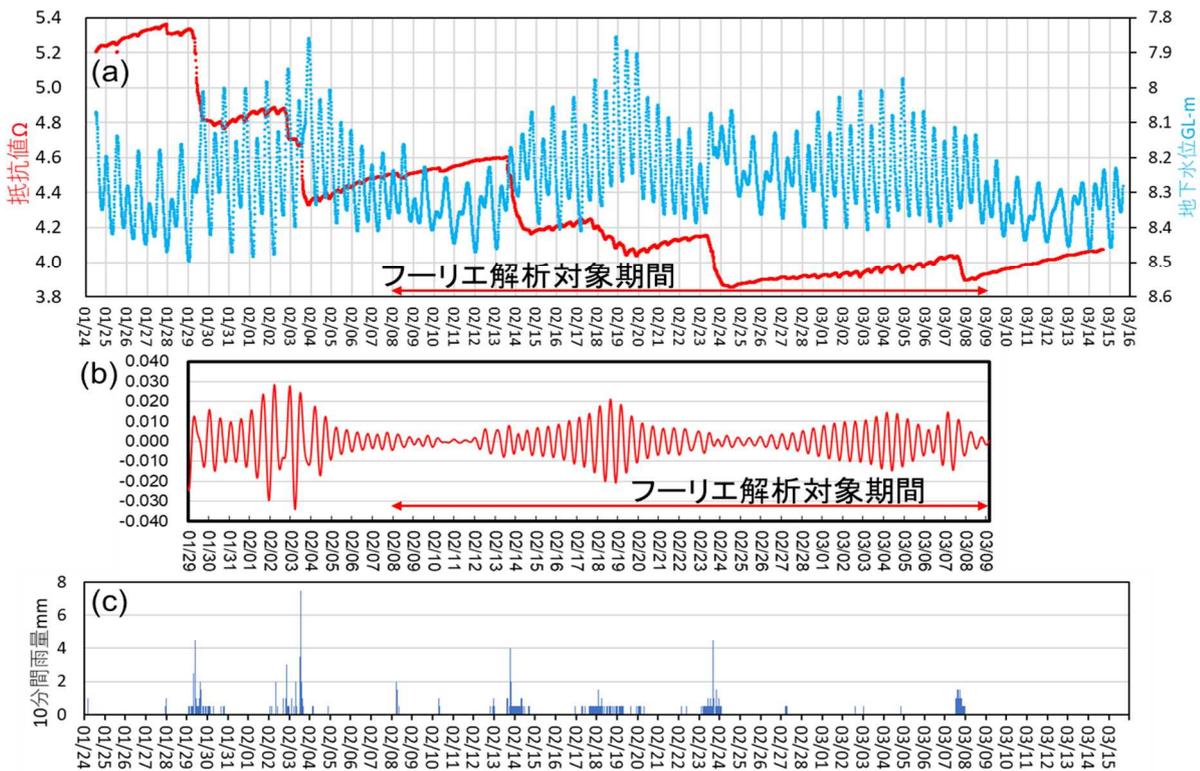


図-2 (a)電気探査時系列探査結果及び近傍地下水位変化, (b)バンドパスフィルタ適用後の電気探査データ, (c)アメダス系数 10 分間雨量

の正弦波的な振動が抽出され, その振幅の変化は近傍観測孔地下水位の振幅変化と同期していた。これは大潮小潮に対応するものと考えられる。2月3日の降雨を避けて調査期間後半のバンドパスフィルタ適用前後の29日間の抵抗値データにフーリエ解析<sup>4)</sup>を行った結果が図-3である。

フィルタ適用後ではM2分潮のスペクトルが明瞭に分離されている。フィルタ適用前の元データでも電極間隔を最適化することでM2分潮のスペクトルの分離が可能で, フィルタが不要となり必要な観測期間の短縮が図られる可能性がある。

#### 4. まとめ

気温変化や降雨浸透による表層の比抵抗変化の影響を受けにくい電極間隔を設定し, 電気探査の時系列データから地下水面の潮汐変動を検知する手法を試行し, M2分潮に相当すると考えられる成分を分離することができた。探査地点と他の水位観測孔データから求められるM2分潮同士の位相差から2点間の透水性評価が可能になることが期待される。

#### 文献

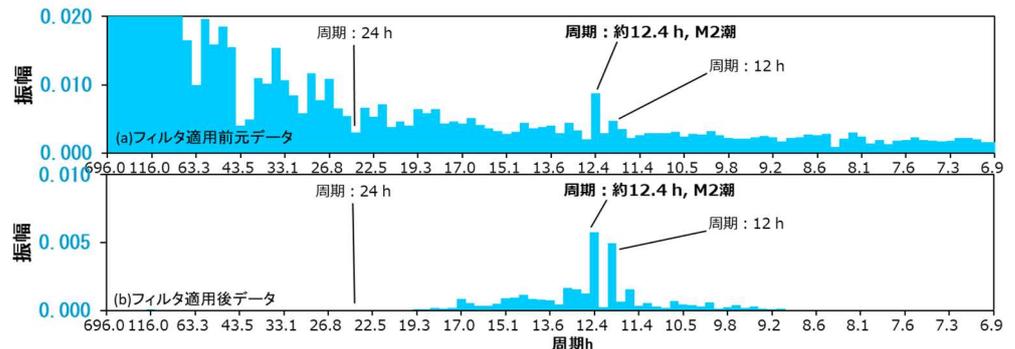


図-3 フーリエ解析結果

- 1) 中里ほか (2021) : 固定4電極電気探査による地下水面変動検知手法, 日本応用地質学会令和3年度研究発表会講演論文集, pp. 49-50.
- 2) Shirahata et al.(2022a): Time series lengths for the accurate isolation of major tidal components by simple Fourier analysis, Japan Agricultural Research Quarterly, Vol. 56, pp. 77-94.
- 3) Shirahata et al.(2022b): A method for evaluating coastal underground barrier wall using groundwater tidal response, Groundwater, doi: 10.1111/gwat.13201.
- 4) 白旗ほか(2014) : 地下水位の潮汐応答の分析による淡水レンズ帯水層の水理定数推定手法, 農村工学研究所技報, No.215, pp.141-154.

謝辞 本研究は生研支援センター「イノベーション創出強化研究推進事業」(JPJ007097)の支援を受けて行った。記して謝意を表します。

### 33. 阿寺断層を貫くトンネル坑内湧水の水質と地質との関連性評価

Evaluation of the relationship between groundwater quality and geology in the tunnel through the Atera fault

○山下慧, 升元一彦, 白鷺卓, 松下智昭 (鹿島建設)

太田岳洋 (山口大学), 福山拓郎 (JRJT)

Kei Yamashita, Kazuhiko Masumoto, Suguru Shirasagi, Tomoaki Matsushita

Takehiro Ohta, Takuro Fukuyama

#### 1. はじめに

トンネル施工において、断層や破碎帯は、切羽の崩壊・突発湧水など施工上の問題<sup>1)</sup>の原因となる場合や、水みちとなり坑内に地表水を引き込むことで、地表における湧水など周辺環境へ影響を与える場合がある。これらのトラブルに対して適切に対処するためには、断層位置やその影響範囲を事前に予測し、対策を検討する必要がある。筆者らは、坑内湧水における地表水の混入程度を把握する手法として、地下水水質を利用した評価方法を検討しており、これまでに湧水の pH・電気伝導度(EC)から、地表水の混入程度を評価できる可能性を示した<sup>2)</sup>。今回、坑内湧水の水質と断層との関連性を評価するため、断層帯を掘削している中央アルプストンネルにおいて、トンネル壁面の湧水（壁面湧水）と長尺先進調査ボーリングからの湧水の水質分析を行った。そして、湧水の水質分析結果と湧水箇所地質状況の比較に基づいて、地下水水質による断層範囲や地質性状の評価の可能性を検討したので、その

結果を報告する。

#### 2. トンネル周辺の地質と採水位置

図-1 に今回調査を行った中央アルプストンネル（山口）の地質縦断図およびトンネル平面図を示す。地質は主に中生代白亜紀の花崗斑岩や伊奈川花崗岩が分布している。また、阿寺断層の活動に伴って形成されたと考えられる複数の破碎帯が確認されており、これらの破碎帯の走向は概ね NW-SE 方向で、トンネル線形とほぼ直交する。

本トンネルでは、本坑掘削に先立ち調査坑を施工している。今回の調査では、調査坑 TD.69m～TD.1122m 区間にて掘削が進む毎に壁面湧水を採水した。また、調査坑 TD.1270m から、調査坑掘削前に長尺先進調査ボーリング (L=450m) を実施しており、削孔中のボーリング孔からの湧水を採水した。採水した湧水に対し、現場分析 (pH, EC, ORP)、主要イオン分析 ( $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{HCO}_3^-$ ) を実施した。

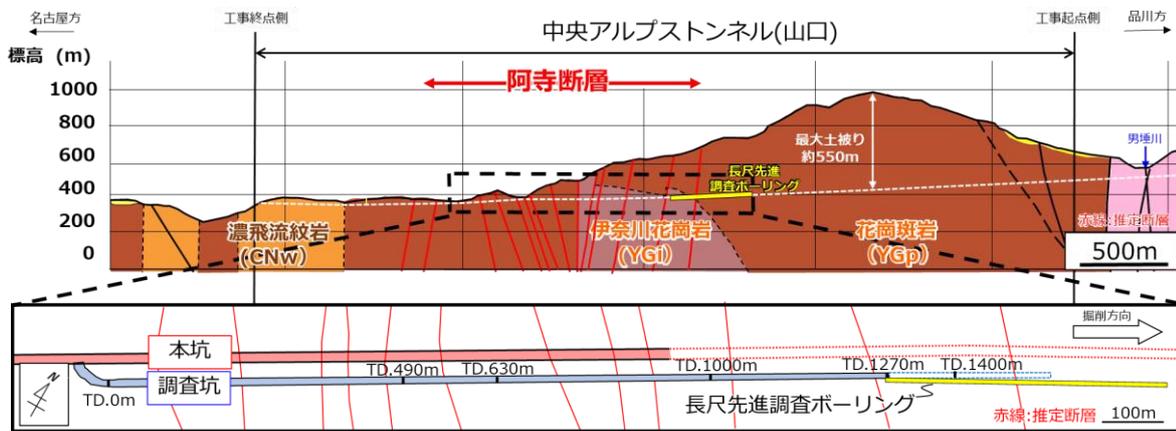


図-1 中央アルプストンネル（山口）のトンネル地質縦断図とトンネル平面図

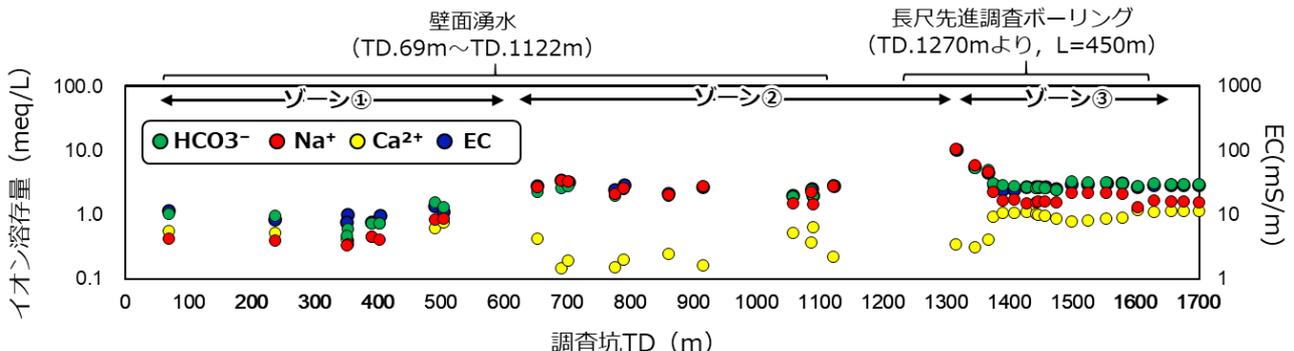


図-2 調査坑 TD に対する壁面湧水と長尺先進調査ボーリングの各イオン濃度

### 3. トンネル湧水の水質と地質状況との比較

壁面湧水・長尺先進調査ボーリング削孔中の湧水の  $\text{HCO}_3^-$  濃度、 $\text{Na}^+$  濃度、 $\text{Ca}^{2+}$  濃度、電気伝導度 (EC) を図-2 に示す。この結果から EC と  $\text{Na}/\text{Ca}$  濃度比に基づき、ゾーン①～③に分類した (表-1)。

表-1 各ゾーンの TD と水質の特徴

	ゾーン①	ゾーン②	ゾーン③
TD	0m~650m	650m~1390m	1390m~
EC (mS/m)	低 (<15mS/m)	高 (>15mS/m)	高 (>15mS/m)
Na/Ca比 (当量)	低 (<5)	高 (>5)	低 (<5)

ゾーン①では  $\text{Na}^+$  濃度、 $\text{Ca}^{2+}$  濃度、EC いずれも地表水と同程度であったが、ゾーン②から  $\text{Na}^+$  濃度、EC が上昇し、 $\text{Ca}^{2+}$  濃度が減少している。これはゾーン②では、地表水よりもイオン濃度の高い地下水が滞留しており、この地下水中の  $\text{Ca}^{2+}$  が粘土鉱物中の  $\text{Na}^+$  とイオン交換したと考えられる。調査坑の地山は、掘削当初から断続的に粘土を挟み割れ目の多い破碎質な地山であったことから (図-4)、断層粘土のイオン交換反応により、 $\text{Na}^+$  濃度が上昇し、 $\text{Ca}^{2+}$  濃度が減少した可能性が高いと考えられる。例えば、宮川ほか<sup>3)</sup>では、断層ガウジなどの粘土鉱物が多い箇所を経路とする場合には、 $\text{Na}^+$  と  $\text{Ca}^{2+}$  のイオン交換が促進されると報告されており、これと同様の反応がゾーン②でも生じていると考えられる。

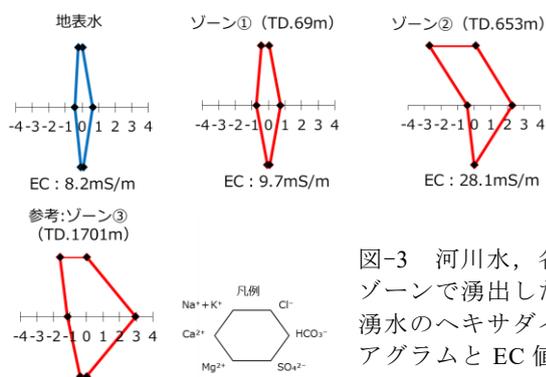


図-3 河川水、各ゾーンで湧出した湧水のヘキサダイアグラムと EC 値

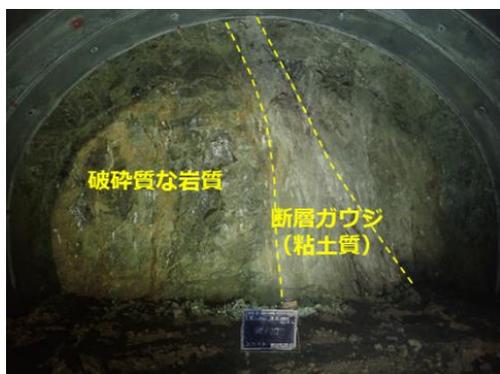
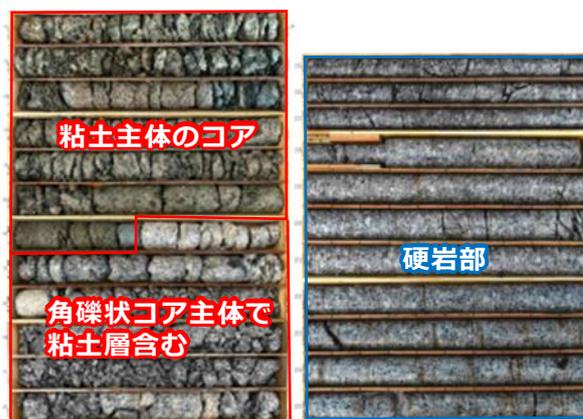


図-4 調査坑 TD.630m の切羽写真

長尺先進調査ボーリングから湧出した湧水のうち、ゾーン③の水質はゾーン②の水質と比較して  $\text{Na}^+$  濃度が減少し、 $\text{Ca}^{2+}$  濃度が上昇している。本ボーリング区間におけるゾーン②と③の代表的なコア写真を

図-5、図-6 に示す。本ボーリング区間のゾーン②では、粘土主体のコアや粘土混じりの角礫状のコアなど断層運動が想定される地質性状が確認され、ゾーン③では CM 級以上の硬質なコアが確認された。

以上より、ゾーン②では阿寺断層の断層運動によって形成された断層粘土が分布するため、 $\text{Na}^+$  と  $\text{Ca}^{2+}$  のイオン交換反応が生じ、ゾーン③は断層運動による断層粘土がほとんど分布しないため、上述のイオン交換反応が起こらなかったと推察される。



(左) 図-5 TD1400m より手前のコア写真 (調査坑 TD1300m 付近)

(右) 図-6 TD1400m より深部のコア写真 (調査坑 TD1450m 付近)

### 4. おわりに

今回、中央アルプストンネルでの調査結果から、坑内湧水の水質と断層範囲や地質性状は相関があり、地下水の水質は賦存している地質状況の違いを反映していると考えられた。特にイオン交換反応により断層粘土の有無が評価できることから、施工上問題となる粘土を伴う断層の範囲を、先進ボーリングでコアが無くても、地下水質で把握できる可能性が示せた。

今後は、母岩・断層粘土の溶出試験により、断層分布域から湧出した湧水の水質形成メカニズムを検討する。

### 文献

- 1) (公社) 土木学会：2016 年制定 トンネル標準示方書 [共通編]・同解説 / [山岳工法編]・同解説, p303, 2016.
- 2) 山下慧, 白鷺卓, 升元一彦, 松下智昭, 太田岳洋：先進ボーリング坑から湧出した湧水の地化学的特徴から地表水との連結度を評価する手法の検討, 土木学会全国大会第 76 回年次学術講演会講演概要集, VI-457, 2021.
- 3) 宮川公雄, 馬服保典：電力中央研究所報告書 地下水流動における断層破碎帯影響評価手法 --地下水化学的調査の適用と系統的評価手段の提案--, 2005

## 34. ミャンマーの地熱資源活用に向けて (第二報)

### —地熱発電計画と非火山性温泉の地熱流体特性に関するレビュー—

Utilization of geothermal resources in Myanmar (2nd Report)

—Reviews on geothermal power generation plan and geothermal fluid characteristics for non-volcanic hot springs—

○須藤 宏 (G&S フィールド)・斎藤健志(産総研地質調査総合センター)・藤野 毅 (埼玉大学大学院理工学研究科)  
Hiroshi Sudo, Takeshi Saito, Takeshi Fujino

#### 1. はじめに

筆者らは令和2年度研究発表会にて文献調査とミャンマー南東部の7箇所温泉地について現地調査と温泉水の主要成分分析から、ミャンマー国内で少なくともあまり活用されていない100箇所程度の自噴泉があること、湧出経路としてプリアパート構造などを伴う strike-slip 断層が関与していること、ミャンマーでの地熱・温泉資源の活用プランについて報告した<sup>1)</sup>。本報は、今後、政情安定後にミャンマーの地熱資源活用に少しでも資することを願って、現地調査時試料の安定同位体比分析を実施し、その後知り得た情報や文献から、これまでのミャンマーでの地熱発電計画とミャンマー東部～南東部に湧出する非火山性地域の温泉の地熱流体特性についてレビューを行う。

#### 2. ミャンマー周辺の地質概要

アジア全体が、テチス海盆の進化に伴う5億年以上にわたる巨大な収束帯であったことや、4つのテチス海 (Proto-, Palaeo-, Meso-, Ceno-Tethys) の沈み込みによるインドシナ地塊やユーラシア大陸への縫合 (Suture) が知られており、シャン州東部の前期三畳紀 (230Ma 頃) の沈み込みでは Palaeo-Tethys 縫合帯、前期古第三紀 (40Ma 頃) の Gondwana 大陸から移動したインド(亜)大陸のユーラシア大陸への衝突では Ceno-Tethys 縫合帯が形成されたと考えられている<sup>2)</sup>。インドとユーラシア大陸のプレート衝突ではユーラシア大陸側が大きく時計回りに回転したことにより、ミャンマー中央部を南北方向に走る Sagaing 断層 (Strike-slip 右横ずれ活断層) を挟んで、ミャンマーを含む周辺地域の地質体 (花崗岩体の連続性など) は南北方向のトレンドを示すことが特徴となっている (図-1)<sup>3)</sup>。

#### 3. ミャンマー周辺の温泉分布

ミャンマー国内で自噴する主な温泉分布は、第四紀火山が分布する中央部の一部と第四紀火山が分布しない東部～南部に偏っている。隣国タイの温泉 (温泉数 109 箇所, 32～99℃)<sup>4)</sup> は主にミャンマー国境側の北部～東部にあり、中でも 80℃以上の温泉はミャンマー・シャン州と隣接する北部に集中している。また中国雲南省西部には第四紀火山を伴う Tengchong (騰冲) 火

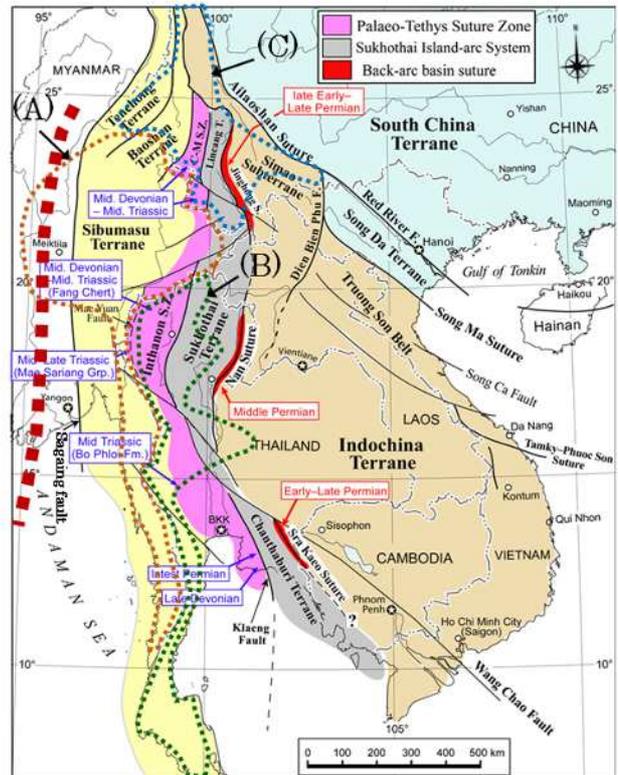


図-1 古テチス海縫合と背弧海盆縫合を示した東南アジア主要部の地質構造区分 (Sone & Metcalfe, 2008<sup>3)</sup>に加筆)。C-M S.Z.= Changning-Menglian 縫合帯, (A)=ミャンマーの主な温泉分布地域, (B)=タイの主な温泉分布地域, (C)=中国雲南省の主な温泉分布地域。太点線は新生代の (Popa-Taungtha) 中央火山帯。

山区に 660 箇所以上の温泉が分布している<sup>5)</sup>。これらのことから、ミャンマーの地熱資源機構については、インドプレートの北東方向への沈み込み状況や東南アジアの地質構造から、中国雲南省からミャンマーとタイを含めて検討していく必要がある (図-1)。

ミャンマーの温泉 (サンプル数 81 箇所)<sup>1) 6) 7)</sup> の湧出温度分布は 26.6～99.5℃ (平均値 53.4℃) で、泉温 80℃以上が 11 箇所確認されている。

#### 4. 地熱発電計画レビュー

これまで日本も重要な貢献をしてきたミャンマーにおける地熱発電計画の経緯の概要を整理した。これまでの経緯を振り返ると、次の5段階に整理される。2011年11月の民政化以前の①温泉湧出箇所の把握段

階 (1883~1965 年), ②地熱資源開発の予備調査段階 (1986~1995 年), 民政化後の③二国間クレジット制度 (JCM) <sup>8)</sup> や実現可能性調査段階 <sup>7)</sup> (2013~2015 年), ④政府への提案や覚書 (MoU) による具体的な計画検討段階 (2016~2019 年) にあったが, 2021 年 2 月国軍クーデター以降は⑤計画の凍結や代替え計画などの不透明な段階 (2021 年以降) となり, 現状では日本や欧米からの技術支援が困難な状況となってしまった。これまでは, ミャンマー東部のシャン州, 同南東部のタニンダリ地方での地熱発電開発計画があった。

## 5. 非火山性温泉の地熱流体特性レビュー

### 5.1 主要・微量成分

ミャンマーの 14 温泉地 (全て非火山性地域) の pH データ <sup>1)</sup>, <sup>7)</sup> によると, 中性 (6.0~7.5 未満): 2 箇所 (約 14%), 弱アルカリ性 (7.5~8.5 未満): 9 箇所 (約 64%), アルカリ性 (8.5 以上) 3 箇所 (約 21%) で弱アルカリ性が卓越している。上記の 14 温泉地の主要成分構成 (ヘキサダイアグラム) は, Ca-SO<sub>4</sub> 型: 1 箇所 (約 7%), Na-SO<sub>4</sub> 型: 1 箇所 (約 7%), Na-Cl 型: 5 箇所 (36%), Na-HCO<sub>3</sub> 型: 7 箇所 (50%) で Na-HCO<sub>3</sub> 型が卓越しており, かつ地域性が認められ, 深部流体の経路の一部が想定できる可能性がある。

地熱流体の深部貯留層の状態を検討する上で有効である非反応性成分の Cl と B を用いた関係図では, 地熱流体に地域性が認められ, B/Cl(mol)比の高い方から (a) シャン州西部, (b) シャン州東部, (c) シャン州西南部~カレン州北部, (d) タニンダリ地方, (e) カレン州南部沖積低地, (f) モン州沖積低地に区分される。また B/Cl(mol)比は地熱水の貯留層構成岩石を反映していると考えられており <sup>9)</sup>, 一般に海成の碎屑性堆積岩とされる B/Cl(mol)比 0.1~1 程度は上記の(a)~(d)領域が該当し, 一般に火山岩類および花崗岩類とされる B/Cl(mol)比 0.01~0.1 程度は(c)~(d)領域が該当する。

### 5.2 安定同位体比

今回, 第一報で報告した 7 箇所の 12 試料を用いて, 水素と酸素の安定同位体分析を行った。安定同位体分析は, Picarro 社のキャピティリングダウン分光方式の安定同位体比分析装置を用い, 繰り返し分析は少なくとも 3 回以上実施した。

筆者らは, 今回の分析値にミャンマーでの既存 11 箇所の分析値 <sup>7)</sup> <sup>10)</sup> を加え, さらにタイ北部と西部の分析値 <sup>11)</sup> <sup>12)</sup> を加えて検討を行った。

ミャンマーの温泉水は, 湧出箇所毎に高度効果や緯度効果などがみられ, 一般的な天水線 ( $\delta D=8 \delta^{18}O+10$ ) 付近にプロットされ, 明瞭なマグマ水 (例えば安山岩水) <sup>13)</sup> 側や現海水側へのシフトはみられないことから, 全て天水起源熱水と判断される。またタイの分析値もほぼ同様に天水線付近にプロットされることから, ミャンマーとタイの地熱流体は類似の成因を持つ可能性

がある。ただし, モン州の Bonet 温泉と Dhamathat 温泉については, NEDO(2015)でも記述されているように主要・微量成分構成から現海水または化石海水が一部混入している可能性がある。

## 6. まとめ

- ①ミャンマーでの地熱資源開発は, 現状国軍クーデター以降不透明な段階となってしまった。
- ②ミャンマー国内 14 箇所の非火山性温泉は全て天水起源熱水で, ミャンマー国境に近いタイ北部~西部にあたる温泉水の水素と酸素安定同位体比とも同様な傾向であり, 地質構造からみても両者の地熱流体は類似の成因を持つことが想定される。また主要・微量成分や安定同位体比からは NEDO(2015)でも一部記述されているように地域性が認められる。
- ③ミャンマー東南部~タイ西部にかけての温泉湧出地周辺に花崗岩類が多く分布するが, 日本でも笹田(1980) <sup>14)</sup> で指摘されているように, 花崗岩体は母岩との接触部付近に断裂系が発達しやすい傾向にある構造規制や, 花崗岩周辺の strike-slip 断層系などによる熱水通路としての役割が大きいと考えられる。

## 7. 今後の課題

ミャンマーの地熱の熱源や貯留層規模については, 大陸や島弧の沈み込みによる海洋プレートスラブとの関連, 現在のアンダマン海底の拡大との関係, 中国雲南省の地熱流体との関係, 物理探査結果, 現地調査なども含めて今後検討したい。

**謝辞:** 本研究実施に際して協力や支援を賜った次の方々と機関に感謝します。永岡洗介氏 (埼玉大学大学院), 埼玉大学東アジア SD 戦略的研究領域, (一社)日本鉄鋼協会・鉄鋼研究振興助成, 総合地球環境学研究所・同位体環境学共同研究事業。

**引用文献:** 1) 須藤宏ほか(2020): 令和 2 年度日本応用地質学会研究発表会講演論文集, 53-54. 2) Metcalfe, I.(2017): Bull. Geol. Soc. Malaysia, 63, 27-60. 3) Sone, M. and Metcalfe I.(2008): C. R. Geoscience, 340, 166-179. 4) Subtawewung, P. et al. (2005): Proceedings World Geothermal Congress, Turkey, 24-29. 5) 大沢信二ほか(1995): 温泉科学, 45, 13-25. 6) Tin Tun Aung(1988): Geothermics, Vol.17, No.2/3, 429-437. 7) NEDO(2015): 平成 26~27 年度成果報告書, (株)ニュージェック・関西電力(株). 8) 環境省/GEC(2013): H25JCM 実現可能性調査 (FS) 「バイナリー地熱発電」最終報告書 (概要版), 日本工営(株). 9) 茂野博 (1992): 地質ニュース, 457, 16-33. 10) Sacchi, E. et al.(2017): Procedia Earth and Planetary Science, 17, 750-753. 11) Takashima I. and Jarach, W.(1987): Bull. Geol. Surv. Japan, 38(1), 33-40. 12) Rattanawong, T. et al. (2020): Applied Environmental Research, 42(1), 101-113. 13) 酒井均・松久幸敬(1996): 安定同位体地球化学, 東京大学出版会, 402p. 14) 笹田政克(1980): 日本地熱学会誌, 2(1), 1-11.

# 35. 適正管理と持続可能な利用にむけた地下水流動場の可視化技術

Visualization Technology on the Groundwater Flow for Appropriate Management and the Sustainable Use

○長谷川 怜思, 緒方 陸, 佐藤 怜, 井川 尚之, 吉田 広人, 鈴木 広美,  
佐々木 理弦, 杉江 美織(八千代エンジニアリング)

HASEGAWA Satoshi, OGATA Riku, SATO Rei, IGAWA Naoyuki, YOSHIDA Hirohito, SUZUKI Hiromi,  
SASAKI Rio, SUGIE Miori

## 1. はじめに

2014年に「水循環基本法」が施行され、自治体においても地下水の保全と持続可能な利用を目的に地下水のモニタリングやマネジメントを行う事例が増えている。地下水を含めた水資源の適正管理と持続可能な利用の際には、地下水流動や地域水循環の実態把握・モニタリングが肝要である。しかしながら地下水面等高線の作成には、既存井戸、湧水や地下水観測孔などで一斉測水を実施し、観測水位に基づいて等ポテンシャル線を描く必要があり、一連の作業に膨大な時間と費用を要する。そのため、調査面積が広大である場合や、民地への立ち入りに制限があるような地域では、地下水面等高線を描くことが困難であり、いまだ地下水面の分布すら明らかになっていない地域も存在する。

筆者らはこれらの課題を解決すべく、高解像度のDEMから広域の地下水面分布を、客観的かつ合理的に把握する解析手法の開発をめざし、地下水流動場の可視化を試みてきた<sup>1)~3)</sup>。ここではその可視化事例について報告する。

## 2. 水系網接谷面を活用した地下水面分布の推計

長谷川ほか(2020)では、基盤地図情報10mメッシュ標高データの水系網から接谷面図を作成し(図-1)、これを既知の地下水面等高線図と比較することで、地下水面分布と読み替えることが可能か検証を行った。国内複数地域を対象とした検証結果から、水系網接谷

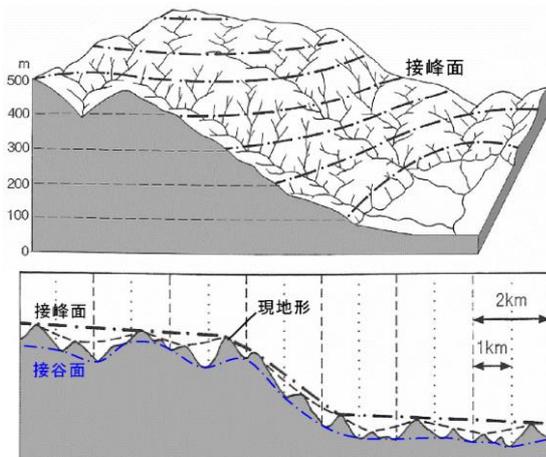


図-1 現地形と接峰面・接谷面との関係<sup>4)</sup>

文献より引用の図に一部加筆

面図はいずれの結果とも、既往の地下水面等高線図の形状と概ね調和しており、等高線の間隔(動水勾配)もほぼ一致しているとの結果を得た<sup>3)</sup>。

一方、水系が未発達地域や一部に難透水基盤が露出するような地域には本解析手法が適さないという課題も確認された。

## 3. 本手法を複数地域に適用するための課題

長谷川ほか(2020)で確立した手法は、水系網を用いた地形解析を前提としており、浸食が及ばない地域や大規模な河道改修が為された地域では、地下水面の推計精度が低下するという弱点を有している。例えば、関東平野の荒川と多摩川に位置する武蔵野台地の様に、江戸時代初期以降に玉川上水をはじめとした上水・農業水利を目的とした人口水路網が張り巡らされた地域では、本手法をそのまま適用することは困難であった。

## 4. 課題解決に向けた工夫点

武蔵野台地およびその近傍では、段丘崖や台地を刻む谷頭から湧水が認められ、台地上に設けられた浅井戸を対象として、古くから地下水面等高線図が描かれている。特に吉村(1940)や、細野(1978)、角田(1986, 2012)らにより、武蔵野台地およびその近傍における不圧地下水の精緻な地下水面等高線図が描かれている。

地下水位は気象、利水・揚水量や土地被覆の条件等によって絶えず変化するが、地下水面の分布は地形に支配されており、大局的な流動場(上下流方向)は年間を通じて逆転することはないと考えられる<sup>5)~8)</sup>。

そこで本研究では、地形解析手法による推計精度が低い地域について、既知の地下水面等高線図のデータを参照することで、地下水面等高線図の高精度化ならびにシームレス化を図った。

## 5. 地域間の繋がりを意識した地下水流動場の可視化

水資源の適正管理と持続可能な利用をめざすには、多種多様なステークホルダーが対等な立場で参画し、協働して課題解決にあたる合意形成の枠組みが必要である。一方で、科学的なファクトを従前のおり示すだけでは、理解不足や認識の違いが生じる可能性があり、そのことが要因で合意形成に至らない場合も多い。そこで本研究では、地下水面等高線図から粒子追跡法

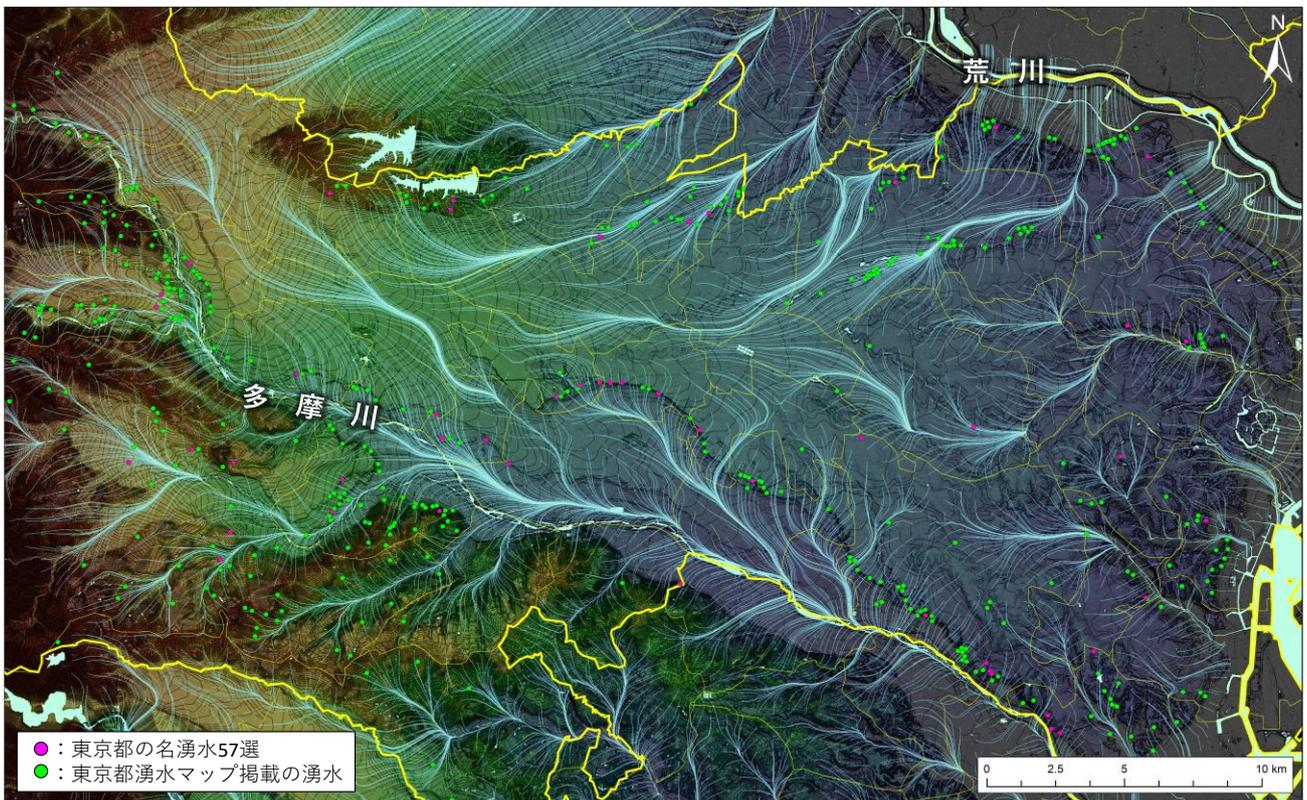


図-2 本研究にて作成した地下水流動場の可視化マップ

吉村信吉 (1940), 細野義純 (1978), 角田清美 (1986, 2012) および長谷川ほか (2020) の手法を用いて作成

により等ポテンシャル線に直交する流線網図を作成し、現地形、地下水面等高線、市町村境界および、既知の湧水地点を重ねた地下水流動場を可視化したマップとして示した (図-2 参照)。

図-2 に示す地下水流線網は、あくまで地下に浸透した水が地下水面に到達した後の流動経路を可視化したものであり、不飽和帯における鉛直浸透までは図化できていない。しかしながら、地下水の主たる流れを流線として表現することで、地下に浸み込んだ水の流動経路と湧水との関係性や、浅層の地下水がやがて河川水へと姿を変えて循環していく様子を、誰もが直観的に理解することができる。

地下水や表流水の流線網を描く手法としては、これまで水循環解析モデルによる浸透流解析が用いられてきた。しかしこの手法では、膨大な時間や費用を要すことに加え、限られた調査結果に基づく水文地質構造の解釈や、現況再現にむけた各種パラメータの設定など、必ずしも地域の実態を正確に再現・予測することはできず、解析結果から得られた地下水面等高線図や地下水・表流水の流線網図には不確実性を含んでいる。

一方、地下水位の観測結果や、地域の現地形に基づいて地下水の流動場を可視化する本手法では、水文地質モデル等の構築過程を経ずに地下水面等高線図や流線網が得られるため、経済的な負担も軽減できる。

## 6. まとめと今後の展望

本可視化手法は、水循環の実態解明に対して十分な

人員と予算確保が難しい地域でも適用可能であり、地下水流動場の理解や、多様なステークホルダー間における合意形成の場への活用も期待される。

## 文献

- 1) 長谷川怜思・山本 晃・原 昌成・西山浩平 (2015) : 高解像度 DEM を活用した周辺水環境への施工影響解析, 日本応用地質学会 平成 27 年度 研究発表会講演論文集, pp.175-176
- 2) 長谷川怜思・磯村 敬・吉川修一・富樫 聡・堀内瀬奈・緒方 陸 (2017) : 高解像度 DEM を活用した花崗岩分布域の水文調査事例, 日本応用地質学会 平成 29 年度 研究発表会講演論文集, pp.269-270.
- 3) 長谷川怜思・山本 晃・吉田広人・菊池英明・富樫聡・内田洋平 (2020) : 日本地下水学会 2020 年秋季講演会講演予稿集, pp.36-41.
- 4) 鈴木隆介 (1998) : 建設技術者のための地形図読図入門 第 1 巻 読図の基礎, 古今書院.
- 5) 吉村信吉 (1940) : 武蔵野台地の地下水, 特に宙水・地下水瀑布線・地下水堆と集落発達との関係, 地理教育, vol.32, pp.20-32.
- 6) 細野義純 (1978) : 武蔵野台地の地下水, 「日本の水収支」, pp.174-188. 古今書院
- 7) 角田清美 (1986) : 秋留台地の地形と不圧地下水, 駒澤地理, (22), pp.202-227.
- 8) 角田清美 (2012) : 日野台地の地形と自由地下水, 駒澤地理, (48), pp.47-62.

# 36. 断層沿いに分布する河川・温泉の水質調査による

## 深部流体の混入状況に関する研究

Study on the mixing of deep fluids by water quality of rivers and hot springs distributed along faults lines

○井上颯太（山口大学），太田岳洋（山口大学）

Sota Inoue, Takehiro Ohta

### 1. はじめに

山口県山口市徳佐地域の徳佐盆地内<sup>1)</sup>と島根県津和野町の河川流域<sup>2)</sup>において高塩濃度湧水が自噴している。これらの流体は高い溶存成分を有しておりその起源を火山の活動に伴う熱水（火山性熱水）或いは沈み込んだフィリピン海プレートから放出された水（スラブ脱水流体）とされている。

これらの流体は地殻深部で放出される流体であり深部流体と呼称される<sup>1) 2)</sup>。そのような深部の岩石は圧力により透水性が低いため、断層や地質構造帯といった高透水性の地質構造を通じて地表へ湧昇している<sup>3)</sup>。

徳佐地域では徳佐-地福断層がNE-SW方向に伸張しており、津和野町河川流域では日原断層がNE-SW方向に伸張している。これらの断層は深部流体の湧昇経路として機能しているとされている<sup>1) 2)</sup>。また、これらの断層は大原湖-弥岐山西断層系に属する断層であり、同断層系は南西方向に木戸山西方断層、大原湖断層、榎野川断層、下郷断層、宇部断層と連続する総延長120kmに及ぶ断層系である<sup>4)</sup>。

深部流体が湧昇する経路とされている断層では複数地域での湧昇が生じることがある<sup>3)</sup>。大原湖-弥岐山西断層系全域において深部流体の湧昇について検討がなされていないことから、本報告では同断層系における深部流体の湧昇状況を把握することを目的とした。

### 2. 調査手法

調査地域は山口県山口市の山口盆地から山口市徳佐地域にかけての東西約15km、南北約20kmの範囲内における河川流域と温泉・湧水に及び島根県津和野地域の湧水である（図-1）。

採取試料は、断層沿いに流下する河川水、ボーリング孔等からの湧水及び温泉水、防火水槽、岩上の溜り水を対象とした。

採取には250mlポリビニル製のボトルを使用した。採取と同時に現地でも簡易測定器を用いて、pH、EC、ORP、TDS、塩分濃度を測定した。水試料の溶存成分は重炭酸イオンを硫酸滴定法、陰イオンをイオンクロマトグラフ法、陽イオンをICP発光分光分析法により測定した。測定値からは流体の異常水質の有無を検討

する目的で、各地点の一般水質傾向を表すためにトリリニアダイアグラム図、高EC流体での深部流体混入を検討する目的でB-Li-Cl量比を表す図を作成した。次に、河川流域での水質の推移を視覚的に表現するために各イオン濃度の空間分布図をQGISで作成した。

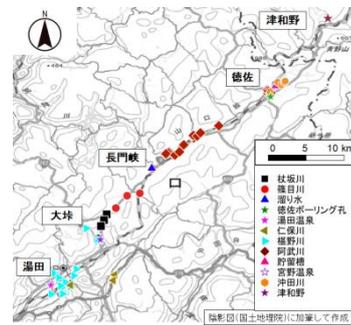


図-1 調査地域

### 3. 結果

#### 3. 1. トリリニアダイアグラム

図-2中の分類は水質傾向を表しておりI～V型に分けられている。I型は流動地下水型(Na-HCO<sub>3</sub>)、II型は停滞地下水型(Ca,Mg-HCO<sub>3</sub>)、III型は温泉・化石海水型(Ca,Mg-Cl,SO<sub>4</sub>)、IV型は海水型(Na-SO<sub>4</sub>,Cl)、V型は天水型とされている。

本調査結果では各温泉や湧水がII型やIV型或いはV型の領域にプロットされた。河川水はI型からV型にかけて直線状にプロットされており、河川の流域でプロットされる領域に差異があるように見られる。

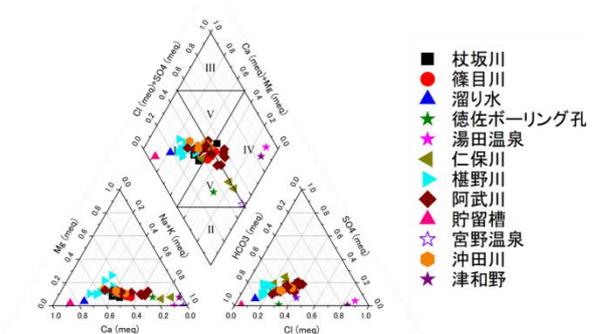


図-2 トリリニアダイアグラム

#### 3. 2. B-Li-Cl 三角図

図-3は大沢ほか(2010)においてプレートの沈み込みに伴い変化する深部流体の水質の変化を表した図である。図中の海水、続成変成作用により生じる脱水

流体，マグマ由来の火山性熱水と試料水の測定値との比較から上記3成分の混合など試料水の起源を推定した。

今回の調査結果では，河川は中央部にプロットされた。温泉湧水等は B-Li 線上にプロットされた。

### 3. 3. イオン濃度空間分布図

図-4 は河川の地点間のイオン濃度差をグラデーションで表現することでイオン濃度異常地点を検出することを目的とした図である。本調査では深部流体の混合を検討するため，対象イオンは深部流体に多量に含有されるイオン (Na, Ca, SO<sub>4</sub>, Cl, B, HCO<sub>3</sub>) に加え，人為的汚染の懸念を考慮して硝酸イオンを含めることとした。

本調査では，徳佐盆地内の河川において Na, SO<sub>4</sub>, Cl, B, HCO<sub>3</sub> が周囲より高い地点が見られた。この地点は NO<sub>3</sub> の濃度が低いことから，人為汚染以外の自然的要因で上記イオンが高濃度を示すことが示唆される (図-5)。

### 4. 考察

温泉や湧水は主にトリリニアダイアグラムの結果からIV型或いはV型を示す結果が得られた。IV型を示す湯田温泉と津和野湧水は地下深部で形成されたことが考えられる。V型を示す徳佐湧水は浅層の流動地下水に深部起源の流体が混入していることが考えられる。同じくV型を示す宮野温泉はII型に近いことから停滞地下水が主な起源であると考えられる。加えて，B-Li-Cl 量比では津和野湧水と徳佐湧水が続成作用による脱水流体と火山性熱水の流体の間にプロットされておりこれらの流体の混合が考えられる。一方で，湯田温泉と宮野温泉は火山性流体と Li 頂点の間にプロットされており，深部流体の形成過程と異なる傾向を示すため起源は深部流体と異なると考えられる。

河川水に関してはイオン濃度空間分布図で示された高い溶存成分が認められる地点では NO<sub>3</sub> の濃度が低いことから要因は自然的なもので深部流体の混入が考えられる。西山ほか (2016) において徳佐盆地内の深部流体の移動経路が示されたがこれらの地点は対象外となっていたため新たに深部流体の湧昇が確認されたことになる。一方で，他の地点において深部流体の傾向がみられる地点は認められなかった。

これらのことから，大原湖-弥岐山西断層系における深部流体の湧昇は徳佐地域から津和野地域に限られると考えられる。

### 文献

1) 村上裕晃，田中和広 (2015)：島根県津和野地域に分布する高塩濃度地下水の地球科学的特徴と湧出機構，地下水学会誌，Vol.57, No.4, pp.415-433。

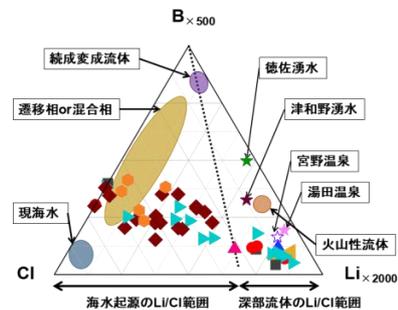


図-3 B-Li-Cl 三角図

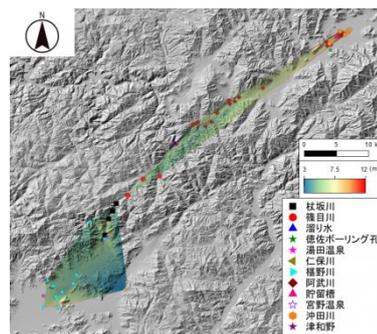


図-4 Cl イオン濃度空間分布図

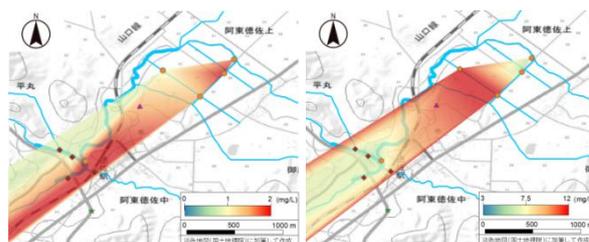


図-5 NO<sub>3</sub> イオン濃度空間分布図(左)と Cl イオン濃度空間分布図(右)の比較図

- 2) 西山成哲，田中和広，鈴木浩一 (2016)：電磁探査および地質・地下水調査による深部流体の移動経路の可視化—山口県北東部徳佐盆地における適用—応用地質，Vol.57, No.3, pp.102-112。
- 3) 風早康平，高橋正明，安原正也，西尾嘉朗，稲村明彦，森川徳敏，佐藤努，高橋浩，北岡豪一，大沢信二，尾山洋一，大和田道子，塚本斉，塚口桂香，戸崎裕貴，切田司 (2014)：西南日本におけるスラブ起源深部流体の分布と特徴，日本水文学会誌，Vol.44, No.1, pp.8-17。
- 4) 金折裕司 (1998)：地震モーメントの平均解放速度に基づく内陸地震の危険度評価—中国地方西部の活断層系からの例—，応用地質，Vol.39, No.3, pp.287-297。
- 5) 大沢信二，綱田和宏，山田誠，三島壮智，風早康平 (2010)：宮崎平野の大深度温泉井から流出する温泉水の地化学特性と成因—温泉起源流体としての続成脱水流体—，温泉科学，Vol.59, pp.295-319。

# 37. 亀裂性岩盤の3次元透水テンソルの推定方法と異方応力下

## での透水性に関する検討

Estimation Method for 3D Permeability Tensor of Fractured Rock Mass and  
Study on Hydraulic properties under Anisotropic Stress Condition

○竹村 貴人(日本大学), 細野 日向子, 作道 悠(日本大学大学院), 川北 章悟, 鈴木 健一郎(大林組)  
Takato Takemura, Hinako Hosono, Yu Tsukurimichi, Shogo Kawakita, Kenichiro Suzuki

### 1. はじめに

岩石・岩盤中を移動する流体は、亀裂を主な移動経路とすることが知られている。例えば、亀裂を鉱物が充填している鉱物脈を考えると地下数 km の深さにおいても、鉱物として晶出する前の熱水が亀裂を移動もしくは滞留していたことがわかるであろう。また、トンネルなどの地下空間として利用する比較的浅い深度においても、壁面やボーリング孔壁において亀裂が観察され、水みちとして機能していることが直接的に観察することができる。このような亀裂を持つ岩石・岩盤（亀裂性岩盤）での流体の移動を考える際、透水係数を使って評価することが多い。多孔質媒体のような比較的等方な透水特性を持つ場合は、一つの透水係数で表現し得るが、亀裂性岩盤のような亀裂が配向性を持つ場合、透水係数も異方性を考慮する必要がある。透水係数の異方性を考える場合、透水係数は3次元の2階のテンソル量であることから、一般化して考えると、 $3 \times 3 = 9$  個の成分で表現する必要がある。ここで、対称性を考慮すると6個の成分となるが、主軸をとれば3個の成分、すなわち互いに直交するそれぞれ方向の透水係数とすることができる。このような3次元の

透水係数は透水テンソルとして表現され、Oda<sup>1)</sup>により亀裂の直径と開口幅、走向傾斜と連結性により表せることが提案されている。亀裂は円盤として近似され、その直径が必要となるが、その実測はほぼ不可能である。そこで、統計幾何学（ステレオロジー）を利用することで2次元平面から直径を推定する方法が提案されており<sup>2,3)</sup>、その有効性はさまざまな方法で検証されている<sup>2,3)</sup>が不十分な点も残されている。また、地下での3次元の亀裂性岩盤の透水係数を考える際、異方応力による方向ごとの透水係数を考える必要がある。

本稿では、3次元の透水係数の推定方法と異方応力下での透水係数をどのようにして考えていくかについての課題をあげ、それぞれ検討をしていく。

### 2. 3次元透水テンソルの推定

Odaにより提案された透水テンソル  $k_{ij}$  は次式で表すことができる。

$$k_{ij} = \frac{\lambda}{12} (P_{kk} \delta_{ij} - P_{ij}), \quad (1)$$

ここで、 $k_{ij}$  は透水係数（浸透率）であり単位は  $m^2$ 、 $\lambda$  は0から1の範囲を連結性の指標（ $\lambda=1$  で全ての亀裂

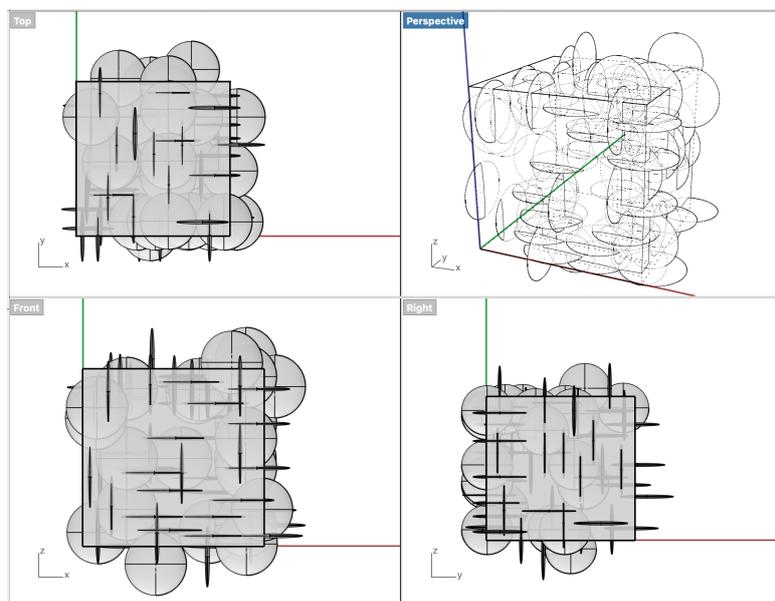


図-1 亀裂の3次元分布の断面で見える亀裂トレース

が連結),  $P_{ij}$  が亀裂の幾何学情報 (開口幅, 方向, 亀裂密度 (個/ $m^3$ ), 亀裂直径) で決まる量である. このうち開口幅と方向は露頭などの調査から直接決定することが可能である. 観察から決定ができない, 亀裂密度と亀裂直径はステレオロジーにより推定せざるを得ない. その推定方では, 各断面に現れる亀裂トレースの方向別の亀裂トレース密度 (本/m) を利用する. 図-1 に断面に現れる亀裂トレースの事例を示す. ここでの亀裂はその法線が  $x, y, z$  それぞれに同じ数になるように, かつ亀裂の中心がランダムに配置されるよう設定されている. 一見すると 3 次元での亀裂は密に見えるが, 断面に現れる亀裂トレースの本数は少なく見える. 断面で相当数の亀裂トレースがないと代表体積 (REV) を満たさないことを考えると, 3 次元で見た時の亀裂密度は断面から想像しているよりも高くなるであろう. また, 断面で亀裂トレースの連結性が悪くとも, 3 次元での連結性は良くなっていると考えられる. しかしながら, 3 次元での連結性に関する評価事例は少ない. また, 図-1 では亀裂の方向は等方 (ここでの等方とは, 主軸の 3 つの値が等しいことをいう) であるが, どの程度の等方までステレオロジーによる推定が可能なのかなどその適用限界に関する議論はあまりなされていない. 今後, 露頭や孔壁などの断面の観察結果から 3 次元の透水テンソルを推定しようとする際に, ステレオロジーによる方法の適用限界や推定誤差について定量的な議論を行うべきであろう.

### 3. 異方応力下の透水挙動

地下深部でのテクトニックな応力の影響やトンネル近傍の応力再配置などの影響により岩石・岩盤は異方応力下に置かれている. このような異方応力が亀裂性岩盤にかかっている場合, 亀裂の開口幅が方向ごとに変わってくるであろう. 例えば, 図-1 のような亀裂の法線方向が  $x, y, z$  にそれぞれ向いている場合で開口幅が全て同じモデルを考える. このような亀裂性岩盤に応力が  $\sigma_x = \sigma_y < \sigma_z$  の条件でかかっているとすると,  $z$  方向 (鉛直方向) に法線を持つ亀裂, すなわち水平方向の亀裂がより閉塞し開口幅が小さくなる. その場合, 透水係数は  $z$  方向のみ小さくなる. このことを考えると亀裂性岩盤を対象とした例えば, 孔内での区間を区切って測定する透水係数は  $(k_x + k_y + k_z)/3$  という透水係数をみていることになり, その現場の異方応力 (土圧や側圧係数) と併せて考える必要がある.

これらの問題を踏まえて透水テンソルによりモデル化ができるかを確認するため, 三軸圧縮試験によりピーク応力近傍まで破壊を進め亀裂を作成した図-2 の試料を用いて異方応力下での透水試験を行った. また, 試料の表面で観察される亀裂トレースから上述のステレオロジーを用いた方法を使い透水テンソルを決定し透水係数の算出を行った. ここで, 異方応力下での亀

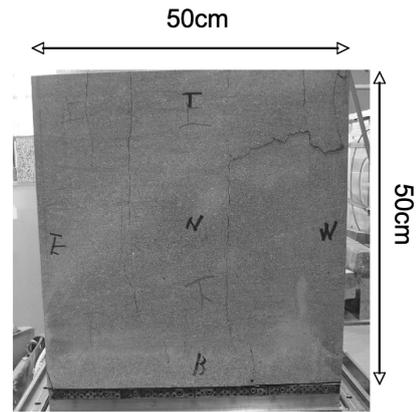


図-2 異方応力下での透水係数測定に用いた試料 (来待砂岩)

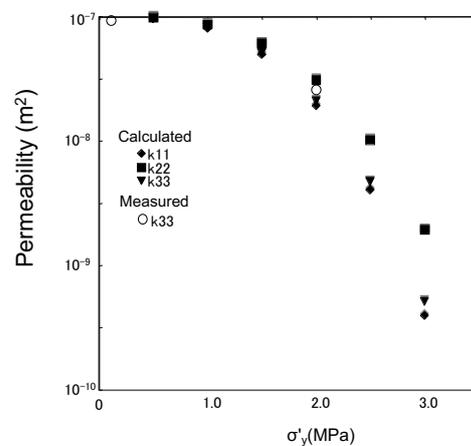


図-3 異方応力下での透水係数の実測と計算値 (応力条件は  $\sigma'_x = 2.0 \text{ MPa}$ ,  $\sigma'_z = 0.1 \text{ MPa}$ )

裂開口幅は異方応力負荷時の歪み量を用いて算出した. 図-3 に実験と計算の結果を示す. 2 つの実測値は計算値に近い値を取っていることが確認された. また, 透水テンソルでのモデル計算の結果, 異方応力の度合いが大きくなるほど, 透水係数の差は大きくなり, 平均値からのずれも大きくなるため, 異方応力下での原位置での透水係数の値の取り扱いには注意が必要であろう. 今後, 異方応力下での透水係数の取り扱いについて実験, 原位置計測の事例を増やすとともに, 断面で観察できる亀裂トレースの幾何情報 (長さ, 方向, 開口幅) の記載を併せて行う必要があると考える.

### 文献

- 1) Oda M.(1985): Permeability tensor for discontinuous rock masses, *Géotechnique*, Vol. 35, No. 4, pp. 483-495.
- 2) Oda M., Takemura T., Aoki T.(2002): Damage growth and permeability change in triaxial compression tests of Inada granite, *Mech Mater*, Vol. 34, No. 6, pp. 313-331.
- 3) Takemura T., Oda M.(2004): Stereology-based fabric analysis of microcracks in damaged granite, *Tectonophysics*, Vol. 387, No. 1-4, pp. 131-150.

## 38. 福島県南相馬市の堆積岩分布域における放射性セシウムの移行挙動の検討

Study of migration behavior of radioactive cesium in sedimentary rock distribution area in Minamisoma City, Fukushima Prefecture.

○木目沢弓都, 張豊瑞, 竹内真司(日本大学)

Yumito kimezawa, Zhang Fengrui, Shinji Takeuchi

### 1. はじめに

東京電力福島第一原子力発電所(以下, 1F)事故により広範囲に放射性セシウム $^{137}\text{Cs}$ などの放射性物質が放出された。特に福島県東部の阿武隈山地に比較的高い濃度の放射性物質が降下沈着した。これまでの研究ではその多くは地表土壌中に吸着されていることが明らかにされてきた<sup>1)</sup>が, 土壌層の薄い地域や基盤岩類が地表に露出する場所では, 降雨浸透に伴って $^{137}\text{Cs}$ が地下深部に移行し, 地下水に混入する可能性は否定できない。また, この地域では, 生活用水として井戸水を利用している住民が多く, 地下水中の $^{137}\text{Cs}$ の存在の有無は, この地域への帰還を判断する重要な判断材料の一つと考えられる。そこで, 本研究では $^{137}\text{Cs}$ の地下水中で移行挙動を理解する一環として, 民家が集中する堆積岩分布域を対象とした地下水流動解析と粒子追跡線解析により, 地下水の移行経路について検討した。

### 2. 調査地概要

調査地域は福島県南相馬市小高区大富である。この地域は1Fから北西に約20kmに位置し, 南北走向の双葉断層帯を境に東側に新第三紀の堆積岩類が海側に中～高角度で傾斜して分布する。また双葉断層帯の西側には白亜紀前期の国見山花崗岩類が分布している<sup>2)</sup>。双葉断層帯では花崗岩類がマイロナイト化やカタクレーサイト化を被っており, 片状構造が顕著な部分が存在する<sup>2)</sup>。さらに断層帯の中にはいわゆる断層粘土が数cm幅で複数箇所分布することを現地調査により確認している。

### 3. 解析方法

解析領域は, 東西方向に3000m, 南北方向に2500mの領域内の分水嶺を境界とした。また, 鉛直方向は解析領域内の最高点280mから海拔0mとした。グリッドのサイズは縦と横を20mとし, 高さ方向は, 標高140m以上の領域は10m, それ以下の領域は2mとした。解析コードは, Visual MODFLOW Classic®(Waterloo Hydrogeologic)を用いた。地質モデルは, 久保ほか(1990)<sup>2)</sup>を参考に砂礫層, 上位砂岩層, 泥岩層, 下位砂岩層, 花崗岩類, 断層の6種類の地質要素を表現した地質構造モデルを構築し(図-1), これらのモデル要素に室内透水試験や既存資料などに基づいて設定した水理パラメータを与え, 水理地質構造

モデルを構築した(図-1)。

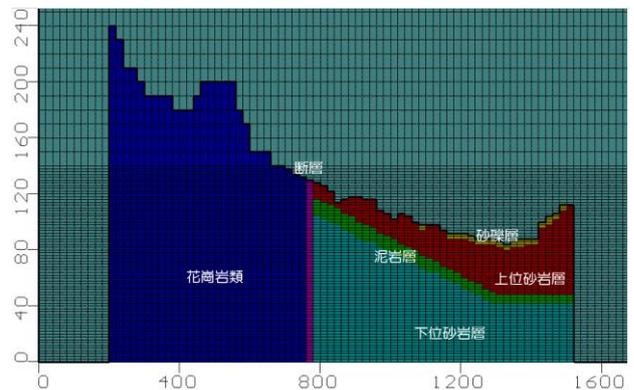


図-1 解析領域の水理地質構造モデル(二次元断面モデル)

構築した水理地質構造モデルでは, 解析領域における浅井戸の水位と深井戸の被圧状態を再現するように透水係数の値を調節した(表-1)。また, 境界条件は地表面に年平均降水量(1409.2mm)を与え, 側方境界は河川とため池に面している部分を地表面の標高に応じた固定水頭境界, それ以外の尾根線とモデルの底面を水の出入りの無い, 不透水境界として設定した(図-2)。

表-1 調整後の水理パラメータ

	透水係数 $k[\text{m/s}]$	比貯留係数 $S_s[1/\text{m}]$
花崗岩	5.00E-07	1.00E-07
泥岩層	1.00E-06	1.00E-06
上位砂岩層	1.00E-04	1.00E-03
下位砂岩層	5.00E-06	1.00E-05
断層	5.00E-07	1.00E-07
砂礫層	1.00E-03	1.00E-03

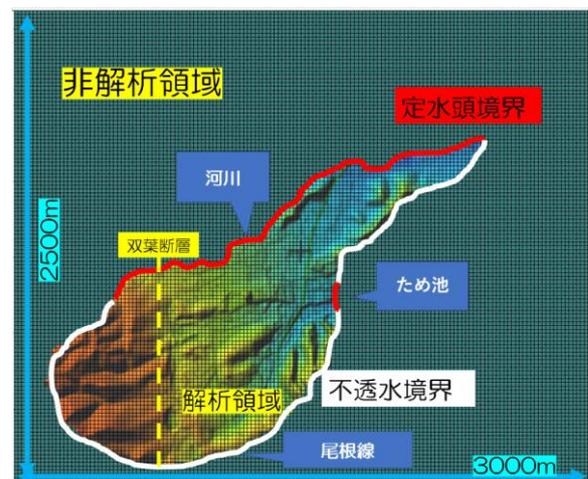


図-2 解析領域の境界条件

#### 4. 解析結果

図-3 に地下水流動解析による水圧分布と粒子追跡線解析の結果を示す。地下水流動解析の結果、水圧は西側の高標高部から東側の低標高部に低下する結果を得た。また、粒子追跡線解析の結果、双葉断層帯西側の地表面の各グリッドから放出された全ての粒子は、北側の河川には流出せず、解析領域東側境界の赤丸で示した地点に流出する結果となった。この地点にはため池が存在し、この地域の集水地点となっている可能性が示唆される。

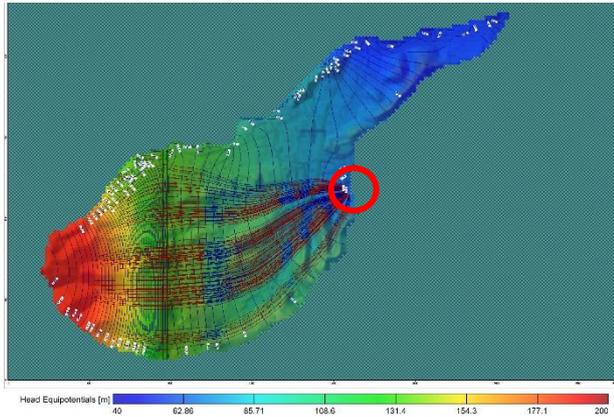


図-3 断層西側山地部から放出した粒子追跡線

次に、浅井戸と深井戸に向かう粒子の出発点を推定するため、ここを起点とする逆粒子追跡線解析を実施した。その結果を断面図（図-4）と平面図（図-5）で示す。浅井戸の位置における逆粒子追跡線解析の結果、井戸から西方で双葉断層帯の東側の堆積岩分布域に出発点が求められた。この粒子は下位の被圧帯水層（下位砂岩層）中を移行していることから、今後、設定した水理パラメータの適切性について検討の余地がある。また深井戸に向かう粒子の出発点は、双葉断層帯西側の花崗岩類分布域に求められた。この結果は、この深井戸が井戸元から湧水をしていることと矛盾しないが、出発点と井戸の標高差は 100m 近いことから、結果の妥当性については今後さらなる検討が必要である。

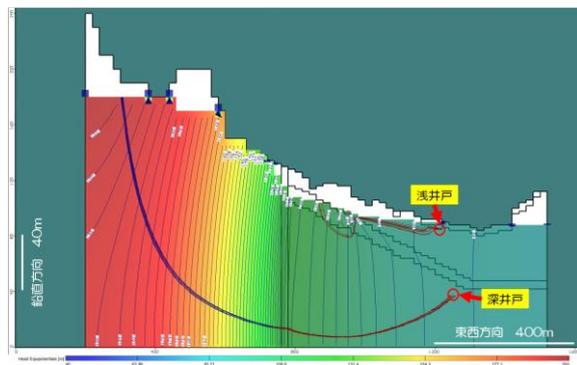


図-4 浅井戸と深井戸での逆粒子追跡線解析結果(断面図)

#### 5. まとめ

1F 事故によって放出された  $^{137}\text{Cs}$  の移行挙動を理解する一貫としての地下水流動解析と粒子追跡線解析等の結

果、双葉断層帯西側から放出された全ての粒子は解析領域東側境界に存在するため池に流出する結果となった。

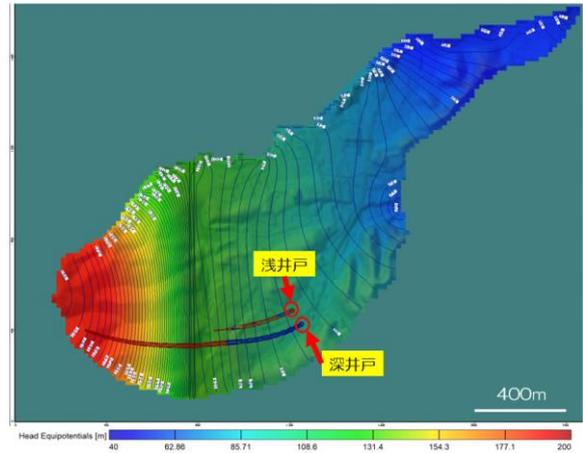


図-5 浅井戸と深井戸での逆粒子追跡線解析結果(平面図)

これは堆積岩が広く分布する比較的平坦な平野部のわずかな地形の起伏が影響しているものと考えられる。仮に断層帯西側の阿武隈山地に降下した比較的高い濃度の  $^{137}\text{Cs}$  が地下水とともに移行した場合、当該ため池に集中して流入することが考えられる。一方で、地下水涵養域(山地部)で基盤岩類の地下水水中に移行する  $^{137}\text{Cs}$  の総量は限られていることや、仮に移行した場合でも岩盤中に存在する黒雲母などの鉱物に吸着されることにより  $^{137}\text{Cs}$  の半減期に従い濃度が低下することから、ため池に流出した場合でも濃度は十分に低下していることも考えられる。これらのことから、今後、ため池における  $^{137}\text{Cs}$  のモニタリングは重要と考えられる。次に、領域内に存在する 2 本に井戸（浅井戸と深井戸）に向かう粒子の出発点を推定するための逆粒子追跡線解析の結果、浅井戸は井戸西方の堆積岩分布域に、深井戸は双葉断層帯西側の阿武隈山地に求められた。前者については、その軌跡が下位の被圧帯水層を移行していること、後者については深井戸における湧水の状況が出発点と井戸地点の標高差（約 100m）に比べてわずかであることから、今後、現地調査を含めた更なる詳細な検討が必要である。

なお、事故後継続して実施している両井戸における  $^{137}\text{Cs}$  の濃度測定の結果では、主として浅井戸から  $^{137}\text{Cs}$  が検出されているものの、その値は食品衛生法に基づく飲料水の基準値である 10Bq/kg に比べて 5 桁程度低い値を示していることから、現状においては利用上問題となるレベルではない。

#### 文献

- 1) 環境省 HP：土壤中の放射性セシウムの分布の状況 <https://www.env.go.jp/chemi/rhm/r1kisoshiryo/r1kiso-04-04-02.html>. (2021 年 1 月 16 日閲覧)
- 2) 久保ほか (1990)：原町及び大甕地域の地質，5 万分の 1 地質図幅，地質調査所

## 39. オープンループ方式地中熱利用システムにおける

### 還元井の目詰まり形成の進展

Progress of clogging formation and in injection wells of open-loop geothermal heat pump systems

○大谷具幸, 米田真由 (岐阜大学)

Tomoyuki Ohtani, Mayu Yoneda

#### 1. はじめに

地中の恒温性を活かして地表と地下との温度差から冷暖房等に熱エネルギーを利用する地中熱利用は、再生可能エネルギーの一種であり、2050年における脱炭素社会の実現のために注目されているエネルギーのひとつである。オープンループ方式は地下水を揚水するのでクローズドループ方式と比べて地下の広い範囲から熱を回収することが可能であるため、熱需要に対して必要な孔井数が少なく、初期コストを抑えることができる。特に浅層地下水を利用できる場合には、コスト低減効果がより大きくなる。

一方で、オープンループ方式のシステムの課題として、地下水還元の問題が挙げられる。従来では、揚水井1本に対して還元井2本を設置することにより還元能力の低下に対処してきたが、この方法では必要な孔井数が多くなることによりコスト高の要因となり、普及拡大を阻害する要因となっている。この点を解消するために、還元井から一時的に揚水する逆洗運転を適切な頻度で行う方法<sup>1)2)</sup>や、還元井に密閉型井戸を用いることにより地下水の酸化を極力抑制する方法<sup>3)</sup>が提案され、一定の効果をj得ている。一方でオープンループ方式システムを用いる際に還元井および帯水層内で生じる現象を明らかにしない限り、還元能力低下のメカニズムが明らかにならず、適切な対処方法を提案することができない。

そこで、オープンループ方式地中熱利用システムを長期的に安定して利用するために、既存事例のモニタリングデータと還元井から回収された目詰まり物質のSEM観察等により還元井の目詰まり形成のメカニズムを明らかにすることが本研究の目的である。

#### 2. 研究方法

本研究では、既存事例のモニタリングデータの解析と還元井から回収された目詰まり物質の観察・分析等を行う。既存事例のモニタリングデータの解析では、オープンループ方式の地中熱利用システムのモニタリングデータから、還元井の還元流量・地下水位と観測井がある場合にはその地下水位を用いて、地下還元の際の自然水位からの水位上昇量を求め、それと流量との関係、およびその時間変化を求める。

還元井から回収された目詰まり物質の観察・分析等

では、還元井より中間期(6月)、酷暑期(8月)、寒期(11月)に逆洗運転により得られる地下水(以下、逆洗水)を採水した。逆洗水の採水では、配管内に滞留する水を採水しないために逆洗運転開始6秒後から採水を開始し、10Lのポリタンク2~3個に逆洗水を採水後も還元井からの揚水を継続し、逆洗開始20分後に再び10Lのポリタンク1~2個に逆洗水を採水した。これにより逆洗開始直後には還元井の内部や孔壁、そのごく近傍に位置する物質を回収し、その後帯水層のより内部の物質、逆洗開始20分後には還元井から離れた自然状態で帯水層中に含まれる物質を回収した。回収した地下水はSSと濁度を測定した上で、0.45 μm径のメンブレンフィルタで浮遊物質をろ過した上で、SEM観察とSEM-EDX分析を行った。

なお、既存事例のモニタリングデータの解析で調査対象としたシステムの設置地点は明德公民館(岐阜県岐阜市)と東邦地水株式会社本社(三重県四日市市)、ゼネラルヒートポンプ工業株式会社本社工場(愛知県名古屋市)であり、還元井から回収された目詰まり物質の観察・分析では東邦地水株式会社本社のみである。

#### 3. 既存事例のモニタリングデータの解析

既存事例のモニタリングデータを解析した結果、明德公民館では、還元流量 > 200 L/min のときに 0.14 m/year の水位上昇量を確認した。水位上昇量は時間とともに一定の傾きで増加するのではなく、冷房運転と暖房運転の切り換え時などシステムが一定期間停止したときに水位上昇量が減少する傾向が見られた。

東邦地水株式会社本社とゼネラルヒートポンプ工業株式会社本社工場では、通常の運転時には水位上昇量は < 10 m/year であるものの、急に水位上昇量が > 10 m/year に増加することがあり、そのときには還元井内の地下水位が急上昇して還元井が使用不能となった。なお、この水位上昇量の急増はシステムを実験的に運用する中で生じたものであり、通常の運用においては順調に地下水還元を行うことができている。

#### 4. 還元井から回収された目詰まり物質の観察・分析

還元井から回収された目詰まり物質のSEM観察・SEM-EDX分析により、*Gallionella ferruginea*(図-1A)、*Siderococcus*、ケイソウ、鉄粒子が認められた。これ

らのうち *Gallionella ferruginea*, *Siderococcus* は鉄酸化細菌である。また、鉍物粒子が *Gallionella ferruginea*, *Siderococcus* に取り囲まれる産状も見いだされた。

鉄酸化細菌である *Gallionella ferruginea*, *Siderococcus* に関して、その産状を確認すると単体と集合体の2通りがある。この産状の違いと、目詰まり物質の回収時期、及び逆洗運転経過時間における鉄酸化細菌の大きさをみると、単体より集合体の方が大きく、最大で 250  $\mu\text{m}$  の集合体が見いだされること、いずれの回収時期においても逆洗運転開始 6 秒後には 150 ~ 250  $\mu\text{m}$  の物質が含まれるものの、約 1 分後と 20 分後には 100  $\mu\text{m}$  以下の物質に限られる (図-2)。一方で、ケイソウと鉍物粒子は逆洗運転開始 6 秒後には認められず、約 1 分後と 20 分後には主に 100  $\mu\text{m}$  以下の物質のみが含まれる。

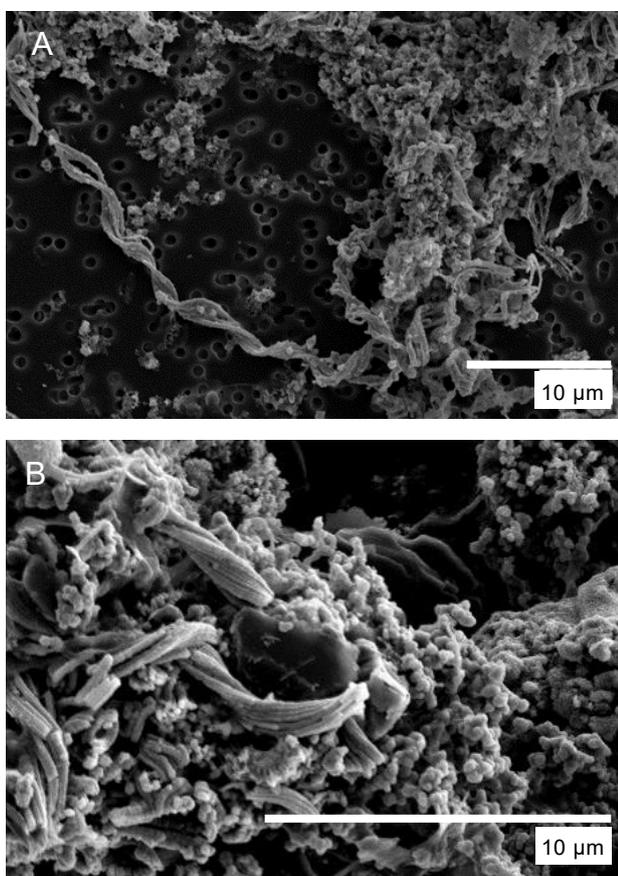


図-1 逆洗運転により還元井より回収された目詰まり物質。A) 鉄酸化細菌 *Gallionella ferruginea*, B) 鉍物粒子を取り囲む鉄酸化細菌 *Gallionella ferruginea*, *Siderococcus*

## 5. 考察

SEM 観察・SEM-EDX 分析より逆洗運転開始 6 秒後の逆洗水に鉄酸化細菌が多く含まれることは還元井内で鉄酸化細菌が繁殖し、それが集合体となることによって大きな物質に成長していると考えられる。目詰まり物質の回収時期にかかわらず、その最大径は 150 ~ 250  $\mu\text{m}$  であり、還元井のスリット幅である 500  $\mu\text{m}$  に

は到達していない。よって、現在の運転状況では定期的な逆洗運転により目詰まり物質がスリット幅である 500  $\mu\text{m}$  に達しないように適切に制御できているといえる。また、水位上昇量が <10 m/year と >10 m/year に 2 極化することは、目詰まり物質が成長しスリットを覆うことによって地下水還元が滞ることにより水位上昇量が急増して還元井が使用不能になることを示していると考えられる。

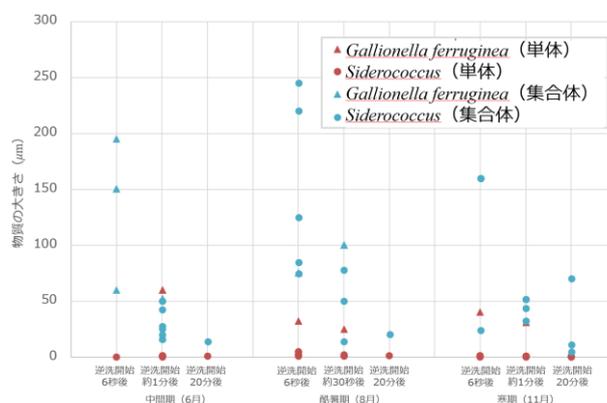


図-2 目詰まり物質の回収時期と逆洗運転経過時間における鉄酸化細菌の大きさ

## 6. まとめ

オープンループ方式の地中熱利用システムの還元井について、水位上昇量の解析と目詰まり物質の観察・分析を行った。その結果、水位上昇量は <10 m/year と >10 m/year に 2 極化すること、主たる目詰まり物質は鉄酸化細菌であり、これが還元井内で繁殖することにより最終的には還元井の目詰まりにつながると考えられる。

## 謝辞

東邦地水株式会社、ゼネラルヒートポンプ工業株式会社には、モニタリングデータをご提供いただきました。また、この成果は、国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構 (NEDO) の委託業務 (JPNP19006) の結果得られたものです。ここに記して感謝の意を表します。

## 文献

- 1) 大谷具幸・三輪義博・香田明彦・藤縄克之・柴芳郎・松村誠司 (2018) : Kansai Geo-Symposium 2018 論文集, 地盤工学会関西支部・地下水地盤環境に関する研究協議会, pp.1-6.
- 2) 東邦地水株式会社・株式会社テイコク・岐阜大学 (2019) : 新エネルギー・産業技術総合開発機構 成果報告書, 20200000000052, 379p.
- 3) 日本地下水開発株式会社・秋田大学・産業技術総合研究所 (2019) : 新エネルギー・産業技術総合開発機構 成果報告書, 20190000000346, 236p.

# 40. 九重山における九州山頂帯の形成要因の検討

## —九重山と祖母山を比較して—

Study of the Factors Forming the Kyushu Summit Belt in Mt. Kuju. - Comparison of Mt. Kuju and Mt. Sobo -

○野口祐弥 (山口大学), 太田岳洋 (山口大学)

Yuya Noguchi, Takehiro Ohota

### 1. はじめに

九重山は主な山頂が標高 1400 m を超える火山群である。本山体の山頂部は高木林が成立する標高であるにも関わらず、低木林や草原が分布する。鈴木<sup>1)</sup>はこの植生分布を九州山頂帯と呼び、山頂に特有な気象条件と火山活動によって形成されたと結論づけた。一方で、祖母山は同様の標高であるにも関わらず、山頂部まで高木林に覆われ、山頂帯は形成されていない。

九重山において九州山頂帯が形成された要因については、植生と土壌<sup>2)</sup>、地温<sup>3)</sup>の関係から検討が行われているが、九州山頂帯が分布しない山体との比較や、地形、地質、土層深など、その他の環境諸条件を考慮した研究は行われていない。

そこで本報告では、九重山で九州山頂帯が形成された要因を明らかにすることを目的とし、土壌の厚さや化学的性質について祖母山と比較、検討した結果を述べる。

### 2. 調査地域

九重山は阿蘇山の北東約 30 km、大分県竹田市西部に位置する。本山体は九州本土最高峰の中岳 (標高 1791 m) を有する。祖母山は阿蘇山の南東約 30 km、大分・宮崎の県境に位置する。本山体の最高峰は祖母山 (標高 1756 m) である。

本研究は標高 900 m 以上を対象とし、調査を行った。

### 3. 調査方法

#### 3.1 現地調査と試料分析

植生図<sup>4)</sup>に基づき現地で植生を確認し、それぞれの植生の典型部において土壌試料を採取した。また、土層強度検査棒を用いた土検棒貫入試験により、それぞれの調査地点における土層深を測定した。限界貫入深度は貫入強度が 300 N に達した深度とし、この深度を土層深と定義した。土壌試料は「土質試験の方法と手順」(地盤工学会)<sup>5)</sup>に基づきそれぞれ土壌懸濁液を作成し、EC (電気伝導率) と pH を測定した。

#### 3.2 GIS 解析

国土地理院基盤地図情報ダウンロードサービスにて公表されている DEM データ<sup>6)</sup>を用いて、木下ほか<sup>7)</sup>を基に谷密度を求め、各山体における開析の発達程度を比較した。

### 4. 結果

図-1 に九重山における土検棒貫入試験地点及び土層深を示す。九重山では西から東に向かって土層深が浅くなる傾向がみられる。図-2 に九重山と祖母山における植生分類と土層深の関係を示す。それぞれの植生分類において土層深の平均を比較すると、祖母山は低木林・高木林ともに深い。

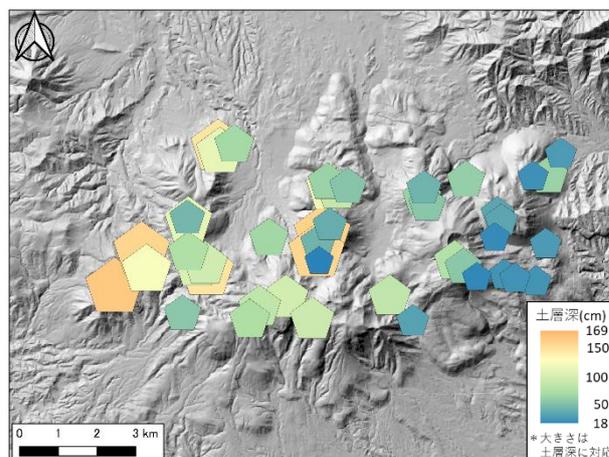


図-1 土検棒貫入試験地点と土層深

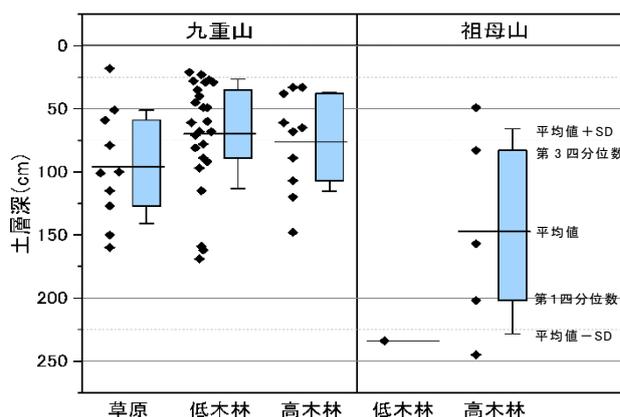


図-2 植生分類と土層深

図-3 に植生分類と土壌懸濁液の EC の関係を示す。九重山では全ての植生分類で幅広い EC を示すが、祖母山では一定して低い値を示す。

図-4 に植生分類と土壌懸濁液の pH の関係を示す。祖母山の高木林が分布する地点の土壌懸濁液は、九重山と比較して高い pH を示す。

図-5にGIS解析による谷密度と、それぞれのセル数の割合を示す。セル数の割合が多いほど、広い面積を占めることを表している。谷密度0-5/kmについて比較すると、九重山は全体の約32%であるのに対し、祖母山では全体の約15%である。

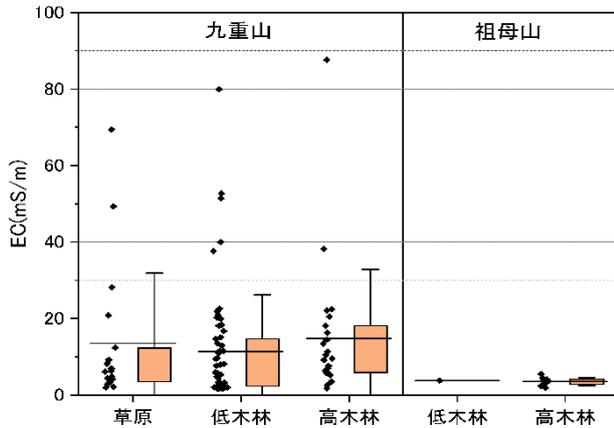


図-3 植生分類と EC

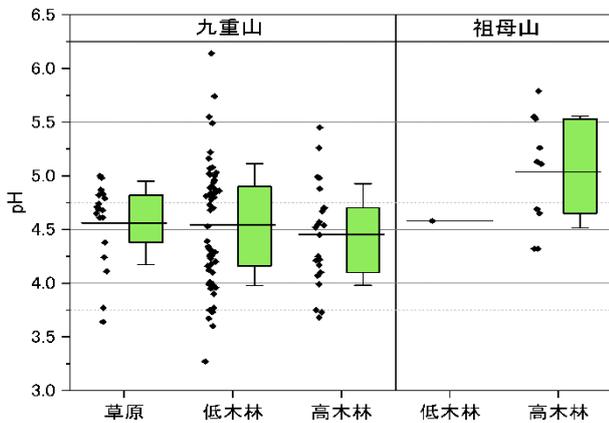


図-4 植生分類と pH

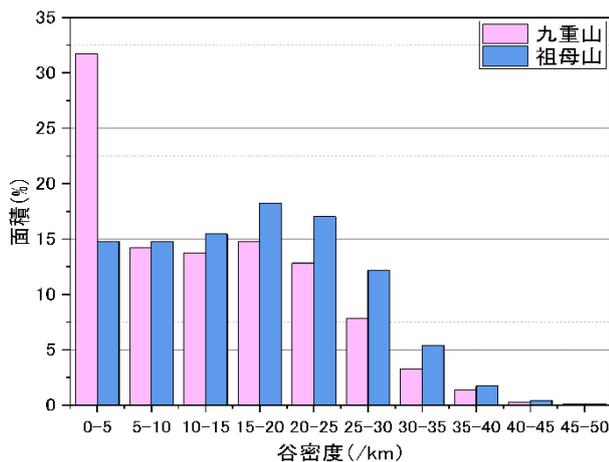


図-5 九重山と祖母山における谷密度

## 5. 考察

以上の結果より、九重山において九州山頂帯が形成された要因について考察を行う。土検棒貫入試験の結果から、九重山は祖母山と比較して土層が浅く、土壌の形成が未発達であると考えられる。山体の形成年代を比較すると、九重山は約200-1.6 ka<sup>8)</sup>、祖母山は約

13-15 Ma<sup>9)</sup>であり、土層深と山体の形成年代は調和的な結果である。加えて、九重山でみられる土層深の西から東へ浅くなる傾向は、九重山山体内の形成年代<sup>8)</sup>とも対応している。ECは土壌懸濁液中の電解質の濃度に伴って上昇する。よって、九重山は祖母山と比較して電解質の濃度が高いことから、土壌中に植物の栄養源である電解質が豊富に存在すると考えられる。祖母山で高いECがみられない要因として、山体が古く土壌形成も古いことから、土壌中の電解質の溶脱が進行しているためと考えられる。pHの測定結果から、九重山は祖母山と比較して土壌が酸性化している。これは、九重山が現在でも噴気活動がみられる活火山であることが要因として考えられる。両山体について谷密度を解析した結果、谷密度0-5/kmで特徴的な差異が得られた。谷密度が小さいほど谷が少ないことを示すことから、九重山は祖母山と比較して谷が少ない、つまり開析が未発達であると解釈できる。これは土層深やECと同様、九重山の山体形成年代が祖母山と比較して新しいことが要因であると考えられる。

これらのことから、九重山において九州山頂帯が形成された要因として、「山体の形成年代に伴う土壌の発達・溶脱・地形的特徴及び、火山活動に伴う土壌の酸性化」が考えられる。

## 文献

- 1) 鈴木時夫(1970):日本生態学会誌,日本生態学会, Vol.20, No.4, p.164.
- 2) 梅津幸雄・鈴木和子(1970):九重火山群山頂部の植生と土壌,日本生態学会, Vol.20, No.5, pp.188-197
- 3) 鈴木時夫・荒金正憲(1972):九重火山群の植物社会と地温,日本生態学会, Vol.22, No.4, pp.180-189
- 4) 第6~7回自然環境保全基礎調査(環境省生物多様性センター  
(<http://gis.biodic.go.jp/webgis/index.html>))
- 5) 地盤工学会(2000):土質試験の方法と解説-第1回改訂版-, pp.159-169
- 6) 国土地理院, 基盤地図情報ダウンロードサービス web サイト  
(<https://fgd.gsi.go.jp/download/menu.php>)
- 7) 木下博久・長谷川修一・野々村敦子・山中稔(2019):谷密度を指標とした流域スケールにおける斜面崩壊危険度評価手法の検討,応用地質学, Vol.59, No.6, pp.472-484.
- 8) 川辺禎久・星住英夫・伊藤順一・山崎誠子(2015):九重火山地質図,産業技術総合研究所地質調査センター
- 9) 高橋正樹・金丸龍夫・谷健一郎(2021):大崩山火山深成複合岩体の地質と形成過程の再検討,日本地質学会講演要旨

# 41. 脱気水上向流カラム試験を用いた盛土内貧酸素環境における

## 重金属溶出傾向の評価

Evaluation of Heavy Metal Leaching Behavior of Excavated Rocks in Oxygen-poor Environments  
by Up-flow Column Test Using Degassing Water

○山崎秀策, 田本修一, 川又基人, 倉橋稔幸 (寒地土木研究所)

Shusaku Yamazaki, Shuichi Tamoto, Moto Kawamata, Toshiyuki Kurahashi

### 1. はじめに

自然由来重金属等を含有する建設発生土の環境安全性評価において、盛土施工後に貧酸素環境へと移行する盛土内環境を再現した溶出評価方法は未確立である。そこで、盛土内の貧酸素環境を再現する試験法として、脱気（脱酸素）した溶媒を大気から長期間遮断した状態で連続通水を行う、脱気水を用いた上向流（飽和）カラム試験法を考案した。本報告では、重金属類の溶出量および溶出傾向の異なる3種の発生土を用いて、新たに考案した試験法と、ISO方式の上向流カラム試験法および環境省告示第46号による短期溶出試験による溶出試験結果を比較することで、貧酸素環境を再現する溶出試験法としての有効性を検討した。

### 2. 試験方法の概要

脱気水を用いた上向流カラム試験法は、カラム長30cm、内径5cmの亚克力製カラムに試料600-850gを充填し実施した。実験試料の調整、充填方法および試験方法は、ISO-21268-3:2019に準拠した。従来方法<sup>1)</sup>およびISO方式からの変更点は、ガスバリア性の高いPVDF製チューブの使用、送液ポンプおよび試料充填後のカラムの窒素ガス置換、溶媒タンクの常時窒素ガスバブリングによる酸素濃度を低減させた蒸留水（以下、N<sub>2</sub>脱気水）の連続通水である。また、溶媒および浸出液の溶存酸素濃度は、カラム前後でフロー計測を行った（図-1）。試験期間を通じて、通水速度は13.1-14.6 ml/hに、溶媒の溶存酸素濃度は大気平衡濃度の約1/20（0.4 mg/L）以下に維持した（図-2）。採水は液個比がおおよそ0.1, 0.25, 1, 2, 3, 4, 5, 7.5, 10となるタイミングで計9回行い、pH、電気伝導度(EC)、酸化還元電位(ORP)、アルカリ度、ICP-MSによる各種元素濃度の測定を行った。測定元素はNa, Mg, Al, Si, P, S, K, Ca, Ti, V, Cr, Mn, Fe, Ni, Cu, Zn, As, Se, Rb, Sr, Mo, Cd, Sn, Sb, Cs, Ba, Pb, Uおよび希土類元素である。

### 3. 試験試料の詳細

自然由来重金属としてヒ素、セレンを含有・溶出する試料として、半固結の砂質シルト（以下、土丹）、覆工コンクリートを混在する変質安山岩（変質岩1）、熱

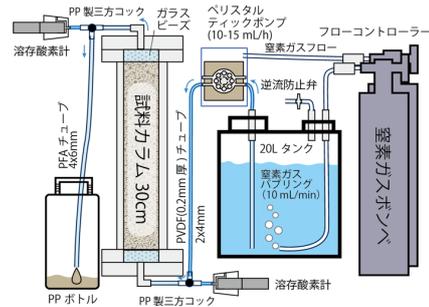


図-1 脱気水を用いた上向流カラム試験方法

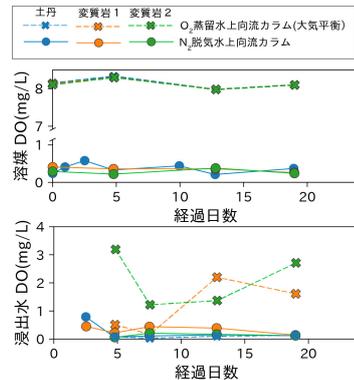


図-2 試験期間中の溶媒（上）と浸出水（下）の溶存酸素濃度の経時変化

表-1 試験試料3種の含有量試験（底質調査法）、含水率、pH・強制酸化試験結果、および短期溶出試験結果

土壌含有量試験結果				短期溶出試験結果(環境省告示46号試験)					
元素名	単位	土丹	変質岩1	変質岩2	元素名	単位	土丹	変質岩1	変質岩2
カドミウム	mg/kg	0.1	0.8	<0.1	カドミウム	mg/L	—	—	—
鉛	mg/kg	10.8	19.7	3.4	鉛	mg/L	<0.001	<0.001	<0.001
総クロム	mg/kg	59	201	619	総クロム	mg/L	—	—	—
六価クロム	mg/kg	—	—	—	六価クロム	mg/L	—	0.023	—
ヒ素	mg/kg	8.4	12.9	122	ヒ素	mg/L	0.007	0.002	0.206
セレン	mg/kg	0.3	0.3	<0.1	セレン	mg/L	0.005	0.001	0.001
ふっ素	mg/kg	195	155	285	ふっ素	mg/L	<0.1	0.4	—
ほう素	mg/kg	62	9	11	ほう素	mg/L	0.04	0.04	—
総水銀	mg/kg	0.03	0.01	0.42	総水銀	mg/L	—	—	—
鉄	%	2.72	5.13	4.22	鉄	mg/L	0.01	<0.01	<0.01
マンガン	mg/kg	299	1430	1650	マンガン	mg/L	0.01	<0.01	0.01
アルミニウム	mg/kg	38500	41600	35100	アルミニウム	mg/L	0.02	1.41	0.03
総硫黄	%	0.133	0.129	0.139	硫黄	mg/L	111	37.4	22.5
カルシウム	%	1.06	6.09	2.73	カルシウム	mg/L	20.9	25.6	4.96
強熱減量	%	3.2	3.2	13.4	塩素	mg/L	0.4	0.4	0.3
含水率	%	0.9	0.6	0.3	シリカ	mg/L	8.1	5.5	1.1
pH(H <sub>2</sub> O)		8.4	11.1	8.7	マグネシウム	mg/L	5.34	0.07	4.73
pH(H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> )		6.9	10.8	8.8	ナトリウム	mg/L	66.4	2.74	2.71
					カリウム	mg/L	10	1.21	1.47
					アルカリ度	meq/L	0.827	0.715	0.311
					pH		8	10.3	8.2
					電気伝導率	mS/m	50.3	17.2	8.8
					酸化還元電位(Orp)	mV	441	329	440

水変質を被った珪化岩（変質岩2）の3種の建設発生土を用いた。試料3種には、いずれも肉眼および顕微鏡観察で黄鉄鉱の含有が確認された。

重金属類の含有濃度は、土丹と変質岩 1 では、As がそれぞれ 8.4, 12.9 mg/kg を含有し、Se は 0.3 mg/kg と微量含有している。一方、変質岩 2 では、As が 122 mg/kg と高濃度の含有を示し、Se は非検出であった。

大気飽和した蒸留水（以下、O<sub>2</sub>蒸留水）を用いた 1:10 振とう試験結果（表-1）より、土丹の浸出液は pH 8.4 を示し、As (0.022 mg/kg) と Se (0.007 mg/L) の溶出が認められた。また、変質岩 1 では pH 11.1 とアルカリ性を示し、As (0.004 mg/L)、Se (0.002 mg/L) を、変質岩 2 では pH 8.7 で As (0.376 mg/L)、Se (0.003 mg/L) の溶出が認められた。

### 3. 脱気水を用いた上向流カラム試験の結果と考察

本報告では、紙面制限の関係から N<sub>2</sub> 脱気水上向流カラム試験の結果より溶存酸素、pH、EC、ORP、As、Se、S の結果を中心に記述する。

図-2 に示すとおり、N<sub>2</sub> 脱気水のカラム通水後液個比 1~2（試験開始 2~4 日）では、浸出水が流入溶媒よりも高い溶存酸素濃度（0.45-0.80 mg/L）を示し、試料中の残留酸素の影響が示唆された。従って、本試験法は液個比 2（4 日）以降において貧酸素環境での溶出傾向の評価を行う。溶存酸素量の計測により、土丹試料は、O<sub>2</sub> 蒸留水および N<sub>2</sub> 脱気水共に、浸出水の溶存酸素濃度は 0.1 mg/L 前後と低く、顕著な溶存酸素の消費を示した。変質岩 1 は、5 日目までは O<sub>2</sub> 蒸留水の浸出水における溶存酸素は 90% 超が消費（1 mg/L 以下）され、その後、10 日経過後は 70-80% 程度まで酸素消費量が低下した。一方、変質岩 2 は、O<sub>2</sub> 蒸留水の浸出水の溶存酸素濃度は初期から 1 mg/L を超え、試験期間中は 60-80% の酸素が消費され、酸素消費量が徐々に減少する傾向が認められた。これは、O<sub>2</sub> 蒸留水と N<sub>2</sub> 脱気水の比較により、試料毎にことなる盛土表層の酸化条件と、盛土内の貧酸素環境における溶出傾向の違いを、短～中期の酸素消費（酸化）傾向として評価できることを示している。

次に、浸出液の pH、EC、ORP の測定結果を図-3 左列に示す。土丹試料は液個比の増加に伴い pH が 8 から 9 前後への増加傾向に、変質岩 1 および 2 ではそれぞれ pH が 11 および 9 前後と試験を通じてほとんど変化は認められなかった（図-3）。土丹および変質岩 1 では、O<sub>2</sub> 蒸留水に対して N<sub>2</sub> 脱気水がわずかに高い pH を示すが、その変化幅は pH で最大 0.3 程度と小さい。変質岩 1 については pH の変化はほとんど認められなかった。EC は 3 試料ともに共通して初期は急激に減少し、液個比が 2 以降はなだらかな減少へと移行した。土丹と変質岩 2 については、総溶存イオン量の目安となる EC が N<sub>2</sub> 脱気水で 5-30% 程度低下する傾向が認められた（図-3）。同様の傾向を示したのが S 濃度であり、N<sub>2</sub> 脱気水を用いた貧酸素環境下では、各試料共通して最大で 70% 程度まで硫黄の溶出量が抑制される結果とな

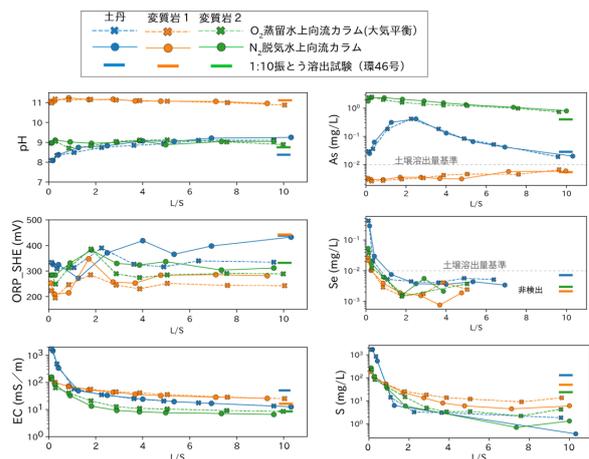


図-3 N<sub>2</sub> 脱気水および O<sub>2</sub> 蒸留水を用いた上向流カラム試験結果と 1:10 振とう溶出試験（環境省告示 46 号試験）結果の比較

った。3 試料において主な硫黄の溶出源は、黄鉄鉱の酸化分解によるものと考えられるため、貧酸素環境下において硫化鉱物の酸化分解が抑制されたことを示している。ORP は、1~7 日間貯水したボトルの採水時測定であるため、大気成分の影響を受けている可能性が高く、測定方法の改善が必要であろう。

溶媒酸素濃度の違いによる As および Se 濃度の差分はわずかであるが、土丹試料では液個比 3 未満の通水初期において N<sub>2</sub> 脱気水の試験結果で 70% 程度高い結果を示し、その後溶出量は 20-30% 程度低い傾向を示した（図-3）。変質岩 1 の As 濃度は検出限界に近く測定誤差の範囲内の変動と解釈される。一方、変質岩 2 は経時的に 10-30% 高い As 溶出量を示した。N<sub>2</sub> 脱気水の試験結果で As の溶出量が増加し、S 溶出量が抑制される結果は、貧酸素環境下で試料の酸化が抑制され pH がわずかに高くなったために、イオン交換態のヒ素の溶出が促進されたと解釈される。Se 濃度は、各試料ともに液個比 2 以降では検出限界に近い低濃度となるため、溶媒による違いは測定誤差の範疇と解釈される。

### 4. まとめ

N<sub>2</sub> 脱気水を用いた上向流カラム試験により、砒素や硫黄など、酸化反応や pH 変化により溶出傾向が影響される元素に関して、貧酸素環境下での溶出傾向を把握することができた。これにより、本手法は盛土内を想定した貧酸素環境下での溶出評価手法として有効性が示されたと考えられる。また、より定量的に酸化の影響を評価するためには、試料の酸素消費量に応じた適切なカラム長の設定や、より酸化を促進あるいは抑制する溶媒を用いた方法の検証が課題である。

### 参考文献

- 1) 山崎秀策・田本修一・倉橋稔幸 (2021) : P26. 貧酸素環境における重金属溶出傾向の把握を目的とした上向流カラム通水試験法の検討, 日本応用地質学会令和 3 年度研究発表会講演要論文集, pp.223-224.

## 42. 地域特性を踏まえたトンネル湧水の対応事例

Case Study on Tunnel Spring Water Countermeasures Based on Local Characteristics

○佐々木理弦, 杉江美織, 堀内瀬奈, 長谷川怜思, 山本 晃 (八千代エンジニアリング), 常陸 正 (国土交通省)  
SASAKI Rio, SUGIE Miori, HORIUCHI Sena, HASEGAWA Satoshi, YAMAMOTO Akira, HITACHI Tadashi

### 1. はじめに

トンネルなどの土木構造物は、水質汚濁防止法における特定施設には該当しないが、トンネル湧水を公共水域に放流する場合には、一律排水基準に基づく水質管理を実施することが多い。トンネル湧水が基準不適合であるため、長期的に中和処理を実施するなど、供用後も水質的課題を保有する事例もある。

本論では、中部横断自動車道（富沢～六郷）区間のトンネル湧水を対象に、無機溶存イオン及び自然由来重金属等に着目した水質分析により周辺環境への影響を評価・対応した事例について報告する。

### 2. 既設トンネルで生じた水質的課題

19区間のトンネルが貫通する事業区間には、中新世の堆積軟岩（富士川層群及び西八代層群）が分布する。これら堆積軟岩は、続成作用が弱く、特に泥岩は脆弱で、スレーキングしやすい性質を有する。

このうち、平成22年4月～平成25年11月に施工された醍醐山トンネルにおけるトンネル湧水のpH観測結果を図-1に示す。トンネル湧水のpHは、平成26年5月以降、徐々に低下する傾向が認められたものの、pH8.5～9.0程度でほぼ下げ止まりとなった。なお、このときの湧水量は概ね500～600L/分である。こうしたpHが高い湧水が一定量湧出し続ける状態が、施工完了後も3年以上にわたって継続した。

この間、トンネル湧水を下流の公共水域へ放流するにあたっては、一律排水基準を満足させるよう液化炭酸ガスによる中和処理対策がなされていた。

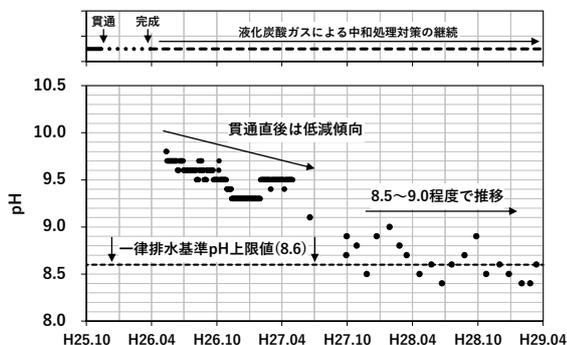


図-1 醍醐山トンネル 湧水の pH 観測結果

### 3. 課題解決に向けたアプローチ

長期的に高アルカリのトンネル湧水が継続してい

る要因を検討するため、無機溶存イオン及び自然由来重金属等に着目した水質分析を実施した。また、トンネル湧水を自然放流するため、周辺環境への影響を評価する方法とその流れを整理した対応フローを作成・実施した。

### 4. 検討結果とそれを踏まえた対応

#### 4.1. 醍醐山トンネルの高アルカリ水生成メカニズム

醍醐山トンネルにおける水質分析の結果、覆工施工時のカルシウムイオンは少なく、ナトリウムイオンに富む Na-HCO<sub>3</sub> 型の水質であった。自然由来重金属等の基準超過も認められなかった。

また、別途実施した岩石室内試験の結果、当事業区間の堆積軟岩はスメクタイトを含有し、陽イオン交換容量(CEC)やスレーキング指数が高いことを確認した。

スメクタイト等の膨潤性粘土鉱物は、水和反応時のイオン交換により水中から水素イオン(H<sup>+</sup>)を取り去るため、水中には相対的に水酸化物イオン(OH<sup>-</sup>)が増加する。その結果、アルカリ性を示すものと評価した。

また、当該地域では Na-HCO<sub>3</sub> 型の高アルカリ水の水源を鉱泉水として利用している集落も確認された。このことから、この水質は地域地下水の特性であるといえる。

#### 4.2. 醍醐山トンネルを踏まえた他トンネルへの対応

醍醐山トンネルの事例から、高アルカリ水が生じる要因は、当事業区間の地域地下水の特性であると考え、当事業区間内の他のトンネルの湧水についても、同様に無機溶存イオン及び自然由来重金属等の水質分析を実施した。

実施の流れは、施工前、施工中、施工後のいずれの段階においても、まずは沢水・トンネル湧水や周辺地下水の水質を確認する。施工により増加したカルシウムイオンの低減及び自然由来重金属等の基準値満足を確認できた湧水では、希釈実験等により安全性を検証する。その後、観測結果及び安全性の検証結果を環境部局へ報告し、自然放流に移行する。以上を整理した対応フローを図-2に示す。

フローに基づいて対応した楮根第四トンネルにおける水質分析結果の推移を図-3に示す。トンネル湧水のpHや濁度が上昇した平成29年7月には、関連してカルシウムイオン濃度の上昇が認められた。一方で、ナトリウムイオンは水質分析を開始した平成29年1

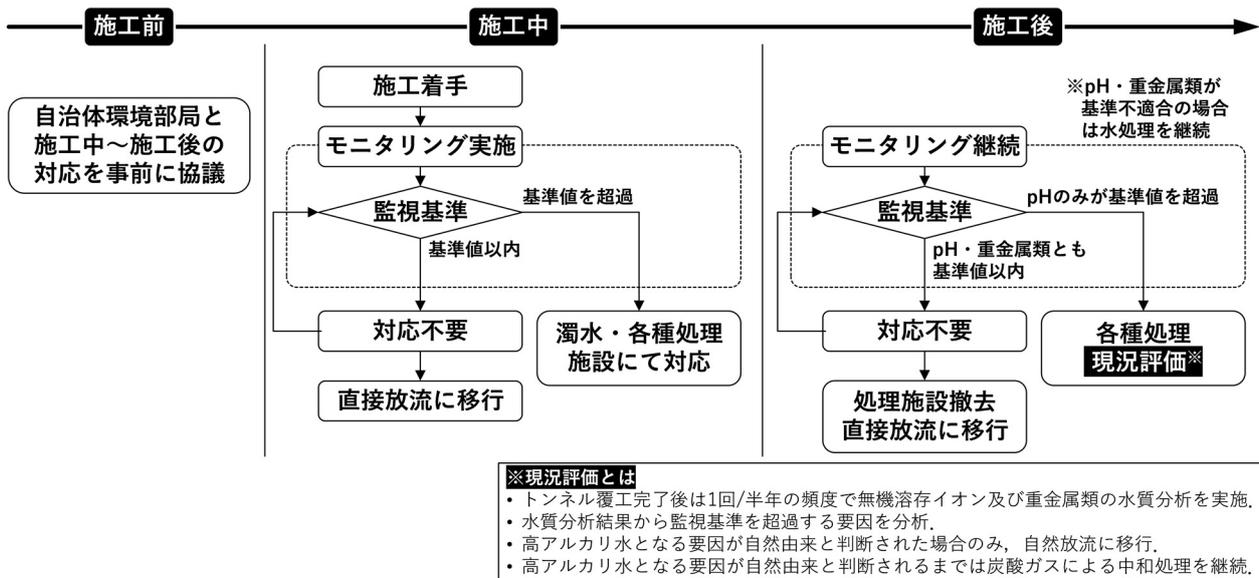


図-2 当事業区間におけるトンネル湧水の対応フロー

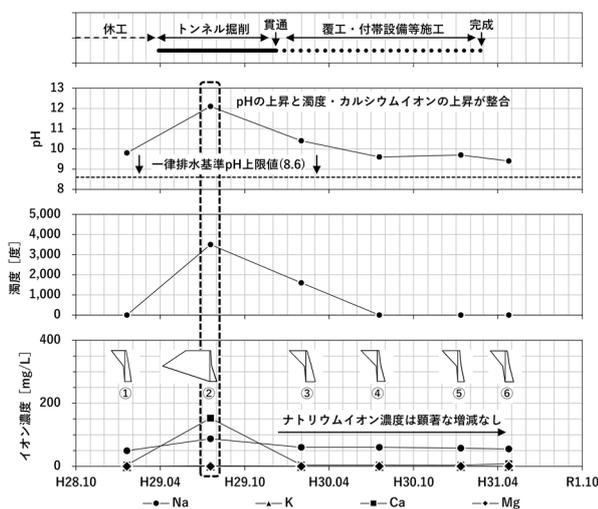


図-3 楕根第四トンネルの水質分析結果の推移

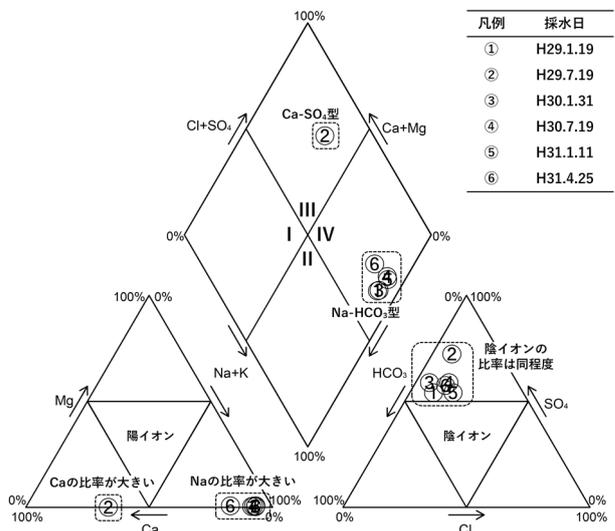


図-4 楕根第四トンネルの水質分析結果

月以降、概ね 55mg/L 前後で推移しており、顕著な増減は認められなかった。

また、水質分析結果を整理したトリリニアダイアグラムを図-4に示す。平成29年1月以降に実施した6回の水質分析のうち、pHが12程度まで上昇した平成29年7月の結果のみⅢ型(Ca-SO<sub>4</sub>タイプ)に分類されるが、その他は全てⅣ型(Na-HCO<sub>3</sub>タイプ)となる。このことは、トンネル湧水の水質において、トンネル掘削期間中にはカルシウムイオンが一時的に増加したものの、施工の影響が低減した後でも本地域の地下水特性により高アルカリを示すという前述のメカニズムと整合する。

### 5. おわりに

当事業区間における全19か所のトンネルでは、前述の対応により全て自然放流に移行済みであり、令和3年8月には事業区間の全線が開通した。

一律排水基準値を超過するトンネル湧水は、何らかの方法で中和処理を継続実施しているトンネルが多い。その一方で、トンネル湧水やその周辺河川の水質はその地域の地質学的な背景に基づき形成されている。全国基準の管理値におけるpHの値のみを用いて一律に水質を評価することは、明快かつ容易である。しかし、持続可能な社会を構築していくためには、地域の地下水やトンネル湧水の放流先となる公共水域の水質、その希釈効果を考慮することに加え、さらには地域の水資源や物質循環に立脚した、安全かつ経済的にも合理的な対策の実践が必要と考える。

### 文献

1) 長谷川怜思・大塚智久・山本 晃・堀内瀬奈(2018)：海成泥質岩の属性程度に着目した物理・化学特性の研究—特に自然由来重金属等の溶出特性について—，日本応用地質学会 平成30年度研究発表会，pp.175-176

# 43. 硫化鉄鉱体に含有する黄銅鉱による酸性水の発生機構について

Consideration of Acid Mine Drainage's Mechanism Caused by Chalcopyrite in Iron-Sulfide Orebody

○昆周作, 品川俊介 (土木研究所)  
Shusaku Kon, Shunsuke Shinagawa

## 1. はじめに

日本の国土は環太平洋地域の変動帯に位置しており火山活動や地殻変動の活発な地帯である. このため, 金属鉱山・鉱床地域・火山地帯といった特定の地質体では自然由来の重金属等が比較的に高濃度で偏在することが知られており, 発生土量の多い公共建設工事等では用途や処分等について問題になる場合がある. 特定の重金属等を含む鉱物を確認し, 酸性水や重金属等の発生・溶出機構を理解することは, 酸性水や重金属等の発生源が自然由来である有力な証拠となり, 具体的な対策工法について検討することが可能となる.

本論では, 酸性水と重金属等の溶出が認められる硫化鉄鉱体から試料を採取し, 各種溶出試験と顕微鏡観察を実施した. これらの結果から, 酸性水が選択的に発生する鉱物を特定し, その発生機構について論じる.

## 2. 試料採取と試料整形

中部地方の某公共事業の現場において, ほとんどが硫化鉱物で構成する, 幅1メートル程の硫化鉄鉱体から試料を採取した. 硫化鉄鉱体の表面は湧水によって影響を受けており, 部分的に藍色～緑色を呈していた.

採取した試料は, 手で強く押すと割れてしまうほど脆いため, 樹脂の含浸を施し補強をした上で, 岩石カッターで切断し, 水擦りによって研磨・琢磨を行った. 表面に分布していた藍色～緑色を呈する鉱物は, 試料整形する過程で見られなくなった.

## 3. 各種溶出試験の結果

短期溶出試験, 全含有量試験, 酸性化可能性試験に

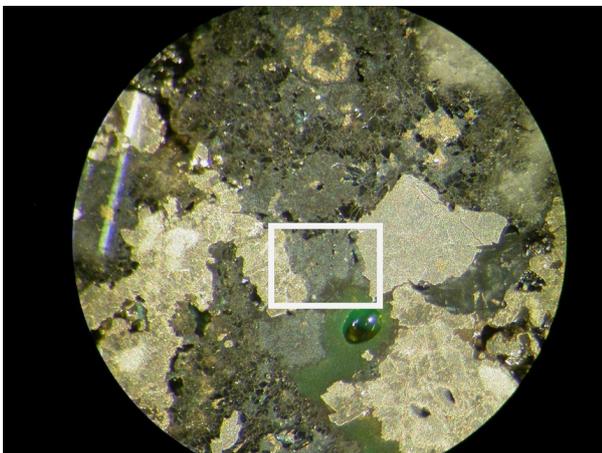


図-1 試料の実体鏡観察 (10倍)

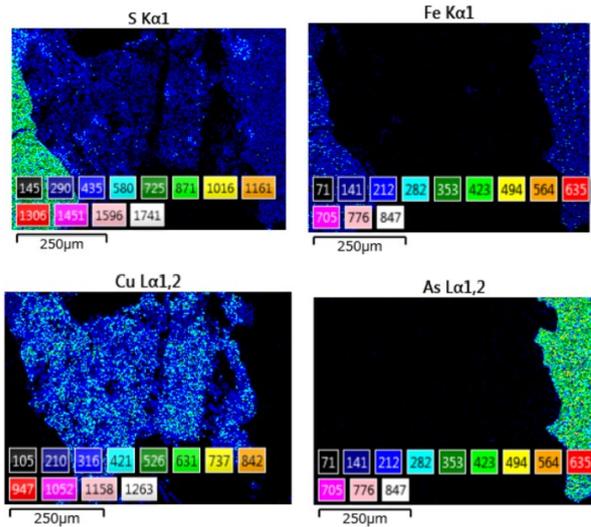
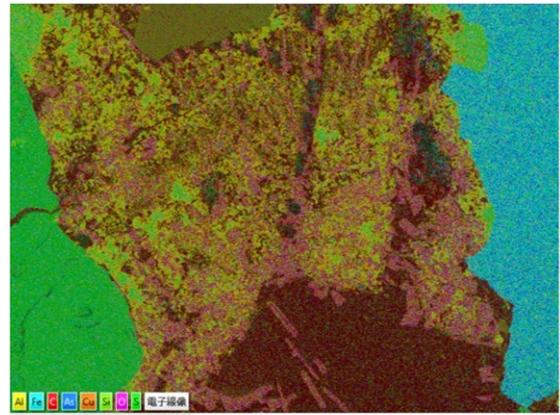


図-2 図-1の枠内におけるSEM-EDSで取得した元素マップ画像と各元素の存在度

加え, 土研式雨水曝露試験は事業者が実施し, 結果を提供いただいた. 短期溶出試験では, pHが排水基準値で不適合 (pH5.8以下) となる5.0であった. 重金属等ではふっ素が土壌溶出量基準値を超過し, カドミウム, 鉛, 砒素は超過しない程度で検出が認められた. 全含有量では, 鉛が土壌含有量基準値を超過する値を示した. 注目すべき点として, 鉄の含有量が著しく高いことがあげられる (42,000 mg/kg). 酸性化可能性試験ではpH2.4を示し, 酸性化の目安値である3.5を大きく下回る値であった. 約1年間実施した土研式雨水曝露試験結果では, pH2.8~3.7以下の強酸性であり, 重金属等についてはカドミウム, 砒素, 鉛, ふっ素が地下水環境基準値を超過しながら現在も継続的に溶出している.

#### 4. 各種顕微鏡を用いた観察結果

試料の観察は、実体鏡と走査型電子顕微鏡（低真空モード）を用いて行った。整形した試料を実体鏡で観察したところ、複数の硫化鉱物を確認でき（図-1）、黄土色の硫化鉱物が点在する箇所針状の暗灰色の鉱物が分布していた。図-1の白枠内を走査型電子顕微鏡で観察し、元素マップ画像と各元素の存在度を取得した（図-2）。ここで確認できる硫化鉱物は、左からそれぞれ黄鉄鉱、黄銅鉱、硫砒鉄鉱である。黄銅鉱に関しては、ほとんどが虫食い状に分布しており、針状の鉱物に置き換わっているのが確認できる。この虫食い状の形態は黄鉄鉱や硫砒鉄鉱では認められなかった。そこでこの黄銅鉱と針状鉱物の化学組成を分析し比較すると、針状鉱物は硫黄の質量%が減少し、鉄はほとんど存在せず、酸素が多く存在することから、硫酸銅であると想定される（図-3）。

図-4は亀裂が発達した硫砒鉄鉱の元素マップ画像である。この硫砒鉄鉱の周辺に針状鉱物が確認できる。また、硫砒鉄鉱に分布する亀裂に沿って銅を含有する鉱物が析出しており、化学組成を確認したところ、銅と砒素を含有する硫酸塩であった。

#### 5. 考察

室内の溶出試験では酸性水の発生を示唆し、実現試験でも強酸性水を検出した。全含有量試験では、鉄の含有量が顕著であることを考慮すると、酸性水と重金属の発生源は硫化鉱物が有力であることが各種溶出試験の結果からも考えられる。

顕微鏡観察を行った結果、複数の硫化鉱物が確認でき、その中でも黄銅鉱は大半が虫食い状に分布し、針状鉱物の硫酸銅に置き換わる現象を確認した。虫食い状の黄銅鉱は、硫黄と水の酸素が反応することで硫酸イオンが発生し、酸性水の発生に起因しているものと考えられる。さらに黄銅鉱は酸化によって胆礬（化学式： $\text{Cu}_4\text{SO}_4 \cdot 5\text{O}_2\text{H}$ ）といった硫酸銅に置き換わっていると考えられる。

広吉ほか<sup>1)</sup>は、硫化銅がそのほかの硫化鉱物と接触していると、静止電圧の高い鉱物をカソード、低い鉱

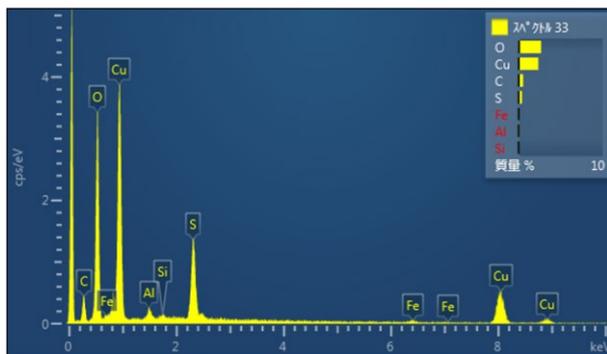


図-3 針状鉱物の元素組成

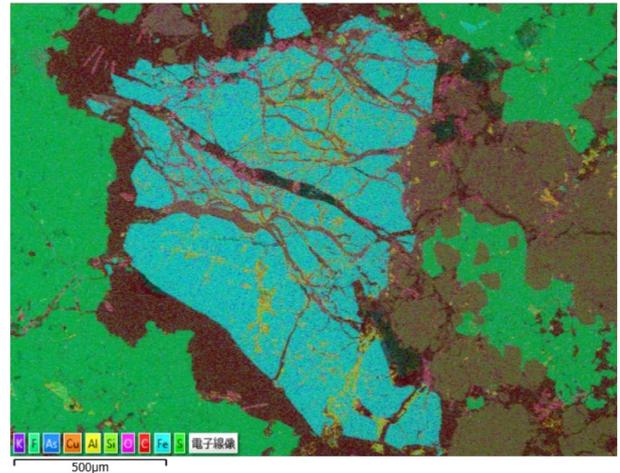


図-4 亀裂が発達した硫砒鉄鉱とその周辺の硫酸塩

物をアノードとするガルバニ電池を形成すると報告している。例えば、図-2において黄鉄鉱や硫砒鉄鉱がカソード、黄銅鉱がアノードに該当する。酸化が起こるアノードの黄銅鉱では溶解が進む一方、還元が起こるカソードの黄鉄鉱や硫砒鉄鉱では溶解が抑制される。すなわち、黄銅鉱が硫砒鉄鉱に含まれる砒素の溶出に対して遅延材として機能していることになる。図-4では、硫砒鉄鉱の周辺には、黄銅鉱から置き換わったと思われる針状鉱物が分布することから、かつては黄銅鉱が分布しており、アノードとして機能していたと考えられる。黄銅鉱の溶出が完了した段階で、これまでカソードであった硫砒鉄鉱からは溶解質である硫酸塩が析出しはじめ、硫砒素鉄鉱起源の酸性水と砒素が発生すると考えられる。

以上をまとめると、複数の硫化鉱物が存在する場合、黄銅鉱が選択的に溶出し、酸性水の発生源になること、および重金属等の溶出の遅延材として機能する可能性について論じた。カドミウムと鉛の発生源と考えられる閃亜鉛鉱や方鉛鉱は、本試料で確認できなかった。今後は、これらの硫化鉱物に対しても硫化銅がアノードとなり、溶出の遅延材として機能するか確認したいと考えている。さらに、盛土内部といった還元的な環境<sup>2)</sup>における硫化銅の溶出抑制効果を理解することで、建設発生土の有効利用が見出せる可能性があると考えている。

#### 文献

- 1) 広吉種臣, 恒川昌美, 平島剛 (1998): 低品位銅鉱のリーチング, 資源処理技術, Vol.45, no.4.
- 2) 福島広之, 佐藤優, 山本隆広 (2020): 酸性化する掘削ずりの対策について—現実的な対策とその検証—, 第62回(平成30年度)北海道開発技術研究発表会文集, 環6.

## 44. 盛土内環境および浸透水量の計測実験

Measurement Experiment of Internal Environment of Embankment and Infiltration Water Volume

○品川俊介, 昆周作 (土木研究所), 田本修一, 山崎秀策 (寒地土木研究所)

Shunsuke Shinagawa, Shusaku Kon, Shuichi Tamoto, Shusaku Yamazaki

### 1. はじめに

発生土からの自然由来重金属等の溶出特性は、発生土の岩石・鉱物学的な特徴だけでなく、発生土が置かれる環境に大きく依存する可能性があることが、各種の溶出試験から示唆される。

発生土からの重金属等の溶出特性の評価は、実際に発生土が置かれる状況に近い環境で評価することが望ましく、実環境に近い試験として土研式雨水曝露試験が用いられることが多い。

一方、土研式雨水曝露試験と実大盛土からの重金属等の溶出濃度の比較実験(品川・阿南, 2020)<sup>1)</sup>では、実大盛土からの溶出の最大濃度は土研式雨水曝露試験より低い傾向が認められ、差異の原因として、酸素や水の供給条件の違いにより、盛土内部の酸化還元電位が異なる可能性が考えられた。

盛土内の環境測定については限られた報告の中で酸素濃度の計測が行われているが、溶出特性と密接に関係する指標である酸化還元電位の計測は行われていない。また、重金属等の環境影響を検討する上で重要である、盛土の浸透率についても実測データは少ない。

本報告では、発生土の適切な環境安全性評価の基礎資料を得ることを目的に、実大スケールでの盛土を模擬した屋外大型土槽実験を実施し、酸化還元電位、酸素濃度、および浸透水量の計測結果を報告する。

### 2. 屋外大型土槽実験の概要

屋外大型土槽実験は、土木研究所内にある蒸発散量測定用の2基のコンクリート製ライシメーター(幅5m×奥行5m×深さ2.5m)を使用した。大型土槽の断面形状、計測機器類の配置を図-1に示す。

盛土材料の粒度分布の違いによる内部環境や浸透量の比較を把握するため、一方には建設工事で発生した更新世のシルト質泥岩(以下、「土丹」)を、他方には硬質砂岩のC-40砕石(以下、「砕石」)を用いた。図-1のような2割勾配の斜面を有する形状に仕立て、表層には厚さ30cmの砂質土による覆土を施した。

土丹、砕石については締固め試験(JIS A 1210に準拠)を行い、プレートコンパクターで締固めを行った。覆土については足踏みにて転圧を行った。また土丹、砕石、および覆土については施工時に現場透水試験(JGS1316に準拠)を実施した。さらに土丹、砕石については施工時に試料採取を行って粒度分析を実施した。現場透水試験結果を表-1に示す。また、土丹、

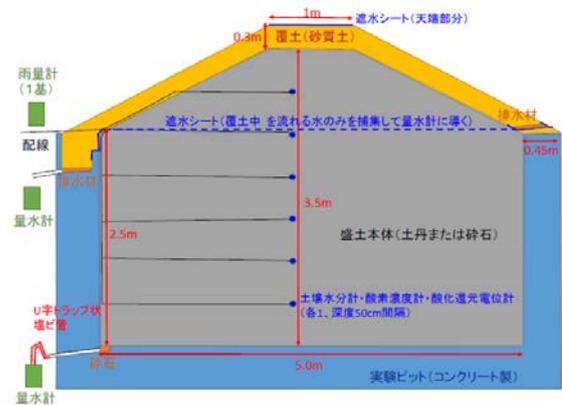


図-1 屋外大型土槽の断面図

表-1 現場透水試験結果

材料	土丹	砕石	覆土
透水係数 (m/s)	$1.35 \times 10^{-5}$	高透水 (測定不能)	$4.38 \times 10^{-5}$

砕石の粒度分析結果によると、土丹は粗礫と中砂にピークを持つバイモーダル分布を示した。最大粒径は土丹で300mm、砕石で53mmと、土丹が大きい。2mmふるい通過質量では土丹は約50%、砕石は約20%と、土丹には細粒分が多かった。

浸透水の観測では、覆土層中を斜面の傾斜に沿って流下する水量を把握するため、斜面脚部の覆土層内部に桶状の形状に遮水シートを設置し、集水した。覆土層脚部からの集水は1転倒2Lの、土槽底部からの集水は1転倒0.2Lの転倒ます型量水計で計測した。また、土槽底部の集水管から土槽内に空気が侵入しないよう、集水管の端部にU字トラップを設置し水封した。

2基の土槽中心部には深度50cmおきに酸化還元電位計、酸素濃度計、および土壌水分計を6箇所、計12個埋設した。なお酸化還元電位計は、水と接触していないと計測できないため、土槽内部に水受けを埋設し、その中に設置した。また、ライシメーター施設内に雨量計を設置した。

大型土槽の築造は2021年12月に行い、竣工直後の2021年12月23日より各種の観測を開始した。

### 3. 観測結果

2022年8月時点で、およそ7ヵ月の観測結果を得た。

図-2に、降水量と排水量の計測結果を示す。観測から2ヵ月ほどは降雨が少なく、排水量もほとんどなかったが、3月中旬より日雨量30mm前後の降雨が時

折発生し、土丹、碎石ともに土槽底部からの排水が継続的に見られるようになった。降雨量に対する土槽底部排水の比率（浸透率）について、基底流出が安定しだした3月18日から8月8日までのデータ（総降水量563mm）では、土丹で51.5%、碎石で55.3%と、一般的とされる盛土の浸透率（30%）に比べて著しく高い。

覆土層脚部からの排水は、おおむね累加で20mm程度の降雨直後に発生し、降雨後すぐに減少する。土槽底部および覆土層脚部からの排水はいずれも、土丹より碎石のピークが大きく、総排水量は碎石の方が多い。

図-3に、酸化還元電位計の計測結果を示す。なお、データ中の206mVを示す値は故障によるものと思われる。2基の土槽の酸化還元電位を比較すると、土丹では計測開始から約200日で深さ2.3mを境に浅部と深部に350mV程度の明確な差が発生したのに対し、碎石土槽では明確な境界はないものの、深部の方が酸化還元電位が高い傾向が認められた。

#### 4. 考察

土丹土槽の酸化還元電位の結果では、浅部と深部の測定値に350mVの差が発生した。境界領域である深さ2.3mの観測結果を見ると、観測を開始した冬における同観測点では、より深部の観測点と同程度の値か、やや高い値を示していたが、降水量が増加する3月中旬以降は測定値の変動が大きくなり、最終的には上部の観測値と同程度である550mVで安定しつつある。酸化還元電位が上下する期間では、降雨後1週間ほどの間に酸化還元電位の急降下が見られたことから、水の供給により酸化還元電位の低下をもたらす反応（例えば黄鉄鉱が酸化分解して酸素を消費するような反応）が土槽内部で行われたことを示唆する。また、それらの繰り返しの結果、深さ2.3m付近が酸化的な環境に変化していったものと考えられる。深さ1.8mの酸化還元電位の変化を見ると、それより浅部に比べて遅れて値の上昇が見られることから、土槽内部が表層より徐々に酸化的な環境に変化していく様子がわかった。

一方、碎石土槽では深部の酸化還元電位が高い傾向が認められ、深部の方が低い土丹土槽とは逆の結果となっている。その原因は現在のところ不明であるが、土槽材料の異なる透水性による雨水の浸透速度の違いや材料の岩石・鉱物学的性質が影響している可能性がある。碎石土槽と比べて充填率が高く、透水性が低い土丹土槽では、酸素を含む雨水が緩やかに浸透することで、土槽浅部にて酸素が消費される一方、碎石土槽は透水性が高く、酸素を含む雨水が速やかに深部まで供給されると考えられる。また、碎石は硬質の砂岩であり、黄鉄鉱などの酸素を消費するような化学反応があまり行われず、酸化的な環境となっている可能性がある。

覆土を施した盛土内部は還元的な環境である可能

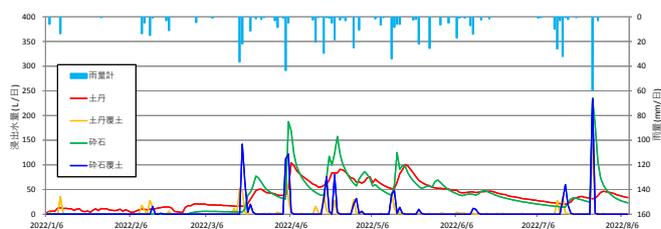


図-2 降水量および土槽底部と覆土層脚部の排水量

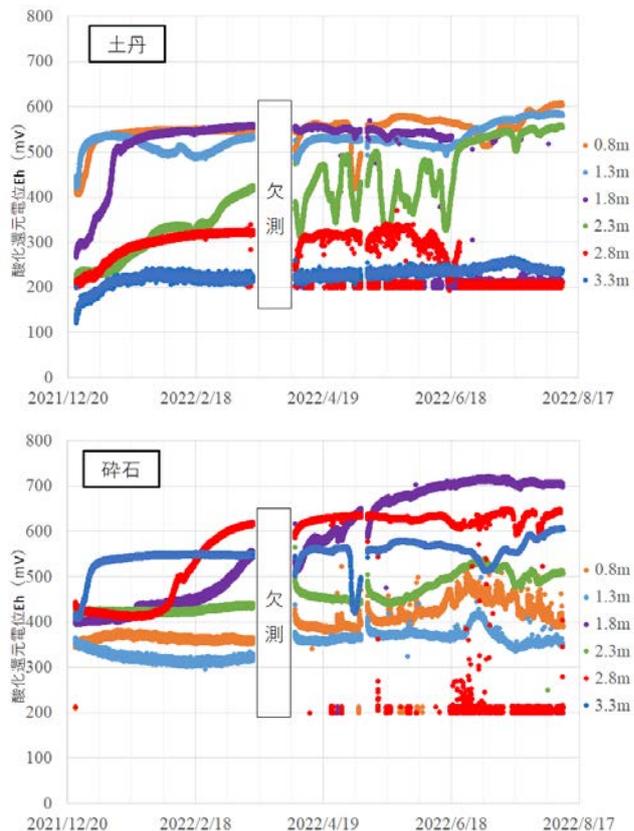


図-3 土丹土槽(上)および碎石土槽(下)の酸化還元電位

性があると報告されている（品川・阿南，2014）<sup>2)</sup>が、材料特性によっては必ずしも還元的でない可能性があると考えられる。

#### 参考文献

- 1) 品川俊介，阿南修司（2020）：自然由来重金属等含有土の溶出特性に関する現地比較実験，第55回地盤工学研究発表会講演論文集，23-6-2-06.
- 2) 品川俊介，阿南修司（2014）：自然由来重金属等含有岩石の大型カラム試験，第49回地盤工学研究発表会講演論文集，pp.2033-2034.

# 46. ダム再生における基礎岩盤評価の事例分析

Utilization of existing data in dam redevelopment project

○多田一晴, 梶山敦司, 矢島良紀, 品川俊介 (土木研究所)  
Issei Tada, Atsushi Kajiyama, Yoshinori Yajima, Shunsuke Shinagawa

## 1. はじめに

頻発する水害の抑制などを目的として、国土交通省では「ダム再生ビジョン (H29)」<sup>1)</sup> や「ダム再生ガイドライン (H30)」<sup>2)</sup> をとりまとめるなど、既設ダムを運用しつつ改造や運用変更等を行う「ダム再生」を推進している。ダム再生のうち堤体の嵩上げをはじめとしたダム本体の改造を伴う場合には、基礎岩盤の強度や透水性などについて再評価が必要となる。再評価に際しては、既設ダム堤体下の基礎岩盤の性状や既存ダムの構造等の情報を得るため、既存ダム建設時の資料が収集・活用されている。しかし、ダム再生事業における地質調査・解析手法の概略的な資料は存在する<sup>3)</sup>、<sup>4)</sup>、<sup>5)</sup>ものの、既存資料の活用方法について具体的に記された資料はない。ダム再生事業を実施するにあたり、基礎岩盤の再評価にどのような既存資料が利用されているか整理されていると、今後の検討において有用な資料になると考えられる。

そこで、本発表ではダム再生事業の事例を基に、地質解析等に利用されている既存資料 (写真, 図面等) と、既存資料が収められていた文献等 (報告書, 工事誌等) の整理結果を報告する。

## 2. 事例の収集

### 2.1 事例の収集方法

ダム再生事業における既存資料の利用状況を具体

表-1 収集事例の形式とダム再生の様式

ダム名	再生ダム型式	ダム再生の様式			
		嵩上げ	堤内放流管の増設	ゲートレス化	洪水吐きの増設・改造
No.1	G	○			
No.2	G	○			○
No.3	G	○			
No.4	G	○			
No.5	G	○			
No.6	G	○	○		
No.7	G				○
No.8	G	○			
No.9	G			○	○
No.10	G	○			○
No.11	G		○		○
No.12	G+R	○			
No.13	G	○			○
No.14	G				○
No.15	G		○		
No.16	G	○			
No.17	E			○	○

G 重力式コンクリート  
G+R 重力式コンクリート+ロックフィル複合  
E アース

的に把握するため、事例の収集を行った。事例収集は、比較的資料が入手しやすい直轄ダム (国土交通省・水資源機構管理) と補助ダム (都道府県管理) を対象として、既存ダムの改造を伴うダム (嵩上げ・放流管増設・ゲートレス化・洪水吐きの改造等) かつダム再生事業中あるいは 2000 年以降にダム再生が完了したダムを対象とした。

また、既存資料の有無や利用状況を資料から読み取れない事例に関しては、収集対象から除外した。

### 2.2 収集結果

上記の条件から抽出された事例は計 17 事例あり、このうち 16 事例が重力式コンクリートダム (複合型式を含む) である (表-1)。また、11 事例が嵩上げを伴うダム再生となっている。

## 3. 事例の整理

### 3.1 整理方法

収集した事例の基礎岩盤の評価資料に利用されている既存資料を抽出し、既存資料が掲載されていた文献等を整理した。

### 3.2 整理結果

#### (1) 地質解析に利用した既存資料

収集した事例において、地質解析に利用されている既存資料は表-2 のように分類できる。

#### (2) 利用した資料が収められていた文献等

収集した事例において、利用した既存資料が収められている文献等は表-3 のように分類できる。

表-2 既存資料の種類

番号	既存資料	内容の例
①	地質関連図面	地質図・岩級区分図等
②	掘削面写真	写真等
③	ボーリング資料	柱状図等
④	横坑資料	壁面スケッチ等
⑤	せん断試験資料	試験結果・試験面スケッチ等
⑥	物理探査資料	弾性波速度断面図等
⑦	岩盤分類資料	区分基準等
⑧	設計図面	掘削形状等
⑨	基礎処理資料	実績図等

表-3 文献等の種類

記号	文献等の種類
A	地質調査関連報告書
B	工事誌
C	施工時記録写真
D	岩盤検査資料
E	竣工図
F	施工記録

表-4 利用された既存資料と参照された文献等の関係

ダム名	既存ダム竣工年	地質解析に利用した既存資料									合計
		地質関連図面	掘削面写真	ボーリング資料	横坑資料	せん断試験資料	物理探査資料	岩盤分類資料	設計図面	基礎処理資料	
No.1	1891										0
No.2	1903										0
No.3	1943		C						E		2
No.4	1952		AC						E		2
No.5	1955								E		1
No.6	1955		C						F	F	3
No.7	1955	F		F					E	F	4
No.8	1957	BD	C						BE	F	4
No.9	1962	AF	C						E		3
No.10	1964	ABD	AC	A	A		B	A	BE	F	8
No.11	1965	A	C		A	A			E		5
No.12	1968	B	BC			B		B	B		5
No.13	1973	AD	C	A	A				A	F	6
No.14	1976	AB		A	A	A		B	B	B	7
No.15	1978	AB	CD	A	A	A	A	A	B	B	9
No.16	1984	ABDF	C	A	A			A	BE	BF	7
No.17	1995		C	A					E		3
合計		10	12	7	6	4	2	5	15	8	

利用された資料が収められている文献等

- A 地質調査関連報告書
- B 工事誌
- C 施工時記録写真
- D 岩盤検査資料
- E 竣工図
- F 施工記録

(3) 既存資料の利用状況と参照した文献等

収集した 17 事例について、既存資料の利用状況と参照した文献等を表-4 に示す。なお、表-4 の空欄部分は資料が残っていない場合に加え資料が残っていたとしても利用していない場合も含まれる。

(4) 既存資料の残存状況

既存ダムの竣工が 1900 年前後（明治ごろ）の古いダムは、既存資料が全く残っていない。竣工が 1960 年以前（昭和 35 年以前）のダムは、掘削面写真と設計図面は比較的残っているものの、ボーリング資料、横坑資料、せん断試験資料、物理探査資料および岩盤分類資料はほとんど残っていない。一方で、竣工が 1960 年以降は既存資料が比較的多く残るダムが多い。

(5) 利用した既存資料と参照された文献等との関係

地質関連図面は、地質調査関連報告書（以降、報告書と呼称）、工事誌から取得、利用されることが多い。また、地質関連図面は、岩盤検査資料や施工記録から取得されている場合もある。掘削面写真は、ほとんどの事例で施工記録写真から取得されているが、報告書や工事誌から取得されている場合もある。ボーリング資料、横坑資料、せん断試験資料、物理探査資料および岩盤分類資料は、ほとんどが報告書から引用されている。設計図面は、工事誌と竣工図から取得されることが多い。基礎処理資料は、施工記録や工事誌から取得されている。

4. 考察

表-4 によると、地質関連図面は報告書から取得されて利用されることが多い。これは、地質関連図面に関しては報告書が内容的に最も情報量が多い資料であることを示唆していると考えられる。さらに、ボーリング資料、横坑資料、せん断試験資料、物理探査資料および岩盤分類資料に関しても多くが報告書から取得されている。したがって、ダム再生事業では報告書の収集が最も有効といえる。また、表-4 から掘削面写

真に関する情報量が多い文献は施工時記録写真、ダム構造に関しては工事誌や竣工図、基礎処理に関する情報量が多い文献は工事誌や施工記録であることが示唆される。ただし、既存ダムの竣工が 1960 年以前の場合は、報告書が残っていないことが多く、工事記録写真や竣工図などの他の種類の文献等が利用されていると考えられる。

5. まとめ

ダム本体の改造を伴うダム再生事業の地質解析において、既存ダムが建設された年代が古いほど利用できる既存資料が少なく、種類も限られる傾向があることが分かった。また、地質関連図面やボーリング資料などの基礎岩盤の性状や分布に関する情報量が多い文献は報告書、掘削面写真に関しては施工時記録写真、ダム構造に関しては工事誌や竣工図、基礎処理に関しては工事誌や施工記録であると考えられる。したがって、既存ダムの基礎岩盤の評価（地質解析）を行う際には、これらの文献等の有無をまず確認する必要がある。

文献

- 1) 国土交通省 水管理・国土保全局（2017）：ダム再生ビジョン、  
[https://www.mlit.go.jp/river/dam/saisei\\_vision.html](https://www.mlit.go.jp/river/dam/saisei_vision.html).
- 2) 国土交通省 水管理・国土保全局 河川環境課 流水管理室・治水課 事業監理室（2018）：ダム再生ガイドライン、  
<https://www.mlit.go.jp/river/dam/guideline.html>.
- 3) 一般社団法人 ダム技術センター（2005）：多目的ダムの建設 第 5 巻 設計 II 編, p.252-253
- 4) 国土交通省 水管理・国土保全局（2014）：国土交通省 河川砂防技術基準 調査編, 第 15 章 第 4 節 p.47-48
- 5) 一般社団法人 ダム技術センター（2015）：ダム技術 Q&A 総集編, p.36-38

# 47. 山岳トンネル施工に係るラムサール条約登録湿地の 環境保全に向けた取組み

Efforts for Environmental Conservation of Ramsar Wetland Concerning of Mountain Tunnel Excavation

○ 柏木 亮, 高垣 裕彦 (鉄道・運輸機構)

Ryo Kashiwagi, Yasuhiko Takagaki

## 1. はじめに

北陸新幹線（金沢・敦賀間）は 2024 年春の完成・開業に向け整備が進められており、敦賀駅から約 2km 北に位置する深山をトンネル（延長 768m）で通過するルートとなっている。深山付近には 2012 年 7 月にラムサール条約に登録された中池見湿地が位置しており、トンネル掘削にあたっては湿地環境保全に向け、様々な調査・検討・対策を実施している（図-1）。

深山トンネルは、2013 年 11 月～2015 年 3 月まで「中池見湿地付近環境事後調査委員会」にて湿地及び周辺環境に与える影響を極力回避できるルートを検討し、2015 年 5 月のルート変更を経て、2019 年 1 月に掘削開始、2020 年 8 月に貫通を迎えた。本稿では、新幹線建設において実施した環境保全に向けた取組みの一部を報告する。

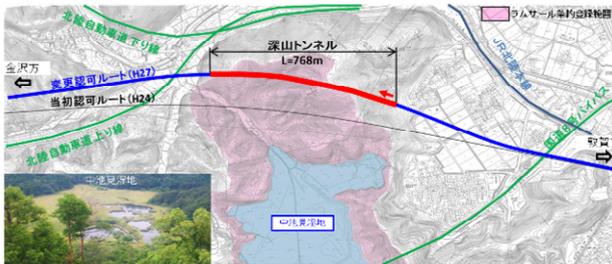


図-1 深山トンネルルート平面図

## 2. トンネルの特徴・計画

本トンネルの特徴として、地質面では過去の活発な断層運動と地殻変動により複数の活断層が存在している点が挙げられる。また、環境面では中池見湿地の多様な水辺環境、多様な動植物相の生育への配慮が挙げられる。トンネルの掘削計画としては、湿地環境の保全措置を講じた上で、小規模な破砕帯が繰り返し出現する複雑な岩相変化に対し、掘削の安全性・経済性を両立させることとした（図-2）。



図-2 トンネル切羽の岩相が複雑に変化する様子

## 3. 環境保全措置

ラムサール条約登録湿地に対する環境保全措置として講じた代表的なものとして以下の 5 項目が挙げられる。

### (1) 新幹線ルートの選定・変更

深山トンネル建設が周辺環境に与える影響を一層低減するルートについて約 2 年に及ぶ検討を行い、平面線形は約 150m 湿地から遠ざける方向（東）へ、縦断線形は最大約 20m 高い位置へ変更し、地下水位の低下をより抑えたルートへ変更した（図-1, 3）。

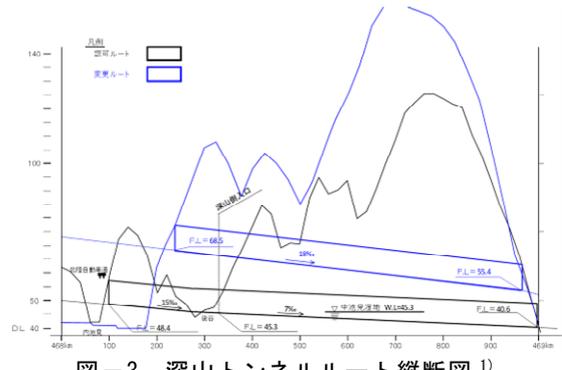


図-3 深山トンネルルート縦断面図<sup>1)</sup>

### (2) モニタリング調査の継続実施

湿地環境への影響を適切に評価するため、掘削前・中・後に至るまでモニタリング調査による管理を行っている。特に水環境については、計測データと既存データの比較分析による日常監視を行っており、調査内容・結果等については毎月公開し、適宜ステークホルダーからの意見等を情報収集した上でフォローアップすることとした（図-4）。また、動植物環境については、猛禽類に加え希少な渡り鳥であるノジコ、湿地の生態系を特徴づける指標生物（魚類・両生類・昆虫類・植物・藻類）等のモニタリング調査を行っている。

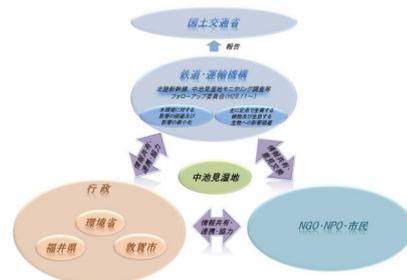


図-4 ステークホルダーとの関係図<sup>1)</sup>

(3) 円形断面型ウォータータイト構造の採用

トンネル建設後、恒久的に地下水をトンネル内に引き込むことのないよう、厚さ 2.0mm の化学接着性防水シートで全周を覆うウォータータイト構造を採用した。なお、本構造を採用することで水圧がトンネルに作用するため、山岳トンネルで一般的な馬蹄形断面ではなく、円形断面を用いることで覆工コンクリート厚を軽減した(図-5)。また、トンネルの吹付けコンクリート面と防水シート外面との隙間を走る地下水の逸走を防止するため、この隙間にグラウトを注入して遮水ゾーンを形成するウォーターバリアも採用した(図-6)。

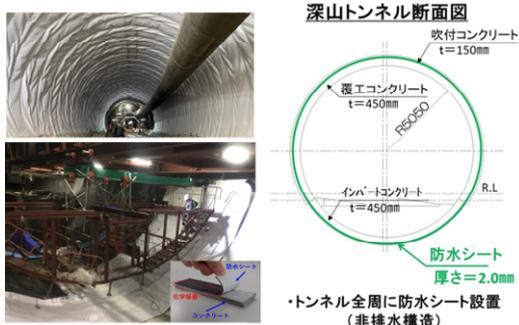


図-5 防水シートと円形断面図<sup>2)</sup>

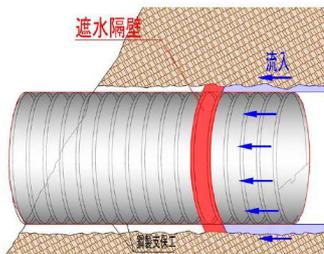
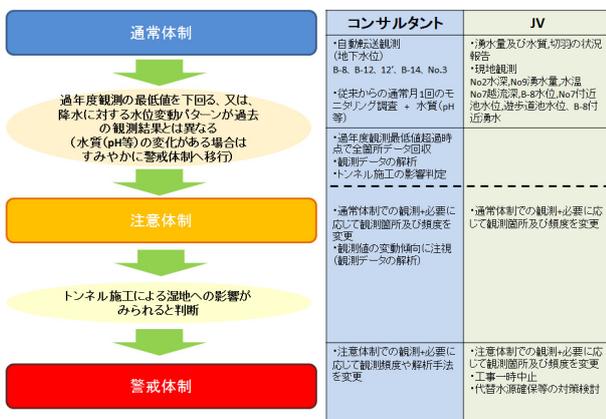


図-6 ウォーターバリア設置イメージ

(4) 先進調査ボーリングの実施

突発湧水対策として、先進調査ボーリングによるコア採取を行い、地山情報、湧水出現の事前把握とともに、湧水帯を確認した場合には坑内への地下水の引き込みを軽減するよう、減水対策の実施を検討することとした。



※各体制において、適宜フォローアップ委員に相談

図-7 影響把握のための判定フロー<sup>1)</sup>

(5) トンネル掘削による影響への対応

モニタリング結果については判定フロー(図-7)に則り、トンネル掘削の影響か否か判断することとし、万一、不測の事態で中池見湿地の水位低下等の影響がみられた場合には、応急的な水位回復措置として、生態系に影響を及ぼす種の混入に留意した上で下流域の自然流水を代替水源とした還流による水位回復措置を計画した。

4. モニタリング結果

トンネル掘削中は坑内へ湧水(0.6~1.0t/min)を導いていたこともあり、掘削前後において深山の地下水位を比較すると概ね全ての観測箇所でも水位が低下する結果となった。しかし箇所毎に水位変化は様ではなかったことから、複雑な断層構造により水の流れが分断されていることが想定される。そのため、深山の地下水位はトンネル掘削に伴い低下している箇所があるものの、湿地水位への直接的な影響は現時点で確認されておらず、還流による水位回復措置は実施していない(図-8)。これは環境影響の定量的な把握を目的として掘削前に実施した三次元浸透流解析において得られていた「深山の地下水位は約5m低下するものの湿地の水位に影響は生じない」との結果と合致している。

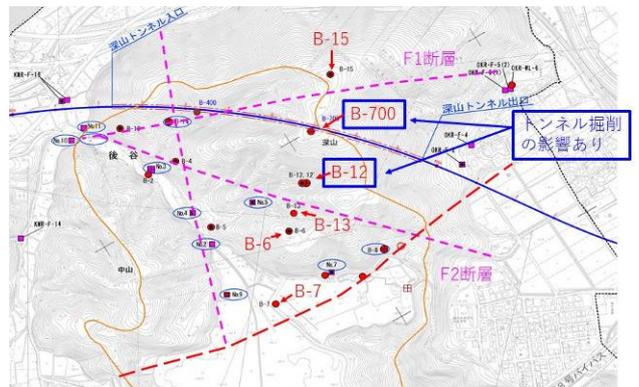


図-8 断層分布及び水文調査箇所<sup>2)</sup>

5. おわりに

開発と保全の両立、そしてバランスを保つため、引き続き掘削後のモニタリング調査とともにステークホルダーとの情報共有・連携・協力を密に行いながら、ラムサール条約登録湿地の環境保全に努めてまいります。

文 献

- 1) (独)鉄道・運輸機構 大阪支社(2018.10): 北陸新幹線、中池見湿地付近深山トンネル等工事に係る環境管理計画。
- 2) 秋葉芳之, 柏木亮ら(2021.4): ラムサール条約登録湿地に配慮したウォータータイトトンネルの施工, トンネルと地下, pp.263-274.

## 48. 画像解析によるダム基礎地盤の地質不均質性評価

The Evaluation of Geological Heterogeneity of Dam Foundation Ground by Image Analysis

○宇田川義夫（清水建設），小高茂治（国土交通省近畿地方整備局足羽川ダム工事事務所），山下哲一（清水建設）  
Yoshio Udagawa, Shigeharu Kodaka, Norikazu Yamashita

### 1. はじめに

ダム基礎地盤では，地質技術者によって入念な地質観察に基づく岩盤等級区分が行われるが，その区分は明確な定量的評価基準がなく，個人差が生じやすい現状にある。

本研究では，トンネル切羽岩盤の地質評価において，宇田川 氏が開発した画像解析による地質不均質性評価技術を足羽川ダム基礎地盤に応用し，ダム基礎地盤の客観的かつ定量的な評価を実施したので報告する。

### 2. 画像解析

#### 2.1 概要

画像解析システムは大きく，①画像処理，②フラクタル次元解析の2段階に分けられる．第1段階「画像処理」では，画素毎に健岩部とその他（亀裂，風化脆弱部）として2値化する．第2段階「フラクタル次元解析」では，2値化した画像をあるグリッドサイズで分割し，グリッド毎のフラクタル次元を算出する．フラクタル次元が大きいほど，そのグリッドは不均質性が大きい地盤として評価される。

#### 2.2 画像処理

ダム基礎地盤画像は，明るさ・コントラスト調整，2階調化などの処理を経て，最終的に2値化画像（白黒画像）として処理される．この画像の2値化により画像から必要とする地質情報（亀裂・風化脆弱部）のみが抽出される（図-1，図-2）．画像はダム基礎掘削面の一部で高さ10mの箇所である。

地質は中生代の花崗岩を主体とし，それに貫入する安山岩脈が分布する．安山岩脈に沿って一部，熱水変質により脆弱化している箇所がある。

#### 2.3 フラクタル次元解析

画像処理後の2値化画像を縦0.5m×横0.5mのグリッドに小分割し，小分割した画像それぞれにボックスカウンティング法によるフラクタル解析を行い，フラクタル次元を求めた。

この小分割の大きさは，岩盤の寸法効果と原位置岩盤せん断試験の供試体寸法から，ダム基礎地盤の地質不均質性と工学的特性値の評価の観点からは，分割セルの大きさは0.5m×0.5m程度が適切であると判断したものである<sup>2)</sup>。

ボックスカウンティング法によるフラクタル次元は次式で表わされる（式-1）。

$$D = -\frac{\Delta \log N(\eta)}{\Delta \log \eta} \quad (\text{式-1})$$

ここで， $D$ はフラクタル次元， $\eta$ はボックスカウンティング法における格子網の幅（単位はピクセル）， $N(\eta)$ は格子網の幅が $\eta$ のときの亀裂が存在する格子の総数である。

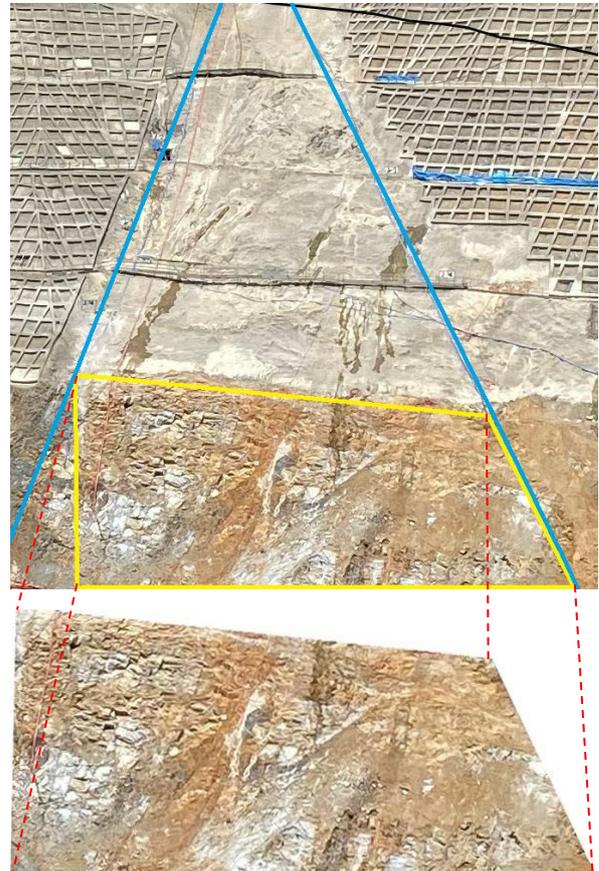
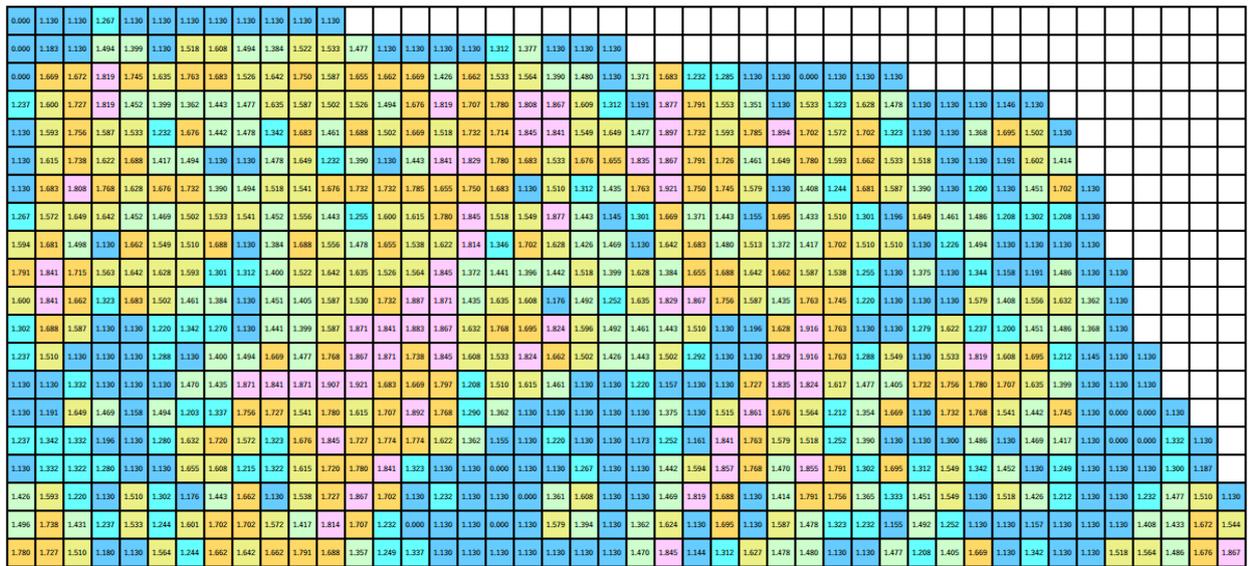


図-1 ダム基礎地盤の画像



図-2 ダム基礎地盤の2値化画像



凡例（フラクタル次元値）

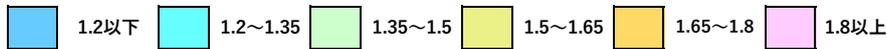


図-3 ダム基礎地盤の地質不均質性

### 3. 地質の不均質性評価

図-3は、図-2のダム基礎地盤の2値化画像を縦0.5m×横0.5mのグリッドに小分割し、小分割した画像それぞれにボックスカウンティング法によるフラクタル解析を行い、フラクタル次元を求め、そのばらつきを地質不均質性として表したものである。

次に、2値化画像の各分割セルのフラクタル次元のばらつき（不均質性指標  $S_f$ ）によって地質の不均質性を評価する。この不均質性指標  $S_f$ は、各分割セルのフラクタル次元の標準偏差として求められる（式-2）。

$$S_f = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (D_i - \bar{D})^2} \quad (\text{式-2})$$

ここで、 $n$ は画像の分割数（ただし、亀裂・風化脆弱部のデータの存在しない分割セルは除く）、 $D_i$ は各分割セルのフラクタル次元、 $\bar{D}$ は分割セルのフラクタル次元の平均値である。

図-4は、縦1m×横1mの領域毎の不均質性指標  $S_f$ の値の分布を表したものである。不均質性指標  $S_f$ の値が大きいほど地質変化が大きく、力学的物性が不連続である（不連続性が大きい）と考えられる。

### 4. 考察とまとめ

本論で提示した、画像解析による地質不均質性評価技術により、ダム基礎岩盤の割れ目分布と岩石の風化の発達程度などのばらつき・不均質な分布を客観的かつ定量的に評価できることが示された。



凡例（地質不均質性指標  $S_f$ ）



図-4 ダム基礎地盤の地質不均質性指標  $S_f$ の分布

今後の課題として、以下の点に取り組んでいきたい。

- ① フラクタル次元値は、画像の解像度に左右されやすい（解像度が高い方が、画素のキメが細かい分布となるため、フラクタル次元値は高くなる）と考えられるので、画像の解像度とフラクタル次元値の相関性について検討したい。
- ② 岩盤の強度、割れ目間隔や割れ目の状態とフラクタル次元値との関連性について精査し、岩盤等級区分を補完する技術として開発を進めたい。

### 参考文献

- 1) 宇田川義夫：地質不均質性の定量的評価手法に関する研究，日本応用地質学会，令和3年度研究発表会講演論文集，pp19-20，2021年10月。
- 2) 宇田川義夫：画像解析によるダム基礎地盤の地質評価に関する基礎的検討，令和4年度全国大会第77回年次学術講演会論文集，2022年9月。

# 49. テキストマイニングと対話システムを用いた

## 施工に関する地質情報の要約技術

Summarizing Technique of Geological Information for Construction, applying Text Mining and Dialogue System

○戸邊 勇人, 升元 一彦, 松川 剛一 (鹿島建設(株))  
Hayato Tobe, Kazuhiko Masumoto, Takekazu Matsukawa

### 1. はじめに

山岳トンネルやダムなどの土木構造物を合理的かつ安全に施工するには、施工予定地周辺の地質とそれに起因する施工上の問題とを関連付け、その情報を迅速に現場に提供することが重要である。しかし、これを実行する地質技術者の人的資源が不足している。

そのため筆者らは、この不足を補うために地質情報を文献から自動的に抽出するシステムのプロトタイプを開発してきた。今回、その開発の継続として、このシステムに対話システムを追加することにより、文献から抽出されたキーワードの間に意味（アノテーション）を付与することを可能にした。この結果、地質・施工の文献から有効な情報を集約するシステムとすることができたため、その成果の概要について報告する。

### 2. システムの概要

施工上の問題が発生したとき、地質技術者は施工地周辺の地質文献や、過去の施工記録などから必要な情報を収集し、それに基づいて対策工の検討を行っている。そして、これらの文献や記録から情報を収集する際には、重要なキーワードの抽出を行っている。このことから、地質技術者の負担を軽減するには、このキーワード抽出の作業を自動化することが適切と考えられる。

文献からキーワードを自動抽出するための手法として、近年 AI 技術のひとつであるテキストマイニングが使われてきている。本システムの開発においても、このテキストマイニング技術を活用し、キーワードから文献を検索できるシステムを構築した。このシステムの構築に用いた技術について以下の 2.1~2.4 に記す。

#### 2.1 単語の抽出（形態素解析）

日本語は英語やハングルのように単語ごとに区切った文章表記をしないため、日本語の文献を解析する場合には文を単語（形態素）に分解する必要がある。形態素解析を行うソフトウェア（解析エンジン）には多種のプログラムが存在しているが、本開発では無償かつ高速な MeCab を使用した。ただし、地質や施工の専門用語は、初期状態では認識できないため、地学辞典<sup>2)</sup>と土木用語辞典<sup>3)</sup>から約 25,000 語を抽出し、MeCab の辞書ファイルに登録した。

### 2.2 単語の出現頻度算出（文のベクトル化）

文献から単語を抽出した後、それらの単語を出現頻度とともに表にまとめた。この表は、単語の種類を次元、出現頻度を要素とするベクトルと等価であるため、この作業工程は「文のベクトル化」と呼ばれている。

表-1 には 3.7km の本坑に複数切羽を採用し高速に施工したトンネルの施工文献<sup>4)</sup>をベクトル化した例を示す（出現頻度上位 10 語を抜粋したもの）。

表-1 文のベクトル化

名詞	出現頻度
掘削	39
本坑	35
トンネル	33
切羽	30
採用	21
避難	21
施工	20
沈下	18
空洞	17
短縮	13

### 2.3 共起ネットワーク解析とキーワード抽出

文献から抽出した単語の重要性は、出現頻度、文中の位置、他の単語との関連性、および出現する文や単語の類似性などを基にして、多変量解析により算出した。この解析は共起解析と呼ばれており、解析結果は共起ネットワークと呼ばれる。表-1 と同じ文献の共起ネットワーク解析例を図-1 に示す。本システムで

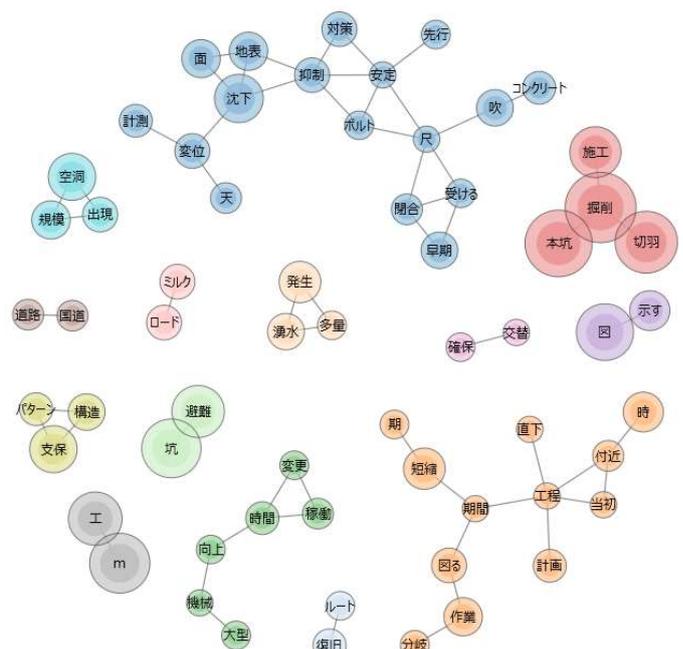


図-1 共起ネットワークの解析例

は、この解析を行うソフトウェアとして、無償かつ高速な解析が可能な KHCorder<sup>5)</sup>を用いた。

## 2.4 データベース化と文献検索

共起解析によって抽出された重要性の高い単語（キーワード）については、文献のタイトルとともにデータベース化した。これにより、再解析を不要とするだけでなく、キーワードを検索キーとして文献の検索（逆引き）をすることができるようになった。また、検索の結果得られた文献から新たに別のキーワードを抽出し、それを検索キーとしてさらに別の文献を検索することができるようになった。

これらのことにより、施工上の問題が発生した場合に関連性の高い多数の文献を即時に引用できるだけでなく、その文献に記述されている内容をキーワードに基づいて短時間で判断できるため、地質・施工情報の集約に必要な時間を削減できるようになった。

## 3. 新語登録とアノテーション付与

文献をデータベース化する際には、抽出されたキーワードを羅列するだけでなく、新語登録とアノテーション付与を行うようにシステムを構築した。

新語登録は、形態素解析エンジンに未登録の専門用語を追加する仕組みである。たとえば図-1 では「避難」「坑」の各単語が関連性の高いものとして抽出されているが、これらは本来「避難坑」として扱うべきであるため、形態素解析の辞書ファイルにフィードバックする。

アノテーション付与は、キーワード間の意味を付与する仕組みである。たとえば図-1 では「空洞」「出現」（および「規模」）のキーワードが塊（クラスタ）で抽出されている。空洞は切羽において確認されるものであるため、これらのキーワードの関係性（アノテーション）は「切羽に」とする（図-2）。これにより、データベースは「切羽に空洞が出現した文献」といった、より高度な検索が可能になる。

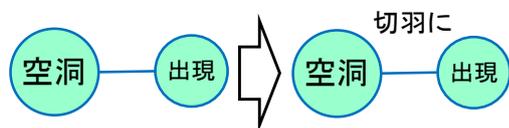


図-2 キーワード間のアノテーション付与

## 4. 対話システムの導入による運用の効率化

アノテーションの付与をすべて手動で行うと数分／回の時間を要する。アノテーションの自動付与技術は様々に研究されているものの、その多くは社外のネットワークへの接続を必要としている。施工の情報には秘密保持を要するものが多く含まれているため、社外ネットワークへの接続は情報漏洩のリスクにつながる。

そのため、本システムは対話システムを用い、キーワード間のアノテーションを PC と地質技術者のチャットにより付与する仕様として、外部への情報漏洩のリスクを低減した（図-3）。

これにより、アノテーションあたりの付与時間は約 10 秒／回に短縮された。また、この対話システムでは前述の新語登録の機能も兼ねることにより、その登録時間も数分から 10 秒以下に短縮することができた（図-4）。

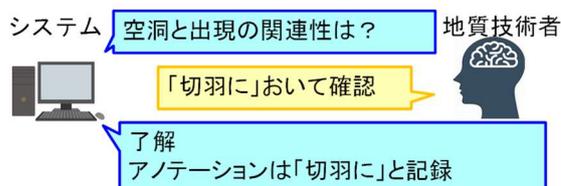


図-3 対話システムによるアノテーション付与の模式図

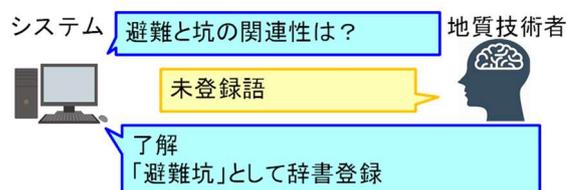


図-4 対話システムによる新語登録の模式図

## 5. おわりに

今回の研究では、施工に関する地質情報の自動集約システムの一部として、対話システムによるアノテーションの付与機能と新語登録機能の開発を行った。これにより、地質文献からのキーワード抽出の性能を、以前より容易に向上させることができるようになった。今後は、本システムの性能向上を進めることにより、より実用性の高い地質・施工情報の要約システムの構築を進めていく予定である。

## 文献

- 1) 戸邊勇人・金子弘幸・松川剛一・升元一彦(2021) : テキストマイニングを応用した地質文献の定量解析と施工への応用, 令和 3 年度応用地質学会研究発表会講演論文集.
- 2) 地学団体研究会(1996): 新版地学事典, 平凡社, 1443p
- 3) 土木用語辞典編集委員会(2000): 土木用語辞典, コロナ社, 1421p.
- 4) 廣瀬学・米田新・秋保琢(2020) : 3.7km の本坑に複数切羽を採用し避難坑とともに 20 か月で掘削一国道 57 号二重峠トンネル, トンネルと地下, 第 51 巻, 5 月号, pp.23-34.
- 5) 樋口耕一(2020) : 社会調査のための計量テキスト分析 第 2 版, 251p.

# 50. 土工事における地質体毎の地質リスク事象

Geological risk events organized for each geological bodies on earthwork

○大岩和暉, 中島亮, 片山政弘 (熊谷組)

Kazuki Oiwa, Ryo Nakajima, Masahiro Katayama

## 1. はじめに

建設工事では、その地域の地質に関わる問題が発生し、工期の延長や事業費の増大をもたらす場合がある。よって建設工事において発生または発生が懸念される望ましくない事象（地質リスク事象）を評価することは、安全で効率的な施工の実現に資すると考えられる。

地質リスク事象を評価した事例として、山岳トンネル工事における、宇田川<sup>1</sup>、中島<sup>2</sup>などが挙げられる。

今回、筆者らの所属組織が 1998 年から現在までに施工した、土工事における地質リスク事象を整理し、傾向の分析と考察を行った。

## 2. 事例分析

計 87 現場、131 件の地質リスク事象を地質体毎に集計した（表-1）。地質リスク事象は、施工者からみて土工事の際に遭遇しやすいと考えられる 9 項目を選定した。

さらに本研究では、事業に対する各地質リスク事象の影響の大きさを、便宜的に 3 段階（事業費・工期に多大な影響を及ぼした：3 点、事業費・工期に影響を及ぼした：2 点、事業費・工期にほとんど影響を及ぼさなかった：1 点）で点数付けを行った（表-1）。

## 3. 分析結果

表-1 によると、地質リスク事象の中では、「ゆるみ岩盤、斜面の変状」の対応件数が最も多く（40 件）、「地すべり（発生対策）」が 2 番目に多い（34 件）。上記の 2 事象は、全対応件数の半数以上であった（74 件/131 件）。上記 2 事象に次いで、「支持力不足、せん断抵抗不足」（16 件）、「透水性（湧水、漏水）」（11 件）の対応件数が多い結果が得られた。

また、地質体毎の地質リスク事象の対応件数の割合をみると（図-1）、どの地質体でも、「ゆるみ岩盤、斜面の変状」および「地すべり（発生対策）」の対応件数の割合が高く、2 事象の合計は各地質体における地質リスク事象の半分以上の割合を占める。深成岩・変成

岩は他の地質体と比較すると、それぞれ「難掘削」・「支持力不足、せん断抵抗不足」の割合が特徴的に高い結果が得られた。

次に各地質リスク事象の 1 件あたりの点数を、土工事に対する影響度（点数/件数）とし、各地質リスク事象の対応件数の割合とともに示す（図-2）。

その結果、正常堆積物では「ゆるみ岩盤、斜面の変状」、「地すべり（発生対策）」、「難掘削」の影響度が平均値よりも高い。付加体堆積物では「地すべり（発生対策）」、「透水性（湧水、漏水）」、「難掘削」、「盛土・材料」の影響度が平均値よりも高い。火山岩では「地すべり（発生対策）」、「難掘削」の影響度が平均値よりも高い。深成岩では「難掘削」の影響度が平均値よりも高い。変成岩では「支持力不足、せん断抵抗不足」、「地すべり（発生対策）」の影響度が平均値よりも高い結果が得られた。

## 4. 考察

### 4.1 各地質リスク事象の対応件数について

全般に全ての地質体において、「ゆるみ岩盤、斜面の変状」・「地すべり（発生対策）」の対応件数とその割合が高い傾向がみられた（表-1、図-1）。斜面の安定性に関わるこれら 2 つの地質リスク事象は、掘削や盛り立てなど、地山からの土砂の除去・定置を伴う土工事の特性上、常に発生しうる事象であるため、他の地質リスク事象と比較して対応件数やその割合が高くなったものとする。また、斜面に関わるこれら 2 つの地質リスク事象は、今回選定した 9 つの地質リスク事象のなかでも、施工中や供用後の構造物の安全性に関わる事象であり、施工者によって認識されやすい地質リスク事象であることも、対応件数やその割合に影響しているものとする。

### 4.2 土工事にて問題となりやすい地質リスク事象

図-2 によると、正常堆積物・付加体堆積物・火山岩では、各地質体において「地すべり（発生対策）」の

表-1 各地質体における地質リスク事象の対応件数・点数

地質体 (現場数)	支持力不足、 せん断抵抗不足		基礎地盤変形に よる構造物の変状		ゆるみ岩盤 斜面の変状		地すべり(発生 対策)		透水性 (湧水、漏水)		スレーキング・膨張に よる変状、劣化		難掘削		盛土・材料		重金属 土壌汚染	
	件数	点数	件数	点数	件数	点数	件数	点数	件数	点数	件数	点数	件数	点数	件数	点数	件数	点数
正常堆積物(32)	5	10	2	3	16	38	9	24	4	7	2	4	3	7	3	5	0	0
付加体堆積物(21)	2	4	3	6	11	26	10	29	1	3	2	4	2	6	2	6	2	4
火山岩(25)	5	11	3	6	9	19	12	30	6	11	0	0	2	6	2	4	0	0
深成岩(5)	1	2	0	0	2	4	1	2	0	0	0	0	2	6	0	0	0	0
変成岩(4)	3	8	0	0	2	4	2	6	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
計	16	35	8	15	40	91	34	91	11	21	4	8	9	25	7	15	2	4

影響度および対応件数の割合が高い傾向がみられる。「ゆるみ岩盤，斜面の変状」の影響度は平均値をやや下回る場合があるものの，対応件数の割合は高水準にある傾向がみられる。よって，上記3つの地質体における土工事では，「地すべり（発生対策）」、「ゆるみ岩盤，斜面の変状」が問題となりやすい地質リスク事象であると考えられる。

同様に，深成岩では「難掘削」，変成岩では「支持力不足，せん断抵抗不足」の影響度・対応件数の割合が高い傾向がみられるため，土工事にて問題となりやすいと考える。なお上記2つの地質体は，対応件数の総数が他の地質体と比べて少ないため，全体的に対応件数の割合がやや高くなっていることに留意する必要がある。

### 4.3 地質リスク事象と各地質体の関係

最後に土工事において問題となりやすい地質リスク事象と各地質体との関係について考察する。

正常堆積物・付加体堆積物・火山岩において問題となりやすい「ゆるみ岩盤，斜面の変状」，「地すべり（発生対策）」は，流れ盤構造を呈する層理面・片理面など各地質体の初生的な構造や，断層破砕帯・強風化部などの弱部が，素因となっている傾向がみられた。

深成岩において問題となりやすい「難掘削」には，調査段階の物理探査や局所的なボーリング調査では想定できなかった硬質な風化残留核の分布により，機械掘削が困難となった事例などがみられた。

変成岩において問題となりやすい「支持力不足，せん断抵抗不足」は，脆弱化した蛇紋岩の支持力について，慎重な検討が必要となった事例がみられた。

このように土工事にて問題となりやすい地質リスク事象には，各地質体の地質構造や，断層活動・風化による岩盤の劣化に関わる事例が多くみられた。

### 5. まとめ

- ・土工事では，斜面に関わる地質リスク事象の対応件数が多い傾向がみられ，土工事の特長や施工者による認識のされやすさが影響しているものと考えられる。
- ・正常堆積物，付加体堆積物，火山岩における土工事では，「ゆるみ岩盤，斜面の変状」，「地すべり（発生対策）」が問題となりやすいと考えられる。
- ・深成岩，変成岩における土工事では，それぞれ「難掘削」，「支持力不足，せん断抵抗不足」が問題となりやすいと考える。
- ・地質リスク事象の点数や影響度の評価については課題があり，今後他の手法を検討する必要がある。
- ・深成岩・変成岩の対応件数が少ないため，更なるデータの蓄積が必要である。

### 文献

- 1) 宇田川 (2016) : 文献調査に基づく山岳トンネルにおける地質リスク事象の要因と対策工に関する分析，応用地質，第56巻，第6号，pp.350-355

- 2) 中島，片山 (2020) : 山岳トンネル工事における地質体毎の地質リスク事象，日本応用地質学会令和2年度研究発表会講演論文集，pp.63-64

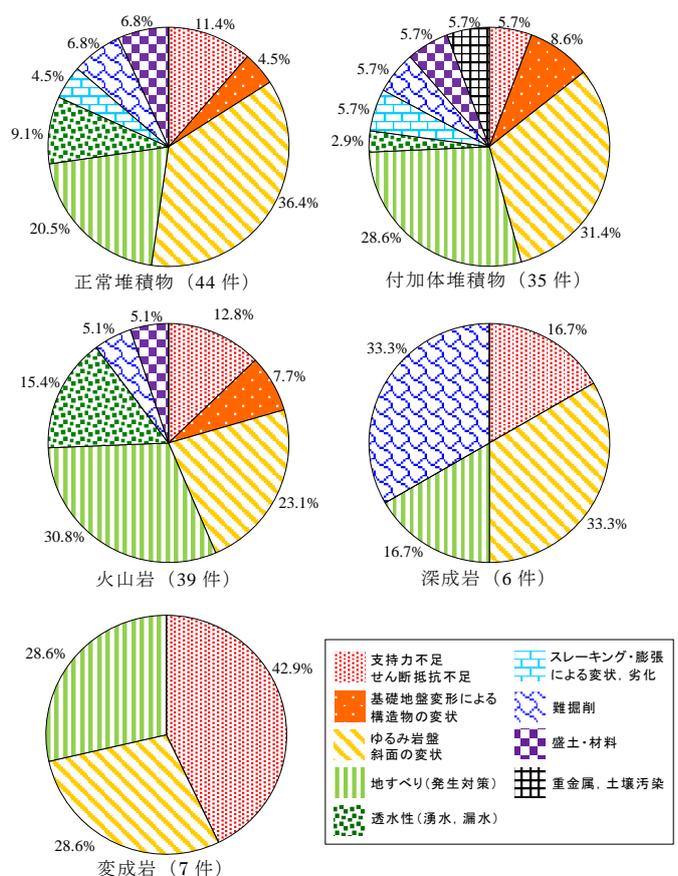


図-1 地質リスク事象の対応件数の割合

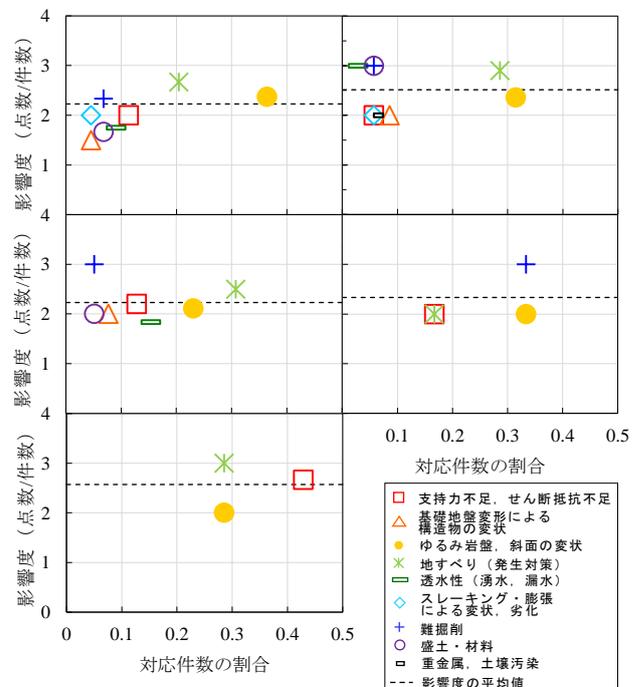


図-2 地質リスク事象の影響度および対応件数の割合

# 51. フィルダムにおける3次元地質・土質モデルを活用した

## BIM/CIMの実施

Application of BIM/CIM 3D geological modeling to Fill dam Construction

○中島亮, 中須賀大樹, 石濱茂崇, 天下井哲生 (熊谷組)

Ryo Nakajima, Daiki Nakasuga, Shigetaka Ishihama, Tetsuo Amagai

### 1. はじめに

熊本県阿蘇郡西原村に位置する大切畑ダムは、古くは江戸時代に農業用ため池として整備され、昭和45～48年の嵩上げ改良工事を経て現在の姿となった。しかし平成28年4月に発生した熊本地震により被災し、ダム堤体の亀裂、洪水吐側壁の傾倒、ダム護岸の損傷、取水設備操作室の傾倒、仮排水トンネルの損傷等の被害が発生した。現在、復旧工事として新堤体の建設が進められている。

本稿では新堤体の盛立に用いる地盤材料の効率的な掘削・採取を目的として地質・土質モデルを活用し、また施工実績を更新したCIMモデルの作成を行ったので報告する。

### 2. 工事概要

熊本地震後、現地調査やトレンチ調査、ダム湖内の音波探査、基準点観測等を行った結果、布田川断層から派生した北向山断層が当ダムを横断していることが判明した。そこで本工事は断層の影響のない上流側に約240m移動したところに新堤体(堤高29.0m, 堤丁長237.7m, 堤体積460,000m<sup>3</sup>)を築堤する工事である(図-1)。

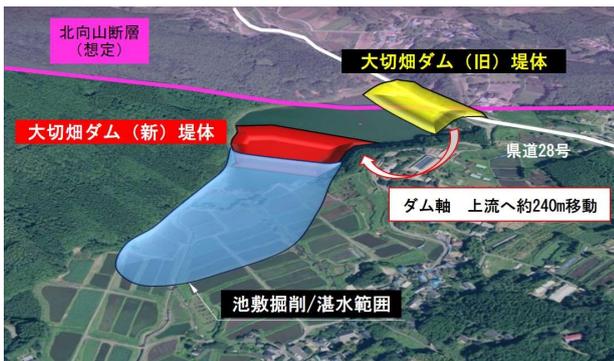


図-1 大切畑ダム復旧概要

ダム周辺に分布する地質は、第四紀の阿蘇外輪山を構成する先阿蘇火山岩類とその上位の阿蘇-2火砕流堆積物、大峰火山岩類、阿蘇-4火砕流堆積物である。また阿蘇外輪山の山麓やダム上流の低地には崖錐堆積物が広く分布する。掘削の対象となる地質は10種類あり、大峰火山岩類及び阿蘇凝灰角礫岩類とその上位の土石流堆積物、ローム、湖成堆積物などである。

本工事では堤体や池敷の掘削発生土をその物

性に応じて盛立材料(遮水材及び半透水材)もしくは捨土とする計画であるが、掘削発生土は土質区分上同様な性質(礫を含む粘性土～砂質土)を持つ地質が多く、また軽石を含む点で共通する地質が複数あるため、掘削時に異なる地質の混入やそれによる材料のロス(捨土の増加)が発生する恐れがある。またそれを避けるために地質の確認・材料選別に時間をかけると工程が遅延する可能性がある。そこで地質・土質モデル(BIM/CIM)を活用した効率的な施工を目指した。

### 3. 地質・土質モデルの作成

施工開始前までに行われた地質・土質調査の成果を基に、以下の手順で地質・土質モデルの作成を行った。モデル作成には3次元地質解析ソフトウェアの「MakeJiban」(五大開発社製)を用いた。

まず、工事着工前の地形データを取り込んだのち、ボーリング調査結果と設計図面である地質断面図を3次元空間に配置した。ボーリング及び断面図上の地質境界にコントロールポイントを配置して3次元地質境界面を作成し(図-2)、さらに地質境界面に囲まれた空間に地質ソリッドモデルを作成した。以上のモデルを調査段階の初期モデルとした。

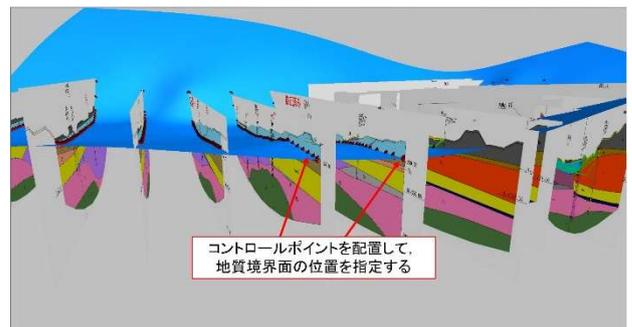


図-2 地質境界面の作成

### 4. 地質・土質モデルの活用と更新

次の段階では、初期モデルを利用して施工に必要なモデルの作成を行った。

まず地質ソリッドモデルを設計掘削形状により掘削範囲内と範囲外に分割した。掘削範囲内の地質ソリッドモデルを非表示にすることで、掘削面の予想地質分布が確認できる(図-3)。また、掘削範囲内の地質ソリッドモデルからボク

セルモデルを作成し、地質別に掘削土量を算出した(図-4)。ボクセルとは、volume(体積)とpixel(画素)を合わせた言葉であり、立方体表現の最小単位である。また、必要な任意断面を設定し、地質断面図の表示・出力を行った。

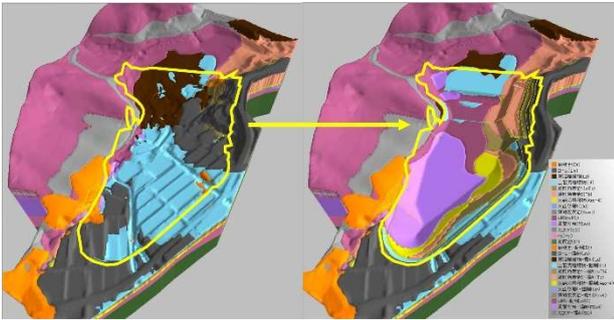


図-3 掘削面地質分布の確認

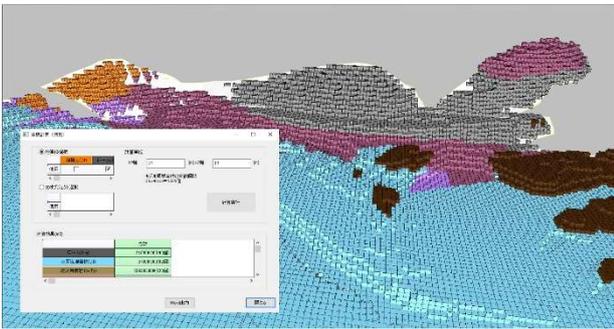


図-4 ボクセルモデルの作成と土量計算

さらに地質境界面を活用したマシンガイダンスによる掘削を行った。これは掘削時に分別が必要となる地質境界面と設計掘削形状を合成したデータを掘削機械に導入することで、法面整形を行いながら材料採取を行うことを可能にしたものである(図-5)。データが実際の地質境界の位置と異なった場合には、随時実績を測量しモデルを修正・更新することで精度向上を図った。

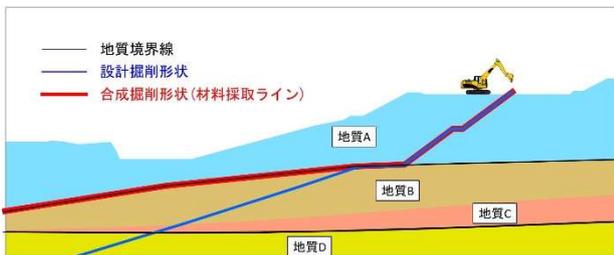


図-5 地質境界面を利用したマシンガイダンス概要図(地質A掘削時)

地質・土質に関するその他の施工実績についてもモデルを作成した。図-6に、掘削法面及び基礎地盤の地質分布図(スケッチ)とUAV測量によるオルソ画像をテクスチャとして掘削形状にマッピングした結果を示す。

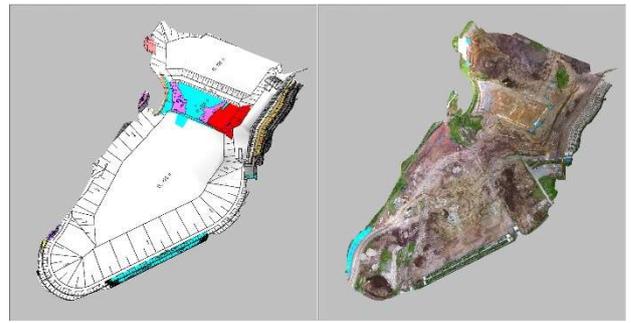


図-6 地質分布図(左)(作成途中)とオルソ画像(右)

## 5. 地質・土質モデル活用の効果

施工段階における地質・土質モデル活用の効果として、掘削面地質分布の確認や任意断面での地質図の作成、ならびに地質分布図(スケッチ)及びオルソ画像のテクスチャマッピングなどの施工実績モデルの作成を通じて、より詳細な施工計画の立案が可能となった。

また新たな試みとして地質境界面データによるマシンガイダンスを実施した。地質境界面は調査結果を基にした想定位置だが、境界面付近で慎重な掘削を行い材料の混入を防げ、また地質変化に伴う材料採取の段取り替えの準備を事前に行うことができた。

## 6. まとめと今後の展望

今回、地質・土質モデルを活用することでより効率かつ高品質な施工を行うことができた。また施工実績を更新することで維持管理段階においても有用なモデルを作成することができた。

今後地質・土質モデルの利用頻度はさらに増えると予想されるため、モデルの精度向上と利用範囲の拡大が望まれ、解決法としてボーリング調査に加え、3次元物理探査が有効であると考えられる。ボーリング間を補間する3次元データがあることで、地質モデルの精度向上に寄与する。また物理探査の解析ソフトウェアと地質・土質モデルのソフトウェアを連携させることで、物性モデルの作成とそれを参考とした高精度な地質境界面作成や地質解析が可能となるものと思われる。

## 文献

- 1) 国土交通省(2022):BIM/CIM 活用ガイドライン(案)第1編 共通編
- 2) 国土交通省:BIM/CIM ポータルサイト  
<http://www.nilim.go.jp/lab/qbg/bimcim/bimcimsummary.html>
- 3) 3次元地質解析技術コンソーシアム(2021):3次元地質解析マニュアル Ver3.0.

## 52. FEM 解析による岩盤亀裂進展のモデル化方法の検討

Simulation of Modeling Method of Rock Crack Progress by FEM

○日外勝仁, 坂本尚弘, 倉橋稔幸 (土木研究所寒地土木研究所)

Katsuhito Agui, Naohiro Sakamoto, Toshiyuki Kurahashi

### 1. はじめに

UAV 撮影写真から SfM (Structure from Motion) 解析により三次元地形モデル上に, UAV (Unmanned aerial vehicle: 無人航空機) 観察及び露頭調査に基づいた亀裂の走向・傾斜を表現することで, 面構造の立体的な把握を行い, 不連続面交差状況に基づいた三次元の崩壊形態モデルを想定した. 筆者は, 塑性ひずみ量に応じた岩盤物性の強度低減を反映した数値解析を繰り返すことにより, ゆるみ等による岩盤の劣化進行過程を再現する「FEM ステップ解析法」を考案してきた<sup>1) 2)</sup>.

そこで, 本稿では, 想定した崩壊形態モデルに基づき, 岩体を縁切る不連続面を厚みのあるメッシュで弱層部としてモデル化することで, 従来の岩盤自体ではなく, 不連続面を模した弱層部の強度低減を図った. そうすることで, 亀裂の開口幅の拡大や伸展といった不連続面の劣化進行状況を, 弱層部の強度低下や強度低下範囲の拡大として数値解析的に再現し, 岩盤亀裂の応力的な劣化が将来的な到達状況の推定を試みた.

### 2. 解析方法

FEM 解析のモデル作成においては, UAV-SfM 解析により写真から作成した三次元地形モデルに対して, 亀裂面を平面として合成し, 流れ盤や受け盤といった斜面との交差状況で色分け表示を行った (図-1).

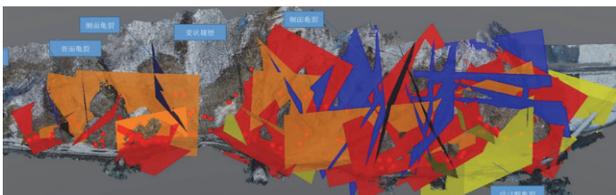


図-1 亀裂面三次元分布状況

【亀裂面区分】赤色:流れ盤亀裂, 黄色:受け盤亀裂, 橙色:背面亀裂, 紺色・青色:側面亀裂, 赤点:落石発生箇所

これまでに確認されている崩壊形態を踏まえ, 崩壊が発生し易いと考えられる複数の亀裂面によって地山から分断された状態のブロックの内, ブロックの重心を支える面構造が流れ盤で, より不安定と思われる比較的大きなブロックを検討対象として選定した. また, 一般的にはジョイントとしてモデル化される不連続面に対し, 約 2m の厚みを持った弱層部としてモデル化した. 拘束条件を示した解析モデルを図-2 に示す.

解析メッシュのサイズとして 5m を基本として, 4 面体によるメッシュ作成を行った. また, 拘束条件として, 底面を三方向拘束とし, 周辺を x・y 軸の二方向拘束とした. 赤色のメッシュ部分が, 弱層に囲まれた不安定岩体に相当する.

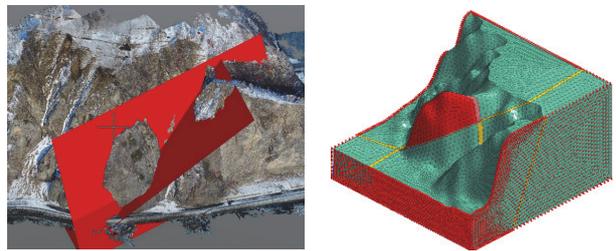


図-2 解析対象箇所と亀裂面の交差状況

FEM ステップ解析方法における応力劣化サイクルでは, 自重解析の塑性ひずみの値を用いて, 微小破壊の程度判定を行っている. 塑性ひずみ値に対して岩盤等級を割り振り, 要素メッシュ毎に物性値を変化させた後, 再度自重解析を行う. このような物性値変更と自重解析を繰り返すことにより, 塑性ひずみの発生範囲の進展を再現し, 自重による劣化影響が収束するまでの過程を把握するものである (図-3).

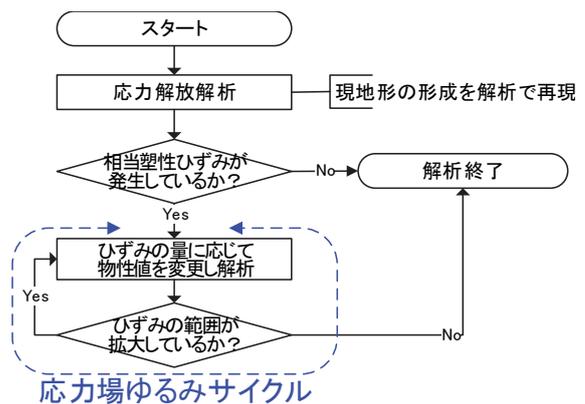


図-3 応力劣化サイクルフロー<sup>1)</sup>

塑性ひずみ量に対応させる岩盤等級ごとの解析物性値を表-1 に示す. モデル全体の岩盤要素を CH 級岩盤, 亀裂の弱層要素を CM 級岩盤として, FEM ステップ解析をスタートさせ, 自重解析終了後の崩壊ブロック底面部のメッシュ要素毎に塑性ひずみ値に対応した物性値に低減変更して再度自重解析を行うというサイ

クルを繰り返すことで、塑性ひずみ量が 1.00% 以上となり破壊と見なされるメッシュ要素が、亀裂を模した弱層部のどの程度まで拡大するのかを再現した。

表-1 岩盤等級別の塑性ひずみ量と解析物性値

岩盤等級	塑性ひずみ量	物性値 (静的変形特性)					静止土圧係数 $K_0$
		ポアソン比 $\nu_s$	ヤング率 $E_s$ (kN/m <sup>2</sup> )	単位体積重量 $\gamma$ (kN/m <sup>3</sup> )	粘着力 $c$ (kN/m <sup>2</sup> )	内部摩擦角 $\phi$ (°)	
CH級岩盤	—	0.30	500,000	25	250	40	0.357212
CM級岩盤	0.05%未満	0.30	50,000	25	150	35	0.426424
CL級岩盤	0.05%以上 ~0.10%未満	0.30	25,000	20	75	30	0.500000
D級岩盤	0.10%以上 ~0.50%未満	0.30	12,500	20	38	25	0.577382
未固結S1	0.50%以上 ~1.00%未満	0.35	6,250	16	20	25	0.577382
破壊部	1.00%以上	0.35	3,125	16	10	20	0.657980

### 3. 解析結果

亀裂に囲まれた岩体の崩壊を規制すると思われる岩体底面の弱層部の塑性ひずみ分布を、上位の不安定岩体を透過させた全体図の STEP 抜粋を図-4に、弱層部の要素数の変化を表-2に示す。

弱層部は、当初 CM 級岩盤としたが、有効塑性ひずみの値によって、逐次物性値を変化させることで、劣化の進行を簡易的に再現し、最も脆弱な等級である破壊部のメッシュ数が 10Step 変わらない Step27 を収束と見なした。

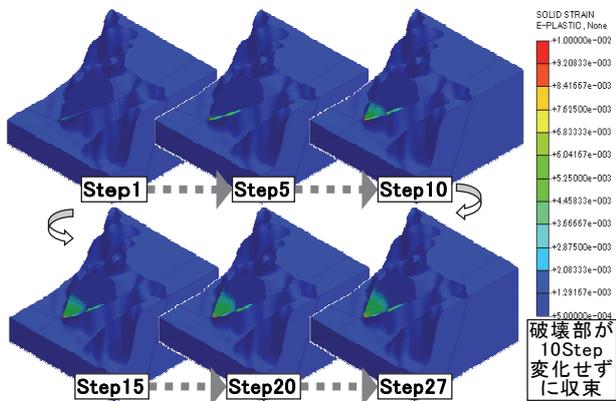


図-4 岩体底面弱層部の塑性ひずみ分布(Step 抜粋)

表-2 物性値変更履歴

	CM級		CL級		CL級以下		D級		D級以下		未固結S1		未固結S1以下		破壊部	
	未変化数	未変化率	数	増加率	数	増加率	数	増加率	数	増加率	数	増加率	数	増加率	全体比率	
Step0	1256	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
Step1	1118	89.0%	60	138	—	—	78	78	—	—	0	0	—	—	—	—
Step2	1062	84.6%	45	194	40.6%	99	149	91.0%	49	50	—	—	—	—	—	0.1%
Step3	1025	81.6%	36	231	19.1%	115	195	30.9%	79	80	60.0%	1	—	—	—	0.1%
Step4	1015	80.8%	26	241	4.3%	118	215	10.3%	96	97	21.3%	1	—	—	—	0.1%
Step5	974	77.5%	39	282	17.0%	129	243	13.0%	112	114	17.5%	2	—	—	—	0.2%
Step6	935	74.4%	38	321	13.8%	159	283	16.5%	121	124	8.8%	3	—	—	—	0.2%
Step7	905	72.1%	31	351	9.3%	186	320	13.1%	130	134	8.1%	4	—	—	—	0.3%
Step8	872	69.4%	39	384	9.4%	201	345	7.8%	138	144	7.5%	6	—	—	—	0.5%
Step9	844	67.2%	37	412	7.3%	229	375	8.7%	148	155	7.6%	7	—	—	—	0.6%
Step10	822	65.4%	33	434	5.3%	242	401	6.9%	151	159	2.6%	8	—	—	—	0.6%
Step11	806	64.2%	26	450	3.7%	259	424	5.7%	155	165	3.8%	10	—	—	—	0.8%
Step12	788	62.7%	34	468	4.0%	262	434	2.4%	162	172	4.2%	10	—	—	—	0.8%
Step13	772	61.5%	38	484	3.4%	266	446	2.8%	169	180	4.7%	11	—	—	—	0.9%
Step14	765	60.9%	31	491	1.4%	270	460	3.1%	179	190	5.6%	11	—	—	—	0.9%
Step15	749	59.6%	33	507	3.3%	279	474	3.0%	184	195	2.6%	11	—	—	—	0.9%
Step16	730	58.1%	42	526	3.7%	282	484	2.1%	191	202	3.6%	11	—	—	—	0.9%
Step17	724	57.6%	37	532	1.1%	291	495	2.3%	193	204	1.0%	11	—	—	—	0.9%
Step18	717	57.1%	34	539	1.3%	298	505	2.0%	195	207	1.5%	12	9.1%	1.0%	—	1.0%
Step19	708	56.4%	30	548	1.7%	308	518	2.6%	198	210	1.4%	12	0.0%	1.0%	10	1.0%
Step20	696	55.4%	37	560	2.2%	310	523	1.0%	201	213	1.4%	12	0.0%	1.0%	10	1.0%
Step21	687	54.7%	40	569	1.6%	303	529	1.1%	214	226	6.1%	12	0.0%	1.0%	10	1.0%
Step22	684	54.5%	36	572	0.5%	310	536	1.3%	214	226	0.0%	12	0.0%	1.0%	10	1.0%
Step23	682	54.3%	32	574	0.3%	315	542	1.1%	215	227	0.4%	12	0.0%	1.0%	10	1.0%
Step24	677	53.9%	31	579	0.9%	320	548	1.1%	216	228	0.4%	12	0.0%	1.0%	10	1.0%
Step25	671	53.4%	32	585	1.0%	323	553	0.9%	218	230	0.9%	12	0.0%	1.0%	10	1.0%
Step26	668	53.2%	32	588	0.5%	323	556	0.5%	221	233	1.3%	12	0.0%	1.0%	10	1.0%
Step27	664	52.9%	30	592	0.7%	327	562	1.1%	223	235	0.9%	12	0.0%	1.0%	10	1.0%

弱層部では、斜面下部の応力作用が顕著な部位において、有効塑性ひずみが増加しており、応力劣化が下端から上方に進行し、脆弱化した領域が拡大する様子が再現されている。しかし、劣化が岩体底面部全体にまで広がるといった極端な不安定化の進行は見られなかった。

次に、要素数の変化から崩壊の可能性を考察すると、破壊部のメッシュ数は、要素全体の 1% 程度(12/1256)と非常に少なく、強度低下の発生箇所が全体の 50% をやや下回る(592/1256)ことから、弱層部の応力的な劣化だけでは崩壊に至る可能性は低いと判断した。ただし、応力・ひずみが特に集中し、岩盤等級が破壊部相当となった弱層部の末端部について、局部的な崩落や落石の発生に十分注意する必要がある。

また、今回の事例では、塑性ひずみ分布は、岩盤斜面表層部でほとんど確認できず、弱層部の表層で線状にわずかに認められる程度であった(図-5)。しかし、UAV や目視による点検では、不連続面の劣化進行状況は表層部から推し量るほかなく、数値解析によって劣化する可能性を示された範囲で実際に変状が確認された場合には、その位置や劣化程度を解析ステップと対照し、不連続面の劣化進行段階を推定することになる。

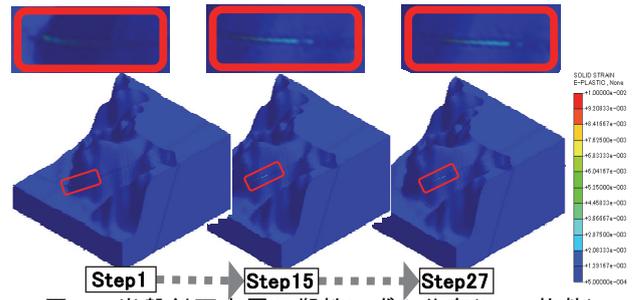


図-5 岩盤斜面表層の塑性ひずみ分布(Step 抜粋)

### 4. おわりに

SfM 技術により UAV 撮影写真から構築した亀裂面分布を含む三次元地形モデルを基に、提案する FEM ステップ解析法を用いて、想定崩壊岩体と地山との境界面の劣化進行状況を推定することで、亀裂面に囲まれた岩体が応力的な経年劣化により将来的に崩壊する可能性があるのかを判定できる可能性を示した。また、亀裂面の劣化が表層に到達する部位では、大きな崩壊に至らずとも落石や小崩壊の発生が懸念されるため、重点的な点検箇所抽出にも役立つと考えられる。

### 文献

- 1) 土木研究所地質チーム(2016): ゆるみ岩盤の安定性評価法の開発, 土木研究所平成 27 年度重点研究報告書, 23p (2022.8.1 参照, <https://www.pwri.go.jp/jpn/results/report/report-project/2015/pdf/ju-4.pdf>).
- 2) 日外勝仁・江口貴弘・佐々木靖人・倉橋稔幸(2017): 塑性ひずみ量に留意した岩盤斜面安定解析手法の検討, 一般社団法人岩の力学連合会, 第 14 回岩の力学国内シンポジウム講演集, 講演番号 009.

# 53. 標準貫入試験の N 値とコーン貫入試験 qc 値の関係

Relationship between N-value of Standard Penetration Test and qc-value of Cone Penetration Test

○向井 和行, 佐高 裕之 (株式会社 レアックス)

Kazuyuki Mukai, Hiroyuki Sataka

## 1. はじめに

我が国において多くの地質調査法の基準となっている「地盤調査の方法と解説(地盤工学会 2013)」<sup>1)</sup>には、標準貫入試験(SPT)による N 値と多くの試験値との相関式が示されている。しかしコーン貫入試験(CPT)による qc 値と N 値の関係は示されていない。一方、N 値と qc 値の関係は、古くは Meyerhof(マイヤホフ)の経験式  $qc=4N/(t/ft^2)$  に始まり、以降、土の種類を考慮するなどの考察が加えられ検討されてきた。

本稿では、N 値や qc 値に加えて土質試験データを数多く得られる機会に恵まれたので、その結果を既往の研究と比較して紹介する。

## 2. 試験方法

SPT は質量 63.5kg のハンマーを 76cm の高さから自由落下させることにより SPT サンプラーと呼ばれる先端部を地中に貫入させる試験であり、N 値は 30cm 打ち込むのに必要な打撃回数である。試験は日本工業規格の JIS A 1219 に従った。

CPT はコーン型の貫入体を地中にゆっくりと貫入させる試験であり、その際の貫入抵抗が qc 値である。試験は「オランダ式二重管コーン貫入試験」と呼ばれていた方法で、日本工業規格の JIS A 1220 に従った。

SPT と CPT の大きな違いは、SPT は瞬間的な衝撃を与える動的な試験、CPT は一定の力を与える静的な試験であることである。

## 3. 調査概要

本調査は、北海道の石狩低地帯で行われた地質調査である。SPT と CPT が 3 地点で近接して行われ、深度 26m もしくは 28m 程度まで両者の結果を比較することができる。また SPT の頻度はサンプリング区間を除き 1 回/1m であり、試験で得られる土質資料すべてで物理試験を行った。

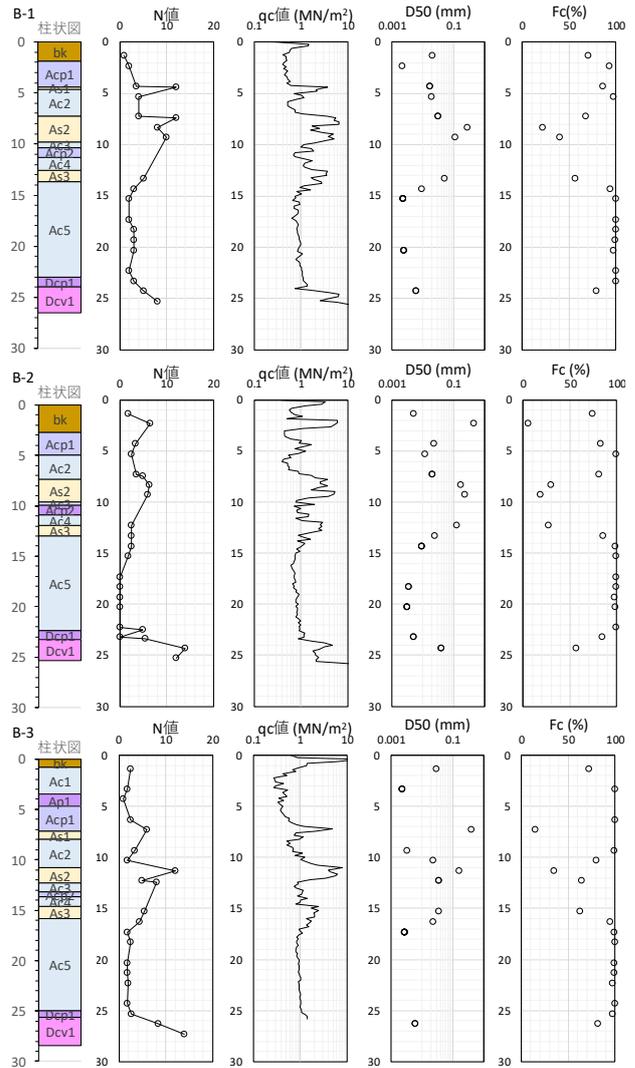
## 4. 試験結果

図-1 に SPT と CPT の結果を示す。あわせて粒度試験結果による平均粒径 D50 と細粒分含有率 Fc を併記した。N 値と qc 値ともに完新世の砂質土に比べて完新世の粘性土のほうが小さい傾向がある。

図-2 は N 値と qc 値の関係を細粒分含有率 Fc、平均粒径 D50 で分類して示したものである。N 値と qc 値は、その分類ごとに関係性が異なり、細粒土ほど qc/N が小さい傾向がみられる。

## 5. 既往研究との比較

Timothy and Scott (1995)<sup>2)</sup> は平均粒径 D50 と N 値と qc 値の比の関係  $qc/N60$  を、既往論文の結果とあわせ



bk:盛土, Ap1:完新世有機質土, Acp1~2:完新世有機質粘性土, Ac1~5:完新世粘性土, As1~3:完新世砂質土, Dep1:更新世有機質粘性土, Dcv1:更新世火山灰質粘性土

図-1 標準貫入試験結果とコーン貫入試験結果

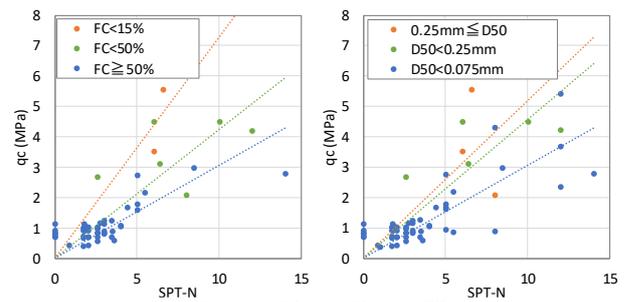


図-2 N 値と qc 値の相関

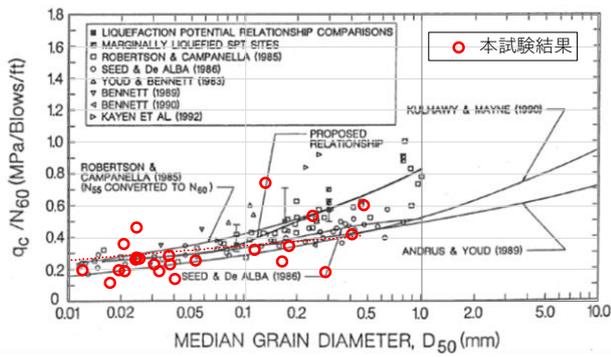


図-3  $q_c/N_{60}$  と平均粒径  $D_{50}$  の関係 <sup>2)</sup>を引用

て示している. 図-3 はそれに本試験結果を重ねたものである. ここで,  $N_{60}$  は異なる落下方法の打撃効率を60%に統一するよう補正した  $N$  値である. 本試験結果も同様に補正しており,  $D_{50}$  と  $q_c/N_{60}$  は Timothy and Scott (1995)<sup>2)</sup> の関係と同様な傾向を示している.

次に, 鈴木ほか(2003)<sup>3)</sup> は  $q_c/N$  が細粒分含有率や平均粒径に代表される土質の差によってのみではなく,  $N$  値に代表される土の硬さあるいは土の相対密度によっても変わることを示している. 図-4 と図-5 は  $q_c/N$  と細粒分含有率および平均粒径の関係を  $N$  値で分類し, 鈴木ほか(2003)<sup>3)</sup> の関係に重ねて示したものである. 鈴木ほか(2003)<sup>3)</sup> によると, 粗粒な(細粒分含有率  $F_c$  が小さい, 平均粒径  $D_{50}$  が大きい)ほど  $q_c/N$  の分布範囲が広いとされ, 本試験結果も同様の傾向が認められる. さらに, 本試験結果では,  $N$  値が8未満のグループでは粗粒なほど  $q_c/N$  が大きい傾向があるが,  $N$  値が8以上のグループでは,  $q_c/N$  は粒径に関らず小さい.

## 6. 考察

山田ほか(1992)<sup>4)</sup> は乾燥した粒径の異なる砂を用いた室内試験から,  $q_c/N$  は相対密度と無関係としている. 一方, 湿潤な原地盤での試験である本試験や鈴木ほか(2003)<sup>3)</sup> では, 砂の  $q_c/N$  は相対密度と関係が深い  $N$  値に依存している. 湿潤の場合に砂の  $q_c/N$  が相対密度や  $N$  値で表される地盤の強さに依存するのは, 試験の排水条件の違いによる<sup>3)</sup>. CPT は静的に近い速度で貫入することから排水条件に, SPT は動的に貫入することから非排水条件に近い. 砂の排水強度( $d$ )と非排水強度( $u$ )の比( $d/u$ )は正負のダイレイタンス特性に影響され, 相対密度が大きいほど小さくなる<sup>3)</sup>. すなわち,  $N$  値が大きい砂ほど  $d/u$  が小さくなり,  $q_c/N$  は小さくなる. 一方, 粘性土は両試験ともに非排水条件に近いことから,  $q_c/N$  は  $N$  値によらず一定に近くなる.

## 7. おわりに

SPT の利点はこれまでの実績が膨大であり, それによって様々な地盤物性値との関係が示されていることにある. しかし, 63.5kg のハンマーを76cmの高さから自由落下させるという試験の性格上, 軟弱な地盤が対象の場合は精度が不十分である. 一方, CPT は軟弱地盤が広く分布する北海道において多く用いられてき

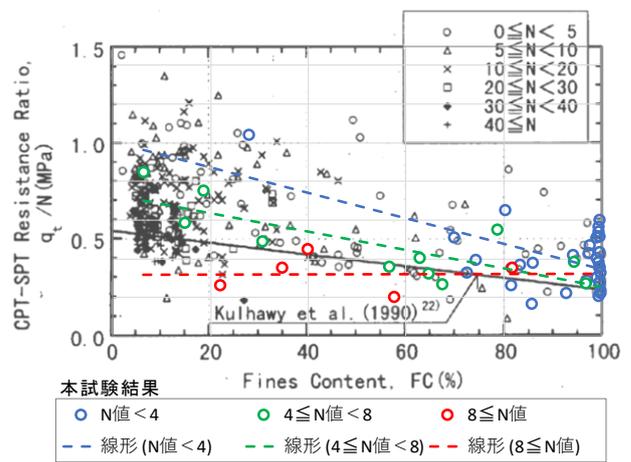


図-4  $N$  値で分類した  $q_c/N$  と細粒分含有率  $F_c$  の関係 <sup>3)</sup>を引用

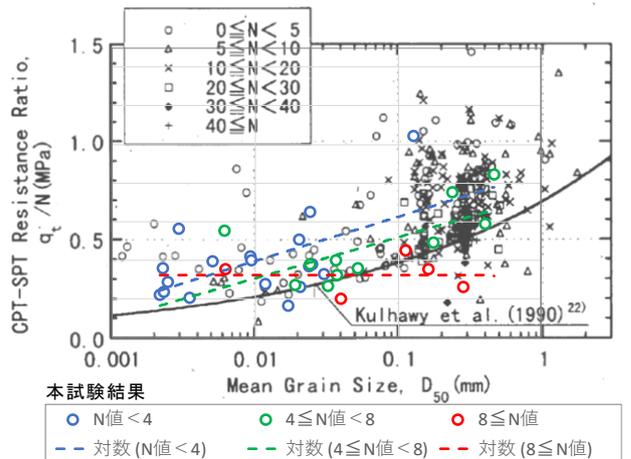


図-5  $N$  値で分類した  $q_c/N$  と平均粒径  $D_{50}$  の関係 <sup>3)</sup>を引用

た調査手法であり, データが連続的に得られることから薄層も見逃さず試験ができる. しかし他の地盤物性との関係を示す文献は少なく,  $N$  値に比べて汎用性が少ないといえる. このような問題に対し, Timothy and Scott (1995)<sup>2)</sup> は液状化抵抗を検討する過程で, 鈴木ほか(2003)<sup>3)</sup> は標準貫入試験に代わる試験としてのコーン貫入試験の適用性検討で  $q_c/N$  について考察している. 本稿は, それらの研究と身近なフィールドの調査結果を比較して同様な傾向が得られたことを紹介したものである. このような検討は, ボーリング調査地点間をコーン貫入試験で補完するような調査の場合, 地盤強度を統一的に評価する上で有効と考えられる.

## 引用文献

- 1) 地盤工学会(2013): 地盤調査の方法と解説, 1259p.
- 2) Timothy D. Stark and Scott M. Olson (1995): Liquefaction Resistance Using CPT and Field Case Histories, Journal of Geotechnical Engineering -December 1995, pp.856-869.
- 3) 鈴木康嗣,時松孝次,實松俊明 (2003): コーン貫入試験結果と標準貫入試験から得られた地盤特性との関係, 日本建築学会構造系論文集 第566号, pp.73-80.
- 4) 山田清臣,鎌尾彰司,吉野広司,増田幸政 (1992): 標準貫入試験の  $N$  値とコーン貫入試験  $q_c$  との相関性, 土と基礎 40(8), pp.5-10.

# 54. 岩石の乾湿繰り返しによる強度低下モデルの構築と

## 斜面安定解析への適用

A model of rock strength reduction due to repeated dry-and-wet cycles and its application to slope stability analysis

○浦越拓野, 河村祥一, 嶋本敬介, 久河竜也 (鉄道総研)

Takuya Urakoshi, Shoichi Kawamura, Keisuke Shimamoto, Tatsuya Hisakawa

### 1. はじめに

鉄道沿線での落石や岩盤崩壊の発生には岩盤の風化が関係する。そこで、筆者らは風化による岩盤の強度低下モデルの構築に取り組んでいる。これまでに、来待砂岩の供試体に対して風化作用を模擬した乾湿変化等を与え、その繰り返し回数と P 波速度  $V_p$  の低下の関係を示した<sup>1)</sup>。さらに、施工時期が既知の切土のり面からの採取試料の  $V_p$  と新鮮な岩石に対する乾湿等の繰り返し試験結果との対比から、室内試験での繰り返し回数を年数に換算し、さらに、 $V_p$  と一軸圧縮強さ  $q_u$  との既往の経験式を適用することで、来待砂岩の風化による時間依存での  $q_u$  の低下モデルを提案した<sup>1)</sup>。

今回、田下凝灰岩を用いて、提案した強度低下モデルの一般性を検討した。さらに、この強度低下モデルを、過去に岩盤崩壊が生じた斜面を対象とした斜面安定解析に適用した。本稿ではこれらの結果を報告する。

### 2. 田下凝灰岩に対する強制風化試験

試験に用いた岩石は市販の田下凝灰岩で、鏡下観察では最大の粒径は 1mm であった。これから、直径 50mm、高さ 100mm の円筒型供試体を 3 個作製した。

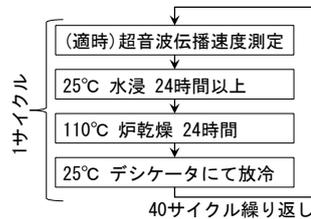


図-1 強制風化試験

供試体に乾湿と温度変化を繰り返し作用させ、風化を促進させる試験（以下、強制風化試験）を実施した。ここでは、25°C で 24 時間以上の水浸を行った後に、110°C で 24 時間の炉乾燥を行うことを繰り返し、適時に  $V_p$  を測定した(図-1)。

強制風化試験の結果を図-2 に示す。比較のため既往の来待砂岩での結果<sup>1)</sup>を併記する。田下凝灰岩の  $V_p$  は、試験開始時の 2.72km/s (3 試料の平均値) に比べ、40 サイクル目では 2.36km/s まで低下した。N サイクル終了後の  $V_p$  は、係数 A と初期の P 波速度  $V_{p0}$  を用いた次の対数関数でよくフィッティングされた。

$$V_p = -A \ln(N + 1) + V_{p0} \quad \dots\dots\dots(1)$$

### 3. 一軸圧縮強さの低下モデル式

既往の一軸圧縮強さ  $q_u$  と  $V_p$  の間の経験式<sup>2)</sup>において、単位を  $q_u$ [MPa],  $V_p$ [km/s] とすると次式が得られる。

$$q_u = 4.2V_p^{2.23} \quad \dots\dots\dots(2)$$

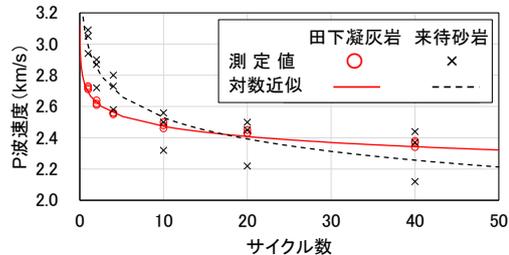


図-2 強制風化試験での  $V_p$  の測定値と対数近似

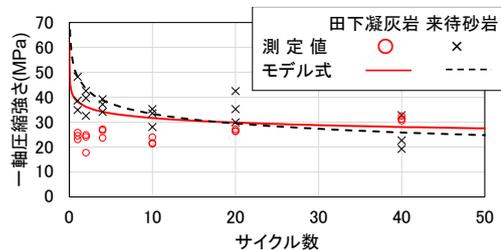


図-3 一軸圧縮強さの低下モデルと測定値の比較

このとき、(1), (2) から、強度低下モデルが次のように得られる。

$$q_u = 4.2 \{-A \ln(N + 1) + V_{p0}\}^{2.23} \quad \dots\dots\dots(3)$$

田下凝灰岩と来待砂岩のそれぞれについて、式(3)による  $q_u$  の推定結果を図-3 に示す。図では、別途実施した一軸圧縮試験結果を併記する。来待砂岩については、式(3)により試験値を概ね再現できている。一方、田下凝灰岩では試験の範囲ではサイクル数の増加に伴う強度低下は認められず、式(3)は試験値を再現できていない。田下凝灰岩で、 $V_p$  は低下したが、 $q_u$  は低下しなかった理由は、現段階では不明である。式(3)は、 $V_p$  は低下するが  $q_u$  は低下しない場合には適用できず、強度低下モデルに適用限界があることが分かった。

### 4. 岩盤崩壊が生じた斜面を対象とした斜面安定解析

#### 4.1 用いる強度低下モデル

(3)式において、 $-A \ln(N + 1) \ll V_{p0}$  と仮定してテイラー展開の 2 次以上の項を省略すると、 $N=0$  の強度  $q_{u0} = 4.2V_{p0}^{2.23}$  と係数  $a$  を用いて、次式が得られる。

$$q_u = -a \ln(N + 1) + q_{u0} \quad \dots\dots\dots(4)$$

サイクル数  $N$  が自然状態での風化時間  $t$  と関係があると仮定し、強制風化試験で得られた式(4)から、岩石の強度低下モデル式を次のように表すこととする。

$$q_u = -p \ln(t + 1) + q_{u0} \quad \dots\dots\dots(5)$$

$p$  は風化による強度低下速度に関する係数である。

風化による強度分布の深度依存性を文献<sup>3)</sup>を参考に、

深度依存性を示す関数 $f(z)$ と、係数 $k$ 及び $c(z)$ を用いて、次のように表すこととする。

$$q_u(t, z) = -kf(z)\ln(t + 1) + c(z) \dots \dots \dots (6)$$

$f(z)$ は対象とする斜面を再現するように定める。ここでは、対象斜面が上位の強風化を受けた層と下位の層に区分され、その境界が明瞭であるとされる<sup>4)</sup>ことから、深度 $z_c$ で浅は風化により概ね一様に強度が低下していることを表現するように、次の関数とした。

$$q_u(t, z) = \begin{cases} -\frac{p}{z_c^4}(z_c^4 - z^4)\ln(t + 1) + q_{u0} & 0 \leq z \leq z_c \\ q_{u0} & z > z_c \end{cases} (7)$$

#### 4.2 対象斜面と数値解析モデル

対象斜面は線路沿線にある切土のり面および背後の岩盤斜面で、開業から84年後に岩盤内をすべり面とした崩壊が発生した<sup>4)</sup>。地質は中生代の粘板岩を主体とし、深度10m~14m程度までの強く風化を受けた弱層と、それ以深の基盤層に区分される。弱層は開口割れ目や斜面傾斜等から、下部斜面、中部斜面、上部斜面に細分される<sup>4)</sup>。解析では、これらを踏まえ図-4のようにモデル化した。また開口割れ目は、分離を表現できるInterface要素としてモデル化した。

弱層で試験を実施できた箇所の粘着力 $c=2.0\text{MPa}$ が得られている<sup>4)</sup>。しかし、岩盤は割れ目が開口し緩んでいる<sup>4)</sup>とされることから、ここでは地表面付近の粘着力を1/200に低減させ0.01MPaとした。また内部摩擦角 $\phi=0$ を仮定してMohr-Coulombの破壊規準を適用し、 $q_u|_{t=84, z=0}=2c=0.02\text{MPa}$ とした。また基盤層および風化層の初期の強度は $q_{u0}=12\text{MPa}$ とした。このとき式(7)は、 $0 \leq z \leq z_c$ では、以下となる。

$$q_u = -5.33 \cdot 10^{-5} \cdot (15^4 - z^4) \cdot \ln(t + 1) + 12 \dots (8)$$

また、解析に用いた弱層の物性値は表-1に示すとおりである。解析には、FLAC3D (ITASCA社製、有限差分法解析)を用いた。

#### 4.3 数値解析結果と考察

図-5に崩壊発生前後の変位コンターを示す。まず下部斜面を起点に変位が発生した(図-5a)。その後、中部斜面が、中部斜面と上部斜面の間の開口割れ目を境に分離し崩壊した(図-5b)。

以上のように、提案した岩石の強度低下モデル式(5)

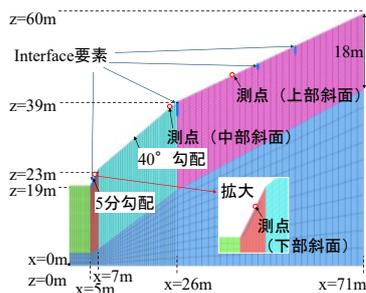


図-4 数値解析メッシュ

物性		単位	値
一軸圧縮強さ	$q_u$	MPa	式(8)
密度	$\gamma$	kg/m <sup>3</sup>	$2.3 \times 10^3$ <sup>4)</sup>
弾性係数	$E$	MPa	$2.6 \times 10^2$ <sup>4)</sup>
ポアソン比	$\nu$	-	0.3 <sup>4)</sup>
粘着力	$c$	MPa	$\sigma_c/2$
内部摩擦角	$\phi$	°	0 (仮定)
引張強度	$\sigma_t$	MPa	$0.2 \times \sigma_c/2$ <sup>5)</sup>

を実際に崩壊が発生した斜面に適用した結果、下部斜面が不安定化し、中部斜面が滑り、崩壊に至るという現象や時期をある程度表現できた。ただし、式(5)は割れ目の影響を考慮していない母岩部分の強度低下モデルである。これを用いて割れ目が開口し緩んでいる岩盤の解析を行うため、現状では、粘着力を低減させて崩壊現象を再現している。今後、割れ目を考慮した強度低下モデルを構築することが必要である。

#### 5. まとめ

田下凝灰岩に対する強制風化試験の結果、試験の範囲では $V_p$ は低下したが $q_u$ は低下しなかった。そのため、これまでに提案した岩石の強度低下モデルには適用限界があることが分かった。

次に強度低下モデルを、岩盤崩壊が生じた斜面の試験解析に適用した結果、斜面崩壊の発生をある程度再現することができた。しかし、割れ目を考慮していない強度低下モデルを用いて崩壊現象を再現するために、物性を極端に低下させた設定としており、今後、割れ目を含む強度低下モデルを構築する必要がある。

#### 文献

- 1) 河村ほか: 来待砂岩の強制劣化試験と強度低下速度, 土木学会論文集C, **77**, 4, 348-359, 2021.
- 2) 井上・大見: 岩石供試体の縦波伝播速度と一軸圧縮強さとの関係, 応用地質, **12**, 3, 136-141, 1971.
- 3) Sunamura, T: A physical model of the rate of coastal tafone development, Jour. Geol., **104**, 741-748, 1996.
- 4) 長谷川ほか: 大規模な斜面崩壊の相対的安定性の区分手法, 鉄道総研報告, **33**, 9, 17-22, 2019.
- 5) 独立行政法人鉄道建設・運輸施設整備支援機構: 山岳トンネル設計施工標準・同解説, p.318, 2008.

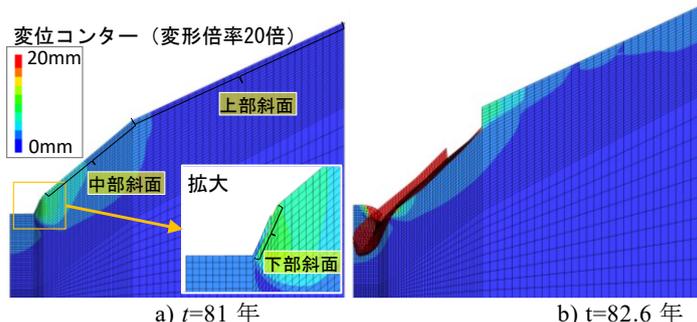


図-5 崩壊発生前後の変位コンター (変形倍率 20 倍)

# 55. 温度および湿度の変動に対する自然岩石のひずみ応答に関する検討

Strain response of natural rock caused by change in temperature and humidity

○久河竜也, 浦越拓野, 河村祥一 (鉄道総合技術研究所)  
Tatsuya Hisakawa, Takuya Urakoshi, Shoichi Kawamura

## 1. はじめに

岩盤斜面の崩壊や剥落型落石は、岩盤部分に割れ目を含んだ斜面で発生しやすい<sup>1)</sup>ため、それらのリスク評価には岩盤中の割れ目の発生や進展に寄与する要因についての評価が重要である。また、周囲の環境の変化などに起因して繰り返し作用する応力に伴った疲労による割れ目の進展は、遠方応力変化の振幅が大きいほど高速であることが経験的に示されている<sup>2)</sup>。

本研究では、温度と含水比の変化に伴う岩石の変形を要因とする遠方応力変化の推定を目的に、気温と湿度を変化させた際の割れ目を含まない岩石のひずみ応答に関して検討する。

## 2. 試料の作成と実験条件

来待砂岩および田下凝灰岩のブロックから 15mm×30mm×130mm の割れ目を含まない角柱状供試体を整形し、30mm×130mm の 2 面の中央にひずみゲージを貼り付けた(図-1)。



図-1 ひずみゲージ貼付後の供試体  
(上：来待砂岩，下：田下凝灰岩)

これらの供試体を室温で 24 時間以上静置したのち、以下に示す実験 A, B に供し、ひずみおよび雰囲気温度、相対湿度の変化を記録した。

- A) 恒温槽内に来待砂岩と田下凝灰岩の供試体 2 個ずつを入れ、35℃一定に温度設定し、恒温槽内の吹き出し口付近に水の入ったビーカー等を置くことで相対湿度を変化させる。
- B) 田下凝灰岩と来待砂岩の供試体 1 個ずつを飽和食塩水の入った密閉容器内に入れることで、相対湿度を 75%程度で一定に保つ。その後、密閉容器ごと恒温槽内に入れ、恒温槽の設定温度を 30℃～40℃の範囲で変化させる。

## 3. 実験結果

実験 A および B における測定結果の例をそれぞれ図-2, 図-3 に示す。なお、同一岩種の供試体において

ひずみは類似した傾向を持って変化していたため、以下各岩種において 1 つのひずみゲージの測定結果のみを示す。

実験 A では、湿度が上昇した際にひずみが増加(膨張)している。また、急激な湿度変化を加えた際にはひずみが遅れを持って応答し、平衡状態の値に漸近する。

実験 B では、雰囲気温度が上昇した際にひずみが減少(収縮)しており、その応答は湿度の急激な変化を与えた場合と同様にやや時間遅れを持っている。

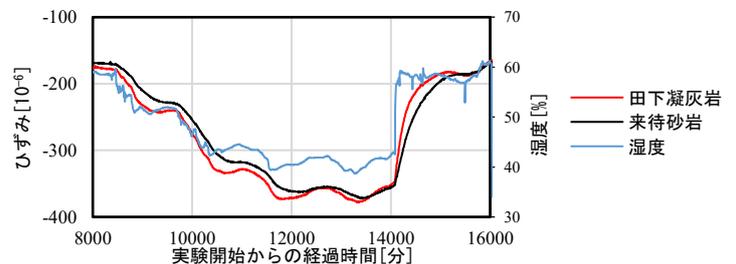


図-2 実験 A における相対湿度・ひずみの時間変化

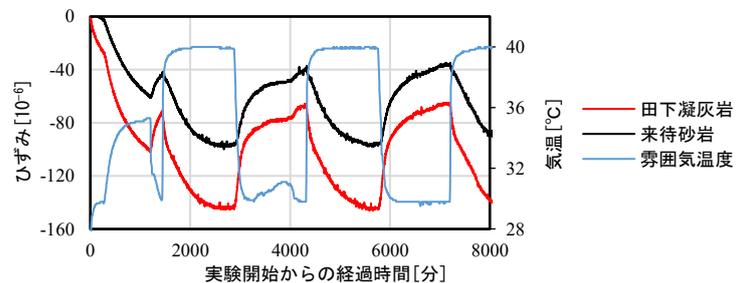


図-3 実験 B における雰囲気温度・ひずみの時間変化

## 4. ひずみ応答に関する解析モデル

初期含水比が  $w_0$  の多孔質物質に対して時刻  $t = 0$  において急激な湿度変化を与え、その後湿度を一定に保った場合の含水比  $w$  の時間変化は、平衡状態の含水比  $w_e$  と反応速度定数  $k$  を用いて、以下のように書ける<sup>3)</sup>。

$$w = (w_0 - w_e) \exp(-kt) + w_e \quad (1)$$

また、温度が一定かつ、含水比が低い堆積岩のひずみは含水比に対して概ね線形に応答することが先行研究<sup>4)</sup>で示唆されている。これらの条件を仮定すると、初期ひずみが  $\varepsilon_0$ 、平衡状態のひずみが  $\varepsilon_e$  となる環境に静置された多孔質な岩石のひずみ  $\varepsilon$  は、以下のような時間変化をすると考えられる。

$$\varepsilon = (\varepsilon_0 - \varepsilon_e) \exp(-kt) + \varepsilon_e \quad (2)$$

また、 $|\varepsilon_0 - \varepsilon_e| = \varepsilon_d$  とすれば、(2)式は以下のようにも書ける。

$$|\varepsilon - \varepsilon_e| = \varepsilon_d \exp(-kt) \quad (3)$$

実験 A の経過時間 14000 分付近では、湿度が 58%程度まで急激に上昇し、その後ほぼ一定となっている(図-2)。この湿度変化に対するひずみ応答と(2)式の関係を検討するため、ひずみ変化が十分小さくなった後のひずみの値を $\varepsilon_e$ と定め、最小二乗法により(3)式の形にフィッティングを行うことでパラメータ $\varepsilon_d$ 、 $k$ を求めた。

実験 B において、岩石は見かけ上では負の線膨張係数を持つ。このような岩石粒子の熱膨張とは逆の傾向を示す現象は先行研究でも報告があり、含水比変化の影響が指摘されている<sup>5)</sup>。そこで、含水比変化によってひずみ変化がどの程度説明できるか調べるため、実験 B の経過時間 4300 分付近からの昇温過程(図-3)に着目し、実験 A と同様のフィッティングを行った。

実験 A, B でそれぞれ着目した時間範囲における $|\varepsilon - \varepsilon_e|$ の時間変化(来待砂岩試料)と(3)式の形の回帰式の片対数プロットを図-4、図-5 に、最小二乗法によるパラメータの決定結果を表 1 に示す。

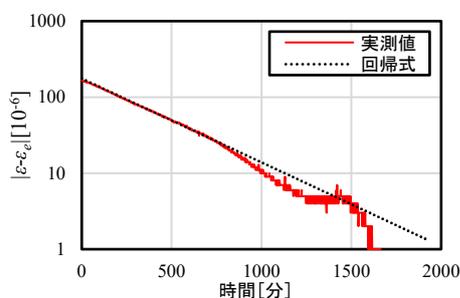


図-4 解析対象時間範囲におけるひずみ変化(実験 A)

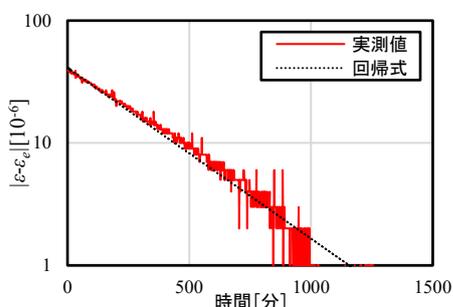


図-5 解析対象時間範囲におけるひずみ変化(実験 B)

表 1 最小二乗法による決定結果

実験名/岩種	$\varepsilon_d$ [ $10^{-6}$ ]	$k$ [ $10^{-3} \cdot \text{分}^{-1}$ ]	$R^2$ 値
A/来待砂岩	176.1	2.5	0.998
A/田下凝灰岩	158.1	4.1	0.995
B/来待砂岩	41.1	3.2	0.990
B/田下凝灰岩	46.6	2.8	0.985

## 5. 考察

湿度変化過程において、ひずみは指数関数的に平衡状態の値に近づく(図-4)。これは湿度変化と含水比変化の関係に関する既往研究と整合的な結果であり、砂岩や凝灰岩のような堆積岩は他の多孔質物質と類似の

メカニズムで吸湿することが示唆される。

温度変化過程においても、ひずみは指数関数的に平衡状態の値に近づくように変化し(図-5)、その時定数は湿度変化過程と同程度の値である。これを踏まえると、温度変化過程におけるひずみ変化は、含水比の変化に起因すると考えて矛盾しない。湿度が等しい環境下における温度差による含水比の差は他の多孔質物質においても観察されている<sup>3)</sup>。

また、温度変化過程におけるひずみの変化は岩石粒子の熱膨張では説明がつかない。これは、常温常湿に近い範囲の堆積岩の変形は、吸湿による含水比の変化等の他の要因によってほぼ支配されていて、熱膨張の影響が小さい場合があることを示している。

どちらの過程でも、時間が経過すると指数関数型の時間変化から外れた変化をする。これは平衡状態に近づいたことで小幅な温湿度変化に鋭敏に反応したこと、ひずみ測定 of 分解能の影響が要因として考えられる。

## 6. まとめ

来待砂岩と田下凝灰岩の供試体に対して温度変化と湿度変化を独立に加えた際のひずみ変化を測定し、測定結果を既往の含水比の時間変化に関する理論に照らして検討した。その結果、温度変化と湿度変化のどちらに対するひずみ応答も含水比の変化でほぼ説明されることが判明した。

今後、気温や湿度が一定でない期間に対応可能な理論を構築する、ならびに他の岩種に対して同様の分析を行うことによって、実際の岩盤斜面における気象条件の変化により即したモデルについて検討する。さらに、その結果を踏まえて気象条件変化に伴う割れ目の進展に関する評価を行うことを目指す。

## 文献

- 野口達雄, 杉山友康, 木谷日出男, 岡田勝也 (2004) : 鉄道沿線の硬岩斜面の安定性評価手法, 土木学会論文集, No. 763, pp.71-86
- Paris P.C., Gomez P., Anderson (1961) : A rational analytic theory of fatigue, The Trend in Engineering 13, 9
- 村田敏, 田中史彦, K.S.P.アマラトゥンガ, 澁谷和子, 内野敏剛 (1995) : 精白米の吸湿過程における平衡含水率の測定, 農業機械学会誌, 57(6), pp.45-52
- 長田昌彦, T.N.Illankoon, 大塚絢香 (2011) : 堆積岩の初期乾燥変形挙動と空気侵入値の関係について, 日本応用地質学会平成26年度研究発表会講演論文集, pp.23-24
- 木下直人, 安部透 (1995) : 高温下における堆積岩の熱膨張・収縮特性, 土木学会論文集 No.517/III-31, pp.53-62

## 56. トンネル坑口急崖斜面で実施した「のり面 CIM」

“Slope CIM” implemented on the steep cliff slope at the entrance of the tunnel

○石濱茂崇（熊谷組）  
Shigetaka Ishihama

### 1. はじめに

「のり面 CIM」は、グラウンドアンカーや鉄筋挿入工などの斜面対策工の施工データを集約・三次元モデル化（可視化）し、一元管理した情報を次ブロックの施工へフィードバックすることにより、施工の効率化を図るシステムである。今回はトンネル坑口の急崖斜面において、発注時と地質が異なる状況となったことから、斜面対策工の設計より携わることとなったため、設計段階での適用性を確認することを目的として「のり面 CIM」を実施した。また、施工中にはドローンを用いた 3 次元写真測量（SfM）を随時実施し、時系列を確認できる 4 次元的な管理も併せて行った。

### 2. 工事の概要

対象としたトンネル工事は、高規格幹線道路を建設する工事である。当初、終点側坑口部（出口側）の斜面は、落石対策としてのロープ伏工や岩接着工、除去工、落石防護柵工等を実施する予定であったが、工事開始後の調査の結果、トンネル掘削の影響から不安定となる岩塊が存在することが明らかとなり、この不安定岩塊部については、岩塊の掘削除去および鉄筋挿入工を実施することとなった。

トンネル周辺の地質は、新第三紀の火成岩類で、流紋岩質の溶結凝灰岩や凝灰角礫岩からなる。岩質は塊状硬質で急崖を形成しており（写真－1）、開口割れ目がみられることから、一部の岩塊は不安定化している。

### 3. 追加調査の経緯と設計の概要

対象とした斜面は、前述したように急崖を形成しており、工事開始直後の現地踏査結果から、急崖斜面の安定性が懸念されたため、3次元地形測量を行うこととした。坑口部の伐採前であることから、レーザードローンによる方法を採用した。なお、発注図面の地形図は概略であり、詳細な形状は捉えられていなかった。

3次元地形測量の結果（図－1）、坑口に隣接する斜面に岩盤クリープ状の箇所があり、内部に開口亀裂が存在した場合には、トンネル掘削の影響により大規模な崩落が発生する可能性が考えられた。そこで、ボアホールスキャナを含むボーリング調査を実施して確認することとした。調査の結果、岩塊内部に 23mm 程度の開口亀裂が確認され（図－2）、上下 2 段実施したボーリングで両者に同様の開口割れ目がみられて連続する可能性が高いこと、および得られた走向傾斜の方向

から、トンネル掘削の影響で崩落する危険性があると判断した。なお、不安定岩塊の深さは 3m 程度である。

基本的に不安定岩塊は掘削除去することとしたが、急崖部であることから、掘削の影響の及ぶ範囲が大きく、健全な岩盤の掘削が多く発生する。このため、様々な掘削形状を検討し、小規模な不安定岩塊が一部に残るものの、対策工が最小限の鉄筋挿入工で収まる形状を選定した（図－3）。



写真－1 急崖を形成する流紋岩質溶結凝灰岩

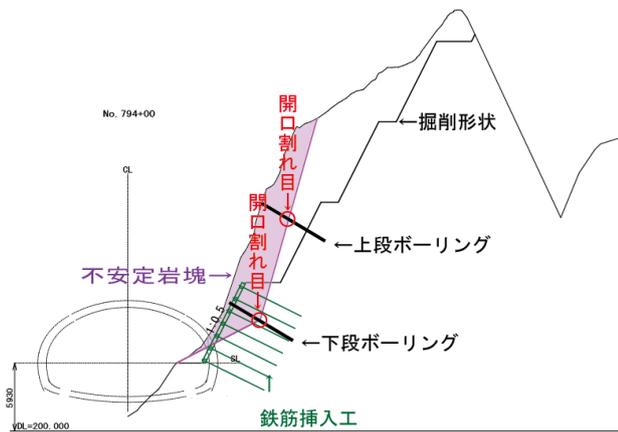


図－1 トンネル近傍斜面の岩盤クリープ状の箇所



上段と下段の各々で開口割れ目が確認され連続すると判断した

図－2 ボアホールスキャナでの開口割れ目



図一3 対策工断面図

#### 4. 施工中におけるのり面 CIM の取り組み

不安定岩塊の掘削には、高所無人掘削機（セーフティクライマー工法）を採用した（写真一2）。掘削時に形状を把握しづらいこと、および適宜掘削数量を把握したい要望があることから、2～4週間ごとにドローンによる写真測量（SfM）を実施して施工中の斜面の3次元モデルを作成し、かつ時系列に確認できるようにして、4次元的管理を行った。4次元的管理にあたっては、ブラウザ上で点群データや3次元の設計データを確認できる CIMPHONY Plus（福井コンピュータ社製）を採用した（図一3）。

斜面对策工の CIM 化については、3次元地質解析ソフトウェアである MakeJiban（五大開発社製）のアドオン機能である「斜面对策 CIM 機能（のり面 CIM）」を用いた。鉄筋の属性情報は、Excel 等の表計算ソフトで入力する仕様となっており、施工管理業務の一環で作成できる。図一4に「のり面 CIM」における設計情報（のり面形状、対策工）と属性情報の表示画面を示す。

#### 5. 効果

本工事では、着手時より積極的に3次元モデルを取り入れたことから、地質構造の説明が明快となることにより、受発注者間の意思の疎通がスムーズとなり、設計変更にまで至る調査が非常に円滑に進行した。

掘削する形状と不連続面（今回は開口割れ目）との関係が分かりやすく、容易に様々なパターンの掘削形状が検討でき、早急に設計へ反映することができた。

施工中における3次元モデルの4次元的管理は、簡便な方法であることから、途中段階で随時確認が可能で、手戻りなく掘削できた。測量作業が掘削斜面に立ち入らずに実施できることから、安全性が向上するとともに、従来の方法では、人員は2名必要なところを1名で作業を行った。また、従来の方法で3時間程度必要であった現地作業時間は1時間程度であった。

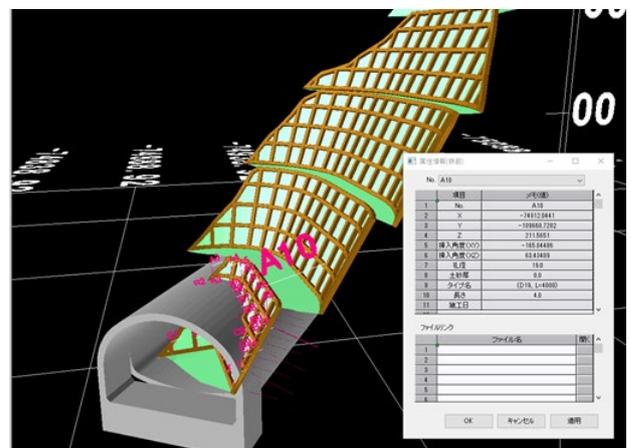
なお、今回は工期の関係から鉄筋挿入工の施工は行われておらず、斜面对策工の施工管理時の効果については確認できていない。



写真一2 高所無人掘削機の掘削状況



図一3 4次元管理画面での点群と掘削形状



図一4 のり面 CIM での設計データと属性情報

#### 6. 今後の課題

今後の課題として、調査から設計までの時間が短い場合に、地質評価を含んだ3次元モデルの作成がクリティカルパスとなり、「のり面 CIM」用のデータ作成を簡略化させることが望まれる。このことから、現在、入力作業の簡略化を図るソフトウェアを開発中である。

#### 文献

- 1) 石濱茂崇 (2020) : グラウンドアンカー工および鉄筋挿入工に特化した CIM (のり面 CIM) の開発, 令和 2 年度研究発表会講演論文集, 日本応用地質学会, pp.89-90.

# 57. トンネル掘削後の地山の飽和度変化に関する解析的検討および飽和度変化が盤ぶくれに与える影響の検討

Analytical Study on Change in Ground Saturation after Tunnel Excavation and Effect of the Change on Floor Heave

○西金佑一郎, 浦越拓野, 嶋本敬介, 鈴木雅之 (鉄道総合技術研究所)  
Yuichiro Nishikane, Takuya Urakoshi, Keisuke Shimamoto, Suzuki Masayuki

## 1. はじめに

完成後の山岳トンネルで盤ぶくれが顕在化する場合があります。このメカニズムの1つとして、嶋本ら<sup>1)</sup>は掘削時の湧水がない泥岩地山でのシナリオを示している。そのシナリオでは、建設時に地山の飽和度が一度低下し、完成後に水が供給されることで飽和度が再上昇すると、スレーキングによって地山の強度が低下し、盤ぶくれが進行する可能性が示されている。

ここでは、このシナリオの妥当性について、浸透流解析とおよび変形解析により検討した結果を報告する。

## 2. 浸透流解析

### 2.1 解析モデル

トンネルを掘削した岩盤を模擬した2次元断面モデルを作成した(図-1)。土被りは約150mとし、トンネル断面は新幹線複線断面とした。また、掘削面から2m以内の岩盤を掘削損傷領域(EDZ)として周辺の岩盤(一般部)と区別した。また、トンネル中心から水平に150m離れた位置において、地下水位をGL-20mに固定した。浸透流解析には、Richards式に基づく飽和・不飽和解析が可能なSoilPlus(ITOCHU Techno-Solutions Corp.製)を使用した。

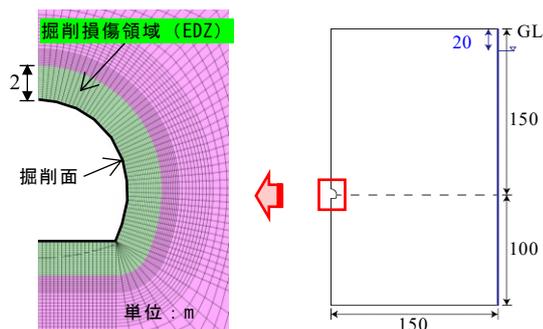


図-1 解析モデル

## 2.2 掘削面からの浸出流量の推定(予備解析)

### 2.2.1 解析条件

掘削面からの浸出流量を浸透流解析により求めた。初期条件としてGL-20m以深を飽和状態とし、時刻0で掘削面を浸出境界としてから1000日間の非定常解析を実施した。

解析ケースは、飽和透水係数を変化させた3ケースとした(表-1)。岩盤として軟質な泥岩を想定し、一般部の飽和透水係数は新第三紀の泥岩の文献値<sup>2)</sup>を参考に設定し、EDZの飽和透水係数は既往文献<sup>3)</sup>を参考

表-1 解析ケース

解析 ケース	飽和透水係数 (一般部)	飽和透水係数 (EDZ)	比貯留 係数	間隙率 %
	m/s	m/s		
1	$1 \times 10^{-9}$	$1 \times 10^{-7}$	0.013	30
2	$1 \times 10^{-10}$	$1 \times 10^{-8}$		
3	$1 \times 10^{-11}$	$1 \times 10^{-9}$		

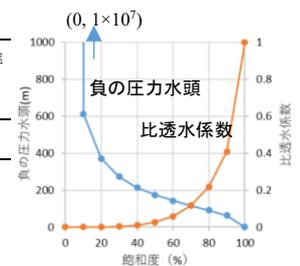


図-2 水分特性曲線

に一般部より2オーダー高く設定した。岩盤の水分特性曲線は、瑞浪層群の泥岩<sup>2)</sup>を参考に図-2のように設定した。

### 2.2.2 解析結果および考察

掘削面からの浸出流量の時間変化を図-3に示す。概ね岩盤の飽和透水係数が高いほど浸出流量は大きく、各ケースとも時間経過とともに流量は減少する。

図-3の結果は蒸発を考慮していないが、浸出流量より蒸発量の方が大きい場合には蒸発の影響が無視できなくなる。既往研究<sup>4)</sup>によれば、トンネル坑内での蒸発量は最大で約30 mg/m<sup>2</sup>/sと測定されている。掘削面からの蒸発量が常に30 mg/m<sup>2</sup>/sと仮定すると、ケース1では424日以降、ケース2では27日以降、ケース3では49日以降では蒸発の影響が無視できなくなると考えられる。

## 2.3 掘削面からの蒸発と施工ステップを考慮した浸透流解析

### 2.3.1 解析条件

掘削面からの蒸発を、流量固定の境界条件を設定することで簡易に考慮することとした。蒸発量を30 mg/m<sup>2</sup>/sと仮定し、ケース2の解析で27日目からは掘削面上の流量を30 mg/m<sup>2</sup>/sに固定して浸透流解析を実

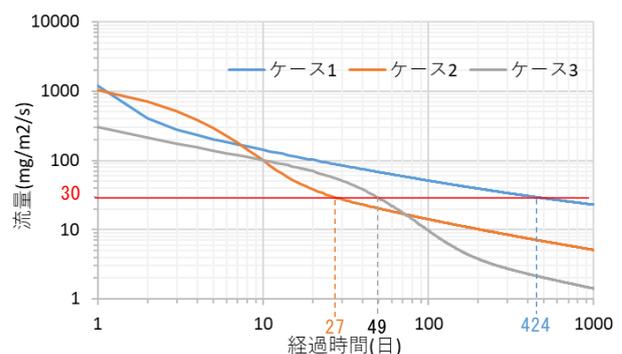


図-3 浸出流量の時間変化

施した。さらに、上下半の掘削から 240 日後にインバート掘削を行い、直ちにインバートおよび覆工コンクリートの打設を行うと仮定し、解析 240 日目にインバート部の地山の要素を削除すると同時に掘削面（側壁およびインバート）を不透水境界とした（図-4）。

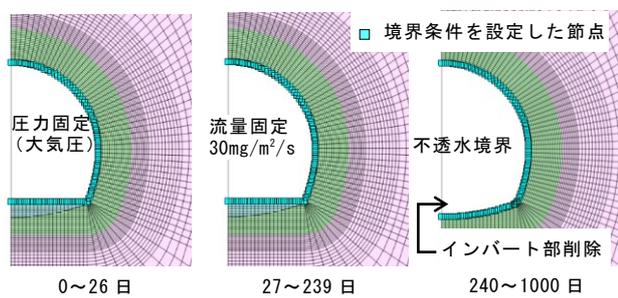


図-4 掘削面の境界条件の変化

### 2.3.2 解析結果および考察

図-5 に 240 日後の飽和度分布を、図-6 にトンネル中心線上の掘削底面、掘削底面の 1m 下および 2m 下における飽和度の時間変化を示す。流量を固定した 27 日以降に、EDZ とほぼ同じ領域に不飽和領域が形成され、240 日以降は飽和度が上昇し、約 200 日かけて飽和状態になった。この結果から、掘削面からの蒸発によりトンネル周辺に不飽和領域が形成されること、また、覆工・インバートの施工によって飽和度が回復することが示唆された。

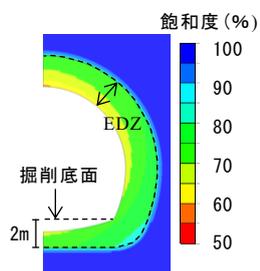


図-5 240 日後の飽和度分布

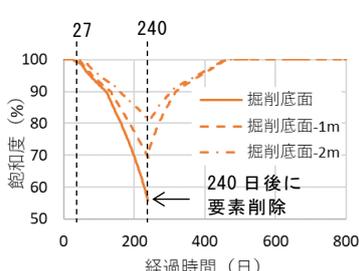


図-6 インバート下の飽和度の時間変化

## 3. 地山の強度低下を考慮したトンネルの変形解析

### 3.1 解析方法

2.3 節の浸透流解析で飽和度の変化（飽和→飽和度の低下→飽和度の上昇）が生じた領域においてスレーキングが生じたと仮定し、この領域の強度を低下させた条件で、トンネルの変形解析を実施した。解析には有限差分コード FLAC3D (Itasca Consulting Group, Inc. 製) を使用し、岩盤は Mohr-Coulomb の破壊規準に従う弾完全塑性体としてモデル化した。岩盤の物性値は泥質軟岩を想定して表-2 のとおり設定した。

文献<sup>り</sup>ではトンネル切羽で採取された新第三紀の泥

表-2 変形解析に用いた物性値

物性	単位	値	物性	単位	値
単位体積重量	kN/m <sup>3</sup>	20	せん断強さ	MPa	0.87
弾性係数	MPa	300	内部摩擦角	°	30
ポアソン比	-	0.3	ダイレイタンス角	°	10

岩を対象に、乾燥によって含水比を初期の 8 割程度まで低下させた後に水浸させたところ、一軸圧縮強さが初期の 1 割程度に低下したことが報告されている。本解析ではこの研究結果を参考に、トンネル断面が形成された後、飽和度の変化が生じた領域のせん断強さを初期の 0.1 倍まで低下させた。なお、今回は覆工およびインバートをモデル化しておらず、素掘りトンネルとしての解析である。

### 3.2 解析結果および考察

解析の結果、せん断強さ  $c$  を 0.1 倍まで低下させた場合には、インバート部の岩盤は掘削時の応力開放によって生じる隆起に加えて、さらに 50mm 隆起した（図-7）。この結果から、トンネル掘削後の地山の飽和度の変化およびそれに伴う強度低下が生じた場合に、盤ぶくれが生じる可能性があることが示唆された。

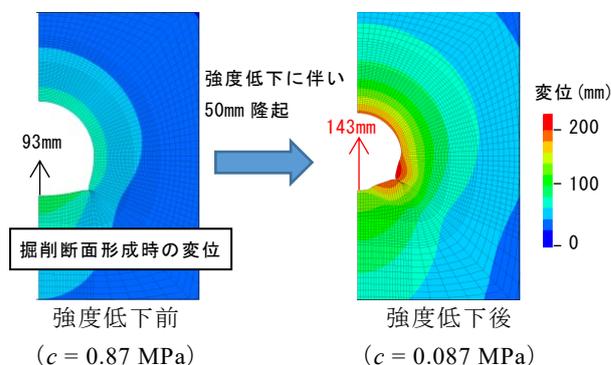


図-7 変形解析の結果

## 4. 今後の課題

本検討の結果、蒸発量が大きい値で継続すると仮定した場合に、素掘りの状態においては、解析上では盤ぶくれが再現された。今後は覆工およびインバートをモデル化した変形解析を実施し、完成後のトンネルの盤ぶくれ量を求めることで本シナリオの妥当性をさらに検討する。しかし、本解析では蒸発量を過大に設定している可能性があり、さらなる検討が必要である。今後は不飽和領域が形成される原因として、トンネル建設時の蒸発以外に、水理地質構造の観点から掘削時点で岩盤が不飽和であった可能性や、掘削時の岩盤の変形による影響等にも着目していきたいと考えている。

### 文献

- 1) 嶋本ほか (2020) : 含水比変化に着目したトンネルの盤ぶくれメカニズムの推察, 土木学会論文集 F1, 76, pp.34-48.
- 2) 堤ほか (1994) : 岩石の不飽和特性の逆推定法, 応用地質, 35, pp.23-30.
- 3) 松井ほか (1992) : 堆積岩地山における立坑周りの力学的・水理的な特性変化, PNC TR/GE 92-06, 41p.
- 4) 渡辺ほか (1990) : 蒸発量計測によるトンネル壁面からの湧水量の測定(その 2) - 現場計測 -, 応用地質, 31, pp.1-11.

## 58. 凹状の弾性波速度から判明した火砕岩類による 埋没谷でのトンネル調査事例

A case study of tunnel investigation in a buried valley formed by volcanoclastic rocks revealed by concave elastic wave speeds.

○田中慎吾（基礎地盤コンサルタンツ株式会社）  
Shingo Tanaka

### 1. はじめに

古第三紀堆積岩類から形成された起伏の少ない丘陵地に延長 350m 程度の新規トンネルが計画され、弾性波探査よりトンネル中央部に凹状の弾性波速度分布が確認された。地形とは非調和的な弾性波速度分布の原因究明を行うために、地質分布や地質構造等について調査・検討を行った結果、堆積岩類からなる古い谷地形を埋めるようにやや軟質な火砕岩類(凝灰岩, 凝灰角礫岩)が堆積し、現地形を形成している埋没谷の存在が確認された。更に、それらの不整合面付近はやや固結した砂礫状を呈する旧崖錐堆積物からなり、不整合面の性状や分布位置等から今後のトンネル施工に大きな影響を及ぼすことが判明した。

本稿は、凹状の弾性波速度分布により現地形からでは予見が難しい埋没谷の存在が判明し、トンネル施工に影響を及ぼす地質リスクを明らかにし、事前にリスクを低減することに繋げた事例をとりまとめたものである。

### 2. 背景

本調査の対象地は、古第三紀の堆積岩類から形成された起伏の少ない丘陵地からなり、延長 350m、最大土被り 40m 程度のトンネルが計画されていた(図-1)。

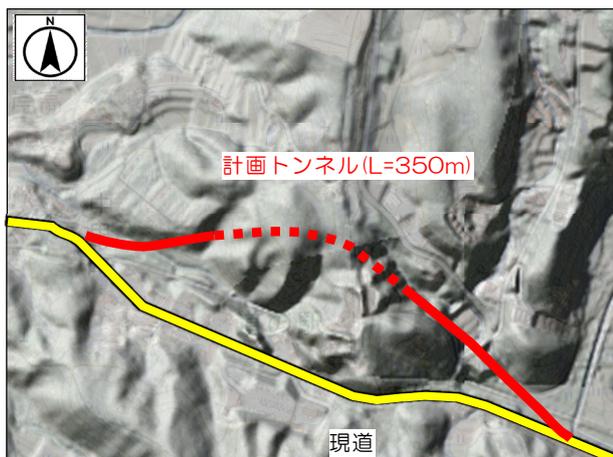


図-1 調査地の地形図<sup>1)</sup>

事前調査として、弾性波探査を実施した結果、トンネル計画地山に凹状の弾性波速度分布が確認され、はぎとり法による低速度帯も同様に確認された(図-2)。凹状の弾性波速度の原因として、一般的に断層破砕帯が想定され、トンネル構造物に対して断層破砕帯が存

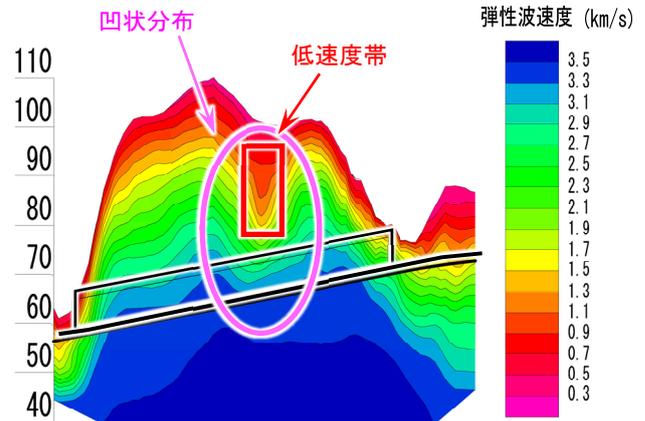


図-2 弾性波速度分布図(縦横比=5:1)

在した場合には、突発湧水や天端や切羽の崩落といった施工上のリスクが懸念されることとなる。

そこで、当該地域の地質分布や性状、地質構造等を把握するために、地表地質踏査・ボーリング調査等、各種調査を実施した。

### 3. 調査結果

図-3 に本調査実施前の地質縦断面図(上図)と本調査実施後の地質縦断面図(下図)を示す。本地質調査の結果、以下に示す地質分布・地質構造が明らかとなった。

- 1) 古第三紀の堆積岩類(砂岩(Ss), 砂岩泥岩互層(Alt), 泥岩(Ms))が互層状に分布し、終点側に向かって 5° 程度傾斜
- 2) 計画ルート中央部(図-3 下①)および終点側(図-3 下②)にやや軟質な第四紀の火砕岩類(凝灰岩(Tf), 凝灰角礫岩(Tb))が凹状に分布
- 3) 古第三紀の堆積岩類と第四紀の火砕岩類の不整合面付近はやや固結した砂礫状を呈する旧崖錐堆積物(ptl)が分布(図-4)

当初、凝灰角礫岩(Tb)は表層部に薄く分布する想定であったが、今回調査を実施した結果、トンネル中央部に火砕岩類に覆われた深さ 30m 程度の埋没谷が確認された(図-3 下①)。

同様に、終点側の水平ボーリングにて、基盤の堆積岩中に二次堆積である旧崖錐堆積物が一部の区間で確認され、区間中央の埋没谷の成因と同じ凹状の分布が想定された(図-3 下②)。

一方、当地域には明瞭なりニアメント等は認められず、断層破砕帯等の存在は確認されなかった。

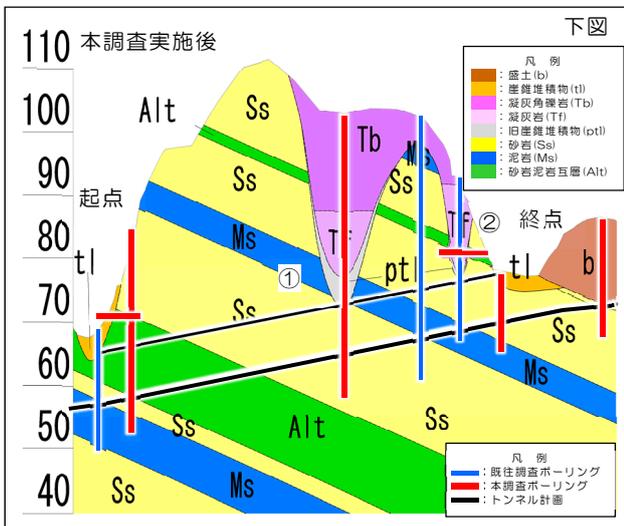
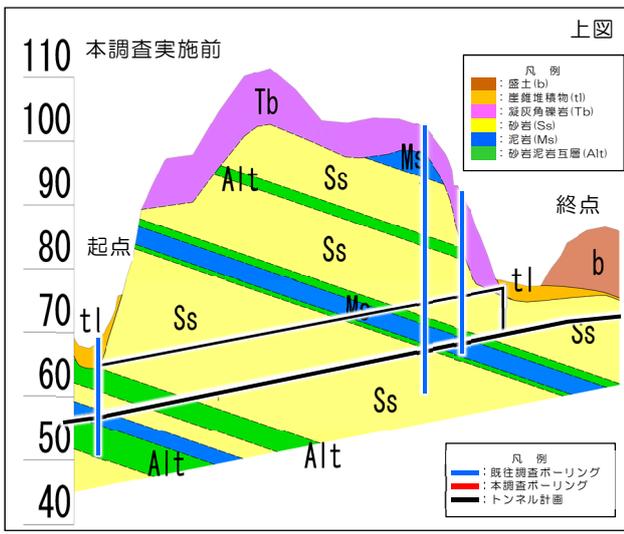


図-3 本調査実施前後の地質縦断図(縦横比=5:1)



図-4 旧崖錐堆積物のボーリングコア

#### 4. 考察

各種調査結果から想定された地質分布・構造は、弾性波速度で確認された凹状分布や低速度帯と調和的であり、図-5に示す当該地域の地質形成史のイメージ図のように、堆積岩類によって形成された古い谷地形を埋めるようにやや軟質な火砕岩類(凝灰岩, 凝灰角礫岩)が堆積し、埋没谷として現地形を形成したと想定される。基盤岩である硬質な堆積岩類と比較すると、その上位の旧崖錐堆積物や火砕岩類はやや軟質であり、トンネル計画ルートの中核部や終点側では天端付近に旧崖錐堆積物等が出現する可能性があることが判明し

た。また、ボーリング掘削中には旧崖錐堆積物以深で孔内水位の低下が見られ、トンネル掘削時の地下水の問題も懸念された。そこで、トンネル施工時には天端から旧崖錐堆積物等の抜け落ち、突発湧水の発生等、トンネル施工に影響を及ぼす地質リスクを明らかにした。その他、堆積岩類の分布性状等からトンネル設計・施工上の留意点についても言及した。

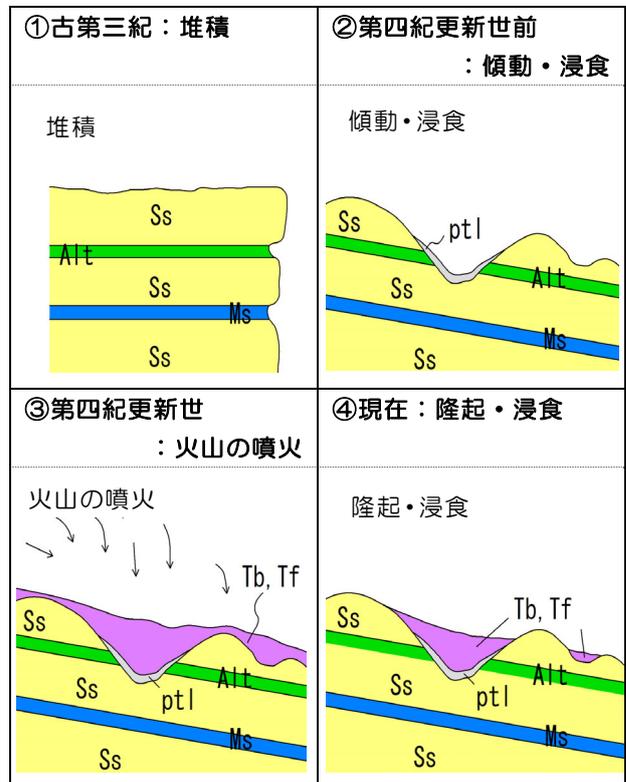


図-5 当地区の地質形成史イメージ図

#### 5. まとめ

地形とは非調和的な凹状の弾性波速度分布により、地形や大略的な地質分布からでは予見が難しい特異な地質・埋没谷について実態を把握し、成因等を追求・特定した。細部の地質構造や成因を見過すことなく対応した結果、トンネル設計施工における地質リスクを抽出し、リスク低減に繋げることができた。

近年、LPデータ等により地形データの精度が向上し、事前調査段階での地形判読の精度も向上している。ただし、地形判読だけでは今回のような事象は捉えきれないので、物理探査やリモートセンシング等で工学的な物性情報も踏まえて評価し、調査精度を段階的に上げていくことで、その地域の地質分布・地質構造が把握でき、事業の地質リスクを明らかにしていくことができると改めて認識した。

#### 文献

- 1) 国土地理院ウェブサイト (<https://maps.gsi.go.jp/>)

# 59. 合成開口レーダを用いた変状検知システムの開発

Development of Displacement Measurement System Using Ground Based Synthetic Aperture Radar

○中谷匡志, 井ノ口拓郎 (安藤ハザマ)

Masashi Nakaya, Takuro Inokuchi

## 1. はじめに

山岳トンネルの掘削施工中の切羽においては、小規模な落石であっても重大な災害につながる可能性がある。また、狭隘なトンネル切羽においては、建設機械等が障害物となり、監視の死角が多く発生する。そのため、従来の目視による監視に加えて、簡便な計測システムを導入することで、変状の見落としを防止し、合理的な切羽監視が可能となる。

このような状況において、筆者らは施工中のトンネル坑内において、簡便な計測手法による切羽監視システムの開発を進めている<sup>1)</sup>。今回、開発したシステムと専用の可視化ソフトを用いて、トンネル坑内における実証実験を実施したところ、既知の変位に対して概ね合致した結果が得られたので報告する。

## 2. 変状検知システム

地上設置型合成開口レーダ (GB-SAR) は、照射した電波の反射波をアンテナの位置を変えながら連続的に受信する。計測した反射波データを合成し、仮想的に大きなアンテナ (開口) を作り出すことで、小さなアンテナであっても、変位量を高精度で算出することができる計測技術である。また、干渉 SAR と呼ばれる解析手法により、反射波の位相差を伝搬距離の差に変換し、観測対象の変位量を相対値として算出する。これにより、切羽全面の変位量をリアルタイムで可視化することが可能となる。

レーダアンテナは、複数の送受信アンテナ素子を直線的に配置した MIMO (Multiple Input Multiple Output) 型 GB-SAR で構成される。各送信アンテナから放射された電波は、切羽面で反射した後、異なる複数の経路で伝搬し、全受信アンテナで取得される。このように、各アンテナの送受信を電気的に制御することで、1 秒程度の時間間隔で計測が可能となる。開発したシステムの外観を写真-1、システムの仕様を表-1、計測概念図を図-1 に示す。

一般的に、計測の空間分解能は照射する電波の周波数帯域に依存する。GB-SAR のクロスレンジ方向とレンジ方向 (図-1 参照) の空間分解能は、電波の伝播速度  $c$ 、周波数帯域  $B$ 、電波の照射角  $\theta$  (正面の場合は  $90^\circ$ )、波長  $\lambda$ 、計測距離  $R$ 、アンテナ開口長  $D$  から以下の式で求められる。

$$\text{クロスレンジ方向: } \Delta X = \lambda R / D \quad (1)$$

$$\text{レンジ方向: } \Delta Y = c / 2B \sin \theta \quad (2)$$



写真-1 システムの構成

表-1 システムの仕様

中心周波数	24GHz
周波数帯域	200MHz / 2GHz
波長 $\lambda$	12.4mm
差分の算出限界 $\lambda / 4$	3.1mm
計測間隔	1秒程度
アンテナタイプ	MIMO型
アンテナ寸法	30×5×50cm

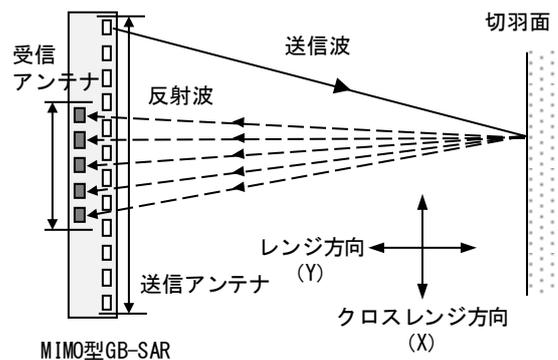


図-1 計測概念図

## 3. 検証実験

干渉 SAR による変位量の算出は、観測対象から十分な反射強度を取得する必要がある。また、電波はレーダアンテナから放射状に照射されるため、計測距離や電波の入射角度により得られる反射強度は変化するものと考えられる。そこで、トンネル坑内における運用を想定し、金属板で作成した反射鏡 (コーナーリフレクタ, CR) を用いて、得られる反射強度や空間分解能などの計測特性を把握するための検証実験を行った。

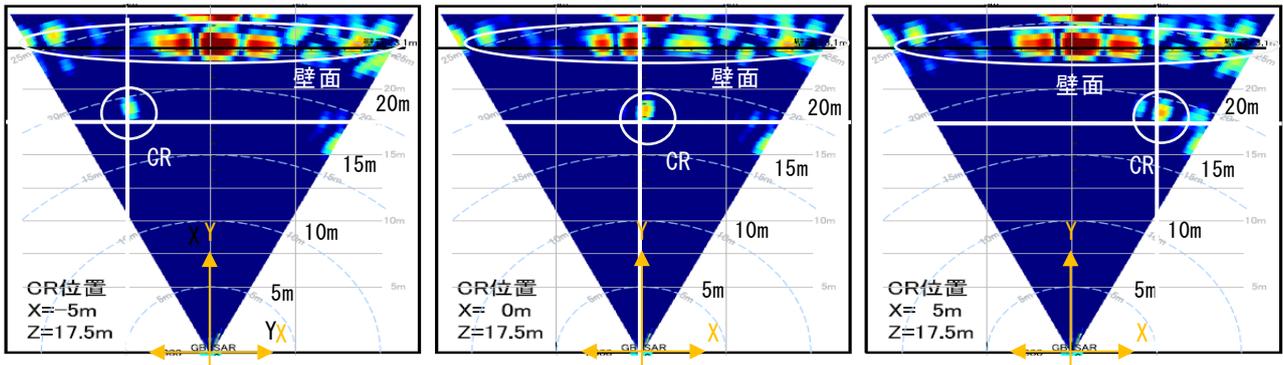


図-2 検証実験の結果

検証実験の結果例として、 $X=-5\sim 5\text{m}$ （クロスレンジ方向）、 $Y=0\sim 20\text{m}$ （レンジ方向）における反射強度画像を図-2に示す。図中、レーダアンテナは、 $X=0, Y=0$ に位置し、観測範囲における反射強度（ $0\sim -15\text{dB}$ ）を描画した。また、白線の交差箇所がコーナーリフレクタの設置位置を示しており、反射強度が大きいものを赤系色、小さいものを青系色で示している。

各図より、設置位置と概ね合致した地点において、変位量算出に必要な十分な反射強度が得られたことから、コーナーリフレクタの一边である  $50\text{cm}$  程度の空間分解能を有しているものと考えられた。しかしながら、最大反射強度は周囲の壁面において確認されたことから、周囲の散乱が大きい場合には、計測精度に影響することが考えられた。

#### 4. 現場実験

トンネル坑内での計測では、切羽面からの反射波が周囲の壁面で散乱することで、計測結果に影響することが考えられる。そのため、計測時の切羽面の三次元座標を測量することで、空間的な情報から周囲の散乱を除去し、切羽面の結果のみを抽出する可視化ソフトを開発した。次に、実際のトンネル工事において、これらのシステムを用いた検証実験を実施した。なお、電波の周波数帯域については、電波法に係わる許認可申請が不要である  $200\text{MHz}$  を採用した。

実験は、延長  $4,998\text{m}$  の道路トンネルで、避難坑と本坑を繋ぐ掘削途中の連絡坑の切羽（幅約  $8\text{m}$ ）で実施した。計測は、連絡坑の切羽面に吹付コンクリートと同程度の反射強度と考えられるターゲットを設置し、厚さを  $1\text{mm}$  単位で変化させ、切羽面における疑似変位とした。実験状況を写真-2に示す。

結果の例として、切羽面の変位抽出結果を図-3に示す。図中、算出した変位量をカラーマップで示しており、切羽の手前側（-）の変位を赤系、切羽前方側（+）の変位を青系、変位を検出できなかった範囲については緑で示している。図-3より、周囲の散乱の影響は除去され、切羽面の結果のみを抽出できている。また、ターゲット設置位置において、実際の変位量（ $-50\text{mm}$ ）と概ね一致した結果が得られていると考えられる。



写真-2 連絡坑切羽での計測状況

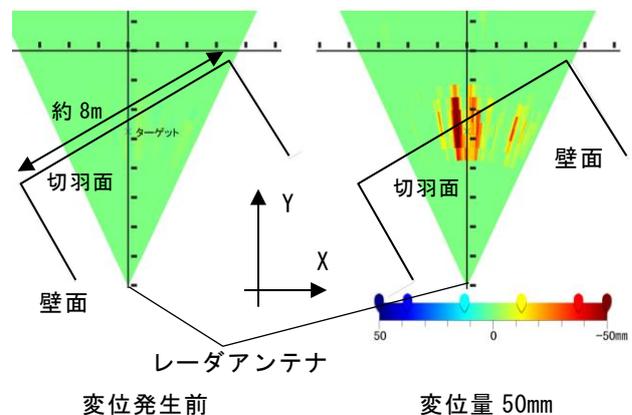


図-3 切羽の変位マップ

#### 5. おわりに

今回、MIMO型GB-SARによる変状検知システムを開発し、実際の現場において確認試験を実施した結果、坑内壁面の散乱を除去することで、切羽面の変位量を検出可能であることを確認した。今後は、様々なトンネル工事における計測データを蓄積し、変状の検知精度の検証を進める計画である。

#### 参考文献

- 1) 中谷ほか：合成開口レーダを用いたトンネル切羽監視システムの開発，土木学会第75回年次学術講演会講演概要集，VI-1005，2020.

## 60. ハイパースペクトルデータと AI 画像認識による

### 阿蘇火砕流堆積物の判別手法の構築

Discrimination of Aso Pyroclastic Flow Deposit based on hyper spectrum data and AI image recognition

○福岡 航治 (地圏総合コンサルタント), 大和田 済熙 (秋田大学), 中村 真一郎 (北海道大学),  
中川 清森 (地圏総合コンサルタント), 佐藤 真 (地圏総合コンサルタント)

Koji Fukuoka, Narihiro Owada, Shinichiro Nakamura, Seishin Nakagawa, Shin Sato

#### 1. はじめに

阿蘇火砕流堆積物は、九州地方北部に分布する溶結凝灰岩類から構成され、約 27Ma~9Ma における 4 つの噴火サイクル (Aso-1~Aso-4) に伴い形成されたことが知られている。

各噴火サイクルの堆積物は、溶結度の変化や含有物の特徴 (組成・年代等)、ローム質降下堆積物の挟み層の分布から層序関係を判定する。また、各噴火サイクルによって透水特性や力学特性といった岩盤の工学的性質が異なることが知られている (佐藤・石橋 (2004)<sup>1)</sup> 等)。阿蘇火砕流堆積物分布域の地質調査や構造物施工時において、各サイクルの判別を行うことは、工学的性質の違いを把握するのにも有効であると考えられる。しかしながら、実際の構造物施工時や災害発生時において地質判定に迅速性が求められる場合に、これらの試料を肉眼観察のみでどのサイクルに属するものであるかを即座に判別することは、経験の少ない技術者にとっては困難な事象である。

本研究では、多くの波長情報を有するハイパースペクトルデータ (以下、HS データ) を阿蘇火砕流堆積物から取得し、深層学習を用いた判別モデルにより、各サイクルの判別を行ったので、その結果を報告する。

#### 2. 方法

##### 2.1 撮影対象と使用機材

本研究で用いた阿蘇火砕流堆積物の試料は、噴火サイクルのうち Aso-1, Aso-2, Aso-3 を対象とし、既往業務において取得したボーリングコアを用いた (図-1)。Aso-4 は、乳白色を呈する軽石を特徴的に含有し、肉眼観察で判別が可能と判断し、対象から除外した。

HS データ取得するために、本研究ではハイパースペクトルカメラ (Spectral Imaging 社・Specim IQ) を使用した。Specim IQ は対象物からの光を 400~1,000nm までの波長帯域で 204 のスペクトルバンドに分光して HS データを取得することが可能な機材である。

Aso-1, Aso-2, Aso-3 の試料に対して、撮影箇所を各々 3 地点 (計 9 箇所) 抽出および撮影し、それらの HS データを取得した。撮影は、暗所にてハロゲンライト (500W) を光源として左右に設置し、露光時間はすべての試料で 50ms とした。

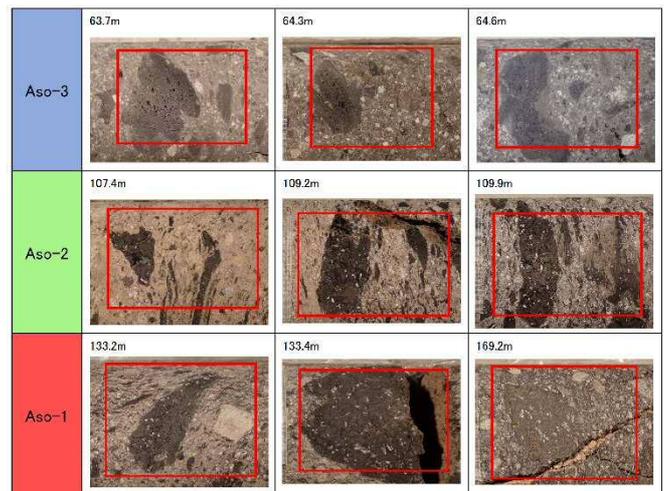


図-1 撮影対象の阿蘇火砕流堆積物 (赤枠：解析箇所)

#### 2.2 深層学習による AI 画像認識

##### 1) 畳み込みニューラルネットワーク (CNN)

HS データによる各サイクルの判別を行うにあたり、深層学習による AI 画像認識を用いた手法を検討した。今回はその他の岩盤の事例で実績のある、畳み込みニューラルネットワーク (CNN: Convolutional Neural Network) を用いて、本研究に適用可能か検討した。

##### 2) 学習条件

CNN を利用した学習モデル (CNN 判別モデル) の作成に使用した HS データの総数は 114,572 個であり、そのうちそれぞれのデータセットに対し無作為に 20% をテストデータ、残りのデータを学習データとした。また、学習データのうち、10% をバリデーションデータ、90% をトレーニングデータとした。そして、畳み込み層は 3 層及び 5 層で学習を行い、各モデルの学習回数は 200 回とした。

#### 3. 室内撮影データの詳細検討結果

##### 3.1 各試料におけるスペクトル

図-2 に代表スペクトルグラフを示す。縦軸は輝度、横軸はスペクトルの波長 (nm) を表している。上図は各試料のデータを平均化し、1 本の代表スペクトルとして表現したグラフ、下図はそのグラフを正規化処理したものである。全試料のスペクトルの傾向は概ね類似している。

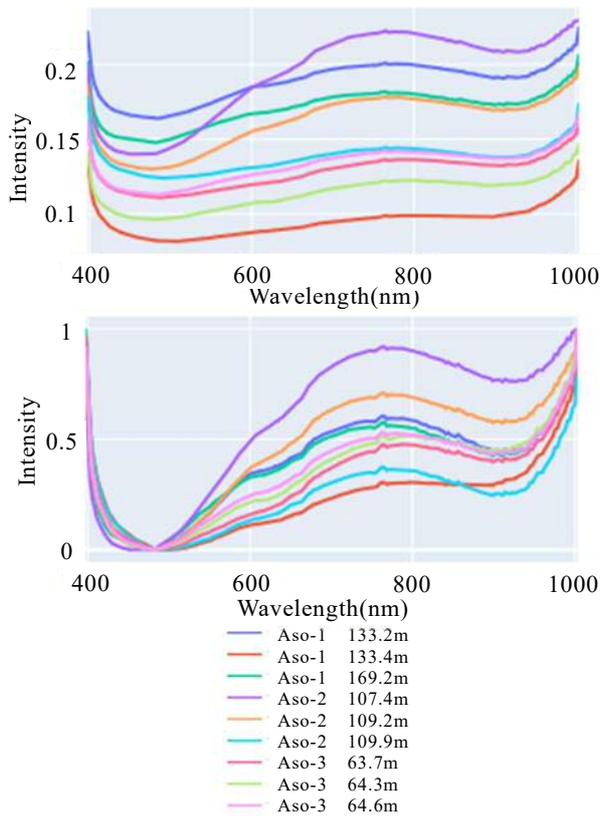


図-2 各試料の代表スペクトル

### 3.2 CNN 判別モデルを用いた判別結果

CNN 判別モデルを用いて、本研究における HS データの判別精度を検証した。

畳み込み 3 層の学習モデルの判別精度は、トレーニングデータ:93.31%, バリデーシオンデータ:92.37%, 学習を行っていないテストデータ:92.36%であった。

畳み込み 5 層の学習モデルの判別精度は、トレーニングデータ:94.24%, バリデーシオンデータ:92.26%, 学習を行っていないテストデータ:93.86%であった。

### 3.3 判別結果の可視化

本研究では、CNN モデルの判別結果を可視化できる WEB アプリ (共著者・大和田済熙 開発, IRO-MIE) を使用した。本アプリは、画像上で指定した範囲のスペクトルを描写し、判定結果を色ごとに表示する機能を有する。本研究における WEB アプリを使用した判別結果を図-3 に示す。なお、判定結果の可視画像はピクセルごとに、Aso-1 は赤色、Aso-2 は緑色、Aso-3 は青色系統で表現している。

既往研究<sup>2)</sup>において化学組成が類似していることが指摘されている Aso-1 と Aso-2 は、判定数でも同様な傾向を示すが、スコリア部の色調で判別が可能である。Aso-3 はスコリアや基質部で満遍なく青色が表示されており、他と区別が可能である。可視画像上で、全体に各々の色別表示を認識できる結果が得られた。

## 4. 野外撮影データでの実証

HS データを野外で取得することを目的として、野外

で撮影したデータ (撮影時気象:曇り, 露光時間 3ms) に対しても判別モデルを作成し、各サイクルの判別が可能かどうか検証した。その結果を図-4 に示す。

画一的ではあるが、大まかに各サイクルの色別表示を認識できる結果が得られた。3.3 章に示したように各組織が明瞭に識別されないのは、室内と異なる画角や光源(太陽光)を用いたことに起因すると推定される。

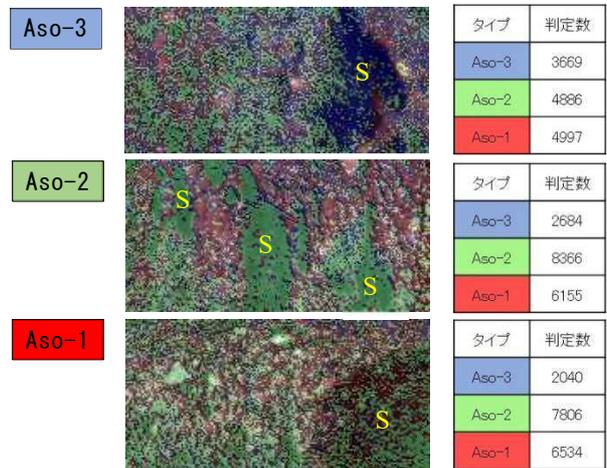


図-3 各試料判定結果の可視化 (S:スコリア)

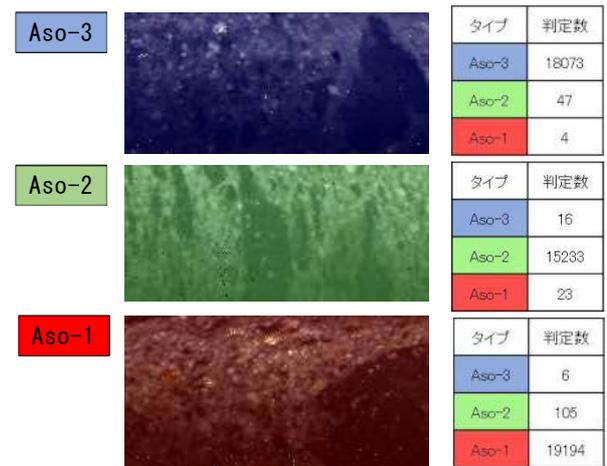


図-4 野外撮影データの判定結果

## 5. まとめ

本研究では、室内撮影による HS データと AI 画像認識から 90%以上の精度で阿蘇火砕流堆積物 Aso-1~Aso-3 を判別し、その結果を色別表示することができた。屋外撮影でのデータに関しては、撮影方法の再検討やそれに伴う解析モデルの再構築が必要である。

## 文献

- 1) 佐藤良・石橋昌三 (2004), 阿蘇火砕流堆積物の透水性状について, 全国地質調査業協会「技術 e-フォーラム 2004」講演要旨集.
- 2) A.G.Hunter (1998), Intracrustal controls on the coexistence of Tholeiitic and Calc-alkaline magma series at Aso Volcano, SW Japan, Journal of Petrology, Vol.39, pp. 1255-1284.

# 61. 安山岩地山を対象とした原石山調査事例

Case study of a quarry survey in an andesite groundmass

○吉田 至良, 田中慎吾, 西島正範(基礎地盤コンサルタンツ)

Noriyoshi Yoshida, Shingo Tanaka, Masanori Nishijima

## 1. はじめに

新たな採石場の候補地として、対象地山の地質分布等を把握し原石山としての妥当性について検証する必要がある。原石山の岩盤性状の条件として、1.現採石場と同じ安山岩であり、2.未風化～弱風化の硬質な岩盤であることが挙げられ、3.断層破砕帯及び変質帯の有無の確認も必要であった。そこで、上記の条件を満たす候補地地山について調査・検討を行った結果、調査地全域ではリニアメントは明瞭ではなく、断層破砕帯や変質帯の存在は確認されないものの、調査地南部では崩壊地形が発達し、崩積土が厚く堆積すると想定され、原石山として不適切であることが判明した。一方、北部では地表付近より硬質な安山岩が露岩しており、風化層が薄いと想定され、採石場候補地として適合していることが判明した。

本稿は、原石山候補地の地山を対象に分布地質や性状について明らかにし、候補地としての妥当性の検証および今後の調査計画についてとりまとめたものである。

## 2. 原石山の条件

原石山(砕石場)候補地としての地質的条件を以下に示す。

- ・ 現採石場と同じ安山岩が対象
- ・ 未風化～弱風化の硬質な岩盤が対象
- ・ 断層破砕帯及び変質帯なし
- ・ 亀裂は多くても可(クラッシュラン)
- ・ 賦存量確保
- ・ 土砂、廃棄岩が少ない

なお、現採石場では緑灰色安山岩(Ag)が分布しており、ハンマーの強打で火花を出しながら割れる程度と硬質である。また、節理面が発達している(写真-1)。



写真-1 旧採石場に分布する安山岩

旧採石場の材料試験(コンクリート用砕石)によると、表乾燥密度(基準 2.50g/cm<sup>3</sup>以上)、吸水率(基準 3.0%以下)、すり減り減量(基準 40.0%以下)、安定性試験(基準 12.0%以下)を満足している。<sup>1)</sup>

## 3. 調査の手法

原石山調査のフローを図-1に示す。今回の調査では、文献調査等・地表地質踏査・概略検討を実施した。



図-1 原石山調査フロー

## 4. 調査結果

既存資料調査では調査地には輝石角閃石安山岩が分布し<sup>2)</sup>、対象地を通る活断層やリニアメントは確認されず大規模な破砕帯はないものと想定された。

地表地質踏査では、対象地は比較的急峻であり、斜面裾部～中腹部にかけては傾斜 20°程度と比較的緩やかである。中腹部～上部にかけては 40°程度と比較的急である。

分布地質は、上位から沖積層(al)、崖錐堆積物(dt)、緑灰色安山岩(Ag)、自破砕安山岩(br)、緑灰色安山岩(Ag)、暗灰色安山岩(An)の順に分布している(表-1)。

対象地の北側で見られる安山岩は硬質で板状節理が発達している緑灰色安山岩(Ag)からなる(写真-2)。一方、南側で見られる安山岩は暗灰色安山岩(An)からなり、全体的にややガラス質である。また、板状節理は

表-1 地質層序表

記号	地層	記事
al	沖積層	調査地区山麓の東側縁辺域に谷底平野を形成して分布するシルト混じり砂礫主体の軟弱層。
dt	崖錐堆積物	地区山麓を解析して流下する小規模渓流やその支流沿い、斜面縁辺域に広範囲に分布する斜面堆積物で、径1cm～数10cmの岩屑～岩塊主体の礫質土砂。
Ag	緑灰色安山岩	・ 緑灰色を呈するやや珪質の安山岩。 ・ 調査地区の北側山麓に分布する。 ・ 一般に北東-南西走向で北西側(20-45度前後)傾斜する厚板状の板状節理が数cm～20cm前後の間隔で挙がる場合が多い。 ・ 岩片は硬いが径数cmの大きさに割れやすい。
br	自破砕安山岩	・ 径数cmの角礫状岩片の集合体を呈する火山砕屑岩で、安山岩溶岩流の基底部等に挟在する自破砕溶岩に相当すると推測される。 ・ 調査地区の北側山麓内の露頭では、緑灰色安山岩に挟在する北東-南西走向で北西側に35度傾斜する厚さ約4mの自破砕安山岩が観察される。 ・ 緑灰色安山岩で観察される板状節理の走向傾斜は、この自破砕安山岩層の走向傾斜に調和的であり、板状節理構造は地層堆積面構造を反映したものである可能性が推測される。 ・ この自破砕安山岩は、岩片とマトリクスが容易に分離できない程度で固結している。
An	暗灰色安山岩	・ 暗灰～黒色を呈する微細斑晶質でややガラス質の安山岩。 ・ 調査地区の南側山麓に分布している。 ・ 一般に低角度の板状節理は伴わず、高角度の不規則節理を伴い数cm～30cm前後の大きさに割れやすい。 ・ 岩片は硬いが岩体としてはやや風化しやすい傾向が推測される。

伴わず、高角度の不規則節理を伴っている。なお、調査地南部では崩壊地形が発達している(写真-3)。

対象地中腹部に緑灰色安山岩(Ag)中に自破砕安山岩(br)が確認され、層状に連続して確認することができた。この自破砕安山岩は、岩片とマトリクスが容易に分離できない程度硬く固結している(写真-4)。



写真-2 緑灰色安山岩(Ag)の露頭状況



写真-3 暗灰色安山岩(An)の露頭状況



写真-4 自破砕安山岩(br)の露頭状況

## 5. 考察

図-2, 3 に当該地域の地質平面図と地質断面図を示す。調査対象地では、リニアメントは明瞭ではなく、断層破碎帯や変質帯の存在は確認されないものの、調査地南部では崩壊地形が発達し、崩積土が厚く堆積すると想定され、原石山として不適切であることが判明した。ただし、地下深部の硬質な岩盤部では採石場の原石として有望の可能性が考えられる。一方、北部では地表付近より硬質な安山岩が露岩しており、風化層が薄いと想定され、採石場候補地として適合している

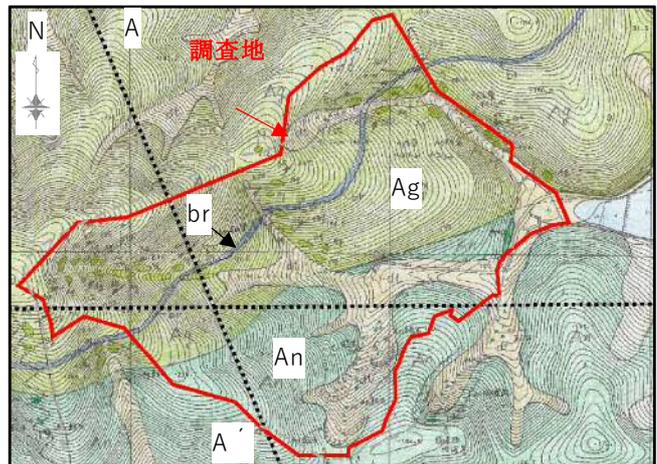


図-2 地質平面図

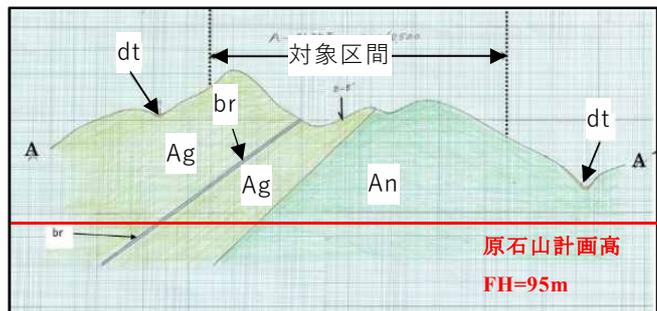


図-3 地質断面図

ことが判明した。ただし、当該地層は、北に向かって傾斜しており、原石山計画高付近では分布地質が変化する可能性が考えられる。また、自破砕安山岩(br)が層状に連続して確認され、岩盤自体は硬質で固結しているが、角礫状で軟質化しやすい岩盤であり、廃棄岩に区別されると考えられる。

今後、表-1 のフローに示す詳細調査(弾性波探査、ボーリング調査)により風化層厚、軟質部の挟在状況等の岩盤状況を把握していく。更に、岩石試験や材料試験により化学的有害物質の有無等を確認する。

## 6. まとめ

原石山の条件を踏まえて、既往資料調査及び地表地質踏査を実施した結果、対象地の安山岩は砕石に適していると判断した。今後、詳細な地質、岩盤状況を把握するための原石山調査を進めていくとともに、原石山の選定ポイント(立地条件、法規上の条件、用地条件、周辺環境条件等)も含め総合的に検討していくことになる。

## 文献

- 1) コンクリート用砕石の試験結果一覧表：コンクリート用砕石の試験結果報告書，小西砕石株式会社，2018。
- 2) 折尾地域の地質：地域地質研究報告，地質調査所，1993

## 62. 橋梁基礎における亀裂の発達した岩盤の

### 強度定数設定に関する検討事例

A Case Study on Setting Strength Parameters for Cracked Bedrock in Bridge Foundations

○佐藤静流, 中川智博, 夏目隆弘 (基礎地盤コンサルタンツ)  
Shizuru Sato, Tomohiro Nakagawa, Takahiro Natsume

#### 1. はじめに

岩盤の強度定数は、一般的に原位置での試験や室内試験により求めることが最も望ましいとされている。しかし、実際には地質調査において数多くの試験を実施することは調査費の面からも困難な場合が多く、室内試験の際も供試体となるボーリングコアの状況によっては実施できない場合がある。このような時は、N値からの推定式にて算出する方法や一般値との比較を行うことが多い。また、室内試験結果を用いる際も、地山の亀裂や断層、将来の風化等を考慮して、設計上安全側となるように設計値を決めなければならない。

本稿では、河川を横断する橋梁基礎の設計に際し、当該地に分布する亀裂の発達した砂岩・粘板岩及びその互層の強度定数について、PS検層によって得られた地山の弾性波速度と室内試験によって得られた供試体の超音波伝播速度を用いて亀裂係数及び低減係数を求め、N値からの推定値とも比較し、亀裂の影響を考慮した強度定数の設定を行った事例を報告する。

#### 2. 調査地の地質概要

本調査地には、主に中・古生代の堆積岩類が分布し、河川に沿って橋梁が計画されている。

現地踏査結果及び橋台・橋脚計画箇所にて採取されたボーリングコアの観察結果より、当該地に分布する岩盤は、砂岩・粘板岩及びその互層から構成されていることが確認された。主な特徴として、砂岩部は岩片自体は比較的硬質であるが、全体に10cm程度の間隔で亀裂が発達しておりブロック状を呈していた。また、粘板岩等の泥質部については、細かな亀裂が多く、破碎し細片状になっているものがほとんどであった。



写真-1 調査地に分布する露頭と亀裂の発達した砂岩・粘板岩の代表的なコア写真

一般的に亀裂を含む岩盤の強度定数は三軸圧縮試験により求めることが基本であるが、コアの亀裂状況等によっては橋梁箇所での同一条件となる三軸圧縮試験

用の供試体を複数得ることが困難であること、室内試験に用いる供試体は亀裂のない良質なものであるため、必ずしも地山を代表としないことが多いことなどから、室内試験結果を設計に用いる場合には地山の風化、亀裂等の影響を適切に評価する必要があった。

#### 3. 岩盤における強度定数の設定方法

このように三軸圧縮試験の実施が困難な場合にはピーク強度を間接的に評価する方法を用いることが考えられる。これは無亀裂状態の強度定数を亀裂係数により低減させ、間接的に亀裂の影響を考慮した強度定数を算出する方法である。算出のために実施した原位置試験及び室内試験は以下の通りである。

《原位置試験》	《室内岩石試験》
・PS検層	・岩石の一軸圧縮試験
(ダウンホール方式及び	・岩石の圧裂引張試験
サスペンション方式)	・超音波伝播速度試験

また、強度定数の設定方法を以下に示す。

①岩盤の一軸圧縮強度 ( $q_u$ ) 及び圧裂引張強度 ( $T_u$ ) の結果をもとに、式-1・式-2より無亀裂状態の強度定数 ( $c_0 \cdot \phi_0$ ) を求める。

$$c_0 = (1/2) \times (q_u \times T_u)^{0.5} \quad \text{式-1}$$

$$\phi_0 = \sin^{-1} \{ (q_u - T_u) / (q_u + T_u) \} \quad \text{式-2}$$

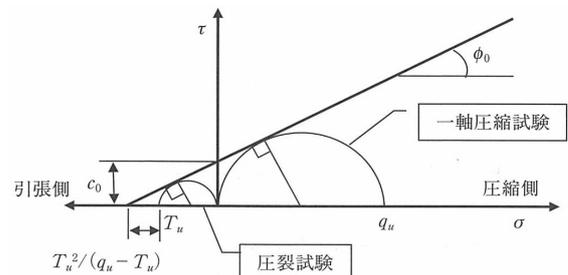


図-1 一軸圧縮試験及び圧裂引張試験に基づく  $c_0$ ,  $\phi_0$  の求め方<sup>1)</sup>

②原位置におけるPS検層にて得られた地山の弾性波速度 ( $V_p$ ) 及び室内での超音波伝播速度試験により得られた供試体の弾性波速度 ( $V_{p0}$ ) を用いて式-3より亀裂係数 ( $C_r$ ) を算出する。

$$C_r = 1 - (V_p / V_{p0})^2 \quad \text{式-3}$$

③ 図-2を参照し、低減係数 (Kc・Kφ) を求める。

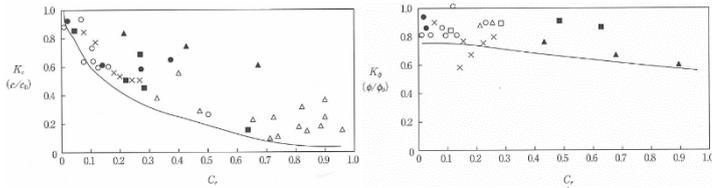


図-2 Kc ~ Cr 及び Kφ ~ Cr の関係<sup>2)</sup>

④①にて算出した無亀裂状態の強度定数(c<sub>0</sub>・φ<sub>0</sub>)を式-4・式-5によって低減し、亀裂の影響を考慮した強度定数を算出する。

c = K<sub>c</sub> × c<sub>0</sub> (式-4)      φ = K<sub>φ</sub> × φ<sub>0</sub> (式-5)

岩盤の強度定数算出結果を表-1に示す。

#### 4. 考察

表-1に示した強度定数の算出結果を見てみると、全体的に亀裂係数(C<sub>r</sub>)が0.8~0.9に集中していることから、岩石試料(供試体)と地山の弾性波速度の差が大きく、強度定数の低減に与える影響も大きいことが分かる(図-3)。これは岩石試料(供試体)そのものが緻密で堅硬であるのに対して、岩盤全体でみると潜在的な亀裂が多く発達していることに影響されているものと考えられる。

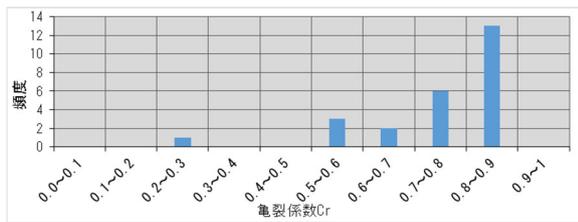


図-3 亀裂係数の頻度分布

また、算出した強度定数とN値からの推定式により算出した場合の値及び岩級区分別の測定例(表-2)と比較した。

《砂岩・礫岩・深成岩の推定式》<sup>2)</sup>

c = 15.2 × N<sup>0.327</sup> (式-6)      φ = 5.10 Log N + 29.3 (式-7)

《泥岩・凝灰岩・凝灰角礫岩の推定式》<sup>2)</sup>

c = 16.2 × N<sup>0.606</sup> (式-8)      φ = 0.888 Log N + 19.3 (式-9)

表-1 強度定数算出結果とN値からの推定値との比較

地層名(岩級)	設計N値	一軸圧縮強度		圧裂引張強度		無亀裂状態のせん断抵抗角		無亀裂状態のせん断抵抗角		地山弾性波速度		供試体の弾性波速度		亀裂係数 Cr	低減係数		亀裂を考慮した粘着力①		推定式による粘着力②		粘着力比率①:②	亀裂を考慮したせん断抵抗角①		推定式によるせん断抵抗角②		せん断抵抗角比率①:②
		σ <sub>u</sub> kN/m <sup>2</sup>	T <sub>u</sub> kN/m <sup>2</sup>	c <sub>0</sub> kN/m <sup>2</sup>	φ <sub>0</sub> °	V <sub>p</sub> m/s	V <sub>p0</sub> m/s	K <sub>c</sub>	K <sub>φ</sub>	c kN/m <sup>2</sup>	φ °	c kN/m <sup>2</sup>	φ °		φ °	φ °										
																	平均値	平均値	平均値	平均値						
砂岩(CL)	170	31750	2828	4738	57	2150	5344	0.84	0.05	0.59	237	485	82	1:0.17	33	31	55	1:1.77								
		78280	2828	7439	68	2060	5508	0.86	0.04	0.59	298															
		78280	2828	7439	68	2060	4439	0.78	0.07	0.60	521															
		17360	7766	5806	22	2150	4049	0.72	0.09	0.60	522															
		17360	7766	5806	22	2150	5067	0.82	0.05	0.60	290															
		10130	1597	2011	47	2150	2541	0.28	0.32	0.72	644															
		10130	1597	2011	47	2150	3304	0.58	0.15	0.63	302															
		159000	7497	17263	65	2170	5741	0.86	0.04	0.59	691															
		159000	7497	17263	65	2170	5465	0.84	0.05	0.59	863															
		194600	8490	20323	66	2170	5724	0.86	0.04	0.59	813															
砂岩(CM)	300	194600	8490	20323	66	2170	5634	0.85	0.04	0.59	813	813	98	1:0.12	39	39	58	1:1.49								
		63380	4461	8407	60	2420	5813	0.83	0.06	0.60	504															
		63380	4461	8407	60	2420	5810	0.83	0.06	0.60	504															
粘板岩・混在岩(CL)	258	22020	3838	4597	45	2310	5409	0.82	0.06	0.60	276	402	469	1:1.17	27	31	24	1:0.77								
		22020	3838	4597	45	2310	5217	0.80	0.07	0.60	322															
		23750	2390	3767	55	1960	5215	0.86	0.04	0.60	151															
砂岩粘板岩互層(CL)	243	40140	9670	9851	38	2120	4900	0.80	0.07	0.60	690	420	452	1:1.08	23	28	24	1:0.86								
		23750	2390	3767	55	2780	4368	0.59	0.14	0.65	527															
		38920	2970	5376	59	2460	5070	0.76	0.08	0.61	430															
		22840	3016	4150	50	3100	4925	0.60	0.14	0.65	581															
		22840	3016	4150	50	3100	4677	0.56	0.15	0.70	622															
		22840	3016	4150	50	3100	4619	0.55	0.15	0.70	622															
		156000	7060	16593	66	2730	5238	0.73	0.05	0.60	830															
		156000	7060	16593	66	2730	5398	0.74	0.05	0.60	830															
		91670	8300	13792	57	2890	6280	0.79	0.07	0.60	965															
								Cr平均値		0.74																
						Cr中央値		0.80																		

表-2 強度定数の測定例<sup>1)</sup>

岩盤分類	粘板岩(ダムサイトの例)				花崗岩(本四連絡橋基礎の例)			
	c (kN/m <sup>2</sup> )		φ (°)		c (kN/m <sup>2</sup> )		φ (°)	
	範囲	代表値(平均)	範囲	平均	範囲	代表値	代表値	
硬岩	B	2250 ~ 2750	2500	40 ~ 50	45	1500 ~ 2500	1500	45
	C <sub>H</sub>	1750 ~ 2250	2000	35 ~ 45	40	1000 ~ 2000	1000	40
	C <sub>M</sub>	750 ~ 1750	1250	35 ~ 45	40	500 ~ 1000	500	40
軟岩	C <sub>L</sub>	250 ~ 750	500	30 ~ 40	35	100 ~ 1000	100	37
	D	100以下	0	20 ~ 30	25	0 ~ 500	0	30 ~ 35

粘着力について、粘板岩及びその互層ではN値からの推定値や一般値に近い値が得られた。一方、砂岩では推定値よりもかなり大きな値となった。これは推定式では砂岩と粘板岩(泥岩)のように岩種で推定式が明確に区分されているのに対し、亀裂係数を考慮した今回の算出方法では岩種による区分はないため、このような差が生じたものと考えられる。

せん断抵抗角の算出値については、粘板岩及び互層にて推定値よりもやや大きい値が得られたが、一般値と比較すると同程度と言える。また、砂岩については推定値よりも低い値となっている。

#### 5. まとめ

本調査では、N値からの推定値ではなく、地層全体の亀裂を考慮した算出値をもとに地盤定数を設定した。また、砂岩部の粘着力に着目しても分かるように、使用した算出方法により、強度定数に差が生じることを改めて確認することができた。特に岩盤の種類や状態に関わらず、せん断抵抗角は30~50°の範囲にあるのに対し、粘着力は10~1000kN/m<sup>2</sup>の間にバラついていることから、粘着力に大きな重点が置かれることに注意し、設計を行っていく必要がある。

#### 文献

- (社)日本道路協会(2021.10):斜面上の深礎基礎設計施工便覧, pp.113-118.
- 東日本高速道路(株), 中日本高速道路(株), 西日本高速道路(株)(2016.8):設計要領第二集橋梁建設編, pp.4-8-4-9.

## 63. 自然災害伝承碑に関する地図情報の整備と活用の可能性

Development of geospatial data on “Natural Disaster Monument” and its utilization possibility

○栗栖悠貴, 宮下妙香 (国土地理院)

KURISU Yuki, MIYASHITA Taeka

### 1. はじめに

近年激甚化・頻発化する自然災害に備えるためには、地域の災害に対する危険性を我が事として理解しておくことが重要である。国土地理院では、地域の危険性について従来から土地の成り立ちに関する地理空間情報（地形分類等）を通して情報発信してきた。しかし、中央防災会議防災対策実行会議「令和元年台風第19号等を踏まえた水害・土砂災害からの避難のあり方について（報告）」において「詳細な地形分類情報は、例えば地形的に洪水となる可能性の高い低地等、災害リスクを示すのに極めて有効であるが、専門性が高く読み解くための学習が必要」と指摘されている。そこで、身近な災害への理解を深め、土地の成り立ちに対する理解促進による地域の防災力向上に貢献することを目的として、国土地理院では自然災害伝承碑に関する地図情報の整備について着実に取り組んでいる。

自然災害伝承碑は、過去に発生した自然災害の教訓を後世に伝えようと先人たちが残した恒久的な石碑やモニュメントで、「過去に発生した自然災害に関する発生日月、災害の種類や範囲、被害の内容や規模」が記載されたものである。そのため、地域に暮らす住民が災害の危険性を身近に感じやすい有力なツールになる。本報告では、国土地理院が取り組む自然災害伝承碑に関する地図情報の整備の意義や防災地理教育支援等への活用の可能性について紹介する。

### 2. 自然災害伝承碑の地図情報の整備

国土地理院では、地図・測量分野から地域の防災力向上と自然災害による被害の軽減を目指し、地域住民が過去の教訓を踏まえた的確な防災行動をとれるよう、2019年3月に地図記号「自然災害伝承碑」を制定し、同年6月19日から「自然災害伝承碑」の情報をウェブ地図「地理院地図」（<https://maps.gsi.go.jp/>）に掲載するとともに、同年9月から2万5千分1地形図に掲載している<sup>1)</sup>。さらに、2021年11月29日から全国の防災に役立つ情報を閲覧できる「ハザードマップポータルサイト」（<https://disaportal.gsi.go.jp/>）にも自然災害伝承碑の情報を掲載することで、想定される自然災害リスクに関する地理空間情報と重ね合わせることを可能とした。

#### 2.1 関係機関との連携

自然災害伝承碑の地図情報を整備するにあたって、整備した情報が適切に地域住民に伝わり後世に引き継

がれるためには、地域の防災計画策定に関わる機関と密な連携を図ることは重要である。そのため、自然災害伝承碑を地理院地図等に登録する際は、適宜都道府県や地方整備局等にもご協力を頂きながら、必ず市区町村に管内の自然災害伝承碑を把握して頂き、国土地理院へ申請していただく流れで取り組んでいる。（図-1）。



図-1 自然災害伝承碑の申請の流れ

#### 2.2 地理院地図で公開する自然災害伝承碑の情報と整備状況

地理院地図から公開している自然災害伝承碑には、7つの属性情報（表-1）が含まれており、自然災害伝承碑のアイコンをクリックすると閲覧することが可能である（図-2）。

表-1 自然災害伝承碑の属性情報

1) 碑名	自然災害伝承碑の名称
2) 災害名	同碑の対象となっている災害名
3) 災害種別	同碑の対象となっている災害の種類
4) 建立年	同碑が建立された年
5) 所在地	同碑の所在地
6) 伝承内容	碑文に記載された内容に死者数や建物被害など被害の規模を示す情報等を補足し、100字程度に要約した情報
7) 写真	同碑の写真

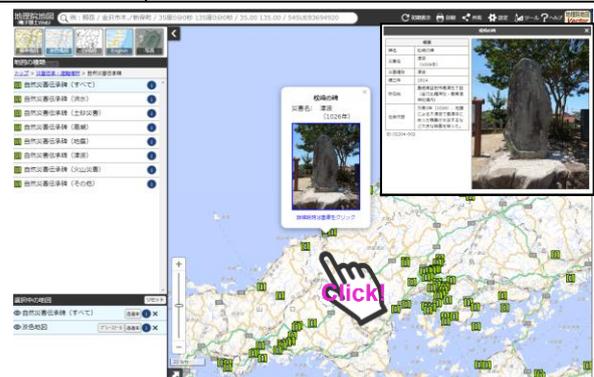


図-2 地理院地図で閲覧できる自然災害伝承碑の属性

国土地理院では、継続的に自然災害伝承碑の地図情報を整備し、2022年7月28日時点で426市区町村1464基を掲載した（図-3）。



図-3 自然災害伝承碑の掲載数の推移

### 2.3 活用促進に向けたオープンデータ化

身近な地域の自然災害の危険性を我が事として捉えるためには、多様な場面で自然災害伝承碑の情報を目にするのが重要である。国土地理院では、認知度向上・活用促進を図るため、2020年8月21日より自然災害伝承碑の情報を GeoJSON, CSV 形式のダウンロード可能データとして公開した<sup>1)</sup>。

## 3. 自然災害伝承碑の活用の可能性

自然災害伝承碑は身近な地域の危険性を実感しやすい地図情報であるため、地域の防災力向上に資する活用が期待される。ここでは、次の3つの可能性について言及する。

### 3.1 防災関係機関の取組における活用

日本における防災計画の根幹となる防災基本計画（令和4年6月）において、災害教訓の伝承のため「災害に関する石碑やモニュメント等の持つ意味を正しく後世に伝えていくよう努める」と明記されている。そのため、市区町村が策定する地域防災計画において防災意識の向上や防災知識の普及のための情報として自然災害伝承碑に関する記載がされ始めている。今後防災関係機関において、国土地理院が整備する自然災害伝承碑の地図情報の活用促進が期待される。

### 3.2 教育分野における活用

地域住民が防災意識を高め地域全体の防災力を底上げするためには、防災・地理教育が重要である。教育分野においては、防災・減災を事例とした系統的な学習と教科横断的な学習の教材として、自然災害伝承碑の活用が期待されている<sup>2)</sup>。そのため、国土地理院では自然災害伝承碑を教育現場で活用できるよう、「地理教育の道具箱」（<https://www.gsi.go.jp/CHIRIKYOUUIK/U/index.html>）に防災・地理教育支援コンテンツ（図-4）を整備し教育分野への支援をしている<sup>3)</sup>。さらに、教科書教材出版会社を対象とした「国土地理院の取り組む教育支援の説明会」を年に一度開催し、自然災害伝承碑をはじめとした防災・地理教育に有用なコンテ

ンツの普及促進に努めてきた成果として、一部の教科書において自然災害伝承碑が掲載された<sup>4)</sup>。今後 ICT を活用した教育が進むことから、地図情報として整備された自然災害伝承碑のより一層の活用が期待される。



図-4 自然災害伝承碑を用いた教育コンテンツ

## 3.3 地域学習における活用

自然災害伝承碑は過去の災害を身近に感じる有力なツールである。そのため、地域を知り地域への愛着を深める探索等の地域学習への活用が期待される。また、地質遺産がもたらした自然環境や地域の文化への理解を深め、科学研究や教育地域振興等に活用することにより、自然と人間との共生及び持続可能な開発を実現することを目的としたジオパークの取り組みの中で、身近な地域への理解を深めるための素材として自然災害伝承碑の活用が期待される。

## 4. おわりに

本報告では、国土地理院が取り組む自然災害伝承碑に関する地図情報の整備と防災・地理教育支援等への活用の可能性について紹介した。地図情報として整備する自然災害伝承碑をきっかけとして、地域の防災力向上の取り組みが促進され、自然災害の教訓が正しく後世に伝わることで持続可能な地域づくりにつながることを期待している。

## 文献

- 1) 安喰靖（2020）：自然災害伝承碑の取組，国土地理院時報，133，pp.71-76.
- 2) 迫有香（2019）：「防災・減災」を事例とした小中学校社会科・高等学校地理歴史科「地理総合」における単元開発—教科固有の系統的な学習と教科横断的な学習の往還を目指して—，広島県立教育センター，[http://www.hiroshima-c.ed.jp/pdf/research/shoin/r01\\_shoin/r01\\_102.pdf](http://www.hiroshima-c.ed.jp/pdf/research/shoin/r01_shoin/r01_102.pdf)，2022年6月閲覧.
- 3) 栗栖悠貴・後藤藤彦・田口綾子・研川英征（2020）：自然災害伝承碑を活用した防災・地理教育支援，2020年日本地理学会春季学術大会発表要旨集，p.134.
- 4) 栗栖悠貴・木村幸一・本嶋祐介（2022）：地理教育の充実に向けた国土地理院による教科書・教材会社への支援，2022年日本地理学会春季学術大会発表要旨集，p.61.

# 64. 自然災害伝承碑調査票とその活用

Natural disaster memorial monument investigation record and its utilization

○稲垣 秀輝 (株環境地質), 下村博之 (パスコ)  
Hideki Inagaki, Hiroyuki Shimomura

## 1. はじめに

近年、自然災害が多発し大きな社会現象になっている。このため国土地理院は、自然災害伝承碑を地形図に掲載することを始めた。そして、日本応用地質学会にとっても自然災害に対する対応の仕方が大きな課題となっている。また、自然災害は気象条件違いや地形・地質の複雑な我が国にあって、地域性があることも知られている。そこで、災害地質研究部会では、「災害碑から学ぶ地域災害」を進めて事例研究を行い、各災害碑の調査票を作成してきた。そして、自然災害伝承碑による地域災害の応用地質的対応やそのアウトリーチについて、全国に散らばっている会員を含めて地域災害を見直していくことで、地域の自然災害に対する防災・減災を応用地質学的に深めることを説明し、その成果を一般にアウトリーチしていくことを提案する。

## 2. 自然災害伝承碑

自然災害伝承碑は、国土地理院により 2020 年 8 月 21 日より公表され、2022 年 6 月 23 日現在の公開数は全国 415 市区町村 1402 基 (平均 3 基) となる。これらの資料は、市民への防災アウトリーチに役立っているが、自然災害の多い日本にあってまだまだ登録箇所は、少ないように思う。登録種別では、概ね津波 31%、水害 24%、土砂災害 23%、地震 13%、高潮 4%、火山 3%、雪害 2% の順になっている。

国土地理院と災害地質研究部会とは、自然災害伝承碑に関する意見交換を続けていて、第 1 回会議を 2022 年 4 月に行い、次回会議を 10 月に予定している。

## 3. 調査票の概要

災害地質研究部会では 2019 年頃から自然災害伝承碑の研究を始め、応用地質学として使える調査票をどのように作成するか検討し、表-1 に示した調査票 (表紙のみ示したが、記載の解説と添付資料として地形・地質・防災・減災の留意点など多くの資料が続けて記載されている) を研究部会 HP 上に公開している。つまり、単なる自然災害碑の説明だけでなく、地質・地形がどのように災害に関与したか、減災・防災にどのように役立つのかなどの応用地質学的要素を入れ込み会員も利用でき、市民にも興味をもってもらい、アウトリーチにつながる工夫がある。

また、自然災害伝承碑によって、応用地質的な新たな発見や研究が可能になるとも考えている。

表-1 自然災害伝承碑調査票の表紙

災害碑調査票					
支部	都道府県	File No.	O. 本部(関東) 4. 神奈川県	1	
名称 (碑名)		豆相大震災犠牲者霊位			
地理院地図への掲載	碑の材質	記載あり (ID:14382-006)	安山岩		
建立日	建立者	1931	—		
住所 (場所)		神奈川県足柄下郡箱根町箱根			
北緯	東経	35.196677	139.005203		
標高 (m) ※		730.5m			
災害の種類 (災害)	分類	北伊豆地震	1. 地震		
発災年月日	西暦	1930年11月26日			
	和暦	昭和5年11月26日			
災害碑の特徴 (碑への記載内容)		昭和5年(1930)11月26日の早朝、丹那盆地付近を震源としたマグニチュード7.3の北伊豆地震が発生した。この地震により土砂崩れが発生し、御料局(当時)の造林作業に従事していた人たちの宿舎が声ノ湖へ押し流され、8名が犠牲となった。			
碑建立の背景 (応用地質的考察)		1930年北伊豆地震の約90年後に、2019年の東日本豪雨災害の際、箱根で連続雨量1000mmを記録し、多くの斜面崩壊が発生した。本被災地でも複数の表層崩壊が発生し、崩壊土砂は石碑まで達した。崩壊の誘因は、地震と豪雨で異なるが、本斜面は危険であることを示している。また、その斜面崩壊の繰り返し性を示したものであり、ここではその間隔が100年程度の可能性がある。			
湘湘地域県政総合セン		神奈川県湘湘地域県政総合センターによる石碑の説明版:昭和五年(1930)年11月26日早朝丹那盆地付近を震源としたマグニチュード7.3の内陸直下型地震が発生しました。この地震に伴って北伊豆新層帯(主に箱根町新層、胆那新層、浮橋新層、大野新層、加殿新層、姫ノ湯新層)が動き、被害が出ました。この場所も地震による土砂崩れが発生し、当時この場所にあった御料局の造林作業に従事する人たちが寝泊まりする宿舎が声ノ湖へ押し流され、八名の尊い命が奪われてしまいました。地震の犠牲となった八名の霊をともむらうために、その翌年この場所に碑が建てられました。			
キーワード		北伊豆地震、直下型地震、箱根、地震、土砂災害、伝承、東日本豪雨災害			
作成者	作成(更新)日	稲垣秀輝	2022年6月1日		

## 4. 調査票の集計結果

8月19日現在の調査票の集計結果を作業中のものを含めて表-2 に示した。以下にその内容を説明する。

表-2 自然災害伝承碑調査票の集計結果 (8/19 現在)

都道府県	調査数	災害種別							地理院地図	
		1.地震	2.津波	3.洪水	4.土砂災害	5.火山災害	7.その他	掲載	非掲載	
01北海道	10	1		2	2		5		1	9
02青森県	1			1						1
04宮城県	2		2						2	
07福島県	2				2				1	1
08茨城県	3			3					3	
11埼玉県	2			2					2	
12千葉県	3	1	2						3	
13東京都	7	4		2	1				7	
14神奈川県	3	2			1				2	1
15新潟県	34			14	12		8		18	16
16富山県	18			13	4		1		8	10
17石川県	7	1		1	5				5	2
20長野県	7			1	6				5	2
21岐阜県	7	2			5				2	5
22静岡県	3				2			1		3
23愛知県	1				1				1	
32島根県	1		1						1	
33岡山県	1			1					1	
34広島県	23			6	17				14	9
36徳島県	29	3	14	4	6		2		18	11
37香川県	8	1		2	4		1		6	2
39高知県	3	1	1		1				3	
40福岡県	11	3		6	2				11	
41佐賀県	3	1			2				3	
42長崎県	1			1					1	
43熊本県	5	1	1		3				3	2
46鹿児島県	4			1			3		4	
99海外	1	1								1
総計	200	22	21	60	76	8	13		125	75

調査票は27都道府県および海外合わせて200件が作成されている(関西では一覧以外に110件の調査進行)。調査件数が多いのは、新潟県34件、徳島県29件、広島県23件、富山県18件、福岡県11件、北海道10件となっている。災害種別でみると、土砂災害76件、洪水60件、地震22件、津波21件、火山災害8件、雪害外13件となる。土砂災害が多いのが特徴である。地理院地図に掲載されている災害碑は125件で、4割ほどにあたる75件は部員に新しく調査した石碑である。

## 5. 箱根の自然災害伝承碑調査票の活用事例

自然災害伝承碑調査票の活用方法を示すために、箱根の調査事例について説明する。神奈川県では51基の登録があり、その中でも最も登録数の多い箱根町(10基)は令和元年東日本台風時に降雨最多の1000mmを記録し、土砂災害が多発した。

図-1は、国土地理院による自然災害伝承碑の位置である。10か所(K:関東大震災,G:アイオン台風,V:火山性地すべり,Z:北伊豆地震)あり、関東大震災(1923.9.1)が3基、アイオン台風(1948.9.16)が3基、早雲山の火山性地すべり(1953.7.26)が2基、北伊豆地震(1930.11.26)が2基となっている。

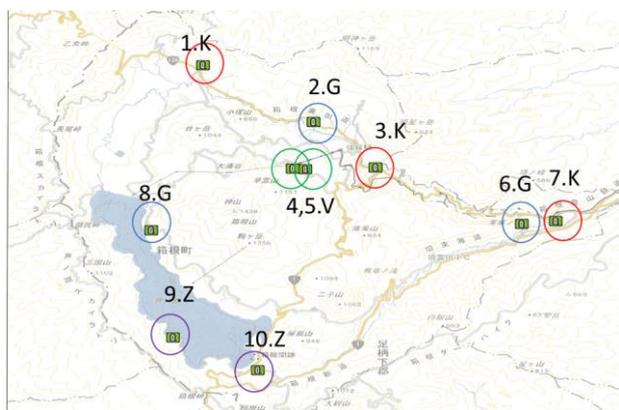


図-1 調査地域と自然災害伝承碑(地理院地図1)に加筆

関東大震災では、南関東の広域に土砂災害が発生し、箱根町でも被害が多かった。北伊豆地震は、活動した丹那断層に近い箱根町南側での石碑となっている。

自然災害伝承碑と東日本台風被害を比較すると被災個所が概ね重複しているように見える。たとえば、2.G箇所付近は、早川沿いの碓氷峠の斜面地でアイオン台風により早川の氾濫や明神岳で土砂崩壊が発生し、旧宮城野村では、死者5名、負傷者5名を出し、人家、道路、橋梁、耕地で未曾有の被害を受けたとしている。東日本台風でも早川の氾濫や箱根地区で最大の斜面崩壊が発生し、多くの土砂の流出や表層崩壊があった地区である。豪雨による災害危険個所が自然災害伝承碑によって確認できる。

また、3.K箇所付近では、関東大震災時蛇骨川に架かる八千代橋が落橋し、周辺の旅館が崖崩れにより谷底へ崩落、激震のため倒壊した。東日本豪雨でも箱根登

山鉄道の蛇骨川沿いでの流出土砂・洗掘や斜面崩壊があり、橋梁が流失したことから箱根登山鉄道が1年を超えるほどの長期の不通が続いた。地震や豪雨による土砂災害の起こりやすい共通の箇所がわかった。

さらに、9.Z箇所付近では、マグニチュード7.3の北伊豆地震が発生した。この地震により土砂崩壊が発生し、御料局(当時)の造林作業に従事していた人たちの宿舎が芦ノ湖へ押し流され、8名が犠牲となった。

ここでは、図-2に示した空中写真判読と追加現地調査を行った。その結果、北伊豆地震時の崩壊は谷の谷頭部で規模が大きく谷出口にあった宿舎を芦ノ湖まで流し去ったことが初めて分かった。その後、1948.9.30の空中写真判読から、カスリン・アイオン台風で谷内に残った土塊の一部が流れ出したこともわかった。東日本台風でも規模は小さいが、再土砂流出や表層崩壊があった地点に自然災害伝承碑があった。このように、自然災害伝承碑をきっかけに北伊豆地震時の大崩壊地形を発見し、その後のカスリン・アイオン台風の再崩壊や東日本台風でも規模の小さい再崩壊が自然災害伝承碑地点で発生していたことが分かった。

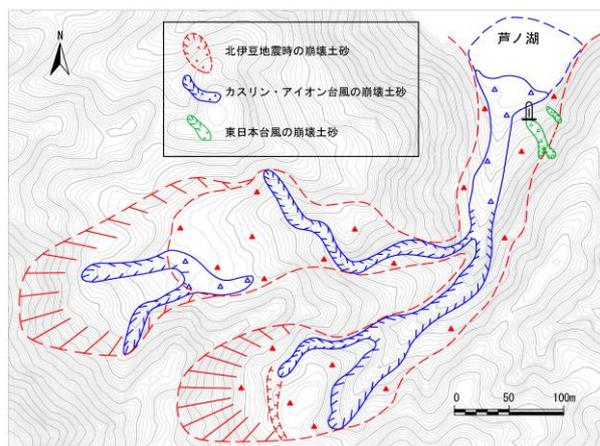


図-2 北伊豆地震・アイオン台風・東日本台風被害<sup>2)</sup>

## 6. 今後の展望

既往研究では、過去の災害記録から当時の災害をあぶり出し、今後の減災・防災に役立てている。今後、自然災害伝承碑周辺の災害を再認識することによって、応用地質的な新しい発見や減災・防災アウトリーチ活動に利用したい。具体的には、以下のアクションプランを考えている。①国土地理院との意見交換を続けながら、本活動を会員にも広げる。②学会誌への投稿による会員サービスや本の出版などによる学生や一般市民へのアウトリーチ。③自然災害の多い日本の防災文化の自然災害伝承碑を設置が遅れている世界に広げる。

## 参考文献

- 1) <https://www.gsi.go.jp/bousaichiri/denshouhi.html>
- 2) 稲垣秀輝(2022):箱根の自然災害伝承碑と令和元年東日本台風による土砂災害, 日本地すべり学会研究発表会講演要旨

## 65. 北海道における自然災害伝承碑と

### 北海道自然災害史研究ワーキンググループの取り組み

Research for Monuments of Natural Disasters in Hokkaido by the History Research Group

○倉橋稔幸（寒地土木研究所），北海道自然災害史研究ワーキンググループ  
Toshiyuki Kurahashi, Research Group for History of Natural Disaster in Hokkaido

#### 1. はじめに

北海道支部は、北海道応用地質研究会とともに令和3年6月に「北海道自然災害史研究ワーキンググループ」を設置し、北海道道内の自然災害伝承碑の調査及び研究に取り組んでいる。これまでに文献調査から北海道における84箇所の自然災害伝承碑を抽出した。

本報告では、文献調査によって得られた情報から災害碑の災害種別、年代別の推移等の傾向を分析し、その特徴について述べる。その他、ワーキンググループ（以下、WGと略す）の活動状況を紹介する。



図-1 第2回 WG 全体会議の様子

#### 2. 北海道自然災害史研究ワーキンググループの取り組み

本WGは、以下の活動に取り組んでいる。

- ①自然災害碑等の事例収集及び現地調査
- ②自然災害碑等に関する情報の集積、分析及び公開
- ③日本応用地質学会本部災害地質研究部会との連携
- ④機関誌、シンポジウム、講習会等による会員への情報発信
- ⑤防災教育としてのアウトリーチ活動
- ⑥その他の必要な事項

委員を支部及び研究会から公募で募集し、令和4年8月1日現在で総勢18名が鋭意活動に取り組んでいる。これまでに3回のWG全体会議を開催し(図-1)、調査の手順を明確化するためのマニュアルの作成を行った。また、3回の現地勉強会を開催し、火山・洪水・地震災害の災害碑を対象について合同で現地調査をおこない理解を深めた(図-2)。これらの活動状況を支部の機関誌「EPOCH」に掲載し、会員向けに情報発信している<sup>1)2)</sup>。

なお、本WGでは、石碑、モニュメント、完成・竣工記念碑、慰霊碑、鎮魂碑、顕彰碑等の災害碑のほかにも災害にまつわる行事や言い伝え等の伝承も対象としている。ただし、当面は、災害碑の調査を優先し、道北・道東・道央・道南の4つの地域に分割し、文献調査及び現地調査を進めている。



図-2 現地勉強会の様子（平成30年北海道胆振東部地震厚真町慰霊碑）

#### 3. 文献調査及び分析方法

インターネット、新聞記事、市町村史等の書籍を調査し、災害碑に関する災害時期・災害種別・建立時期・所在地及び伝承内容等の情報を収集した。それらを地域別の分布、災害種別における内訳及び建立時期の推移の傾向を分析した。

#### 3. 分析結果

##### 3.1 地域分布の傾向と特徴

文献調査の結果、道内に災害碑が86箇所に存在することが分かった。

地域別にみると、上川地方、渡島地方、檜山地方の順に多い(図-3)。市町村別にみると、上富良野町が9箇所で最も多く、江差町、美瑛町、奥尻町と続く。上

富良野町と美瑛町の災害碑の大半は十勝岳の火山災害によるものである。一方、江差町や奥尻町の災害碑は津波災害によるものである。このように分布に地域的偏りが認められる。その要因として、早くから和人が入植した道南地方に多いことのほか、文献調査で抽出された災害碑が道内 179 市町村のうち 50 市町村にとどまっていることなどが考えられる。

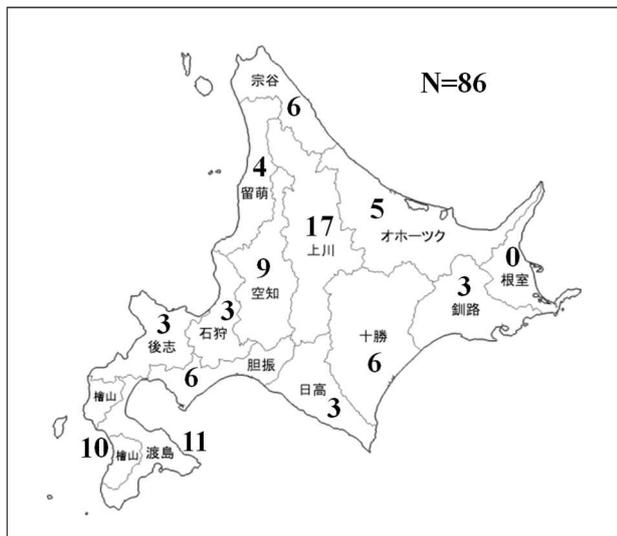


図-3 災害碑の地域別分布

### 3.2 災害種別の内訳

災害種別の内訳を図-4 に示す。最も多い災害種別は洪水及び火山災害である。両者ともに 22 件あり、およそ半数を占める。また、その他の災害の内訳は、竜巻・火災・台風（風倒木）・雪崩・海難である。

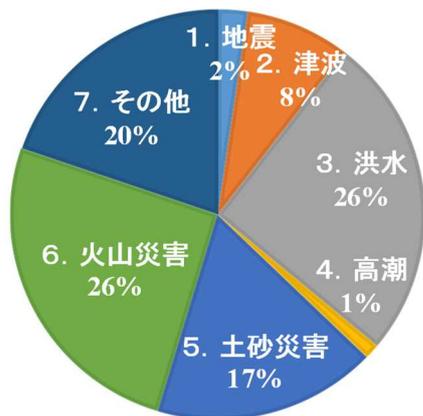


図-4 災害種別の内訳

### 3.3 建立時期の年代別傾向

図-5 に災害碑の 10 年ごとの建立件数の推移を示す。建立件数は 1920 年代に突出して多いものの、1868 年の明治維新を境に増える傾向にあり、北海道開拓の進展とともに増えてきたことがうかがえる。しかし、1970 年代をピークに減少に転じ、平成に入ると著しく減少した。なお、1920 年代に多いのは、1926 年の十勝岳大正噴火に伴う融雪泥流等の災害によるものである。

また、道内で最も古い災害碑は江差町の「淪没弧魂両縁塔」である。渡島大島噴火に伴う山体崩壊により発生したと考えられている、寛保津波(1741 年)の犠牲者の供養塔として建立された。ただし、ここでは渡島大島噴火の真偽について問わないことにする。このほかにも江戸時代の災害碑として、洞爺湖町に有珠山の文政噴火(1822 年)の災害碑がある。これら江戸時代の災害碑はいずれも和人の居留地における災害によるものである。一方、最も新しい災害碑は令和 3 年に厚真町に建立された「平成 30 年北海道胆振東部地震厚真町慰霊碑」である。

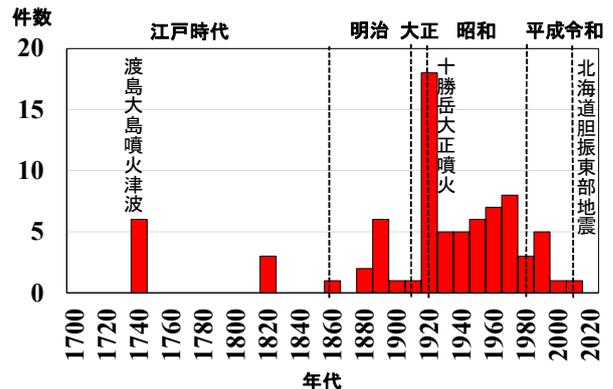


図-5 災害碑建立件数の推移

## 4. まとめと今後の課題

北海道における自然災害伝承碑の傾向と特徴は以下のようにまとめられる。

- 1) 北海道自然災害碑の分布は、上川、渡島、檜山地方の順に多い。早くから和人が入植した道南地方に多い傾向にある。
- 2) 北海道の自然災害伝承碑は明治以降に建立されたものが多い。
- 3) 災害種別は洪水及び火山災害が約半数を占める。

ただし、文献調査で抽出できたのは、道内 179 市町村のうち 50 市町村である。また、8 月 1 日時点で現地調査が終了したのは、84 箇所のうち未だ 9 箇所である。今後の調査の進展に伴い、さらに災害碑が増えることが期待される。また、今後、得られた成果や活動状況を支部の機関誌や支部ホームページ等でお知らせし、情報発信やアウトリーチ活動に取り組みたい。

## 文献

- 1) 倉橋稔幸 (2021) : 北海道自然災害史研究ワーキンググループの設立について, EPOCH, 日本応用地質学会北海道支部・北海道応用地質研究会, No.83, pp.20-23.
- 2) 倉橋稔幸 (2022) : 北海道自然災害史研究ワーキンググループの活動状況について, EPOCH, 日本応用地質学会北海道支部・北海道応用地質研究会, No.84, pp.10-12.

## 66. 東北地方の事例 気仙沼大島の津波”MEMORIAL”

Case study in Tohoku District – the Tsunami “MEMORIAL” of Kesen-numa Oshima island

○橋本修一（東北開発コンサルタント）、杉山直人（基礎地盤コンサルタント）、新山雅憲（ダイヤコンサルタント）  
Shuichi Hashimoto, Naoto Sugiyama, Masanori Niiyama

### 1. はじめに

東北地方三陸沿岸に数多く建設されている昭和8年三陸津波碑のうち、気仙沼大島に碑名は英語・碑文は漢文という奇妙な記念碑がある。島の地形考察も刻まれた碑文内容、建設にまつわる社会的背景、2011年の津波との対比でいくつか知見を得たので報告する。

なお、島名は大島であるが、全国に大島が複数存在することから、ここでは気仙沼大島と表現する。

### 2. 昭和三陸津波記念碑の組織的建設

宮城県内には30基の昭和三陸津波記念碑が自然災害伝承碑として登録されている（図-1）。これら『津波記念碑』の建設は、当時、新聞社に集められた巨額の義捐金の残余を資金として、資金を寄託された宮城県の指導によって一斉に行われている<sup>1)</sup>。

宮城県は罹災集落63か所を指定し当該町村長に記念碑の建設費を交付した。その際、県は建設標準を定め、被害状況や記録を表示することのほか、碑文・標語の参考案を示し、建設状況や精算書の提出を指示している。ただ、設置場所については『震嘯災害を記念するに最も適当なりと認むる場所』<sup>2)</sup>を選定することとし、町村長の裁量に任せられた形になっている。

### 3. 気仙沼大島の津波記念碑

気仙沼大島（旧大島村）には県が指定した3基とも現存している（図-2）。それらは津波到達地点を示す津波境標柱<sup>3)</sup>より標高が高い場所に設置されている。このうち②長崎の記念碑は長崎漁港背後の標高16.2mの道路脇に設置されている（図-3）。他の2基は県指定の碑名・標語、具体的な被災状況及び明治と昭和の被害数量比較を記しているが、長崎の碑だけ特異で、唯一無二の英語碑名、格調高い漢文碑文である。

碑の建設にかかわる背景は次のとおりである。当時の村長菅原熊治郎氏（在任1909-1941）は島の文化・経済・教育の発展に大きく貢献した人物で、また性格は豪放磊落、博覧強記の人であったとされる。碑の撰文者2名は大島出身の学識者で菅原氏と同世代であり、うち1名は菅原氏と共に2年間漢学塾に学んでいる<sup>3)</sup>。碑文は漢学の素養が反映されたものである。

3基の碑文内容を合わせ読むと、島内の津波被災状況と被災の歴史、津波伝達経路の地形的考察など一通り知ることが可能である。村独自に津波境標柱を多数

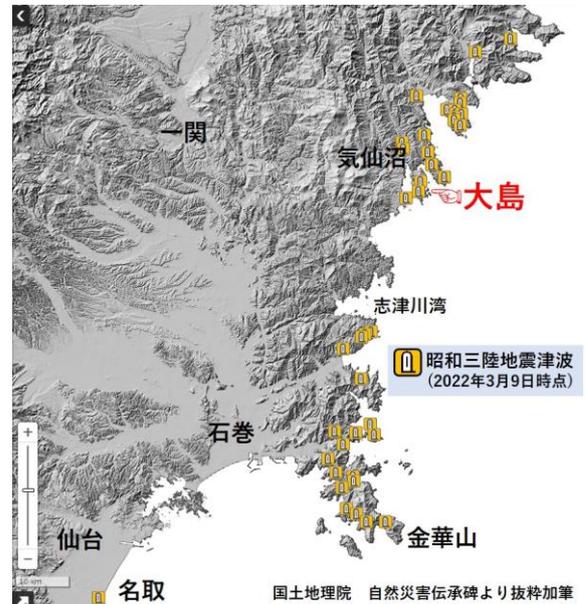


図-1 昭和三陸津波記念碑の分布（宮城県内に30基登録 2022年7月28日現在）



図-2 気仙沼大島内の津波関連碑等分布

設置したことと合わせると、後世の住民に津波災害を伝え防災意識を高める仕組みを島全体に残したものと感じる。「大島帝国」とも称された村の文化的高さを示す村長の力作であったと思われる。



図-3 長崎の津波記念碑と英文碑名 (拓本)  
東北支部現地研修会(2021年11月26日)

#### 4. 長崎の津波記念碑 碑文の構成と内容

碑文(図-4)の主な構成は次の通りである。

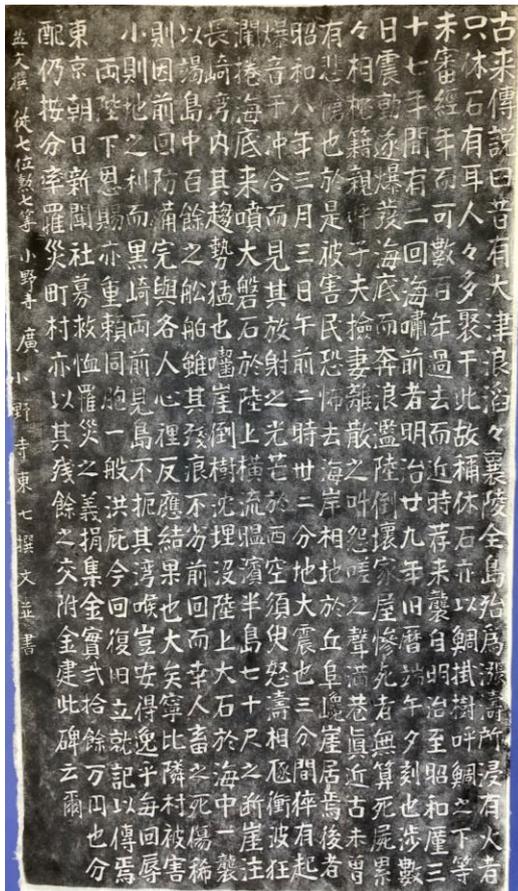


図-4 長崎の津波碑文・拓本

まず津波伝説と地名の紹介, 次に明治と昭和の津波描写があり, 明治後の住民の移転があったこと, 昭和と三陸津波の襲来時系列等が記されている。そして昭和津波で人畜被害が稀なのは, 明治以後の防備・防災意識の成果であり, 隣村と比べ小被害だった理由として島々の地形的配置による地の利があったとしている。

特に 10 行目以降は津波伝播経路や被害の地域差をもたらした地形をダイナミックに記述する。『温濱半島七十尺の断崖を横流し, 長崎湾内に注ぐ。(中略)寧ろ隣村に比し被害の小なるは則ち之地の利にして, 黒崎, 両前見島その湾喉を扼せずんば豈焉んぞ逸するを得ん也』とある。地形図で照合すると, 南東から襲来した津波は温濱半島に衝突した後で長崎湾に至るが, 湾の入口に存在する黒崎半島や二つの前見島と周囲の浅海によって, 波のエネルギーは分散することになる。これが『地の利』との記述と理解できる。(図-5)



図-5 津浪の襲来方向と長崎湾の位置

#### 5. 2011年東日本大震災時の津波被災との比較

2011年3月11日の津波高は過去の水位(津波境標柱)を上回り, 低地は浸水し島は分断された。しかし気仙沼湾側は荒廃が著しかったものの, 長崎漁港は瓦礫もなく損壊も目立たなかった(13日空撮画像)。救援のため最初に米軍揚陸艇が上陸したのは長崎漁港であった。碑文内容を再現するかのように, 長崎漁港では津波は遡上したものの勢いが弱められた結果と推定できる。

#### 6. おわりに

石碑による災害伝承には①簡潔ゆえの難しさ②石碑の風化③使用する書の形式が難点として挙げられている<sup>1)</sup>。気仙沼大島では市民団体が石碑の拓本体験講座やその展示を行うなど災害伝承活動を続けている。

今後, 今回得られたような地形的知見, 3基合わせた物語性も加えた展示やツアーをメニューに加えれば, より効果的な災害伝承の方法として役立つものと期待される。

#### 文献

- 1) 首藤伸夫(2001): 昭和三陸津波記念碑—建立の経緯と防災上の意義—, 津波工学研究報告, No.18, pp.73-84.
- 2) 宮城県(1935): 宮城県昭和震嘯誌
- 3) 白幡勝美・佐藤健一(2016) 気仙沼市における明治・昭和三陸津波関係碑<第2版>

# 67. 関東地方の事例 ー主に埼玉県と東京都の洪水と地震ー

Examples of Natural Disaster Monuments in the Kanto Region - Mainly Floods and Earthquakes in Saitama Prefecture and Tokyo -

○千田敬二（八州），金山健太郎（大日本コンサルタント）  
Keiji Chida, Kentaro Kanayama

## 1. はじめに

災害地質研究部会関東地区（本部）は，新型コロナウイルスの感染拡大の影響を受けて自然災害伝承碑の現地活動を控えていたが，今年度より感染拡大に注意して本部委員による合同現地調査も併用しながら情報収集に努めてきている．ここでは関東地区の伝承碑が収集段階のこともあり，国土地理院の自然災害伝承碑のデータを参考に災害状況の分析を行い，代表的な災害碑について応用地質の視点を加えた調査結果について報告する．近年，我が国では地震や地球温暖化による気候変動に伴う災害が頻発しており，特に最近では線状降水帯発生の予報のたびに前例のない記録的な大雨による災害になる傾向が高く，自然災害に対する畏怖の念とともに，効果的な備えや対策の必要性が高くなっており，自然災害伝承碑の記録から，今後の防災・減災を考える一助としたい．

## 2. 関東地区の自然災害伝承碑の概要

関東地区の自然災害伝承碑は，国土地理院データ（2022年6月23日版）<sup>1)</sup>を参考にするると関東地区については実基数302基，重複基数431基（表-1）である．都県別では長野県54基（重複86基），神奈川県51基（重複79基）で重複基数が比較的多く，東京都32基（重複35基），埼玉県22基（重複24基）となっている．

表-1 関東地区の自然災害伝承碑基数 <sup>1)</sup>より作成

県名	実基数	重複総基数	土砂災害	洪水	高潮	地震	津波	火山災害	その他
茨城県	35	42	1	29	0	6	6	0	0
栃木県	34	40	6	24	0	10	0	0	0
群馬県	32	54	21	22	0	5	0	6	0
埼玉県	22	24	1	18	0	4	0	1	0
千葉県	21	39	0	2	1	18	17	0	1
東京都	32	35	3	4	5	20	0	0	3
神奈川県	51	79	18	5	0	44	4	0	8
山梨県	21	32	17	13	0	1	0	0	1
長野県	54	86	44	37	0	2	0	2	1
計	302	431	111	154	6	110	27	9	14

災害種別（重複基数）による自然災害伝承碑は，洪水（154基），土砂災害（111基），地震（110基）が多くて関東全体の約9割近くを占め，津波（27基），火山災害（9基），高潮（6基）およびその他（14基）で約1割の割合となっている．（図-1）

災害名毎の自然災害伝承碑は，関東地区で総数5基以上が登録される災害名を抽出した場合に，関東大震

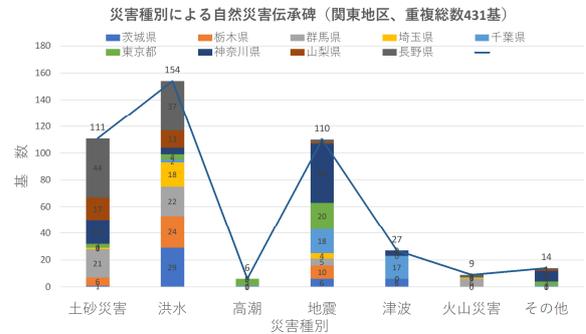


図-1 災害種別による自然災害伝承碑 <sup>1)</sup>より作成

災（1923年9月1日）62基，三六災害（1961年6月下旬）24基，カスリーン台風（1947年9月）17基，東日本大震災（2011年3月）12基，那須豪雨（1998年8月27日）10基などを含めた全12災害で全体の6割の基数を占める．東京都と埼玉県近辺では，関東大震災が震源地に近い東京都（20基），神奈川県（37基）で突出しており，東日本大震災は千葉県（6基），茨城県（6基）の海岸線で，カスリーン台風は群馬県（11基），埼玉県（4基）の河川沿いに，元禄地震は千葉県（8基）の海岸線に分布する．（図-2）

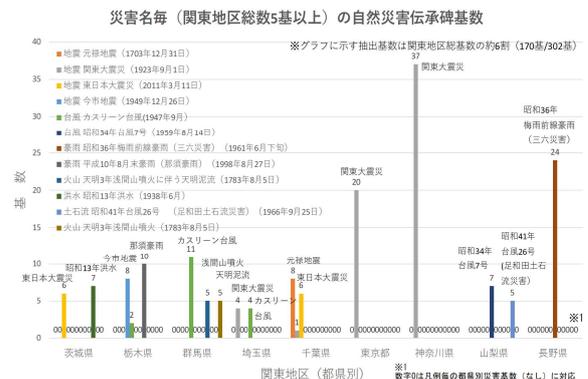


図-2 代表的災害の自然災害伝承碑基数 <sup>1)</sup>より作成

今回はこれらの自然災害伝承碑の中で埼玉県のカスリーン台風と東京都の関東大震災の災害碑の数例について報告する．

## 3. カスリーン台風と自然災害伝承碑

1947年（昭和22年）9月に大正・昭和・平成・令和を通して荒川，利根川流域に未曾有の洪水被害を引き起こしたカスリーン台風が襲来した．戦後間もないこともあり治水対策が十分でなかったことも一因としてあげられており，9月15日からの河川の増水と氾濫お

よび堤防決壊による浸水区域図がまとめられ、堤防決壊口には災害碑が建立され、碑文として災害状況や治水対策の重要性が刻まれている。(図-3、図-4)

カスリーン台風の浸水区域図

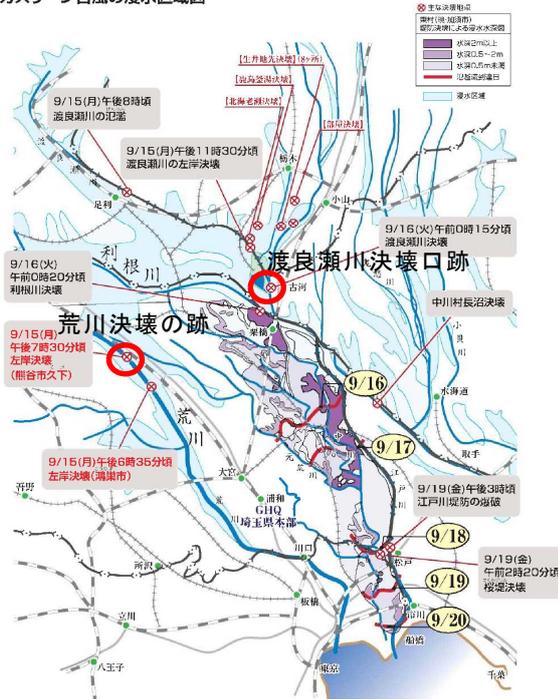


図-3 カスリーン台風の浸水区域図<sup>2)</sup>に追記



「決壊の跡」 「決壊口跡」

図-4 荒川(左)と渡良瀬川(右)の災害碑

関東平野の低地部は、利根川、荒川、渡良瀬川などの主要河川が山地部から扇状地地形をなして低地へと移行しており熊谷低地、利根川低地、加須低地で標高5~20m、荒川、元荒川、江戸川、中川の中下流部は東京低地部へと続く標高5m以下に集中する。したがって、現状の関東平野の利根川、荒川上流域が氾濫した場合はカスリーン台風で起こった浸水区域と同じ災害となる地形特性にあり荒川、江戸川の中・下流域の遊水池や流下能力の確保が極めて重要である。(図-5)

#### 4. 関東大地震と自然災害伝承碑

東京都の関東大震災の自然災害伝承碑は東京都心部の江東区、中央区、千代田区、台東区などの低地部に多く、千代田区、文京区などの台地部に少数分布す

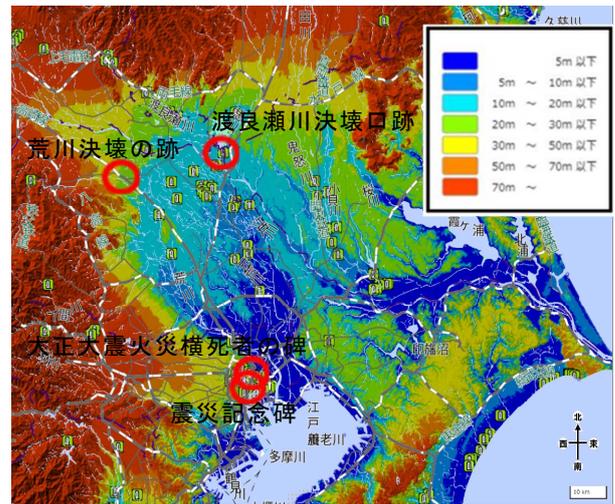


図-5 関東平野の標高区分図

(地理院地図+色別標高図より作成)

る。地震に伴う大火災が低地部の現荒川左岸から隅田川沿いの江東区、墨田区、中央区、台東区の低地部で発生している。災害碑は千代田区神田駿河台の「震災記念の碑」と文京区湯島(麟祥院)の「大正大震災火災横死者之碑」の2例を紹介する。(図-6)



「震災記念の碑」 「大正大震災火災横死者之碑」

図-6 関東大震災の災害碑

#### 5. まとめ

関東地区の自然災害伝承碑(災害碑)の調査は、国土地理院の既登録地点を主体に進めながら調査対象を増やし、地域災害として関連把握に努めているところである。今後は国土地理院登録箇所の調査と並行して、県や市町村史などの図書館やインターネットなどを利用した地域毎の災害碑の発掘も行いながら、地域の自然災害に対する防災・減災への応用地質学的な理解を深め、その成果を一般にアウトリーチしていきたい。

#### 参考文献

- 1) 国土地理院 HP: 自然災害伝承碑情報 2022年6月23日版, 2022年7月15日ダウンロード。
- 2) 荒川上流河川事務所 HP: カスリーン台風から70年展示パネル(18枚PDF), カスリーン台風による決壊後の到達時間, P6, 2022年8月12日閲覧。

## 68. 新潟県における自然災害伝承碑の分布とその特徴

Distribution and characteristics map of natural disaster monuments in Niigata Prefecture

堀松 崇 (株式会社 興和), 末武 晋一 (日本工営 株式会社), 佐藤 壽則 (株式会社 日さく)  
Takashi Horimatsu, Shinichi Suetake, Hisanori Sato

### 1. はじめに

過去に発生した自然災害に関する事柄が記されている石碑やモニュメントを自然災害伝承碑という。建立者は後世に災害の記憶を伝えることを念頭において被災場所や災害にかかわりあいのある地に碑を設置したと考えられる。碑には犠牲者への鎮魂の思いだけでなく、後世に同じような災害に見舞われることの無いようにという思いが込められていることもあると思われる。

地域での自然災害発生には反復性があることが多く、近年の激甚な災害発生箇所においても過去に同様な災害が発生していたことを示す自然災害伝承碑が見いだされることがある。こうした自然災害伝承碑に注目し、その内容を伝えることで地域住民の防災意識の向上につながることを期待される。

本報告では新潟県内の自然災害伝承碑について、その特徴や分布状況について整理する。

### 2. 自然災害伝承碑の抽出

新潟県内に分布する自然災害伝承碑については、国土地理院の地理院地図に掲載されているもののほか、特定非営利活動法人土砂災害防止広報センターHPに掲載されている「砂防の石碑」や、支部会員からの情報などを収集し、その後の現地調査により計 43 基を抽出した。

### 3. 新潟県の自然災害伝承碑の特徴

#### 3.1. 災害別の自然災害伝承碑設置数

自然災害伝承碑が建立されるに至った災害名と、建立された伝承碑数について表-1 に掲げる。これによると、最も古い伝承碑は 1824 年に発生した戸倉山雪崩（糸魚川市）に関する伝承碑である。一つの災害で複数の伝承碑が設置されている例が 9 件あり、特に 1967 年に新潟県下越地方に大きな被害をもたらした羽越水害では 6 基もの伝承碑が建立されている。一方で同様に広域的な被害が発生した 1964 年新潟地震、2004 年新潟県中越地震などの伝承碑数は、1~2 基と少なく、津波に関する伝承碑も 1 基と少ない。

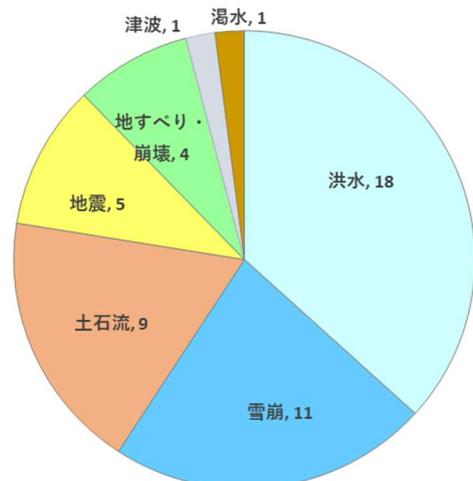
#### 3.2. 災害種別に見た自然災害伝承碑の割合

災害種別にみた伝承碑の割合を図-1 に掲げる。新潟県の伝承碑は、「洪水」、「雪崩」、「土石流」の順で多い。これら 3 つの災害種の割合は全体の 78% を占め、雪崩に関する伝承碑が多いのが地域的な特徴といえる。一方、「地震」や「津波」、「地すべり・崩壊」などの伝承碑は少ない。また佐渡島には「濁水」に関する伝

承碑があり、離島特有の問題を表している。

表-1 自然災害伝承碑が建立された災害一覧

災害名	災害発生年月日	災害種	伝承碑 建立数
戸倉山雪崩	1824年2月5日	雪崩	1
三条地震	1828年12月18日	地震	1
五反田切れ	1881年4月30日	洪水	1
尾神岳殉難事故	1883年3月12日	雪崩	1
栗立山大崩壊	1883年9月24日	崩壊、土石流	1
横田切れ	1896年7月22日	洪水	2
木津切れ	1913年8月27日	洪水	1
曾川切れ	1917年10月2日	洪水	2
三俣大雪崩	1918年1月9日	雪崩	1
六日町洪水	1921年4月5日	洪水	1
勝山大雪崩災害	1922年2月3日	雪崩	5
大洞地すべり災害	1927年2月14日	地すべり	1
小泊地すべり災害	1963年3月16日	地すべり	1
新潟地震	1964年6月16日	地震	2
下越水害	1966年7月17日	洪水	1
羽越水害	1967年8月29日	洪水・土石流	6
外波水害	1969年8月9日	洪水	1
白田切川土石流災害	1978年5月18日	土石流	1
大倉雪崩災害	1981年1月7日	雪崩	1
玉ノ木地すべり災害	1985年2月15日	地すべり	1
柵口雪崩災害	1986年1月26日	雪崩	1
7.11水害	1995年7月11日	洪水・土石流	2
蒲原沢土石流災害	1996年12月6日	土石流	1
浅草岳ブロック雪崩災害	2000年6月18日	雪崩	1
平成16年7月新潟・福島豪雨	2004年7月13日	洪水	2
新潟県中越地震	2004年10月23日	地震	2
平成23年7月新潟・福島豪雨	2011年7月26日	洪水	1
頻発する災害を克服したもの		洪水、濁水	2



\*複数の災害を一つの石碑にまとめているものがあるため  
石碑の総数と災害種の総数は一致しない

図-1 災害種別別自然災害伝承碑設置数

#### 4. 災害種別にみた自然災害伝承碑の分布状況

##### 4.1. 洪水

越後平野では、海岸線沿いに発達する砂丘により河川の流路が遮られ、排水不良の低湿地が広がっている。特に信濃川、阿賀野川などの大河川の河口付近は標高0m以下となっており（図-2）、周辺には数多くの洪水に関する自然災害伝承碑が分布している。

このうち、大河津分水路建設の契機となった1896年の横田切れ破堤地点には、横田破堤記念碑が建立されている。そこから直線距離で約26km下流の新潟市西区横尾には横田切れ水位標が設置されている。この地点での水位は約301cmであり、3か月にわたって水が引かなかったとの記録が残っている。

1913年に発生した木津切れは、この地点で過去何度も発生した破堤の一つであり、自然災害伝承碑の脇には、1707年以降計13回にもわたる破堤の歴史が記されている。

曾川切れは、1917年10月2日の台風による豪雨により発生しているが、この台風は同様に大阪府の淀川大塚切れや東京湾での高潮災害をももたらしている。

これらの破堤を契機に越後平野は分水路や放水路、排水機場の建設、河川改修事業、干拓事業や圃場整備などが進められ、日本有数の穀倉地帯となった。ただし標高0m以下の地帯が広がっていることによりはなくなり、その後も1966年の下越水害、2004年の新潟・福島豪雨をはじめとする豪雨により、越後平野はたびたび洪水に見舞われている。

##### 4.2. 土石流

1967年8月26～29日にかけて発生した羽越水害は、新潟県下越地方から山形県西部にかけての広い範囲で河川の氾濫や土砂災害を発生させている。羽越水

害に関する自然災害伝承碑は6基が建立されているが、そのうち土石流に関するものは計4基である。これらは都辺田川（2基）、下ノ沢川、綱木川沿いの集落内に建立されているが、各河川の上流域には花崗岩が分布する。また、復興記念碑（関川村、荒川）、越後胎内観音（胎内市、胎内川）建立地点周辺および上流側は、花崗閃緑岩やデイサイトの分布地帯である。このほかの例としては白田切川土石流災害（妙高山、第四紀火山）、蒲原沢土石流（第四紀火山噴出物）などがあり、いずれも火山岩類が分布する。このように土石流に関する自然災害伝承碑は、第四紀火山や花崗岩類の分布地に建立されているという地質的偏在性を有している。

##### 4.3. 雪崩

雪崩は傾斜30度以上の積雪斜面であればどこでも発生しうる。雪崩に関する自然災害伝承碑の多くは、山間部の豪雪地帯に建立されているが、計5基もの伝承碑が建立されている勝山大雪崩災害は、普段あまり積雪が見られない新潟県糸魚川市親不知の海岸沿いの急崖地で発生した。この災害は、雪崩復旧作業従事者を乗せた列車に雪崩が直撃したことにより90名の犠牲者を出した2次災害である。同様に浅草岳ブロック雪崩災害は、山菜取り中に亡くなった方の遺体搬出中に捜索救助隊の警察官や消防隊員等が雪崩に襲われ計4名の方が殉職したという2次災害である。このように雪崩災害に関する自然災害伝承碑は、そこに暮らしていた人々が雪崩に巻き込まれたもののほか、2次災害に関するものがあることが特徴的である。

#### 5. まとめ

本論執筆中の2022年8月3日～5日にかけて新潟県下越地方から山形県西部地方では豪雨に見舞われ、洪水災害や土砂災害が多数発生している。この地域では、1967年の羽越水害以降地域を挙げて防災活動に取り組んでいる。例えば関川村では羽越水害の教訓を後世に伝えるために、地元で伝わる伝説をもとに全集落が分担して作成したわら細工の大蛇が町中を練り歩く、えちごせきかわ大したもん蛇祭りを開催している。この大蛇の長さは82.8mであるが、これは羽越水害発生日の8月28日にちなんでいる。

2022年8月8日現在、今回の豪雨による犠牲者は発生していないが、災害を後世に伝える取り組みがあったこととは無関係でないと思われる。自然災害を後世に伝える方法としては、自然災害伝承碑の建立のほか、口承伝承、災害資料集の作成、災害伝承施設の建設などさまざまな手法があるが、このような取り組みの重要性は、今回の例をもってしても明らかである。

#### 文献

- 1) 新潟市江南区郷土資料館：亀田郷のお話，URL <http://www.city.niigata.lg.jp/konan/about/history.html>
- 2) 新潟県土木部（1972）：羽越豪雨（42.8.28）復旧の記録

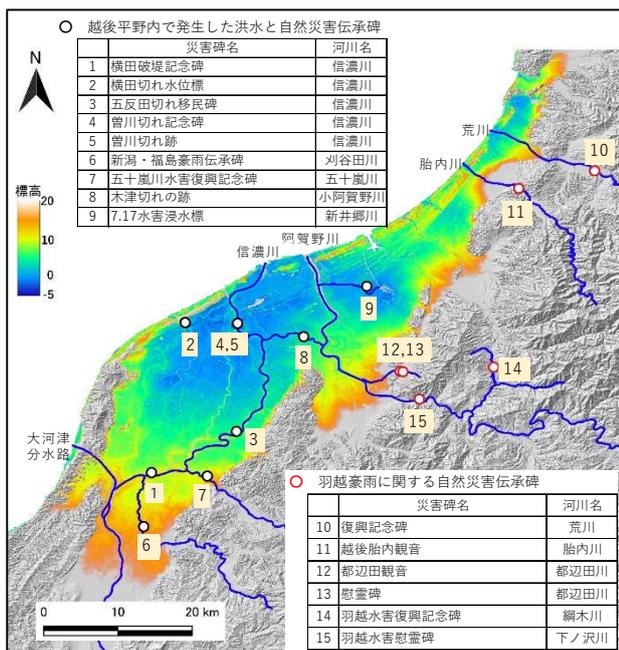


図-2 越後平野周辺に分布する自然災害伝承碑  
(地理院タイルを加工して作成)

## 69. 中部地方の災害伝承碑の分布と代表的な災害

### Distribution of Disaster Tradition Monuments and Typical Disasters in the Chubu Region

○加藤靖郎（川崎地質株式会社），日野康久（株式会社 KANSO テクノス），藤井幸泰（名城大学理工学部），居川信之（株式会社エイト日本技術開発），佐々木信剛（株式会社静環検査センター），赤嶺辰之介（サンコーコンサルタント株式会社），太田尚（応用地質株式会社），篠田繁幸（国際航業株式会社）  
Yasuo Katoh, Yasuhisa Hino, Yukiyasu Fujii, Nobuyuki Ikawa, Nobutaka Sasaki, Shin-nosuke Akamine, Hisashi Ota, Shigeyuki Shinoda

#### 1. はじめに

中部地方に設置されている自然災害伝承碑（以下、災害碑とよぶ）は、地震、津波、洪水、土砂災害、高潮と多岐にわたり、長野県も含めると火山災害の災害碑も認められる。本講演では、中部支部管内に長野県を加えた範囲の災害碑の分布と、災害碑が建立された代表的な災害について報告する。

#### 2. 災害碑マップ

中部支部の災害碑調査は、①机上調査、②机上調査結果を Google マップに集約（図-1）、③Google マップを利用した現地調査、の順に行った。

中部支部管内と長野県の災害碑は 391 箇所、そのうち 160 箇所は地理院地図に未掲載のものである。



図-1 災害碑マップ <赤色：地理院地図未掲載。青色：地理院地図掲載>（QR コードを読み込むことで 10/31 までマップが閲覧可能）

#### 3. 中部地方の代表的な災害と災害碑

##### 3.1 伊勢湾台風

1959（昭和 34）年 9 月 26 日に紀伊半島に上陸した伊勢湾台風は、濃尾平野を中心に高潮・洪水による甚大な被害をもたらし、5098 人に達する死者・行方不明者を出した。災害碑は、地理院地図掲載分だけでも 38 箇所（2022.7.28 現在）が確認され、そのほとんどは三重県北部～愛知県西部の低地部に集中するが、岐阜県郡上市や三重県名張市等の内陸部や、遠くは京都府八

幡市にも分布し、災害が広域に及んだことを示している。また、被災地域の大部分はゼロメートル地帯とよばれる低地帯であり、浸水位を示す標識が各所に設置されているのが特徴である。地上から 4 メートル近い位置に浸水位が表示されている地区もあり、高潮の恐ろしさを効果的に伝えている。

##### 3.2 濃尾地震

1891（明治 24）年 10 月 28 日午前 6 時 38 分に発生したマグニチュード 8.0 の濃尾地震は、国内の内陸型地震としては歴史上最大とされる。明治 24 年は文明開化期にあたり、当時先端技術であった鉄道や紡績工場が大被害を受け、震源に近く人口密度も高い濃尾平野では 7000 人余の圧死者を出した。震源域の震度分布も調べられており、激震域（震度 7）に相当する被害は、断層沿いの地帯に加え、大垣や木曾三川の軟弱地盤地帯で生じたとされる<sup>1)</sup>。中部支部で把握している災害碑が、活断層沿や激震域に分布する。活断層は北西から南東へ、根尾谷断層-梅原断層-古瀬断層-華立断層と連続しており<sup>2)</sup>、災害碑も同様な分布である。名古屋市に分布する災害碑のいくつかは、震災後に激震域から移転されたものも含まれる。災害碑の情報に加え、地理情報システム（GIS）の活用により、より深い考察が得られると考える。

##### 3.3 昭和東南海地震

南海トラフはフィリピン海プレートがユーラシアプレートの下に沈み込む日向灘から駿河湾まで続く海盆であり、年間数 cm の速度で沈み込みが進行しているプレート境界である。この南海トラフから沿岸域にかけて、過去 1400 年間に約 100～200 年間隔で大地震が発生しており、最も新しく発生した大地震が昭和 19 年の昭和東南海地震と昭和 21 年の昭和南海地震である。

昭和東南海地震は昭和 19 年（1944 年）12 月 7 日 13 時 35 分に発生した<sup>3)</sup>。気象庁マグニチュードは 7.9 であり、三重県、愛知県、静岡県などで最大震度 6 を記録し、地震に関係した死者は 1,220 名、全壊家屋は 26,130 棟にのぼった<sup>3)</sup>。

三重県の沿岸では地震直後に津波が到達し、尾鷲で最大 10m の津波が発生するなど、犠牲者の多くは津波が原因であった。しかし伊勢湾内の津波は低かったため、愛知県では津波被害が生じなかったが、海岸に近

い軟弱な土地で震度 6 以上の揺れが生じたために多くの建物が倒壊し、多数の死傷者をだした。

昭和東南海地震に関する災害碑は全部で 28 箇所ある。その大半は三重県沿岸部に設けられた津波被害の碑であり 22 箇所のにぼる。さらに愛知県には 5 箇所、和歌山県に 1 箇所の碑が設けられている。

### 3.4 飛騨川バス転落事故と国道の防災体制の整備

1968 (昭和 43) 年 8 月 18 日、岐阜県加茂郡白川町河岐の国道 41 号で、集中豪雨による斜面崩壊で立ち往生していた観光バス 2 台が土石流に押し流されて飛騨川に転落、104 人が犠牲になった。翌年に建てられた天心白菊の塔にはその状況が克明に記録されている。

周辺は飛騨川の下刻により形成された飛水峡(ひすいきょう)と呼ばれる景勝地を有する急峻な山岳地となっている。当時、現場近くでは時間 100mm の雨量が観測されており、バスを立ち往生させた崩壊は美濃帯堆積岩分布域、土石流は花崗斑岩分布域で発生した。

この事故はその後の「道路防災点検」、「テレメータの設置」、「異常気象時通行規制」など、特に異常気象発生時における国道の防災体制が整備される契機となった。また現在、事故現場を含む 6.2km 区間を対象に落石・崩壊等への対策及び事前通行規制区間の解消を目的とした抜本的なバイパス事業(国道 41 号飛水峡街道(上麻生防災))が進められている。

### 3.5 安部川流域の昭和 41 年台風 26 号による土砂災害

静岡県に建立する災害碑は、伊豆半島では主に海岸部に分布し、伊豆半島以外は平野、山地に分布していることが特徴である。前者は台風、高潮、津波の災害、後者は台風、豪雨の災害により建立されたものである。特に、一つの集水域、河川・安倍川に沿った災害碑の分布は、他には見られない特徴である。安倍川流域の上流域に建立する災害碑は山地における土砂災害による被害について伝承しており、下流域は扇状地・平野における河川の氾濫(洪水)、内水氾濫による被害について伝承している。その中で、最上流に位置する災害碑である梅ヶ島温泉の慰霊碑は、昭和 41 年の台風 26 号によって発生した土砂災害の被害について伝承し、現在でも犠牲者への供養がなされており、他の慰霊碑よりも管理・整備が行き届いている石碑であった。

### 3.6 天竜川流域の昭和 36 年梅雨前線豪雨(三六災害)

昭和 36 (1961) 年 6 月、台風接近と梅雨前線の停滞により、長野県伊那谷では総雨量 532.4mm を記録。天竜川流域の各地で 1 万箇所以上の崩壊・地すべり・土石流が発生し、天竜川本川、支川は、堤防決壊・氾濫の浸水災害が発生。死者・行方不明者 136 名、家屋の全壊・流出・半壊 1500 戸に及んでいる。

地理院地図にある三六災害の主な災害碑は 16 箇所に及ぶ。災害碑の設置場所を地形図・地質図<sup>4)</sup>と重ねてみると、災害発生状況・原因が見えてくる。長野県

飯田市の花崗岩山地部崩壊、土石流発生箇所は、現在の地形からも確認できる。大鹿村の大西山(中央構造線沿いマイロナイト分布域)の大崩落(深層崩壊)発生箇所<sup>5)</sup>は、崩壊形状が残されており、災害碑の位置する崩積土堆積箇所は、現在、桜公園として整備されている。

## 4. 中部支部の災害碑に関連したアウトリーチ活動

中部支部では、図-1 で紹介した災害碑マップを将来的には一般公開することを考えている。一般公開によって地域住民が災害履歴を知ることができ、減災が期待できる。

また、2018 年 1 月に開始した Twitter において、災害碑などの情報発信を行っている。具体的には、「〇〇年の今日(〇月〇日)は、△県△市で災害がありました」の書き出しで始まり、災害の概要や災害碑の写真や地図を掲載するようにしている。

ある災害のツイートには、「今までここに住んでいて災害の経験がないが油断禁物ですね」というコメントが寄せられた。Twitter の活用もアウトリーチに有効と考えられる。

(Twitter アカウント名: 日本応用地質学会 中部支部)

## 5. まとめ

中部地方は、太平洋岸にプレート境界を有し、プレート活動に伴う活断層の活動が活発であることで高標高の山岳地帯が形成される一方、沈降帯では大規模な低平地が形成されている。災害碑調査を進めると、地域の地質的要因に関連して発生した多くの自然災害を改めて認識でき、災害碑が私たちに防災を呼びかけていることが強く伝わってきた。このように伝承されている災害への警告を、中部支部としてとりまとめを進め、アウトリーチ活動を一層推進するつもりである。

## 文献

- 1) 村松郁栄・松田時彦・岡田篤正(1992): 濃尾地震と根尾谷断層-地下観察館の案内-, 岐阜県本巣市教育委員会, 32p.
- 2) 岐阜県博物館, 岐阜県地質図 [ジオランドぎふ], <https://geo-gifu.org/geoland/>
- 3) 中央防災会議 災害教訓の継承に関する専門調査会 (2017): 1944 東南海・1945 三河地震 報告書, 229p.
- 4) 長野県地質図活用普及事業研究会 新版長野県デジタル地質図 2015
- 5) 三六災害 60 年実行委員会, 三六災害 60 年 <https://www.cbr.mlit.go.jp/tenjyo/36saigai60/index.html>

# 70. 関西地域における自然災害伝承碑

Monuments of Natural Disaster Tradition in the Kansai Region

○塚本峻一（アジア航測）、北田奈緒子（地域地盤環境研究所）

Ryoichi Tsukamoto, Naoko Kitada

## 1. はじめに

自然災害伝承碑（以下、災害碑）とは、過去に発生した自然災害の規模や被害の状況を後世に伝える石碑やモニュメントであり、自然災害の多い我が国では、全国各地で確認される。災害碑の情報は、郷土を襲った災害の歴史を確認する防災教育の一助にもなることが期待されている。

国土地理院は、2019年から「自然災害伝承碑」の情報を地方公共団体と連携して収集し始めており、地図記号も制定した。2022年7月28日現在では、全国426市区町村1464基の災害碑が地図上に掲載されているが、実際には、この何倍もの数の災害碑があると推定されている。応用地質学会では、災害地質部会を中心に、その災害碑の情報収集を独自に実施し、地域の防災意識の向上を促す一助になる活動を全国的に実施している。

本発表では、関西地域における災害碑の整理状況と今後の展望について報告する。

## 2. 国土地理院における災害碑の整備状況

国土地理院が現在公開している災害碑には、地理院地図の位置に記号が示されているだけでなく、「碑名」や「災害名」、「災害種別」などの様々な情報が付属して公開されている。国土地理院が公開する関西地域における災害碑の分布と「災害種別」の整理を図-1と表-1に示す。

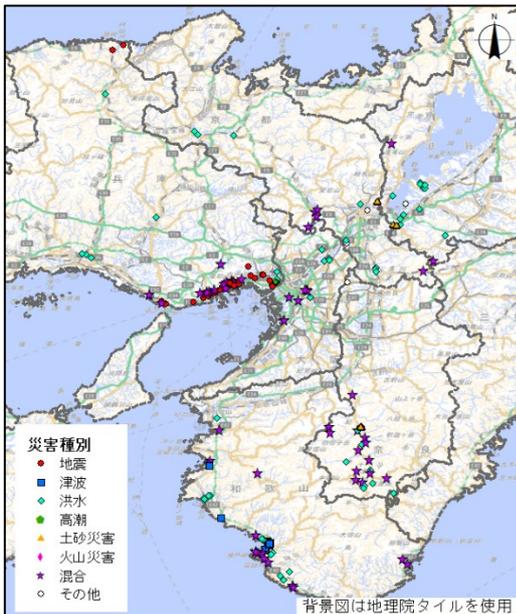


図-1 国土地理院公開の災害碑の分布

表-1 災害種別ごとの災害碑の数

災害種別	都道府県							計
	滋賀	京都	大阪	兵庫	奈良	和歌山		
地震	0	0	0	29	0	0	29	
津波	0	0	0	0	0	21	21	
洪水	11	8	5	9	10	13	56	
高潮	0	0	0	2	0	0	2	
土砂災害	3	0	0	0	2	0	5	
火山災害	0	0	0	0	0	0	0	
混合※1	2	5	6	20	13	16	62	
その他※2	1	2	0	0	1	0	4	
計	17	15	11	60	26	50	179	

※1 複数の災害種別が含まれる(例)洪水・土砂災害)

※2 台風や強風による人家倒壊等

関西地域で災害碑が多い兵庫県では、地震が多く「阪神・淡路大震災」の関連があり、和歌山県では津波や洪水が多く、「明治22年紀伊半島大水害」「昭和南海地震」の関連がある。災害碑が最も少ない大阪府では、「室戸台風」や淀川氾濫による水害関連がある。

## 3. 災害碑情報の収集と整理

比較的災害碑の少ない大阪府を中心にweb上に公開されている災害碑の情報等を収集し、136地点に災害関連の碑があることが確認できた。これらの災害関連碑を建てた要因を調査し、発災要因を「地震」「津波」「氾濫」「氾濫・高潮」「高潮」「強風・高潮」「干ばつ」「史跡」「地名由来」に区分し、図-2に示す。

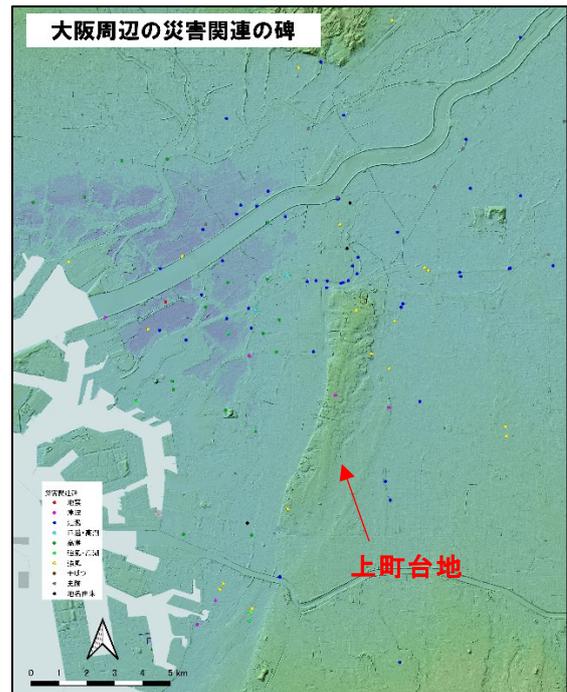


図-2 大阪周辺の災害関連碑の分布

(背景図は地理院タイルの識別標高図と陰影図を使用)

特徴として、「氾濫」は、河川沿いに多く分布しており、「高潮」は、港湾部ではなく、0m 地域付近に分布している。「津波」は、港湾部・河口部だけでなく、上町台地を超えた東側にも分布している。強風は広い範囲に分布するため、目立った特徴は見られない。

また、収集した災害関連碑を「伝承」「信仰」「災害位置」「功労」「啓発」「橋梁碑」「改修記念」「慰霊」の8つのカテゴリーに区分した（表-2）。

表-2 8つのカテゴリー区分

カテゴリー	個数
伝承	21
信仰	2
災害位置	5
功労	10
啓発	16
橋梁碑	17
改修記念	30
慰霊	35
合計	136

8つのカテゴリーのうち、国土地理院の災害碑の該当する碑として「伝承」「災害位置」「橋梁碑」「改修記念」「慰霊」であるが、「改修記念」「慰霊」には、場所や災害を示さない場合もあるため、選択が必要である。

#### 4. まとめと今後の展望

本報告では、国土地理院が公開している179地点の災害碑と別にwed上に公開されている情報等を活用し、136地点の災害関連碑を確認できた。また、それらを発災要因や8つのカテゴリーに区分した。

今回収集した情報は、机上収集のため実際に現地での災害碑調査は行っていない。また、場所や災害を示さない災害関連碑の区分が未区分のため、災害碑調査箇所として「啓発」「功労」「信仰」を除いた約110地点が該当する。

今後これらの情報の取りまとめを行い、各地点を調査し、調査表に整理することを展望とする。

# 71. 中国四国地方における自然災害伝承碑の分布とその特徴

## Distribution and characteristics of natural hazard stone monuments in Chugoku-Shikoku District, Japan

○西山賢一（徳島大学）・木村一成（ケイジオ）・加藤弘徳（荒谷建設コンサルタント）・野々村敦子（香川大学）

### 1. はじめに

2011年東日本大震災以降、中国四国地方でも、2014年広島豪雨災害や2018年西日本豪雨災害などが相次いで発生してきた。南海トラフを震源とする巨大地震の繰り返しを含めて、地域に伝わる古い災害伝承から学ぶことの重要性が以前から指摘されている<sup>1)~12)</sup>。2019年には、国土地理院が新しい地図記号「自然災害伝承碑（以下、伝承碑と呼ぶ）」を制定し、地理院地図 web で閲覧できるようになった。筆者らは、中国四国地方に伝わる伝承碑について、地理院地図に掲載されている碑を中心に、その分布と特徴の把握を試みた。

### 2. 伝承碑の登録数と地域的な差異

2022年6月現在に地理院地図に登録されている伝承碑に関する情報（位置・災害種・伝承内容など）を、国土地理院 HP<sup>13)</sup> から得て集計した。中国四国地方9県における集計結果を表1に示す。

表1では、災害種を5つのカテゴリー（土砂・洪水・高潮・地震・津波）に細分して、災害種ごとの登録数を表示している（複数のカテゴリーにまたがる災害も多いため、全件数と、災害種ごとの数とは一致しない）。その結果、古くから南海ト

ラフ巨大地震による災害を受けてきた四国地方には、特に高知・徳島両県に多くの伝承碑が存在するが、愛媛県は2箇所、香川県は0箇所と少ない。このうち、南海トラフ巨大地震の震源域に当たる高知県では、地震時に顕著な隆起が生じることで知られている室戸岬周辺には伝承碑が報告されていない。一方、中国地方には、津波に関わる伝承碑が島根県益田市に1箇所だけ知られており、中世（1026年）の日本海で発生した津波伝承を伝える日本最古級の伝承碑である。

気象災害（土砂・洪水・高潮）に関する伝承碑は、中国・四国ともに多く分布しているが、地域ごとに特徴的な差も認められる。例えば、広島県は土砂災害41箇所・洪水災害35箇所と、両者ともに類似した数の伝承碑が登録されているが、岡山県では土砂災害が0箇所・洪水災害が20箇所と、両者に大きな差が認められる。また、高潮に関する伝承碑は全数で26箇所あり、その多くが瀬戸内海沿岸の各県に存在することも特徴的である。ただし、地理院地図に未登録の高潮に関する伝承碑は徳島県内にも存在しており、「四国災害アーカイブス」HPに四国四県の詳細な伝承碑の調査結果が網羅されている<sup>14)</sup>。

表1 中国四国地方における自然災害伝承碑の災害種ごとの集計

県名	全件数	土砂	洪水	高潮	地震	津波	地震土砂	ため池
鳥取	8	2	6	0	1	0	0	0
島根	13	4	10	0	1	1	0	0
岡山	21	0	20	1	0	0	0	3
広島	55	41	35	2	0	0	0	0
山口	20	5	10	7	0	0	0	0
徳島	43	7	9	1	25	23	0	0
香川	18	10	15	2	0	0	0	3
愛媛	12	3	6	4	2	0	0	0
高知	90	30	39	9	40	34	5	0
計	280	102	150	26	69	58	5	6

### 3. 災害種ごとに細分した伝承碑の特徴

地震災害に着目すると、地震時に発生した土砂災害の伝承碑は、高知県に5箇所のみと少ない。また、歴代の南海トラフ巨大地震に関して、1707年宝永、1854年安政、1946年昭和の大地震ごとの伝承碑の数は、登録数の多い高知県では3者ともほぼ同数であるが、愛媛県では昭和地震のみとなる。なお、2017年には、徳島県の複数の伝承碑が、文化庁により「国登録記念物（遺跡関係）」に指定された。

台風災害に着目すると、四国に上陸して京阪神方面へ進んだ1934年室戸台風の伝承碑が、高知県室戸市に多数存在することに加えて、進路から離れた岡山県に7箇所あることが注目される。岡山県では、室戸台風の豪雨により、旭川のはんらんによる洪水被害が顕著であったが<sup>15)</sup>、<sup>16)</sup>、室戸台風による総雨量は、岡山県内では100~200mmと突出した値ではない<sup>17)</sup>。

1945年枕崎台風は、台風が上陸・通過した鹿児島県や九州より、圧倒的に中国地方で甚大な災害が発生した台風であり、広島県では犠牲者が2,000名を超えるほか、山口・愛媛・島根・岡山の4県の合計でも500名を超える犠牲者が出ている<sup>18)</sup>。このため、広島県には複数の伝承碑が残されている。

戦後の日本に襲来した台風のうち、最も多量の降水をもたらしたとされている1976年台風17号<sup>18)</sup>に関する伝承碑は、特に被害が集中した香川県小豆島と徳島県に8箇所と多く残されている。

### 4. 伝承碑の保存と活用に関する課題

今回検討したように、伝承碑を用いると、災害をもたらす特異気象や地震の発生頻度を、観測記録のない時期まで含めた長いスパンで推定するための貴重な資料となりうる。また、古記録を用いた土砂災害の有無は、長期的にみた「斜面崩壊の免疫性」の有無を検討するための基礎資料ともなる。今後、より古い時代の災害伝承の発掘とともに、崩壊堆積物・津波堆積物の識別と、堆積物中の炭化物・古土壌の<sup>14</sup>C年代測定による地質学的な検証を進めていく必要がある。

### 文献

1) 羽鳥徳太郎(1978)高知・徳島における慶長・宝永・安政南海道地震の記念碑. 東京大学地震研究所彙報, 53, 421-445.

- 2) 村上仁士・島田富美男・伊藤禎彦・山本尚明・石塚淳一(1996)四国における歴史津波(1605慶長・1707宝永・1854安政)の津波高の再検討. 自然災害科学, 15, 39-52.
- 3) 中川健次(2002)被災地からのメッセージ. 教育出版センター, 331p(非売品).
- 4) 国土交通省四国地方整備局四国山地砂防事務所(2004)四国山地の土砂災害. 68p.
- 5) 和田一範・松尾祐治・山本 基・武田由美子(2008)四国に伝わる災害の教訓に関する考察. 土木史研究論文集, 27, 77-93.
- 6) 徳島県(2008)南海地震を知る 徳島県の地震・津波碑. 徳島県. 45p.
- 7) 井若和久・田邊 晋・山中亮一・上月康則・松下恭司・村上仁士(2008)徳島県鳴門市周辺における安政南海地震の震度分布. 歴史地震, 23, 121-130.
- 8) 松尾祐治・和田一範・山本 基・中野 晋(2010)四国に伝わる災害に関する言い伝えからの防災術の抽出と活用に関する考察. 自然災害科学, 29, 393-411.
- 9) 井若和久・上月康則・山中亮一・田邊 晋・村上仁士(2011)徳島県における地震・津波碑の価値と活用について. 土木学会論文集 B2(海岸工学), 67, 1261-1265.
- 10) 藤本理志・小山耕平・熊原博康(2016)広島県内における水害碑の碑文資料. 広島大学総合博物館研究報告, 8, 91-113.
- 11) 小山耕平・熊原博康・藤本理志(2017)広島県内の洪水・土砂災害に関する石碑の特徴と防災上の意義. 地理科学, 72, 1-18.
- 12) 熊原博康・弘胤 佑・小山耕平・岩佐佳哉(2017)広島県内の水害碑に関する追加資料と歴史の変遷. 広島大学総合博物館研究報告, 9, 81-94.
- 13) 国土地理院 HP <https://www.gsi.go.jp/bousaichiri/denshouhi.html>
- 14) 四国災害アーカイブス HP <https://www.shikoku-saigai.com/>
- 15) 蓬郷 巖(1989)岡山の災害. 日本文教出版, 65-87.
- 16) 岡山理科大学「岡山学」研究会(2012)岡山の「災害」を科学する. 吉備人出版, 75-77.
- 17) 畠山久尚編(1966)気象災害. 共立出版, 324-326.
- 18) 饒村 曜(1986)台風物語. 日本気象協会, 250p.

## 72. 九州地方の事例

### Natural Disaster Monuments in Kyushu Region

○池見洋明(日本文理大学), 梅崎基考(アバンス), 矢野健二(ジオテック技術士事務所), 新谷俊一(ダイヤコンサルタント), 矢田純(カミナガ), 山田好之助(藤永地建), 松崎達二(サンコーコンサルタント)

Hiro Ikemi, Noritaka Umezaki, Kenji Yano, Toshikazu Shinya, Jun Yada, Yoshinosuke Yamada, Tatsuji Matsuzaki

#### 1. はじめに

国土地理院で公開されている自然災害伝承碑のうち九州地方に分布するものは107基, その内訳は福岡県14基, 佐賀県19基, 長崎県27基, 熊本県13基, 大分県5基, 宮崎県9基, 鹿児島県22基である(2022年7月26日現在)。九州支部では, このリストをもとに自然災害伝承碑ワーキングG(ワーキングG長 梅崎基考)を発足させ, 各県で調査を開始した。当初は7名で開始したが, 現在は鹿児島県, 宮崎県のメンバーを加えた16名となっている。

2022年7月までの調査により福岡県4基, 佐賀県2基, 長崎県1基, 熊本県4基の調査票が作成された。8月以降も鋭意調査を継続する予定であり, 本報告では, これらの調査票をもとに九州地方の災害碑を紹介する。

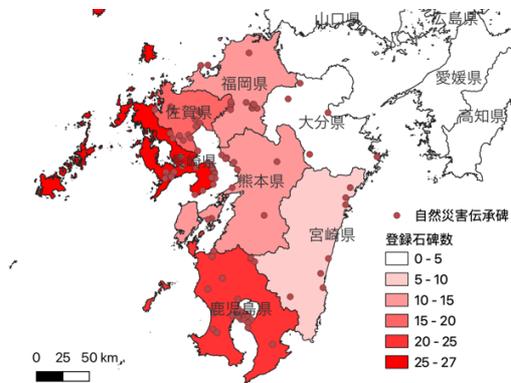


図-1 九州の自然災害伝承碑の登録数と分布

#### 2. 各県の事例紹介

##### (1) 福岡県

これまで福岡県では, うきは市に分布する大村復興碑(1932年), 山潮記念碑(1947年), 大水害記念碑(1948年), 儲穀の碑(1794年)の調査票が作成されている(括弧内は建立年)。

このうち大村復興碑と儲穀の碑は享保5年(1720年)に発生した洪水と土石流による災害を伝承する石碑となっている。この年, 耳納連山では降雨による大規模な土砂災害が各地で発生した。うきは市浮羽町流川で発生した土石流が, 増水した巨瀬川を塞ぎ, 下流に位置する大村地区などに土砂と洪水流が襲った。空中写

真では流川地区付近に新しい崩壊地形を確認することができる。写真-1は大村復興碑で, 石材は泥質片岩である。耳納山地は主に結晶片岩(頂部には安山岩が分布する)から構成されており, 現地のものであると思われる。石碑には割れ目が多く, 所々で剥がれ落ちが発生しており, 裏面に刻まれた碑文は読み難い状態となっている。



写真-1 大村復興碑(左:表, 右:裏)

##### (2) 佐賀県

佐賀県ではこれまでに, 伊万里市に分布する西分地へ復旧碑(1957年)と人形石山地へ復旧記念碑(1960年)2基の調査票が作成された。これらは佐賀県伊万里市と長崎県松浦市の境界をなす人形石山(標高427m)から石倉山(標高311.7m)の東側の佐賀県において, 発生した地すべり災害を伝承するものである。1951(昭和26)年2月には西分地すべり, 1957(昭和32)年7月には人形石山地すべりが甚大な被害を及ぼした。

この九州北西部は北松浦半島に位置し, 玄武岩溶岩台地が広がり, その台地縁辺が本邦有数の地すべり地帯となっている。地質は, 新第三紀中新世前期から中期の相浦層群・佐世保層群(挾炭層)および野島層群の堆積岩を基盤とし, 中新世後期の人の久保砂礫層を介して北松浦玄武岩類が覆っている。この地域の地すべり発生機構は野田(1957)により「北松型地すべり」と命名されている。写真-2は西分地へ復旧碑の全景で, 石碑の石材は玄武岩で, 名盤には柱状の「阿翁石」が使用される。背景の山腹が地すべり地であり, 近年の対策工についての説明版が建てられている。



写真-2 西分地に復旧記念碑

### (3) 長崎県

長崎県では、諫早市にある諫早大水害復興記念碑（1977年）の調査票が作成されている。諫早市は東シナ海から湿った空気が流れやすい地勢にあり、古くから集中豪雨による水害に見舞われてきた。昭和32年の水害では時間雨量300mm、日雨量600mm以上の降雨により諫早市を流れる本明川の各所で堤防が破堤し、市街地の大部分が浸水した。また本明川に架かる眼鏡橋は流木や土石を堰き止めて被害を拡大させる原因となった。なお、この眼鏡橋は現在、国の重要文化財に指定され、諫早公園に移転されている。写真-3は諫早大水害復興記念碑であり、前面には諫早市長による被災状況が記載されている。写真-4は移転された眼鏡橋の全景となる。



写真-3 諫早大水害復興記念碑



写真-4 諫早公園に移転された眼鏡橋

### (4) 熊本県

熊本県では、阿蘇村、五木村などに分布する数鹿流（すぎる）崩之碑（2020年）、横手谷災害復興記念碑（1995年）、瀬戸石崩れを伝承する崩土地蔵（2004年）、宝川内土石流を伝承する慰霊の碑（2004年）の調査票が作成されている。

このうち数鹿流崩之碑は平成28年4月の熊本地震で阿蘇大橋を崩落させた崩壊を伝承する石碑である。この崩壊は阿蘇外輪山のカルデラを形成する先阿蘇火山岩類の安山岩質溶岩と凝灰角礫岩の互層（噴出年代50～80万年前）からなる。石碑には、この安山岩が使用されているが、崩壊地内のは亀裂が多く、石材の確保は難しかったようである。また石碑のある「立野峡谷」は、布田川断層などにより崩壊が幾度も繰り返されており、立野にまつわる神話（健甕龍命の蹴破り伝説）も残されている。写真-5は数鹿流崩之碑であり、旧阿蘇大橋の崩壊跡に建立されている。



写真-5 国道57号旧阿蘇大橋大崩壊

### 5. まとめ

本紙では、九州地方に分布し、国土地理院に登録されている自然災害伝承碑について紹介した。また、その事例として、現在、九州支部自然災害伝承碑ワーキングGで作成が進められている調査票をもとに一部を紹介し、応用地質的な部分について説明した。

### 文献

- 1) 地質調査所北松型地すべりグループ(1969)：北松型地すべり (3). 地質ニュース No.181,p23-29
- 2) 日本応用地質学会九州支部 (2008)：九州の自然災害～地盤災害を主として～.
- 3) 渡辺一徳 (2022)：阿蘇踏査の歩み. 不知火書房,p.91-93

## 73. 海外における自然災害伝承碑

Examples from Various Countries of Monuments that pass on the Natural Disasters

○西村智博（国際航業），上野将司（応用地質）

Tomohiro NISHIMURA, Shoji UENO

### 1. はじめに

日本国内には数多くの自然災害伝承碑が設置されているが、ここでは筆者らが海外を訪問した際に確認した事例についていくつか紹介する。

### 2. 海外における自然災害碑の事例

#### 2.1. ヴァーダル地すべり（ノルウェー）

ノルウェー中部のヴァーダルでは、1893年5月19日未明に河川の侵食が原因と考えられるクイック・クレイ地すべりが発生した。傾斜10度未満の斜面が3kmにわたって崩壊し、崩壊土砂は液体状となって下流に流出したため、ヴァーダル全域が浸水し、5500万m<sup>3</sup>の土砂が数mの厚さで9km<sup>2</sup>の地域を埋めた。この地すべりにより116人が死亡し、105の農場が破壊された。

この災害から1年後、被災地を一望する対岸の丘に慰霊碑が建立された。川を挟んで対岸の緩斜面でクイック・クレイ地すべりが発生し、低地全体に泥流化した地すべりが氾濫した。慰霊碑の近くには、当時の災害の状況を示した案内板も設置されている。



写真-1 ヴァーダル地すべりの全景（上野,1996）

#### 2.2. バイオントダム災害（イタリア）

イタリア北部ヴェネト州では、1960年に竣工したバイオントダムの堤体背後で1963年10月9日深夜に地すべりが発生し、土塊がダム湖に滑り込んだ。このため、ダム湖の水が対岸250mの高さまで遡上し、山腹のカッソ村の一部を破壊したほか、ダムを越水して流れ出し、下流のロンガローネ村を飲み込んだ。この災害によりダム周辺で2000名以上が亡くなった。

現在、最大の被災地であるロンガローネ村の中心部に博物館が整備され、災害前後の様子を展示することによって災害を伝えている。ダム周辺は災害遺構として整備されており、ダム堤体や背後の地すべり土塊などを見学できる。また、災害直後にロンガローネ村の下流に慰霊者墓지가建設され、慰霊施設には、数か国語で「最初は波の轟音 そして死の沈黙 決して忘れてはならない記憶」という警句が刻まれている。



写真-2 バイオントダムと背後の地すべり（上野,2019）

#### 2.3. セントヘレンズ火山の山体崩壊（アメリカ）

1980年5月18日8時30分頃、アメリカ・ワシントン州南部にあるセントヘレンズ山で大規模な火山噴火が発生した。この噴火により山頂部分で大規模な山体崩壊が生じ、直径1.5kmにおよぶ馬蹄形カルデラが形成され、山頂部の標高は2,950mから2,550mに減少した。崩壊した山頂部は岩層なだれとなり、200棟の建物と47本の橋を消失させ、57人の命を奪った。

噴火後、火山周辺は国立火山記念公園として整備され、複数の学習施設が開設された。その後、一部統廃合が行われたものの、現在もフォレスト・ラーニングセンターでは噴火前後の様子を示す展示が行われており、ジョンストン・リッジ観察所からは馬蹄形のカルデラや岩層なだれ堆積物が観察できる。

#### 2.4. 2016年エクアドル地震（エクアドル）

2016年4月16日18時58分、エクアドル北部のエスメラルダス県ムイスネの南南東約27km付近を震央とするM=7.8の地震が発生した。この地震により、エクアドル沿岸部の都市ではビルの倒壊など大きな被害が発生し、全土で死者661人、負傷者16,600人、行方不明58人の人的被害が生じた。

この地震を記憶するため、震源南部のペデルナレス市のビーチに記念碑が設置されている。碑には「新生ペデルナレス 2016年4月16日の地震で亡くなった方々の追悼のために」とだけ記されており、碑の左右には地震による犠牲者の名前が刻まれている。



写真-3 ビーチに設置された地震記念碑（西村,2021）

## 2.5. 2011 年リオデジャネイロ州豪雨災害（ブラジル）

ブラジル・リオデジャネイロ州の山岳地帯では、2011年1月11-12日にかけて豪雨が発生し、ノバフプリブルゴ市やテレゾポリス市、ペトロポリス市などで洪水や土石流・土砂崩れが多発した。死傷者は918名と言われており、ブラジル史上最悪の気象災害となった。これらの地域では、貧困層が都市周辺の斜面を開拓して住居を構築し、ファベイラ（スラム街）となっているところも多く、自然的な要因だけで発生した災害ではないところも見受けられる。

この災害の後、リオデジャネイロ消防局によりノバフプリブルゴの消防署の敷地内に「英雄消防士記念碑」が建立された。この碑は、2008年に交通事故で亡くなった消防士や2011年の豪雨災害によって被害を受けた人々を救出するために果敢に現場へ立ち向かった消防士へのオマージュとなっている。

## 2.6. 2008 年四川大地震の災害遺構（中国）

2008年四川大地震は、中国中部の四川省汶川県で2008年5月12日14時28分に発生した。龍門山脈に沿う長さ約300kmの龍門山断層帯の一部が活動したと考えられており、中国当局の発表では $M_s=8.0$ とされている。この地震によって多くの建物が倒壊し、道路や電力・水道・通信などライフラインが寸断された。地震から2か月後の時点で、死者6万9197人、負傷者37万4176人、1万8222人がなお行方不明で、家屋倒壊21万6千棟、損壊家屋415万棟とされている。

四川省では、学校校舎の倒壊が6898棟発生し、教職員および生徒の被害が全犠牲者の1割以上を数えた。震源地に近い汶川県の漩口中学も倒壊したが、災害遺址として保存され、一般に公開されている。



写真-4 倒壊した学校を利用した災害遺跡（上野,2016）

## 2.7. 2009 年少林村の深層崩壊による災害（台湾）

台湾では、2009年8月9日の早朝、台風モーラコットにより4日間で2,900mmという豪雨により深層崩壊が発生し、斜面の麓にあった少林村の中心部が埋没し、死者・行方不明者あわせて500人を超える被害が出た。

かつての少林村の市街地を見渡せる高台に「少林村記念公園」が整備され、慰霊碑と被害者461名の銘板が設置されている。



写真-5 少林村記念公園の災害慰霊碑（上野,2016）

## 2.8. 1999 年台湾大地震の災害遺構（台湾）

台湾では1999年9月21日未明、中部の南投県集集镇付近を震源とした $M_w=7.6$ の地震が発生した。中西部の山麓部には地表地震断層が出現し、各地で構造物や施設に大きな変状が生じた。また、多くの建物が倒壊し、斜面崩壊や地すべりも多発、死者2415人、行方不明者29人、負傷者11000人以上の被害が出た。

震源域の北部にあたる台中県石岡郷の石岡ダムでは、ダムの直下に低角の逆断層が出現し、堤体が約7mの落差で大きく破壊され、決壊に至る被害を受けた。このダムは災害遺構として整備・公開されている。

光復新村では、陸上競技場を横切るように低角逆断層の地表地震断層が出現した。この陸上競技場も保存され、トラックを変位させた地表地震断層や、隣接する大きく倒壊した小学校の校舎などを見学しながら地震やその被害を学べる施設として整備されている。

地表地震断層が出現した地域から少し東側の山間部に位置する九份二山では、地質構造に大きく支配された斜面が地震により流れ盤地すべりを起こし、集落が丸ごと流された。台湾行政院では、この地すべりを保全し、傾いた家や堰止湖、地すべりの痕跡などを地震記念地として見学できるように整備している。



写真-6 地表地震断層の保存施設（上野,2016）

## 3. まとめ

本稿では、筆者らが海外で確認した自然災害碑を10件紹介した。世界各地の災害碑を網羅したわけではないが、日本と同様、世界各地にも災害を伝承する碑や施設が整備されていることが示せた。

確認した碑や施設をまとめると、慰霊碑4件、顕彰碑1件、災害遺構6件（重複含む）となり、災害遺構を見学できるように保存・整備しているものが多い。

## 74. Current activities and research issues of engineering geology in Korea

○Yong-Seok Seo (Chungbuk National University, President of the Korean Society of Engineering Geology)

In this lecture, I would like to explain about major research and projects that have been or are currently being conducted by the Korean Society of Engineering Geology (KSEG). First, three projects to solve engineering geological problems caused by faults, a kind of weak rock, are introduced. Second, it explains a project related to the ground subsidence problem that occurs frequently in downtown areas. Finally, I would like to explain the problem of recovery from mine damage in Mongolia, where mine development has been completed.

The first project is an engineering geological survey of foundation including fault zone in the Philippine<sup>1)</sup>. The study area is situated within the Philippine Mobile Belt, which is a complex assemblage of platelets (or crustal blocks) located between the Philippine Sea Plate and the Sunda Plate. There are several major faults close to the study area. In order to evaluate slope stability near study area, physico-mechanical properties of ground containing fault zones, which were obtained from 14 boreholes, an electrical resistivity survey, BIPS, and a seismic refraction survey, were analyzed.

The second is classification of geological and engineering properties in weak rock<sup>2)</sup>. The engineering properties according to the geological conditions of faces were analyzed to establish a detailed classification scheme for weak rocks in a tunnel in southeastern Korea where Ulsan fault zone is present. Weak rocks are classified into 'disintegrated rocks' that are physically weathered and 'decomposed rocks' that are chemically weathered, and engineering properties are determined by analyzing the results of simple visual examinations, Schmidt hammer tests, and point load tests. This proposed classification method can determine rock strength (Is(50) and Schmidt rebound values) based on discontinuity properties and Schmidt hammer tests of the individual weathering types.

The third project is about hydraulic characteristics of fault rocks in reservoir site<sup>3)</sup>. Since completion in 2018, the Yugye Reservoir, located in Pohang City, Gyeongsangbuk-do, South Korea, has experienced persistent seepage in the river section downstream of the reservoir, causing a decline in water storage function. It was presumed that the seepage was caused by the high permeability of the foundation, as the reservoir was constructed directly above the Yugye

segment of the Yangsan fault zone, which is the largest fault zone in Korea. Therefore, in-situ tests were conducted to identify the hydraulic conductivities of the fault zone constituting the foundation.

The fourth is about ground subsidence in large cities. Several small-scale ground depression and cave-in have been occurring in large cities of Korea since about 10 years ago. Therefore, a number of studies on ground subsidence and countermeasures are being conducted. The subjects of research are mainly about the mechanism of occurrence, the major causes, processes, and tendency of ground depression and cave-in to occur. In addition, joint exploration work is underway using vehicle-type GPR exploration equipment and handy-type GPR exploration equipment for major sections of the downtown area. The main causes of ground subsidence in downtown are excavation works, damage to underground facilities (sewage pipes, water pipes, etc.), and soil loss due to heavy rain.

Finally, Mine development causes mine damage and has a great impact on the human environment. Recently, such mine damage has been recovered and economic and eco-friendly use of abandoned mine sites has been actively developed. This presentation includes explanation of the mine damage inspection, environmental recovery, etc. in Mongolia. The types of mine damage include soil pollution, water pollution, and ground subsidence.

### Reference

- 1) KSEG (2019), : Expert Report on Rock Classification & Slope Stability Analysis for Zone II (A1E 2 x 600 USC CFPP), Report, p.77.
- 2) Yun, H.S., Seo, Y.S., (2019): Classification of geological and engineering properties in weak rock: a case study of a tunnel in a fault zone in southeastern Korea, Bull. Eng. Geol. Environ., 78, 445-458.
- 3) Moon, S.W., Kim, H.S., Seo, Y.S., (2022) Relationship between Hydraulic Conductivity and Occurrence of Fault Rocks in Yangsan Fault Zone, Korea, Bull. Eng. Geol. Environ., 81:365.



## 75. 国内地質技術者が海外業務で戸惑う点について

Topics regarding Japanese Geologists are bewildered on Overseas Projects

○徳楠充宏（株式会社ニュージェック）

Mitsuhiro Tokusu

### 1. はじめに

コンサルタント業界では、景気の複雑な変化に対応すべく、国内業務と海外業務の双方に対して適時に人材を投入する傾向が高くなっている。人材は海外専門の地質技術者のみならず、国内地質技術者がハイブリッド的に投入されるケースも多い。国内業務で多忙な中、海外業務に参画した国内地質技術者が海外業務に戸惑い、モチベーションを失うことで早期に帰国を希望することもある。結局は、渡航してから自分の海外業務に対する適性が判明することになるが、本文では、国内地質技術者が海外業務で経験すると思われる戸惑いについて、生活環境の変化、プロジェクト段階、顧客、技術面、報告書の観点から幾つか事例を紹介する。

### 2. プロジェクト段階

プロジェクトには、進行段階（Pre-FS, FS, DD, CS）がある。Pre-FS は事前実行可能性調査、FS は実行可能性調査、DD は詳細設計、CS は建設ステージである。**Pre-FS**：現地踏査のみで主要な地質リスクを想定することが主要な目的となるため、現場の見立てができる熟練した技術者を派遣することが望ましい。但し、この段階での踏査は、現場までのアクセスが悪いことや危険を伴うことがある。現地業務を全うしたい義務感や焦燥感の中で対峙する困難に対して安全を確保しながら業務を遂行することになる。

**FS**：主要な一連の地質調査を行い、GDR（Geotechnical Data Report）とGBR（Geotechnical Baseline Report）の作成と施工入札図書を作成する。地質調査期間は概ね6か月~1年程度、FS全体でも1.5年~2年程度の工期であるので、我が国のような綿密な調査はできないことが多く、限られた調査結果から地質リスクを想定する。積み残された問題がある場合は、Upgrade FS や Update FS と称される追加地質調査が行われることも多々あるが、この場合は顧客に対して調査の必要性を客観的に説明する必要がある。この説得こそが地質技術者の腕の見せ所になる。この段階ではローカルの地質調査業者が現地に入るため、現場までのアクセスや安全管理は改善される。

**DD**：土木技術者による設計業務が主体となるが、設計に用いる地質図面類や基礎地盤の物性値を提供するために、地質技術者もプロジェクトに参画する。地質リスクの懸念が払拭されていない場合は、この段階でも追加地質調査を行うこともある。

**CS**：国内業務と同様に施工管理の立場でプロジェクトに参画する。施工業者がベースキャンプを建設しているので、現場の生活環境は飛躍的に改善されている。この段階では、地質判定（地盤検査、トンネル切羽観察、杭施工スライム判定等）が主たる業務となるため、国内の岩級判定が使えない点を除くと現場は国内業務での作業と同じである。但し、海外施工業者の中には、わが国の施工業者のように一般的な常識を持つとは限らず、攻撃的で自己主張を通す業者もあり、クレーム対応に四苦八苦するケースもある。

以上の一般論は、オーナーと施工業者との契約形態（Engineering Procurement Construction: EPC または Bill of Quantity: BOQ）や雇用されるコンサル（オーナー側または施工業者側）の立場により内容が変わる。

### 3. 顧客

顧客は、1) JICA 等の我国の政府機関、2) 相手国省庁と融資をサポートする銀行、3) 民間機関（日本企業、海外企業）に分かれる。

1)の業務形態は、国内技術業務と類似しているため、地質担当として容易に業務に馴染める。2)については、融資する国際金融機関が第三者技術専門家による技術団を雇用するケースがあり、技術団の承認がないと進めない。専門家は欧米の白人が大半で、国際技術標準や手法を全面に出してくる、英語力での劣位、立場上の劣位等の理由で、日本人技術者にとってはこの対応に不慣れであることが多い。3)のケースにおいても、最終的には国際金融機関からの融資を受けることになるので、2)と同じケースとなりがちである。

### 4. 技術面

#### 4.1 地形データ

我が国との技術レベルの差が出る分野であり、地形データの不備は設計・施工に大きく影響する。測量方法は、わが国と同様に、市販地形図、衛星データによる地形図化、地上測量、航空機 LiDAR、ドローン LiDAR 等である。我が国に比して、概してローカル再委託業者の成果品質が悪い。品質が悪い理由の一つは、等高線の作成をプログラム任せにして、現地での確認を十分に行わないため、極端な場合は小さな尾根を沢と取り違えることもある。対応として、発注仕様書で細かな縛りを設けること、また成果品のドラフト段階で不備箇所を修正させること、現地確認を粘り強く行うこ

とが必要である。また、事前情報により、優秀な再委託業者を見つけ確保しておくことも重要である。

#### 4.2 地質データ

市販の広域地質図や活構造図が作成されていることが多いので、精度はともかく、まずはこれらの地質データを利用する。現地調査方法はわが国と同様に、各種探査、ボーリング、試掘横坑、テストピット、岩石試験、土質試験、原位置試験等である。地形データと同様に再委託業者の成果品質が悪いため、再委託業者への成果品の照査は十分な時間と手間を割く必要がある。コロナ禍では、Webを駆使したリモート地質調査管理も行われている<sup>1)</sup>。

#### 4.3 技術標準

技術標準は、国際標準がベースになるので、地質調査業務をローカルに再委託する際に用いる技術標準は、ASTM (Standards of American Society for Testing and Materials), ISO (International Organization for Standardization), USGS (United States Geological Survey), USBR (United States Bureau of Reclamation) を標準化しておくことと便利である。顧客に説明し承認を得れば、JIS (Japanese Industrial Standards) や JGS (Japan Geotechnical Society Standards) を利用することも可能である。我が国の軟弱地盤、脆弱トンネル、フィルダム、災害地質、火山地質、活断層、地震等は高い技術レベルにあるものの、英語で標準化したものがないため、海外に技術紹介する場合は個別の論文を参照することになる。国内と海外で異なる典型的な技術標準としては、岩盤に対する岩級区分がある。海外では、下記のように、主にトンネルや地下空洞を対象とした評点形式の区分が多い。

表-1 海外での主な岩級区分<sup>2)</sup>

No.	Rock Mass Classification System	Abbreviation	Originator	Country of Origin	Appreciation Areas
1	Rock Load		Terzaghi, 1946	USA	Tunnel with steel support
2	Stand-up time		Lauffer, 1958	Australia	Tunneling
3	New Austrian Tunneling Method	NATM	Pacher et al., 1964	Austria	Tunneling
4	Rock Quality Designation	RQD	Deere et al., 1967	USA	Core logging, tunneling
5	Rock Structure Rating	RSR	Wickham et al., 1967	USA	Tunneling
6	Rock Mass Rating	RMR	Bieniawski, 1973 (last modification 1989-USA)	South Africa	Tunnels, mines, slopes, foundations
7	Modified Rock Mass Rating	M-RMR	Ünal and Özkan, 1990	Turkey	Mining
8	Rock Mass Quality	Q	Barton et al., 1974 (last modification 2002)	Norway	Tunnels, mines, foundations
9	Strength-Block Size		Franklin, 1975	Canada	Tunneling
10	Basic Geotechnical Classification		ISRM, 1981	International	General
11	Rock Mass Strength	RMS	Stille et al., 1982	Sweden	Metal Mining
12	Unified Rock Mass Classification System	URCS	Williamson, 1984	USA	General
13	Communication Weakening Coefficient System	WCS	Singh, 1986	India	Coal mining
14	Rock mass Index	RMI	Palnström, 1996	Sweden	Tunneling
15	Geological Strength Index	GSI	Hoek and Brown, 1997	Canada	All underground excavations

#### 4.4 調査数量と調査期間

調査数量に関しては、我が国で行うような精密な調査は期待できないので、日本人地質技術者が海外業務に参画すると、まずは粗い地質調査に驚かされる。粗

い地質調査がもたらす地質リスクはコストに換算することが多く、例えば地質想定と実施工時に現れる地質事象の乖離がプロジェクトコストの数%程度以内で収まるのであれば、予め設定されている予備費で相殺される。問題は、予見されていない重要な地質リスクが出現するケースである。このような重要な地質リスクへの対応は、オーナー側のコストを圧迫する他、発生する工期延長は、コストよりも深刻なダメージに繋がることがある。銀行の融資は商業ベースでの施設運開時期で決められているため、オーナー側の理由による遅延であればペナルティを課せられることもある。重要な地質リスクの見逃しを回避するのは、地質技術者の力量に依存するため、海外業務の地質技術者のプレセンスは国内業務よりも大きいのかも知れない。

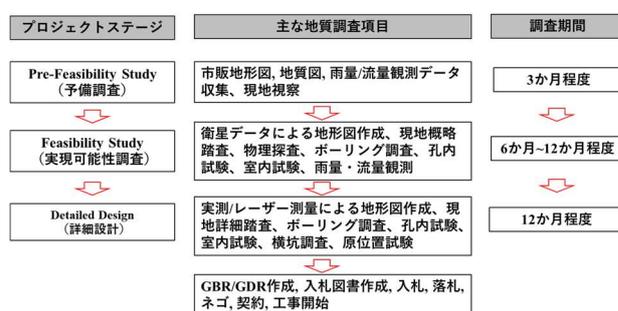


図-1 海外業務での一般的な地質調査の流れ

#### 4.5 報告書

日本での地質解析報告書は、海外では一般に GIR (Geotechnical Interpretative Report) と称し、FS の中間時に提出されるもので、得られた地質事象を顧客に客観的に説明するレポートであり、日本人地質技術者にとって本報告書の作成に違和感はない。FS の最終時には、土木入札業者の見積りの参考図書となる GDR と GBR を準備するが、国内業務では存在しない報告書なので作成に戸惑いがちである。尚、本報告書はガイドラインが出版されているので参考にされたい<sup>3)</sup>。

#### 引用文献

- 中大輔・柳島健太・高橋真弘・猿橋崇央 (2021) : ウェアラブルカメラを用いた海外でのリモート地質踏査の実施, 電力土木 9 月号.
- COSAR,S. (2004) : Application of rock mass classification systems for future support design of the Dim Tunnel near Alanya, Thesis (Master of Science in Mining Engineering) Middle East Technical University, Ankara.
- Randall, J. Essex (2007) : Geotechnical Baseline Report for Construction: Suggested Guidelines and Practices, American Society of Civil Engineers.

## 76. シンガポールの広域地質調査と地質図の改訂

### ～45年ぶりの大幅な層序改訂とインタラクティブ地質図の発行～

Regional Geological Survey and Revision of Geological Map in Singapore  
- First Major Stratigraphic Revision in 45 Years and Publication of Interactive Geological Map

○安田智広 (基礎地盤コンサルタンツ株式会社)

Tomohiro Yasuda

#### 1. はじめに

シンガポールは東南アジアのマレー半島の南端に位置し、その国土面積は約 700 km<sup>2</sup> と狭い。地上の空間が限られるため、2010 年頃からシンガポール政府は地下空間の有効活用を推進している。大深度地下開発の候補地選定のため、シンガポール建築・建設庁(BCA)と共に 2012～2018 年にシンガポール島の約 40%のエリアで広域地質調査を実施し、3次元地質・地盤モデルを構築した<sup>1)</sup>。

シンガポールの地質図は 1976 年に初めて出版されてから 2009 年に一度改訂されたが、その地質層序は初版から大きな変更はなされなかった。上記の広域地質調査で得られた情報を基に BCA と英国地質調査所(BGS)が中心となって国際層序ガイドに準拠した層序に改訂し、2021 年に新しい地質図を発行した<sup>2)</sup>。

#### 2. 広域地質調査と 3次元地質・地盤モデルの構築

2012 年から 2017 年にかけて、シンガポール島の約 40%に相当する約 300 km<sup>2</sup> のエリアで地質調査を実施した。調査と並行して 3次元地質・地盤モデルを作成し、2018 年に完成した。調査とモデリングにあたっては、シンガポールと日本はもとより、英国や中国、カナダ、オーストラリアから各分野のスペシャリストを集め、プロジェクトを遂行した。特に英国の BGS は第三者照査者としてモデリングの入力データおよび地質学的解釈、モデリング手法、構築した 3次元モデル自体についての照査を一貫して行った。

地質調査は以下のボーリング調査と物理探査を主体とし、加えて 13,200 地点もの既往ボーリングデータ(掘進長 30～70 m 主体)を活用することで地質の分布状況を把握した。

- 深掘りボーリング 170 地点(掘進長 100～200 m 主体): 高採取率コアで深部地質を把握し室内岩石試験を多数実施、孔内で原位置試験や物理検層・ボアホールカメラ観察を実施
- 弾性波探査 155 km(探査深度 300～500 m): 反射法と屈折法を実施し、断層や褶曲などの地質構造を推定

取得・収集したデータを基に以下の 3次元モデルを構築した。

- 地質モデル: 地層の分布や断層・褶曲といった地質構造を可視化したモデル(図-1)
- 地盤モデル: 風化区分や岩級区分のような工学的観点で作成したモデル

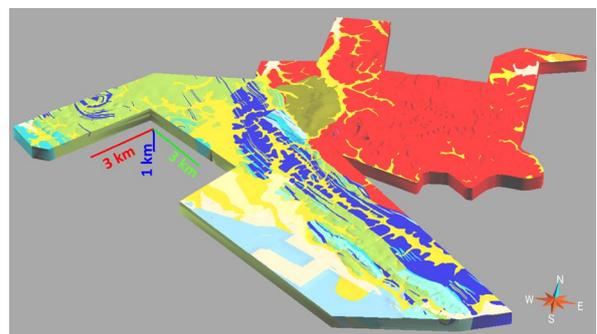


図-1 3次元地質モデル<sup>1)</sup>

#### 3. 地質層序の改訂

新しい地質層序を図-2と図-3に示す。

改訂の大きな点は以下の2つである。まず、シンガポールの北部と東部の大部分を覆っている火成岩(花崗岩類主体)の中に、複数の貫入が認められ、6つの深成岩体に分類された。さらに、シンガポールの南部と西部の大部分を覆っている堆積岩と火砕岩は、これまでは「ジュロン層」と呼ばれ、複数の「相」に分かれていたが、国際層序ガイドに従って、いくつかの新しい層と2つの新しい層群(ジュロン層群とセントーサ層群)に完全に分類し直された。

新生代の堆積層に関しては大きな層序の改訂はないが、名称の変更がなされた。

今回の改訂においては断層や褶曲などの把握もなされ、構造地質学的アプローチと地質年代測定によりシンガポールとその周辺の地質発達史を再考察した上

地質年代				地質体単元及び階層		
代	紀	世	期	第4階層	第5階層	第6階層
中生代	白亜紀	後期	セノマニアン		ブラウセドック石英ソナイト岩体	
	おおよそ三畳紀後期以降から白亜紀前期以前				シンガポール玄武岩 -安山岩質岩脈群	岩脈 (名称なし)
	三畳紀	後期	カーニアン	ブキ ティマ センター (深成 岩類)	シンパン花崗岩体	
		中期 ～後期	アニシアン ～カーニアン		ブラウウビン花崗岩体	
古生代	ペルム紀 ～三畳紀	グアダルピアン ～三畳紀中期	キャピタニアン ～アニシアン		デイリーファーム花崗岩 -細粒花崗岩質岩体	
	ペルム紀	シスウラリアン	アーティス キアン		ゴンバック斑れい岩-花崗岩質岩体	
					チャオチューカン花崗閃緑岩 -トータル岩質岩体	

図-2 地質層序表(火成岩) <sup>2)</sup>を和訳

で地質層序を再構築していったのが特徴的である。

代	紀	世	期	シンガポールにおける 岩相層序学的枠組み
新生代	第四紀 ～新第三紀	完新世		ローチー 粘土層/ タンジョン ルー粘土層
		更新世		ジャラン ベサル層/ クランジ層
		?	鮮新世	ベドック層 フォートキヤニング層
中生代	白亜紀	前期	?	アプチアン ?ペリアシアン
		後期	?	アプチアン ?ペリアシアン
	ジュラ紀	前期		アプチアン ?ペリアシアン
		後期		アプチアン ?ペリアシアン
		中期		アプチアン ?ペリアシアン
	三疊紀	後期		アプチアン ?ペリアシアン
		中期		アプチアン ?ペリアシアン
古生代	石炭紀 ～ミシシ ピアン紀			アプチアン ?ペリアシアン
				アプチアン ?ペリアシアン

図-3 地質層序表（堆積層、堆積・火砕岩）<sup>2)</sup>を和訳

#### 4. 改訂地質図の発行

改訂された地質層序に基づく新しい地質図は紙媒体とデジタル媒体の2種類で発行された。前者は地質図と説明書で、後者は地層等の表示を自分で設定できるインタラクティブ地質図（図-4）のpdfファイルとGISファイルで構成される。

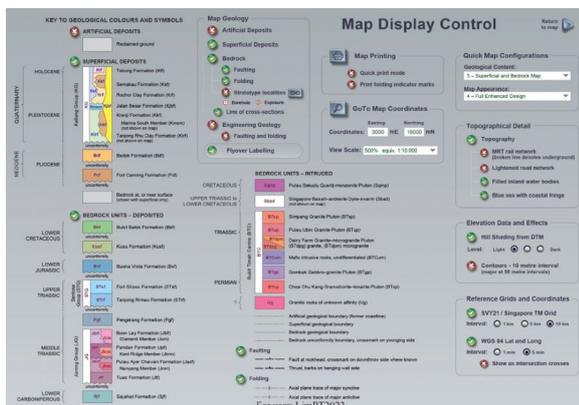
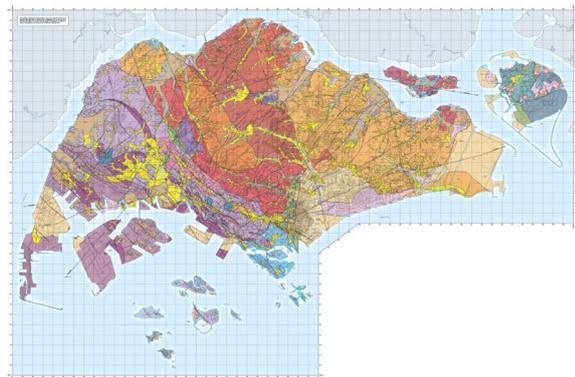


図-4 インタラクティブ地質図（上図）とその表示コントロールパネル（下図）<sup>2)</sup>

地質図は表層地質図、基盤岩地質図およびそれらを統合した地質図、応用地質学的区分図から構成されている。説明書では前述の広域地質調査で得られた豊富

な岩石コア写真・薄片写真を用いた岩種構成の記述に加えて、単位体積重量や強度、変形係数、透水係数、弾性波速度などの地盤定数も示され土木事業でも有益な資料である。地盤定数の値は各層の岩相と風化区分毎に統計処理シグラフ（図-5）と表にまとめられており実用的である。

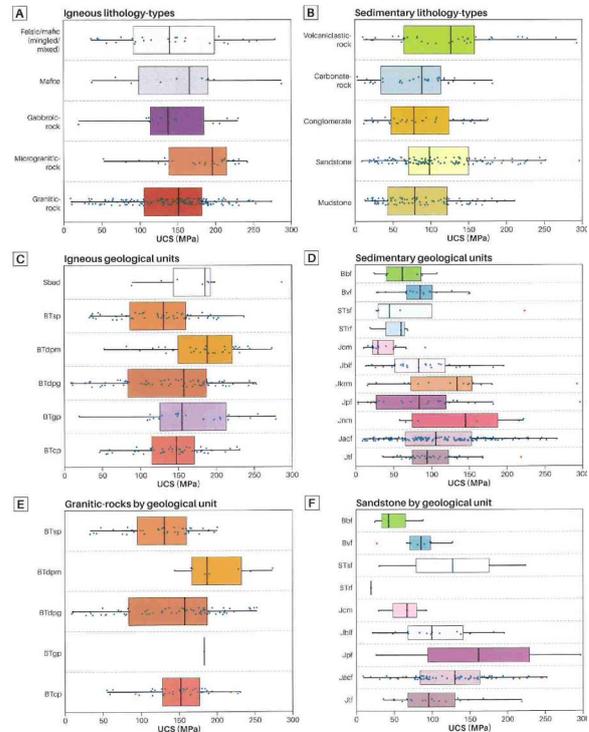


図-5 地盤定数のグラフ例<sup>2)</sup>

#### 5. まとめ

新しい地質図と説明書の出版は、最初の正式な出版物が1976年に発表されたことを考えると、画期的な成果である。新しい地質層序は2022年10月1日から、シンガポールでの公共土木事業において全面適用されることになっている。

#### 6. 謝辞

本論文を執筆するにあたり、BCAからは地質図に関わる資料を提供していただいた。ここに記して感謝の意を表す。

#### 文献

- 1) Yasuda T., Lu K. T., Leh L. C., Chiam K. and Ghiong L. S. (2019) : Development of 3D geological model of Singapore, Japanese Geotechnical Society Special Publication, Vol. 6 Issue 2, pp.67-72.
- 2) Building and Construction Authority, Singapore (2021) : Singapore Geology.

# 77. 海外プロジェクトにおける地質技術者の役割

Geotechnical Engineer's Duties on Foreign Construction Projects

○百瀬 泰 (日本工営株式会社)

Yasushi MOMOSE

## 1. はじめに

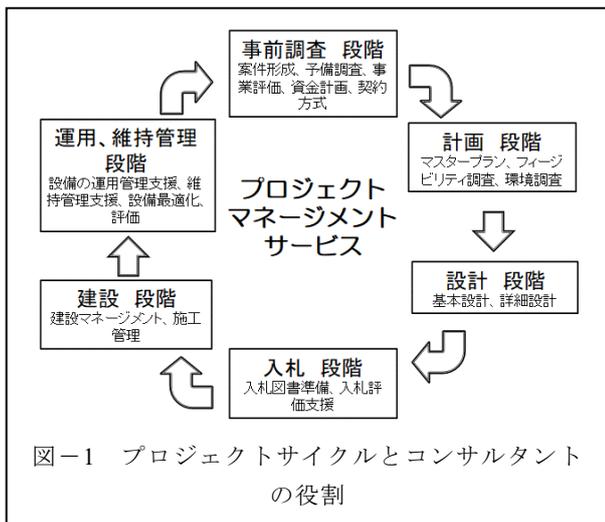
筆者は海外業務に従事して、今年で 22 年目となる地質技術者であり、これまで、海外プロジェクトには 21ヶ国、その中でアジアでは 11ヶ国に携わってきた。

本発表は、海外業務を通して得た個人的な経験である。近年、実際の業務の中で、海外技術者の育成や、日本国内外で働けるハイブリット人材の養成を求められることが多いことから、今後海外で活躍を期待される若手に対し、一つの参考事例を提供することは重要と考え、筆者の経験を披露したい。

## 2. プロジェクトにおける地質技術者の立場

地質技術者と最も関わりが深い、社会資本の建設プロジェクトにおけるコンサルタント業務は、通常、事前調査・計画・設計・入札・建設・運用・維持管理の各段階を経て行われる(図-1)。地質技術者は、主として計画・設計・建設段階で活躍し、地質調査を計画・実施して、対象となる地盤をモデル化して工学的な評価を加え、設計者に調査結果を提示する。このように、地質調査の目的や作業内容自体には、海外業務の特殊性があるわけではなく、国内業務と変わらない。

海外業務の特徴は、その実施方法にあり、各段階において、多数の専門家がコンサルタントチームを結成して、一つのプロジェクトのために短期間で実施することである。地質技術者は、プロジェクトの地質に関連する業務を一手に担うため、地質の専門性に加え、調査対象となる構造物の知識やチーム内における他の専門家とのコミュニケーション能力を要求される。また、具体的な地質調査は、現地地質業者に再委託して



行われるため、現地地質業者に対するマネージメント能力が必要となる。

## 3. 地質技術者の具体的な業務

地質調査の作業実施に当たっては、対象となる国の社会環境や慣習、さらには各現場の状況に対応した調査方法のアレンジが要求される。こうした臨機応変の対応は、海外業務の面白さの一つであり、技術者の力量が問われるところでもある。近年では、経費削減の必要もあって、地質調査の全期間を通して、現地に滞在することができない。このため、地質調査は、各段階につき 3 回程度の渡航で実施され、その中で遭遇する困難を一つ一つ解決しながら、進めることになる。  
<第一回目渡航：現地作業期間は 1.0 ヶ月間程度>

### ① 既存資料収集

インターネットや各国の地質調査機関等から、地質情報を入手・レビューする。多くのアジア各国では、大縮尺の地形図(S=1:50,000~1:100,000)や地質図(S=1:100,000~200,000)が利用できる。近年は GIS シェープファイルをダウンロード可能なサイトが増え、衛星写真も利用可能になっている。ただし、詳細な既存地形図は機密扱いで、利用が制限(スリランカ等)されることもある。

### ② 現地確認

発注者や現地カウンターパートと共同で現地視察を行う。事前の計画準備(飛行機・車両の手配、宿泊地の確保、案内人の確保等)が重要であるが、準備ができたとしても予定時間通りに移動できることは少なく、実際に行ってみないと分からないことは多い。また、踏み跡を辿ってたどり着いた現地には目印もないため、最近では GPS を利用できるとはいえ、現地確認には『地図を読む』能力が必須である。

### ③ 調査計画立案・仕様書の作成

ボーリング、物理探査、室内試験等を立案し、現地地質業者に発注するための仕様書を作成する。試験方法は ASTM に準拠することが多い。標準貫入試験やルジオンテストは、試験方法や機材、また解析方法が日本とは微妙に異なることがあり、現場に応じた調整が必要となる。このため、現地地質業者を訪問して、資機材や試験装置の性能確認が必要となる。

<第二回目渡航：現地作業期間は 0.5 ヶ月程度、現場

管理の多くはリモートで実施

#### ④ 調査実施

調査実施期間中、少なくとも1回は、現地確認を実施したいが、発注者から認められないこともある。このため、国内から email や SNS を使って、現場と頻りに連絡を取り合い、現場管理を行っている。アジア諸国のスマートフォンの普及率は高いので、問題が生じた場合は、写真や動画の送付を依頼し、現場には SNS で指示すると共に、現地傭人を別途雇用して、フォローアップしている。遠隔での現場管理は難しいため、仕様書で撮影項目や場所を具体的に指定して、現場状況を可能な限り把握するとともに、ドローン撮影を利用している。

ボーリング機材は全て人力で運搬され、作業員は期間中、現場でキャンプする。このため、深堀でなければ、作業時間や費用は日本に比べ非常に小さい。ただし、コアパックチューブ（インドネシアでは最近 JICA 調査で導入された）を使用しない等から、コア採取率が悪く、地質の解釈には想像力が要求される。弾性波探査は、火薬使用の承認に非常に時間が掛かるため、実施できないことが多く、また、現地業者は作業・解析に不慣れである。トンネル調査では、ボーリングの本数を増やし、Turbo hammer 等を利用した非発破による弾性波探査が行われている。

<第三回目渡航：現地期間は1.0ヶ月程度>

#### ⑤ 調査結果の検収・報告書作成

現地地質業者から成果を受領し、ボーリング位置や削孔深度を現地確認する。ボーリングコアを見直し、試験結果をレビューして、地質調査報告書を作成する。業者の地質調査が予定通りに終了することは希であり、報告書作成の時間は非常に短い。また、室内試験は、報告書作成時期に間に合わないことが頻発する。

海外での地質調査は、地質技術者が優秀であっても一人でやることは出来ない。当該国の地質技術者との共同作業が、調査結果の成否を担っている。このため、現地地質業者を信頼しないと、地質調査を行うことは出来ないが、地質技術者は業者が実施した調査結果を検証する責務がある。

サンプリングや原試験箇所の決定は、可能な限り自ら行い、事前に試験結果を想定し、実際の試験値に大きな差異が生じた場合は、その理由を考察に加えるようにしている。なお、この短い期間中に、現地カウンターパートに対し、地質調査結果を説明するワークショップを開催することもある。

#### 4. 海外で遭遇する地質調査上の困難

- ① 現地地質業者は、仕様に従ったことはできるが、それ以上の成果は期待できない。『仕様書の要求事

項に近づくよう管理できるか』は、地質技術者の力量となる。詳細に仕様書に記載し、確実に指示する。

- ② 地形図を読むことができる（等高線で地形のイメージを持てる）現地の技術者は少ない。さらに、測量業者は外業と内業（CADによる図化）の分業が進み、測量のエラーに気が付かないことがある。地形図が現実の地形に合わない場合は、指摘して再作図を要求する。
- ③ 地質図作成技術が低い。残念ながら、筆者はこれまで地質踏査をまともにできる業者に巡り合ったことは無い。報告書の成果のために、自分で踏査し直して、再確認している。また、作業期間が十分に確保できないため、詳細の地形図作成は、地質調査時期と重なってしまうことも多く、地質踏査に詳細地形図が利用しないことから、地質図の精度が期待できない。

#### 5. 終わりに

地質技術者は、高度な判断力が求められ、プロジェクトの遂行に大きな役割を果たしている。このため、国内技術者が日頃感じている以上に、海外の地質技術者のプロジェクトにおける地位は高く、尊敬される専門職であるといえる。最後に、筆者の考える海外業務の面白さを列挙して、本稿のまとめとしたい。

- ✓ 好きな仕事でお金が貰える。
- ✓ 相手政府の協力を得られるため、通常の旅行では入れない場所を訪問できる。
- ✓ うまいかないことや辛いことは多いが、ものができる達成感はある、やみつきにはなる。
- ✓ 責任範囲の中において、判断が任せられ、評価される。逆を返せば、判断を下せなければ、Engineerとは言えない。
- ✓ 地質技術者個人の経験が高く評価させるため、体力が続く限り、年配になっても働ける。
- ✓ 場所や時間が変わると、同じ方法は使えない。ルーティンワーク化し難く、仕事が無くなることはない。

#### 追記

地質図からもアジアの歴史や国柄が読み解ける。インドネシアは、オランダの Bemmelen, R. W. van による非常に優れた先駆的調査がある（The Geology of Indonesia, 1949）。東チモールは、インドネシア時代に作成された地形図・地質図が利用できる。鉱物資源が豊富な国（スリランカ、ミャンマー等）は、詳細な地質図が作成されている。ベトナムの地質図では、第四紀層が細かく分類されており、これらの地層区分は旧ソ連の影響と推測される。フィリピンは積極的に情報公開を行っており、ホームページが充実している。

## 78. ネパール人から見た日本のコンサルタント事情

View of Japanese Consultant's Situation from the Nepalese Engineer

○プラダン オム (応用地質株式会社)

Pradhan Om, OYO Corporation

### 1. はじめに

近年、日本において留学生は増加傾向にある。2021年における外国人留学生の統計<sup>1)</sup>を見てみると、修士課程では約3万人、博士課程では約1万7千人であり、コロナの影響により留学生数は減少したものの、日本への関心は失われていない。そして、これらの日本で学んだ留学生は、そのまま日本企業への就職を希望する人たちも多い。文部科学省がまとめた留学生の日本における就職率は、2018年は40%程度<sup>2)</sup>であり、比較的日本への定着が進んでいると考えられる。

実際に日本企業に就職した著者の目から見ると、日本企業は海外進出についての関心は高いものの、外国籍の技術者が日本国内の企業で活躍することに対する関心はそれほど高くないように感じられる。日本企業の国際化に対する関心が高まりつつあるなか、外国籍の技術者の始点から見た日本で働くことの利点や課題を、著者の体験を含めて伝えたいと思う。

### 2. 日本での仕事の様子

2013年に応用地質株式会社(以下、OYO)に入社し、現在9年目となる。電磁探査機器を搭載したヘリコプターに搭乗し、広範囲にわたる地下構造の調査する空中物理探査業務を主に担当している。その他、地上物理探査関連の業務を担当しながら日本各地で調査を行っている。入社当時から日本語による日常会話には不自由はないものの、多くの外国人技術者と同様に、英語による技術用語の知識はあるが技術的な日本語の理解度が低かったため、対応に苦慮する場面が多くあった。非漢字圏出身の外国人技術者の越えなければならない壁のひとつだと思う。

OYOでは日本の多くの企業と同じく、入社後社内研修が多くあり、OJT(On the Job Training)も充実している。その都度、理解が浅い事柄や、不明点について解消し学ぶ機会や社内システムに慣れる機会があった。入社後の1年間は、専任指導員を割り当てられ、社内システムの理解するための教育や仕事の流れなどの細かい指導が受けられたことで日本での仕事のスタートがスムーズに出来たと感じている。母国を含めて他の国ではこのような業務に関する教育の機会が少ないと思われる。さらに、タイムリーなフォローアップもあつて、業務遂行に必要な理解が深まったと思う。

日本ではチームワークを重視することから、日本語の技術用語の他、最低限の日本語による会話や文章力

を含めたコミュニケーション力が必要であると感じている。はじめのころは基本となる報告、相談、連絡が日本語力不足から相手にわかりやすく伝えられないことも多くあった。このような場合も、上司や同僚が優しい日本語での会話や英語による会話を心がけてくれたことなど、外国人とのコミュニケーションに対する配慮があり仕事を円滑に進めて行くことができた。気兼ねなく声を掛け合える環境は大切だと思う。

コロナ禍により、データ解析などの業務は基本的に在宅勤務で行うことが増えており、そのため社内における対面での会話は減っている。しかしながら、オンラインシステムの活用により、日本語の文章によるコミュニケーションを取ることができている。

現場作業は基本的にチームメンバーで行う。一人で行う現場作業は少ないこともあり、現場作業こそチームワークおよびコミュニケーションを図ることが重要となる。実際の現場状況を確認した中での調査について、データを共有する場合に、お互いの認識を伝えることは難しいことではないと思う。但し、仕事内容の十分な理解や目的を明確して探査方法の選択および実施が必要であるため、わからないことや、迷った時には、上司や先輩に相談して進めるようにしている。

### 3. 仕事の環境の利点

海外事業を拡大している企業が増えている中、近年海外からの技術者を採用する企業も増えている。仕事の安定性が高いと思われる日本は、仕事の環境や価値観の視点では世界トップクラスであるため、日本企業への就職を望む外国人技術者や留学生は増えていると思われる。しかしながら、地質コンサルタントの分野では、外国籍の技術者はまだまだ少ない。その中で、日本の地質コンサルタントで働く著者自身が感じている利点を以下に述べる。

まず、大学・大学院からの企業への就職の流れがシステムティックであることが挙げられる。会社説明会に行き、採用までの一連の流れが明確になっている。新卒採用の場合は、2.でも述べたように企業内における研修、教育制度が充実しており、OJTやタイムリーなフォローアップ制度により、学びながら仕事することができる。さらに新しい環境に適応するためのサポートも整っている。日本での仕事においては時間厳守が基本であることも、良い点のひとつであると考えている。

次に、地質コンサルタントの業務においては、個人で完遂する業務は少なく、多くはチームで行う。そのため、チーム内では相談しやすい環境にあると思う。業務を行う中で、システム・仕事の流れが定まっていることが多い。その中で、新しい発想を柔軟に取り入れる地盤があり、イノベーションによる発展が起きやすい環境であることから、自分が得意な部分を発信することで仕事に生かせる場合もある。

そのほか、日本では安定した収入が得られること、健康保険や雇用保険などが充実しており生活が安定していること、治安が良いこと、などの社会的要因が挙げられる。地質技術者からみると、日本は地形・地質の観点での魅力は多く、出張等で様々な場所へ行くことで、その土地の風土や、文化も知ることができ、日本について学べる機会となっている。

最後に、グローバル企業に就職した場合、語学を活かし、日本をプラットフォームとして世界で活躍できる人材になれる可能性がある。

#### 4. 日本で働く上での課題

一方で、日本で働く上での課題も多くある。

まず、日本語能力が低いとコミュニケーション不足になりやすく、チームでの仕事がスムーズに進まない。特に、地質に関連した技術的な日本語は、基本的な会話レベルの日本語と大きな差があり、スキルアップに時間が掛かる。日本企業による国内の業務の報告書はすべて日本語ということもあり、理解に時間が掛かることも多くある。

次に、一人当たりの仕事の量が比較的多いことから、長時間労働が常態化している。そのため、平日に定時に帰る社員は少ない。但し、コロナ禍でのリモートワークが始まったことにより、通勤時間の短縮でワークライフバランスを取りやすい環境になりつつあるように感じている。

その他、大手のゼネコンなどの作業するとき、外国人であることから、別途書類提出などの手続きが必要な場合もある。

最後に、技術士の取得は地質コンサルタントの技術者として日本で働く場合、重要な資格となるが、外国人技術者にとっては高いハードルと感じている。

#### 5. まとめ

これまで、途上国の外国人留学生は日本で学んだ後に帰国し、母国の発展に貢献することを目的としていたと思う。しかしながら、日本は治安の良さや収入面など多くの魅力があり、日本への定着を目指した技術者志望の留学生も多くなってきている。

就職後も言葉の壁など大きなハードルがあり、業務の理解などに時間が掛かる。外国籍の技術者はコンサルタントとして働く上でのハードルが高いことで、活

躍できる機会が少ないと感じている。しかしながら、裏を返せば、就職後に感じる困難については日本人が海外で働く際に感じることに、多くは重なる面があるようにも思う。

文化の違いを乗り越えるために必要なものは何かと考えた時、それはコミュニケーション力ではないかと考えている。会話を含めたコミュニケーションを取ること、互いを認め合い、円滑な業務遂行に繋がると思う。

SDGs 目標には多様性の遵守がある。今後日本の企業がよりグローバル化するためには、国籍の壁を飛び越えて、日本国内で活躍する外国人技術者を増やす必要があると思う。このことが、日本人が海外で活躍する機会が増えていくことに繋がると考える。日本企業の海外市場への進展に寄与する一助となるのではないだろうか。

これからも、多様性を認め合い、日本人技術者や外国人技術者にとって、より働きやすい環境に変化していくことを期待している。

#### 文献

- 1) 文部科学省報道発表(令和4年3月30日):「外国人留学生在在籍状況調査」及び「日本人の海外留学数」 [https://www.mext.go.jp/content/20220603-mxt\\_gakushi02-100001342\\_2.pdf](https://www.mext.go.jp/content/20220603-mxt_gakushi02-100001342_2.pdf) (2022年8月15日閲覧)
- 2) 一般財団法人日本国際協力センター(2020年3月):留学生の就職促進に関する周知及び調査研究成果報告 [https://www.mext.go.jp/content/20200521-mxt\\_gakushi02-000007326\\_1.pdf](https://www.mext.go.jp/content/20200521-mxt_gakushi02-000007326_1.pdf) (2022年3月15日閲覧)

# 79. 地盤情報を活用した関西国際空港基礎地盤モデルの構築と地盤変形解析への適用について

Development of the ground models of Knasai International Airport based on geoinformatic database and its application to numerical assessment by finite element analyses

○三村 衛 (京都大学), 田中さち (関西エアポート(株))  
Mamoru Mimura, Sachi Tanaka

## 1. はじめに

泉州沖の大水深海域に構築された関西国際空港は、計画段階から粘土/砂礫互層から成る海底地盤の長期にわたる大きな沈下が予想されたため、ボーリングと物理探査による地盤調査が実施され、沈下解析に必要な精緻な海底地盤モデルの作成が行われた。

本稿では、関西国際空港基礎地盤のモデル化に際し、地質学と地盤工学の専門家が協働して実施した当該箇所の海底地盤のモデル化とともに、特に埋立に伴う圧密沈下にとって重要となる、排水を担う更新統砂礫層の透水性の評価を中心に説明する。

## 2. 調査の手順

本調査の対象地は、大阪府泉州沖約 5km に位置するエリアで、第一期、第二期空港島合わせて 1,000ha を超える人工島を建設するための海底地盤である。地盤調査としては、ボーリング調査を中心として、それぞれの地点における深さ方向の層序を確認するとともに、粘土層の圧縮・強度特性、砂礫層の粒度や透水性を中心に原位置における標準貫入試験と室内における各種地質分析と土質試験による検討結果を基礎として地質モデル、地盤モデルを構築するという手順を踏んだ。結果として実施したボーリングは 270 本におよんだ。

ボーリング調査の利点は当該地点における深さ方向の層序が試料によって目視でき、構成土質の細かい分類が可能となることにより、地層境界を確実に評価できる点にある。一方、平面的には点情報であり、関西国際空港のような広大な領域の埋立工事に際し、各地層の側方への展開が強く求められるような場合、調査数を増やすことには限界があり、物理探査による補間が必須となる。関西国際空港の地盤調査においては、海上からの反射法地震探査がその役割を担った。関西国際空港基礎地盤においては、特に、沖積粘土のようにバーチカルドレーンのような地盤改良が望めない深部更新統粘土層の長期におよぶ大きな沈下の懸念があったため、粘土層間の更新統砂礫層の厚さと面的な広がりをも正確に把握する必要があった。図-1<sup>1)</sup>に当該エリアにおけるボーリング地点と反射法地震探査測線を示す。同図より、点で示したボーリング(●は地質分析有、○は無し)は空港連絡橋に沿った線上と空港島建

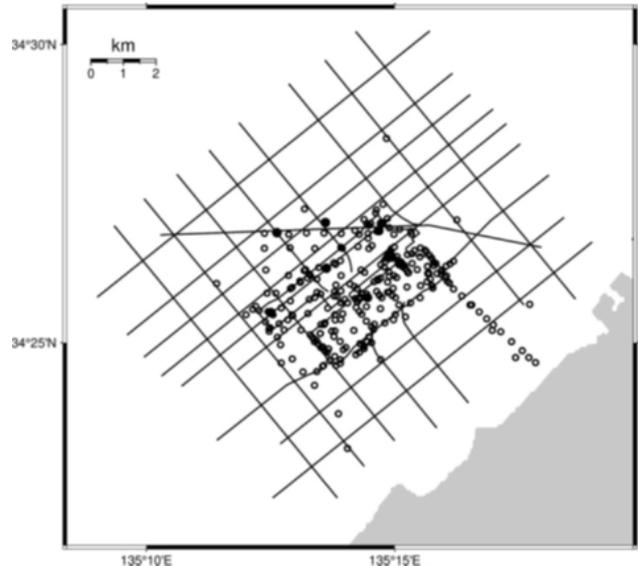


図-1 ボーリング地点と反射法地震探査測線<sup>1)</sup>

設エリアを中心に行われており、実線で示した反射法地震探査は空港島を取り囲むように領域を拡大して実施されていることがわかる。これは、過剰間隙水圧の消散を担う砂礫層の分布が空港島領域のみでは不足で、建設領域外の広い空間で考えなければならないということによっている。このため、空港建設領域外の砂礫層の分布状態を知るために非常に大きな領域での調査が必要とされたことによる。

## 3. 三次元地質・地盤モデルの構築

既往のボーリング調査において実施された粘土層の地質分析により設定された層序が第二期空港島の一角で実施された KIX18-1 大深度ボーリングコアの詳細分析によって更新<sup>2)</sup>され、既往の情報と合わせて側方に展開された。また砂礫層については反射法地震探査結果に基づき、各砂礫層の分布状況と層厚分布が明らかとなった。図-2 に当該地区の地層分布を模式的に示す。海底面には沖積層である Ma13 が更新統の粘土/砂礫互層を下位に置いて堆積している。図中 Ma は海成粘土を、Ds は更新統砂礫層を表している。Ma12 以上は更新統起源である。次に三次元モデル化に向けて平面的な地層の広がりを反射法地震探査結果とコア分析結果に基づいて検討した。一例を図-3, 4 に示す。紙面

の制約上、最下位の基底礫層としたDs10砂礫層の層厚分布を図-3に示す。空港島直下から図面右側の北東に向けて10mを超える十分な層厚が認められるが、逆に南西側については空港島エリアを離れると急速にこの砂礫層が薄くなって消滅に向かうことがわかる。図-4ではコア分析結果による粒度分析から、砂礫層の分布エリアと主たる構成土質を示している。同図よりDs10は主として砂分で構成されており、礫分が少ないことがわかる。

こうした分析を各層に対して実施し、面的に地層を連結することによって関西空港基礎地盤の三次元モデル<sup>1)</sup>を作成した(図-5参照)。沈下解析を行うにあたり、粘土層と砂礫層の土質定数を設定する必要がある。粘土層については、採取試料による室内土質試験で設定可能である。一方砂礫層

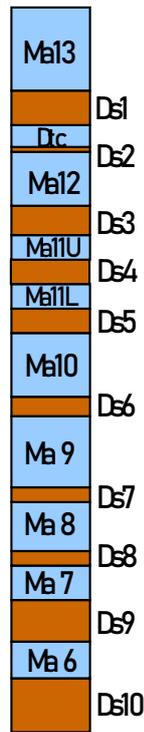


図-2 関西国際空港地盤の代表地盤層序

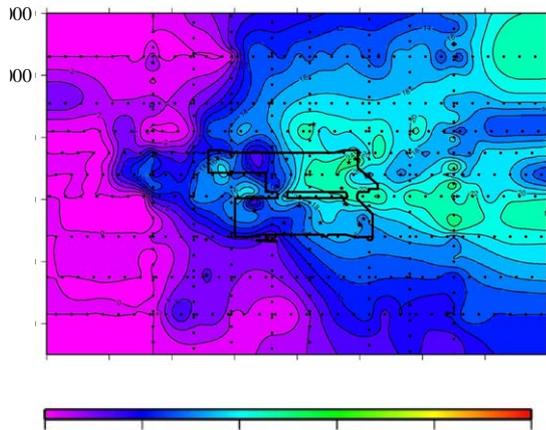


図-3 反射法地震探査によるDs10砂礫層の層厚分布<sup>1)</sup>

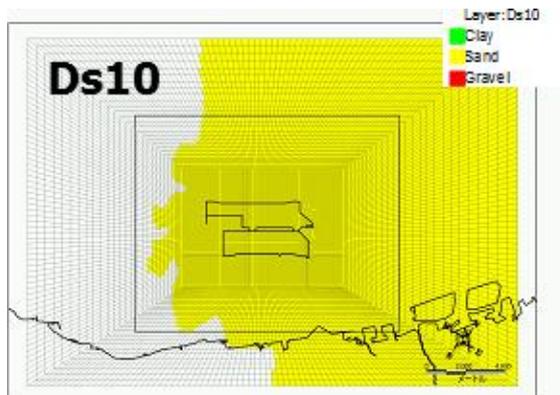


図-4 Ds10砂礫層の分布と構成土質<sup>1)</sup>

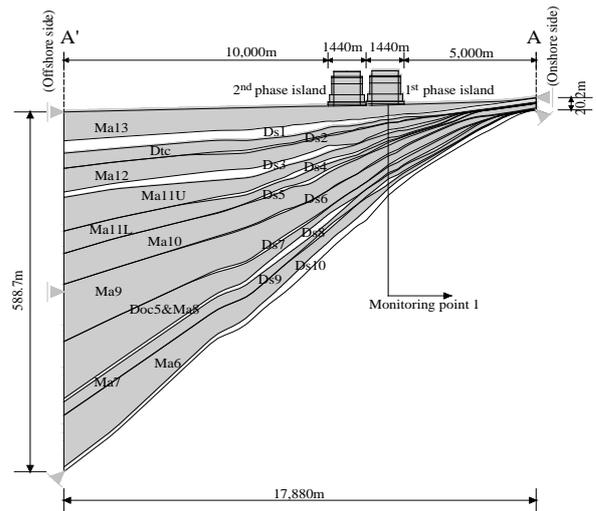


図-5 三次元地質・地盤モデルに基づく関西国際空港における一期、二期空港島を横断する地盤モデルの一例<sup>1)</sup>

については図-3,4の結果から層としての排水能力を地質学的な知見に基づいて良、普通、劣という判定をしていただき、層別測定結果を評価できる等価透水係数という形で決定した<sup>3)</sup>。ここで等価透水係数は土質試験で得られる透水係数とは必ずしも一致せず、層として原位置の透水能力を表す量という位置づけとなる。この設定は地質学透水能力評価に基づいて行われた。その結果採用した等価透水係数については、Ds6,7層はその値を低減、Ds1,3,10の各層は上昇させることにより、原位置の実測現象を定量的に評価できる値として設定した<sup>3)</sup>。図-5を解析モデルとした弾粘塑性有限要素法による関西国際空港基礎地盤の変形解析結果は、二期空港島建設に伴う過剰間隙水圧の既設の一期空港島基礎地盤への還流現象をはじめ、各更新統粘土/砂礫層の過剰間隙水圧挙動、更新統粘土層の層別沈下挙動の実測値を妥当に表現できることがわかっている<sup>4)</sup>。詳細については文献4)を参照されたい。

## 文献

- 1) 井上直人・北田奈緒子・江川祐輔 (2022) : 関西国際空港における3次元地質モデルの更新, DS-3-08.
- 2) 北田奈緒子・井上直人・瀬口均 (2022) : 関西国際空港建設時における地質地盤調査および堆積境調査の成果, 第57回地盤工学研究発表会, DS-3-07.
- 3) 三村衛・田中さち (2022) : 関西国際空港の沖積・更新統基礎地盤の長期変形問題へのアプローチ, 第57回地盤工学研究発表会, DS-3-09.
- 4) Mimura, M. and Jeon, B. G. (2013): Interactive Behavior of the Pleistocene Marine Foundations of the Existing 1st Phase Island Due to Construction of the 2nd Phase Island of Kansai International Airport, Soils and Foundations, Vol. 53, No. 3, pp.375-394.

# 80. 三次元地質・地盤モデルの不確実性の評価と明示

A Study for Enabling Quality evaluation of Geological/Geotechnical Three-dimensional Model in Construction Project

○和田里絵 (応用地質 (株))

Rie Wada

## 1. はじめに

福岡市地下鉄七隈線延伸工事現場における道路陥没事故では、要因の1つとして、複雑な地質構造とその過小評価の可能性が指摘されている<sup>1)</sup>。事業リスクを評価するに充分の品質をもつ地質・地盤モデルの作成や、モデルの不確実性を事業関係者が評価可能とすることは、このような建設事故の有効な防止策となる。

一方で、2023年度までに小規模を除くすべての公共工事において原則適用となる予定の BIM/CIM は、建築物や構造物の情報を、ライフサイクルを通して関係者が共有し、迅速な合意形成や生産性向上を果たすための枠組みであり、すべての情報は、三次元モデルとそれに紐づくデータやドキュメントとして管理される<sup>2)</sup>。地質や地盤の情報も三次元モデルを核に共有されるため、関係者の理解のし易さやデータ利活用の利便性は格段に向上する。しかし、トンネルや橋梁などの実体を模した構造物モデルと技術者の解釈結果である地質・地盤モデルが一体の BIM モデルとして扱われた場合、モデルが独り歩きすることによる品質の誤認や事業リスクの過小評価の危険性が增大する懸念がある。

このような背景のもと、筆者が責任者を務めた(公社)地盤工学会 ATC10 (都市地盤情報に関するアジアテクニカルコミッティ国内委員会) WG1 では、地質・地盤データの品質に係る情報を設計・施工・維持管理段階に確実に引き継ぎ、以て地盤リスクのマネジメントに資することを目的として、地質・地盤データの不確実性の評価と明示に係る研究を 2017~2019 年にかけて行った<sup>3)</sup>。本稿ではその結果を紹介する。

## 2. 検討範囲とプロセス

地質・地盤調査結果からモデルを作成し利用するまでのフローと当 WG の検討範囲を図-1 に示す。調査で得られたデータを基に、まずは理学的な地質の成り立ちを模した地質モデルを作成する。その後、工学的な特性(物理特性、力学特性、化学特性など)を表現する地盤モデルを作成する。地質モデルは唯一だが、地盤モデルは、その用途や表現する特性により複数存在し得ることに注意が必要である。建設段階が進み新たなデータが得られると、まず地質モデルが更新され、それを基に地盤モデルが更新され、利活用される。

検討範囲について、調査手法とその精度については概ね基準が定められている。それらに従っている限り、所定の品質が担保されると考え範囲外とした。また、

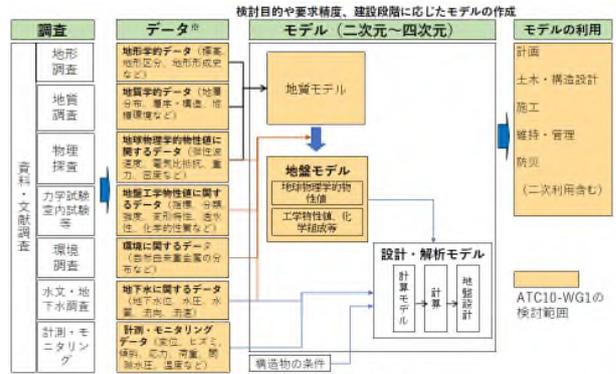


図-1 地質・地盤調査結果からモデルを作成するフローと WG の検討範囲(文献<sup>3)</sup>図 1.4.1 に加筆・修正)

図-1 地質・地盤調査結果からモデルを作成するフローと WG の検討範囲(文献<sup>3)</sup>図 1.4.1 に加筆・修正)

設計・解析モデルは構造物の条件、計算手法などに依存し、後工程での利活用が考え難いため対象外とした。

当 WG の活動フローを図-2 に示す。様々な地盤条件や構造物を網羅するように選定した、表-1 に示す 9 つの建設事例について、地質・地盤モデルの精度や信頼性に影響を与えた要因を精査した。並行して、国内外の規格・基準類について、地質・地盤モデルの品質に関する記述を調査した。これらの結果から、混乱しやすい用語の定義と解説、地質・地盤モデルの品質のトレーサビリティを確保するためにモデルに付随させるべき品質項目などを取りまとめた。

表-1 WG で精査した 9 つの建設事例

事例	モデル作成目的	地盤	段階
寝屋川北部地下河川	大深度地下利用の支持地盤の特定	土質	調査
関西国際空港	空港周辺地盤の沈下予測	土質 埋立	調査
飯山トンネル	高圧帯水層の事前把握	岩盤	施行
新北陸トンネル	断層破砕帯の事前把握	岩盤	施行
八甲田トンネル	鉱化変質岩分布の早期把握	岩盤	施行
京阪中之島線	トンネルを横切る活断層の評価	土質	調査
地震被害想定	表層地盤地震動増幅特性評価	土質	-
建築	建築物の支持層深度判別	土質	設計
盛土造成宅地	造成計画、大規模造成地の変動予測	盛土	-

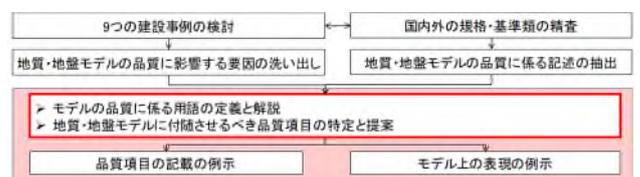


図-2 WG の活動フロー

### 3. 検討成果 1—用語の定義と解説

モデルの品質評価を可能とするには、品質の定義やそれを表現する言葉について関係者が共通認識を持つ必要がある。しかし、調査の結果、様々な用語の使い方に混乱が生じていることが判明した。そのため、特に重要な9つの用語（地質モデル、地盤モデル、解析モデル、モデルの補間と補完、地盤情報、一次利用・二次利用、地質モデル・地盤モデルの品質、地質モデル・地盤モデルの不確実性、地質リスク・地盤リスク）について定義と解説を行った。1例を図-3に示す。

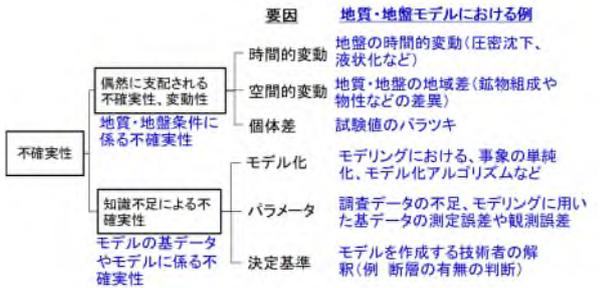


図-3 地質・地盤モデルの不確実性の体系 (文献<sup>3)</sup> 図 1.5.1 に加筆, 修正)

### 4. 検討成果 2—品質項目の提案

9つの建設事例について、地質・地盤モデルの品質への影響要因を精査するとともに、品質評価にあたっての着目点と品質トレーサビリティ確保のためにモデルに持たせるべき情報（以下、品質項目と表記する）を検討した。岩盤地域の山岳トンネルの検討結果の一部を図-4に示す。例えば、地質モデルでは、その地域の標準層序として認定されている地質のうち、一部のみ、あるいは、複数の地質を、目的・用途に応じてまとめて表現する機会が多い。モデルの分解能の目安として、標準層序のうちどの地質を表現したのかを示すために、地質層序表とモデルの地質凡例を対の情報としてモデルに持たせることは品質を明示する上で重要である。また、トンネルのような線形構造物の場合、モデルの作成範囲は建設段階を経る毎に狭くなる。そのため、モデルを作成する範囲と空間補間に用いた基データの範囲（内挿補間をするためモデル作成範囲よりも広く設定する）は、品質項目として重要である。

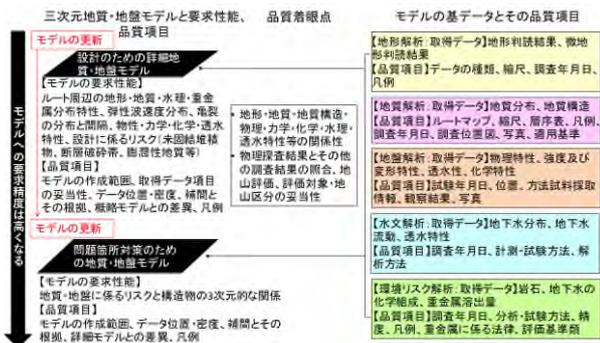


図-4 地質・地盤モデルの品質項目 (文献<sup>3)</sup> 図 3.3.3 一部抜粋)

### 5. 検討成果 3—不確実性の可視化

地質・地盤を専門としない事業関係者の理解を容易にするために、モデルの不確実性を可視化することは有効である。当WGが検討した1例を図-5に示す。データ密度を指標として格子上に算出した不確実性の度合いを透過度で示し、地層境界面のサーフェスマデルに重ねて表現している。ただし、モデルの利用目的や用途により許容できる不確実性は変わる。そのため、このような例は、不確実性の度合いを相対的に表現するものであり、唯一絶対的な評価基準をもって定量的に表現するものではないことに注意が必要である。

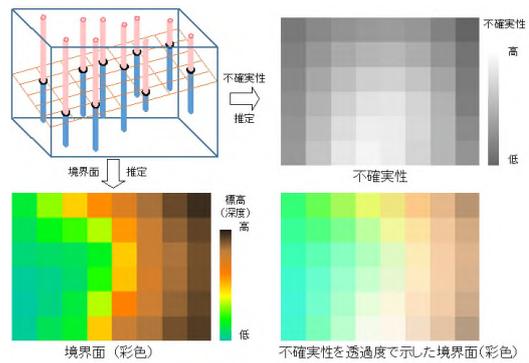


図-5 地質・地盤モデルの不確実性の表現例(文献<sup>3)</sup> 図 5.1.4 一部抜粋)

### 6. まとめと今後の課題

本研究では、地質・地盤モデルの品質と包含される不確実性をどう表記し継承するのかについて検討し、一定の基準を提示した。不確実性は明示するだけでなく低減する必要がある。要求性能を満たすモデルを作成し継承するには、作成者個々人の地質と地盤に関する高い見識や、それぞれの専門家によるクロスチェックの仕組み、地盤条件とそれを律する地質に対する理工融合の知識体系の構築などが望まれる。また、地質・地盤モデルの重要性に対する発注者、設計者、施工業者の認知度は、必ずしも十分とはいえないため、地質・地盤モデルの不確実性と品質評価に対する理解が建設プロジェクトにおける事故防止と経済的施工に直結することを啓発する努力が必要であろう。

### 引用文献

- 1) 福岡地下鉄七隈線延伸工事現場における道路陥没に関する検討委員会・(国研) 土木研究所(2017): 福岡地下鉄七隈線延伸工事現場における道路陥没に関する検討委員会報告書, pp.2-6-2-65.
- 2) 和田里絵他(2022): BIMにおける地質・地盤モデルデータ交換の国際標準, 地盤工学会誌 Vo.70(5), pp.25-30.
- 3) 地盤データ品質標準化小委員会・社会基盤情報標準化委員会(2018): 地盤データ品質標準化小委員会報告書「三次元地質・地盤モデルの利活用と不確実性の評価・明示」, 171p.

# 81. 理学と工学の協働作業を行って設計施工を行った事例について

Case studies of collaborative work between geology and geotechnical engineering in design and construction

○北田奈緒子 (一財) 地域地盤環境研究所  
Naoko Kitada (Geo-Research Institute)

## 1. はじめに

地質・地盤に起因する事故や不具合に至る「地質・地盤リスク」というものが論じられるようになり、地質・地盤についてアセスメント（評価・査定）することから、マネジメント（活用・運用）することへと変化しつつある。現時点では、地質・地盤の特徴を把握して、建設・施工時に事故やトラブルを防ぐために事例を収集し、分析する作業が行われている。トラブルが発生した場合、その要因を追求し、同一の事故を防ぐことが大切である。

地盤特性によるトラブルの発生させやすい、すなわちリスクの高い地盤の特徴については、地質学的な観点から見た堆積環境や構成鉱物、地質構造などが要因となる場合が多く、地質学的な観点から見た地盤の特徴が施工時の対策方針や設計方針の重要なポイントとなることが多い。このような検討はまさに理学と工学の協働作業によるものである。

ここでは、このような理学と工学の協働の事例をいくつか示す。

## 2. 事例その1：旧河道にみられる玉石の分布

分野によって定義が大きく異なるが、基本的に、礫の一種で丸みを帯びた石である。河川水によって運搬されることにより、角が取れて丸くなっているものを指すのが一般的である。概ね粗石(75mm)以上あるいは大礫(64mm)以上のものを定義しているが、粒径というよりも、工事を難航させる厄介な礫という意味で「玉石」と呼ぶ傾向がある。この用語は基本的に工学の分野、トンネルや施工現場の技術者が利用する用語である。理学的に上記の説明から類推すると、河道部に多く分布する礫層（河床礫）に相当するのではないかと考えて、検討を実施した。ボーリング試料あるいは柱状図から、例えば第1洪積砂礫層の該当箇所の地質観察や記事を精査すると、上部には砂層や礫混じり砂層が見られ、下部に大礫混じりの砂礫が確認される（図-1）。これを周辺に分布するボーリングデータベース情報を用いて側方への断面図を作成して検討すると、図-2のような断面図が得られる。ここで河道部の所では、比較的はっきりした礫層が分布し、側方では下位の粘土層が分布する。つまり、施工計画時にしっかりと調査を行なって、河道位置を確認することなく、構造物の設計を実施すると杭基礎の先端部の位置を誤認するなどの問題が発生することになる。

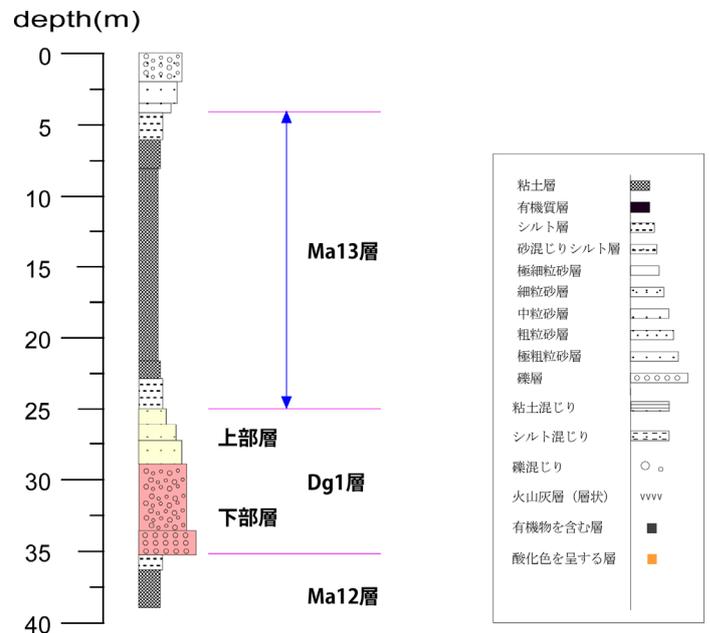


図-1 大阪平野で見られる沖積粘土層と Dg1 層

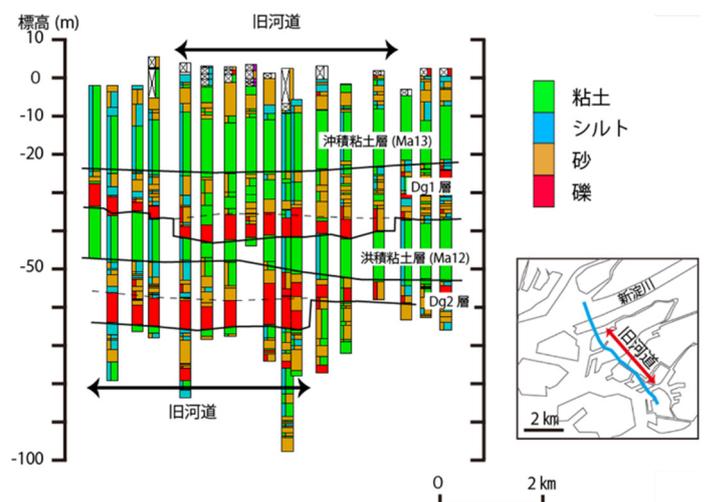


図-2 地質断面図による旧河道部の解釈図<sup>1)</sup>

このような旧河道部の礫層（大礫・玉石）については、シールド掘進中にこの部分を通過するとカッタービット異常な摩耗や掘進速度が減衰するなどの問題が発生するために堆積環境を考慮した地質断面あるいは堆積物の特徴を把握して、適切な施工計画を立てることが重要である。

### 3. 事例その2：断層部における地層断面図の作成

上町断層は大阪の中心部をほぼ南北に通過するもので、活断層の一つとして文部科学省地震調査推進本部が認定している。発生のリスクは最も高いSランクに認定されており、もし、地震が発生したら最大震度7の揺れに見舞われる予想である<sup>2)</sup>。断層が通過すると考えられる場所に地下構造物がシールドで建設されることになり、ボーリング調査が実施された。地質断面図は一般的に隣り合う粘土層はN値や特徴が同じ(大阪であれば海成粘土層で貝殻を含むなど)であれば、水平に層状に対比される。しかし、断層が通過する場合、その断面図はどうなるか?という問いと共に持ち込まれた案件については、海成粘土層の可否を特定するのみでなく、堆積時期を特定して同時期の海成粘土を側方対比する必要がある。この時の検討には、層序決定の手法に用いられる火山灰層の対比と花粉分析結果および微化石や珪藻分析等の地質分析を実施した。火山灰分析は目視で確認できる火山灰層は少ないので、潜在火山灰層を確認するために50cm毎にコア試料を分取して粘土粒子を取り除いて顕微鏡下で観察を行い火山ガラスや火山砕屑物の含有の有無を確認し、降灰層準を特定した。その結果、元の地質断面図とは大きく異なる改訂地質断面図が作成されることになった。

大阪平野地下においては、基盤岩上部付近までは上町断層の変位に伴って岩盤の上下落差や地層の断層構造が読み取れるが、層厚1000m以上の堆積層中では、断層による変位は撓曲として分布している。地表近くの構造物を施工する深度100m程度の深さでは断層によって地層は撓み、大きく直立していることが明らかになった。この結果より作成された地質断面図(図-3)を基に施工計画および耐震設計や断層変位に対する検討を実施し無事に完成した。

### 4. おわりに

地質学的な検討や考察を加味することで、施工計画時の地質断面図やモデル図はより精度の高いものになると考えられる。一方で、調査の目的や事象に応じて、適切な分析や手法を用いて検討することが適切であると考え、目的に応じた調査設計が必要であると考えます。

事前調査から本施工に至るまで、地盤状況の把握と施工計画のためには理学と工学が十分に対話を行いながらプロジェクトを進める事が望ましいと考える。

### 文献

- 1) 北田奈緒子(2022):地盤情報の活用による地質地盤リスク評価,地盤工学会誌,70(5),p10-13.
- 2) 地震調査研究推進本部委員会(2022):活断層長期評価の表記見直し,[https://www.jishin.go.jp/resource/column/16aut\\_p4/](https://www.jishin.go.jp/resource/column/16aut_p4/)(2022.8月閲覧)

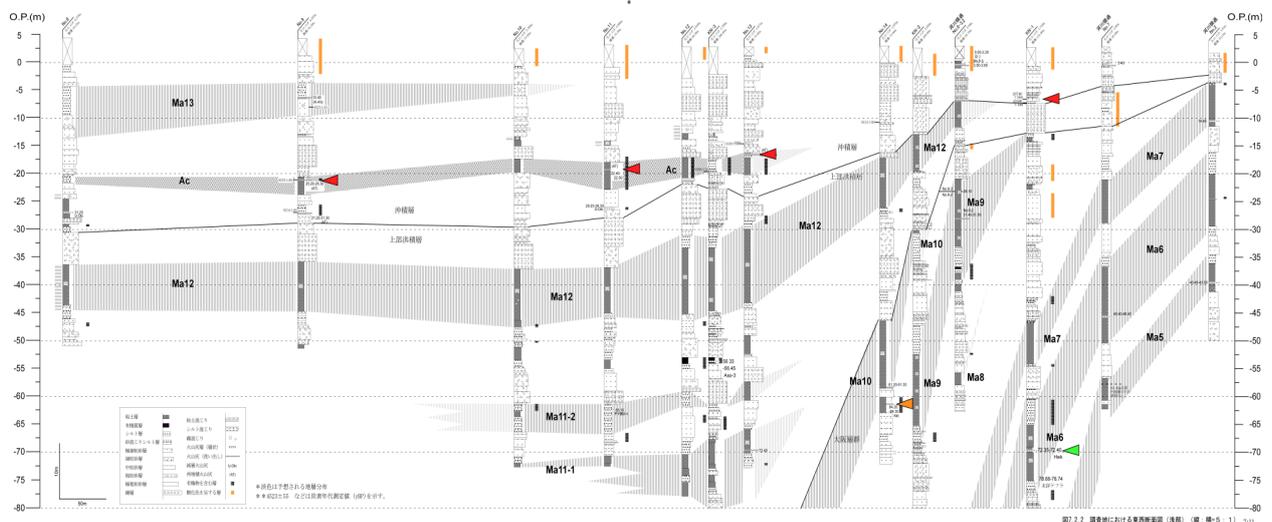


図-3 地質学的な分析方法(火山灰分析,花粉分析,珪藻分析など)を用いて地層対比した結果の断面図

## 82. 応用地質学と地盤工学の協働を考える

Considering Collaboration between Engineering Geology and Geotechnical Engineering

○末岡 徹 (キタック顧問) 正会員, JGS 名誉会員

Toru Sueoka

### 1. はじめに

地盤工学会関東支部においては、2019年5月(令和元年5月)より、「地盤工学のあり方—応用地質学と地盤工学の協働を考える—研究委員会」を設立し、3年間にわたり望ましい応用地質学と地盤工学の協働の形・内容を模索・協議・検討してきた。委員会は構成メンバーとして日本応用地質学会からの3名の推薦委員を含む21名の産官学に所属する委員から構成されている。活動に際しては、まず委員自身が両学問・技術の協働の体験について紹介するとともに、応用地質学と地盤工学の協働の立場から、(1) 応用地質学の役割、(2) 教育・人材について集中的に討議・議論・検討を行い以下に示す報告及び提言案を作成した。

「地盤工学のあり方—応用地質学と地盤工学の協働を考える—研究委員会」報告および提言(案)

2022年3月公益社団法人地盤工学会関東支部

<https://jibankantou.jp/group/pdf/20220329kyoudoubook.pdf>

なお、本研究委員会のテーマの重要性に鑑み、2022年4月より(公社)地盤工学会の会長特別委員会として①アクションプラン付き提言の作成、②シンポジウムの開催、を目指してさらに活動を進めている。

### 2. 研究委員会設立の背景

地盤研究を始めるに際しては、以下のような背景が存在した。

- ① 地盤が関係する建設事故やインフラ災害の多発
- ② 応用地質学と地盤工学(土質工学)の協働に関する先人達の指摘
- ③ 地盤工学ハンドブックにおける応用地質学分野(地形・地質など)に関する記載充実の必要性
- ④ 従来の地盤工学と違った新しい地盤工学の創設への期待
- ⑤ 地質・地盤技術者による両分野におけるこれまでの協働体験の記述・記録と整理・分析さらに学問・技術としての普遍化の必要性
- ⑥ これからの地質・地盤技術者は、ペックの提唱する三つの技術能力(先例に通じている、土質力学の理解、役に立つ地質学の知識)を身に着けた理想の地盤技術者像に近づくことが求められている
- ⑦ 「応用地質学」を取り巻く教育環境の悪化

### 3. 研究委員会活動の経緯

研究委員会は、以下のような基本方針のもと、第一段階として全体討論を実施した後、コロナ禍の影響もあり第二段階として二つのワーキンググループに分かれて活動を行った。

#### (基本方針)

学問・技術・人材育成(教育)の観点から、根本的かつ本質的に「応用地質学と地盤工学の協働」を見つめ直し、「令和の時代にふさわしい魅力ある地盤工学」の発展に寄与する。

#### (WG-1の活動)-応用地質学の役割

学問・技術の観点から「応用地質学と地盤工学の協働」における応用地質学の役割を研究した結果、設計を中心としたテーマである「地盤構造物の設計」に焦点を当て、両者の協働を考えた。

#### (WG-2の活動)-人材・教育

人材・教育の観点から研究するに際し、まず現状調査から始めることとし、大学における両分野に関するシラバス調査から始め、地盤工学会会員(関東支部)に対する「応用地質学と地盤工学の協働」に関するいくつかの観点からのアンケート調査を行い、会員の本研究分野に関する現状認識と考えを聞かせていただいた。

### 4. 先人達の指摘

地盤工学(地質工学)と応用地質学(地質学)の協働に関しては、カール・テルツァーギ、渡邊貫(とおる)、赤木俊允らの著書や講演などから、両学問・技術に関する主張や警鐘を取り上げ、以下のように整理した。

#### カール・テルツァーギ

「土質力学」を1925年に創始し、その後4大陸で活躍し、1948年以降国際的にも地盤工学の基本となる学術・技術書を発刊するとともに、各地の大学などで教育・講演活動に携わった。それらの中で以下のことを主張している。

- ・いつも土質力学・地質学両分野の知識を必要とした<sup>1)2)</sup>
- ・失敗の大部分は、地質学的要素のもたらす結果を無視したために起こったものであって、(土質力学)の計算の誤りによって起こったものでない<sup>1)2)</sup>
- ・テルツァーギは「土質力学」を「数量化された応用地質学の一分野」と考えていた<sup>3)</sup>

- ・土質力学と応用地質学が **Geotechnology** の名称のもとに、一つになるのにふさわしい時代が来るかもしれない<sup>4)</sup>

## 渡邊貫（とおる）

理学部地質学科出身の鉄道省技師として丹那トンネルの建設<sup>5)</sup>に携わり、1935年「地質工学」を出版<sup>6)</sup>し以下のことを提唱している。

- ・土木技術者は簡単なしかしながら正しい地質学の普通の一般の知識さえ持ち合わせていれば、一寸した注意だけで、充分経済的な工事を成し得る<sup>6)</sup>
- ・地質学者と土木技術者の密接な交渉と正しい理解、完全な提携が欲しい<sup>6)</sup>
- ・土木地質学は、仲介の役割<sup>6)</sup>を果たす
- ・大地の工学に親しむようになり、**Geomechanik**(地質工学)の新造語<sup>6)</sup>を与えた

## 5.提言案の作成

### 5.1 提言案作成の経緯

「地盤工学のあり方—応用地質学と地盤工学の協働を考える—研究委員会」に設置された二つのワーキンググループの活動努力により、両学問・技術の協働に関する研究をさらに分かり易い形で公表するには、提言という形が望ましいという結論に至り、主な主張を短い項目ごとに提言という形で表現・公表することにした。

### 5.2 提言案の内容と構成

提言案は以下の8項目から構成されている。提言内容自体は既に先人たちにより言及されたものも含まれているが、「応用地質学と地盤工学の協働」を軸に検討を重ねてきた当研究委員会独自の観点に基づくものとなっている。なお各提言案は、実現のための（時間スケール—短期・中期・長期）や（提言の相手先—組織体の種類別）について、ある程度明確にするとともに内容については解説欄を設けて詳述している。

- ① 応用地質学と地盤工学の協働の推進
- ② 地盤構造物およびその設計の定義に関する新たな提案
- ③ 設計・施工に必要な情報を付加した質の高い「工学的な地質図」の作成
- ④ 学問・技術としての応用地質学と地盤工学に関する理解の深化
- ⑤ 後期中等教育（高校）における防災リテラシー・環境リテラシーに必要な「地学」教育必修科の実現
- ⑥ 高等教育（大学・高専）における「応用地質学」と「地盤工学」、両学問の単位相互取得を可能にする制度改革の実現
- ⑦ 両分野の未修得な学問・技術の自己研鑽による習得
- ⑧ 海外インフラ建設プロジェクトにおけるジオテ

クニカル・ベースラインレポート（GBR）の理解促進

## 6.まとめ

以上各提言案を紹介したが、その要点をまとめると以下ようになる<sup>7)</sup>。

- (1) 新しく提案した「地盤構造物の設計<sup>8)</sup>」における地質技術者（調査）と地盤技術者（設計・施工）による協働の実践（→工学的な地質図を協働で作成する）  
(栗原論文：83 地盤構造物の設計における応用地質学の役割の重要性について、を参照のこと)
- (2) 高等教育における「応用地質学」と「地盤工学」、両学問の教育の充実および両学問・技術に精通した人材の育成
- (3) 日本応用地質学会と地盤工学会、両学会による「応用地質学」と「地盤工学」の学習機会の提供や共同研究活動など、協働活動の実践
- (4) 未修得な学問・技術である「応用地質学」あるいは「地盤工学」の自己研鑽による習得

## 参考文献

- 1) リチャード・E・グッドマン著、赤木俊允訳、石原研而・吉見吉昭校閲：土質力学の父 カール・テルツァーギの生涯，p.497,地盤工学会，平成18年1月
- 2) 末岡徹：カール・テルツァーギとボスポラス海峡，地盤工学会誌，(69)4，pp.40-46，2021年4月
- 3) 赤木俊允，橋場友則著：土構造，土木工学大系34，彰国社版，p.22.，1983年1月
- 4) カール・テルツァーギ：第2回国際土質基礎国際会議，会長講演，No.4，pp.465~468,1948年
- 5) 末岡徹：渡邊貫（とおる）と丹那トンネル、地盤工学のあり方—応用地質学と地盤工学の協働を考える—研究委員会」報告および提言（案）、自由投稿、pp.1-18、地盤工学会関東支部（電子情報）、2022年3月
- 6) 渡邊貫：緒言、地質工学、古今書院，pp.1-5，1935年3月
- 7) 地盤工学会関東支部HP：地盤工学のあり方研究委員会，報告および提言（案），2022年3月
- 8) 栗原則夫・末岡徹・石井裕泰：人工物工学の設計論に基づく地盤構造物の設計概念の再構築，土木学会論文集F4部門，Vol.78，No.1，pp.81~98，2022年4月

## 83. 地盤構造物の設計における応用地質学の役割の重要性について

An Important Role of Engineering Geology in Designing Geotechnical Structures

地盤工学会 会長特別委員会委員 栗原則夫  
Norio Kurihara

### 1. はじめに

土木地質分野において事業遂行上の課題が発生した事例を分析した結果<sup>1)</sup>によると、その主な原因は、「地質構造や地質リスクに対する認識不足」や「調査数量の不足」である。その理由1つとして考えられるのは、従来、地盤構造物の設計プロセスにおいて応用地質学の役割が過小評価されてきたことである。本文では、地盤構造物の設計プロセスの再構築と応用地質学と地盤工学の協働による改善策について提案する。

### 2. 地盤工学における設計プロセスの問題点

地盤工学では、地盤構造物の「設計」を「土質力学理論の実際問題への適用」とする土質力学以来の一般的な考え方を基に、次のように定義している<sup>2)</sup>。

目的の設定→調査と試験→設計計算→設計代替案  
の評価→意思決定→実施 … (式1)

ここに「設計計算」とは、「理想化されたモデルでの応力や変形の計算」のことである。

こうした設計のとらえ方は、「調査と試験」の目的を「設計計算のための地盤の工学的性質の収集」とする矮小化された考え方を広める結果となり、「調査と試験」における応用地質学の役割の過小評価とともに、土質力学理論に基づく「設計計算」結果の過信という弊害を生んでいる。

その根本的な原因は、(式1)の「設計」の定義が設計についての理論的考察から導かれたものではなく、一面的なものになっていることにある。

### 3. 設計の一般的な定義

現在の工学は、機械、電気、土木などのように、限定した領域の学問に分かれていて、領域ごとに対象システムを支配する原理・法則に関する自然科学の理論に基づく設計法((式1)のような)が整備されている。

近年、そうした領域限定をしないで、全部を含んだ人工物を対象とする人工物工学が提唱されている<sup>3)</sup>。

ここに人工物とは、人為的につくり出された、元々は自然界には存在しないものであり、機械や電気機器などの工業製品、建物や橋などの土木・建築の構造物といった物理的な存在であることが多いが、コンピュータ・ソフトウェアのような抽象的な人工物、社会システムのような制度的な人工物もある。

人工物は、所定の働きをするようにつくられており、その働きは、人工物が備えている仕組みによってもた

らされる。人工物が持つ働きを機能といい、仕組みを構造という。ただし機能と構造は、1対1の関係にはない。すなわち、ある機能を発現する構造は、1つだけとは限らず複数あり得る。また逆もいえる。

人工物工学では、上記のような機能と構造の関係を踏まえて、設計を「機能から構造を案出すること」と定義している<sup>4)</sup>。そのプロセスは、大きくは2つから成り、土木・建築構造物を想定した場合、その作業内容は、次のようになる。

(1) 対象としているものの機能を定めて、その機能を発現させる構造を案出するプロセス。

その作業は、本来、まだ存在しないものを考え出す非常に難しいものであるが、実際は、既存例のルーチンワーク・バージョンアップなどであることが多い。

(2) 案出した構造が要求機能を発現することを保証するプロセス。

その作業は、案出した構造を計算モデルに置き換えて、材料を特定した上で、構造の属性(形状、寸法など)をいろいろ仮定し、一定の荷重条件の下で構造解析を繰り返し行い、その予測機能が要求機能を満足するものを求めることである。従来、「設計計算」と呼ばれているのは、このプロセスである。

### 4. 地盤構造物の設計プロセスの再構築

#### 4.1 地盤構造物の定義

地盤という用語は、土木・建築構造物の建設・防災・環境に関連する地球の表層部を形成する地殻の表面および表面付近のある範囲(数十m~数km)の岩石や土を含めた総称として使われており、地山ということもある。

地盤には、土台という意味があるように、ビルや盛土などの荷重を支持するという機能がある。地盤が固い岩盤の場合は、ビルや盛土などを造成しても特段の技術的な問題が起こることはない。しかし軟弱な粘土地盤の場合は、ビルや盛土が著しく沈下したり、壊れたりすることがある。こうした軟弱な地盤のように荷重支持機能が十分に大きくない場合は、基礎杭や地盤改良工といった人工物、すなわち構造物を施工することによって、構造物の持つ機能を地盤の機能に付加し、ビルや盛土などの荷重を支持する必要がある。

また地盤を掘削する場合、掘削面が自立する機能もある。しかし地盤を掘削したり、斜面を切土したり、トンネルを掘削したりする場合に、その自立機能が十

分でなければ、土留め工・のり面工・支保工などの構造物を施工して、地盤を安定させる必要がある。

また地盤は、その内部に地下水を透水したり、遮水したりする機能もある。ダムや堤防を建設する場合は、こうした地盤の持つ機能の利活用の検討が行われる。

以上のような地盤の機能は、地盤の構造によってもたらされる。

従来、「地盤構造物」と呼ばれている盛土構造物、基礎構造物、土留め構造物、斜面構造物、トンネル構造物などは、こうした地盤の機能の利活用を基本とした「地盤と構造物の構造的・機能的な組合せ」であり、地盤支持タイプ（地盤の上に構造物を築造したもの）と抗土圧タイプ（地盤の表層又は内部を掘削して構造物を築造したもの）の2つに大別できる。

すなわち地盤構造物は、「地盤の持つ潜在的な機能（支持力、アーチ作用、透水・遮水能力など）を利活用することを基本とした地盤と構造物の複合構造体」と定義することができる。

#### 4.2 再構築した設計プロセスと応用地質学的作用

人工物工学の「機能から構造を案出する」という設計の一般的な定義に基づいて再構築した「地盤構造物の設計プロセス」は、図1のようなになる<sup>5)</sup>。

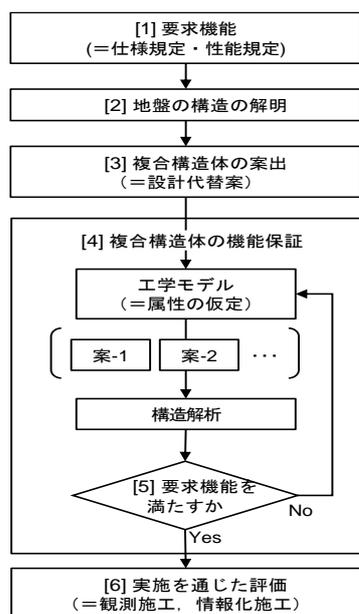


図1 再構築した地盤構造物の設計プロセス

設計の目的は、地盤と構造物の複合構造体を案出することであるが、そのためには、まず「地盤の構造」を解明しなければならない。ここに「地盤の構造」は、i) 地形、ii) 地盤の構成物質（土質・岩質・水質）、iii) 地質構造、iv) 地盤の生成履歴、で表現される。

その上で、解明した「地盤の構造」に組み合わせるべき適切な「構造物の構造」、いわゆる対策工を案出する必要がある。そうして案出した「地盤と構造物の複合構造体」について、土質力学や岩盤力学、さらには経験則などに基づいた「設計計算」が実施される。

この「地盤の構造の解明」というプロセスを必要とする点が、他にない地盤構造物の設計の特異性であり、この「地盤の構造の解明」こそが「調査と試験」の本来の目的であって、そこで応用地質学の果たすべき役割は極めて大きい。

「地盤の構造の解明」にあたっては、地質学的な推論（論理学でいうアブダクション）を用いる必要があることから、解明された「地盤の構造」には、不確実性を含むことが避けられない。したがって、解明された「地盤の構造」のどこにどのような不確実性の可能性があるのかを明示しておくことが極めて重要となる。

#### 5. まとめ

「地盤の構造の解明」によって、「地盤の構造」は「工学的な地質図」として明示する必要がある。ここに「工学的な地質図」とは、地盤の構造を応用地質学の理学的な視点から表現することを目的に作成される「地質図」を基に、地盤の機能を力学的・水理学的に分析する上で必要な情報を加味して作成されるもので、一般に「土地質図」と呼ばれているものに相当する。

このように工学的な地質図は、一般の地質図とはまったく違う目的でつくられるものであるが、従来、地質技術者が作成し、地盤技術者ないし土木技術者が利用するものとなっていて<sup>6)</sup>、果たして設計・施工に必要な情報が必要十分に含まれたものになっていたか、疑問が残るところがあり、それが設計・施工の失敗へつながる一因となってきたと考えられる。

したがって、自然地盤の構造の解明にあたって、地質技術者と地盤技術者が協働して、地盤の構造に関するどのような情報を取得すべきかを十分協議し、それらが必要十分に表現された工学的な地質図<sup>7)</sup>を作成して、情報共有するように努めることが重要である。

#### 文献

- 1) 長谷川怜思：事例収集に基づく土地質分野における現状と課題，日本応用地質学会平成 25 年度研究発表会講演論文集，pp.99~100, 2013
- 2) 地盤工学会：地盤工学ハンドブック，丸善出版，p.441, 1999
- 3) 吉川弘之：人工物工学，精密工学学会誌，Vol.61, No.4, pp.465~468, 1995
- 4) 中島尚正：人工物と設計，（財）放送大学教育振興会，6325, pp.32~33, 2004
- 5) 栗原則夫・末岡徹・石井裕泰：人工物工学の設計論に基づく地盤構造物の設計概念の再構築，土木学会論文集 F4 部門，Vol.78, No.1, pp.81~98, 2022
- 6) 横田修一郎：地質情報の伝達媒体としてみた土地質図，応用地質，30 巻，3 号，pp.23~32, 1989
- 7) 地盤工学会関東支部 HP：地盤工学のあり方研究委員会「応用地質学の役割」WG 報告書，pp.33~54, 2022

## 84. コンクリーション化による EDZ および水みち割れ目の 自己シーリング実証試験研究

In-situ feasibility experiment for self-sealing process of EDZ and flow-paths factures  
learnt from spherical carbonate concretion formation

○吉田英一, 山本鋼志, 浅原良浩 (名古屋大学), 刈茅孝一, 齊藤朱音 (積水化学工業),  
松井裕哉 (日本原子力研究開発機構)

○Hidekazu Yoshida, Koshi Yamamoto, Yoshihiro Asahara (Nagoya Univ.),  
Koichi Karukaya, Akane Saito (Sekisui Chemical Co.Ltd.), Hiroya Matsui (Japan Atomic Energy Agency)

### 1. はじめに

球状コンクリーションには、鉄やシリカ、炭酸カルシウム(カルサイト: $\text{CaCO}_3$ )や一部マグネシウムを含む炭酸塩(ドロマイト: $\text{CaMgCO}_3$ )を主成分とするものがある<sup>1,2,3,4</sup>。その中でも炭酸カルシウムを主成分とする球状岩塊は、世界中の数億年～完新世までの海性堆積岩中から発見され、そのサイズは数センチ～数メートルと様々である<sup>3,4</sup>。この炭酸カルシウムを主成分とするコンクリーション中には、保存良好のさまざまな海生生物の化石や遺骸・生痕を内包し、その存在は約一世紀も前から記載がなされ、とくに古生物研究の対象として知られていたものである。

このような産状や特徴を有するコンクリーションの成因・形成速度に関して、国内外の数百に及ぶ試料を用いて、産状や形態、化学成分などの調査・分析を進め、その結果、球状コンクリーションに共通する性質として、コンクリーション内部の $\text{CaCO}_3$ 濃度がほぼ一定で、また $\delta^{13}\text{C}$ が低く有機物炭素由来であること、また、これらのコンクリーション内の均一な元素濃集から、未固結の海底堆積物中において、炭素起源となる生物を取り巻くように内部から外へと急速な反応でコンクリーションが成長することを明らかにした<sup>3,5,6</sup>。

現在、我々の研究グループではこれらコンクリーションの力学的ならびに水理学的評価のほか、人工的にコンクリーション化する複合樹脂(コンシード)を民間企業と共同開発し、実際の地下環境での水みち割れ目のシーリングに応用するための実証試験を開始した。本報告では、これまでの試験で得られた結果について紹介する。

### 2. コンクリーションの工学的評価

天然のコンクリーションの工学的評価に関して、これまでの測定結果から以下のことが分かってきた。

天然コンクリーション部分に含まれる炭酸カルシウム(カルサイト: $\text{CaCO}_3$ )の量は、周辺地層の約10～20倍の40～60wt%である。この割合は、

ほとんどのコンクリーションに共通した値である。この割合は、海底堆積物(未固結)の初期空隙率に対応する割合であり、コンクリーションが未固結堆積物中で形成されたことと整合的である<sup>7</sup>。またコンクリーションの空隙率は、古い地質時代のコンクリーションほど低い値を示す傾向があるものの、完新世のコンクリーションにおいても5%程度であり<sup>3,5</sup>、炭酸カルシウムの濃集・沈殿が速やかに進行したことを示す。このような炭酸カルシウムのシーリングに伴う力学特性について、現在エコーチップ測定法によってその強度に関するデータを蓄積しており、透水係数のデータ( $10^{-12}\text{m/s}$  オーダー)も含め花崗岩に匹敵するものが認められている<sup>7</sup>。

岩石の風化や変質が、ある時間(t)における岩石-地下水反応に伴う地下水の透過フラックス(F)に左右されるとすると、Fは、 $F \propto \rho \cdot k$  ( $\rho$ :空隙率,  $k$ :透水係数)でおおよそ示すことが可能である。これまでのコンクリーション及びその周辺地層の空隙率と透水係数の測定結果から、コンクリーションと周辺地層の総フラックスの差は、1000～10000となる。つまりコンクリーションと周辺地層の風化速度は1/1000～1/10000の違いが生じることを示唆する。このことは、炭酸カルシウムを主成分とする球状コンクリーション中の化石が保存良好なのは、微細なカルサイト結晶の空隙内での急速な沈殿によって、堆積物の細かい隙間まで充填・シーリングされることで外部との化学反応が抑制され、物質循環的に隔離されるためだと言える<sup>8</sup>。

### 3. コンクリーション化剤と原位置実証試験

開発した人工的コンクリーション化剤‘コンクリーションシード(略称コンシード):特願第6889508号’(図-1)の利点・特徴は、

1)従来の物理的圧入法と異なり、元素の拡散・沈殿によりミクロンオーダー以下の微細な空隙もシーリングが可能であること

2) 元素の拡散によるシーリングであることから、地下水の(高)間隙水圧の影響を受けないこと

3) 地下水中の自然由来の重炭酸イオンやカルシウムイオンも活用可能であり、持続的かつ長期的なシーリングが可能、という点である。

このコンシードを用いた実証試験を、日本原子力研究開発機構の幌延深地層研究センター(北海道幌延町)において実施中である。

実験は、地下 350m の試験坑道において、地下坑道掘削に伴う岩盤の破壊領域(掘削損傷領域: EDZ)部分を対象とし、コンクリーション化剤によるシーリング効果を確認することを目的とする。方法としては、坑道壁面や底盤から深さ 1~2m のボーリングを複数本掘削し、そのうちの 1 本を透水性変化のモニター孔として残し、他のボーリング孔にコンクリーション化剤を注入し、時間経過と共に水みちが閉塞され透水性が変化していく様子をモニターするものである。その最新の結果として、地下坑道周辺の掘削に伴い生じた EDZ の透水性が、これまでに約 2 オーダー以上低下し、周辺母岩とほぼ同レベルの透水性にまで改善されつつあることが確認された。また、オーバーコアリングによって、コンクリーション化によ



図-1 コンクリーションシード

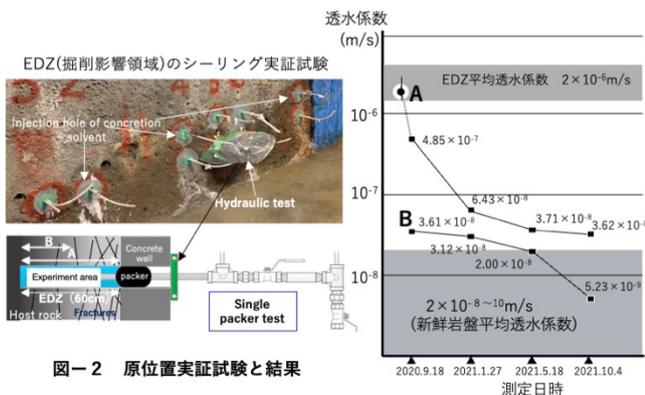


図-2 原位置実証試験と結果

る炭酸カルシウムの充填でシーリングされた割れ目状態も確認することができた(図-2)。

今後、さらに実証研究を進めるとともに、将来的には、岩盤中の割れ目帯や断層破碎帯などの大規模水みちの止水対策や、既存トンネルの修復に用いられるグラウト技術の代替策として、さらには CCS や石油廃孔の長期シーリングなどへの適用性も検討する計画である。なお、本研究は、経済産業省資源エネルギー庁委託事業「令和 3 年度高レベル放射性廃棄物等の地層処分にに関する技術開発事業(JPJ007597)(地層処分施設閉鎖技術確認試験)」及び中部電力特定テーマ公募研究助成

研究による成果の一部である。

## 文献

- 1) Yoshida,H, Hasegawa,H., Katsuta,N., Maruyama,I., Sirono,S., Minami,M., Asahara,Y., Nishimoto,S., Yamaguchi,Y., Ichinnorov,N., Metcalfe,R. (2018) Fe-oxide concretions formed by interacting carbonate and acidic waters on Earth and Mars. *Science Advances*, DOI:4: eaau0872.
- 2) Yoshida,H., Kuma,R., Hasegawa,H., Katsuta,N., Sirono,S., Minami,M., Nishimoto,S., Takagi,N., Kadowaki,S., Metcalfe,R. (2021) Syngenetic rapid growth of ellipsoidal silica concretions with bitumen cores. *Scientific Reports*, DOI: <https://doi.org/10.1038/s41598-021-83651-w>.
- 3) Yoshida,H., Ujihara,A., Minami,M., Asahara,Y., Katsuta,N., Yamamoto,K., Sirono,S., Maruyama,I., Nishimoto,S., Metcalfe,R. (2015) Early post mortem formation of carbonate concretions around tusk-shells over week-month timescales. *Scientific Reports*, 5:14123 doi: 10.1038/srep14123.
- 4) Muramiya,Y., Yoshida,H., Kubota,K., Minami,M. (2020) Rapid formation of gigantic spherical dolomite concretion in marine sediments. *Sedimentary Geology*, 404, 105664, <https://doi.org/10.1016/j.sedgeo.2020.105664>.
- 5) Yoshida,H., Yamamoto,K., Minami,M., Katsuta,N., Sirono,S., Metcalfe,R. (2018) Generalized conditions of spherical carbonate concretion formation around decaying organic matter in early diagenesis. *Scientific Reports*, doi.org/10.1038/s41598-018-24205-5.
- 6) Yoshida,H., Yamamoto,K., Ohe,T., Katsuta,K., Maruyama,I., Metcalfe,R. (2020) Diffusion controlled formation of spherical carbonate concretion in muddy sedimentary matrices. *Geochemical Journal*, 54, 233-242.
- 7) 竹内真司・後藤 慧・中村祥子・吉田英一 (2022) 炭酸カルシウムコンクリーションの物理・力学特性. *地質学雑誌* (印刷中).
- 8) 吉田英一 (2022) 球状コンクリーションの理解と応用. *地質学雑誌* (印刷中).

## 86. 形成環境が異なる炭酸塩コンクリーションの工学特性について

Study on the hydro-mechanical characterization of the calcareous concretion in different formation environments.

竹内真司, 後藤慧 (日本大学), 中村祥子, 吉田英一 (名古屋大学)

Shinji Takeuchi, Satoshi Goto, Sachiko Nakamura, Hidekazu Yoshida

### 1. はじめに

炭酸塩コンクリーションは海底堆積物中に埋没した生物の腐敗に伴う有機酸の拡散と海水中のカルシウムイオンとの過飽和・沈殿反応によって数年～数十年という、地質学的には極めて短期間で形成されたことが明らかにされてきた<sup>1)</sup>。またその地質学的産状などから、非常に緻密な構造を持ち風化に強いという特徴を有する。さらにコンクリーション形成後は長期間に渡って安定的に存在することから、この特性を地下構造物の亀裂やボーリング孔などのシーリングへ応用することが検討されている<sup>2)</sup>。Yoshida et al. (2015) などにより、炭酸塩コンクリーションの形成メカニズムは明らかにされてきた<sup>1)</sup>ものの、コンクリーションによる長期間のシーリング機能を評価する上で重要な固化後の水理特性や硬度特性などの工学的特性について検討された事例は未だ少ない。そこで、著者らはこれまでに神奈川県三浦半島に分布する葉山層群と岐阜県瑞浪市に分布する瑞浪層群に分布するコンクリーションを対象に、それらの工学的性質を明らかにすることを目的に、エコーチップ硬さ試験機を用いた硬度測定や透水試験による透水係数の測定などを実施してきた。葉山層群と瑞浪層群は同じ形成年代(中新統)ではあるものの、前者はプレート沈み込み境界<sup>3)</sup>、後者は比較的静かな内湾的な環境で形成されたとされており<sup>4)</sup>形成環境が異なる。ここでは、形成時期が同時期で形成環境が異なるコンクリーションの水理・力学特性の測定結果に基づいて、形成環境が工学的性質に与える影響について報告する。

### 2. 実施内容

検討対象とした試料は、神奈川県三浦半島南部の野比海岸に分布する葉山層群中の暗灰色砂質コンクリーションと三浦半島西部の長者ヶ崎海岸で転石として採取される暗褐色コンクリーション、岐阜県瑞浪市土岐川河床に分布する瑞浪層群の暗灰色砂質コンクリーションである

(図-1)。これらの試料を対象に水理特性および力学特性について検討した。なお、長者ヶ崎海岸のコンクリーションについては、力学的特性についてのみ検討した。



図-1 野比海岸(左)、長者ヶ崎海岸(中央)、および土岐川河床(右)のコンクリーション

#### 2-1. 水理特性

水理特性の検討は、空隙率測定と変水位透水試験を実施した。空隙率測定は、岩石片試料の乾燥重量と湿潤重量及び体積から算出した。また、変水位透水試験は JIS A 1218 に準拠し、野比海岸および土岐川河床で採取したコンクリーションを直径 5cm、厚さ約 3cm の円筒形に成型した試料を用いて実施した。

#### 2-2. 力学特性

力学特性の検討には、Proceq 社のエコーチップ硬さ試験装置 (EQUITIP3<sup>®</sup>) を用いた。この装置は超鋼製のボールチップをスプリングの力で試料表面に打撃し、その打撃速度と跳ね返り速度の比から硬度 (HL 値) を求めるものである。HL 値は、圧縮強度と正の相関性を有することが示されている<sup>5)・6)</sup>。各試料は、切断研磨したコンクリーション面に 1 cm 四方の格子線を引き、各格子の中心点を 10 回打撃した。打撃初期は HL 値は上昇するが、後半は HL 値が安定することから、今回は後半 5 回の測定値の平均値をその格子の代表値とした。対象とした試料は、野比海岸、長者ヶ崎海岸、および土岐川河床のコンクリーションである。

### 3. 実施結果

#### 3-1. 水理特性

野比海岸のコンクリーションの空隙率は 1.5~2.0%、周辺母岩は 45~55%、土岐川河床のコンクリーションは 3.0

～8.0%，周辺母岩は30～40%であり，コンクリーション部は周辺母岩よりも一桁程度低い値を示した．また，変水透水試験の結果，透水係数は野比海岸のコンクリーションは $1.9 \times 10^{-9} \sim 5 \times 10^{-9}$  (m/s)，土岐川河床のコンクリーションは $9.4 \times 10^{-10} \sim 8.5 \times 10^{-9}$  (m/s) の値を示した．空隙率，透水係数とも2地域のコンクリーションは概ね同等の水理特性を有する．

### 3-2. 力学特性

エコーチップ硬さ試験装置を用いた硬さ測定の結果を図-2に示す．いずれの試料もHL値は中央部で相対的に高く，外縁部で低い値を示す．比較的大きな試料で測定が行えた長者ヶ崎海岸と土岐川河床のコンクリーションでは中央部で750～800のHL値を得た．野比海岸のコンクリーションのHL値が若干低いのは，十分な試料の厚さを確保できなかったことが原因として考えられる．さらに，プレート沈み込み境界の変形を被ったと考えられる葉山層群中のコンクリーションの内部のHL値の分布に偏りはなく，内湾的環境で形成された瑞浪層群のものと同様，概ね均質である．

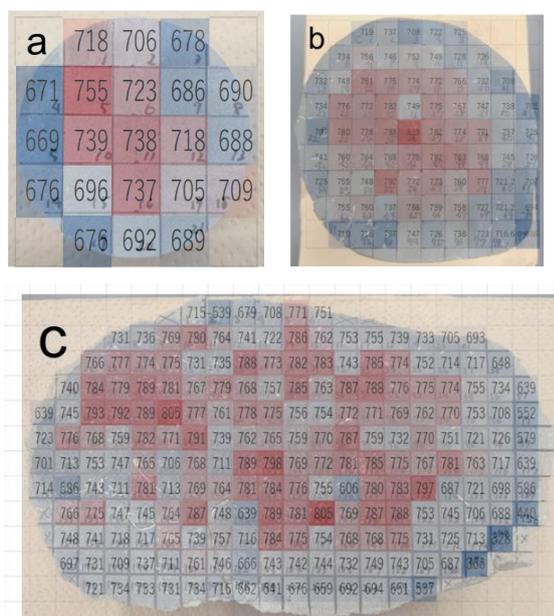


図-2 エコーチップ硬さ試験装置の測定結果

a : 葉山層群 (野比海岸), b : 葉山層群 (長者ヶ崎海岸), c : 瑞浪層群 (土岐川河床)

### 4. まとめ

本検討では，中新統の葉山層群と瑞浪層群中のコンクリーションを対象として，水理・力学特性について検討した．両層群は形成環境の違いはあるものの，コンクリ

ーション部の空隙率，透水係数，硬度は同程度であることが明らかとなった．このことから，生命体の死滅後，短期間で固化したコンクリーションは堆積環境やその後の変形作用の影響を大きく受けることなく，長期間にわたって安定して存在したことが示唆される．この特性は，コンクリーションの超長期間のシーリング性能の健全性を工学的に評価する上で重要な知見である．今後は，他の地質体中のコンクリーションについて同様の検討を進め，これまで得られた知見の信頼性を確認するとともに，断層運動で強く変形を被ったコンクリーションを対象として水理・力学特性の検討を行う予定である．

### 文献

- Hidekazu Yoshida, Atsushi Ujihara, Masayo Minami, Yoshihiro Asahara, Nagayoshi Katsuta, Koshi Yamamoto, Sin-iti Sirono, Ippei Maruyama, Shoji Nishimoto, Richard Metcalfe (2015), Early post-mortem formation of carbonate concretions around tusk-shells over week-month timescales, *Scientific Reports*, 5, 14123.
- 吉田英一ほか (2021), コンクリーション化によるEDZおよび水みち割れ目の自己シーリングに関する研究, 令和3年度日本応用地質学会研究発表会講演論文集, 85.
- Yamamoto Y. et al. (2017), Geothermal structure of the Miura-Boso plate subduction margin, central Japan, *Tectonophysics*.  
<https://doi.org/10.1016/j.tecto.2016.11.004>.
- 入月俊明, 細山光也 (2006), 15.5 瑞浪層群明世層と産出化石 古伊勢湾の浅海相と明世動物群. 日本地質学会編, 日本地方地質誌4中部地方, 朝倉書店, 368-369.
- 川崎了ほか (2002) : エコーチップ硬さ試験器による岩石の力学特性推定の試み, 応用地質, Vol.43, No.4, 244-248
- 中家ほか (2009), 連打法によるエコーチップ硬さ試験機の反発値と微小窪みとの関係, 筑波大学陸域環境研究センター報告, 10, 29-36.

# 87. 地質年代の異なる炭酸塩コンクリーションの 工学的特性について

Study on the Engineering Properties of Carbonate Concretions of Different Geologic Ages

後藤慧, 竹内真司 (日本大学), 吉田英一 (名古屋大学)  
Satoshi Goto, Shinji Takeuchi, Hidekazu Yoshida

## 1. はじめに

炭酸塩コンクリーションは、堆積物中で硬化してから現在までの長期間にわたってその健全性を維持しているとされているが、現在、この特性を再現し、地下空間のシーリング材として利用することが検討されている<sup>1)</sup>。近年では、炭酸カルシウムからなるコンクリーションが海底堆積物の生物遺骸を由来とする有機酸の拡散と海水中のカルシウムイオンとの過飽和・沈殿反応により形成されることや、数年単位という地質学的には極めて短い期間で形成されることが明らかとなり<sup>2)</sup>、実際の坑道などをを用いたコンクリーション化の実証実験が行われている。

一方で、天然の炭酸塩コンクリーションの持つ透水特性や硬度特性などの工学的特性について分析した例は殆どないことから、天然のコンクリーションを長期にわたるシーリング機能や健全性の観点から検討することは重要である。筆者らはこれまで国内の複数の地点において、形成年代や形成環境の異なる炭酸塩コンクリーションを用いて工学的特性を検討してきた。本報告では、それらのうち形成年代の異なる付加体中に形成されたコンクリーションについて検討した結果を紹介する。

検討に用いた試料は、神奈川県葉山層群から産出するへそ石と、静岡県瀬戸川層群から産出する鉄丸石（てつがんせき）と呼ばれる、形状や内部構造のよく似たコンクリーションである。これらを対象に、透水特性や硬度特性に関する測定を行い、その特徴を比較した。

## 2. 実施内容

### 2-1) コンクリーションの産地と特徴

検討対象のコンクリーションの産地である葉山層群と瀬戸川層群は、それぞれ神奈川県三浦半島と静岡県中部



図-1 葉山層群で見つかるへそ石と内部の軸構造

に分布する付加体であり、形成年代は葉山層群が中新世(14~16Ma)<sup>3)</sup>、瀬戸川層群が始新世~中新世(14~40Ma)<sup>4)</sup>とされている。

葉山層群から産するコンクリーションの一種であるへそ石は、図-1に示すような球状や円筒状、釣り鐘型で、淡灰褐色を呈し、中心を貫くような軸構造を持つ。これらは主に三浦半島西部の長者ヶ崎海岸などで転石として採取されたもので、半島南部の野比海岸では断層破砕帯の泥岩中から発見された。同様な形状を持つコンクリーションが瀬戸川層群の分布する静岡市の安倍川水系の河床の転石として採取されており、これらは外側が暗褐色で内部が暗灰色~黒色を呈するものが多く、鉄丸石と呼ばれている。葵区の富厚里地区では黒色泥岩露頭から鉄丸石が得られた。このような軸をもつコンクリーションは蟹江ほか(2012)によれば、*Tasselia Ordamensis* という生痕化石の一種がコンクリーション化したものであるとされる<sup>5)</sup>。

### 2-2) 水理・力学特性の検討

透水特性のうち空隙率測定は、岩石試料片の乾燥重量と湿潤重量および体積を測定して算出した。また、岩石

薄片を作成し、偏光顕微鏡で結晶構造を観察した。

硬度特性の測定には、エコーチップ硬さ試験機（超鋼製のボールチップを岩石表面に打撃し、その落下速度と跳ね返り速度から硬度を算出する測定装置）D型を用いた。エコーチップにより測定される硬度の値（HL値）は、一軸圧縮強度と正の相関をもつとされ<sup>6)</sup>、硬度値が高いほど岩石の強度が高いことを示す。球状のコンクリーション試料を半球状に切断したのち、切断面に1cm四方の格子線を引いて各格子内の一点を10回打撃して硬度を計測、後半5回の平均値を硬度としてコンクリーション内の硬度分布を検討した。

### 3. 実施結果

試料の空隙率測定の結果、へそ石と鉄丸石の空隙率は約2%であった。野比海岸のコンクリーションを含む母岩（灰白色泥岩）の空隙率は、46~54%であることから、これらのコンクリーションは泥質母岩と比べ非常に空隙が少ないことがわかる。ただしコンクリーション試料は緻密で水の浸透が十分でない可能性があり、より精密な手法による空隙率測定が必要と考えられる。

薄片観察の結果、へそ石では碎屑物粒子の間隙を炭酸カルシウム（方解石）が充填している様子が観察できた。鉄丸石にも碎屑物の隙間を極めて微細な鉱物が充填している様子が観察できたが、同定にはいたってはいない。なお、蟹江ほか（2012）では瀬戸川層群の鉄丸石のX線回折結果から、菱鉄鉱（シデライト）と石英が含まれるとしている<sup>5)</sup>。

硬度測定の結果、へそ石はHL値でおよそ650~800、鉄丸石はおよそ800~900という硬度値が得られた。このことから、鉄丸石はへそ石以上の強度を持っていることが分かる。またへそ石・鉄丸石ともに中心部から外縁部に向けて硬度値が低下する傾向を示した（図-2）。しかし、軸部の硬度は周辺よりも高い場合と低い場合があ

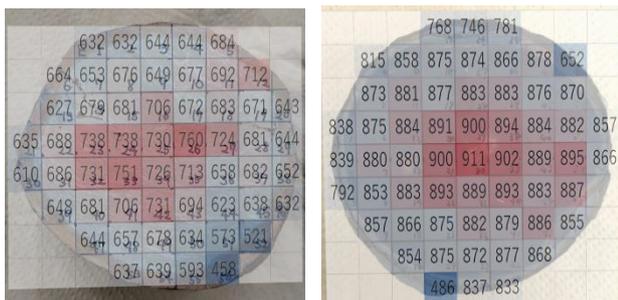


図-2 へそ石(左)、鉄丸石(右)の硬度の分布傾向

る。これは軸部の充填物の違いや、外部から軸部に浸透した間隙水による変質の影響と考えられる。

### 4. まとめ

本論では、形成年代が異なる付加体に産出するコンクリーション（へそ石と鉄丸石）を対象に、水理・力学特性について検討した。その結果、鉄丸石はへそ石よりも高い強度を持つことがわかった。また両者ともに内部ほど硬質であることが定量的に示された。古い時代に形成された鉄丸石のほうが強度を持つ理由は不明であることから、今後、組成や結晶度などの分析により形成後の埋没深度や化学的変質などの影響について検討する予定である。一方、水理特性についてはいずれも空隙が非常に少なく緻密であることがわかった。これまでのコンクリーションの分析では硬度が高くなると透水性が低くなる傾向がみられたことから、鉄丸石はへそ石以上に水を通しにくいと考えられる。今後は透水性の詳細な比較を行うため、より精度の高い空隙構造の把握と透水係数の算出を行う予定である。

### 文献

- 1) 吉田英一ほか（2021）、令和3年度日本応用地質学会研究発表会講演論文集、85。
- 2) Hidekazu Yoshida *et al.* (2015), *Scientific Reports*, 5, 14123.
- 3) 鈴木進（2012）、神奈川県立博物館研究報告（自然科学）、14, 65-74.
- 4) 日本地質学会（2018）、日本地方地質誌4, 中部地方.
- 5) 蟹江康光ほか（2012）、神奈川県立博物館研究報告（自然科学）、14, 93-102.
- 6) 川崎了ほか（2002）、応用地質, Vol.43, No.4, 244-248.

## 88. 坑道の掘削損傷領域(EDZ)評価のための割れ目調査

### Fracture investigation for EDZ estimation

○大泉涼, 加藤猛士, 木方建造, 窪島光志 (川崎地質), 宮良信勝 (日本原子力研究開発機構)  
Ryo Ohizumi, Takeshi Kato, Kenzo Kiho, Koji Kuboshima and Nobukatsu Miyara

#### 1. はじめに

高レベル放射性廃棄物 (HLW) の処分場が建設される岩体について、候補岩体の透水性が非常に小さいことは安全評価のうえで有利である。しかし、低透水性の岩体でも、処分坑道掘削時には坑道周辺に掘削の影響による割れ目が発生し、これに沿った水みちが生じ得るため、掘削の影響で生じる割れ目の分布やその透水性などを評価する必要がある。このような観点から、日本原子力研究開発機構幌延深地層研究センターの地下 350m 調査坑道内において、坑道周辺の割れ目調査を実施した。

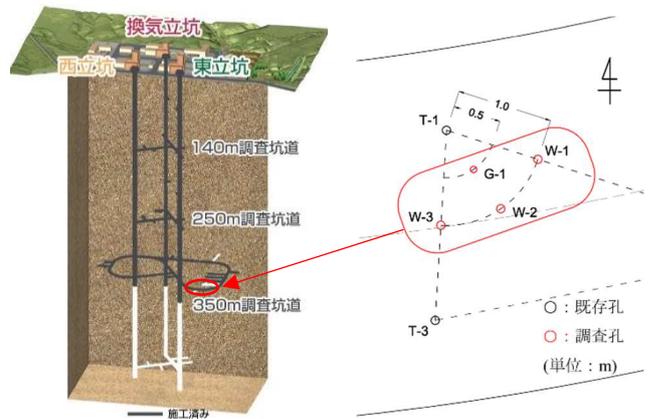


図-2 ボーリング孔掘削レイアウト

#### 2. 坑道周辺の掘削に伴う影響領域

トンネルを掘削すると応力解放により坑道周辺の岩盤に割れ目が生じるなどの影響が生じることが知られている。Tsang et al. (2005) はその影響領域を図-1 のように分類している。

本稿では、図-1 のうち、掘削に伴う応力再配分による岩盤の塑性変形に起因する割れ目、すなわち EDZ 割れ目に着目した。

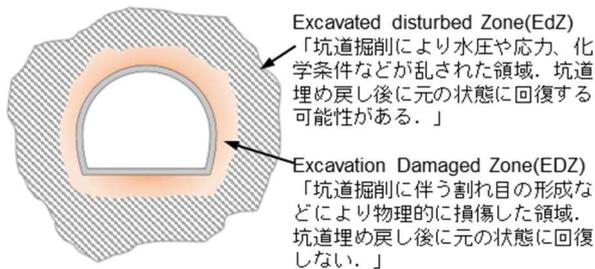


図-1 坑道壁面近傍の概念図

#### 3. 調査の概要

本調査を含む原位置試験は、図-2 に示す同研究所内 350m 調査坑道の東周回坑道上で実施しており、調査対象は稚内層の珪質泥岩を主体とする岩盤である。調査は、坑道底盤から孔長 7m の鉛直孔を 4 孔掘削し、コア観察 (割れ目観察を含む)、BTV 観測、孔径検層、孔曲がり測定を実施した。

#### 4. 割れ目調査結果

##### 4.1 割れ目の成因による区分

割れ目区分に際しては吉野他(2019)<sup>2)</sup>に基づき、EDZ の観点から割れ目を以下の 3 タイプに区分した。

- ①EDZ 割れ目 (掘削損傷割れ目): 掘削により発生した引っ張り割れ目。割れ目表面全体に羽毛状構造が認められる割れ目。
- ②PE 割れ目 (既存割れ目): 初生的に存在している剪断割れ目。鏡肌、条線やステップ構造が認められる割れ目。
- ③CD 割れ目 (機械的割れ目): コアの掘削や取り扱いにより機械的に生じた割れ目。

##### 4.2 割れ目と層理の方向性

層理の方向性は BTV 観測により確認した。コア観察による割れ目のうち、その大部分が BTV 観測で確認できなかったため、BTV 観測で確認できる割れ目やジュールなどの方位を基準に、コアでの相対的方位から割れ目の方向性を決定した。各孔のそれぞれの割れ目の走向傾斜を、図-3 のステレオネット (南半球投影) に示し、方向性をまとめたものを表-1 に示す。

表-1 割れ目と層理の方向性

層理/割れ目	方向性	備考
層理 (FO)	NW-SE 中角 SW	層理と EDZ 割れ目の整合性は小さい
EDZ 割れ目	NNE-SSW~NE-SW 低角~中角 SE	
PE 割れ目	卓越方向なし	
CD 割れ目	卓越方向なし	

##### 4.3 割れ目の深度分布

底盤からの深度を基準にした割れ目の累積頻度曲線 (図-4) から、EDZ 割れ目の累積頻度は各孔坑道径 (4m) の範囲内 (深度 2.5m~3.5m) でほぼ 95~100%

となっており、特に浅い深度で急激な増加の傾向が認められる。

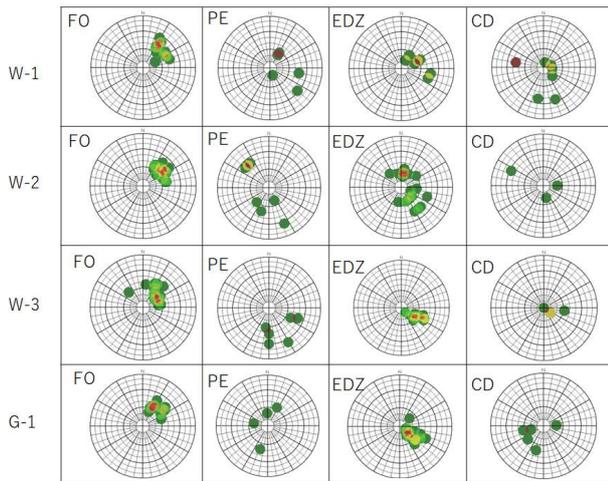


図-3 ステレオネット図(下半球投影)

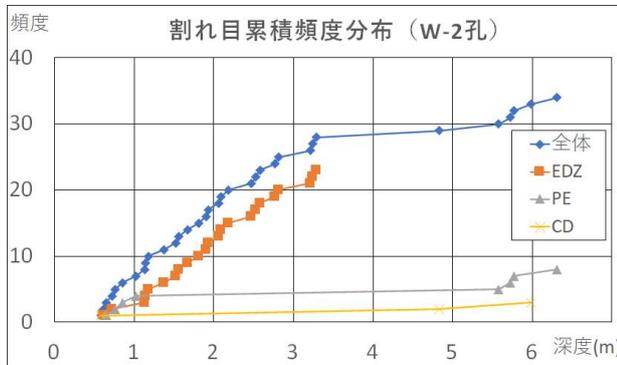


図-4 割れ目累積頻度分布図(W-2)

#### 4.4 EDZ 割れ目の傾斜角

各孔における深度を基準とした EDZ 割れ目の傾斜角からは、W-2 孔を除いた各孔の割れ目の傾斜角は浅い深度でおよそ 50° 前後で、深くなるに従い 20° 前後と徐々に緩くなる傾向が認められた (図-5)。

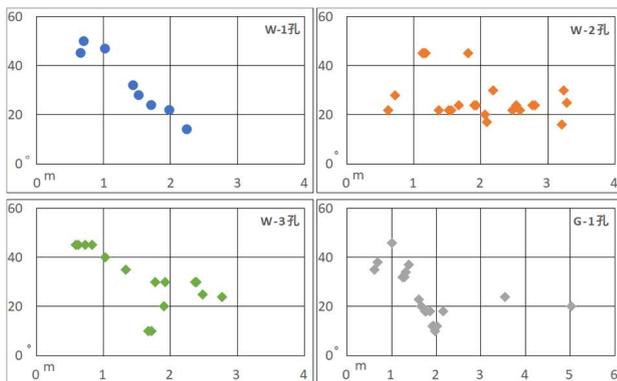


図-5 EDZ 割れ目の傾斜角分布図  
(縦軸：傾斜角(°) 横軸：深度(m))

#### 4.5 割れ目の連続性

各孔の割れ目の位置と傾斜角の関係を図-6 に示す。傾斜角は、孔に分布する割れ目を G-1 孔と各観測孔間の断面に投影したときの見掛け傾斜角として表記した。

この図から、G-1 孔の深度 2m 以浅では EDZ 割れ目が密に分布するとともに、同様の方向性を有する EDZ 割れ目が各観測孔にも分布している。このため、特に深度 2m 程度までの範囲内では、微小な割れ目の集合体が連続して発達している可能性がある。

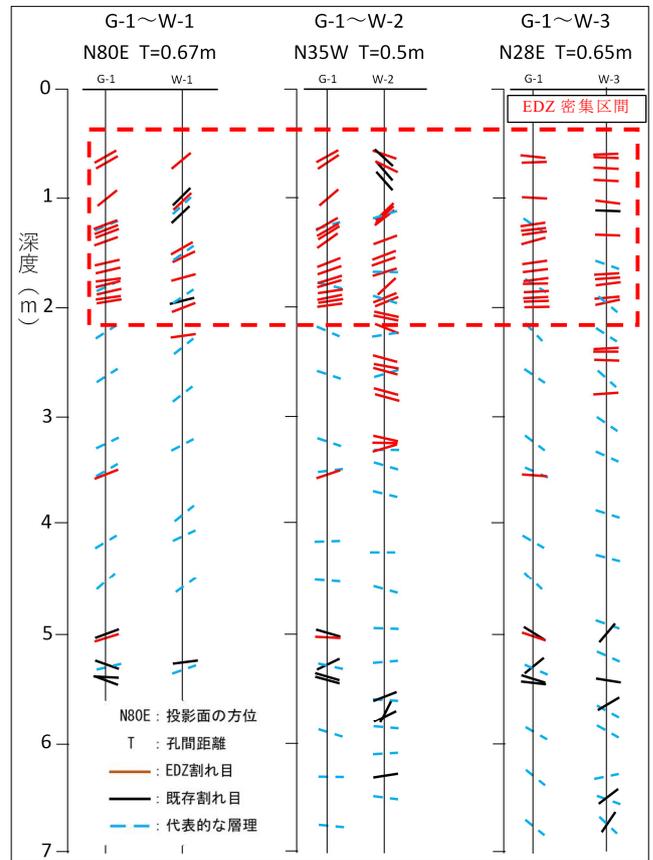


図-6 割れ目の連続性検討モデル

### 5 まとめ

割れ目調査で確認した割れ目を EDZ, PE, CD 割れ目の 3 タイプに区分し、EDZ 評価のための分析を行った。その結果、EDZ の発生に伴う割れ目は特に 2m 以浅に集中し、この範囲では微小割れ目の集合体として連続する可能性があること、EDZ 割れ目と層理の方向性の整合性が低いことが分かった。今後は、坑道横方向、上方向の分布についても調査を行い、坑道全周にわたる EDZ に関する地質評価手法を向上することが必要であると考えられる。

なお、本報告は、経済産業省資源エネルギー庁から受託した「令和 3 年度高レベル放射性廃棄物等の地層処分に関する技術開発事業 (JPJ007597) (地層処分施設閉鎖技術確証試験)」の成果の一部である。

### 文献

- 1) Tsang, C.F., Bernier, F., Davies, C (2005) : Int. J. Rock Mech. Min. Sci., 42, pp.109-125.
- 2) 吉野浩光, 佐俣洋一, 丹生屋純夫, 石井英一 (2019) : JAEA-Data/Code 2018-015, 169p.

# 89. 割れ目ネットワークモデルにおける割れ目長さを考慮した 透水量係数分布の推定

Estimation method of hydraulic parameters considered correlation with fracture size for DFN modeling

○石橋正祐紀, 田川陽一, 並川 正 (鹿島建設), 尾上博則 (原子力発電環境整備機構)  
Masayuki Ishibashi, Yoichi Tagawa, Tadashi Namikawa, Hironori Onoe

## 1. はじめに

亀裂性岩盤の空間的な透水不均質性を考慮して、地下水流動・物質移行特性を評価する際には、割れ目の幾何形状や空間分布、透水性等を確率論的に表現した割れ目ネットワークモデル (DFN モデル) が用いられる<sup>1)</sup>など。説明性の高いモデルを構築する上では、原位置で取得された実測値 (例えば、水理試験で得られた透水係数分布) の再現性が高い解析入力パラメータを設定することが肝要である。近年、割れ目の透水量係数分布の設定には、割れ目の大きさと透水量係数の間に準相関関係を仮定した確率論的な分布 (式-1) が用いられる<sup>1)</sup>など。

$$T = \text{lognorm}(\mu, \sigma) \times r^C \dots \text{式-1}$$

ここで、 $T$ : 透水量係数,  $\mu$ : 対数平均,  $\sigma$ : 対数標準偏差,  $r$ : 割れ目半径,  $C$ : 定数を示す。式-1 に示す通り、割れ目の透水量係数には3つ ( $\mu$  値,  $\sigma$  値,  $C$  値) の未知数が含まれ、これらの最適な組合せを探索 (グリッドサーチ) する場合、膨大なケース数の解析が必要となる。そこで、本件では岐阜県瑞浪市の深度 500m に位置する地下坑道から掘削されたボーリング孔で取得された水理試験データ<sup>2)</sup>を用いた仮想水理試験解析<sup>3)</sup>を実施し、岩盤の透水係数分布の再現性が高い割れ目の透水量係数分布を効率的に推定する方法を検討した。

## 2. 検討内容

既存の検討<sup>3)</sup>から、 $\mu$  値は仮想水理試験解析結果 (透水係数分布) 全体の増減に寄与する未知数であることが示唆されている。そこで、まずは  $\mu$  値が岩盤の透水係数分布の推定結果に与える影響を定量的に評価した。次に、その評価結果に基づき割れ目の透水量係数分布の推定手法を検討し、その手法の妥当性を確認した。

この際、DFN モデルに用いた割れ目の幾何学的パラメータセットは表-1、仮想水理試験の解析条件は、表-2 の通りである。各未知数の推定範囲は、 $\mu$  値を 1E-16~1E-20 ( $\log_{10}$ 0.2 間隔; 21 パターン)、 $\sigma$  値を 0.0~2.0 (0.2 間隔; 11 パターン)、 $C$  値を 6.0~8.0 (0.2 間隔; 11 パターン) とした (グリッドサーチする場合、2,541 ケースとなる)。なお、各ケースでは確率論的に構築した 50 個の DFN モデルによる仮想水理試験解析の結果から透水係数分布を算出した。

表-1 割れ目の幾何学的パラメータセット<sup>1)</sup>

セット	傾斜方位/ 傾斜* [deg.]	Fisher 定数 [-]	最小長さ[m], べき指数[-]	三次元 割れ目 密度 [m <sup>2</sup> /m <sup>3</sup> ]
1	202.9 / 87.8	18.5	2.0, 3.1	0.43
2	150.6 / 89.6	17.8	2.0, 3.4	0.13
3	80.7 / 86.2	15.3	2.0, 4.7	0.05
4	210.7 / 30.3	12.1	2.0, 3.3	0.08

\* 傾斜方位は、北方向を 0° とした時計回りの角度を示し、傾斜は水平面下向きの角度を示す。

表-2 仮想水理試験の解析条件

モデル化 領域	100m×100m×100m ※200m×200m×200m で DFN モデルを構築し、中央部から対象領域を抜き出し構築 (領域縁辺部の割れ目密度低下を抑制するため)
仮想水理試験 解析に用いた 仮想孔の 仕様	長さ: 9.14m, 方位: N9.58°W, 傾斜: 0° ※長さ・方位は、比較対象とするボーリング孔の水理試験区間の平均値を算出して設定
境界 条件	外側境界: 固定水頭 (1.0m) 仮想孔: 固定水頭 (0.0m)
割れ目の 透水量係数	下限値: 1E-11m <sup>2</sup> /s, 上限値: 1E-4m <sup>2</sup> /s ※解析の収束性の向上を図るために上下限値を設定 ※上下限値を越える割れ目については、透水量係数を上下限値に再設定

## 3. 結果

### 3.1 $\mu$ 値の影響評価

$\mu$  値について、1.0E-18 m<sup>2</sup>/s を基準とし、その 0.5 倍、1.0 倍、1.5 倍、10 倍の計 4 ケースの仮想水理試験解析を実施した。この際、 $\sigma$  値には 0.0~1.0 (0.5 間隔)、 $C$  値には 6.0~8.0 (1.0 間隔) を設定し、 $\sigma$  値と  $C$  値が異なる条件下での  $\mu$  値の影響についても検討した。

図-1 に検討結果の一例として、 $\mu=1E-17.0$ ,  $1E-18.0$  の解析結果、及び  $\mu=1E-18.0$  の解析結果を 10 倍 ( $\mu$  値の比で乗算) した補正值を示す。同図からは、 $\mu=1E-17.0$  の解析結果と  $\mu=1E-18.0$  の解析結果の補正值が概ね一致していることがわかる。この傾向は他のケースでも同様であったため、 $\mu$  値については乗算で概ね補正することが可能と考えられる。しかしながら、1E-10m/s 未満の低透水性部では、解析結果と補正值に乖離が認められる (図-1 中の赤丸と黒破線)。

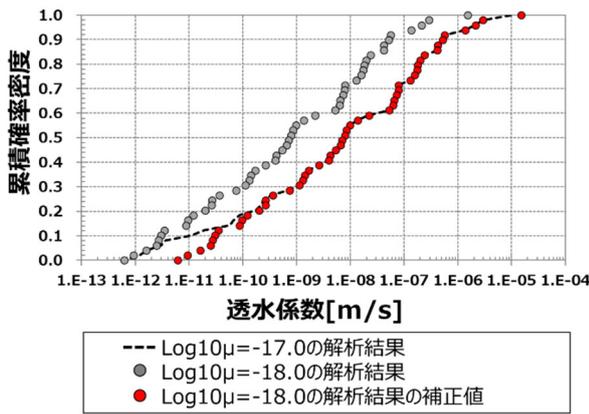


図-1 μ 値の影響の評価結果の事例

本解析では、表-2 に示した通り、解析の収束性の向上を図るため、割れ目の透水量係数分布に上下限値を設定した。異なる μ 値で構築した DFN モデルでは、透水量係数分布を再設定する対象の割れ目の本数が変わるため、低透水部や高透水部で透水量係数分布の傾向に違いが生じたと推察される。また、高透水性の割れ目に比べて低透水性の割れ目の方が、割れ目本数が多いため、透水性が低い範囲で、その違いが顕著に現れたものと考えられる。

### 3. 2 透水量係数分布の推定手法の検討結果

3. 1 節の結果から、上下限値の設定による影響はあるが、全体的な透水量係数分布は乗算により補正可能であることが示された。そこで、本検討では以下の推定手順で透水量係数分布を推定し、岩盤の透水量係数の実測値との比較を通じて、推定手法の妥当性を確認した。

- ① 仮想水理試験解析について、μ 値は 1E-18m<sup>2</sup>/s に固定し、σ 値、C 値に対してグリッドサーチする。
- ② 実測値との誤差 (RMSE: Root Mean Squared Error) を算出する際、最小二乗法などを用いて RMSE が最小となる μ 値を推定し、1E-18m<sup>2</sup>/s との比を乗算し透水量係数分布を補正する。
- ③ 補正した結果の RMSE 分布に基づき、σ 値、C 値の最適値を判定する。
- ④ 3. 1 節に示したように、μ 値の補正については、低透水性部などに不確実な部分があることから、判定した σ 値、C 値を固定し推定された μ 値の前後 1 オーダーを対象に仮想水理試験解析を実施し、最も RMSE が小さくなる μ 値を判定する。

①については、表-1、表-2 に示す解析条件を用い、σ=0.0~2.0 (0.2 間隔)、C=6.0~8.0 (0.2 間隔) を対象として、仮想水理試験解析を実施した。μ 値で仮想水理解析結果を補正し (②)、出力した RMSE 分布を図-2 に示す (③)。RMSE の分布は、σ=1.8、C=6.6 で最小となり、楕円状に低下する傾向を示した (この際の RMSE は 0.16、推定された μ 値は 1E-17.2)。

この結果から、μ=1E-18.2~1E-16.2 (log<sub>10</sub>0.2 間隔) で仮想水理試験解析を実施し、最適な μ 値を推定した

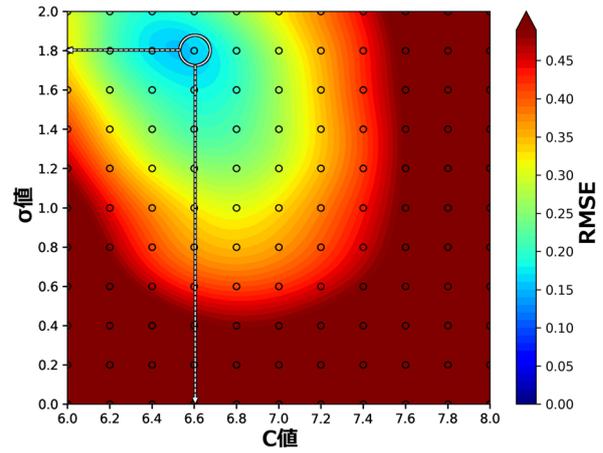


図-2 グリッドサーチ結果 (RMSE マップ)

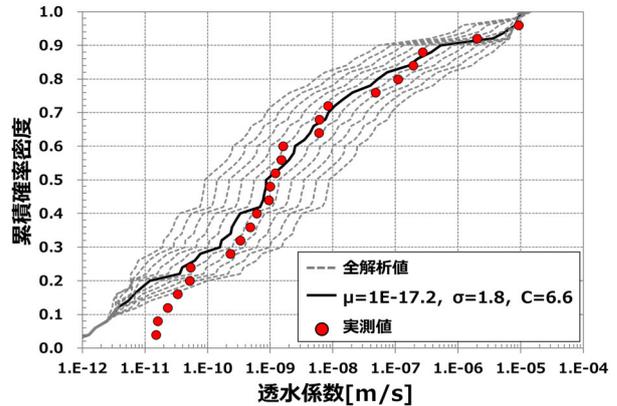


図-3 実測値と解析結果の比較

(④)。その結果、推定値と同様の μ=1E-17.2 で最も実測値との誤差が小さくなり、その透水量係数分布は実測値をよく再現できていることが確認できた (図-3)。

本検討を例にすると、構築した推定手法を適用することで、グリッドサーチを用いた場合に必要となる 2,541 ケースの約 5% の計算量 (131 ケース) で、割れ目の透水量係数分布の推定が可能となる。

## 5. まとめ

DFN モデルにおける割れ目の透水量係数分布について、原位置データを用いて、割れ目の大きさと準相関関係を考慮した効率的な推定方法を検討した。

その結果、μ 値については、簡易な計算で解析結果が補正できること、構築した手法により従来のグリッドサーチを行う場合に比較して、数%程度の少ない計算量で岩盤の透水量係数分布を再現可能な透水量係数分布を推定できることを実証した。今後は、更なる省力化に向けて自動処理化などの検討を進めていく。

## 文献

- 1) Onoe et. al. (2021) International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 114, 104737.
- 2) 尾上・竹内 (2020) JAEA-Data/Code 2020-011.
- 3) 石橋ほか (2021) 令和 3 年度土木学会全国大会第 76 会年次講演会, CS12-08.

# 90. 岩石の点載荷試験の利用についての一考察

A Study on the Use of Point Load Test on Rocks

○大山朝之, 向井和行 (株式会社レアックス)  
Tomoyuki Oyama, Kazuyuki Mukai

## 1. はじめに

岩石の点載荷試験(JGS3421-2012)は, ①不定形の岩石試料に対し, ②簡易的にその強度を評価できることが特徴であり, 一軸圧縮試験などの試験と比較し短時間で多くの試験を実施できる利点がある. 一方, 点載荷強さとその他の強度試験との関係ははまだ確立されていない.

本稿では, 点載荷強さを岩石の強度の指標として利用するために, 露頭からの採取試料およびボーリングコア試料から得られた複数の岩種を対象に点載荷試験を実施した. また, 一部の試料について一軸圧縮試験を実施し, 点載荷強さと一軸圧縮強さとの関係について整理した結果を報告する.

## 2. 調査方法

### (1) 試験方法

点載荷試験は JGS3421-2012 岩石の点載荷試験方法に準じて実施した<sup>1)</sup>. 試験に用いた試験機は, 応用地質株式会社製の点載荷試験機(PPOINT LOAD TESTER) MODEL-4326 である.

点載荷強さ  $I_s$  は以下の式-1 で算定した.

$$I_s = P/De^2 \quad (式-1)$$

$P$  は破壊荷重(N),  $De$  は等価コア径(mm)である.

等価コア径  $De$  は, 供試体が円柱の場合  $De=D$ (mm), 供試体の形状が円柱以外の場合  $De^2 = (4WD)/\pi$  で定義される.  $D$  は荷点間隔(mm),  $W$  は供試体幅(mm)である.

### (2) 試料の概要

点載荷試験は 129 個の供試体に対し実施した. 採取箇所の内訳はボーリングコアからの採取が 58 試料, 露頭からの採取が 71 試料であった.

対象岩種の内訳は, ジュラ紀前後に形成された付加体起源の粘板岩が 83 試料, 新第三紀中新世の安山岩類が 27 試料, 凝灰角礫岩が 19 試料であった.

また, 上記の 129 試料のうち, 対応する一軸圧縮試験結果があるものは 22 試料であった. 対象岩種の内訳は, 粘板岩 7 試料, 安山岩類 6 試料, 凝灰角礫岩 9 試料であった.

## 3. 結果

### (1) 岩種と点載荷強さの傾向

表-1 に点載荷試験結果を示す. 点載荷強さの平均値は, 最大が粘板岩(SI)の  $4.38(MN/m^2)$  に対し, 最小は凝

表-1 点載荷試験結果一覧表

岩種	供試体数(個)	点載荷強さ(MN/m <sup>2</sup> )				標準偏差	変動係数
		最大値	最小値	平均値	中央値		
粘板岩(SI)	83	9.69	0.55	4.38	4.49	2.18	0.50
安山岩類(An)	27	8.53	0.47	2.81	2.57	1.73	0.62
凝灰角礫岩(Tb)	19	4.16	0.31	1.24	0.95	0.86	0.69

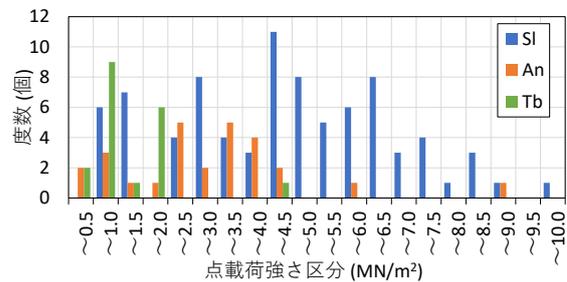


図-1 点載荷試験結果ヒストグラム

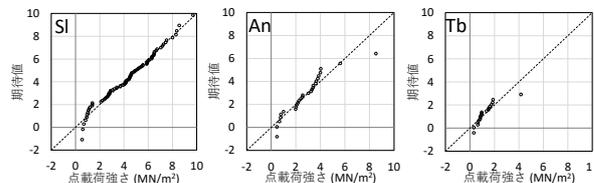


図-2 Q-Q プロット図

灰角礫岩(Tb)の  $1.24(MN/m^2)$  であった. 図-1 に点載荷試験結果ヒストグラムを示す. 図-1 によると, 各岩種ともばらつきは大きいものの, 分布の中央値付近にヒストグラムの最頻値を持ち, 正規分布に近似できることを示唆している. また, 図-2 には正規性の確認のための, Q-Q プロットを示した. 各岩種とも概ね直線上にプロットされることから, これらの標本集団は正規分布に近似できると判定される.

### (2) 試料のばらつきと供試体数

ばらつきの程度を示す変動係数は  $0.50 \sim 0.69(50 \sim 69\%)$  を示す. 正田ら<sup>2)</sup>は, 岩石の強度の分布が正規分布で近似できるとした場合の, 変動係数と統計的に必要な試料数について考察しているが, 変動係数が 30% 前後で 20 個程度の試料数が必要と述べられている.

また, 地盤工学会<sup>3)</sup>では, 既存の指針等を取りまとめて, 点載荷試験を指標試験として取り扱う場合の供試体数の目安を示しており, 同一の試料(試料採取位置が同じ域内, 岩種が同一, 大きさがほぼ同じ, 破壊荷重がほぼ同じと想定される等の条件を満足するとされた試料)から 10 個前後とし, 岩石の引張り強さや一軸

圧縮強さとの相関を見る場合などは、さらに多くの供試体が必要としている。今回の試験試料では、対応する一軸圧縮試験結果がある試料が粘板岩 7 試料、安山岩類 6 試料、凝灰角礫岩 9 試料であり、上記の例と比較しやや少ないといえる。

#### 4. 考察

##### (1) 点載荷強さ $I_{s(50)}$ と一軸圧縮強度の相関

直径 50mm のコアから求められる点載荷強さ  $I_{s(50)}$  と一軸圧縮強度の相関については、良好な関係を持つことが示されている<sup>1)</sup>。疋田ら<sup>2)</sup>による報告では  $I_{s(50)}$  と一軸圧縮強度の比について、火成岩で 12.3 倍、堆積岩で 15 倍が示されている。

本報告でも既往の報告と同様の相関が見られるか否かを確認した。点載荷試験を実施した試料のうち、一軸圧縮強度試験を実施している 22 試料について、 $I_{s(50)}$  を算出するとともに一軸圧縮強度との相関を検討した。各試料の  $I_{s(50)}$  は以下の式-2 を用いて算出した。

$$I_{s(50)} = F \cdot I_s \quad F = (De/50)^{0.45} \quad \text{(式-2)}$$

図-3 に点載荷強さ  $I_{s(50)}$  と一軸圧縮強度の散布図を示す。各岩種の相関係数は、粘板岩(SI)で 0.68、安山岩類(An)で 0.056、凝灰角礫岩(Tb)で 0.18 となり、粘板岩(SI)で良好な相関を示す一方、凝灰角礫岩(Tb)ではごく弱い相関、安山岩類(An)ではほぼ無相関と判定される。次に、各岩種について回帰分析を行い、回帰直線、回帰方程式を求めた。岩石試料の特徴を考えたとき、点載荷強さが 0(MN/m<sup>2</sup>)の時は、一軸圧縮強度もまた 0(MN/m<sup>2</sup>)となると仮定できる。このため、回帰分析は回帰直線が原点を通る原点回帰モデルを用いた。

検討の結果、粘板岩(SI)で  $y=19.361x$ 、安山岩類(An)で  $y=11.098x$ 、凝灰角礫岩(Tb)で  $y=15.737x$  と、粘板岩(SI)と凝灰角礫岩(Tb)で疋田ら<sup>2)</sup>の報告の堆積岩に近い強度比、安山岩類(An)で同じく火成岩に近い強度比を示した。

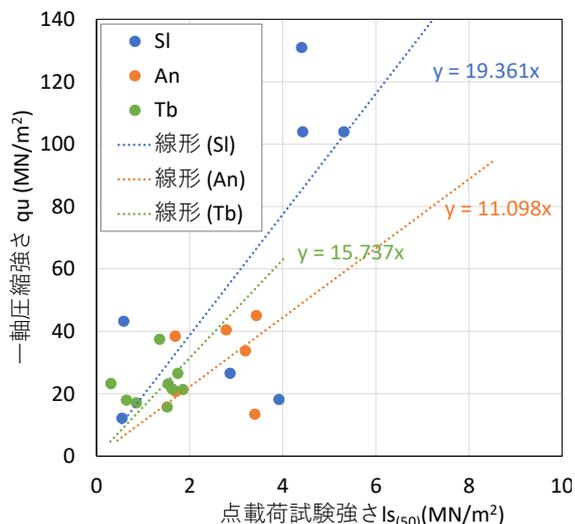


図-3 点載荷強さ  $I_{s(50)}$  と一軸圧縮強度の関係

以上から、粘板岩(SI)と凝灰角礫岩(Tb)について、点載荷強さはその岩石の強度特性を一定程度反映しているものと推定される一方、安山岩類(An)ではいまだその関係性は不明瞭である結果となった。

岩種により相関の程度が大きく異なる理由として、一軸圧縮試験と点載荷試験の特性の違いと、試験を実施した各岩種の個別の特性が考えられる。

点載荷試験は引張強さの迅速試験と考えることができ<sup>3)</sup>、岩石中に内在している弱面の付着強度の影響を受けやすいと考えられる。試験に用いた試料はどれも肉眼的には明瞭な不連続面を有しないインタクテナものを選んでいますが、今回試験を実施した各岩種は、それぞれ以下のような特徴から弱面を内在している。

- ・粘板岩 (SI) : 岩石の生成過程で高圧によるせん断変形を受けており、潜在的な弱面を多く内包している。
- ・安山岩類 (An) : 不規則な流理構造や自破碎構造を有し、このため強度的に不均質である可能性がある。
- ・凝灰角礫岩 (Tb) : 細粒の基質中に様々なサイズの礫を含んでおり、各試験試料に含まれる礫の粒度と礫率により強度が違う可能性があること、また、礫と基質の境界部が弱面として作用する可能性がある。

#### 5. まとめ

本報告では、岩種によって点載荷強さ  $I_{s(50)}$  と一軸圧縮強度の相関の程度に違いがあり、少ない分析数では有意な相関を見いだせない場合があることが明らかとなった。

既往の報告でも点載荷強さ  $I_{s(50)}$  と岩片の硬さを把握する簡易試験法との関係について、新第三系中新統の堆積性軟岩のような初生的軟岩に対してはよい相関が見られるが、中古生界の砂岩、粘板岩のような破碎が進行した岩石に対してはばらつきが大きく、微小な亀裂の存在に強い影響を受けることがあり、この点に十分留意する必要があると述べられている<sup>1)</sup>。

このため、点載荷強さを岩石の強度の推定方法として利用する際には、他の強度試験との関係性を事例ごとに検討、評価する必要があることが示唆された。

今後は様々な岩種で同様の検討を実施して事例を蓄積し、岩種ごとの点載荷強度の特徴や他の強度試験との相関をより明らかにすることができればと思う。

#### 文献

- 1) 地盤工学会 (2013) : 地盤調査の方法と解説, pp.448-459.
- 2) 疋田貞良, 菊池昌博 (1988) : 点載荷試験の実用性に関する一考察, 開発土木研究所月報, No.423, pp.30-41.
- 3) 平松良雄, 岡行俊, 木山英朗 (1965) : 非整形試験片による岩石の引張強さの迅速試験, 日本鉱業会誌, Vol81, pp.1024-1030.

# 91. 砂型積層 3D プリンターで作製した模擬試料を用いた

## 力学特性評価の確認-真三軸試験手法の例-

Verification of Evaluating Mechanical Properties Using Sandstone Analogue Fabricated by Sand Casting 3D-Printing  
:The Case of True Triaxial Test

○佐藤 稔 (電力中央研究所), 朝比奈大輔 (産業技術総合研究所), 竹村貴人 (日本大学)  
Minoru Sato, Daisuke Asahina, Takato Takemura

### 1. はじめに

自然界の地盤・岩盤を構成する岩石は多様で少なからず不均質性を有する。特に小寸法の試料を用いる要素試験では、このことが試験結果にばらつきを生じさせる一因となることから、同種の岩石を用いた試験結果であってもその数値モデルとの比較が困難になることもある。そこで、砂型積層 3D プリンターで作製した均質な試料を用いて試験を行うことで、その結果と数値モデルとの比較検討、妥当性確認にも有用であると考えられる。

また、近年地下利用が深部化する中で、実現象の把握や現場作業の安全性向上のため、より現実的な岩盤中の応力状態を再現可能な、真三軸試験を用いた研究例が増加している<sup>1)</sup>。真三軸試験は想定する地下環境に応じて様々な境界条件・応力経路で行われているが、不均質性を有する岩石で得られた試験結果を比較検討する場合にはその評価に不確実性を有することとなる。そこで本研究では 3D プリンターで作製した砂岩模擬試料を用いて真三軸試験を行い、力学特性評価について確認した。

### 2. 砂型積層 3D プリンターで作製された模擬試料

本研究で使用した試料は、砂型積層 3D プリンター (SCM-10, CMET 社) により作製された 35×35×70mm の角柱形試料である (図-1)。3D プリンターは 3DCAD データを基にインクジェット方式で金属製造用の鋳型を積層造形する装置である。砂はアルミナ-シリカ系セラミックであるムライト (粒径 100 $\mu$ m) を、砂を結合させるバインダーとしてフラン系樹脂を使用した。

同様の 3D プリンターで作製された模擬試料は、これまでも地盤材料モデルとして力学・強度特性について研究されてきた<sup>例え ば 2)</sup>。一軸圧縮強さは平均 6.3MPa、標準偏差 0.32、一面せん断試験の結果から粘着力  $c=1.54$ MPa、内部摩擦角  $\phi=27^\circ$  が得られている<sup>1)</sup>。なお、一連の研究で用いられた試料は軟らかく、試料を運ぶ際や試験機にセットするまでに角が削れやすく、取り扱いに注意が必要であった。そこで本研究では 2 つのバインダー添加率条件 (質量で 2.4%, 3.9%) を変えた試料を作製し試験を行った。なお、通常の砂型はバインダー添加率 2.4% で作製されている。

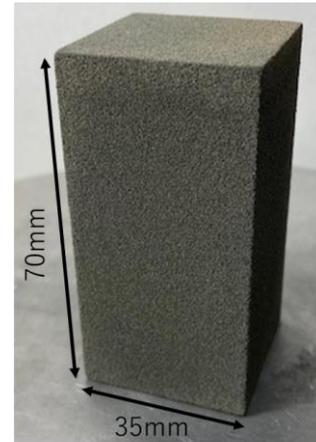


図-1 作製した砂岩模擬試料

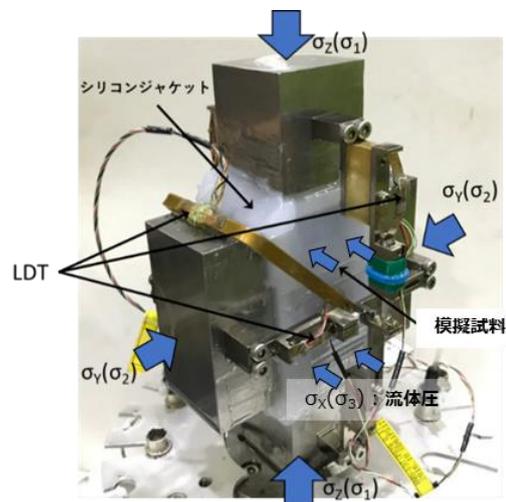


図-2 真三軸試験の圧力容器内の様子

### 3. 真三軸試験条件

真三軸試験は流体圧による拘束圧下で 2 方向の応力 (固体圧) を独立制御する真三軸試験手法で行った (図-2)。圧縮応力を正にとり、互いに直交する三主応力のうち小さいものから最小主応力 ( $\sigma_3$ )、中間主応力 ( $\sigma_2$ )、最大主応力 ( $\sigma_1$ ) とする。なお、真三軸試験を取り扱う文献において、二主応力が等しい試験条件は通例として  $\sigma_3=\sigma_2$  もしくは  $\sigma_2=\sigma_1$  として表され、本稿でも同様の表記とする。各方向の変位は高感度変

位計 LDT (Local Deformation Transducer) を使用して測定し、3 方向それぞれのひずみを算出した。自然乾燥した模擬試料の上下左右に金属製のエンドピースを取り付け、シリコンゴムを使用して試料表面を被覆した。なお、試料表面とエンドピースの間に生じる摩擦を防ぐために、減摩擦剤としてシリコングリスを塗布したテフロンシートと銅箔を供試体とエンドピースの間に装着した。応力経路は  $\sigma_3$  を 2.5MPa、 $\sigma_2$  方向および  $\sigma_1$  方向を 5.0MPa まで载荷した ( $\sigma_3 < \sigma_2 = \sigma_1$ ) 後に、 $\sigma_3$  と  $\sigma_2$  を一定に保ちながら  $\sigma_1$  をストローク制御 (0.02mm/min) にて载荷した。

#### 4. 試験結果

図-3 に試料 b-1 (バインダー添加率 3.9%) の真三軸試験で得られた応力-ひずみ線図を示す。 $\epsilon_1$ 、 $\epsilon_2$ 、 $\epsilon_3$  はそれぞれ  $\sigma_1$ 、 $\sigma_2$ 、 $\sigma_3$  方向のひずみを、 $\epsilon_v$  は体積ひずみを示している。縦軸は差応力 ( $\sigma_1 - \sigma_3$ ) であり、21.3MPa でピーク応力となり、その後応力降下し、13.6MPa でほぼ残留状態となった。ピーク応力を超えてからは  $\epsilon_3$  が特に大きく変形し、残留状態では  $\epsilon_2$  にほとんど動きがなく、 $\epsilon_1$  の圧縮とともに  $\epsilon_3$  方向に膨張したことがわかる。

3 試料の応力-ひずみ線図を比較した結果を図-4 に示す。試料 a-1 および a-2 はバインダー添加率 2.4% であり、バインダー添加率の高い b-1 よりも破壊強度が低い結果が得られた。また、a-1、a-2 はやや全体的に差応力値が異なるが、ピーク応力を超えてから 3 段階に分かれて応力降下する傾向は一致していた。試験後に圧力容器から取り出した試料を観察すると (図-5)、a-1 はせん断破壊、b-1 はせん断破壊とともに縦割れが観察された。

#### 4. 考察

バインダー添加率を増加したところ、破壊強度が増加し、変形特性も変化した。3D プリンターで作製した模擬試料の力学特性は自然の岩石を用いた既往研究の真三軸試験結果 (例えば 3) に近いと考えられる。また、バインダー添加率を変化させることで、特定の強度を持つ軟岩の模擬試料を作製できることも示唆された。

同じバインダー添加率の結果を比較すると、差応力値はやや異なるが、強度・変形特性はほぼ同様な傾向が得られた。3D プリンターで作製した試料は、試料自体の自然の岩石に比べて非常に均質であり、作製する人による不確かさもほとんどないため、力学特性等の評価手法の確認や、数値モデルの妥当性確認に適していると考えられる。

#### 文献

1) 佐藤稔 (2022) : 岩石用真三軸試験技術の高度化に関するレビュー, 応用地質 (印刷中)。

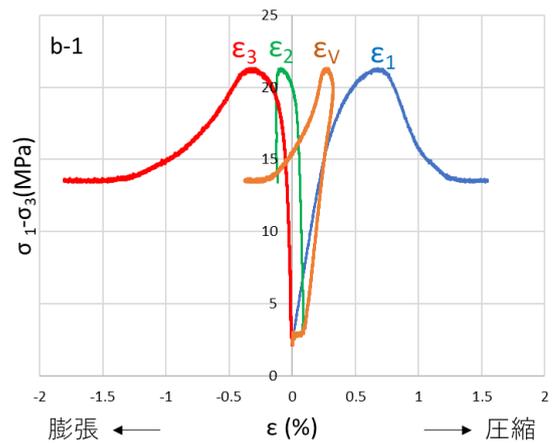


図-3 応力-ひずみ線図(b-1, バインダー3.9%)

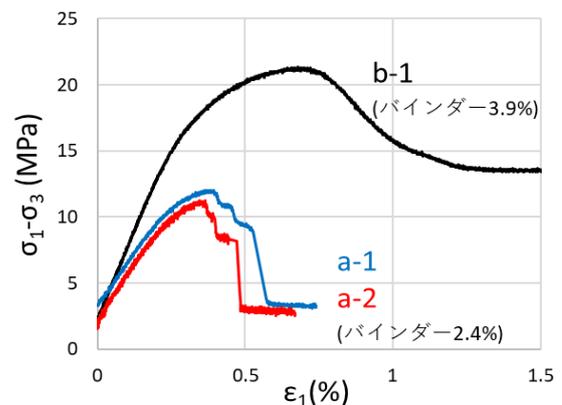


図-4 バインダー添加率の異なる試料の応力-ひずみ線図の比較

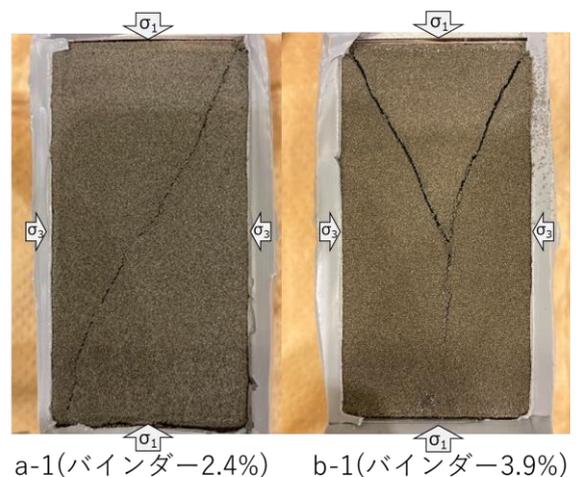


図-5 バインダー添加率の異なる試料の破壊後の写真

- 2) 鈴木健一郎, 奥澤康一, 濱本昌一郎, 藤井幸泰, 磯部有作 (2019) : 砂型積層 3D プリンターで作製した地盤材料モデルの力学特性の再現性, 第 54 回地盤工学研究発表会発表講演集, pp. 37-38.
- 3) 佐藤稔, 朝比奈大輔, 西本壮志 (2021) : 平面ひずみ状態における来待砂岩の力学変形特性, 第 15 回岩の力学国内シンポジウム講演集, pp.567-571.

## 92. 花崗岩類分布地域における土石流の要注意溪流の抽出手法

A Method to Extract Streams with Debris Flow Hazard at Granite Distribution Area

○長谷川 淳, 西金 佑一郎 (鉄道総合技術研究所)

Atsushi Hasegawa, Yuichiro Nishikane

### 1. はじめに

筆者らは、鉄道における土石流による被災の実態を明らかにするため、1967年から2019年までに発生した土石流によると考えられる鉄道の被災事例を分析してきた<sup>1,2)</sup>。その中で、中生代の花崗岩類、堆積岩類、変成岩類が分布し、流域面積が0.2km<sup>2</sup>以下かつ平均溪床勾配が20~30°の流域での事例が多いことを明らかにした<sup>2)</sup>。また、花崗岩類が分布する流域での事例については、最高点距離と堆積土砂量に正の相関があり、直線回帰による決定係数が0.52となることから、最高点距離を用いることで堆積土砂量のある程度推定できる可能性があることを示した<sup>2)</sup>。

本研究ではこれまでの検討結果をふまえ、地質別で鉄道の被災事例が最も多かった花崗岩類に着目し、花崗岩類が分布する地域において溪流の地形条件から土石流が発生する可能性がある溪流を抽出する手法について検討した。

### 2. モデル地区での検討

モデル地区として、おもに花崗岩類が分布し、過去に土石流による災害が多発している約95km<sup>2</sup>の範囲を選定した(図-1の黒枠内)。当該範囲に含まれる谷次数が1次以上の578の溪流について土石流の発生有無を調査し、溪流の地形条件の差異について検討した。

#### 2.1 モデル地区の溪流の地形的な特徴

対象とした578溪流について数値標高モデルを用い

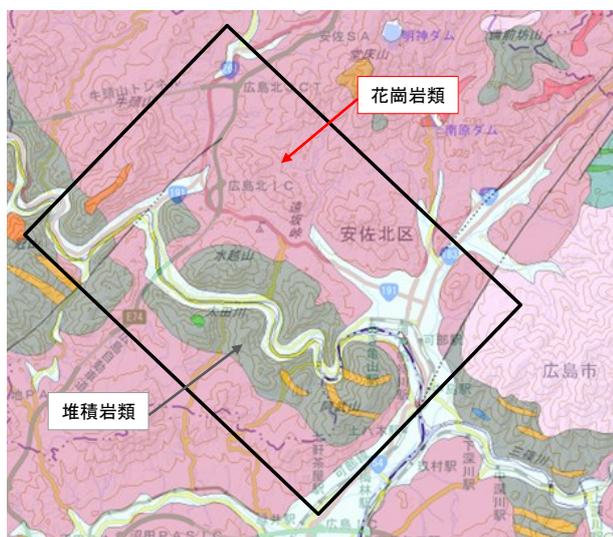


図-1 モデル地区の位置図  
(地質図 Navi<sup>3)</sup> に加筆)

て図-2 に示す地形量のうち流域最大径, 本流長, 流域面積, 本流比高, 流域比高, 平均溪床勾配および谷次数を計測した。計測した地形量を限定した理由は、図-2 の地形量は相互の相関係数が高いものが多かったためである。モデル地区においては、流域面積が0.2km<sup>2</sup>以下の流域は全体の約80%, 0.05km<sup>2</sup>以下は約50%を占め、平均溪床勾配は10~25度の溪流が多かった。このことから、第1章に示した鉄道の被災事例<sup>1)</sup>に比べると、モデル地区の溪流の規模はより小規模で平均溪床勾配はやや緩勾配であると言える。

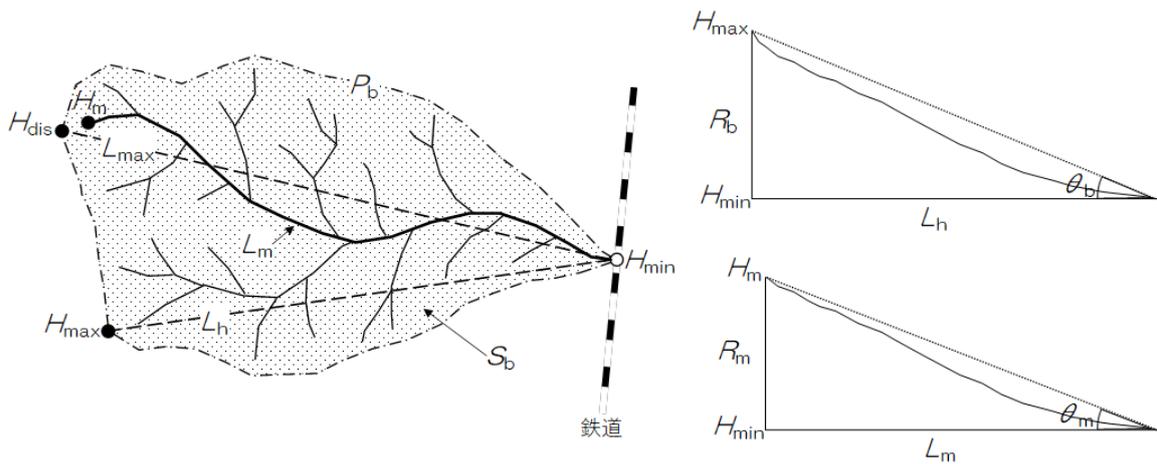
#### 2.2 土石流が発生した溪流の地形的な特徴

対象とした578溪流について災害関係資料の調査および1975年撮影の空中写真の判読を行い、59の溪流で土石流の発生を確認した。ここで、今回の調査で土石流の発生を確認した溪流を「履歴あり」、それ以外の溪流を「履歴不明」と称する。両者の溪流の地形条件の相違を検討したところ、流域比高, 本流比高, 平均溪床勾配について、履歴ありの最小値が履歴不明の最小値よりも大きくなる傾向がみられた(図-3)。これらの地形量における履歴ありの最小値は、流域比高が76m, 本流比高が39m, 平均溪床勾配が11度であり、これらをしきい値とすることで履歴ありと同じ地形条件にある溪流、すなわち土石流が発生する可能性がある要注意溪流を抽出することができる可能性がある。

### 3. 要注意溪流の抽出手法の検討

第2章の結果をもとに、流域比高, 本流比高, 平均溪床勾配の組合せにより要注意溪流を抽出する手法について検討した。前述の値をしきい値とした場合、しきい値以下の範囲に分布する履歴不明の全溪流に対する割合は、平均溪床勾配-流域比高の関係で24.4%(図-4)、平均溪床勾配-本流比高の関係で23.7%、本流比高-流域比高の関係で18.5%であった。要注意溪流の抽出にあたっては履歴不明の溪流をなるべく除外できる方がよいため、平均溪床勾配11度以上かつ流域比高76m以上が抽出条件として適当であると考えられる。

ここで、上述のしきい値はモデル地区における値であり、他地域の花崗岩類が分布する溪流に適用できるかどうかは不明である。そこで、花崗岩類が分布する溪流における鉄道の被災事例を用いて検証した。本研究で収集した事例のうち、花崗岩類が分布する地域での事例は49件あり、平均溪床勾配の最小値は11.2°、流域比高の最小値は76mであった。よって、花崗岩類



$H_{min}$ :最低点高度,  $H_{max}$ :最高点高度,  $H_{dis}$ :最遠点高度,  $H_m$ :本流最高点高度,  $L_h$ :最高点距離,  $L_m$ :本流長,  $P_b$ :流域縁辺長,  $S_b$ :流域面積,  $R_b$ :流域比高,  $R_m$ :本流比高,  $\theta_b$ :流域傾斜,  $\theta_m$ :平均溪床勾配

図-2 計測した地形量<sup>2)</sup>

における鉄道の被災事例は、上述のしきい値以上の範囲に含まれる（図-5 の赤色の範囲）。このことから、今回検討した範囲内では、花崗岩類が分布する地域において土石流の要注意渓流を抽出するしきい値として前述の値が適当であると考えられる。

#### 4. まとめ

本論では、花崗岩類が分布するモデル地区のデータに基づいた土石流の要注意渓流を抽出する手法の案を示した。今後は他の地域での検証を行い、汎用的な手法の確立を目指す。

#### 文献

- 1) 長谷川ほか (2020) : 鉄道における土石流による被災事例の文献調査, JSEG 令和 2 年度研究発表会講演論文集, pp.115-116.
- 2) 長谷川ほか (2021) : 鉄道沿線で発生した土石流の堆積土砂量と地形・地質条件の関係: JSEG 令和 3 年度研究発表会講演論文集, pp.63-64.
- 3) 地質図 Navi (<https://gbank.gsj.jp/geonavi/geonavi.php>)

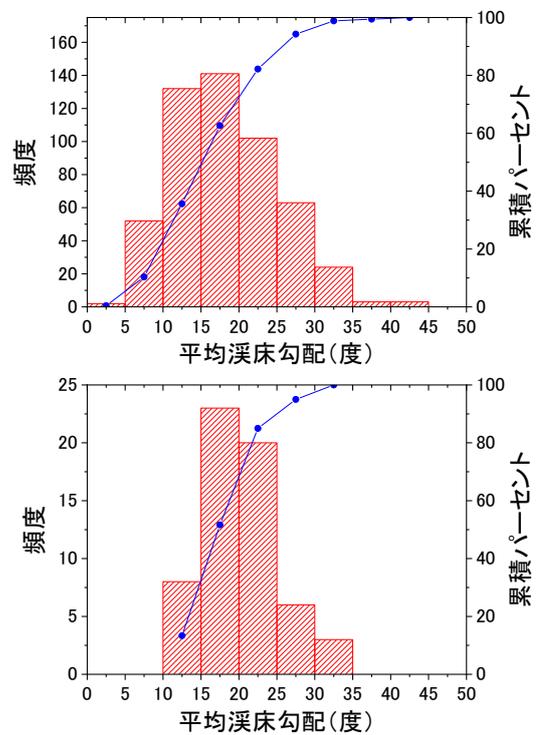


図-3 被災履歴の有無ごと地形条件の相違の例 (上図: 履歴不明, 下図: 履歴あり)

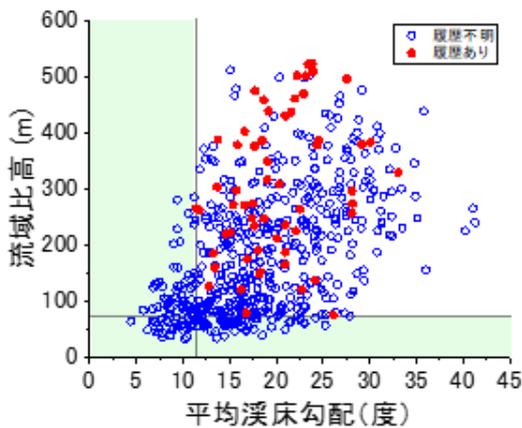


図-4 被災履歴の有無ごとの平均溪床勾配-流域比高の関係 (緑の範囲に該当するプロットが全体の 24.4%)

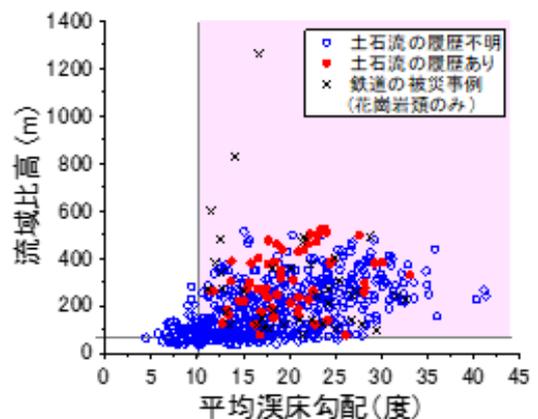


図-5 鉄道の被災事例を含めた平均溪床勾配-流域比高の関係

## 93. 空中写真測量を用いた飛騨変成岩斜面の

### 地形変化に関する研究

Research on Topographical Change of Hida Metamorphic Rock Slope using Aerial Photogrammetry

○山内滉大 (名城大学), 藤井幸泰 (名城大学), 日野康久 (KANSO テクノス), 加藤歌那子 (元名城大学)  
Kodai Yamauchi, Yukiyasu Fujii, Yasuhisa Hino, Kanako Kato

#### 1. はじめに

岐阜県飛騨市河合町付近に位置する斜面は飛騨片麻岩で構成され、風化作用で表層が土砂に変化して崩れやすい。これらの対策の一つとして、斜面崩壊の初期現象を把握することが有効と考えられる。その手段の一つとして、無人航空機 (UAV) による空中写真測量を用いる手法がある。空中写真測量はアナログ写真の頃から地すべり地等への活用が進められており、近年では UAV による斜面崩壊への適用も積極的に図られている。そこで本研究では、上記飛騨の斜面を対象に、空中写真測量を用いて斜面表層の経時的变化を明らかにすることで、斜面崩壊の初期現象を捉えることを試みた。

#### 2. 研究対象地の概要

本研究の対象地とする斜面は、岐阜県飛騨市河合町元田付近に位置している。(図-1) この地域は特別豪雪地帯に指定され、融雪による斜面災害が危惧されている。さらに、活断層である跡津川断層が小鳥川 (おどりがわ) 沿いに連続しており、地震による斜面崩壊の危険性も存在する。加えて、対象斜面の地質は変成岩である“飛騨片麻岩”を含む飛騨帯で構成されており、片理面に沿った亀裂が生じやすいため、斜面崩壊の要因になり得るとされている。

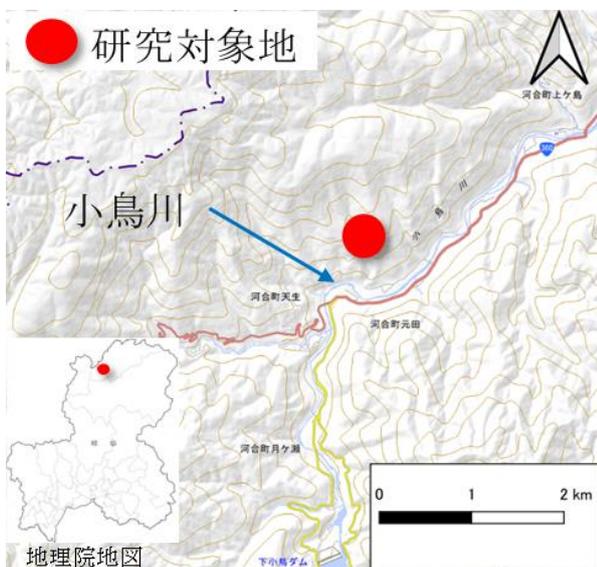


図-1 研究対象地

#### 3. 調査の手順

2021年4月10日と2022年4月13日に対象斜面の撮影を実施した。現地では、下記の手順で UAV による空中写真撮影などを実施した。

- 1) 斜面全体の適切な位置に対空標識 (標定点) を設置
- 2) トータルステーション (TS) で標定点の座標を測定
- 3) UAV を用いて撮影高度 60m で空中写真を撮影

図-2の赤枠内が対象斜面である。2021年4月10日と2022年4月13日の標定点の位置は、図-2に示すように斜面全体を囲うように11個設置した。標定点とは、空中写真測量の測量精度を向上させるために設置する、座標値が明らかな点である。

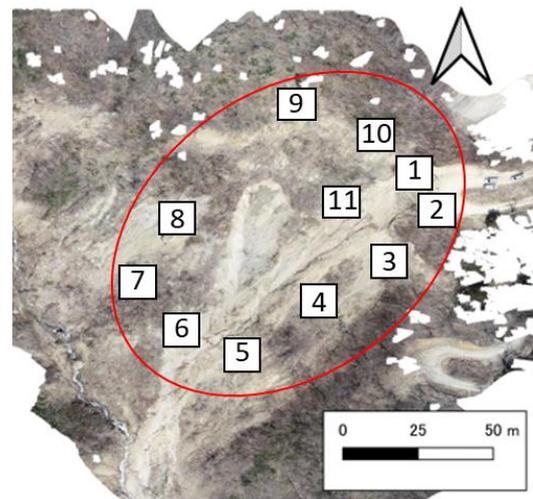


図-2 対象斜面と標定点の位置

次に、現地で撮影した空中写真を SfM / MVS (Structure from Motion / Multi-view Stereo) ソフトである Agisoft Metashape に読み込み、下記の手順で斜面の三次元モデル化を実施した。

- 1) アライメントの実施
- 2) 高密度クラウド構築
- 3) メッシュ構築
- 4) テクスチャ構築

アライメントとは、画像の重複部分から同一の特徴点をマッチングし、点の集合体を作成すると共に、撮影時のカメラの位置と方向を復元する作業である。

#### 4. 二時期の斜面表層の比較

2021年4月10日と2022年4月13日に撮影高度60mで撮影した斜面の三次元モデルのDEM (Digital Elevation Model: 数値標高モデル) の差分を計算した結果を図-3に示す。赤色が堆積, 青色が侵食, 黄色が変化なしを示している。対象斜面(図-2)の外側は植生等の影響による異常値が生じるため, 考慮しないものとする。図-3の赤枠部に着目すると, 斜面が3m程度鉛直方向に侵食され, 斜面下側に堆積していることが確認されるが(矢印), この侵食が融雪によるものか, 降雨によるものかは不明なため, どちらの影響を強く受けているのかを後に考察する。

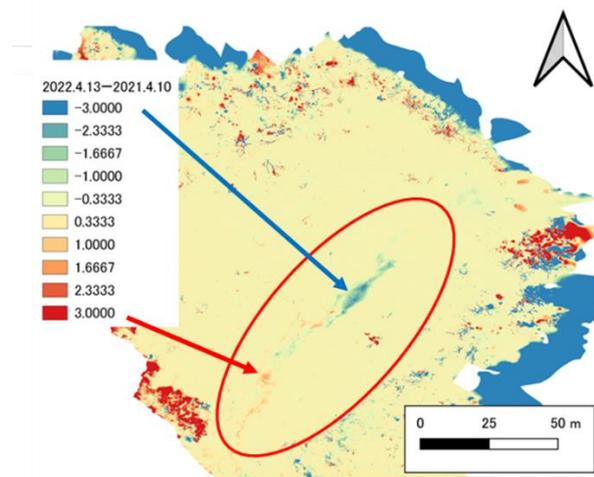


図-3 2021年と2022年の斜面のDEMの差分

図-4は2022年4月13日の撮影高度60mでのオルソモザイク画像である。図-3と同様の箇所に注目すると, 斜面上側から地下水が漏れ出ている様子が確認できる(矢印)。2章で述べたように, この地域が特別豪雪地帯に指定されていることを考慮すると, 融雪により生じた水が斜面表層に浸透し, 地下水として漏出している可能性が考えられる。

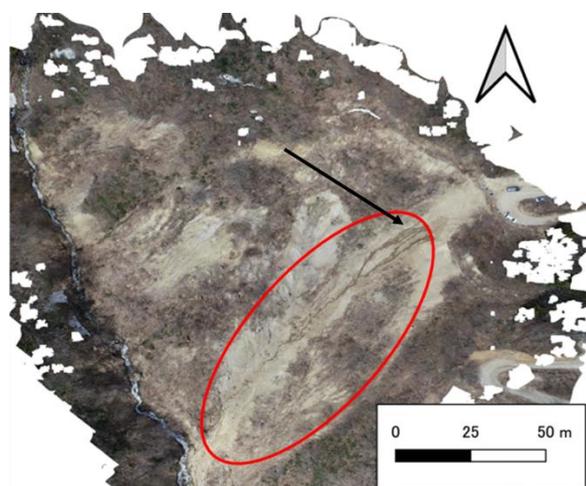


図-4 2022年の斜面のオルソモザイク画像

#### 5. 考察

本研究では2021年11月にも同様の測量調査を実施した。しかし植生等の影響で計測可能な部分は一部のみであった。ここからは11月斜面の計測可能な部分に着目し, 図-3の斜面侵食が降雨もしくは融雪のどちらによるものかを考察する。

図-5の左側は2021年4月と11月のDEMの差分を表し, 右側は2021年11月と2022年4月のDEMの差分を表している。(色分けは図-3と同様)左側と図-3を比較すると, 斜面土砂侵食のほとんどが降雨等による侵食であることがわかる。逆に右側では, 斜面土砂侵食部の確認はできないが(積雪期の植生の枯死が侵食として現れている), 植生の真下に堆積が確認できることから(矢印), 侵食部が植生の表示に隠れてしまった可能性も考えられる。

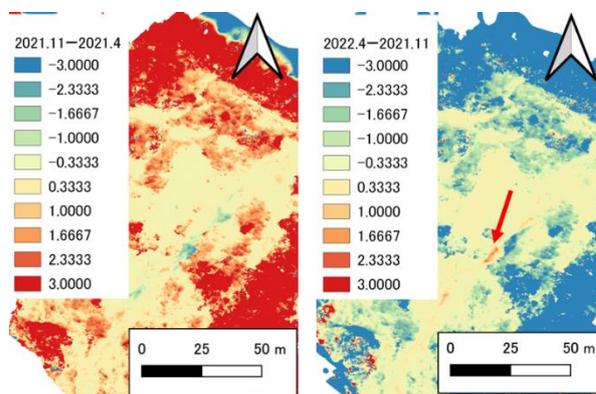


図-5 11月斜面と4月斜面のDEMの差との比較

#### 6. まとめ

本研究では, 飛騨の斜面を対象に, 空中写真測量を用いて2021年4月10日から2022年4月13日の斜面を比較し, 経時的変化を明らかにすることで, 斜面崩壊の初期現象を捉えることを目的に研究を行った。二次期のDEMを比較した結果, 斜面中央部付近が3m程度鉛直方向に侵食され, 斜面下側に堆積していることが確認できた。図-5より, 2021年4月から2021年11月に斜面が降雨等による侵食を受けていることがわかった。また, 2021年11月から2022年4月に侵食部の確認はできないが, 植生の真下に堆積部が確認できることから, 侵食部が植生の表示に隠れてしまった可能性も考えられる。

今後も斜面の観察を続け, 融雪等が斜面にどのような影響を与えるか, 検討していきたい。

#### 文献

- 1) 吉澤孝和, 丸山昌義, 長尾勲, 村瀬孝三, 西澤茂高, 三澤敏雄, 根岸六郎 (1991): 空中写真測量による地すべり情報の提供とすべり面の解析-長野市広瀬地区に発生した地すべり地への応用-, 地すべり, Vol.27, No.4, pp9-17.

## 94. 衛星写真から読み解くメカニカルレイヤーの特徴に関する研究

### Investigation of feature of mechanical layer from satellite images

○作道 悠 (日本大学大学院), 朝比奈 大輔 (産業技術総合研究所), 遠藤 稜尚 (日本大学大学院), 細野 日向子 (日本大学大学院), 竹村 貴人 (日本大学)

Yu Tsukurimichi, Daisuke Asahina, Takahisa Endo, Hinako Hosono, Takato Takemura

#### 1. はじめに

近年, 火星等の地球外惑星の地形や地質内部構造に関する科学的知見は, リモートセンシング技術や現地探査機の機能向上によって増加している. 現在の火星の無人探査は, 資源開発のための有人探査を見据えたものであり, 将来的には土木構造物の建設も検討されている. しかし, 火星のような遠隔地の過酷な環境における地質構造を調べることは容易ではない. 例えば, 火星では重力異常の分布は得られているが, 地球で行われている地震波を利用した探査や, より直接的なボーリングコアによる観察は困難である.

そこで本研究では, 衛星写真や地表面を撮影した写真から地下の内部構造を読み解く手法について検討する. Soliva et al.<sup>1)</sup> による研究から, 断層間隔とメカニカルレイヤー(力学的物質特性が同一の層)の層厚がおおよそ線形になることが実測値として示されている. 本研究は, 層厚と断層間隔の力学的な関係性についてより詳しく調べるため, 引張応力場を模擬したアナログ物理実験と剛体ばねモデルによる数値解析を行い, その関係性について考察した.

#### 2. アナログ実験

図-1 にアナログ実験に用いた装置の概要を示す. 箱部は厚さ 10 mm のアクリル板でできており, 寸法は 300 mm × 500 mm × 高さ 250 mm である. アクリル箱底部にゴムシートを敷きその上に試料を充填した. 試料下部に敷いたゴムシートは, 一端を固定しもう一端をトルクモータに接続したローラーで巻き取る機構となっている. 本装置によって, 充填した試料に引張応力場を発生させ, 引張亀裂の発生過程を観察することが可能である. 試料には乾燥カオリンを使用した. 試料を空中落下法によってアクリル箱の中に充填した後, ゴムシートを巻き取り, 試料表面に生じた亀裂の様子を撮影した. なお, 試験時間は 5 分間, 最大静止トルクは 4.32 N・m で一定とした. 実験は試料の厚さを変えて行い, それぞれの厚さにおける平均亀裂間隔を測定した.

図-2 にアナログ実験の結果を示す. アナログ実験では, 試験開始から数秒後のゴムシートを一定量引っ張った段階で, 引張方向に対して垂直の亀裂が発生し始めた. 図-2(b)に示すように, ある程度亀裂が発生すると試験終了まで新たな亀裂の発生はほとんど見られず, 既にある亀裂が延長し連結する様子や開口幅が大きくなる様子がみられた. 層厚が増加すると亀裂間隔が増加する傾向が明瞭に確認できた.

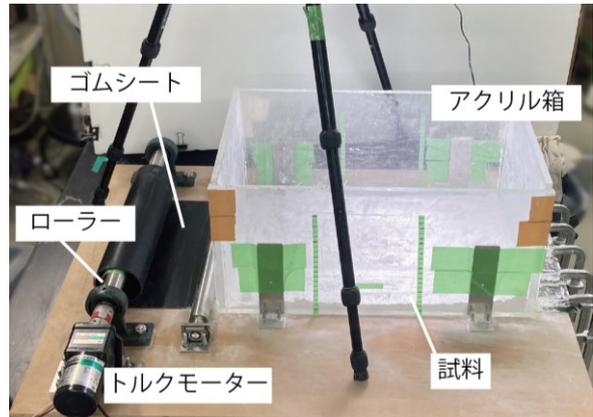


図-1 アナログ実験装置の写真

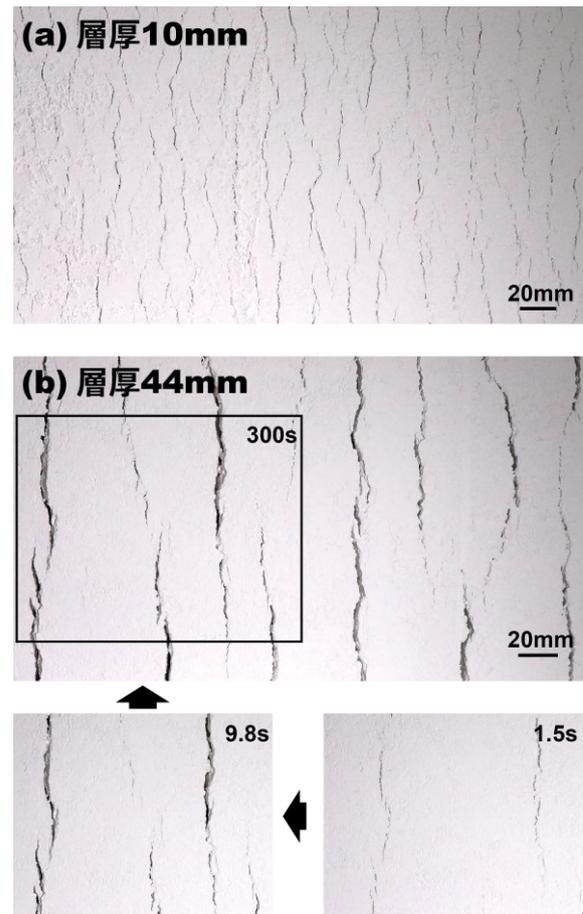


図-2 アナログ実験の結果: (a)層厚 10 mm, (b)層厚 44 mm. (b)には, 全体の写真に加えて, 時間の経過とともに亀裂が変化する様子を示す.

### 3. 剛体ばねモデルによる解析

不連続体モデルの一つである剛体ばねモデルを用いて、アナログ実験を再現し、試料の引張挙動と亀裂の進展に関する数値計算を行った(図-3)。アナログ実験で用いた試料と同様の大きさの領域を設定し、下層をゴムシート層、上層をカオリン層となるように材料特性を設定した。境界条件として、ゴムシート層の節点に変位を与え、その他は自由節点とした。本解析では、ゴムシート層端部に変位 30 mm を 30 ステップに分けて与え、各段階における力学的な平衡状態を計算した。ここで、設定した 30 mm はアナログ実験で計測されたゴムシートの最大変位量に等しい。カオリンのヤング率は 15.23 GPa<sup>2)</sup>、破壊強度は 0.06 MPa<sup>3)</sup>とし、ゴムシートは破壊しないように設定した。1つの層厚ごとに 10 ケースの解析モデルを作成し、亀裂間隔の平均値を計算した。

図-3 に、剛体ばねモデルによる解析結果の一例を示す。載荷初期に、ゴムシート層とカオリン層の境界で亀裂が発生し、その亀裂の幾つかが表面に進展し、マクロな亀裂に発達する様子が見られた。アナログ実験と同様に、載荷初期に発生した亀裂が連結・進展し、載荷後期には新たな亀裂の発生はほとんど見られなかった。剛体ばねモデルにおいても、層厚が増加すると亀裂間隔が増加した。

### 4. 結果と考察

図-4 に、アナログ実験および剛体ばねモデルで得られた層厚と亀裂間隔の関係の結果を示す。図には、Soliva et al.<sup>1)</sup>の近似線も併せて示す。実験と解析の両方で、層厚を厚く

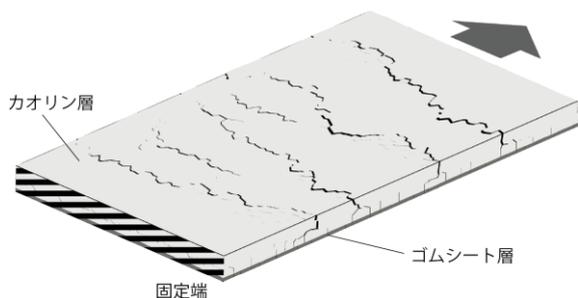


図-3 剛体ばねモデルによる数値解析結果の一例

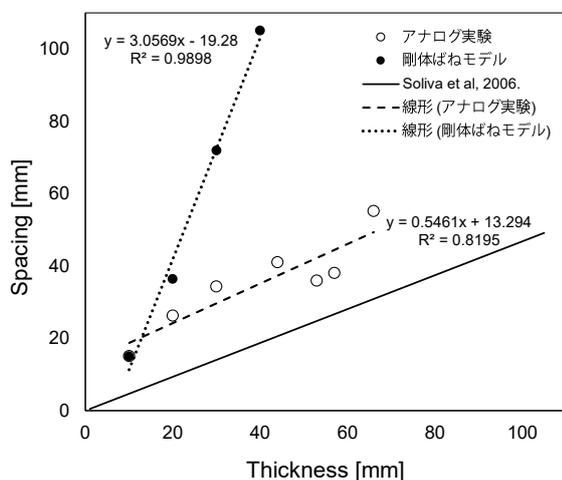


図-4 層厚と亀裂間隔の関係

すると亀裂間隔が広がる正の相関関係がみられた。実験結果では、載荷初期に亀裂が発生した後、新たな亀裂が発生することはほとんど無かった。解析においても、載荷初期に非常に多くの亀裂が発生したが、載荷後半はほとんど亀裂が発生していない。したがって、載荷初期の亀裂発生時における亀裂の間隔と、載荷後半における最終的な亀裂の間隔にほぼ変化がないことが分かった。

実験結果の線形近似は Soliva et al.<sup>1)</sup>と傾きが近い値となったが、切片が異なった。また、層厚 50 mm 以下の結果のみを用いると対数近似が線形よりよい近似となった。一方、解析結果は実験結果と比較して線形近似の傾きと切片が大きく異なり、解析は実験を十分再現できたとは言い難い。既往の研究から、引張亀裂においては、線形近似の傾きは Fracture Spacing Index(FSI)という一つの指標として用いられており、層厚と亀裂間隔の傾きはメカニカルレイヤーの物性に依存していると考えられる。また、横ずれ断層を対象とした研究<sup>4)</sup>では、層厚と断層間隔の関係には底面と試料(本研究では、ゴムシートとカオリン)の間の摩擦係数の影響があると報告している。一方、せん断破壊である断層を対象とした研究<sup>1)</sup>では、層厚と断層間隔の関係には物性の影響は少ないとしている。本研究においては、境界条件が異なると線形近似の傾きや切片が変わる結果が得られた。

### 5. まとめ

層厚と亀裂間隔の関係を調べるために、カオリンを用いたアナログ実験と剛体ばねモデルを用いた解析を行った。その結果、これらには正の相関関係が認められ、既往研究と一致した。しかし、近似直線の傾きや切片が変化している点で既往研究とは異なる結果を得た。断層や亀裂間隔からその内部構造を読み解くうえで、亀裂の間隔と形成メカニズムの関係の解明が課題である。今後は、物性値や破壊モードが層厚と亀裂間隔の関係に与える影響について検討する予定である。

### 文献

- 1) Soliva R, Benedicto A, Maerten L. (2006): Spacing and linkage of confined normal faults: Importance of mechanical thickness. *J Geophys Res Solid Earth*. Vol. 111, NO. 1, pp.1-17.
- 2) Vanorio T, Prasad M, Nur A. (2003): Elastic properties of dry clay mineral aggregates, suspensions and sandstones. *Geophys J Int*. Vol. 155, NO. 1, pp.319-26.
- 3) Pembele W, Gui Y, Stirling R. (2019): Laboratory tensile strength testing of clay soils using direct measurement. *7th Asia-Pacific Conf Unsaturated Soils, AP-UNSAT 2019*. pp.198-204.
- 4) Zuza A V., Yin A, Lin J, Sun M. (2017): Spacing and strength of active continental strike-slip faults. *Earth Planet Sci Lett*. Vol. 457, pp.49-62.

# 95. ドローンレーザ計測による落石が懸念される斜面の調査事例

## Rockfall slope survey case by drone laser measurement

○喜 里美(JR 東日本コンサルタンツ), 神谷 弘志, 佐藤 洋平, 秋山 保行(東日本旅客鉄道),  
今村 駿志(JR 東日本コンサルタンツ), 原 太一(中日本航空)  
Satomi Yoshi, Hiroshi Kamiya, Yohei Sato, Yasuyuki Akiyama, Takashi Imamura, Taichi Hara

### 1. はじめに

我々はこれまで、人手で実施してきた落石検査の効率化と精度向上のため、ドローンを活用した落石斜面検査手法の開発を進めている。これまで、人手では状態が把握できない大規模岩盤斜面の急崖部において、ドローンの可視画像撮影による検査を実施している。一方で、可視画像撮影では常緑樹植生下の地表面の確認が困難という課題があり、ドローンレーザ計測により取得される高密度な点群データを用いた落石検査手法を確立することを目指している。

本報告では、実際の落石検査斜面を対象に、二時期でドローンレーザ計測を実施し、落石検査に活用できるデータを取得するためのドローン飛行条件、計測データの活用方法についての検討を行った。

### 2. 調査の手順

ドローンレーザ計測による落石検査では、二時期のレーザ計測データの解析から、新たな転石の出現や、その移動の有無の把握を目指す。そのためには、対象となる 50cm 程度以上の転石の形状を把握する必要がある。必要となるレーザ点の密度について、下記のように考えた。1m 四方の平面の任意の位置に 50cm 四方の四角形（転石を模した物体）を置いた(図-1)。地表面にあたるレーザをイメージした点を、乱数により密度 25 点/m<sup>2</sup>、100 点/m<sup>2</sup> でプロットし、四角形内部に入った点の外周を転石の形状として直線で囲んだ。その結果、25 点/m<sup>2</sup> では形状が再現できていないが、100 点/m<sup>2</sup> では形状が数 cm の誤差で再現できている。これより、50cm 四方の転石の形状を把握するには、レーザの点密度が最低でも 100 点/m<sup>2</sup> 以上必要である。また、二時期のレーザ計測の際に、同一のレーザ計測機器を使用し、基準点で位置合わせを行うことで、数 cm 内の誤差で転石の移動を把握できると考えた。

レーザ計測において、レーザパルスは地表面以外にも樹木や建物等、様々なところで反射して戻る。地表面で反射して戻る点群（グラウンドデータ）の透過率は裸地や植生地で様々だが、ここでは樹木等の透過率を 10%程度と仮定し、反射して戻る全点群（オリジナルデータ）の点密度 1,000 点/m<sup>2</sup> 以上の取得を目標としてドローンの飛行条件を計画した。

鉄道路線沿線の落石検査斜面を対象に、試験計測を実施した(図-2)。当該斜面は、比高 300m、斜面勾配は 1

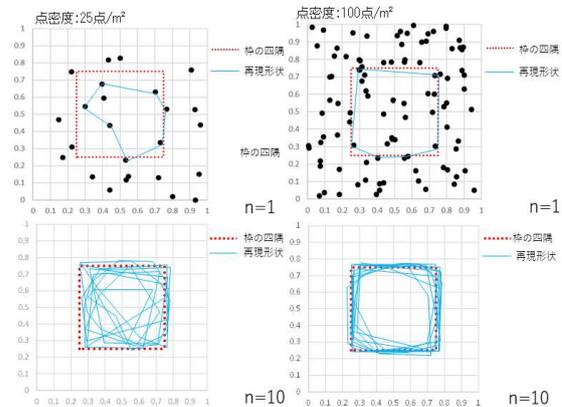


図-1 レーザ計測データの点密度の検討

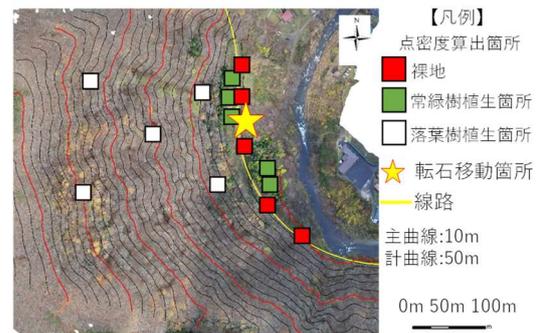


図-2 ドローン飛行試験箇所

表-1 飛行条件

試験箇所	落石検査斜面 (11月)	
機器等仕様	UAV	Freefly Systems社 ALTA X
	レーザスキャナ	発射回数50万発/秒、スキャン角330°、計測精度10mm
	計測コース	10本(格子状)、コース間隔40m
飛行条件	コース方向	クロスコース
	対地高度	100m
	飛行速度	18km/h(5m/s)

割程度であり、各所に露岩が見られる。斜面内には落葉樹が植生しているが、線路脇の斜面の立ち上がり部に常緑樹が植生する。飛行条件は表-1とした。計測は、4月と11月の落葉期に行った。

### 3. 結果

図-2に示す場所ごとの点密度と透過率を表-2に示す。オリジナルデータの点密度は概ね 1,000 点/m<sup>2</sup> 以上となった。グラウンドデータの点密度は、裸地、落葉樹植生箇所では概ね 100 点/m<sup>2</sup> 以上となったが、常緑樹植生箇所では 15 点/m<sup>2</sup> で透過率 1.1%となった。一方、斜面中腹に常緑樹が植生する別の計測範囲での常緑樹植生箇所の透過率は 14.8%であった。このことから、図-2の常緑樹植生箇所の透過率が低いのは植生位置が

線路脇であるということが影響していると推察される。

計測データから地表面付近の点群を抽出した下層モデル（以下、S-DEM）を作成し、そこから差分図、点群断面図を作成した。S-DEMとは、グラウンドデータから任意の高さに位置する点群を再抽出したものであり、地表面のほか転石などの情報を含んだ点群データである。差分図は、二時期のS-DEMグリッドデータの高さ方向の差分をとって表した平面図である。点群断面図は、S-DEMを任意の測線で断面に表した図である。作成した各種図から、転石、崩壊地等の計測データについて考察を行った。

表-2 場所ごとの点密度と透過率

場所	平均点密度 (点/m <sup>2</sup> )		透過率 (%)
	オリジナル	グラウンド	
裸地	1,076	1,076	100
落葉樹植生箇所	3,721	1,072	28.8
常緑樹植生箇所	1,280	15	1.1

※オリジナルの点密度の差は飛行コースの影響と考えている。

#### 4. 考察

##### ① 転石のある箇所

落石止擁壁裏側の転石（約50×40cm）の現地写真、S-DEM、点群断面図を図-3に示す。転石が再現できていることが分かる。

##### ② 転石移動箇所

二時期目の計測前に転石（約50×20cm）の移動を行った。図-4に現地写真、差分図、点群断面図を示す。差分図では、移動前の転石位置が青色（約-20cm）に、移動後の位置が赤色（約+20cm）に表示されており、転石の移動が確認できる。また、点群断面図で一時期目から二時期目の点群隆起部の移動が確認できる。

##### ③ 崩壊地

図-5に崩壊地内の土砂移動の現地写真、差分図、点群断面図を示す。差分図では、崩壊地中腹に青色、崩壊地下部に赤色が表示されている。点群断面図では、高さ4mの位置から5m<sup>2</sup>程度の土砂が下方に移動していることが確認できる。現地で確認したところ、崩壊地の縁部から土砂移動が発生していた。

#### 5. まとめ

今回設定した飛行条件では、裸地、落葉樹植生箇所において、オリジナルデータ点密度1,000点/m<sup>2</sup>以上を取得することができ、転石の位置と移動等を捉えることができた。一方、一部の常緑樹植生箇所においては、グラウンドデータの点密度の透過率が極端に減衰し、落石検査に必要な点密度を取得することが難しい結果となった。今後、点密度の取得に影響が大きい常緑樹の植生条件を検証するとともに、飛行高度を低くするなどの飛行条件の工夫や、地上レーザ計測等の活用を検討する必要がある。

ドローンを活用した落石検査について、可視画像撮

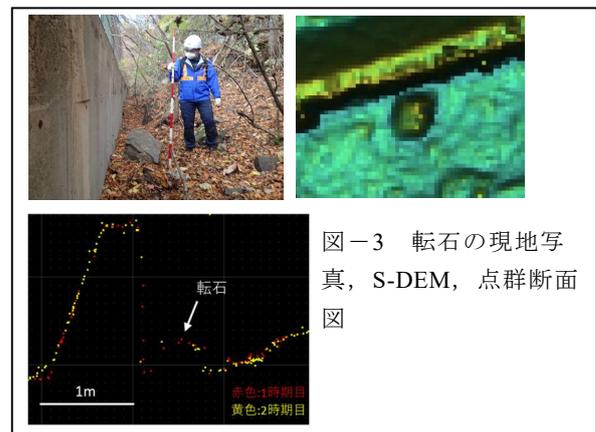


図-3 転石の現地写真、S-DEM、点群断面図

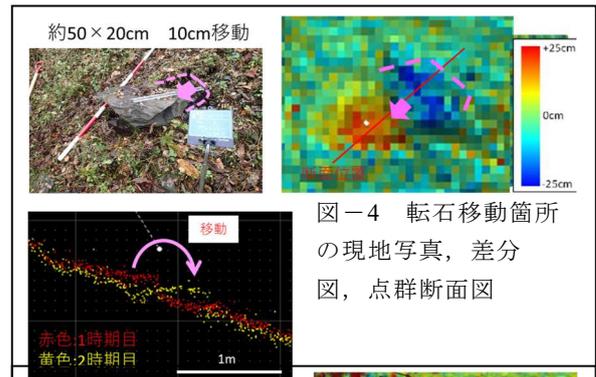


図-4 転石移動箇所の現地写真、差分図、点群断面図

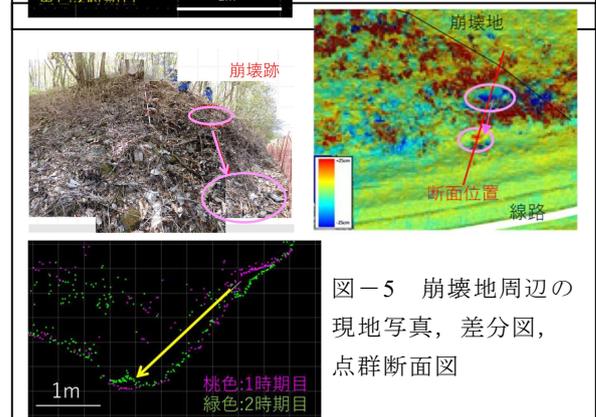


図-5 崩壊地周辺の現地写真、差分図、点群断面図

影と合わせて下記の活用方法を検討している。

- ① 大規模な岩盤斜面において、その後の措置についての確かな判断を下すことを目的に専門技術者が詳細に状態の検査を行う「個別検査」
- ② 落石が懸念される斜面において、斜面全体にわたり経年変化や環境変化を検査する「特別全般検査」  
特に②については、今回レーザ計測結果（S-DEM、差分図、点群断面図等）を用いることで、斜面全体にわたり転石の位置や移動、土砂移動等を捉えることができたため、落石検査の効率化、精度向上につながると期待している。

#### 文献

- 1) 千田良道, 高野正範 (2013): 転石・岩盤斜面調査を目的とした航空レーザ測定の課題改善, 日本写真測量学会学術講演会発表論文集, pp.85-88.

# 97. 土木材料を用いた伝統的たたき工法の力学的特性に関する研究

Research on Mechanical Characteristics of Plastering Technique Tataki Using Soil Materials

○竹内幸輝, 藤井幸泰 (名城大学)  
TAKEUCHI Koki, FUJII Yukiyasu

## 1. はじめに

近年、環境問題が注目されており、応用地質分野においても環境面に配慮した材料性能を考慮することが重要である。そこで本論では、環境に優しい地盤材料として「たたき」に着目した。たたきとは、母材となる土に消石灰を混ぜ、固化剤として  $MgCl_2$  を主成分とするにがりを添加し、木槌等で叩き固めたものである。伝統的な左官工法の一つであり、土間や塀等の小規模構造物に用いられた。また、たたきの技術を応用した土木工法として人造石工法があり、鉄筋コンクリートが普及する以前の土木材料として日本の産業近代化に大きく貢献したり。

たたきの施工は、大正期末頃まで盛んに行われていたが、国産セメントの入手が可能になったことや人件費の高騰から徐々に使用頻度が低くなった。また、当時の左官職人の経験や技量に依存していたため、作成方法や材料の配合割合についての記録があまり残っておらず、地盤材料としての性能について十分に解明されていない。本論では、粒径の異なる2種類の母材を用いてたたきを疑似的に作成し、添加する消石灰の量やにがり濃度の違いによるたたきの力学的特性に及ぼす影響について室内実験により考察した。

## 2. 使用材料の特性

たたきの母材として、花崗岩が風化したまさ土や砂利(死に石)の混ざった粘土質の土質材料が使用されていたとされる<sup>2)</sup>。まさ土は母岩の性質や風化過程等の影響により、同一採取場所であっても性質が異なるケースがあり、実験条件を同じにするのが困難である。そこで本論では、比較的入手可能が容易である三河珪砂等を配合した土質材料(以下、人工まさ土と称す)を作成し、実験に使用した。配合表を表-1に示す。人工まさ土は日本各地でみられるまさ土の平均<sup>3)</sup>とした(図-1)。比較対象として京都府伏見稲荷地域で採

表-1 人工まさ土の配合表

材料	配合割合 (%)
切込砕石 <sup>※)</sup>	13.07
三河珪砂4号	33.07
三河珪砂6号	27.93
三河珪砂8号	16.71
DLクレー	9.23

※) 粒度調整し、4.75 mm, 2 mmのみ使用した。

取される第四紀更新世の深草砂利を使用した。こちらは市販で購入可能であり、あらかじめ粒径 15 mm で粒度調整が行われている。地盤工学会に規定されている JIS A 1210 に基づき土質材料の締固め試験を行った結果、どちらもおよそ最適含水比 10%であると示された(図-2)。

消石灰は、土中窯で石炭と岩塩を混ぜて焼くことで生成される塩焼き消石灰を使用した。にがりには粗製塩化海水塩化マグネシウムが主成分である甘塩を蒸留水に所定量溶解させることで人工的ににがり水溶液を作成し、濃度を変化させて実験に使用した。

## 3. 供試体の配合及び作成方法

自然乾燥させた土質材料に消石灰とにがり水溶液を表-2に示す配合により添加し、たたきを疑似的に作

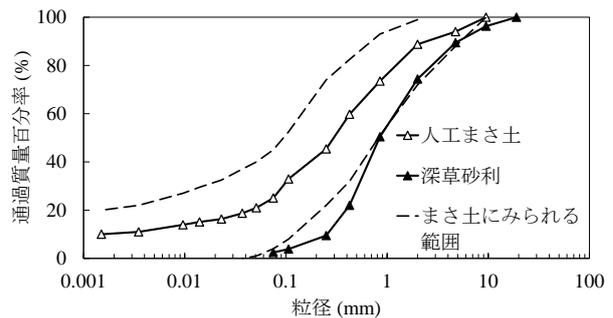


図-1 土質材料の粒度分布<sup>3)</sup>

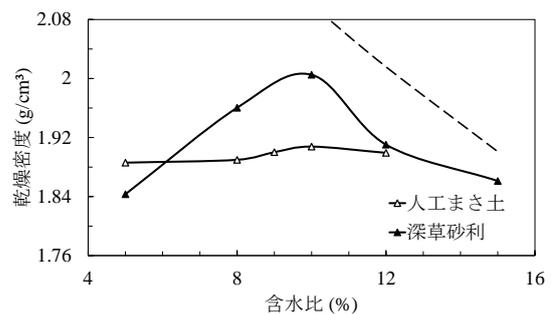


図-2 土質材料の締固め曲線

表-2 供試体作成の配合表

人工まさ土	深草砂利	消石灰:土質材料 (重量比)	濃度
A8-M0	F8-M0	1:8	0%
A8-M3	F8-M3		3%
A8-M10	F8-M10		10%
A10-M0	F10-M0	1:10	0%
A10-M3	F10-M3		3%
A10-M10	F10-M10		10%
A15-M0	F15-M0	1:15	0%
A15-M3	F15-M3		3%
A15-M10	F15-M10		10%

成した。はじめに土質材料と消石灰を混ぜ、均一状態になった後、にがり水溶液を加え再び均一になるまで手動（所要時間：約 15 分）で混ぜ合わせた。加える水は最適含水比である 10%とした。供試体はφ50 mm×100 mm で、締固めエネルギー550kJ/m<sup>3</sup>に合わせるため、2.5 kg ランマーを 30 cm 自由落下させ 1 層目 6 回、2 層目 7 回、3 層目 8 回の計 21 回の動的締固めにて作成を行った。養生は 7 日及び 28 日とし、実験室にて保管を行った。

#### 4. たたきの一軸圧縮試験結果

図-3～5に一軸圧縮試験結果を示す。なお、試験機の最大荷重が 5 kN であり、グラフ上で×と示している部分は、供試体が破壊不可能であった。

##### 4.1 土質材料による強度への影響

塩分濃度 0%の場合に着目すると、人工まさ土を用いて実験を行った結果、添加する消石灰の量が多い（配合比 1:8 や 1:10）ほど一軸圧縮強度が増加し、添加量によって強度変化に大きな違いがある。一方、深草砂利を用いた場合、添加する消石灰の量に関わらずほぼ同等の値となり、添加量による強度への影響は低いと考えられる。消石灰の添加による土の強度発現として、イオン交換反応による短期的反応とポゾラン反応による中長期的反応にわけられる<sup>4)</sup>。養生 28 日では、短期的反応であるイオン交換反応による硬化が生じていると考えられる。この反応は、消石灰が土中水に溶解し、Ca<sup>+</sup>イオンが土粒子表面に付着している H<sup>+</sup>、Na<sup>+</sup>イオン等とイオン交換することで土粒子表面の帯電状態が変化し、団粒化することで硬化が生じる<sup>4)</sup>。細粒分（粘土分）ほど粘土鉱物含有率が高く、H<sup>+</sup>、Na<sup>+</sup>イオン等も多く含まれる。図-1の粒度分布より深草砂利は 0.075 mm 以下の粘土分をほとんど含まないため、イオン交換反応に必要な粘土鉱物があまりなく、消石灰による硬化の影響が低いと考えられる。

##### 4.2 にがり濃度の変化による強度への影響

人工まさ土を用いた場合、養生 7 日では、配合比 1:8、1:15 では、にがり濃度 3%で最も強度が増加したが、養生による強度増加は濃度 10%が最も大きく養生 28 日では濃度 3%とほぼ同等の強度が得られた。一方、深草砂利を用いた場合では、養生日数にかかわらず、にがり濃度 10%で最も強度が増加した。また、養生 28 日で供試体が壊れなかったため実際の強度はグラフに示す値以上と仮定すると、養生による強度発現も大きいと考えられる。これより、にがり濃度を高くすることで養生による強度増加が大きくなり、さらに養生日数を延ばすことでより強固になると予測できる。

#### 5. おわりに

本論では、添加する消石灰の量やにがり濃度によってたたきの強度に及ぼす影響について実験を行った。

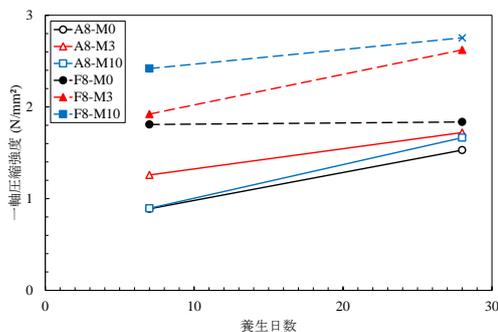


図-3 一軸圧縮試験結果（配合比 1:8）

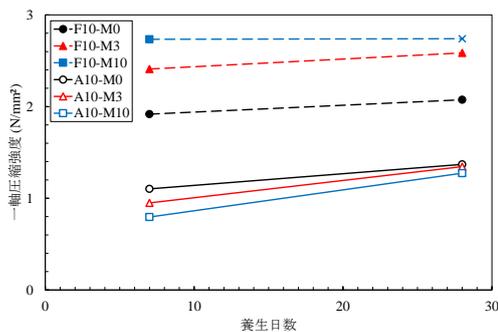


図-4 一軸圧縮試験結果（配合比 1:10）

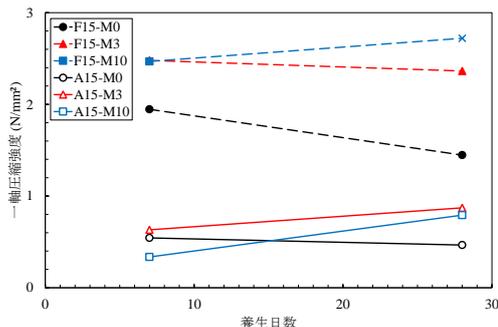


図-5 一軸圧縮試験結果（配合比 1:15）

その結果、細粒分を多く含む人工まさ土では、添加する消石灰の量を多くすることで強度が増加したが、細粒分をほとんど含まない深草砂利では、添加する消石灰の量による強度増加が低いことがわかった。また、にがり濃度を高くすることでたたきの強度が増加し、さらに養生日数を延ばすことで強固になると予測できる。にがり濃度による硬化反応のメカニズムについては不明な点が多いため今後検討する所存である。

#### 文献

- 1) 石田正治（1991）：人造石工法（たたき）の遺産の調査とその保存，土木史研究，第 11 号，pp. 309-318.
- 2) 藤田洋三（2005）：石灰の残した土木遺産，漆喰と石灰，LIME・石灰，日本石灰協会，pp.33-38.
- 3) 末岡徹（1990）：地盤工学の立場からみた風化残積土に関する研究，京都大学学術情報リポジトリ，pp. 101-104.
- 4) 日本石灰協会（2016）：石灰による地盤改良マニュアル第 7 報，pp.1-40.

# 98. 加熱冷却による粘板岩中の人工亀裂の発生と

## 弾性波速度測定による異方性の検討

Evaluation of Anisotropy of Slate with Heating and Cooling Cracks by Elastic Wave Velocity

○細野日向子, 竹村貴人, 加藤直子 (日本大学大学院)  
Hinako Hosono, Takato Takemura, Naoko Kato

### 1. はじめに

日本列島を構成する岩石は広域応力や付加の影響により潜在的なダメージを受け、構造異方性を持つ。中でも堆積岩の構造は堆積時の水平面を記録した層理と、その後の広域応力などによる鉱物の再配列を記録した劈開・片理によって決定する<sup>1)</sup>。構造異方性のうち力学・水理学的特性に大きな影響を与えるのは岩石中の亀裂である。そのため亀裂は、放射性廃棄物の地層処分の安定性や地熱発電の熱水移動の評価<sup>2)</sup>をする上で重要である。そこで、堆積岩採石時の異方性と加熱冷却により形成される亀裂の異方性について、亀裂幅や弾性波速度の測定を行ったため、報告する。

### 2. 調査地

本研究は、宮城県の北東部に位置する粘板岩を対象とした。宮城県の石巻市には三疊系海成層の稲井層群伊里前層が採石される<sup>3)</sup>(図-1)。稲井石(別名井内石, 仙台石)と呼ばれる砂質の粘板岩は、層理面による石目が美しく、硬度が高いにも関わらずたわみやすく折れにくい。さらに、面的に割れやすい粘板岩の性質から、石碑として広く利用されている<sup>4)</sup>。本研究では特に、図-1で採石した稲井石を用いた。

同じく石巻北側の雄勝地域では、二疊系の登米層などが雄勝石と呼ばれている。雄勝石は稲井石に比べて泥質で硬度が低い。またスレート劈開が強く発達しており、硯の材料など工芸品として利用されている。

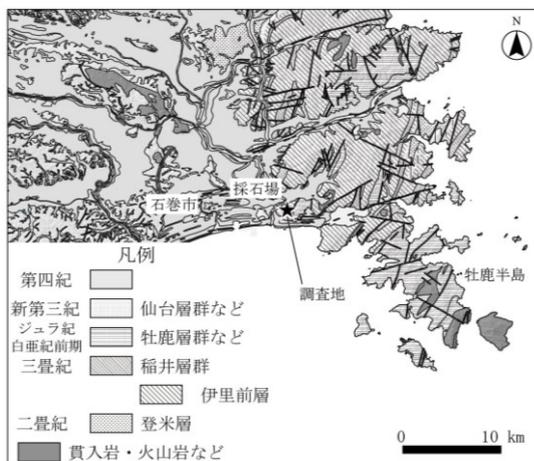


図-1 調査地

QGISで作成した宮城県石巻市の地質図(産総研: シームレス地質図, 地理院地図: 陰影起伏図)。野外調査は★印の採石場で行った。

### 3. 調査手順

#### 3.1. 野外調査

石巻市内の採石場で野外調査を行った。採石場では、層理面とは異なる、目なり、横、小口という3つの違いに直交する面を基準に石を切っている。3.2.以降に定方位で各種測定を行うために、3面をそれぞれ $M(x) \cdot Y(y) \cdot K(z)$ 面とした。

#### 3.2. 岩石試料

初めに、稲井石を $M(x) \cdot Y(y) \cdot K(z)$ 面を3面とする一辺 $35(\pm 0.1)$  mmの立方体に成形した。その次に、電気炉にて試料の加熱を行ったのち、室温の水で急冷して亀裂を形成した。亀裂密度を変化させるため、温度は表-1に示す通り、インタクト試料1試料と、200-800°Cまで100°Cずつの7段階、計8条件とした。加熱時間は、全条件下で試料の中心まで温度一定になるよう、熱伝導度の非定常計算を行った上で30分とした。また加熱前と加熱冷却終了後の岩石試料の長さを測定し、歪を計測した。

#### 3.3. 弾性波速度の測定

各面の法線方向を軸とする $M(x) \cdot Y(y) \cdot K(z)$ 軸のそれぞれの方向で弾性波速度の測定を行なった。図-2に示すように、発振側にS波素子(応用地質)、受振側に三軸振動計(NP-3572, 小野測器)を設置し、図中 $x \cdot y$ 軸の矢印をS波、 $z$ 軸の矢印をP波の到達時刻とした。本稿では、このうちP波を使うこととする。測定は乾燥・飽和状態の2条件で、全て大気圧下で行った。波の到達時間を読み取りやすくするため、S波素子を医療用のゲルで、振動計をロウで設置させたほか、センサンプ(PS-1300, 小野測器)を使用し、測定方向上側に約2.5 kgの重りを載せて測定した。

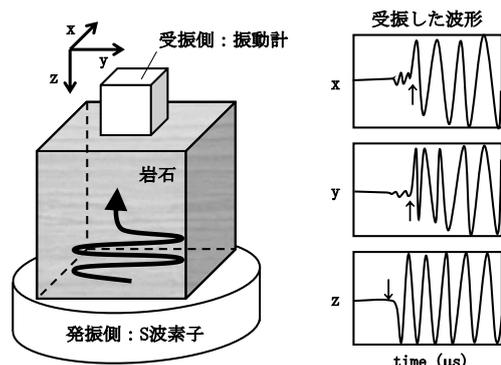


図-2 弾性波速度の測定方法

## 4. 結果

### 4. 1. 野外調査

図-1 の採石場で野外調査を行った。採石場では稲井石の目なりが最も割れやすく、横、小口の順に割れにくくなるという稲井石の性質を活かして岩石の切り出しを行っていた。

### 4. 2. 間隙率と歪

加熱前後の岩石の間隙率、及び体積歪を表-1 に示す。加熱する前、稲井石の間隙率は平均で 0.56 %と、すべて 1 %未満であった。加熱温度が 200–300 °C の時、間隙率、体積歪ともに大きな変化は見られなかった。加熱温度が 400 °C になると、間隙率が 0.53 %から 0.59 %とわずかに上昇し、体積歪が増加して 5718  $\mu\epsilon$  となった。加熱温度が 500 °C を超えると、間隙率は 1 %を上回り、加熱温度 800 °C まで増加傾向にある。また、700 °C では、加熱終了時に試料が M(x) 面で割れてしまったため、間隙率、体積歪ともに実際より大きく測定されている可能性がある。

加熱時の温度と歪の関係を図-3 に示す。3 方向のうち、M(x) 軸、Y(y) 軸、K(z) 軸の順に歪が小さくなった。歪は、測定方向の亀裂の幅の総量を意味するため、M(x) 軸に垂直な方向の亀裂が多くできたことがわかる。

### 4. 3. 弾性波速度の測定

加熱前（乾燥・飽和）、加熱後（乾燥・飽和）の 4 条件において、弾性波速度を測定した。加速度計の z 方向の振動から読み取った P 波速度と歪の関係を図-4 に示す。歪量が増加すると、乾燥・飽和状態ともに P 波速度の減少が見られた。飽和状態では比較的緩やかな減少であるのに対して、乾燥状態は大きく減少した。特に歪量が 10000  $\mu\epsilon$  を超えると、乾燥状態の P 波速度は約 1 km/sec と加熱前の 4 分の 1 程度まで減少した。

## 5. 考察

加熱温度と 3 方向の歪の関係から、M(x) 軸に垂直な亀裂がもっとも多くできたとと言える。これは、目なり、横、小口の順に割れやすいという採石場で見られる稲井石の特徴と整合的である。

4. 1. で得られた結果から、400 °C の加熱冷却によって亀裂の形成が開始したと考えられる。しかし、間隙率の変化は 0.06 %と小さいことから、亀裂の連結度が低い可能性がある。鏡下での観察や、透水試験を行って孤立したマイクロクラックの存在を確かめる必要がある。500 °C 以降から大きく間隙率が増加していることから、亀裂の連結は 500 °C 以上の条件下で開始すると考えられる。

## 6. まとめ

本研究では、稲井石の加熱冷却による亀裂の発生と歪と弾性波速度の関係について調べた。今後は熱膨張率や鏡下観察を行い、亀裂の形成要因についても検討していきたい。

表-1 稲井石の加熱温度と加熱前後の物性値

試料名	加熱温度 (°C)	加熱前		加熱後	
		間隙率 (%)	間隙率 (%)	体積歪 ( $\mu\epsilon$ )	
INS_001	intact	0.56	—	—	
INS_002	200	0.54	0.31	0	
INS_003	300	0.59	0.42	0	
INS_004	400	0.53	0.59	5718	
INS_005	500	0.60	1.15	7135	
INS_006	600	0.57	0.76	7137	
INS_007	700	0.44	2.94	19980	
INS_008	800	0.47	2.66	29951	

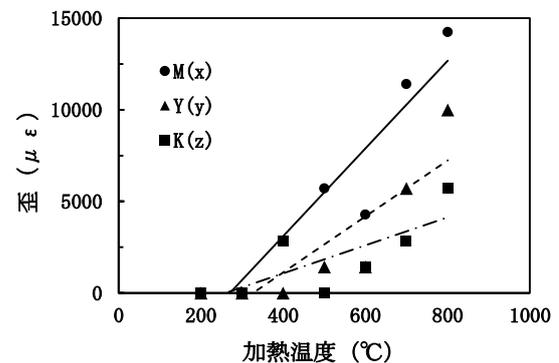


図-3 加熱温度と歪の関係と近似線

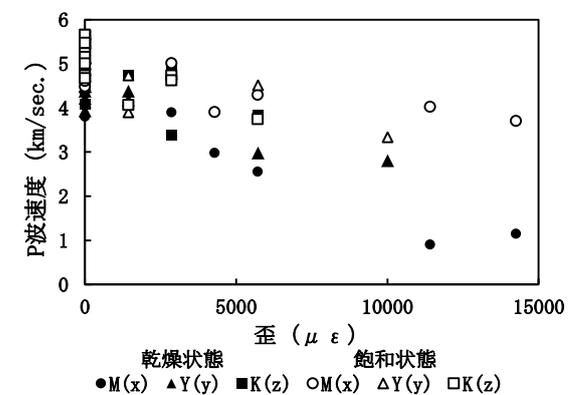


図-4 歪と弾性波速度の関係

謝辞: 本研究の調査にあたり石巻市内のアベタ石材(株)にご協力いただきました。厚く御礼申し上げます。

## 文献

- 1) 石井和彦(1985):地質学雑誌, Vol.91, No.5, pp.309-321.
- 2) 花野峰行・梶竜哉・館野正之・加藤修(1994):地下水学会誌, Vol.36, No.2, pp.133-146.
- 3) 滝沢文教・柳沢幸夫・久保和也・鎌田耕太郎・駒澤正夫・石原丈実・広島俊男・中塚正(1992):地質調査所. 20万分の1地質図幅.
- 4) 高橋直樹・赤司卓也(2016):号外地球, No.66, pp.91-102.

# 99. 分布型光ファイバ計測技術によるダム基礎グラウチングの評価

Evaluation on dam foundation grouting using distributed fiber optic sensing technology

○升元 一彦, 野中 隼人, 黒川 紗季, 宮嶋 保幸, 奈須野恭伸, 小林 弘明 (鹿島建設)

Kazuhiko Masumoto, Hayato Nonaka, Saki Kurokawa, Yasuyuki Miyajima, Tadanobu Nasuno, Hiroaki Kobayashi

## 1. はじめに

近年、ダムの基礎処理工に従事する技能者の数が減少しており、施工の合理化が求められている。ダムの基礎処理工は、一般的に「グラウチング技術指針・同解説<sup>1)</sup>」に基づき、標準的な注入仕様や孔配置が設定されている。一方、注入圧や注入材などの仕様を変更し1孔当たりの注入効果を高めることができれば、追加孔数を抑制することや規定孔間隔を広くすることで、施工数量の縮減や工程短縮に繋げることが期待できる。

上記の実現には、施工中の基礎岩盤内部の水理地質状況を把握し、注入仕様に応じた改良効果の評価が必要である。しかし、岩盤内部には多数の割れ目が不均質に存在し、セメントミルク（注入材）はそれらを複雑に経路するため、既存の点型計測機器による計測手法では注入状況を正確に把握することは困難であった。

そこで、筆者らは光ファイバに沿って高密度にデータを取得できる分布型光ファイバ計測技術に着目した。本技術では岩盤内部の状況を線上に計測できるため、不均質に分布する割れ目に沿ったセメントミルクの到達を評価できることが期待される。

本報では、光ファイバを用いて注入効果の高い仕様を評価する方法を開発することを目指して、特にグラウチング時の岩盤内部の温度変化を光ファイバ計測で捉えることによる、セメントミルクの空間的な注入状況評価の可能性について検討した結果を報告する。

## 2. 試験概要

秋田県雄勝郡東成瀬村で建設中の成瀬ダムにおける、補助カーテングラウチングの一部を対象に試験施工を行った。試験施工では、図-1に示す様に平面的に3つのエリアに分割し、それぞれ異なる注入仕様で施工を行った。表-1に各エリアの主な注入仕様を示す。また、補助カーテングラウチングは地表部の約5mが改良区間であるため、長さ約12mの光ファイバ観測孔を合計8箇所（M1～M8）に設置した。

本検討では、注入時の微小な挙動を捉える必要があるため、高精度で高密度にデータを取得することが可能なレイリー散乱光に基づく計測器を採用し、光ファイバに沿って50mm間隔で約1分間に1回の頻度で連続計測を行った。また、注入効果を注入水やセメントミルクの到達による温度変化により評価するために、注入水及び練り混ぜ水を事前に約25℃まで加温した上で注入を行った。図-2に試験の概要図を示す。

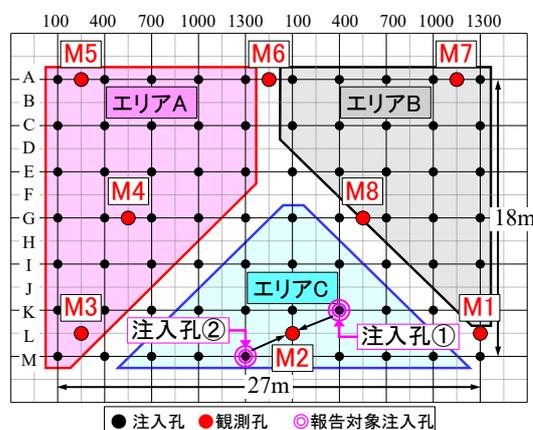


図-1 試験施工エリアのレイアウト（平面図）

表-1 各エリアの注入仕様

エリア	注入材料	規定圧力 [MPa]
A	高炉セメント B 種	0.5
B	超微粒子セメント	0.3
C	超微粒子セメント	0.5

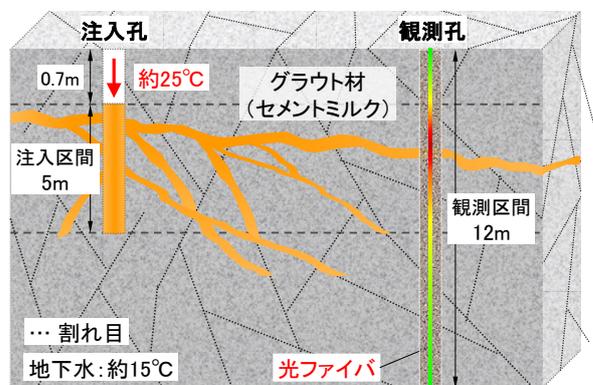


図-2 試験概要図

## 3. 光ファイバ計測によるセメントミルクの検知

例として観測孔 M2 における計測結果を示す。図-3の左図は、注入孔①の施工時に各時刻で取得した温度の深度分布図である。注入区間深度（0.7～5.7m）を中心に反応が見られるが、一様ではなく、特に 3.0m, 3.5m, 4.2m 付近で、局所的に温度上昇していることが見て取れる。また、該当深度近傍の孔壁展開画像（図-3、右図）において、対応する深度に約 1mm の開口割れ目が確認されたことから、注入により開口割れ目を通過したセメントミルクを検知したと考えられる。

図-4 は注入孔②での計測結果を示している。注入

孔①で大きく反応した深度（2.5~4.5m 付近）での応答は比較的小さい一方で、5.5m, 6.0m 付近で特に大きな温度上昇を示した。これは、各注入孔で観測孔 M2 に連続する主要な水みちが異なっていることを示唆している。また、該当深度の孔壁展開画像では明瞭な開口割れ目は見られず、一般的に透水性への寄与が小さい密着割れ目や鉱物脈が分布している。このように、深度方向に連続して計測することで、開口割れ目を確認されない位置でのセメントミルクの到達を見落としなく検知出来ることを確認した。

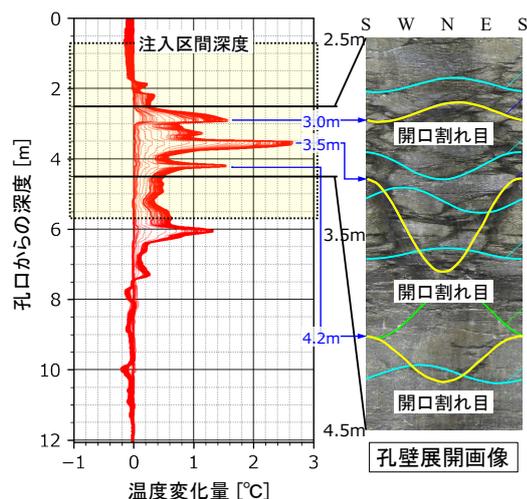


図-3 注入孔①での M2 孔の温度の深度分布(左) 及び 2.5m~4.5m の孔壁展開画像(右)

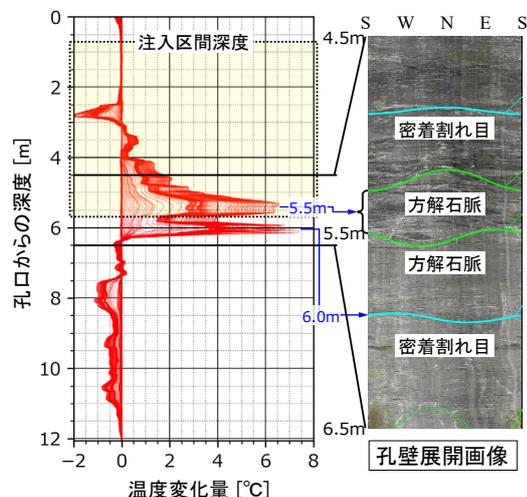


図-4 注入孔②での M2 孔の温度の深度分布(左) 及び 4.5m~6.5m の孔壁展開画像(右)

#### 4. 温度応答による注入効果の評価

観測孔での温度変化からセメントミルクの到達検知が可能であることを活用し、空間的なセメントミルクの注入状況の評価した。具体的には、注入孔と各観測孔 (M1~M8) の離隔距離に対する注入開始直前からの温度上昇量 (最大値) を整理した。図-5 は、全 66 孔の注入孔について上記の整理を行い、エリアごとにプロットしたものである。不均質な岩盤性状の影響を

受けるためばらつきが大きいものの、全体として注入孔との距離が近くなるに伴い温度上昇量が大きくなる傾向が確認された。特に、セメントミルクに超微粒子セメントを使用したエリア B とエリア C では、離隔が 3m 以上離れた場合でも、明瞭に温度上昇したケースが多数見られる (図 5 網掛け範囲)。

均質場での注入時の周辺応答は注入孔からの距離の対数に比例する。そのため、セメントミルクの到達の判断となる閾値の温度上昇量を設定できれば、対数近似式から逆算することでセメントミルクの平均的な到達距離を評価できる。閾値を 1°C と仮定した場合、平均到達距離はそれぞれエリア A : 1.7m, エリア B : 5.0m, エリア C : 6.3m と算定された。この結果から、高炉セメントを使用したエリア A に比べて、超微粒子セメントを使用したエリア B とエリア C の方が、注入効果が高いことが示された。到達距離を評価する閾値については実績を蓄積して妥当な設定方法を検討する必要があるが、光ファイバを用いた温度計測により効果的な注入仕様を評価できることを示した。

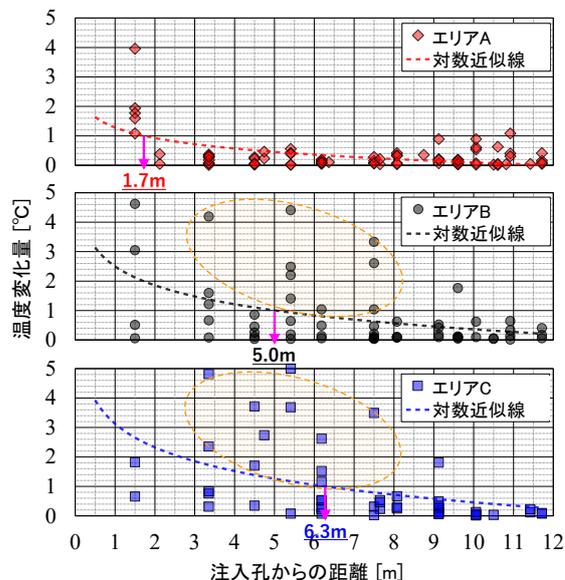


図-5 注入孔と観測孔の距離に対する温度変化量

#### 5. まとめ

高密度、高精度で線上にデータ取得が可能な光ファイバを用いて、グラウチング時に岩盤内部に生じる温度変化を連続計測することで、セメントミルクの到達を検知できることを確認した。また、注入孔と観測孔の距離が異なる条件で計測した温度上昇量を整理することで、注入効果の違いを評価できることを示した。

今後は、施工数量の多い主カーテンなどを対象に適用範囲を広げていき、効果の高い注入仕様での注入による合理的な施工に貢献していく所存である。

#### 文献

- 1) 国土技術研究センター：グラウチング技術指針・同解説，2003。

# 100. 三軸圧縮応力下における岩石試料の可視化計測システムの開発

Development of a visual measurement system for geomaterials under triaxial compression stress

○遠藤稜尚（日本大学大学院），朝比奈大輔（産業技術総合研究所），竹村貴人（日本大学），作道悠（日本大学大学院）  
Takahisa Endo, Daisuke Asahina, Takato Takemura, Yu Tsukurimichi

## 1. はじめに

地下空間の掘削や地下資源の採取によって断層周辺の応力場が変化すると、近傍の断層が再活動することがある。断層再活動のメカニズムを理解するためには、断層面の固着域とされているアスペリティのすべり及び変形の過程を観察することが重要である。アスペリティの力学的挙動を理解することを目的に、これまで様々な三軸圧縮試験が行われてきた。三軸圧縮試験装置は軸方向の差応力の载荷に加えて、全方向の封圧を加えることで地下の応力状態を再現することができる特徴があり、岩石試料の力学的性質を評価するために利用されている。しかし、岩石の三軸圧縮試験に用いる圧力容器は金属製であるため、内部の岩石の様子を観察することはできない。

本研究では、実験中の圧力容器内の岩石試料の挙動を直接観察することができる可視化計測システムを開発した。岩石試料には、あらかじめすべり面とアスペリティを想定した凹凸を作成し、封圧の違いによる力学的挙動の変化を観察した。実験中に撮影した岩石試料の画像から、デジタル画像相関法（DIC）を用いて変位分布の変化の過程を測定することに成功した。

## 2. 実験方法

### 2-1. 可視化計測システム

図-1 に、耐圧ハウジングにカメラを内蔵した可視化計測システムを示す。耐圧ハウジングは SUS304 で作成し、6 MPa の封圧に耐えられるように設計した。カメラは市販のデジタルカメラを用いた。耐圧ハウジングの蓋部は撮影用窓が開いており、ポリカーボネートで覆った（図-2）。本計測システムは、主に以下の三つの利点がある。第一に、本計測システムは圧力容器の内部から、実験中の試料の挙動を直接観察できる。第二に、本計測システムは数万円で作成することができ安価である。そして第三に、本計測システムは既存の三軸装置を改造することなく設置することが可能であり、三軸試験装置とは独立した制御系であるため安全に使用できる。

### 2-2. 実験試料と実験装置

実験試料には、模擬岩石試料として石膏の円柱試料（直径 30 mm，高さ 60 mm）を用いた。試料は軸方向から 30° の角度でプレカットされ、その面上には高さ 2 mm，底辺 10 mm の三角形の凹凸を作成した（以下、三

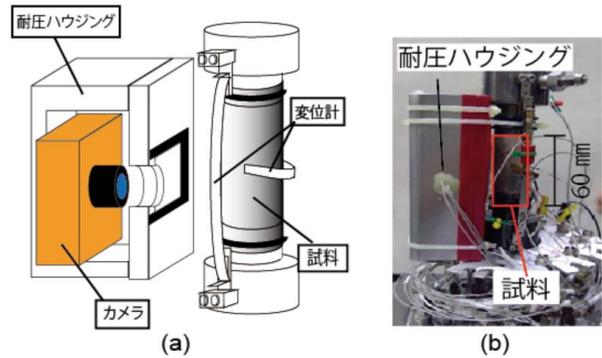


図-1 (a) 計測システム概略図 (b) 計測システム（カメラ内蔵の耐圧ハウジング）を三軸試験用の台座に設置した様子

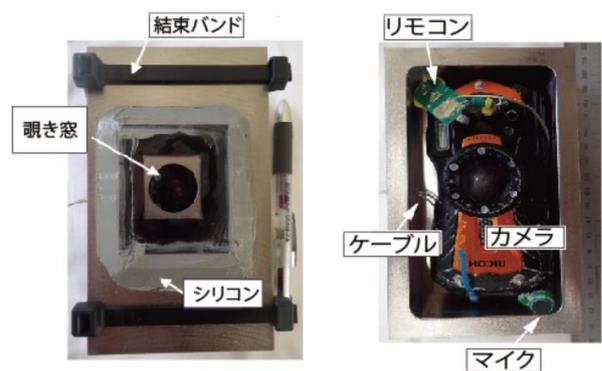


図-2 ハウジング内に設置されたカメラの様子

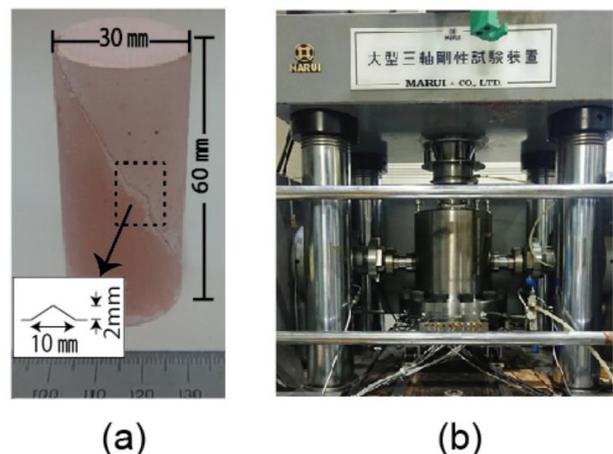


図-3 (a) プレカット石膏試料 (b) 三軸試験機

角形アスペリティと呼ぶ)。(図-3a)。

実験には産業技術総合研究所が所有する三軸試験装置を用いた(図-3b)。試料は透明な熱収縮チューブで被覆し、圧力容器内で封圧を加えた後、0.04 mm/minの速度で軸方向への载荷を行った。可視化計測システムを圧力容器内に設置し、実験時の試料の観察を行った。

### 2-3. デジタル画像相関法 (DIC)

DICは、対象物表面のランダムな斑点模様(スペckルパターン)を追跡することで、対象物表面の変位やひずみの変化を計測することができる手法である。本研究では、Blaber et al (2015)のMatlab用ソフトNcorrを用いて解析を行った。試料表面にアクリルスプレーを塗布することでスペckルパターンを作成した。

## 3. 実験結果

図-4に、異なる封圧下(1 MPa, 6 MPa)における2つの試料の差応力と横方向変位の時間変化を示す。封圧の増加に伴いピーク応力及び残留応力が明確になり、すべり挙動に対する封圧の影響が確認できた。図-5に、2つの試料の三角形アスペリティ周辺の様子(2000s経過時)を示す。三角形アスペリティのすべりの様子から、アスペリティ上をすべる挙動とアスペリティを破壊するせん断挙動の2種類のすべり挙動が観察できた。封圧1 MPaの試料ではアスペリティに大きな損傷を与えることなく、試料の上半分が乗り上げている。一方、封圧6 MPaの試料では三角形のアスペリティがせん断によって破壊されることが確認できた。

図-6に、2つの試料の実験時の画像とDICによって算出した変位場を示す。封圧1 MPaの試料では、三角形アスペリティの付近の隙間が広がっていることから、試料上半分の変位が確認できる。DIC解析結果から、試料の上半分が大きく変位しており、三角形のアスペリティに沿って滑っていることがわかる。一方、封圧6 MPaの試料では、撮影画像から変位を確認することは困難である。しかし、DIC解析画像では、ピーク応力前(650 s)と後(850 s)で三角形アスペリティとその周辺の変位量が異なり、アスペリティの頂部付近が変形したことが確認できる。実験後の試料からも、アスペリティ頂部を破壊しながら滑ったことが確認できた。

## 4. まとめ

提案した新しい可視化計測システムによって、圧力容器内部の模擬岩石試料のすべり挙動を直接観察し、計測することに成功した。計測システムは、市販のデジタルカメラを内蔵した耐圧ハウジングから構成されている。このシステムは安価で安全な上、従来の試験

装置を使用できるため汎用性がある。さらに、既往の計測方法とは異なり、試料のすべりや破壊による変形過程を直接観察することが可能である。本研究では、三角形の凹凸を持つプレカット試料のすべり挙動を撮影し、DIC解析の結果から、封圧がすべりに与える影響を明らかにした。

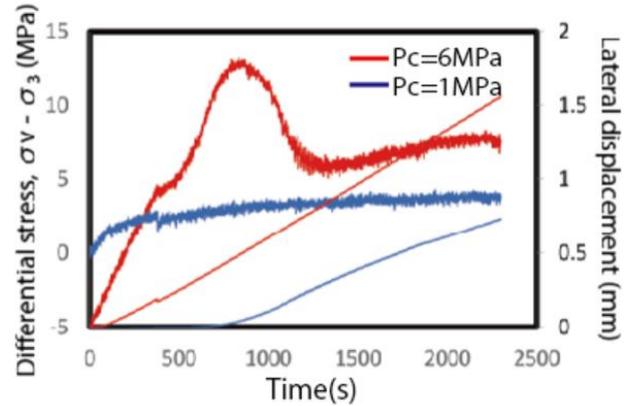


図-4 異なる封圧下における差応力及び横方向変位の時間変化

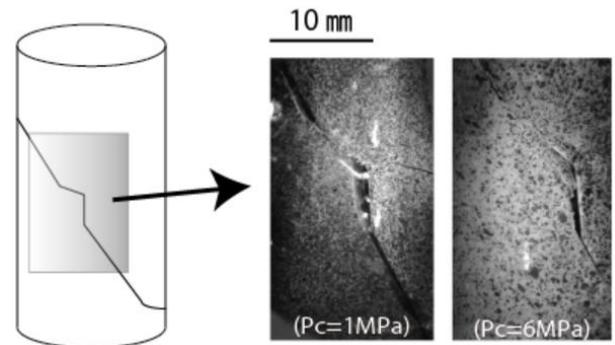


図-5 デジタルカメラにより撮影された実験時の試料画像

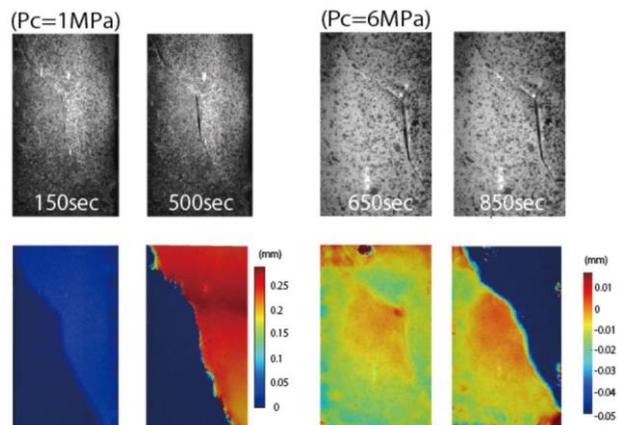


図-6 実験時の試料画像およびDIC解析結果

## 引用文献

- Blaber, J., Adair, B., and Antoniou, A. (2015): Ncorr: Open-Source 2D Digital Image Correlation Matlab Software: Experimental Mechanics, Vol.55, pp.1105-1122.

# P1. 北海道津別町, 1953年本岐地すべりと造林殉難者慰霊碑

A monument for the martyrs of afforestation caused by the 1953 Honki landslide, Tsubetsu, Hokkaido

○田近 淳 (ドーコン), 北海道自然災害史研究ワーキンググループ  
Jun Tajika, Research group for history of natural disaster in Hokkaido

## 1. はじめに

1953年5月31日午前2時15分頃, 北海道網走郡津別町本岐字木樋の道有林で発生した地すべり(地すべり: 広義)は, 造林作業に従事していた作業員の宿舎を押しつぶし, 就寝中の16人が死亡した<sup>1)</sup>. 発生の一年後, 津別町と北海道は現場近くに殉難者慰霊碑を建立した. この地すべりについては, 発生直後に北海道大学理学部地質学教室の早坂一郎, 石川俊夫, 勝井義雄, 北川芳雄, 魚住悟, 以下, 北大報告書)によって詳しい調査が行われている<sup>2)</sup>. 現代的にみると, この斜面変動は古い地すべり地形が解体する過程で発生した豪雨による風化岩の崩壊-岩屑なだれであり, 斜面防災を考えるうえで示唆に富む事例である<sup>3) 4)</sup>. この発表では北大報告書を中心にその後の調査結果を含めてこの斜面変動と, 慰霊碑について紹介する.

## 2. 発生した斜面変動

**岩屑なだれ:** 崩壊は宿舎(飯場)から400m, 比高120mの斜面で発生し, 崩壊した土砂は対岸に乗り上げて沢を下り, 沢口にあった宿舎を約30度回転させて停止した(図1). 崩壊源は幅, 奥行はおおよそ100m, 中心の深さ17mの深いスプーンカット状の形態で, 滑落崖(高さ5m)は風化・ブロック化した砂岩や硬質頁岩や硬質頁岩からなり, 下部には湧水が見られた. 崩壊源の背後には凹地があり, 融雪期には湛水していたと考えられている. 移動した土砂は約3,600m<sup>3</sup>, 水を含みドロドロで, 両側に乗上げ痕があり, 先端は舌状に膨らみ, 溶岩流に似ている. 表土を含む移動体はブロック状に分離して移動した(流れ山). これらのことから, この斜面変動は母岩と風化帯の境界付近がすべり, 流れ下ったもので, 報告書ではこれを土砂流と呼んでいる. これらの形態は現在も現地で確認でき, 現代的に言えば風化岩の崩壊と引き続く岩屑なだれと考えられる<sup>3) 4)</sup>.

これにより宿舎1階で15人が死亡, 中2階山側で1名死亡, 中2階低地側に就寝中の2名だけが生存した. 発生時の状況を, 生存した新田守さんは「寝て間もなくごうごうという音に目をさましてハッとしたときはもう飯場に土砂がぶつかり, ばりばりと音がしていた. まったく一瞬の出来事であつという間に寝床のまま外にはより出され, 隣に寝ていた高橋さんが胸まで土砂に埋まってもがいていました」と語っている(昭和28年6月1日付北海道新聞).

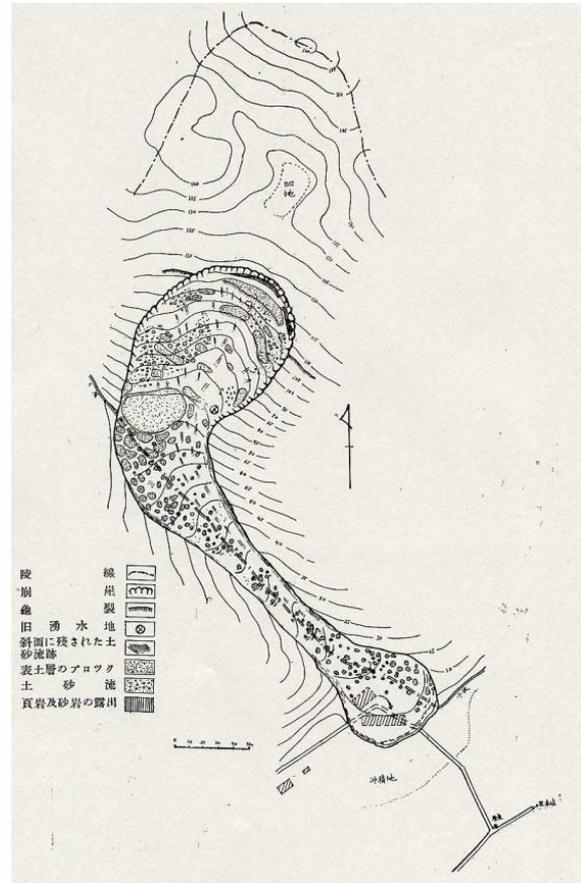


図1 本岐地すべりの実測平面図 北大報告書<sup>2)</sup>

**降水の状況:** 5月30日は29日夕刻からの雨が降り続いていたという. これが誘因と考えられるが, 被災地の北東13kmの津別で観測された日降水量は29日8.7mm, 30日20.6mmで大雨というほどではない<sup>3)</sup>. 発生時期を考えると, 北大報告書で指摘されたように融雪水の浸透・帯水が大きく影響したのかもしれない.

**発生場所の地形・地質:** 北見・津別地域は大規模地すべり地形の密集地域である. 発生場所の網走川支流ケミチャップ川左岸の山地は奥行1km, 幅5kmにわたって大～中規模の地すべり地形が発達する(図2). 本岐地すべりはこれらの地すべり移動体の一部が崩壊して発生したものである<sup>3) 4)</sup>.

地すべり地形は古第三紀連層泥岩(Tms)硬質頁岩(Tps)とこれを覆う新第三紀津別層砂岩(Tss)の地域に分布しており<sup>5)</sup>, 分離崖や線状凹地の明瞭なことから過去の大規模な岩盤並進すべりの跡と考えられる. ここには本岐地すべりのほかにも似たような崩壊地形や斜面前面に崩落堆・沖積錐が発達する. 移動体

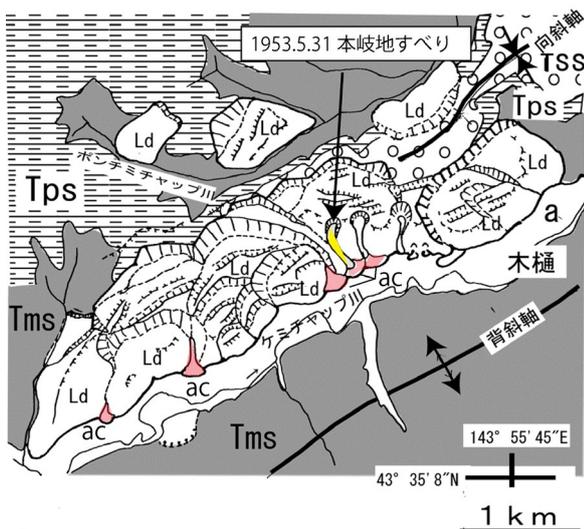


図2 津別町ケミチャップ川流域の地すべり地形と本岐地すべりの位置<sup>4)</sup>

Ld: 地すべり地形, ac: 沖積錐, a: 低地, Tss: 津別層砂岩, Tps: 達娯層硬質頁岩, Tms: 同泥岩

を構成する頁岩・泥岩は破碎・風化が進んでいるものとみられ、谷沿いの斜面には径1m前後のパイピング穴と土砂流出の跡が見られる。これらのことは岩盤すべり発生後、地すべりにより破碎した岩盤からなる斜面ではこのような崩壊が繰り返されてきたことを示す。地形発達の考え方からみるならば、本岐地すべりは、過去の地すべり地形が開析され、解体していく過程で発生する斜面崩壊<sup>6)</sup>ということができる。

### 3. 造林殉難者慰霊碑

**荒廃した森林:** 木材は第2次大戦中には軍需物資として、また戦後は戦災復興のため大量に伐採された。無秩序な伐採により山林は荒廃し、荒廃した山林は各地で土砂災害や水害を引き起こした。このため、国土保全や水資源の涵養のための森林造成の必要性が広く認識されるようになった。昭和20年代後半から30年代、北海道網走地方、なかでものちに「愛林の町」を掲げることになる林業の町津別町にとっては荒廃した山林の復旧・緑化は喫緊の課題であった。北大報告書には崩壊地背後の山地の写真が掲載されているが、その写真は荒廃した森林の状況を物語っている。

**慰霊碑:** このような背景で発生した地すべりは地元の人々に大きな衝撃を与えた。のべ2082名もの人々が8日間救出作業と遺品の捜索にあたったという。翌年、5月31日に造林殉難者慰霊碑(田中敏文北海道知事の揮毫、林利弘津別町長撰の碑文、白御影)が被災地の西側の林道わきに建てられた。碑文は次の通りである。

北海道庁木樺造林地大地にハ造林飯場及就寝中ノ十六名深く埋没之カ急救二官民出動延老千余名幸ヒ全員収容成ルモ嗚呼空シ今ヤ国土緑化運動酣ノ秋コノ造林ト殉難ヲ記念シ諸君ノ冥福ヲ祈リ永ク国土緑化ノ偉

業ヲ仰グ(一部判読困難な文字があり)。

**遭難者:** 町史<sup>1)</sup>によれば、被災者のうち5名は地元津別町民、北見市の1名のほか、5名が秋田県北秋田郡七座村、5名が同郡沢口村の出身であった。秋田県北秋田郡は秋田杉の美林で知られた場所である。

### 4. まとめと教訓

北大報告書では、調査結果を次のようにまとめている。「本岐の地すべりは(中略)基盤岩層の機械的風化帯が浸透した雨水で飽和され、不透水の基盤岩の傾斜面上を迂りおちたものである。(中略)地質状態が同様なこの地方一帯の地域では、同様な地すべりは過去にもあったように、今後も起こりえるものと考えなければならない。(中略)今回の地すべりが多大の犠牲者を出したのは、飯場が土砂流の末端近くにあったためである。わずか20m西南方に寄っていたならば、全く避けえたに相違ないのでその点遺憾に絶えない」として、宿舍の立地場所について「溪谷の口の直前を避けること」など4つの注意点を示している。

この事例では中2階低地側に就寝中の2名だけが生存した。最近では水平避難に加えて「垂直避難」の重要性が指摘されるようになってきたが、これもその重要性を示す事例である。

さらに我々は次の点を教訓としなければならない。地すべり地形の移動体部分に崩壊地形やその前面に沖積錐がある場合は、(地すべりの再活動ではなく)降雨による急速な崩壊の危険性を認識すべきである。なお、報告書の第2章には地すべりと地質学に関する格調高い一文が掲載されている。ご一読をお勧めしたい。石井正之氏のウェブサイト<sup>7)</sup>に引用されている。

### 文献

- 1) 津別町(1954): 木樺山くずれ事件. 津別町史, pp.173-174.
- 2) 北海道大学地質学鉱物学教室(1954): 昭和28年5月31日北見国津別町本岐の地すべり, 北海道地質要報, No.25, pp.23-28.
- 3) 伊藤陽司・雨宮和夫・石井正之・田近淳・戸田英明・豊田守・宮坂省吾(2007) 地すべり学会・北海道地すべり学会研究発表会予稿集, pp.21-24.
- 4) 田近淳(2010): 14.1 地すべり・斜面崩壊・土砂流. 日本地方地質誌北海道地方, 朝倉書店, pp.477-488.
- 5) 山口昇一・沢村孝之助(1965): 5万分の1地質図福「本岐」および同説明書, 地質調査所, 46p.
- 6) 田近淳(2018): 地すべり地形の場で発生する斜面崩壊一日田市小野地区地すべりを例にして, 防災科学技研究所研究資料, No.418, pp. 139-141.
- 7) 石井正之(2006): 北海道津別町本岐の地すべり. 地質と土木をつなぐの“貯蔵庫”, 2006年7月1日 <http://mishi.weblike.jp/ponkilandslide.html>

## P2. 東北地方の事例—安達太良火山の2つの災害碑—

### Two Disaster Monuments of Adataro Volcano in Tohoku Region

○村上智昭（復建技術コンサルタント）、橋本修一（東北開発コンサルタント）

Tomoaki Murakami, Shuichi Hashimoto

### 1. はじめに

東北地方の自然災害碑は太平洋岸の津波被害によるものが大多数を占めている。また、火山災害といえは明治以降最大の477名が死亡したとされる1888年の磐梯山噴火が有名である。

ここでは磐梯山から東に20kmに位置する安達太良火山で発生した土砂災害と噴火災害の伝承碑に示された災害の状況について記録や現地の地形・地質状況からとりまとめ、災害リスクの認知度を高めるためのアウトリーチ活動の必要性について考える。

### 2. 安達太良火山災害の概要

安達太良火山は、福島県県中北部に位置する東北日本弧の火山フロントを構成する第四紀火山である。南北に連なる尾根は25～12万年前の噴出物で形成している。それ以降の活動は現在の火口である沼ノ平付近での噴火であり溶岩の噴出量は少ない。

有史以降記録のある人的被害を出した災害は3回あり、状況について表-1にまとめる。安達太良火山は標高1700m程度であり山麓からのアクセスが容易なこと、高温で多量の温泉や硫黄鉱山など火口付近での資源が豊富であり、人の往来が盛んであった。

表-1 安達太良火山災害の概要

年	月日	災害概要
1842(文政7)年	9月7日	台風豪雨により斜面崩壊が発生し湯日温泉(旧嶽温泉)が埋まる。 死者63人・怪我6人・無事87人(湯女約100は含まず)
1900(明治33)年	7月17日	噴火:沼ノ平内に長径300m短径150mの火口を生じ、熱灰や石を噴出。噴出物総量 $1.1 \times 10^6 \text{ m}^3$ 。火口の硫黄探掘所全壊。死者72名、負傷者10名、山林耕地被害。
1997(平成9)年	9月15日	火山ガス(硫化水素)により、沼ノ平火口で登山者4名死亡。



図-1 災害発生位置と伝承碑の位置

ここでは、1842年に発生した斜面崩壊により旧岳温泉を壊滅させた災害(以下、1842年岳山事変)と、1900年に沼ノ平火口の水蒸気爆発で硫黄鉱山従事者に死傷者を出した災害(以下、1900年水蒸気爆発)におけるそれぞれの自然災害碑と災害の状況について報告する。



図-2 災害発生位置と地形

### 3. 1842年岳山事変

1842年に岳山崩れと言われる土砂災害が発生した。この年は8月下旬から大雨が続き、9月7日午後10時頃、鉄山の南側の斜面が大きく崩れ当時の岳温泉を襲った。古文書に残されている絵図によると、急崖をなす黒金山(くろがねやま=鉄山)南斜面の中腹に大きく「ヌケアト」とあり、その下方に源泉の一部と家屋群が土砂に埋まっている様子が図示されている。ヌケアト規模は、幅約30m、長さ約55m、また、埋もれて平地になった沢の規模は幅約50m、長さ約110mとされる。岩質は複輝石安山岩であるが、温泉変質により脆くなっていることや斜面崩壊が多発しているため、200年前の崩壊箇所を特定することは難しい。

供養観音像と供養碑は、岳山崩れ現場からは南東に約6.3km離れた現在の岳温泉の一角に設置されている。

碑文には「…文政7年8月15日に豪雨のために鉄山の一角が崩壊し湯小屋11軒は土砂に押しつぶされ200数10人の死傷者を出す大惨事となってしまいました。～中略～この惨事に際し二本松藩では4日間に渡り延べ人員2,200人の救援隊を出し救助にあたりました。藩の正式の記録には死者63人、怪我6人、無事87人の196人が記されていますがこの被害報告には記録されていない人別帳(戸籍簿)から抹消された湯女が約100人もいました。これらの人々で亡くなった方の遺体を深堀村に運び手厚く埋葬し、安らかある永眠を願い観音像が立てられています」と記されている。



文政七年岳山変災供養観音と碑文

岳温泉の湯元は安達太良連峰の鉄山の  
 麓下にあります。この湯出地は貞觀五年  
 (八六三年)には小結温泉神として記述され  
 明徳五年(二四九六年)頃より繁盛し始め  
 一般湯治も行われて来ましたが、  
 文政七年(二八二四年)八月十五日太陽暦の  
 九月七日に豪雨の為に鉄山の一角が崩壊し  
 湯小屋十一軒は土砂に押しつぶされ二百数十  
 人の死傷者を出す大惨事となってしまいました。  
 安達和尙が寛文十年(二六七〇年)に止めの  
 祈願に死石を刻み山神を請ひ百五十年間の  
 山中での歌舞音曲を祈し賜って百五十四年日  
 のことす。この惨事に際し二本松藩では  
 四日間に渡り延べ人員二千二百人の救援隊を  
 出し救助にあたりました。藩の正式の記録には  
 死者六十二人、傷者四十六人、被褥八十七人の  
 百九十六人が記されていますが、この被害報告  
 には記録されていない人別帳(戸籍簿)から  
 抹消された湯女が約百人もいました。これらの  
 人々で亡くなった方の遺体を深堀村に運び  
 手厚く埋葬し、安らかなる永眠を願ひ  
 観音像が立てられています。

写真-1 文政7年岳山事変供養観音と碑文

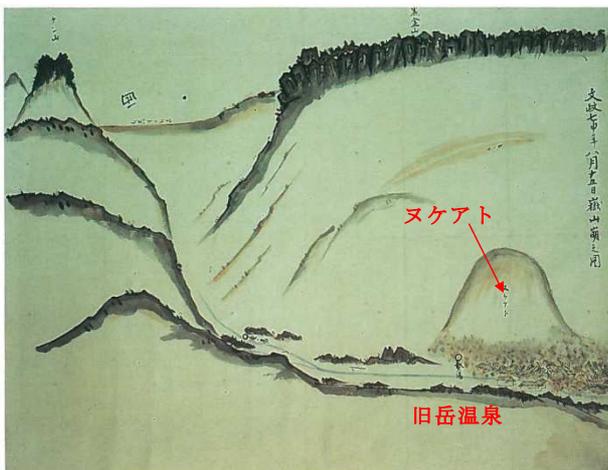


図-3 文政七年八月十五日嶽山崩之図<sup>4)</sup>

#### 4. 1900年水蒸気爆発

沼ノ平火口では1888(明治21)年に欧米式の精錬方法を導入してから採掘が活発化し火口内で精錬していた。噴火前年の1899年頃から火山活動が活発化し1900(明治33年)7月17日の4回目の噴火で爆発的噴火が発生し、長径300m、短径150m、深さ30mの火口が形成されるとともに精錬所や居住棟は全壊した。また、火砕サーージが疾風を伴って硫黄川に沿って西方に流下し、避難する作業員を襲った。火口から1.6km西方の沼尻温泉源泉付近では疾風で建物が倒壊し、最終的には硫黄川の下流2.4kmまで達している。

この噴火では死者72名、負傷者10名を出したが、ほとんどが沼尻鉄山の関係者であった。

その翌年に沼尻硫黄山噴火遭難碑は火口から西に約6kmの中ノ沢温泉神社の参道に建てられた。碑文には「ああ、この地が渋沢仁之助君(渋沢栄一の甥っ子)

が命を落とした場所である。～中略～明治33年7月17日、午後5時頃突然山が震動し、谷から音がし、噴火の火が立ち上がり、天高く砂、石が雨のように降った。またたく間に鉄区に立っていた建物、掘削道具、人も家畜も火に包まれた」と記載されており、災害全体の記述よりも渋沢仁之助の半生についての記述が多い。石碑の左隣には全遭難者を慰霊する碑が立てられており「沼尻硫黄山噴火遭難碑」と記されている。

写真-2の右は碑文が記された石碑で、左は全遭難者を慰霊するもので「沼尻硫黄山噴火遭難碑」、間に見える角塔婆は、平成12(2000)年に噴火百周年遭難者慰霊祭において設置されたものである。



写真-2 沼尻硫黄山噴火遭難碑

#### 5. まとめ

火山災害は噴石や火山灰ばかりでなく、火山噴出物や山体崩壊によって発生する火山泥流は沢地形沿いに10km以上下流でも災害をもたらす可能性が高いことを考えれば、周辺住民への啓蒙は必要な事項である。

自然災害碑は年が経つに連れて記憶が薄れていくものである。さらに、地元での被害者が少なければ防災への意識は低く地域で伝承されることも少ないことが今回の事例からも明らかである。自然災害を伝承していくためには、発生からの10周年の区切りで行事を催し過去に発生した災害事例と、起こりうる災害について考えるイベントを定期的に作ることで災害伝承では重要であり、今後のアウトリーチ活動に必要な課題であると考えらる。

#### 文献

- 1) 安達太良山火山防災連絡会議(2016):安達太良山ハザードマップ
- 2) 佐藤公(2020):安達太良山という火山のお話 <https://www.stylekoriyama.com/2020/08/21/adatarayama/> (2022.8.1閲覧)
- 3) 藤縄明彦・鴨志田毅・棚瀬充史・谷本一樹・中村洋一・紺谷和生(2006):安達太良火山,1900年爆発的噴火の再検討,火山,第51号,pp.311-325.
- 4) 柳田春子(2001):岳温泉を襲った豪雨災害,予防時報,第205号,pp.1-3.

## P3. 自然災害伝承碑の立地する地形種と地形場

Geomorphic species and setting of Natural Disaster Monument

○下河敏彦（㈱環境地質）

Toshihiko shimogawa

### 1. はじめに

国土地理院では、2018（平成 30）年 7 月豪雨災害において、自然災害伝承碑が建立されている地域で大きな犠牲が発生したことを契機として、自然災害伝承碑の GIS データを整備している。2022 年 9 月現在で 1,345 か所の自然災害伝承碑の位置データが提供され、災害種別や碑文の伝承内容も整備されている。一般に、自然災害伝承碑の建立された場所は、主に人的被害を伴うような場所に限られ、必ずしも自然災害発生要因の危険性とか一致しない。本報告では、自然災害伝承碑周辺の地形種・地形場を判読し、今後の災害伝承のありかたについて考察する。

### 2. 研究の方法

国土地理院の提供している自然災害伝承碑の GIS データをダウンロードし、空中写真判読や旧版地形図、土地条件図等と重ね合わせ、地形を判読した。また、自然災害種別が 26 種類に分類されている。本報告では、主な災害発生誘因に着目して水害、土砂災害、地震、津波、高潮、雪害、火山、その他の 8 種類に整理した。

水害は、主に河川の洪水流による被災である。碑文の記載内容から、土石流が主体であると判断される事例は「土砂」として分類した。また、大規模な土砂災害であっても誘因が地震である場合、事前予測と避難の困難さに着目し地震として分類した。津波は海溝型巨大地震や山体崩壊を誘因とし、沿岸に特化していることから単一のカテゴリとした。内訳を図-1 に示す。

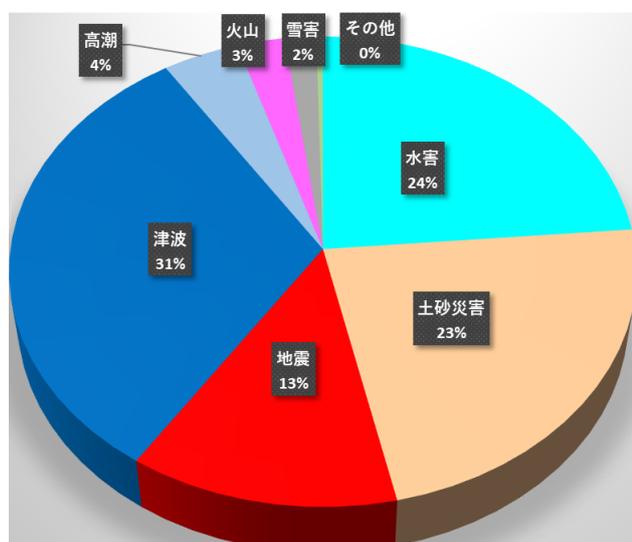


図-1 自然災害伝承碑の災害種別の割合

### 3. 結果

#### 3.1 水害及び土砂災害

豪雨に伴う洪水流や土石流で人的被害が発生しやすい場所は、河川・溪流の近傍である。地形種としては、自然堤防と旧河道、沖積錐の頂部から中央部が多い（図-2、図-3）。後背低地や支谷閉塞低地は、冠水が長期化し地盤も軟弱で構造物の基礎には不向きであるが、洪水の挙動が緩やかである。沖積錐や扇状地の末端は後続流によるが主体で避難もしやすいと考えられる。

#### 3.2 地震

特定の地震災害に限られ、建物の崩壊や土砂崩壊による犠牲が多い。土砂崩壊の場合は火山砕屑物や地すべり地形、軟質な尾根といった低山の崩壊が主体で、硬質岩山地の崩壊による自然災害伝承碑は 1923 年関東大震災が大半である。低地においては旧河道や埋立地のほか、活断層沿いに多い。

#### 3.3 津波

繰り返し大規模な津波災害を受けた三陸海岸や三重県、四国沿岸に多い。太平洋岸以外は、いわゆる「島原大変肥後迷惑」と呼ばれた雲仙眉山崩壊による津波や浜田地震、日本海中部地震の津波等がある。津波の災害伝承碑は、津波の遡上範囲を示唆する面的な情報を喚起させることが特徴と言える。

#### 3.4 高潮

1959 年伊勢湾台風の慰霊碑が最も多い。地形種としては三角州や埋め立て地が主体である。

#### 3.5 都道府県別の集計

図-4、表-1 に自然災害伝承碑の災害種別と都道府県別の集計結果を示す。最も多いのは岩手県であるが、大半が津波である。台風の通り道となりやすい沖縄県は、津波以外の伝承碑は建立されていない。津波や火山は誘因となる自然現象の規模に伴い人的被害も大きくなるため、後世に伝える意志が働きやすいと考えられる。また、一方、洪水や土石流災害のように、わが国で普遍的に発生しうる災害については、人的被害が発生した地点と、誘因となる自然現象の破壊力が必ずしも一致しないことに留意が必要である。このような場合、災害実態や地形発達史を踏まえた解説看板を設置するなどの工夫が必要であろう。

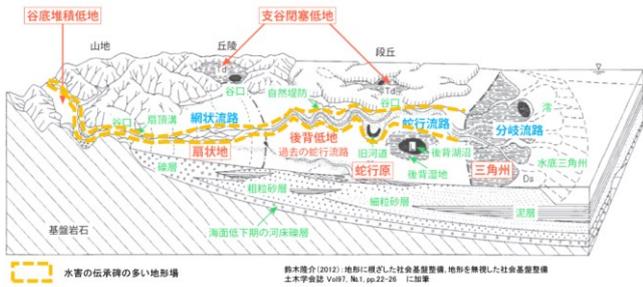


図-2 水害の自然災害伝承碑の多い地形場

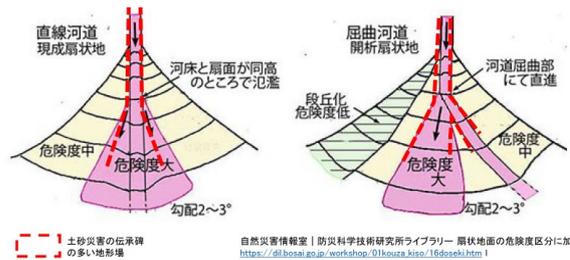


図-3 土砂災害の自然災害伝承碑の多い地形場

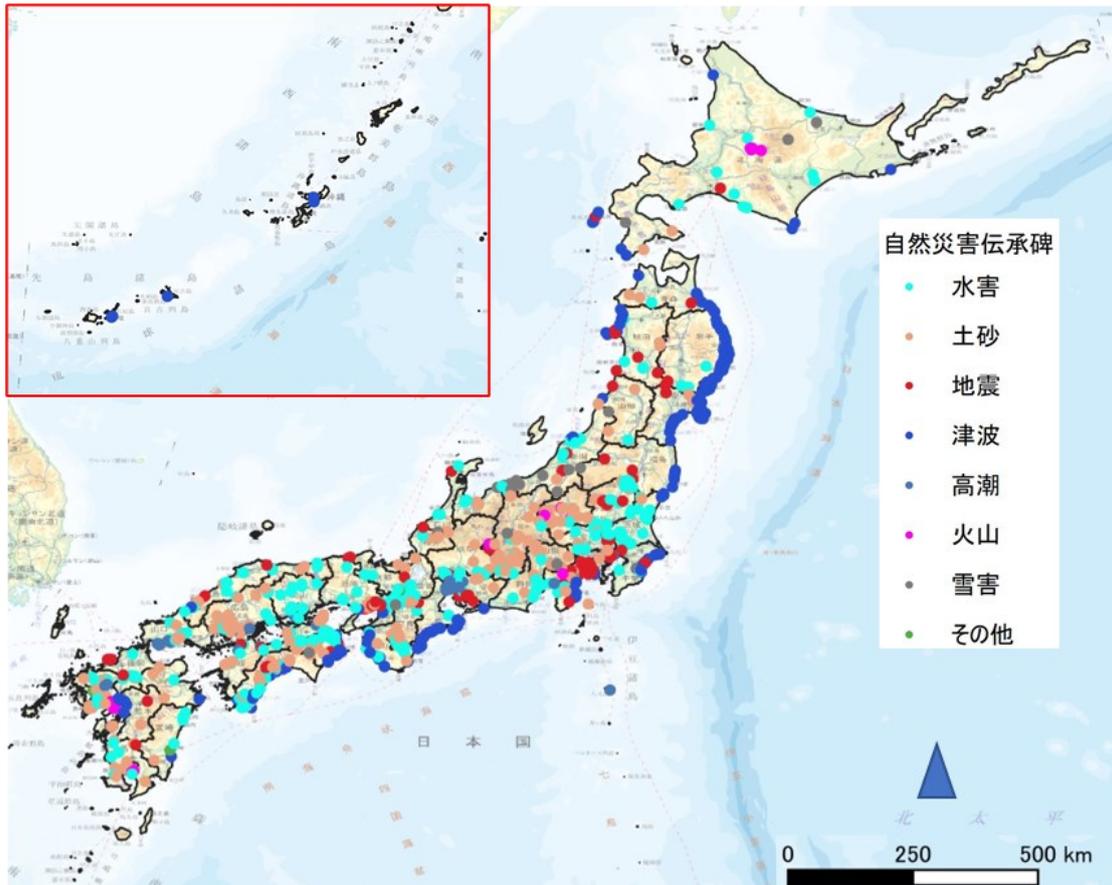


図-4 自然災害伝承碑の災害種別の分布

表-1 自然災害伝承碑の都道府県別の集計

都道府県名	水害	土砂	地震	津波	高潮	雪害	火山	その他	総計	都道府県名	水害	土砂	地震	津波	高潮	雪害	火山	その他	総計
03 岩手県	4		1	131				1	137	19 山梨県	3	17							21
39 高知県	18	24	6	32					80	33 岡山県	20				1	1			21
20 長野県	9	50	11				6		77	41 佐賀県	6	8	1		3			1	19
04 宮城県	3	3	3	71					77	35 山口県	8	5			6				19
24 三重県	5	2	2	41	14				64	37 香川県	7	10			1				18
28 兵庫県	10	18	29	1	2				60	25 滋賀県	11	4	1						16
14 神奈川県	2	5	39	4			1		51	40 福岡県	8	3	3						14
34 広島県	8	39			2				49	02 青森県	1	2	1	9					13
23 愛知県	8	6	12	1	22				49	32 鳥取県	7	4	1	1					13
36 徳島県	9	7	3	22	1	1			43	21 岐阜県	8	4	1						13
30 和歌山県	8	2		29					39	43 熊本県		3	1	7					11
22 静岡県	12	8	2	15	1		1		39	07 福島県			3	8					11
08 茨城県	26	3		6					35	26 京都府	8	1						2	11
01 北海道	10	2	2	9		3	9		35	16 富山県	7	3							10
09 栃木県	20	5	9						34	18 福井県	1	6	2				1		10
13 東京都	2	4	20		5	1			32	27 大阪府	7			3					10
10 群馬県	5	19					8		32	45 宮崎県	4	2	1	1				1	9
15 新潟県	8	2	3	2		13			28	06 山形県	1	4	1	1			1		8
29 奈良県	10	15				1			26	31 鳥取県	5	2	1						8
11 埼玉県	15	2	4				1		22	47 沖縄県				6					6
46 鹿児島県	5	7					10		22	17 石川県	3	2	1						6
12 千葉県	2		2	16		1			21	44 大分県	1	3		1					5
05 秋田県	6	2	5	8					21	総計	318	308	171	425	58	24	36	5	1,345

## P4. 外気圧の周期的変動に対する岩石ブロック内の気圧応答

Pressure response in a rock block to periodic fluctuations in external pressure

○長田 昌彦 (埼玉大学大学院), 大沢 光司 (埼玉大学), クリスティーナ・プツリ (埼玉大学), 野澤 海人 (元・埼玉大学)  
Masahiko Osada, Koji Osawa, Christina Putri, Kaito Nozawa

### 1. はじめに

大気圧は日々変化しており、微かではあるが、岩盤にもその圧力変化が伝わっている。本研究では、この大気圧変動を外力として、岩盤の有する力学的あるいは水理学的な特性を評価するための方法論を検討している。これを実現するために、現在原位置での長期観測を実施している<sup>1)</sup>が、大気圧変動のような不規則な変化に対して、岩盤内の間隙空気圧がどのように応答しているのか不明な点も多い。

そこでここでは、室内で岩石ブロックに気圧の変動を与え、それに対する気圧応答を計測した。

### 2. 気圧変化実験

ここでは、2つの実験を実施した。1つは「減圧実験」であり、もう1つは「気圧変動実験」である。試料には、18cm立方の岩石ブロック（井内粘板岩）を用いた。湿潤密度は $2.763 \text{ g/cm}^3$ 、有効間隙率は $0.56\%$ であり<sup>2)</sup>、非常に緻密な暗黒色の粘板岩である。岩石ブロックの中央に中心まで円孔を空け、温度・湿度・気圧計を備えたセンサを埋設している。なお、試料は乾燥炉にて $110^\circ\text{C}$ で24時間乾燥させたあと、デシケーター内で保管したものをを用いている。

両実験はともに、**図-1**に示すように、真空ボックス内に岩石ブロックを設置し、真空コントローラを用いて真空ボックス内の気圧を変化させることによって行う。このとき、真空ボックス内と岩石ブロック内の温度・湿度・気圧を1秒間隔でデータ収録する。なお、計測とデータ収録にはラズベリーパイを用いた。

#### (1) 減圧実験

減圧実験は、大気圧の状態から、真空ボックス内の気圧を $930 \text{ hPa}$ に減圧し、このときの岩石ブロック内部の気圧の変化を計測するものである。計測結果の一例を、**図-2**に示す。真空ボックス内の気圧は、1分半から2分で、初期設定値に至る。これに対して、岩石ブロック内部の気圧は45分から1時間で徐々に外気圧と同じレベルに至っていることがわかる。同じ試料に対して、同様の実験を10回繰り返したが、この曲線はほぼ同一の経路を通り、再現性は高い。

原理としては、Brace et al.<sup>3)</sup>の提案したトランジェントパルス法と同じであり、拡散方程式で表現される。そこで、彼らの定式化による一次元モデルの数値解を

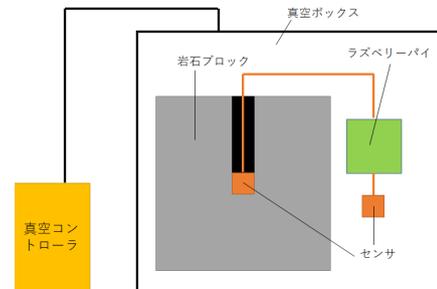


図-1 実験の模式図

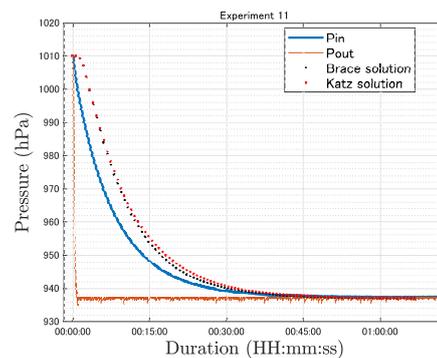


図-2 減圧実験時の気圧の経時変化

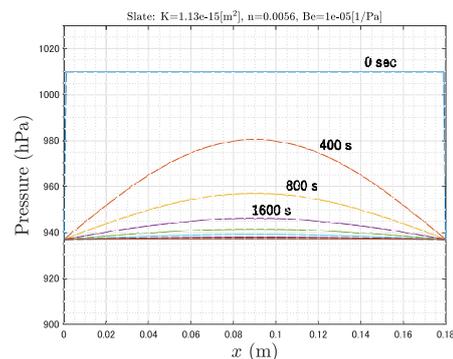


図-3 減圧実験時の気圧の分布（解析値）

参考までに**図-2**にプロットし、このときの試料を横断するようになった気圧の分布を**図-3**に示した。また、既報<sup>1)</sup>では、空気の圧縮性を考慮したKatz<sup>4)</sup>の式に基づく検討をしているため、こちらについても同じく、**図-2**に含めた。どちらの理論を用いたとしても、気圧

が減少していく様子をうまく表現できていることがわかる。ただし、実験開始の初期段階では、数値解では若干遅れて応答が見られるのに対して、実験では、この応答が見られない結果であり、この点については更なる検討が必要と考えている。なお、Brace et al. <sup>3)</sup> の理論に当てはめると、固有透過度は  $1.13 \times 10^{-15}$  [m<sup>2</sup>] と見積もられた。

## (2) 気圧変動実験

気圧変動実験は、大気圧の状態から、まず 900 hPa に減圧し、続いて 900 hPa から 950 hPa の間で、一定周期の三角波を与えたときの岩石ブロック内部での気圧の応答を計測するものである。用いた周期は、2分、4分、8分である。

周期が4分および8分のときの計測結果を図-4に示す。図の横軸は、経過時間を周期で除したサイクル数にとっており、20サイクル分を示している。規格化された真空ボックス内の気圧(out)は、ほぼ重なっており、気圧の振幅もほぼ一定であることがわかる。なお、真空コントローラの問題できれいな三角波にはなっておらず、また下側の設定値 900 hPa に対して 910 hPa と若干大きめの値となっている。一方、岩石ブロック内部の気圧(in)は、減圧実験と同様に、徐々に下がって収束値 930 hPa に近づいており、15サイクル辺りで定常に至っていることがわかる。気圧(out)に対して、気圧の振幅は明らかに小さい。また周期4分および8分の定常状態での振幅を比較すると、若干8分の方の振幅が大きいことがわかる。

定常状態における振幅比と位相のずれを、フーリエ変換を用いて計算した結果を図-5に示す。周期2分の結果は、図-4上にプロットすると、規格化された外気圧の形状が若干異なっているため、あくまで参考値としてプロットしている。また図には、変化傾向の目安として、Katzの式を用いて計算した周期2分から9分のときの振幅比と位相のずれの傾向もプロットしている。●および■で表わした振幅比の変化傾向は、周期が大きくなると、大きくなる傾向となっており、実験と解析結果で同じ傾向を示した。一方、位相のずれについては、解析では、周期が大きくなると、小さくなる傾向を示すが、実験では、逆に大きくなるか、ほぼ横ばいという結果となっている。

周期を大きくすることは、流動媒体である空気が圧力差により、より試料奥まで移動する時間を担保していることになるので、周期の増加に対して、振幅比が大きくなることは当然の結果といえる。一方で、位相のずれの変化傾向については、周期をさらに大きくした実験を実施することによって、さらなる検討が必要である。

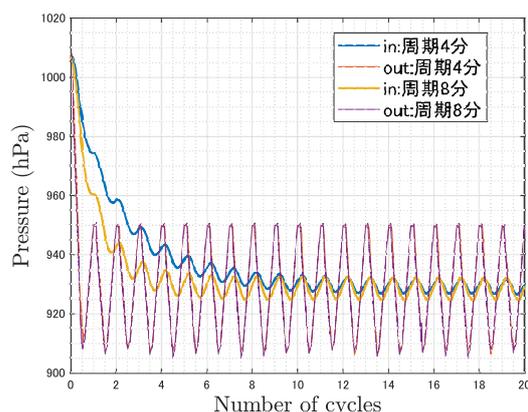


図-4 気圧変動実験時の気圧の経時変化

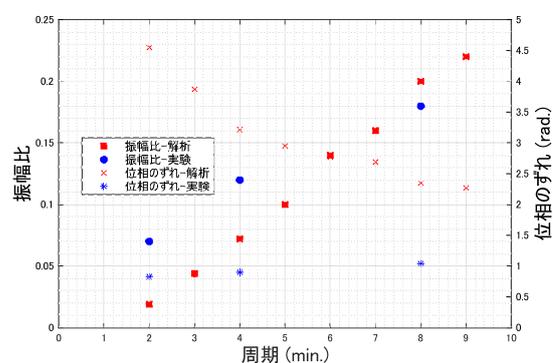


図-5 周期と振幅比・位相のズレの関係

## 3. おわりに

室内実験を通して、大気圧の変動と同程度の気圧の変化を与えることによって、岩石内部での気圧応答に、振幅の減衰や位相のずれが生じることを確認することができた。今後は、位相のずれに対する岩石内部の応答について、さらに検討を進めるとともに、日常の大気圧変動に対する岩石内気圧応答の解釈に取り組んでいく予定である。

**謝辞** 本研究の遂行にあたり、科学研究費補助金(基盤研究(B) 課題番号 20H02238)を使用させていただきました。ここに記して感謝の意を表します。

### 参考文献

- 1) 長田昌彦, 竹村貴人, 五嶋壯太, 富樫陽太, 大沢光司: 大気圧変動に対する飽和度低下による間隙空気圧変化の時系列解析, 第15回岩の力学国内シンポジウム講演集, pp. 221-225, 2021.
- 2) 高倉伸一: 含水岩石の比抵抗の温度依存性, Conductivity Anomaly 研究会論文集, pp. 85-91, 2018.
- 3) Brace, W. F., Walsh, J. B. and Frangos, W. T.: Permeability of granite under high pressure, *Journal of Geophysical Research (1896-1977)*, Vol. 73, No. 6, pp. 2225-2236, 1968.
- 4) Katz, D. L., Cornell, D., Vary, J. A., Kobayashi, R., Elenbaas, J. R., Poettmann, F. H. and Weinaug, C. F.: *Handbook of natural gas engineering*, 1959.

## P5. 山岳トンネルにおける地質調査の留意点（断層破碎帯）

Points to note in geological surveys in mountain tunnels (Fault fracture zones)

○ 阿部徳和（日本工営），土木地質研究部会課題事例分析ワーキング  
Norikazu Abe, Case study WG, Research Group on Engineering Geology, JSEG

### 1. はじめに

土木地質研究部会では，学会誌「応用地質」の連載講座（継続中）で，トンネルにおける地質体ごとの土木地質調査の要点について事例をふまえて提示してきた。その中で，ほとんどの地質体で「断層破碎帯」，「地すべり地帯」が，重大な土木地質リスク源であることが明らかになった。また，これらの土木地質リスク源を把握・対処するための地質調査では，計画～維持管理までの事業段階ごとに異なる対応が必要になる。

本報告では，土木地質リスク源である「断層破碎帯」について，想定される土木地質リスク事象の回避・低減・保有を考慮した山岳トンネルにおける地質調査の留意点について事業段階ごとに示す。

なお，土木地質リスク源（以下，リスク源という），土木地質リスク事象（以下，リスク事象という），地質体の定義は連載講座<sup>1)</sup>に倣う。

### 2. 断層破碎帯の定義とリスク事象

#### 2.1 断層破碎帯の定義

断層破碎帯とは，一般に「断層運動によって破碎された角礫や粘土が分布するゾーン」と定義<sup>2)</sup>されており，角礫状岩石と粘土等からなる。断層破碎帯の周辺岩盤においては，最大幅数百mにわたって割れ目発達部，脆弱岩盤（ここでは擾乱帯と呼称）および熱水変質による劣化岩盤が分布することがあり，トンネル掘削により土木地質リスク事象が認められることがある。そのため，割れ目発達部，脆弱岩盤の領域を含めて断層破碎帯として取り扱う。

#### 2.2 断層破碎帯におけるリスク事象

断層破碎帯におけるリスク事象は，主に「切羽部の崩壊・変状」，「過大な変位」，「突発湧水」および「坑口部と周辺斜面の崩壊」等が挙げられ，施工段階で発生すると，施工安全性の低下や工期延長等の土木地質リスクが発現する。

### 3. 各地質体における断層破碎帯の特徴

断層破碎帯の性状は，断層の規模および活動度のほか，地質体ごとに違いが認められる。地質体による違いは，地質の硬軟や地質構造に起因すると考えられるが，これまでの多くのトンネル施工事例から，各地質体における断層破碎帯と周辺岩盤の土木地質的な特徴は表-1のようにまとめられる。

表-1 地質体ごとの断層破碎帯の主な特徴（試案）

地質体	断層あるいは周辺岩盤の特徴
付加体	付加作用に伴う変形作用を受けられるため，他の地質体に比べて低角度断層の出現頻度が高く，大小様々な破碎割れ目を伴う傾向にある
火山岩・深成岩	熱水変質を伴うことが多い
正常堆積物	比較的平滑な断層面を形成し，形成年代が古いほど新旧様々な断層が存在する。また，褶曲に伴う層面断層が存在する。
変成岩	片理面方向の断層は連続する傾向にある

### 4. 事業段階ごとの土木地質リスク対応と要求精度

#### 4.1 事業段階ごとの土木地質リスク対応

事業プロセスに応じて土木地質リスクが生じ，地質リスクマネジメント<sup>3)</sup>の観点での対応により，土木地質リスクが低減される（表-2）。各事業段階での土木地質リスク低減のための対応を以下に列挙する。

##### 【計画段階】

計画ルートを踏まえた文献断層や地形判読・地表踏査で断層破碎帯の分布位置と性状の概略を把握し，リスクを考慮した路線線形検討の資料を作成するとともに，次の段階における調査計画を提案する。

##### 【調査・設計段階】

物理探査，地表踏査により断層破碎帯の位置と分布状況を把握し，トンネル計画高における断層破碎帯の性状と分布状況，地下水状況を把握するためのボーリング調査で発生頻度・重要性の高いリスク事象に対応した工法検討，変位予測を踏まえた設計を念頭に調査を実施する<sup>3)</sup>。

##### 【施工段階】

トンネルの切羽・側壁，坑口・小土被り部の変状，周辺環境（湧水・地表面変位等）に関連した地質リスクが予想される箇所に対する詳細調査・計測工と変形解析を実施して，施工方法の見直し，事前に検討した補助工法の採用などの判断を行う。

##### 【維持管理段階】

施工中，施工後に生じた地質リスク事象に対する監視体制を立案し実施する。

#### 4.2 事業段階ごとの地質調査への要求精度

地質調査に求められる地質情報の要求精度やそれに応じた調査数量，コストなどは，事業段階ごとに異なり，事業進捗に伴い要求精度が高くなり，対象範囲が限定される。各事業段階での地質解析の要求事項もより具体的でかつ限定的な内容に絞られる（表-2）。

表-2 事業段階ごとの要求精度とリスク事象（試案）

項目	事業段階	計画段階	調査・設計段階	施工段階	維持管理段階
調査対象範囲		広い（概略）	中～狭い（詳細）	狭い（極詳細）	中～狭い（詳細）
図面スケール		1/10,000～25,000	1/2,500～1/500	1/500～1/100	1/200～1/100
調査範囲		比較案を含む計画路線全体を包括するエリア	トンネル線形と断層の交差箇所および接近箇所	トンネル切羽前方	—
主な調査手法		文献調査、地形判読、地表地質踏査	地表地質踏査、物理探査、ボーリング調査、室内試験	切羽前方探査、先進ボーリング、計測工	目視点検、計測工
地質解析の主な要求事項		比較計画ルートごとの断層影響評価と調査立案	断層の影響を考慮した実施設計・施工計画に必要な性状確認	施工時のリスク事象の予測と設計変更・施工計画検討のための地質情報取得	変状要因分析と変状予測
リスク事象		断層の分布位置や地質性状に起因する次段階での業務効率性の低下や予算超過	断層破砕帯の分布予測や不均質性に起因する地山区分の相違	過大变位、切羽崩壊、突発湧水、水源地枯渇、地表面変位・沈下、重金属含有	覆工背面地山の流出による覆工の劣化・損傷、地震等の自然災害による損傷
事業対応		断層破砕帯を回避あるいは影響度を考慮した路線選定、次段階の調査計画立案	リスク源を考慮した段階的な調査実施、高リスク範囲での安全側設計・施工計画	土木地質リスク発現箇所に対する詳細調査・計測工と挙動解析	施工中・施工後のリスク事象を対象とした監視

5. 地質体別断層破砕帯とリスク事象

表-3 に断層破砕帯をリスク源としたリスク事象の件数を地質体ごとに整理した<sup>4)</sup>。ここでは、第四紀堆積岩類、第三紀堆積岩類、中生代堆積岩類は、概ね正常堆積物に対応しているものと考えられる。この結果からは、断層破砕帯に起因するリスク事象の発現は、第三紀堆積岩類などの正常堆積物に比較的多いことがわかる。また、火山岩や深成岩などの火成岩も比較的生件数が多い傾向にある。特にこれら火成岩では熱水変質を伴う場合があることに留意する。なお、付加体や変成岩の事例は確認されていないが、付加体などでは低角度断層による切羽崩壊なども懸念される<sup>5)</sup>ことから留意が必要である。

表-3 断層破砕帯の影響によるリスク事象（件数）

地質体	地質リスク事象			
	過大な変位	切羽崩壊	異常湧水	地表面沈下
第四紀堆積岩類				1
第三紀堆積岩類	5	8	6	1
中生代堆積岩類	1	1	1	
付加体				
火山岩		2	2	
深成岩	3	1	3	
変成岩				
合計(件数)	9	12	12	2

注) 件数は「トンネルと地下」の10年間の報文を統計的に分析したものである。

6. 地質体別事業段階ごとの地質調査の留意事項

事業段階ごとの調査精度と土木地質リスク低減の考え方、施工時のリスク事象を考慮した地質調査について地質体における留意事項を以下に示す。

【計画段階】

- 付加体：低角度断層の分布頻度が高く地形判読では抽出が難しく、地表踏査等による確認と重要箇所での調査提案が必要である。
- 火山岩類：冷却節理を断層のリニアメントとして判読される場合があり現地確認が必要である。

【調査・設計段階】

- 付加体・変成岩（片岩・片麻岩）：低角度の断層破砕帯による弾性波速度の逆転構造を見誤る可能性がある。

- 火山岩・深成岩類：断層破砕帯とその周辺に熱水変質による不規則な擾乱帯が分布する場合、膨張性地山となる可能性があり、安全側の設計・施工計画の検討が必要である。

【施工段階】

- 断層破砕帯とその周辺の熱水変質による不規則な擾乱帯推定箇所について計測工、坑内調査（前方探査、先進ボーリング等）を実施して掘削工法・支保パターンの見直し、補助工法の検討、実施を行う。付加体においては、低角度断層の存在も考慮に入れて観測施工を行う。

【維持管理段階】

- 火山岩・深成岩類：熱水変質帯における膨張性地山において共用後に変状を生じる可能性があり、監視強化が必要である。

7. まとめ

各段階で実施される地質調査は、業務発注の構造上、調査結果の検証やフィードバック、さらに、それらの成果が設計から施工・維持管理へと確実に引き継がれる仕組みとなっていない。そのため、特に施工、維持管理においては、調査の重複や事前段階での留意点の見過ごしによる本来回避できたトラブル遭遇など、リスク事象を低減させるための関係者間協議等、地質リスクコミュニケーションによる調査結果の検証や確実な引継ぎが重要になる。

文献

- 1) 佐々木靖人（2020）：地質体における土木地質調査の要点(1)、応用地質 Vol.61, No.4, pp.192-197
- 2) 日本応用地質学会（2004）：応用地質用語集（CD-ROM）Ver.1.0
- 3) 阿南修司（2011）：トンネル工事等における地質リスクマネジメント手法に関する研究①、平成23年度土木研究所成果報告書
- 4) 宇田川義夫（2016）：文献調査に基づく山岳トンネルにおける地質リスク事象の要因と対策工に関する分析、応用地質 Vol56, No.6, pp.350-355
- 5) 片山政弘他(2021)：地質体における土木地質調査の要点(4)トンネル編(その2)付加体堆積物、応用地質 Vol62.No.5,pp308-315

## P6. 山岳トンネルにおける地質調査の留意点 (地すべり地帯)

Points to note in geological surveys in mountain tunnels (landslide zones)

○永井誠二 (日本国土開発), 日本応用地質学会土木地質研究部会課題事例分析ワーキング  
Seiji Nagai, Case study WG, Research Group on Engineering Geology, JSEG

### 1. はじめに

本報告は、既往報告<sup>1)</sup>と同様に、「地すべり地帯」における土木地質リスクを考慮した地質調査の留意点について、事業段階ごとに示していく。

### 2. 地すべり地帯の土木地質リスク事象

地すべり地帯の土木地質リスク事象は、既往報告<sup>2)</sup> (他連載講座) より「坑口部の崩壊・変状」, 「過大な変位」が多くの地質体との関連性が高いとされている。

### 3. 各地質体における地すべり地帯の特徴

地すべり地帯の分布は、地域性や地質体ごとに特徴があり、東北日本海側～北陸の火山岩(グリーンタフ)や正常堆積物(新第三紀堆積岩)、四国の変成岩(御荷鉾帯、三波川帯)に集中し、一部付加体や深成岩、四国以外の変成岩では相対的に少ない<sup>3)</sup>。

### 4. 各事業段階における地質調査の留意点

地質調査に求められる精度や調査項目・数量、コストなどは、事業段階ごとに異なる。ここでは事業段階ごとに留意すべき地質調査について説明する(表-1)。

#### 4.1 計画段階

計画段階の地質調査は、地形・地質や環境に適合した路線選定のための資料作成、次段階の調査立案を目的とする。地すべり地帯では、特にこの段階の調査が重要であり、重大リスクは回避が基本だが、低減・保有せざるを得ない場合は、活動状況を明らかにすることが重要になる。調査結果は、地すべりの回避あるいは低減・保有による事業コスト比較資料となる。

具体的な調査は、既往文献による地すべり履歴調査、地形図や空中写真による地形判読、それを基にした地質踏査がある。地形判読では、精度の高いLPや衛星SARによるデータの普及・活用により様々なスケールでの地形判読が可能となっている。

地すべり地帯は、地域性や地質体ごとに特徴がみられる<sup>3)</sup>ことから、文献調査や地形判読時にこれらの特徴を活用して効率的に調査を進めることが望ましい。

#### 4.2 調査・設計段階

調査・設計段階の地質調査は、当初計画、工事計画、積算などに必要な資料作成を目的とし、地すべり範囲の抽出、すべり面の位置や性状、活動性、地下水位の把握が重要になる。

具体的な調査は、坑口部や小土被り部でのボーリング、微地形判読、動態観測、地下水位観測などが挙げられる。コア観察では、せん断面がすべり面か断層か

の特定が難しいケースもあり、地質構造を基に判断することもある。なお物理探査(屈折法弾性波探査)では、火山岩地帯のキャップロック構造や低角度断層による速度逆転層に留意し調査方法・評価を検討する。

#### 4.3 施工段階

施工段階の地質調査は、施工中に生じる問題点の予測および確認、設計変更、維持管理のための資料作成を目的とし、4.2と同様の留意事項がある。

具体的な調査は、トンネルルート沿いの地質踏査、坑口部を中心とした動態観測、地下水位観測、切羽観察、坑内からの地質調査などが挙げられる。正常堆積物では、地層の走向傾斜と切羽、坑口斜面との関係、変成岩では、片理面や破碎状況などに留意して調査方法を選定することが重要である。

#### 4.4 維持管理段階

維持管理段階の地質調査は、施工中、施工後に生じた問題点の確認、補償あるいは変状対策を目的とする。供用後に地すべりが発現すると、長期間の通行止めや第三者災害、路線変更など多大な影響が生じる。また、II期線施工時や大雨、地震時に地すべりが再活動することがある。施工時に地すべりが顕在化したトンネルでは、供用後しばらくは動態観測を続けることが多いことから、過去の活動履歴に応じて観測範囲や期間および、計測・監視方法を選定することが重要である。

### 5. まとめ

各事業段階での地質調査は、結果の検証やフィードバックが行われることは稀であり、それらの成果を各段階へと確実に引き継がれることもまた稀であるなど、業務発注の構造的課題がある。そのため、特に施工、維持管理においては、留意点の見過ごしによる本来回避できたトラブル遭遇など、土木地質リスク事象の発生を低減させるための地質リスクコミュニケーションによる調査結果の検証や引継ぎが重要になる。

#### 引用文献

- 1) 阿部徳和他(2022): 山岳トンネルにおける地質調査の留意点(断層破碎帯), 日本応用地質学会令和4年度研究発表会ポスターセッション(投稿中)
- 2) 佐々木靖人(2020): 地質体における土木地質調査の要点(1), 応用地質, Vol.61, No.4, pp.192-197.
- 3) 藤原治他(2004): 日本列島における地すべり地形の分布・特徴, 日本地すべり学会誌, Vol41, No.4, pp.335-344



# P7. X線CT画像解析と鉱物同定による堆積岩中の変形・破砕組織の定量的検討

Quantitative investigation of deformation and fracture structures in sedimentary rocks by X-ray CT image analysis and mineral identification ○濱田 藍・大山隆弘・田中姿郎 ((一財)電力中央研究所)

Ai Hamada, Takahiro Oyama, Shiro Tanaka

## 1. はじめに

内空変位が生じているトンネルにおいて、切羽観察、岩石試料のX線CT画像による岩石組織解析および鉱物同定等を行うことで、堆積岩中の変形・破砕組織の定量的な分類を試みた。さらに、内空変位の要因となる堆積岩中の変形・破砕の原因を考察した。

## 2. 調査対象の露頭観察と試料採取

調査地域の地質は、新第三紀中新世の頁岩である。図-1には観察したトンネル切羽下半の露頭写真とスケッチ、また切羽下半において代表的な岩石組織を有する試料の採取位置(01~05)をスケッチ上で示す。この箇所における土被りは約60mである。トンネル切羽西側では、頁岩が数~10数cmの厚みで層状に40°~50°の傾きで成層する(04)。頁岩は硬質で、層理に沿って剥離しており、剥離面には鏡肌が見られることもある。頁岩の層間には炭酸塩が薄く析出し、坑壁は乾燥していた。これに対し切羽東側は、軟質な粘土主体でわずかに褐色化しており、粘土の中には小礫状の頁岩が含まれ、坑壁は湿っていた(03, 05)。東西方向で坑壁の色が変化する境界には小規模な2条の断層が分布していた。東側の断層に沿って炭酸塩と黄鉄鉱の含まれる脈が観察された(02)。表-1には採取した5つの試料の採取方法および肉眼観察による特徴をまとめた。

## 3. X線CT画像解析による変形・破砕組織の可視化

採取した試料について、X線CT装置による撮影を行った。X線CT装置は電力中央研究所が所有するマルチスライス・ヘリカルX線CTスキャナー(Aquilion Precision, キヤノンメディカルシステムズ製)を用いた。撮影条件は管電圧140kVp, 管電流200mA, スライス厚0.25mmとした。図-2の上段には05の試料について、CT画像のグレースケール表示およびCT値に応じ異なる色で色付けした画像(カラースケール表示)を示す。カラースケール表示では、肉眼およびCT画像観察の結果に基づき、試料に含まれると推定される鉱物(炭酸塩, 黄鉄鉱), 岩石の状態(硬質, 粘土質), また破砕組織(礫状, 網目状など)を色で区別できるような閾値の基準を設け(表-2), その閾値を5試料に共通して設定し色分けを行った。05は全体的に低密度(青~黄)を示し、ところどころ礫状に硬質部(緑)が介在して見える。また青で示す低密度領域には、より低密度な網目状・筋状に見える組織(マゼンタ~黄)

が発達しており、網目状は低密度領域(青)を構成する岩石がさらに礫状になった組織を、筋状は断層に伴うせん断構造を示している可能性がある。

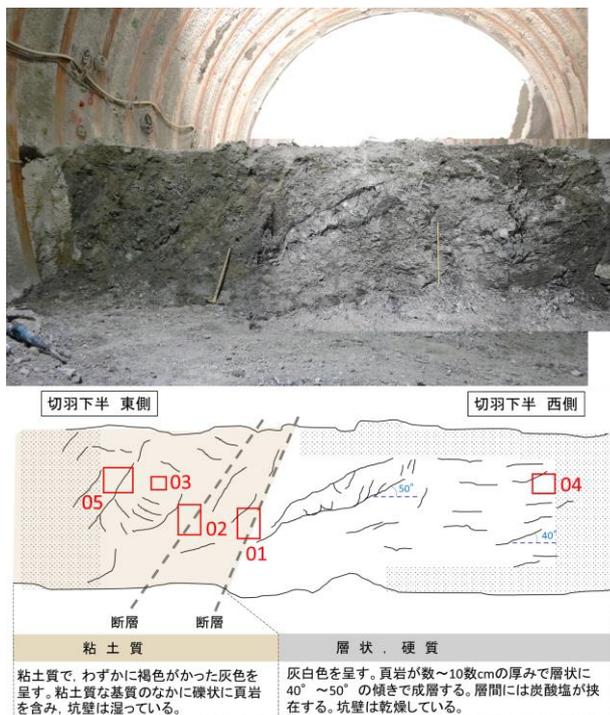


図-1 トンネル切羽下半の露頭写真およびスケッチ(紙面の左側:東側, 右側:西側, スケールは1m)。赤枠で囲ったところで試料採取を行った。数字はサンプリング番号を示す。

表-1 切羽下半で採取した岩石試料の肉眼観察による特徴

番号	採取方法	肉眼観察による試料の特徴
01	定方位	硬質と粘土質が互層する
02	定方位	断層を挟んで採取し、断層に沿って脈を伴う
03	定方位	中央は粘土質、周縁部に小礫を含む
04	不定方位	層状の硬質な頁岩、層間に炭酸塩が付着
05	不定方位	全体的に粘土質

表-2 カラースケール表示における色分けの基準

Gray	Color	CT画像上での特徴	推定される岩石や含有鉱物
	Red	特に高輝度に見える鉱物を抽出	炭酸塩や黄鉄鉱
	Green	硬質な礫を抽出	硬質な頁岩
	Blue	頁岩の基質を抽出	粘土鉱物の含有
	Magenta	基質(網目状)を抽出	粘土鉱物の含有
	Yellow	基質(筋状)、礫の間の充填部分を抽出	粘土鉱物の含有

## 4. XRD分析による鉱物同定とCT画像解析の比較

CT画像を取得した岩石試料からXRD分析用の試料を採取し、不定方位分析, 定方位分析を行った。定方位分析では、粉末試料の水簸により細粒分を濃集し定方位分析したのち、エチレングリコール処理によりスメクタイトを同定した。また水簸により濃集させた試料に塩酸処理を施して分析し、緑泥石を同定した。各試料からは、構成鉱物として、石英, 長石, 緑泥石,

イライトおよび黄鉄鉱が同定された。スメクタイトは硬質な部分と粘土質な部分の両方で少量であった。切羽西側の硬質な頁岩 (04) の層間の白色脈や 02 の断層沿いに分布する脈 (CT 画像で高輝度) からは方解石が検出されたが、切羽東側の粘土質なゾーンには、方解石はほとんど認められなかった。

同定された鉱物の相対量と CT 値を比較したところ、低密度領域 (マゼンタ～黄) では、粘土鉱物の量が比較的多い傾向にあった。緑～青はどの試料においても粘土鉱物を含むが、マゼンタ～黄と比較すると、石英・長石の量に富む傾向にあった。赤は方解石もしくは黄鉄鉱などの特定の鉱物が濃集し、CT 画像で高密度を示す箇所と一致する。以上より、肉眼観察に基づく表-2 の色分けの基準は含有鉱物の量と相関性があることが確かめられた。

## 5. 頁岩の薄片観察

図-2 の下段には、05 の岩石薄片写真を示す。05 試料の基質部分は、頁岩が破碎され、礫状になった組織がよく観察された。礫と礫の間には、非常に細粒な充填物が介在しており、XRD 分析の結果も考慮すると、微細なイライトや緑泥石、少量のスメクタイト、黄鉄鉱などであると考えられた。図-2 の上段の CT 画像上で紡錘状に高輝度に見える部分には、方解石や微粒の黄鉄鉱が濃集していることが確認された。

## 6. 考察 (頁岩中の破碎組織の形成と軟質化)

本研究で調査したトンネルの切羽下半では、切羽西側でこの地域の基盤となる層状の硬質な頁岩が分布し、切羽の中央より少し東側にある断層の活動に伴い、切羽東側にかけて破碎が進んだと考えられる。破碎して

できた頁岩礫の周りは微細な粘土鉱物や緑泥石などにより充填されていることから、頁岩破碎後に再固結が起こったと考えられる。一方、鉱物同定からは、硬質な部分でも粘土質な部分でもスメクタイトの含有量は少ないことが想定され、粘土鉱物の膨潤による内空変位への影響は小さいと考えられる。粘土化したゾーンから上盤側の切羽東側にかけては坑壁が湿っており、断層破碎に伴い、水みちが形成されたことが想定される。地表付近からの地下水の流入により、破碎部に充填する微細な黄鉄鉱の酸化や方解石の溶解が生じたことで、岩石が軟質化し、遮水壁になったことが考えられる。この切羽近傍の内空変位は約 80mm で、沈下量には不均一性があり、切羽東側の沈下量が西側に比べて大きいことが分かっている。先に述べたように、切羽東側は西側に比べ、断層運動に伴う破碎と地下水流入の影響による軟質化が進んでいることが内空変位の原因につながっている可能性がある。

## 7. まとめ

岩石の肉眼および CT 画像観察に基づき設定した CT 値による堆積岩の性状区分と、含有鉱物の量や種類の組み合わせには相関があることを確認した。この結果から、堆積岩を対象とした変形・破碎・粘土化等の定量的な評価に、CT 値が利用できる可能性が示された。

## 謝辞

本研究の現場調査にあたり (独) 鉄道建設・運輸施設整備支援機構の上野光様、今井啓文様には大変お世話になりました。また岩石薄片は田尻薄片製作所の田尻理恵様に製作いただきました。ここで謝意を表します。

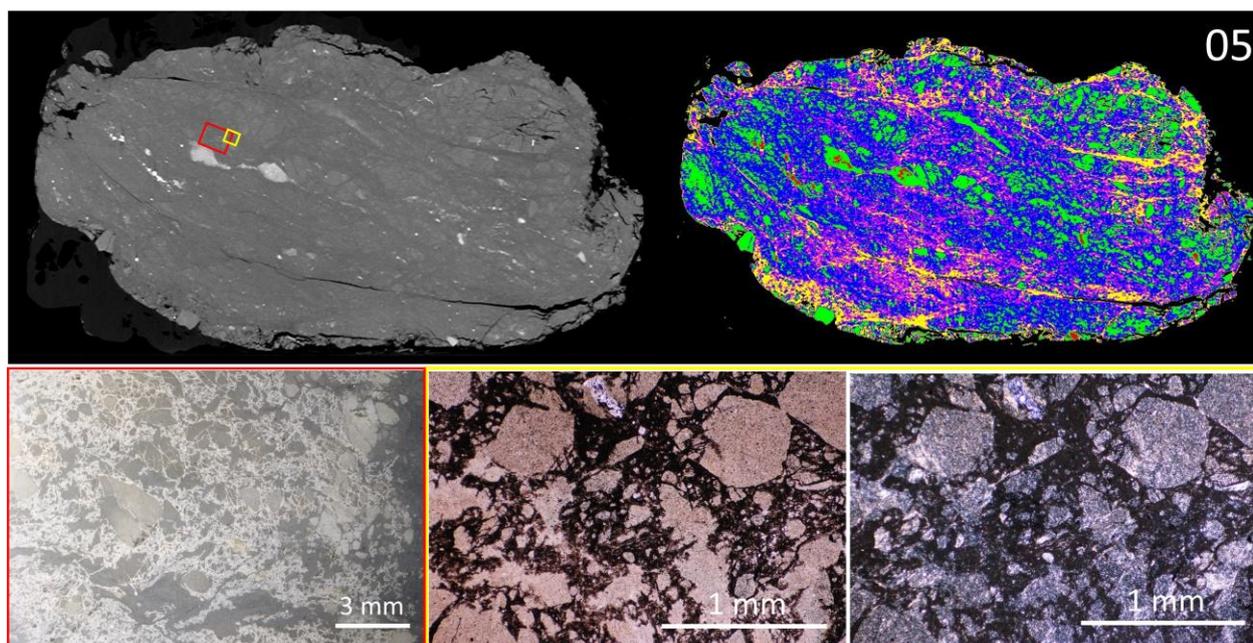


図-2 上段：05 試料の CT 画像 (左：グレースケール表示，右：カラースケール表示)，下段：05 試料の薄片画像。左：実体顕微鏡写真 (上段で赤枠)，中央：偏光顕微鏡写真 (オープンニコル)，右：偏光顕微鏡写真 (クロスニコル) (上段で黄色枠)

# P8. 山岳トンネルの地質・地盤リスクに関する基礎的研究：

## 地形・地質と支保パターンの相関性検討（予察）

Geomorphological and Geological Factors Controlling Support System Decision of Mountain Tunnels: a Preliminary Study

○荒谷 忠, 品川俊介 (土木研究所)  
Tadashi Araya, Shunsuke Shinagawa

### 1. はじめに

山岳トンネルは事前設計段階の地質・地盤の不確実性<sup>1)</sup>が大きく、「トンネルの地質調査結果は信頼できない」<sup>2)</sup>、「トンネル地質の予測が当たらない」<sup>3)</sup>、「設計と実施工が合わないことが多い」<sup>4)</sup>と言われる。この不確実性の影響、すなわち地質・地盤リスク<sup>1)</sup>に関する基礎的研究の一環として、筆者らは地形・地質と支保パターンの相関性を検討している。ここでは、近畿・中国・四国・九州地方の149トンネルについて切羽観察記録を分析した結果から、土被りと地質の組合せと支保パターンの関係を予察する。

### 2. 調査の手順

#### 2.1 施工時記録と地形・地質情報の収集整理

(1) 施工時記録：国土交通省（旧建設省）が1990年代以降に建設した山岳道路トンネルの切羽観察記録を基礎資料とした。トンネルの名称・位置、切羽の土被り、岩相、支保パターン（当初・実績）の情報が揃った切羽（19584箇所）を解析対象とした。支保パターンは6段階（B, CI, CII, DI, DII, DIII以下）に整理した。  
(2) 地形：切羽の土被り（h）を8段階（h<20m, 20~40m, 40~60m, 60~80m, 80~100m, 100~150m, 150~200m, h≥200m）に区分した。

表-1 地質区分

地質区分群		地質区分		データ数	
記号	区分名	記号	区分名	トンネル数	切羽数
AC	付加体・変成帯	AC1	四万十帯南帯	10	947
		AC2	四万十帯北帯	23	3310
		AC3	秩父帯南帯	5	769
		AC4	黒瀬川帯	2	382
		AC5	秩父帯北帯	4	267
		AC6	三波川帯	2	220
		AC7	美濃-丹波帯	11	960
		AC8	その他付加体・古期岩類	8	1080
PL	深成岩類・半深成岩類	PL1	領家帯	5	739
		PL2	山陽帯	13	1235
		PL3	山陰帯	6	656
		PL4	その他	11	990
PY	火山岩類・火砕岩類	PY1	第四系	3	249
		PY2	新第三系	13	1658
		PY3	古第三系	0	0
		PY4	中生界	14	1432
SE	堆積岩類	SE1	第四系	2	132
		SE2	新第三系	15	2237
		SE3	古第三系	4	624
		SE4	中生界	13	1669
Z	地質境界	Z	複数の地質区分が混在	6	28

AC6：文献5)の三波川変成帯（狭義）と四万十帯変成帯をあわせた広義の（伝統的な）三波川帯  
PL4：北部九州と京都府以東の花崗岩類（暫定）  
AC8：舞鶴帯・夜久野岩類，周防帯，秋吉帯，肥後帯

(3) 地質：地質区分（広域スケール）は、一般的な地帯構造区分<sup>5)</sup>や岩石区<sup>6)</sup>、地質時代に基づいて4群・21区分に分けた（表-1）。未固結堆積物等が薄く被覆する場合は、下位の地山の地質区分を採用した。岩相区分（切羽スケール）は、切羽観察記録の「岩相」の記載に基づいて31種類（暫定）に分類した。区分の基準は岩石名や層相に限らず、未固結、接触変成、熱水変質、断層、地質境界などの区分も設定した。

#### 2.2 地形・地質と支保パターンの相関性検討

地形（土被り）、地質（地質区分、岩相区分）の階級・区分ごとに、支保パターンの構成比、支保変更の割合を整理し、傾向を分析した。

### 3. 結果

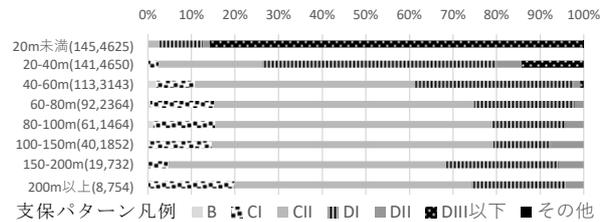


図-1 土被りと支保パターン構成比の関係  
( )内の数字は(トンネル数, 切羽数)を表す。

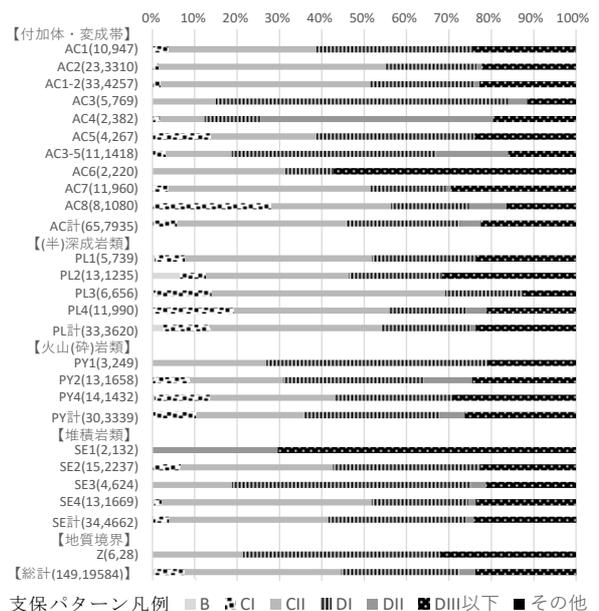


図-2 地質区別にみた支保パターン構成比  
記号は地質区分（表-1 参照）。  
( )内の数字は(トンネル数, 切羽数)を表す。

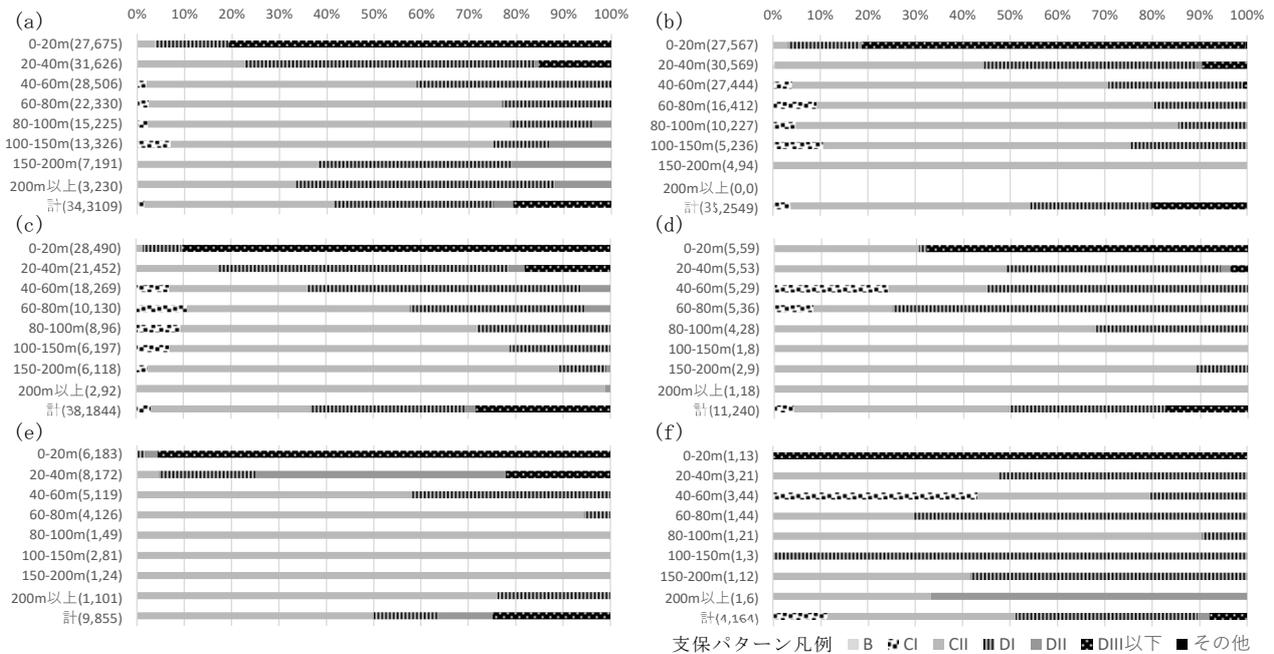


図-3 付加体・変成帯 (AC) を構成する主要岩相区分別にみた支保パターン構成比  
 (a) 泥岩類 (34, 3109), (b) 泥岩・砂岩 (35, 2549), (c) 砂岩 (38, 1844), (d) 混在岩 (11, 240),  
 (e) 片岩・千枚岩 (9, 855), (f) チャート (4, 164). ( )内の数字は(トンネル数, 切羽数)を表す.

### 3.1 土被りと支保パターンの関係

土被り  $h$  と支保パターンには明瞭な相関がある (図-1).  $h < 20\text{m}$  は DIII 主体,  $h < 60\text{m}$  は  $h$  が小さいほど支保が重く, それ以深は支保構成が概ね一定となる.

### 3.2 地質区分と支保パターンの関係

地質区分により構成比が異なる (図-2). 付加体・変成帯 (AC) は地質帯により傾向が異なり, 四万十帯 (AC1-2) は支保が軽く, 秩父帯・黒瀬川帯・三波川帯 (AC3-6) は重い. (半) 深成岩類 (PL) は支保が軽く, 火山岩類・火砕岩類 (PY) は中古生界 (PY4) を除き支保が重い. 堆積岩類 (SE) は中庸だが, 固結度の低い第四系 (SE1) は DII~DIII が採用される. 支保パターンの変更増は PL や SE は軽微であるのに対し, AC (特に AC3-6) は高土被りでも変更増の割合が高い.

### 3.3 岩相区分と支保パターンの関係

地山評価が最も難しいと考えられる AC について, 主要岩相ごとに  $h$  と支保パターン構成比の関係を示す (図-3). (a) 泥岩類は  $h=60\text{m}$  付近まで深部ほど支保が軽い,  $h \geq 150\text{m}$  にも DI~DII が多い. (b) 泥岩・砂岩, (c) 砂岩は(a)より  $h$  に対する支保の遞減が緩やかで,  $h \geq 150\text{m}$  の高土被り部は CII 主体となる. (d) 混在岩は(a)に比べ,  $h < 100\text{m}$  の DI の比率が高い. (e) 片岩・千枚岩は,  $h < 60\text{m}$  は DI~DII,  $h \geq 60\text{m}$  は CII が主体である. (f) チャートは  $h$  によらず DI~DII が多い.

## 4. 考察とまとめ

上述のように, 土被りと支保パターンの間には相関があるが, 地質区分・岩相区分によりその傾向が異なることがわかった. トンネル支保パターンの概略設計手法として, 同地域・同岩種の施工実績に基づく, 土

被りに従った支保設計が提唱されており<sup>7)</sup>, 切羽観察結果の分析はそうした検討に資する可能性がある. 今後トンネル数・切羽数を増やし, 施工上問題のある岩石等も含め, より慎重に検討していく必要がある. 謝辞: 施工時記録を提供された国土交通省各事務所, 土木研究所トンネルチームの皆様へ感謝申し上げます.

## 文献

- 1) 国土交通省大臣官房技術調査課ほか (2020): 土木事業における地質・地盤リスクマネジメントのガイドライン, 69p.
- 2) 鈴木守・富田宏夫 (1993): トンネル地質調査の性格と問題点(1), トンネルと地下, Vol.24, No.9, pp. 689-695.
- 3) 飯酒孟久夫 (2001): トンネル地質の予測が当たらない諸因子について, 平成13年度シンポジウム予稿集, 日本応用地質学会, pp. 52-60.
- 4) 土木学会トンネル工学委員会技術小委員会事前調査・設計検討部会 (2007): より良い山岳トンネルの事前調査・事前設計に向けて, トンネル・ライブラリー18, 土木学会, p. 11.
- 5) 磯崎行雄ほか (2010): 日本列島の地体構造区分再訪 太平洋型 (都城型) 造山帯構成单元および境界の分類・定義, 地学雑誌, Vol.119, No.6, pp. 999-1053.
- 6) 中島 隆 (2018): 日本の花崗岩 2017 年における総括, 地質学雑誌, Vol.124, No.8, pp. 603-625.
- 7) 中川浩二 (2004): 山岳トンネルの事前調査・設計における問題点と今後の展望, 土木学会論文集, VI-65, pp. 1-13.

# P9. 第四紀テフラの U-Th-Pb 年代測定 (その 8) : 近畿のテフラへの適用

U-Th-Pb dating for Quaternary tephra (part 8): application to tephra in the Kinki region

○伊藤久敏 (電力中央研究所)

Hisatoshi Ito

## 1. はじめに

第四紀テフラ (特に広域テフラ) の噴出年代は、火山活動の履歴評価に有用であるだけでなく、断層の活動性評価においても重要であり、放射性廃棄物の地層処分を行う上でも、高精度な第四紀テフラの年代測定ニーズは高い。今回、発表者は、北アルプスで約 1.7 Ma に発生した巨大噴火に関連したテフラ (福田火山灰) を近畿地方で確認すべく、淡路島にてテフラ採取を行い、ジルコンの U-Pb 年代測定を行った。その結果、同テフラの確認には至らなかったが、 $2.48 \pm 0.06$  Ma (誤差は  $2\sigma$ , もしくはそれに相当する値で表示。以下同様) に噴出した層厚 1 m のテフラを確認した。また、淡路島北部の古土壌には当地域に広域に露出する花崗岩由来と考えられる 80~100 Ma のジルコンが多く含まれていた。これらの事実から、淡路島の成り立ちについて若干の考察を行った。

## 2. 淡路島のテフラと採取した試料

福田火山灰は、近畿地方では 1 m 程度の層厚をもち、淡路島北部で久留麻 (くるま) 火山灰<sup>2)</sup>と呼ばれている。淡路島北部の大阪層群中には、下位より、釜口火山灰、浅野火山灰、久留麻火山灰が分布する<sup>2)</sup>。また、淡路島中部の大阪層群中には、明神火山灰、王子火山灰、佐古火山灰、倭文 (しとお) 火山灰、研城ヶ丘火山灰、園出火山灰が分布する<sup>2)</sup>。このうち、研城ヶ丘火山灰は、 $3.6 \pm 0.6$  Ma のフィッシュン・トラック (FT) 年代が報告されている<sup>3)</sup>が、大阪層群堆積前の年代を示すことからこの年代値を再検討する必要性が水野 (1993)<sup>2)</sup>により指摘されていた。今回、淡路島中部の図-1 に示す 2107-1 地点にて研城ヶ丘火山灰 (図-2 に示すように層厚 1m の白色細粒の火山灰。鉱物をほとんど含まず、ほぼ火山ガラスで構成される) を採取し、ジルコンの U-Pb 年代測定を行った。また、かつて久留麻火山灰が確認された地点である淡路島北部の 2107-2 地点にて火山灰質な古土壌 (図-3) を採取し、ジルコンの U-Pb 年代測定を行った。

## 3. 結果

両試料から、ジルコンを分離し、Ito et al. (2021)<sup>4)</sup>に示した方法で U-Pb 年代測定を実施した。その結果、研城ヶ丘火山灰からは、測定した 20 粒中、11 粒の加重平均年代として、 $2.48 \pm 0.06$  Ma の良好な年代が得られた (図-4)。他の 9 粒は 32~1523 Ma を示した。また、

2107-2 の火山灰質古土壌からは、測定した 29 粒子から期待した福田火山灰に相当する年代 (約 1.7 Ma) のジルコンは得られず、大部分のジルコンが白亜紀の年代を示し、1 粒子のみから、 $2.39 \pm 0.30$  Ma の年代が得られた (図-5)。

## 4. 考察

今回得られた研城ヶ丘火山灰のジルコン U-Pb 年代 ( $2.48 \pm 0.06$  Ma) は、大阪層群の最下部に相当する年代であり、淡路島中部における大阪層群最下部層の存在が放射年代学的にも確認できた。

残念ながら、2107-2 地点から福田火山灰に相当するテフラを確認することは出来なかったが、ほぼ  $90.0 \pm 3.2$  Ma のジルコンで構成されることが分かった。今回の試料採取地点付近に広く分布する白亜紀花崗岩から同程度のジルコン U-Pb 年代が得られている<sup>5)</sup>ことから、後背地の白亜紀花崗岩が風化し、運搬・堆積を経て、土壌化したものと判断される。

以下に、今回の結果も踏まえて、淡路島の成り立ちについて考察する。

Ito (2004)<sup>6)</sup>は、淡路島の白亜紀花崗岩のアパタイトの FT 年代等を根拠に、淡路島は第四紀に急激に上昇したと推定した。水野 (1993)<sup>2)</sup>は、淡路島北部での東西の地質断面図を示し、中央部の花崗岩の隆起により、大阪層群が急傾斜していること等から、断層の主要な活動時期が大阪層群堆積後であると推定している。これらのことは、淡路島 (南部を除く) が陸化し、現在の地形 (最大標高 500 m 程度) が形成されたのは、最近 100 万年以内の出来事であったことを示していると考えられる。なお、今回採取した淡路島中部の研城ヶ丘火山灰 (標高 43 m) 中には、白亜紀花崗岩由来と考えられる 85~88 Ma のジルコンが 3 粒含まれたことから、約 2.5 Ma の大阪層群最下部層堆積時には既に淡路島北部~中部の白亜紀花崗岩が地表に露出し、花崗岩礫を運搬・堆積する環境にあったことも考えられるが、さらに古い 104~1523 Ma のジルコンが 3 粒含まれたことから、研城ヶ丘火山灰中の異質ジルコンは、2.5 Ma に陸化していたと想定される淡路島南部の花崗岩や和泉層群由来とも考えられる。いずれにせよ、第四紀テフラのジルコン U-Pb 年代は、テフラの噴出年代以外にもテクトニクスに関する示唆も得られる有用なツールである。

最後に、水野清秀氏には淡路島のテフラに関する情

報を教えてください、感謝申し上げます。

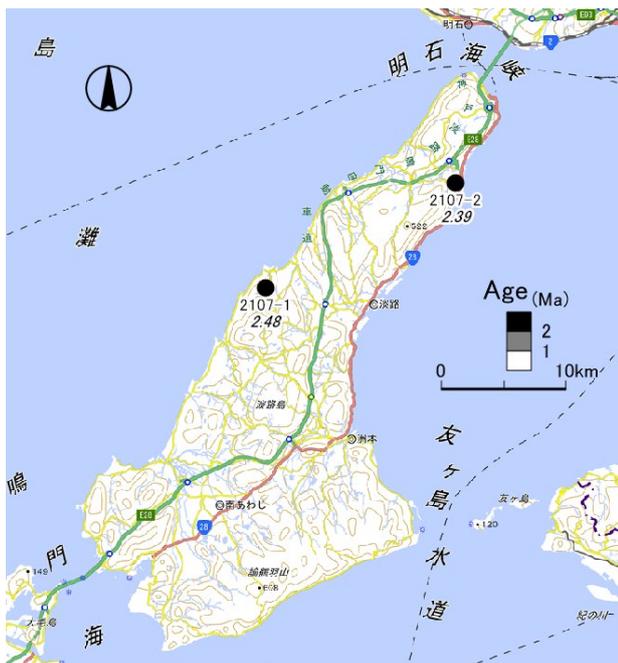


図-1 試料採取地点. 試料名の下にイタリックでジルコンの U-Pb 年代を示した.



図-2 研城ヶ丘火山灰 (試料名 : 2107-1)



図-3 火山灰質古土壌 (試料名 : 2107-2)

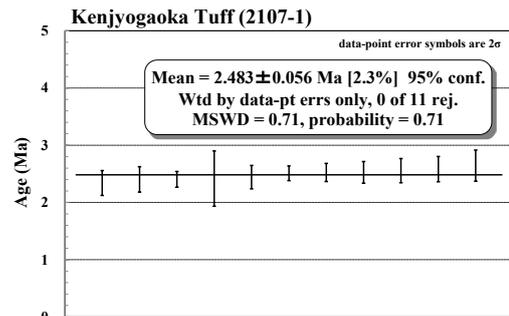


図-4 研城ヶ丘火山灰のジルコン U-Pb 年代測定結果

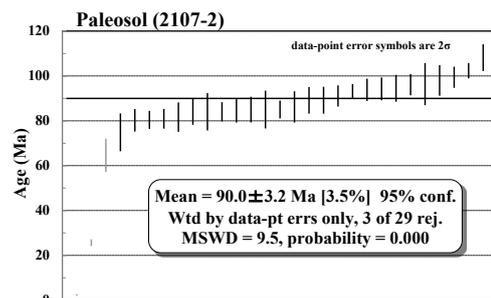


図-5 古土壌のジルコン U-Pb 年代測定結果

## 文献

- 1) 長橋良隆・里口保文・吉川周作 (2000) : 本州中央部における鮮新-更新世の火砕流堆積物と広域火山灰層との対比および層位噴出年代. 地質雑, 106, 51-69.
- 2) 水野清秀 (1993) : 淡路島. 市原 実編「大阪層群」. 創元社, 127-141.
- 3) Horie, S. (1986): Fission-track dating data on fresh-water sediments for the study of land connection between the Asiatic continent and Lake Biwa through the Seto Island Sea. Proc. Japan. Acad., Ser. B, 62, 377-380.
- 4) Ito, H., Adachi, Y., Cambeses, A., Bea, F., Fukuyama, M., Fukuma, K., Yamada, R., Kubo, T., Takehara, M. and Horie, K. (2021): The Quaternary Kurobegawa Granite: an example of a deeply dissected resurgent pluton. Sci. Rep., 11, 22059.
- 5) 伊藤久敏・田村明弘・森下知晃・荒井章司 (2010) : 野島断層およびその周辺の花崗岩質岩から得られたジルコンの U-Pb および FT 年代 - LA-ICP-MS による U-Pb 年代測定法の新たな展望 -. 地質雑, 116, 544-551.
- 6) Ito, H. (2004): Apatite fission-track dating of fault-related rocks along the Nojima and Kusumoto faults and its tectonic significance. Geophys. Res. Lett., 31, L21610, doi:10.1029/2004GL020776.

# P10. 島尻層群泥岩における粘土鉱物・黄鉄鉱の形成

Formation of clay minerals and pyrite under diagenesis in the mudstone of the Shimajiri Group

○鈴木茂之（岡山大学），木村隆行，後根裕樹，嶋 将志，石川敦代（エイト日本技術開発），伊佐真幸，備瀬知康，安里 隆，中園幸樹（内閣府沖縄総合事務局）

Shigeyuki Suzuki, Takayuki Kimura, Yuki Ushirone, Shouji Shima, Nobuyo Ishikawa, Masayuki Isa, Tomoyasu Bise, Takashi Asato, Kouki Nakazono

## 1. はじめに

沖縄本島南部に分布する新第三系島尻層群の泥岩は、乾くと「クチャ」と呼ばれるたいへん軟質な産状をなし、強度が低いために初生地すべりを発生させることで知られている。この地すべり発生の要因を検討するために沖縄県中頭郡中城村伊集地内でボーリング調査が行われた。ここでは得られたコア試料の薄片顕微鏡観察による堆積学的検討とX線分析による鉱物鑑定を行い、地層の強度が低い原因を検討した。

## 2. ボーリング調査地点周辺の地形と地質

調査地は平坦に近い台地，および遷急線を境に急傾斜する斜面からなる（図-1）。斜面側には初生地すべりによる馬蹄形の滑落崖が連続している。ボーリング掘削は滑落崖に接した台地上で行われた。



図-1 ボーリング位置及び周辺の地形

コア試料は標高 133.74m から深度 18m まで採取された。深度 10.90～11.52m に砂岩が挟まれる以外は塊状

な泥岩からなる。泥岩には地層境界が不明瞭な厚さ 1cm～10cm 程度の砂岩が挟まれることがある（図-2）。これらの地層は東側に数度程度緩く傾斜している。

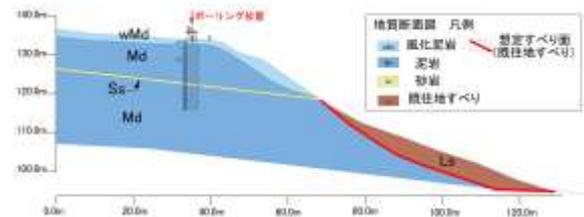


図-2 ボーリング位置周辺地質断面図

地質は全体に均質に見えるが、色彩特性によって深度 10～15m を紫化進行帯とし、それ以外の紫化漸移帯と区別した。X線分析は 2, 5, 7, 8, 11, 12, 14, 14.3, 16, 17m 直下 5cm の 10 試料で行った。11m 直下試料は砂岩でそれ以外はすべて泥岩である。岩石薄片は 2, 11, 16m 直下の 3 試料から作成した。

## 3. X線分析結果

試料は粘土，シルト・砂，有孔虫など化石，不透明有機物，不透明鉱物からなる。粘土は分析の結果，スメクタイト，緑泥石，イライトからなる。紫化進行帯の試料ではイライト/スメクタイト混合鉱物，斜ブチロル沸石を伴うものがある。イライト/スメクタイト混合鉱物は 17m 直下試料でも検出された。またリートベルト法解析によるとスメクタイトは紫化進行帯で多くなる。碎屑性のシルト・砂はX線分析でも石英が主体で斜長石も普遍的に含むことが確認された。主に化石を構成すると考えられる方解石はすべての試料から検出された。ピーク強度による比較では，紫化進行帯で方解石が明瞭になる傾向が認められる。陸源の植物遺骸によると推測される炭質物は砂岩以外のすべての試料で検出された。不透明鉱物はすべての試料からは同定できなかったが，含有量が多い紫化進行帯の試料では黄鉄鉱であることが確認された。

## 4. 鏡下での堆積物の特徴

顕微鏡観察の結果 2, 16m 直下の 2 試料はシルト混じり泥岩，11m 直下の試料は極細粒泥質砂岩であった。

16m 直下試料では粘土の色調とシルト含有量の違いによる不明瞭な葉理が部分的に認められたが、全般に塊状である。

泥岩は粘土が主体でシルトから砂サイズの石英・長石を含み、植物片、有孔虫化石も普遍的に伴う。有孔虫化石内部には黄鉄鉱が形成されている(図-3)。粘土を構成する鉱物を明確に識別鑑定することは困難であるが、数 $\mu$ 程度で粒状から板状をなしオレンジ色やや高次の干渉色をなすものはイライト、数 $\mu$ 程度の範囲で不定形をなしオープンニコルで緑色を呈しクロスニコルで青灰色の異常干渉色をなすものは緑泥石と考えられる。粘土のそれ以外の判別困難な部分はX線分析から、主にスメクタイトなどからなると推測される。

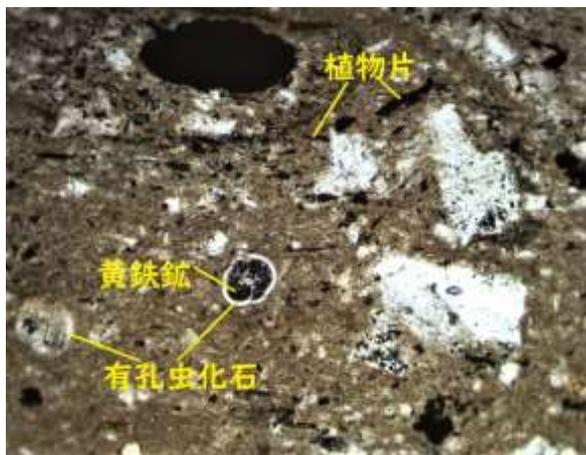


図-3 16m 直下試料：横 1mm：オープンニコル

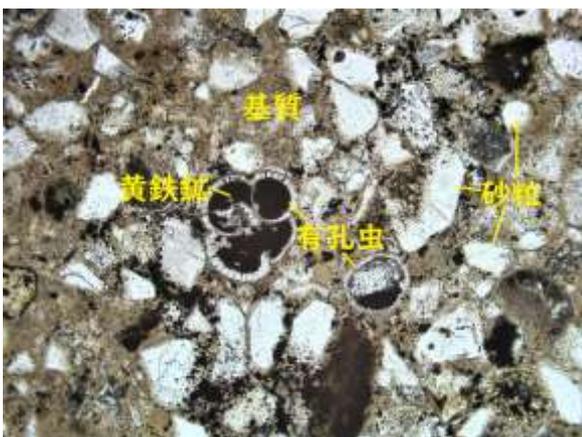


図-4 11m 直下試料：横 1mm：オープンニコル

砂岩は主に極細粒サイズの砂からなる。砕屑粒はシルトサイズから細粒サイズのものも含む。鏡下観察でも石英と斜長石が確認でき、さらに岩石片として流紋岩、デイサイト、チャートが少量認められた。基質の粘土は 30%程度とやや多く淘汰度はあまり良くない(図-4)。粘土を多く含むのでX線分析でも粘土鉱物は泥岩と同様に検出されている。有孔虫化石は泥岩にも

認められるが、砂岩ではより多く含まれる。方解石は有孔虫の殻の部分として認められる。ごく少量であるが海緑石が認められることから還元環境で堆積したものと推測される。

### 5. 黄鉄鉱の産状

不透明な黄鉄鉱と有機物は反射光を当てることで区別できる。黄鉄鉱は有孔虫化石内部に顕著に形成されている。また粘土中でも植物片の多い部分や植物片中にも形成されている。これらは微細な粒状やその集合体をなし、フランボイダル黄鉄鉱も認められる(図-5)。続成過程でノジュールなどに形成される炭酸カルシウムや酸化鉄などは、生物遺骸に由来する有機物が関与して形成されることが知られている<sup>1)</sup>。有孔虫化石内の黄鉄鉱は有孔虫軟体部の、粘土中の黄鉄鉱微粒子は植物遺骸などの有機物がその形成に関与していることが考えられる。このことは島尻層群の堆積物には、現在認められる以上の有機物が含まれていたことを示す。

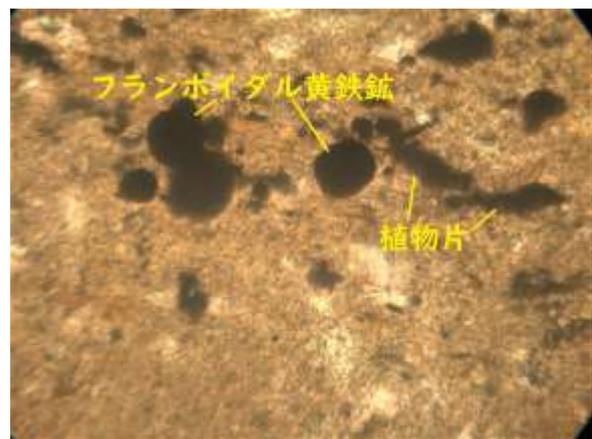


図-5 16m 直下試料：横 0.5mm：オープンニコル

### 5. まとめ

島尻層群の堆積物には有孔虫化石による方解石を含み、また有機物を含んでいる。砂岩では有孔虫を多く含むことから、砂岩をよく挟む紫化進行帯でこの傾向は大きくなると考えられる。島尻層群の堆積物は、カルシウムと有機物を有意に含んでいることによって、スメクタイトに富む強度が低い粘土鉱物組成を形成した可能性が考えられる。

### 文献

- 1) 吉田英一 (2019)：球状コンクリーションの科学，近未来社，pp.200.

# P11. 島尻泥岩の色彩特性と鉱物区分

Color characterization and Mineralogical classification of Shimajiri Mudstones

○木村隆行 (エイト日本技術開発), 鈴木茂之 (岡山大学), 後根裕樹, 嶋将志, 石川敦代(エイト日本技術開発)

伊佐真幸, 備瀬知康, 安里隆, 中園幸樹(内閣府沖縄総合事務局)

Takayuki Kimura, Shigezuki Suzuki, Yuki Ushirone, Shouji Shima, Nobuyo Ishikawa,

Masayuki Isa, Tomoyasu Bise, Takashi Asato, Kouki Nakazono

## 1. はじめに

島尻泥岩における初生地すべり候補地のボーリングコアを用い、顕微鏡写真で鉱物の色彩を把握するとともに、コアの色彩と含有粘土鉱物量及び元素量の相関を把握した。色彩測定は、FUSOU 製 PRISMO-MIRAGE 分光測色計を使用し、含有鉱物量は Rigaku 製 MiniFlex600 を使用し、元素量は Rigaku 製蛍光 X 線分析装置 NEX QC を用いた。その関連式で鉱物変化を推定した結果を報告する。

## 2. 鉱物の色彩分布状

顕微鏡写真を図-1 左に示すが、有孔虫の殻は方解石になり中は黄鉄鉱が分布した。またイライトは 0.01mm

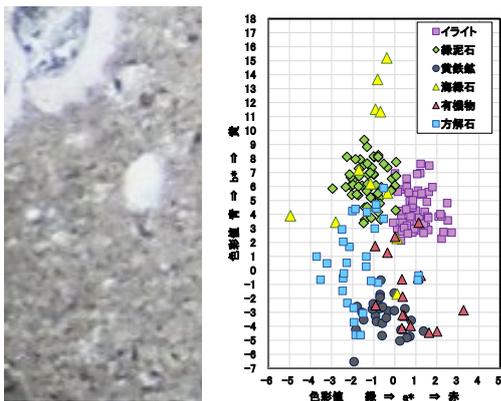


図-1 顕微鏡写真(横 0.2mm)と各鉱物の a\*b\*値

程度の針状結晶として広く分布し、やや緑色化したものが緑泥石と考えられた。さらに拡大印刷したものを色彩測定し a\*b\*値を図-1 右に示した。緑泥石とイライトは近接した色彩エリアに分布し、+a\*-b\*側がイライトになっている。方解石、有機物もある色彩範囲に集中する傾向を示した。

## 3 コアの色彩と鉱物含有量との相関

コアの色彩分布と針貫入勾配 Np 分布を図-2 に示す。中間の ZoneIII で紫化 (+a\*-b\*) が進行し、針貫入勾配 Np 値が低い傾向があることが判明した。また、この ZoneIII は微細砂層がしばしば介在し、有孔虫が多く顕微鏡下で観察され、殻はすべて方解石の変化し、中身は黄鉄鉱に変化していた。

この色彩値 (+a\*-b\*) と X 線回折によるスメクタイト含有量の相関を図-3 に示した。また同様に色彩値 a\* と蛍光 X 線で把握した CaO 重量%との相関も合わせて示した。いずれも色彩値と相関があり、スメクタイトが多い箇所は Ca も多い可能性があることが判明した。つまり、微細砂の多い箇所は有孔虫も多く分布し、その殻は方解石 CaCO<sub>3</sub> に変質している。Ca は水和力の強い元素であるのでイライト化を妨げるとされており<sup>1)</sup>、イライト化しなかったスメクタイトが多く残留している可能性が考えられた。

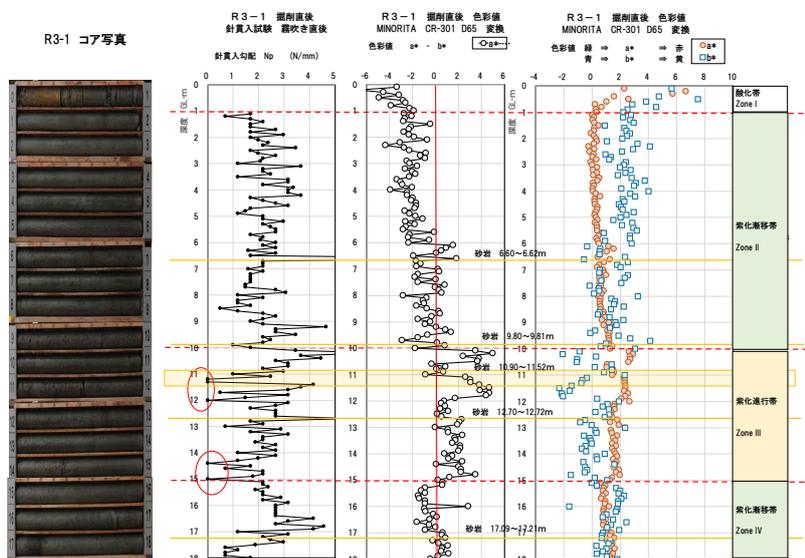


図-2 色彩分布と Np 分布

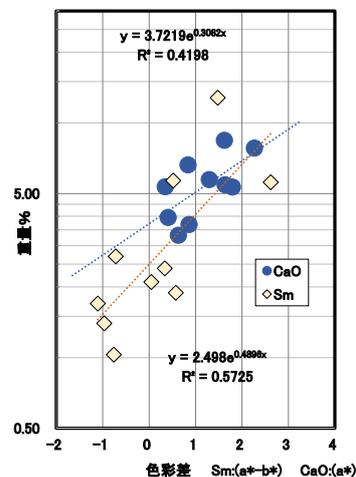


図-3 色彩とスメクタイト・Caの相関

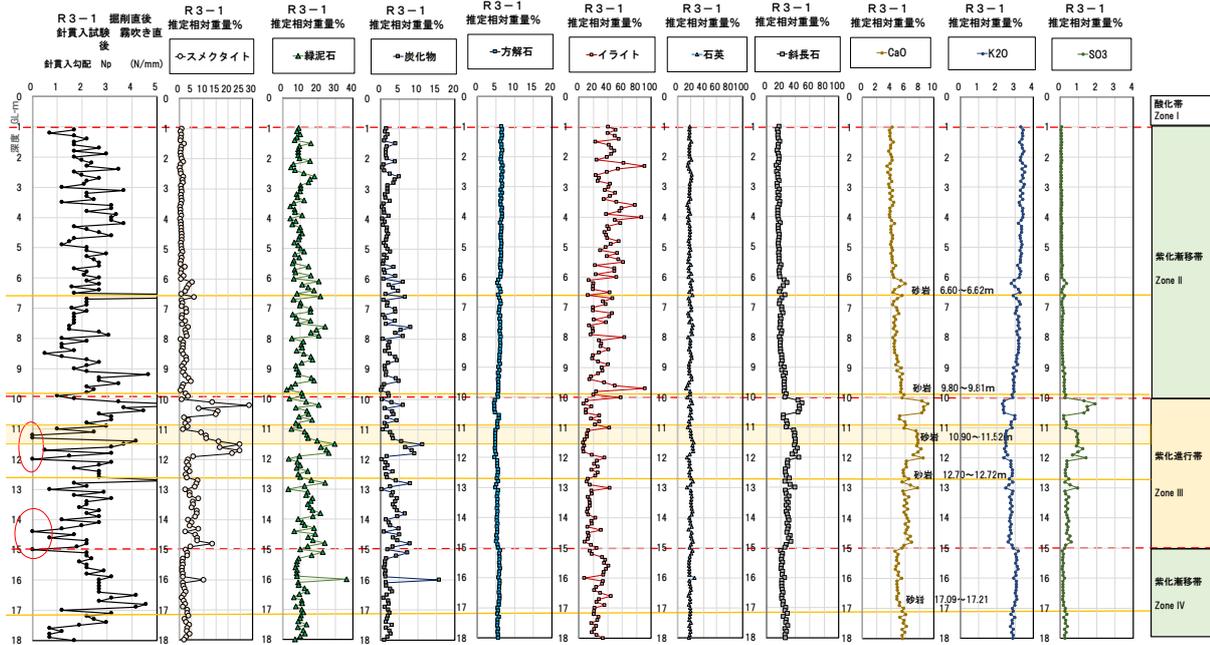


図-4 Np と各鉱物含有量および CaO の分布

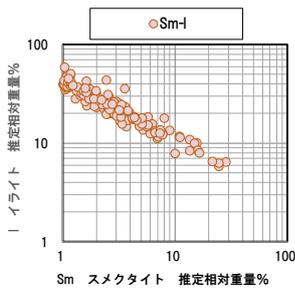


図-5 Sm-I 相関図

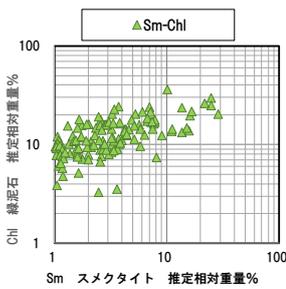


図-6 Sm-Chl 相関図

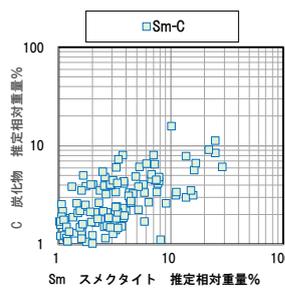


図-7 Sm-C 相関図

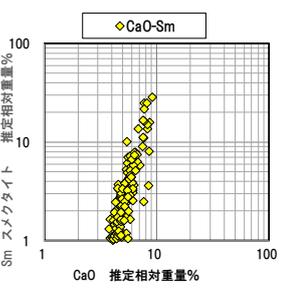


図-8 CaO-I 相関図

また、各鉱物含有量も元素量も色彩値との相関があり、それぞれの相関式から各鉱物含有量分布図を示したのが図-4 である。各鉱物の増減では ZoneIII で、スメクタイトや緑泥石、炭化物、斜長石が多くなるのに対しイライトが減少するのが特徴的である。定方位法 X 線回折では、イライト/スメクタイト混合層鉱物を確認しており、続成作用の過程では高温高压になるほどスメクタイトからイライトへ変質していくと考えられる。また、スメクタイトの多い ZoneIII では、CaO と SO<sub>3</sub> が多く K<sub>2</sub>O が少ない傾向が認められる。図-5~7 に、スメクタイトに対するイライト、緑泥石、炭化物の含有量の相関を示すが、唯一イライトが顕著な負の相関になっている。つまり、スメクタイトが減少すればイライトが増大する。図-8 は CaO とスメクタイトの相関で、Ca の多い部分はイライト化が進行せずスメクタイトが増大している。図-9 は CaO とイライトの関係で、Ca が多ければイライトは減少する。図-10 は黄鉄鉱 FeS<sub>2</sub> の S を反映し、S は有孔虫の中に多く形成している。そのため、有孔虫が多い箇所ではスメクタイトが形成された場合、Ca も多くイライト化が進行しないメカニズムが想定される。

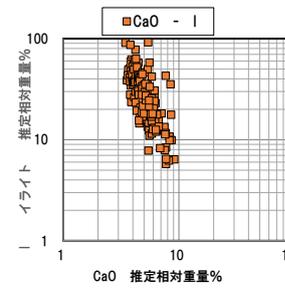


図-9 CaO-I 相関図

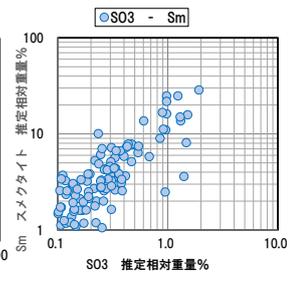


図-10 SO<sub>3</sub>-Sm 相関図

#### 4. まとめ

島尻泥岩にはスメクタイトを多く含有する Zone があり、その把握に色彩測定が有効である可能性が判明した。また、スメクタイトが多い Zone はイライト化が進行していない残留スメクタイト帯である可能性が高い。その堆積環境や形成条件が地すべり分布と関係している可能性があり、今後の課題と考えられる。

#### 文献

- 井上厚行 (1990) : スメクタイトからイライトの生成機構, 鉱物学雑誌, 第 19 巻, pp.53-61.

# P12.島尻泥岩の地すべり地帯における約 100 年間の地すべり拡大傾向

Trend of spread landslide for about one hundred years in Shimajiri mudstone landslide area

○後根裕樹, 木村隆行, 嶋将志, 石川敦代 (エイト日本技術開発), 鈴木茂之 (岡山大学)

Yuki Ushirone, Takayuki Kimura, Shouji Shima, Nobuyo Ishikawa, Shigeyuki Suzuki

伊佐真幸, 備瀬知康, 安里隆, 中園幸樹 (内閣府沖縄総合事務局開発建設部 河川課)

Masayuki Isa, Tomoyasu Bise, Takashi Asato, Kouki Nakazono

## 1. はじめに

沖縄本島東海岸の中頭東部地区は、島尻泥岩の分布域に位置し、地すべり多発地帯にあたる。この地区で発生する初生・準初生地すべり<sup>1)</sup>は、明確な地すべり地形を呈さない中～高位段丘面の崖縁部（以下、台地縁部という）において突発的に発生する特徴をもち、事前の発生の予測は困難を伴うことが課題とされる。

しかし、当地区の台地縁部における経年的な地形変化を調査し、過去の地すべりの拡大傾向を考察することで、将来の地すべり発生の予測や対策の優先度検討等に資する情報が得られる可能性が考えられる。

そこで本稿では、中頭東部地区における新旧地形図の比較から、台地縁部の約 100 年間の後退量を調査し、過去の地すべりの拡大傾向について考察した。

## 2. 調査の手順

調査地は、中頭東部地区南東部を対象とした。解析には、2019 年に取得された LP データに基づく地形図（以下、LP 地形図という）と、1917 年に作成された 5 万分の 1 地形図『興那原』（以下、古地図という）を使用した。

調査では、2 つの地形図を重ね合わせ、それぞれ台地縁部付近にある等高線（120m, 130m）のずれの平面距離を 10m 間隔で計測・整理することで、約 100 年間における台地縁部の後退量を推定した。また、この結果から、後退量が大きかったと判断された地点では、2 つの地形図からそれぞれ横断面図を作成し、約 100 年間の横断形状の変化についても調査した。

なお、古地図については、GIS 上で図面の四隅に記載される座標系（旧日本測地系）をもとに LP 地形図と重ね合わせた。また、古地図において、台地縁部付近の等高線が崩壊記号の表記などにより一部記載されていない区間については、崩壊記号の縁や、その上下の等高線の間部付近をとるなど、おおよその等高線の位置を推定することで補完した。

## 3. 結果

図-1 に 2 つの地形図を重ね合わせた図を示す。古地図は、LP 地形図に比べ精度が低いと考えられる点に留意する必要があるが、古い集落や尾根の位置、台地

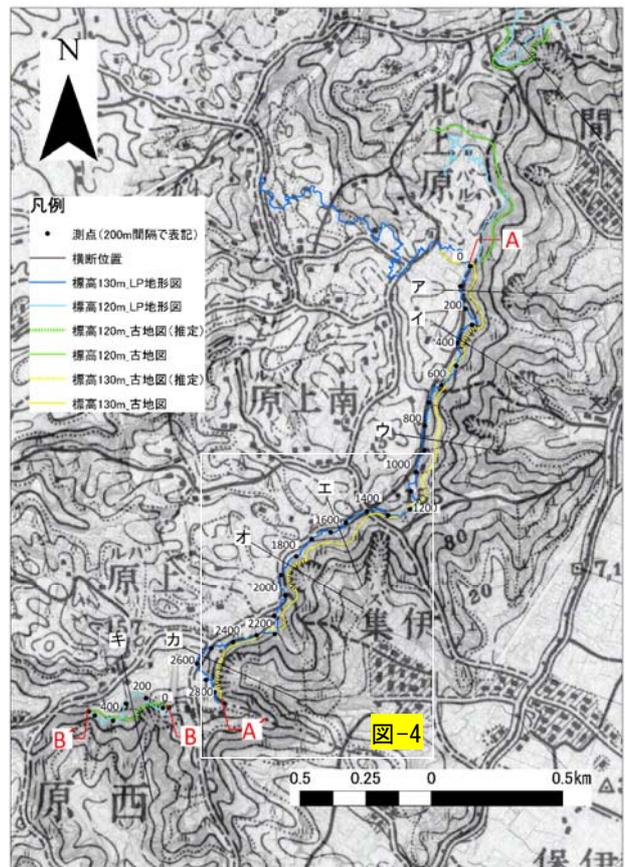


図-1 調査地の新旧地形図（重ね合わせ）

上に土地改変されずに残る小丘の位置などは、LP 地形図とほとんどずれはなく、台地縁部の大よその後退量を推定するにあたっては、概ね信頼できる精度があるものと判断された。

2 つの地形図の台地縁部付近（図-1 の A-A'、B-B'）に沿った等高線の位置を比較した結果、古地図よりも LP 地形図のほうが、等高線が全体に台地の内側に位置し、台地縁部が背後へと後退した傾向が確認された。またその後退量は、大きいところで 40～60m 程度、最大で 80m 程度と見積もられた（図-2）。

また、代表箇所で作成した断面図によると、台地縁部より斜面下では、約 100 年間で鉛直方向に標高が 10～25m 程度低くなっており、台地縁部から斜面下にかけて小～大規模の土砂移動があったことが示唆された（図-3）。

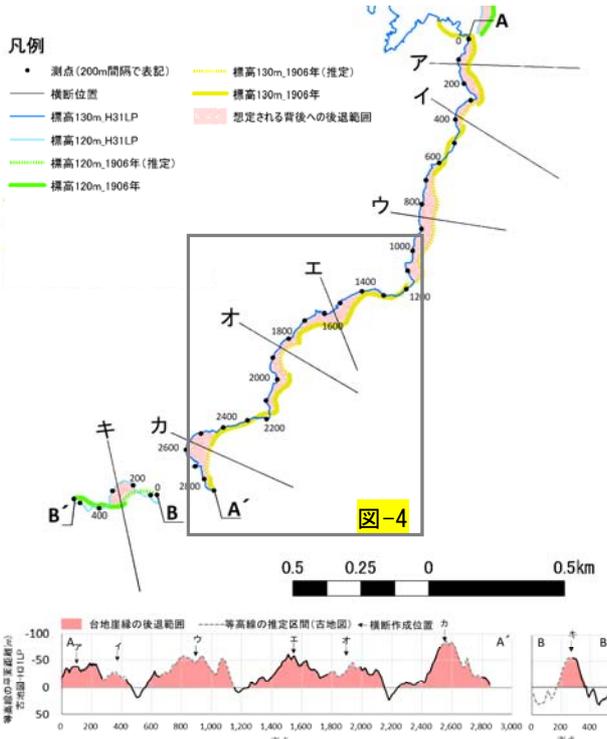


図-2 台地縁部 (A-A'、B-B') において想定された背後への後退範囲 (上図) と後退量 (下図)

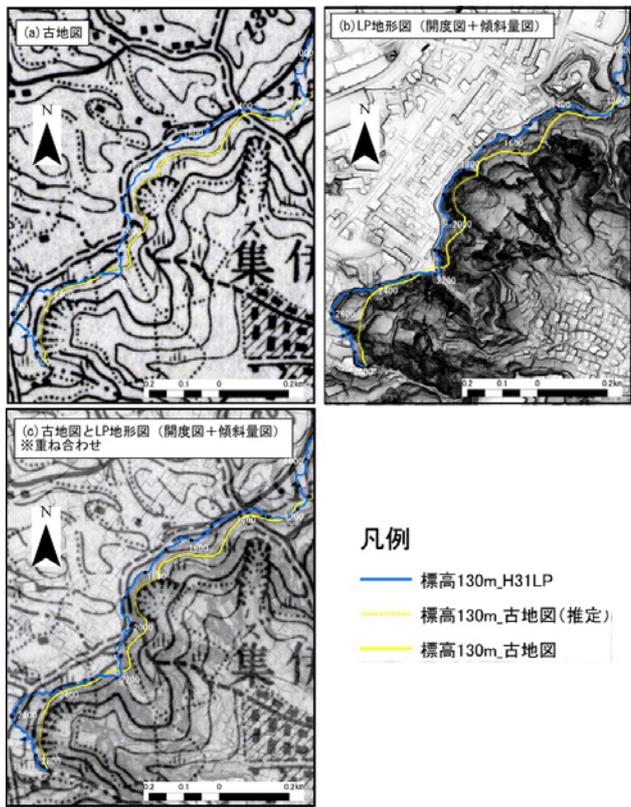


図-4 後退量が大きかったエリアの地形図

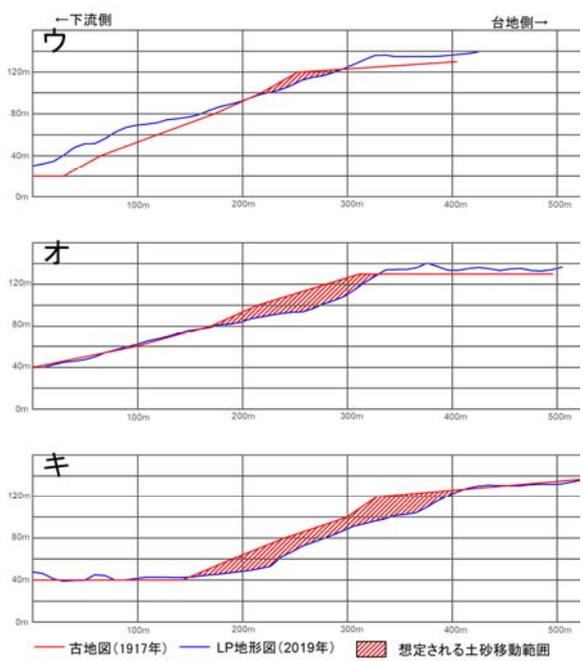


図-3 代表地点の地形断面図  
作成した断面図 (ア~キ) の一部を抜粋して示す。

背後への後退が大きかった地点は、古地図においては、台地縁部よりも下流側に崩壊記号が記載される地点が多く、当時より土砂移動が頻発していた地点と推察された (図-4a)。また、LP 地形図によると、現在の台地縁部は、概ね馬蹄形~円形の形状をなす傾向が確認された (図-4b~c)。

以上の特徴から、台地縁部の背後への後退は、台地縁部において地すべりが繰り返し発生することで進行

してきたと推察される。このことから、台地縁部の後退量が大きかった区間では、今後も地すべりが発生するリスクが相対的に高いことが示唆され、将来の地すべり発生予測や対策の優先度の検討等にあたり目していく必要があると考えられる。

4. まとめ

本稿では、中頭東部地区南東部における台地縁部の地形変化について検討した。その結果、台地縁部は約100年間で40~80m程度背後に後退したと推察された。

後退量が大きかった区間、横断方向の地形形状の変化が大きかった地点では、その背後の台地縁部においてボーリング調査等の地質調査を実施し、地すべりが発生する地質的背景を明らかにすることで、その発生予測手法や対策の優先度検討に資するさらに有効な情報が得られる可能性が考えられる。

また、本稿と同様の解析をより複数の時期の地形図を用いて行うことで、台地縁部における後退の変遷や地すべりの拡大・発生履歴をさらに詳細に把握できる可能性が考えられ、今後の課題になると考えている。

文献

1) 内閣府沖縄総合事務局開発建設部河川課 (2013) : 中頭東部地区地すべり対策の提言について、<http://www.dc.ogb.go.jp/Kyoku/mizu/kisyahappyou/ki zi/kisyahappyoushiryoujisuberiteigen.pdf>(2022年8月4日閲覧)。

# P13. 六甲山地における表層土層厚と地形量の関係の一考察

Discussion of the relationships between soil thickness on shallow landslide and Topography in the Rokko Mountain

○小寺凌, 梶山敦司, 浅井健一 (土木研究所)  
Ryo Kotera, Atsushi Kajiyama, Kenichi Asai

## 1. はじめに

山腹斜面における危険個所の評価精度の向上を行うために、山腹斜面の表層土層厚（風化層厚・未固結土砂層厚）を把握することは重要である。しかしながら、既往研究等では、崩壊前後の地形データから斜面崩壊の危険度評価は行われるが、表層土層厚の推定を行った事例は少ない<sup>1)</sup>。本研究では、山腹斜面の崩壊の素因となる表層土層厚を推定することを目的とし、航空レーザー測量から得られた地形データと簡易貫入試験結果、ボーリング調査結果および現地露岩調査結果から得られた表層土層厚の関係について整理した。

本発表では、五助断層―芦屋断層に囲われた地域を対象として、地形データから得られる地形量と実測した表層土層厚の関係について報告する。

## 2. 調査方法

### 2.1 現地調査結果の整理

本研究の対象地は、地形量を算出する上で地形形成上の影響を除くために、形成史の特徴が同一であると考えられる兵庫県芦屋市～神戸市の五助断層―芦屋断層に囲われた地域を対象とした（図-1）。対象地は、山地部は古生代の丹波帯の砂岩および泥岩、白亜紀の花崗岩からなり、斜面下腹部および住宅地は大阪層群および段丘堆積物からなる。簡易貫入試験は $Nd \leq 12^2)$ 、ボーリング調査結果は崖錐堆積物および $N \leq 10$ の風化部を表層土層厚とし、計 333 地点の表層土層厚を整理した。さらに、現地調査で露岩箇所をプロットし、表層土層厚 0m として整理した。

### 2.2 地形解析手法

航空レーザー測量より得られた 1m および 5m グリッドデータを用いて各グリッドデータにおける地形量を算出した。

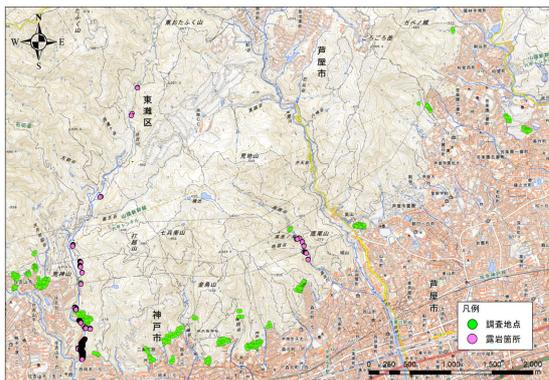


図-1 調査位置図

表層土層厚を目的変数とし、算出した各地形量を説明変数として多変量解析を行った。1m グリッドデータの露岩箇所は簡易貫入試験結果及びボーリング調査結果地点（以下、調査地点）数と比べ、データ数が非常に多いため、ランダムサンプリングを実施し、調査地点数と同等程度の 350 地点を抽出した。

## 3. 調査結果

### 3.1 多変量解析結果

表-1 に 1m グリッドデータおよび 5m グリッドデータにおいて、露岩調査結果を使用した場合と使用しない場合を分けて重回帰分析を行い、説明変数の係数を算出し整理した。

説明変数である地形量間の相関性が高いと重回帰分析結果に影響を及ぼすことから、地形量間の相関性を把握するために相関分析を行った。地形量間の相関性が高い場合、目的変数と相関性が低い地形量を棄却し、重回帰分析を行った。

異なる単位の係数間を比較する際に用いられる標準化係数で比較すると、各グリッドデータで露岩調査結果の有無に関わらず斜面傾斜角、斜面傾斜方向は標準化係数が高い傾向がみられた。また、1m、5m グリッドデータともに露岩調査結果を考慮しない場合、1～3 番目に影響の大きい係数は同じであった。

### 3.2 推定表層土層厚と実測の土層厚との比較

重回帰分析から得られた係数を用いて各調査地点の地形量から表層土層厚を推定した。図-2 に推定表層土層厚と調査から得られた実測の調査土層厚を比較した結果を示す。

1m グリッドデータ、5m グリッドデータの結果ともに露岩調査結果の有無に関わらず、2m より大きい推定表層土層厚は算出されず、調査土層厚が 2m 以上地点では、推定表層土層厚と調査土層厚の差が大きい。

表-1 説明変数の係数

地形量	1mグリッドデータ				5mグリッドデータ			
	露岩調査あり 重回帰係数	露岩調査なし 標準化係数	露岩調査あり 重回帰係数	露岩調査なし 標準化係数	露岩調査あり 重回帰係数	露岩調査なし 標準化係数	露岩調査あり 重回帰係数	露岩調査なし 標準化係数
標高	0.0002	0.015	-0.002	-0.154	-0.0004	-0.036	-0.002	-0.152
斜面傾斜角	-0.019	-0.346	-0.013	-0.174	-0.024	-0.293	-0.016	-0.168
斜面傾斜方向	-0.001	-0.133	0.003	0.216	0.002	0.134	0.003	0.263
垂直曲率	-0.0003	-0.013	-	-	-0.004	-0.047	-0.014	-0.089
水平曲率	-0.001	-0.04	-	-	-0.007	-0.065	-0.019	-0.131
平均曲率	-	-	-	-	-	-	-	-
起伏量	-	-	-	-	0.034	0.556	0.0001	0.001
ラプラスアン	-	-	-0.035	-0.042	0.013	0.027	0.027	0.067
定数	1.474	1.239	-	0.360	-	1.230	-	-

- 棄却した係数  
最も影響の大きい係数  
2番目に影響大きい係数  
3番目に影響大きい係数

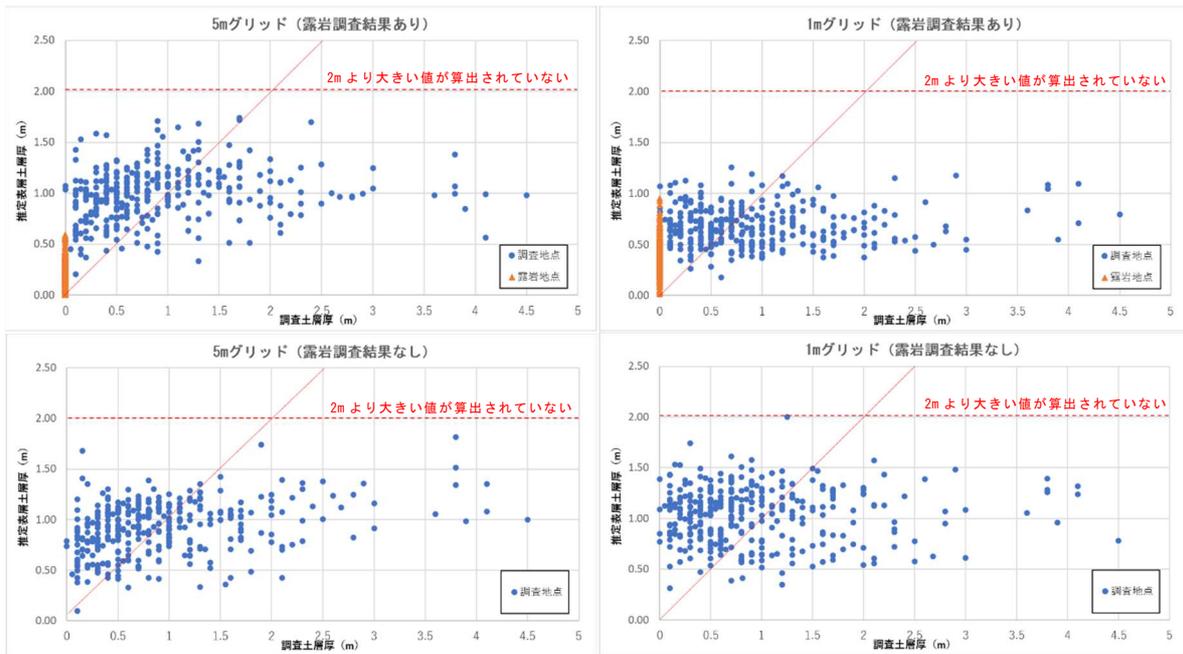


図-2 推定表層土層厚と実測の調査土層厚の比較

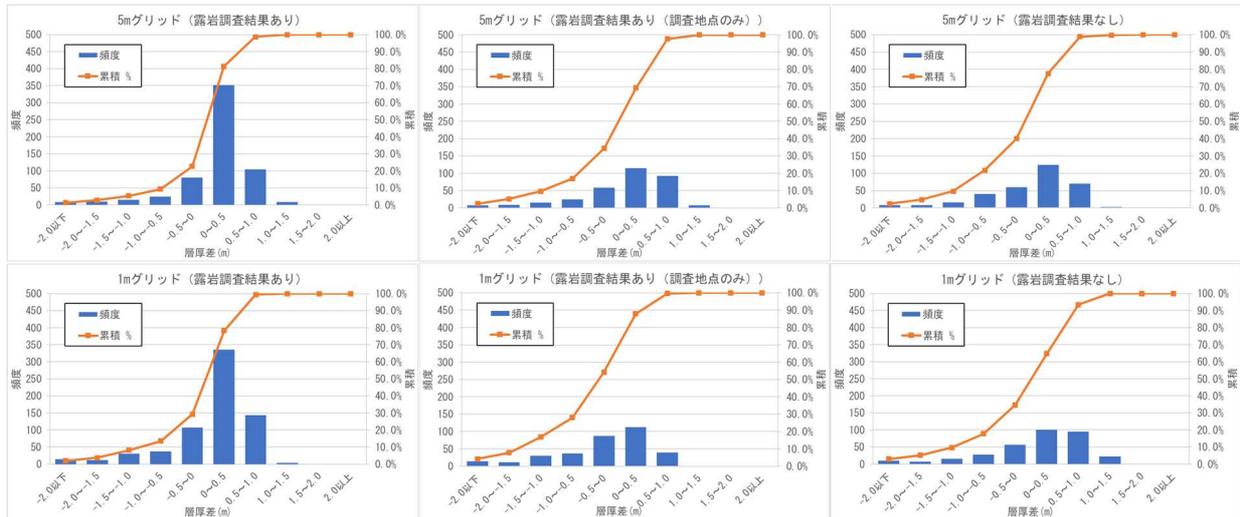


図-3 推定表層土層厚と実測の調査土層厚の差の頻度分布

表-2 層厚差の比較

	5mグリッドデータ			1mグリッドデータ		
	露岩調査あり 露岩地点含む	露岩調査あり 調査地点のみ	露岩調査なし	露岩調査あり 露岩地点含む	露岩調査あり 調査地点のみ	露岩調査なし
危険割合	22.67%	34.55%	40.00%	29.28%	54.22%	34.64%
平均値	0.12	0.05	-0.03	0.07	-0.26	0.08
標準偏差	0.60	0.79	0.74	0.67	0.80	0.83

図-3 および表-2 に推定土層厚と調査土層厚の層厚差を整理した結果を示す。調査地点の層厚差を比較すると、5m グリッドデータは、露岩調査結果を考慮した方が、危険側（推定表層土層厚から調査土層厚を引いた値がマイナス）の結果となる地点は減少した。一方、1m グリッドデータでは、露岩調査結果を考慮しない方が、危険側の結果となる地点は大きく減少した。

#### 4. まとめ

六甲山地の山腹斜面を対象に地形データから得られる地形量と調査土層厚の関係を整理した。その結果、推定表層土層厚を推定するには露岩調査結果を考慮し

た 5m グリッドデータを用いる方がよいことが分かった。しかし、各データにおいて 2m より大きい推定表層土層厚が算出されていないため、2m より大きい推定表層土層厚が算出する手法については今後検討する必要がある。

本研究を実施するにあたり、国土交通省近畿地方整備局六甲砂防事務所には兵庫県六甲地域の航空レーザー測量データの提供を受けた。ここに感謝の意を表する。

#### 文献

- 1) 坂井ほか (2012) : 航空レーザー計測を用いた地形解析による表層土層厚の推定, 砂防学会誌, Vol.64, No.6, pp.38-42.
- 2) 沖村 孝・田中 茂 (1980) : 一試験地における風化花崗岩斜面の土層構造と崩壊発生深さに関する研究, 新砂防, pp.7-16.

# P14. 火山層序と火口移動の検討—那須火山群南月山火山の調査例—

Stratigraphy of the volcanic rocks and crater movement- study of volc.Minamigassann in the Nasu Volcano Group -

○杉山直也 (J-POWER 設計コンサルタント), 田中学 (電源開発), 八代正和 (電源開発), 荒井融 (地圏科学研究所),  
池田正道 (J-POWER 設計コンサルタント)

Naoya Sugiyama, Manabu Tanaka, Masakazu Yashiro, Toru Arai, Masamichi Ikeda

## 1. はじめに

火山の形成史を詳細に把握することは、火山災害のリスク評価を行う上で欠かすことのできない基礎的情報となる。今回、那須火山群南部に成層火山体が複合する南月山火山を対象に、高精度の地形図を用いた地表踏査と岩石学的検討から、火山層序・噴出口の移動・形成年代について、新知見を得たので報告する。

## 2. 調査位置および調査方法

本調査は、栃木県の北方に位置し、活火山である那須岳を含む那須連峰の南月山の西側斜面周辺を対象とした。南月山火山は地形的に3つ(日の出平・白笹山・黒尾谷)の噴出口が分布する。また3つの噴出口のうち日の出平・白笹山の溶岩が区分されていない。このため南月山の西側約7.5km<sup>2</sup>について地表踏査及び岩石試料の分析を実施した。

## 3. 調査範囲に分布する各ユニットの岩石学特徴

調査範囲に分布する溶岩流は4種類(uk:未区分, Hd:日の出平溶岩流, Ss:白笹山溶岩流, Bz:麦飯坂溶岩流)に区分された。以下に4種類の溶岩流の特徴を示す。

### 【未区分溶岩流: uk.】

麦飯坂上流域では、日の出平溶岩流の下位に両輝石+磁鉄鉱斑晶で特徴付けられる未区分溶岩流(uk.)が広く分布していた。本溶岩流は日の出平溶岩流と麦飯坂溶岩流に覆われているため、地形面を形成せず、谷底から沢の両岸斜面に急崖を形成している。本溶岩流には少なくとも2枚の溶岩(下位をuk1, 上位をuk2とする)が確認され、厚さ約30mの上位の溶岩(uk2)の最下部に板状節理が発達する。また、下位の溶岩(uk1)の直下には河川堆積物が分布している。

斜方輝石・単斜輝石・磁鉄鉱の斑晶のサイズは小さく、いずれも径0.5mm程度である。他の溶岩流がほぼ完晶質な石基を持つのに対して、本溶岩流の石基は半晶質~完全ガラス質である。

### 【日の出平溶岩流: Hd】

日の出平溶岩流(Hd)は、日の出平付近を頂点とする火山斜面から沼原ダム付近の南北に伸びる尾根部に分布するとともに、沼原調整池南側直下の湯川河床付近にも露出することが確認された。麦飯坂上流域では本

溶岩流に挟在する火砕堆積物が確認されている。

本溶岩流はかんらん石の斑晶で特徴付けられ、そのサイズは3mmに達することもある。輝石族の斑晶を含む溶岩と含まない溶岩があり、麦飯坂上流域では最上位の溶岩に両輝石斑晶を伴う。両輝石斑晶を伴う溶岩は、含まない溶岩に比較して斑晶量が多い傾向があり、最大30~40%に達する。いずれも石基はほぼ完晶質である。

### 【白笹山溶岩流: Ss】

白笹山溶岩流(Ss)は、白笹山を頂点とする火山斜面から沢名川河床、さらに沢名川河右岸斜面から沼原ダム南東側の尾根頂部にかけて分布する。

本溶岩流は両輝石斑晶によって特徴付けられ、斑晶量は最大約40%に達し石基はほぼ完晶質である。有色鉱物の斑晶として斜方輝石と単斜輝石をほぼ等量含むが、時折、大型で融食形を示すかんらん石が、縁から粗粒な輝石に置換された組織が認められることがある。斑晶の縁に石基と同じサイズの微細な輝石を生じるいわゆる“反応縁”とは異なる組織である。このようなかんらん石は、石基をなすマグマから直接晶出したものではなく、地下深部マグマだまりの中で、結晶化した後に化学組成が変化したマグマに対して不安定化して反応し、輝石族鉱物を生じた一種の捕獲結晶と考えられることから、斑晶鉱物として扱わない。

### 【麦飯坂溶岩流: Bz】

麦飯坂溶岩流(Bz)は、日の出平付近を頂点とし、西~西北西方向へ流下した溶岩がなす火山斜面を形成する。伴(1991)はL3-Unit(後の論文の麦飯坂溶岩)に石英斑晶の存在を記載しており、ひとつの特徴として単斜輝石と斜方輝石の逆累帯構造を記載している。本観察試料中にも逆累帯構造を示す輝石の斑晶が認められた。

## 4. 全岩化学分析

### 【未区分溶岩流: uk.】

デイサイトに近い安山岩であり、カルクアルカリ系列(CA)に属し、K<sub>2</sub>O分類ではmedium-Kに属す。

### 【日の出平溶岩流: Hdと白笹山溶岩流: Ss】

両者は一連のトレンド上に示される。日の出平溶

岩流は玄武岩～玄武岩質安山岩、白笹山溶岩流は玄武岩質安山岩であり、いずれもソレイイト系列(TH)に属するが、白笹山溶岩流の一部はカルクアルカリ系列(CA)に近い組成を示す。K<sub>2</sub>O分類ではlow-Kに属す。

【麦飯坂溶岩流：Bz】

玄武岩質安山岩であり、カルクアルカリ系列(CA)に属する。K<sub>2</sub>O分類ではmedium-Kに近いlow-Kに属する。

5. 火山層序と火山地形の発達史の考察

既往研究による南月山火山の層序と本調査による溶岩流の区分、及び試料分析による溶岩流の岩石学的特徴を総括的に整理した(表-1)。本表に示す溶岩流のうち、麦飯坂上流域には白笹山溶岩流(Ss)以外の溶岩流が網羅的に分布する。

これらから南月山火山の発達史を述べる。

① 南月山火山の活動開始期

基盤を覆う厚さ10～20mの「最下位溶岩流」の噴出が始まる。噴出後は一定期間の火山活動の休止があったと推定される。

② 未区分溶岩流(uk.)の噴出期

火山活動の休止期を経て、20～28万年前にデイサイト質な安山岩を噴出する火山活動が始まる。火砕堆積物を挟んで少なくとも2回の噴出(下位：uk1・上位：uk2)が認められ、厚さは累積最大約70mに達する。

③ 日の出平溶岩流(Hd)と白笹山溶岩流(Ss)の噴出期

デイサイト質な安山岩の活動に連続して、約20万年

前に玄武岩質な火山活動が開始する。噴出物の厚さは最大約100mに達する。下位の未区分溶岩流と日の出平溶岩流には、化学組成に非常に大きな隔りがあるが、噴出時期はいずれも約20万年前である。両者が連続的に露出する麦飯坂上流に位置する露頭においても、噴出の間隙を示す堆積物等は確認されていない。このことは、別のマグマだまりから供給された異質なマグマが、ほぼ同時期に次々噴出し、同じ成層火山体を形成するという特異な火山活動であったと考えられる。

この火山活動により日の出平付近の成層火山体がほぼ完成するが、その後、同じマグマだまりから供給されたマグマの噴出源は、約2km南の白笹山へ移動し、新たな成層火山体が形成される。

④ 麦飯坂溶岩流(Bz)の噴出期

日の出平・白笹山溶岩流の噴出から約10万年を経た6～8万年前に、再び日の出平付近を噴出源として、玄武岩質安山岩を噴出する火山活動が発生した。一般的な厚さは5～10m程度と推定され、比較的小規模なマグマ噴火が起きたと考えられる。

文献

- 1) 加藤祐三 (1964): 那須火山の岩石学的研究, 岩石鉱物鉱床学会誌, 51(6), pp.233-243.
- 2) 伴雅雄 (1991): 東北日本弧, 那須火山群, 南月山火山の岩石学的モデル, 火山, 36(2), pp.255-267.
- 3) 伴雅雄・高岡宣雄 (1995): 東北日本弧, 那須火山群の形成史, 岩鉱, 90, pp.196-214.
- 4) 山元孝広・伴雅雄 (1997): 1:30000 那須火山地質図および解説, 地質調査所.

表-1 南月山火山の層序と本調査の区分

既存研究による南月山火山の層序と本調査の区分							
加藤(1964)		伴(1991)		伴・高岡(1995)	山元・伴(1997)	本調査の区分	
那須火山 第一活動期	(姥ヶ平溶岩類)	南月山	後期-3 (L-3 Unit)	麦飯坂溶岩類	麦飯坂溶岩	Bz	麦飯坂溶岩流
	黒尾谷溶岩類	後期	後期-2 (L-2 Unit)	黒尾谷岳溶岩類	黒尾谷岳溶岩	Ko	黒尾谷岳溶岩流
	白笹溶岩類	南月山	前期-2 (E-2 Unit)	日の出平溶岩類	南月山火山 前期噴出物	Ss	白笹山溶岩流
	姥ヶ平溶岩類					Hd	日の出平溶岩流
	沼原溶岩類					uk.	未区分溶岩流
	-	前期	前期-1 (E-1 Unit)	-	-	-	(最下位溶岩流)

本調査の南月山溶岩流の区分と各種分析結果

溶岩流	噴出源	岩石記載(薄片)		化学組成(全岩化学分析)			噴出年代 (K-Ar年代測定)
		斑晶鉱物組合せ	その他の特徴	IUGS分類	マグマ系列	K <sub>2</sub> O分類	
麦飯坂(Bz)	日の出平付近	Ol+Op+Cp	Op・Cpの逆累帯構造 石基はほぼ完晶質	玄武岩質安山岩	カルクアルカリ	low-K (medium-Kに近い)	6～8万年前
白笹山(Ss)	白笹山	Op+Cp	時折、不安定Olを伴う 石基はほぼ完晶質	玄武岩質安山岩	ソレイイト (カルクアルカリに近い)	low-K	日の出平(Hd)直後 (ほぼ一連)
日の出平(Hd)	日の出平付近	Ol±Op, Cp	しばしばOl大型斑晶 石基はほぼ完晶質	玄武岩～ 玄武岩質安山岩	ソレイイト	low-K	約20万年前
未区分(uk.)	不明 (地形面をつくらない)	Op+Cp+Mt	石基は半晶質～ 完全ガラス質	デイサイトに近い 安山岩	カルクアルカリ	medium-K	20～28万年前

Ol:かんらん石, Op:斜方輝石, Cp:単斜輝石, Mt:磁鉄石

# P15. シュードタキライト形成温度の測定の試みー

## 熱重量示差熱同時測定によるアプローチ

Measurement of the formation temperature of pseudotachylyte by means of thermogravimeter-differential thermal analyzer

○二馬 大海, 竹村 貴人, 水越 雄太, 藤森 裕基, 野口真理子(日本大学大学院)

Hiroimi Futaba, Takato Takemura, Yuta Mizukoshi, Hiroki Fujimori, Mariko Noguchi

### 1. はじめに

シュードタキライトは地震などの摩擦運動時に発生する熱により岩石が熔融することにより形成される。摩擦係数の変化の過程は円柱もしくは円筒状の試料 2 個を押し付けながら回転させ剪断摩擦を起こす実験にて測定されている。これらの実験では鉱物組成から岩石の融点が推定されている<sup>1)</sup>。しかし、サーモグラフィーなどを用いた温度の測定では鉱物組成から推定される融点よりも低い温度が融点として測定される<sup>1)</sup>。

これらを踏まえ、シュードタキライトが発見されている延岡衝上断層近傍の岩石を使用し、熱力学的な測定方法を用いて、熔融する温度の測定を試みた。

### 2. 調査及び方法

本研究で対象とした岩石は、延岡衝上断層の下盤の岩石を利用した。

延岡衝上断層は四万十帯を北部、南部に細分する断層である。下盤は日向層で、頁岩主体のメランジュで構成されている。最高埋没温度は 250~270℃と求められている<sup>2)</sup>。

延岡衝上断層では上盤側のせん断帯からシュードタキライトが発見されている<sup>3)</sup>。また、上盤側から断層を貫くようにボーリングが行われ、主すべり面からシュードタキライトが発見されている<sup>4)</sup>。

岩石サンプルを鉄乳鉢と鉄乳棒を用いて粉砕し粉末試料とした。粉末試料はそれぞれ岩石の鉱物組成の測定に X 線回折分析、分析機器の温度範囲内で融解するか確認することを目的として、電気炉での熔融実験、融点などの測定のために TG-DTA の測定を行った。

電気炉での熔融はアルミナ製の燃焼ボートに粉末試料を約 100mg 入れ、電気炉で 1500℃まで加熱を行った。

TG-DTA の測定は TG8120 を利用した。TG-DTA は粉末状にした試料と測定したい温度域で熱特性の変化がほとんど起こらない標準物質とともに、電気炉を用い、一定速度で加熱していき、試料、標準試料の質量差 (TG)、試料と標準試料の温度差である示差熱 (DTA) を測定する熱分析法である。TG の温度変化を表した TG 曲線、DTA の温度変化を示す DTA 曲線が検出される。TG 曲線、DTA 曲線の変化を測定し、熱変化を測定する。

今報告では測定に使用する容器は半径 2.5mm の  $\alpha$

-アルミナ製セル、標準物質は  $\alpha$ -アルミナを利用した。試料は 14.7mg、窒素雰囲気化で、測定条件を 10K/min で 1300℃まで昇温、で行った。

### 3. 結果

図-1 に電気炉で 1500℃まで加熱した試料を示す。

加熱前の試料は粉体なのに対し、加熱後の試料は光沢を帯びていた。



図-1 試料の X 線回折図

a:加熱前

b:加熱後

図-2 に試料の X 線回折図を示す。各鉱物の第一ピークの強度の比較により鉱物組成は、石英が 73%、曹長石が 21%、緑泥石が 5% 含まれている。

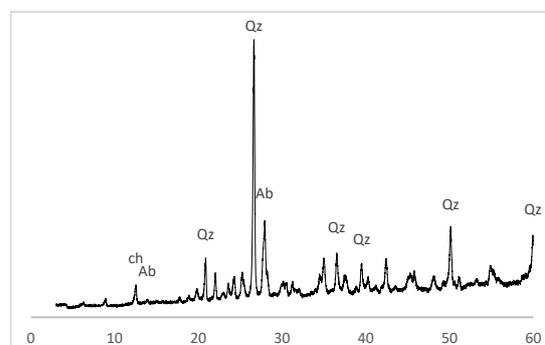


図-2 試料の X 線回折図

図-3 に TG-DTA の測定結果を示す。昇温過程での TG は 450℃から 800℃にかけ減少している。降温過程では 200℃まで大きく変化していない。昇温過程では

DTA 曲線では値の減少を示しているが、熱変化を示すピークは明瞭には見ることができない。降温過程では 1230℃に上に凸の部分が見られるが測定温度の上限に近い温度のため、ピークかどうかの判断は難しい。

TG-DTA 測定後の試料(図-4)の状態は全体的に黒色で、ガラス光沢が見られる部分がある。また部分的に 0.5mm未満の灰色の部分が見られる。

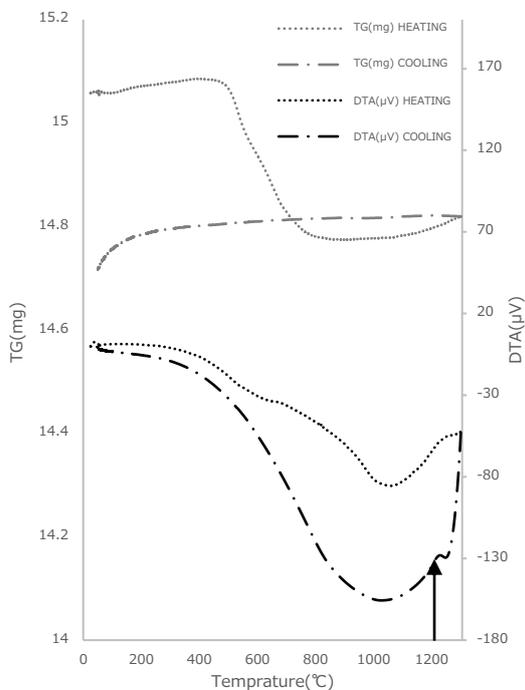


図-3 測定された TG-DTA 曲線  
 図中矢印は降温過程でみられるピーク



図-4 TG-DTA 測定後の試料

#### 4. 考察

TG 曲線の示す 450℃付近からの減少は緑泥石などに含まれる構造水の脱水によるものと考えられる。

DTA 曲線には吸熱反応が現れるがその反応が現れていない。

降温時の DTA 曲線にピークと思われる凸部が見られる 1230℃では昇温時、降温時、ともに TG に変化が

見られない。測定後の試料に光沢が見られることから、1230℃で液体が固体に変化する凝固が起こった可能性があり、また、光沢などからガラス質になっていると考えられる。また、電気炉の実験では 1500℃では大部分がガラス化していることから少なくとも 1500℃では融点に達していると考えられる。

#### 5. まとめ

今回の測定では TG 曲線、DTA 曲線から緑泥石などの脱水と思われるベースラインの変化は確認することができたが、融解の明確なピークは確認することができなかった。

測定前後の X 線回折図の比較、TG-DTA の昇温、降温速度の変化などにより、融解などのピークが明瞭になる可能性もある。

今回の測定は窒素雰囲気化で行ったが、試料のシュードタキライト形成時の環境は大量の水が存在、していたとされる<sup>4)</sup>。実際の形成環境に合わせるために、水蒸気下などで測定を行っていく必要もある。

#### 文献

- 1) Hung, C.-C., et al (2019): Grain fragmentation and frictional melting during initial experimental deformation and implications for seismic slip at shallow depths. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, vol. 124, 11150– 11169.
- 2) Kondo, H., Kimura, G., Masago, H., Ohmori-Ikehara, K., Kitamura, Y., Ikesawa, E., Sakaguchi, A., Yamaguchi, A., and Okamoto, S. (2005): Deformation and fluid flow of a major out-of-sequence thrust located at seismogenic depth in an accretionary complex: Nobeoka Thrust in the Shimanto Belt, Kyushu, Japan, *Tectonics*, vol. 24, TC6008, doi:10.1029/2004TC001655.
- 3) S. Okamoto, G. Kimura, S. Takizawa, H. Yamaguchi. (2006) : Earthquake fault rock indicating a coupled lubrication mechanism, *eEarth Discussions*, vol. 1 (2), pp.135-149.
- 4) Hasegawa, R., Yamaguchi, A., Fukuchi, R. et al. (2019) : Postseismic fluid discharge chemically recorded in altered pseudotachylyte discovered from an ancient megasplay fault: an example from the Nobeoka Thrust in the Shimanto accretionary complex, SW Japan. *Prog Earth Planet Sci* vol. 6, 36. <https://doi.org/10.1186/s40645-019-0281-2>

# P16. 紀伊半島東部北山川流域の付加体山地斜面に認められる

## 遷急線の地質制約

Geological pledge of the transition line found by the accretionary prism slopes  
of the Kitayama River basin in the eastern part of the Kii Peninsula

○栗田将一（大洋エンジニアリング）、木村克己、金子誠（深田地質研究所）、  
菊地輝行、杉山直也（J-POWER 設計コンサルタント）

Shoichi Kuwada, Katumi kimura, Makoto Kaneko, Teruyuki Kikuchi, Naoya Sugiyama

### 1. はじめに

紀伊半島東部を流れる熊野川の支流には、花崗岩が分布する大峰山脈によって隔てられた、西側の十津川、東側の北山川が存在する。十津川水系では、先行研究により地すべり地と遷急線の発達に深く関係があることが報告されている<sup>1)</sup>。一方、北山川水系では、地すべり地形分布が十津川水系に比べて少なく、地質学的な検討において、熱変成を受けて岩石の反発強度が高い等の異なる性状を示す報告がある<sup>2)</sup>。

本研究では、両水系の地形的な性状の違いを遷急線の分布傾向によって可視化した。これにより DEM データと QGIS の活用及び現地踏査によって広範囲での遷急線を判読し、斜面災害の発生箇所との関係を明らかにすることを試みた。

### 2. 地形・地質概要

調査対象の紀伊半島東部は、四万十帯白亜系の日高川層群からなり、東縁部にはそれを傾斜不整合に覆う第三紀中期中新世の熊野層群と、その上位に熊野酸性火成岩類が堆積ないし貫入している。調査地西部には

中期中新世の大峯花崗岩が貫入する。日高川層群は四万十帯の北半部を占めており、頁岩及び砂岩泥岩互層からなる陸源の堆積物に加え、チャートや緑色岩類等の付加体を伴う。

### 3. 調査手法

調査手順としては、まず、十津川水系での既往研究<sup>1)</sup>を参考に、地理院の標準地図と 10mDEM で作成した地形図を用いて、北山川流域とその周辺の遷急線を抽出した。その後、1mDEM で作成した傾斜量図の解読で、より詳細な遷急線を QGIS で作図した（図-1）。その後、検証の為に現地踏査を行い、遷急線の位置を確認して最終的な遷急線を設定した。

現地踏査は、行仙岳中腹を通る白谷トンネル周辺及び、北山川に注ぐ支流の前鬼川、不動七重滝周辺で実施し、地形把握のため目視観察とドローンによる空撮を行うと共に、ルート沿いの地質調査、IC 値（イライト結晶度）測定、反発硬度と真密度の測定用に岩石試料を採取した。

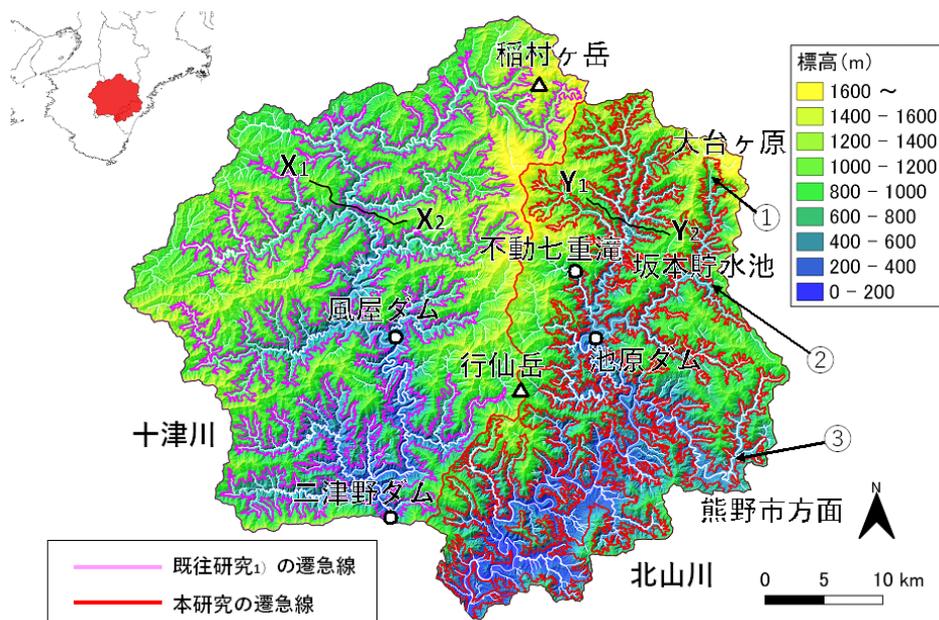


図-1 調査地位置図と遷急線分布状況

地図は QGIS により基盤地図情報の数値標高モデル及び河川データから作成。

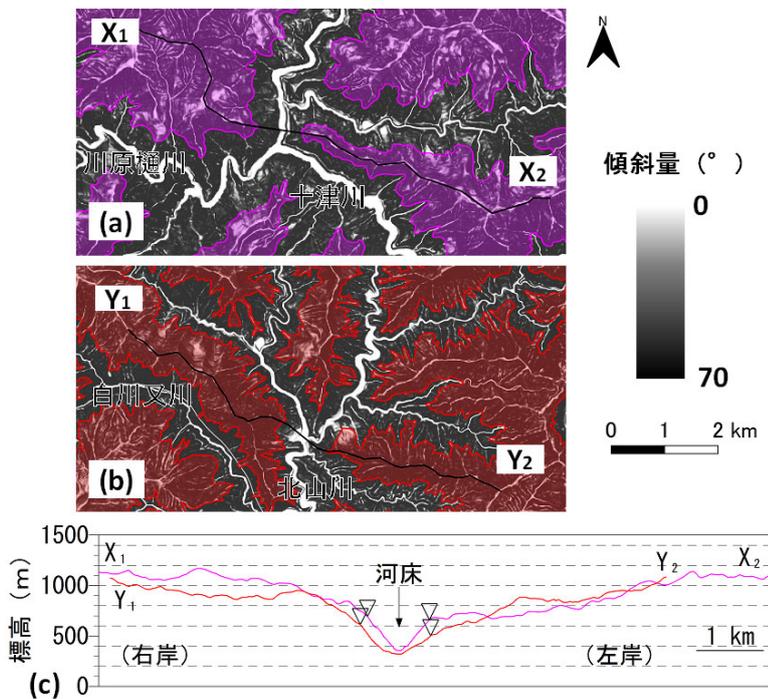


図-2 代表的な斜面の断面図

(a)十津川と川原樋川の合流箇所付近, (b)北山川と白川又川の合流箇所から北北東へ約3km付近, (c) X1-X2間は約10km, Y1-Y2間は約8.2km, 遷急線の河床からの比高はX1-X2間で338m(右岸)、303m(左岸), Y1-Y2間で291m(右岸)、181m(左岸)

#### 4. 結果

##### 4.1 地形判読の結果

十津川流域では、大部分に明瞭な遷急線が形成されている<sup>1)</sup>。一方、北山川流域では、調査地北東部の大台ヶ原南部(図-1 ①)から東部の坂本貯水池周辺(図-1 ②)、南部の熊野市方面(図-1 ③)にかけては、明瞭な緩斜面が形成されており遷急線の判別が比較的容易であった。しかし、それ以外の大部分の地域では急峻な斜面が続き、遷急線の不明瞭な地域が多く認められた。

図-2の断面X1-X2は十津川流域の代表的な地形断面を示しており、遷急線を形成する急斜面と緩斜面の境界が明瞭であった。これに対し、断面Y1-Y2で示す北山川流域の代表的な地形断面では、急斜面と緩斜面の境界は不明瞭になっており、遷急線の河床からの比高は十津川流域に比べて最大約157m低くなる結果となった。

##### 4.2 地表踏査の結果

地形判読では、尾根まで急峻な斜面が続き、標高800m以上で遷急線が推測された北山川支流の前鬼川流域であったが、現地踏査の際に不動七重滝を浸食前線とした大規模な急崖地形の上部、標高500m付近においても傾斜角度の変化(遷急線)が認められた。すなわち、地形判読結果から推測した地点より低い標高に、急崖地形と急傾斜の緩斜面によって形成された遷

急線が認められた。また、前鬼川流域の遷急線付近や、十津川流域の左岸側山頂付近においてホルンフェルス化が認められる岩石が多く見られたが、遷急線以下の斜面や平坦地での転石においては、本調査ではほとんど確認されなかった。

#### 5. まとめ

本調査では、十津川流域では明瞭な遷急線が形成されていることに対し、北山川流域では全体的に傾斜の変化が乏しく、遷急線は不明瞭である。この違いは、地表踏査の結果から、地質に原因があると考えた。すなわち、十津川流域、特に右岸は、付加体等の砂岩泥岩互層を主体としている。これに対し、北山川流域では、付加体に貫入した大峯花崗岩類等から均質に熱変成を受け、十津川流域と異なり硬質な地質となった。このため十津川流域は差別浸食を受けて明瞭な遷急線が形成されたことに対し、北山川流域では、硬質な地質が隆起し不明瞭な遷急線を形成しているのではないかと考えられる。

以上のことから、北山川流域と十津川流域では熱変成が原因による地質の硬さの違いから浸食に差が生じ、遷急線の特徴の違いや、冒頭で述べたように地すべり地形分布の違いにつながっていると考えられる。これはTsou et al(2017)の遷急線が明瞭に形成される地域において地すべり地形が生じやすい<sup>1)</sup>という結果と整合する。よって、本研究を通し、遷急線が不明瞭な山地地形では地すべりの発生頻度が低いのではないかと推察できる。実際に2011年に起こった深層崩壊の大部分は十津川流域で発生しており、斜面災害の発生は地形地質に大きく依存することが確認できた。この関係を、さらに地質学的な検討を行うことで今後の防災研究に活用されることが期待できる。

#### 文献

- 1) Ching-Ying Tsou・Masahiro Chigira・Yuki Matsushi・Narumi Hiraishi・Noriyuki Arai (2017) : Coupling fluvial processes and landslide distribution toward geomorphological hazard assessment:a case study in a transient landscape in Japan, Landskides(2017), 14, pp.1901-1914
- 2) 細野日向子・竹村貴人・木村克己・菊地輝行(2022) : 紀伊半島南部の四万十帯と熊野層群の泥質岩におけるイライト結晶度と反発硬度の空間分布特性, 応用地質, Vol.63, No.2, pp.42-48

# P17. 地盤情報データベースを用いて復元した構造運動像と 3 次元地質構造 ：大阪平野の表層地質の例

Reconstruction of Relative Tectonic Movements and Three Dimensional Subsurface Geological Structures Based on  
a Geo-informatics Database Analysis: A Case Study for the Shallow Subsurface Geology of the Osaka Plain

○櫻井皆生 (ハイテック株式会社)

Minao Sakurai

## 1. はじめに

ボーリングデータなどの地盤調査情報を集積した地盤情報データベースは、建設事業の設計・施工・積算などに利用されるほか、ボーリングデータが高密度に得られる利点から学術研究にも用いられている。本発表では、大阪平野を中心とした地域で構築・運営されている関西圏地盤情報データベースを用いて大阪平野の尼崎地域と貝塚湾岸部においてボーリング柱状図列からなる断面図を作成し、断面図に見られる海成粘土層基底面（ラビーンメント面）の形態から構造運動像を復元した結果を報告する。さらに、上町台地周辺地域において、東西方向と南北方向に高密度に作成した断面図に現れる地質構造を解析して作成した 3 次元地質構造モデルを紹介する。

## 2. 関西圏地盤情報データベースの概要

関西圏地盤情報データベースは近畿二府四県に福井県を加えた地域の地盤情報を集積している。1950 年代からのボーリング調査データを収録し、データ数は現在 6 万本を超える。このデータベースは 1980 年代後半に構築された海域の大阪湾地盤情報データベースと陸域の関西地盤調査情報データベースが 2003 年に統合されたもので、現在は関西圏地盤情報ネットワーク（KG-NET）によって運用されている<sup>1,2)</sup>。データベースの利用は原則として会員制で、利用会員は KG-NET のサイトからデータベースをダウンロードすることができる。操作方法は簡便で、検索画面でボーリング地点を連続して選定すれば、自動的にボーリング柱状図列からなる断面図が作成できるようになっている。

## 3. 大阪平野の地形・地質概要

大阪平野は周囲を基盤岩からなる標高 300～1100m 程度の山地に囲まれていて、平野の中央部に標高 10～30m 程度の上町台地の構造的な高まりが南北方向に細長く半島状に伸びていることが大きな特徴となっている（図-1）。上町台地の西側は淀川などの河口に発達した標高 5m 以下の三角州平野で、上町台地の東側にも標高 5m 以下の低平地が広がる。これに対し、平野の北部と南部の山地近傍には、標高 30～150m の段丘や丘陵地が発達し、山地と平野の境界と上町台地の西縁付近には、断層が走っている。

大阪平野の地下には大阪層群などの第四系が分布し、その分布深度は 1500～2000m に達する。この第四

系の上半部には、氷河性海水準変動によって支配された高海水準期に堆積した湾底堆積物の海成粘土層（Ma）が繰り返し挟まれている。また、断層の近傍では、地下に分布する第四系が断層運動の影響によって変形していることが知られている<sup>2)</sup>。

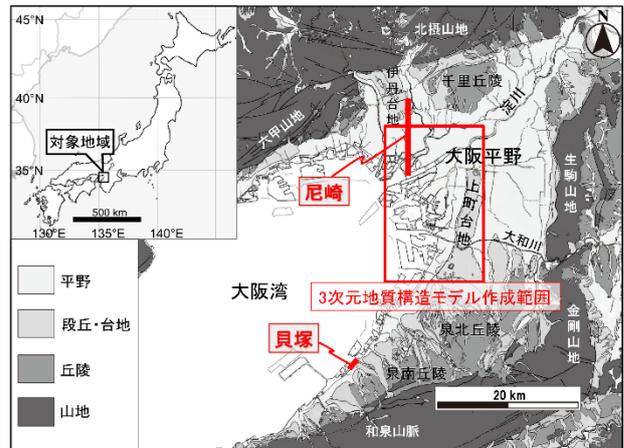


図-1 位置図

## 4. 構造運動像の復元

構造運動復元の基準面には、海成粘土層基底面を用いた。海成粘土層基底面は、堆積学的には海進期に波浪や潮汐の侵食作用で形成された平坦面であるラビーンメント面に相当すると考えられている<sup>3,4)</sup>。構造運動の影響を受けていない初生のラビーンメント面は、断面図上では海側に緩く傾いた直線で表されることから、初生のラビーンメント面とその下位の構造運動で変形したラビーンメント面とを比較することによって、構造運動像を容易に復元することができる<sup>4,5)</sup>。

例えば、断面図上で上下のラビーンメント面が平行な場合は、見かけ一定の沈降もしくは上昇の傾向にあることがわかる。一方、下位のラビーンメント面の沖側がより傾動している場合は、沖に沈降の中心があったことがわかる。さらに、上下 2 枚のラビーンメント面が同規模の海進で形成されたものであれば、それらの陸側末端の標高差を比較することによって、その地域の地盤の昇降量を見積もることができる。すなわち、下位のラビーンメント面の陸側末端の標高が上位のそれより 10m 低ければ、上下のラビーンメント面の形成年代間に地盤は 10m 沈降していたことがわかる。これらの構造運動センスや地盤の昇降量をあらゆる方向の断面図で解析することによって、地盤の昇降や傾動の傾

向を3次元的に読み取ることができる。さらに、多くのラビメント面は、氷河性海水準変動と関連して形成されることから年代が特定できるので、構造運動速度の見積もりにも有用である。

大阪平野北西部の尼崎地域では、現在の地形面勾配の最大傾斜方向と平行な南北方向の表層地質断面図を作成し、約6000年前の海進期に堆積した沖積海成粘土層(Ma13層)とその一つ前の約125000年前の海進期に堆積した海成粘土層(Ma12層)の基底面(ラビメント面)の構造を比較した。その結果、この地域の陸側では、約125000年前以降に見かけ約14m、約0.12mm/yの隆起があったことを見積もることができた(図-2)。隆起量は、両海成粘土層基底面の陸側末端点の標高差から見積もった。これらの海成粘土層が堆積した海進期はそれぞれ海洋酸素同位体ステージのMIS.1とMIS.5eに相当し、氷河性海水準はほぼ同じ高さにまで上昇したとされている<sup>6)</sup>。一方、海側では下位の海成粘土層基底面の方が急傾斜していることから、見かけ南方への傾動が生じていたことがわかった。

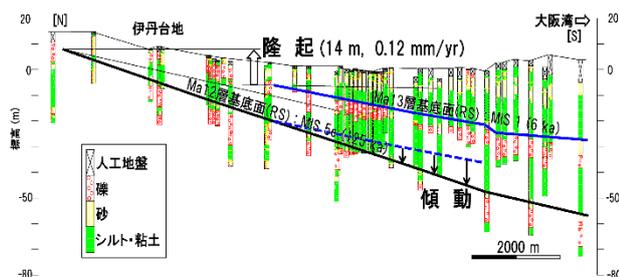


図-2 尼崎地域の断面図と構造運動像

大阪平野南西部の貝塚の湾岸部では、海洋酸素同位体ステージ MIS.9, 11, 13, 15 の海進期に堆積した4枚の海成粘土層(Ma10層~Ma7層)の基底面(ラビメント面)から背斜構造の北翼部の傾動の復元を試みた。その結果、下位の海成粘土層基底面ほど傾斜角が大きく(約0.6~1.2°)、各海成粘土層基底面の傾斜角と海成粘土層の堆積年代の関係から、約57万年前~約33万年前の間にこの地域では見かけ等速度の傾動が起きていたことが復元できた(図-3)。

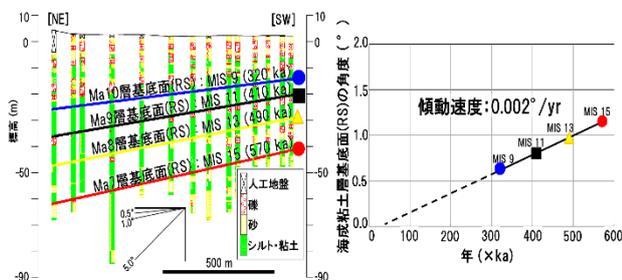


図-3 貝塚湾岸部の断面図と構造運動像

### 5. 上町台地周辺地域の3次元地質構造モデル

上町台地周辺地域で作成した3次元地質構造モデルは、海成粘土層基底面(ラビメント面)のサーフェスモデルである(図-4)。モデルを作成した層準は、

Ma12層とMa10層~Ma4層である。モデルはGISソフトにポイントデータをインプットし、その空間補間機能により作成した。ポイントデータ数は計2350点で、データはボーリング地点の経度、緯度と各海成粘土層基底面の標高からなる。緯度経度は関西圏地盤情報データベースのボーリング地点情報を参照し、海成粘土層基底面の標高はデータベースから作成したボーリング柱状図列からなる断面図から0.1mの精度で読み取った。断面図は上町台地とその周辺の低地部に200m間隔のメッシュで基準線を設定し、それらに沿って東西方向113断面、南北方向74断面を作成した。モデルの作成に使用したGISソフトはEsri社製のArcGISで、空間補間計算には自然近傍法を用いた。

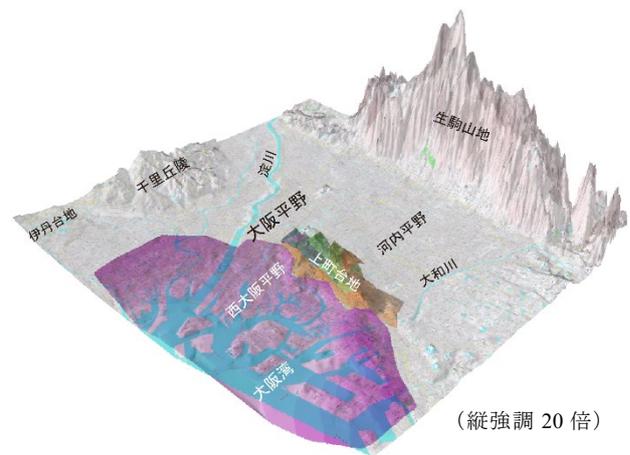


図-4 上町台地周辺地域の3次元地質構造モデル

### 文献

- 1) 北田奈緒子 (2010) : 関西圏地盤情報ネットワークの活動と大阪における地質情報の取り組み方, 地質ニュース, Vol.675, pp10-13.
- 2) KG-NET 関西圏地盤研究会 (2007) : 新関西地盤一大阪平野から大阪湾へ, 354p.
- 3) 増田富士雄 (2007): 相対的な海面変動が支配する地層の累重と地形の形成: わが国の沖積層の解析から, 地形, Vol.28, pp.365-379.
- 4) Sakurai M. and Masuda F. (2014) : Reconstruction of relative tectonic movements using transgressive ravinement erosion surfaces: A case study for the shallow subsurface geology of the Osaka Plain, Japan, Journal of Earth Science and Geotechnical Engineering, Vol.4, pp.17-24.
- 5) 増田富士雄・佐藤智之・伊藤有加・櫻井皆生 (2013) : Shazam 層序学をボーリングデータベース解析へ適用する試み: 大阪平野の表層地質研究を例に, 地学雑誌, Vol.122, pp.892-904.
- 6) Lambeck K., Yokoyama Y. and Purcell A. (2002) : Into and out of Last Glacial Maximum: sea-level change during the Oxygen Isotope Stage 3 and 2, Quaternary Science Reviews, vol.21, pp.343-360.

# P18. 長野県上高地大正池の水質形成と褐色沈殿物の成因について

Water geochemistry and origin of brown precipitate around the Taisho Pond, Kamikouchi, Nagano

○伊藤由紀, 大山隆弘, 田中姿郎, 平野伸一, 足立佳子 (電力中央研究所)

Yuki Ito, Takahiro Oyama, Shiro Tanaka, Shinichi Hirano, Yoshiko Adachi

## 1. はじめに

鉄酸化菌による褐色沈殿は、河川や水路、温泉、トンネルの湧水、水抜き孔等で、普遍的にみられる現象であり、景観の悪化のみならず土木設備の機能低下を引き起こすことが知られている。長野県の上高地に位置する大正池は、1915年の焼岳の噴火で梓川が火山噴出物によりせき止められたことにより形成され、上流からの堆積物の供給により、徐々にその分布は狭まり、水深が浅くなることで、周辺には湿地が形成されている。大正池では、周辺の湿地から、湖底、下流の梓川河岸にかけて、数 km にわたり褐色沈殿 (図-1) がみられる。本報告では、火山地域における鉄の生物地球化学的な挙動という新たな観点で、大正池における褐色の沈殿物の成因について、現地での水質測定と室内での化学・同位体分析、DNA を指標とした微生物解析を実施し検討した結果を報告する。

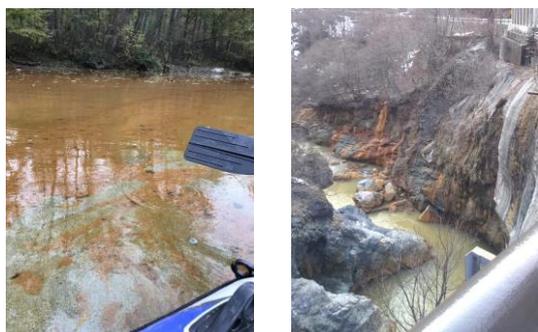


図-1 大正池湖底にみられる褐色沈殿 (左), 大正池下流の梓川にみられる湧水流下跡の褐色沈殿 (右)

## 2. 調査方法

本調査の対象地は、大正池のやや上流 (河童橋付近) から大正池下流 (以後下流と記載) の沢渡までの梓川流域である。2020年10月に梓川と支流、周辺湧水、大正池の現地水質測定 (pH, 電気伝導度 (EC), 酸化還元電位 (ORP), 溶存酸素 (DO), 水温) および採水を行った。大正池の上流と下流の温泉水も各2地点合わせて採取した。微生物用試料については、褐色沈殿が顕著な地点で滅菌済み容器に採取した。

採水試料についてはイオンクロマトグラフィーで Cl, SO<sub>4</sub> イオン, ICP-OES で Na, K, Ca, Mg および Fe の分析を行い、ろ過試料の結果を溶存鉄量とした。HCO<sub>3</sub> イオンは SO<sub>4</sub> 滴定法によるアルカリ度から換算した。採水試料の一部は、CRDS 分光法にて  $\delta D$ ,  $\delta^{18}O$  の分析を行った。微生物解析として、沈殿物もしくは水試

料を 0.2 $\mu$ m フィルターろ過により捕集した微生物について DNA 抽出を行った。得られた DNA 抽出液を対象に定量解析 (定量 PCR), ならびに多様性解析 (微生物が共通して有する 16S rRNA gene を指標とした次世代シーケンス解析) を行うことで、試料中に含まれる微生物の密度と種類を推定した。

## 3. 結果

現地調査の結果、大正池より上流部の図-2 赤丸印で示した扇状地の末端や氾濫原の湿地に、図-1 で示したような褐色沈殿物の生成が顕著に認められた。湧水地点では湧水点よりも下流側に向かって褐色化が生じており、支流の一部では河床全体が褐色化していた。そのような個所では溶存鉄濃度が 500~38,000 $\mu$ g/L と高い傾向が見られた。また扇状地末端に位置する上流の温泉のうち1か所も溶存鉄濃度が約 1,600 $\mu$ g/L であった (図-2)。また大正池の下流にあたる中の湯温泉付近の右岸側湧水でも褐色沈殿が生じており、ここでは溶存鉄濃度が約 18,000 $\mu$ g/L であった。これらの溶存鉄濃度が非常に高い地点の水は、梓川本流に比べて水温がやや高く弱酸性、EC が高く ORP と DO が低いという傾向がみられた。大正池では溶存鉄濃度が

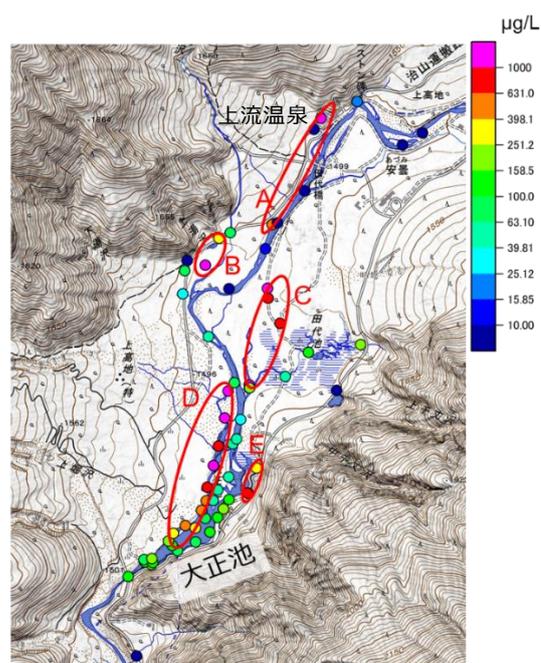


図-2 溶存鉄濃度の分布 (大正池付近拡大)  
赤丸 A~E は濃度が特に高い部分

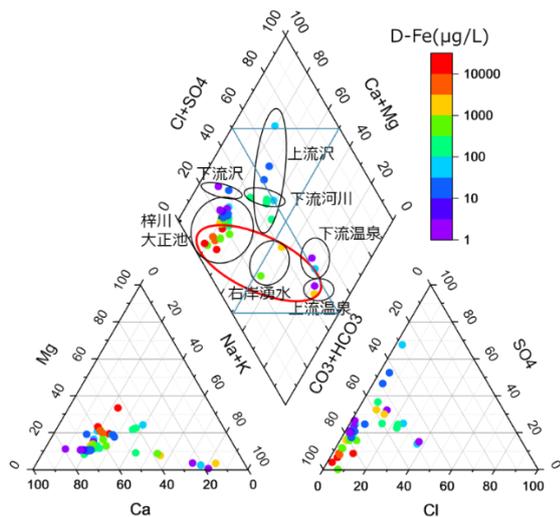


図-3 トリリニアダイアグラムによる水質分類  
赤丸部が溶存鉄濃度の高い地点

100µg/L以上の地点が多く、梓川上流より濃度が高い。大正池の右岸・左岸の湧水や支流から流れ込む溶存鉄（図-2中のD,E）が、大正池内の褐色沈殿生成に影響している可能性が高い。大正池下流の梓川では溶存鉄濃度が100~300µg/Lとやや高く、これは中の湯温泉付近の右岸側湧水のような溶存鉄濃度の高い水の流入によると考えられる。

主要イオン分析結果をトリリニアダイアグラム上にプロットした結果（図-3）、梓川本流・上流支流・下流沢および大正池のほとんどの地点は、河水水や循環性地下水にみられるCa(HCO<sub>3</sub>)<sub>2</sub>型にプロットされた。上流沢の一部はCaSO<sub>4</sub>型に近い中間領域にプロットされ、火山起源の硫黄の影響を受けている可能性がある。右岸湧水・上流温泉・下流温泉は中間Ca-NaHCO<sub>3</sub>型にプロットされ、やや停滞性地下水の水質を示す。このうち上流温泉・下流温泉はNaCl型に近く、特に下流温泉は熱水の影響を受けている可能性があるが、上流温泉の1か所を除き溶存鉄濃度は低い。溶存鉄濃度が高い地点（図-3赤丸部分）は、循環性地下水およびやや停滞性地下水に近い水質であった。

δD-δ<sup>18</sup>Oプロットによると分析した地点の多くはCraigの天水線付近にプロットされ、天水起源であることがわかる（図-4）。下流温泉の1地点のみ焼岳噴気孔ガス水蒸気と天水の混合線上にある（図-4の赤点）ため火山ガスが微量混合している可能性がある。これは主要イオン分析結果と整合性があるものの、この温泉の溶存鉄濃度は2µg/Lと非常に低い。

採取試料の微生物の定量解析を行った結果、褐色沈殿（および同時に採取した水）中には約10<sup>9</sup> gene copies/mL、湧水中には約10<sup>4</sup> gene copies/mLの微生物が含まれることが推定された。また多様性解析の結果、湧水中の優占種は中性鉄酸化菌であった一方で、沈殿物および同時に採取した水については、鉄酸化菌が検

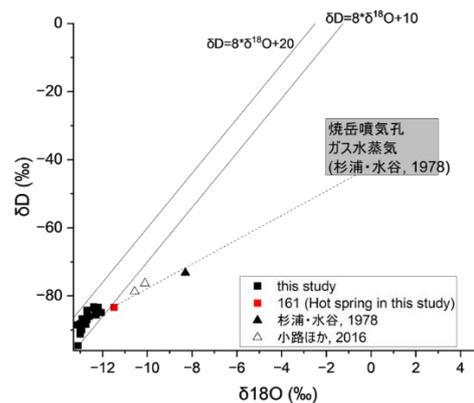


図-4 採水試料のδD-δ<sup>18</sup>Oプロット

出されたが微生物全体に対する割合は少なく、淡水性微生物等の多種多様な種が存在した。

#### 4. 考察

溶存鉄濃度の高い水は、天水起源であり、循環性地下水およびやや停滞性地下水に近い水質を示すことから、溶存鉄は表層・地下浅部由来である可能性が高い。ただし、表層・地下浅部の水で溶存鉄が多い地点は限定的なため、鉄供給源は偏在すると想定される。溶存鉄濃度が高い水は、雨水が火山噴出物中の黄鉄鉱などの鉄鉱物から鉄を溶出させた後、地下を浸透して一部ORPやDOの低いやや停滞性の地下水と混ざり、扇状地の縁や湿地で地表に湧出していると考えられる。焼岳の火山噴出物（火山灰や泥流物質）には黄鉄鉱の存在が確認されていることから、黄鉄鉱からの鉄溶出の可能性も十分考えられる。

溶存鉄を含む水は、溶存酸素濃度の低い湧水点近傍で鉄酸化菌により酸化されるため、湧水点よりも下流側で酸化鉄の沈殿が見られる。その後支流に流入すると溶存酸素濃度が増加し無機的な鉄酸化沈殿が主となると考えられる。この沈殿物内では湧水中の微生物が生成した有機物を使う多種多様な淡水性微生物が増殖し、淡水微生物と酸化鉄の混合物となり大正池に流入していると考えられる。

#### 5. まとめ

本研究では水質分析と微生物解析を用いて、火山地域における鉄の生物地球化学的挙動の検討事例を示した。大正池周辺では火山噴出物中の黄鉄鉱などから雨水などにより鉄が溶出して流下し扇状地の縁などで湧出し、それが鉄酸化菌により酸化され、淡水微生物と酸化鉄の混合物となって存在することが示唆された。

#### 文献

- 1) 小坂（2003）：日本各地の火山噴出物に含有される粘土鉱物と噴火活動様式の考究，火山，第48巻，第1号，pp.43-61.

## P20. 日本全国の数値標高モデルを用いた谷の抽出結果

Valley distribution of Japan extracted with DEMs

○平田康人（電力中央研究所）

Yasuto Hirata

### 1. はじめに

谷の形状や分布は、基盤の地質と深く関係し、地形の発達過程を表す。古くから、谷は等高線の判読または数値標高モデル（DEM）を用いた計算により、面積が数 km<sup>2</sup>～数百 km<sup>2</sup>の流域単位で詳細に描かれてきた。それでも、日本全国については、それと同等の精度かつ共通の基準で、谷の分布図が作られていなかった。

本研究では、日本全国の 10–20 m DEM を用いて水系・谷密度の分布図を作成し、谷密度と起伏量または地質とを比較した。

### 2. 方法

国土地理院の基盤地図情報の DEM10B と水域データを用いて、谷頭のセルを抽出し、そのセルを起点にして 8 方位の最大傾斜方向に谷線（水系）を延長した。DEM のみを用いる場合に比べて、水域データを併用すると、下流部の水系の形状はより現実的なものになる。本論では、海と連続する河川・湖沼の水域を谷頭の抽出範囲から除き、その水域中の標高を元の DEM の標高よりも 10 m 下げた DEM を用いて水系を作成し、下流部の水系を水域の形状に一致させた。

谷頭は、第 1–19 系の各平面直角座標の元の DEM と 20 m メッシュに集約した DEM との 2 種の DEM を用いて、次の 3 段階の方法<sup>2)</sup>で抽出した。①谷の候補となるセルは、セル幅かける平面曲率が -1 未満であり、傾斜が 4° 以上のものと仮定した。このセルの集合を谷領域のポリゴンに変換した。②谷の連続性を加味するため、谷領域の面積が 1 つのセルの面積の 6 倍以上のもの、または面積の 3 倍以上の 2 つの谷領域が最大傾斜方向に 2 セル以内で近接するものを残した。③残

りの谷領域中の最標高部のセルを谷頭とした。①の曲率の閾値は等高線の折入角が 90 度未満に相当する。この閾値は地形判読の基準値<sup>3,4)</sup>に則った。傾斜の下限値は、湧水点で測られた最大傾斜角<sup>例<sup>2)</sup></sup>を参考にした。

抽出した水系から谷密度図を作成し、起伏量図と地質図と重ね合わせた。本論における谷密度は、幅 10 m の各セルを中心とする半径 500 m の円内の谷セルの合計数にセル幅をかけた後、その円の面積で割ったものである。起伏量は各セルから 500 m 四方中の最高点と最低点の差である。谷密度と起伏量は 10 m 間隔で各平面直角座標系の DEM の領域で計算した。そして、起伏量で区分された領域について谷密度の頻度分布を求めた。他方、地質分布には、シームレス地質図<sup>5)</sup>のポリゴンを岩石の成因で再分類し、100 km<sup>2</sup> 以上を占める要素を使用した。各地質要素内の谷密度の頻度分布を求めた。なお、全ての計算には ArcGIS Pro 2.8 (Spatial Analyst Tool) を使用した。

### 3. 結果・考察

図-1 に既往文献<sup>3,6)</sup>の谷の判読結果と同地域の抽出結果を示す。抽出された水系は従来とほぼ同様のパターンを持ち、地質（蛇紋岩、花崗岩類、付加体）による違いも表している。(b) よりも (d) で谷が低密度である理由は、小松<sup>3)</sup>が 1/25000 地形図を用いて 50 m の解像度で判読しているため、谷の等高線の屈曲を計算より鋭敏に読んだためである可能性が考えられる。

図-2 は、谷密度の分布と Strahler 則で 7 次谷以上の水系を示す。谷次数は、石狩川、阿武隈川、信濃川、淀川、木曾川、高梁川が 9 次と算出された。利根川の谷次数は 10 次を示し、島野<sup>7)</sup>の利根川支流の地形判読に基づく推測と一致した。地域区分別にみると、谷密度が 3.0 km<sup>2</sup>/km<sup>2</sup> 以上のところが九州・中国で広く、東北・北海道で狭い傾向がある。ただし、平野の谷密度は、どの地域でも 1.0 km<sup>2</sup>/km<sup>2</sup> 以下とわかる。

谷密度が 6.0 km<sup>2</sup>/km<sup>2</sup> を超える地域は、信楽高原、中国山地、宮崎県境川流域（付加体）、沖縄県国頭村（海成砂岩泥岩層）、那珂川中流部（付加体）、三河高原、阿武隈山地、能登（火山岩）、千葉県清澄山（付加体）に位置する。このように、谷が密に発達した地域は、花崗岩山地に一般的であったが、他の地質にも分布していた。逆に谷密度の小さい山地は、中部山岳地域、西南日本外帯、北海道中央部に認められた。

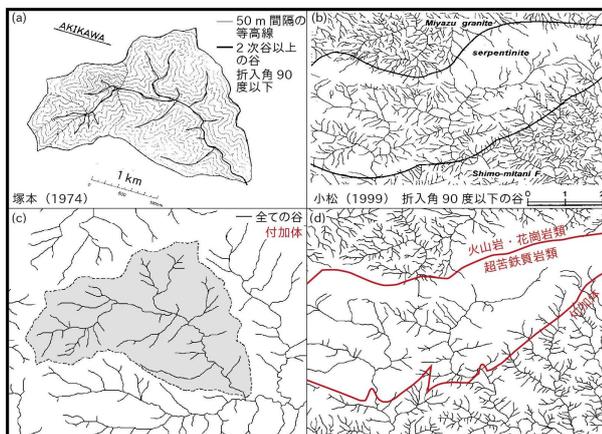


図-1 谷の抽出結果（下）と文献図（上）の比較

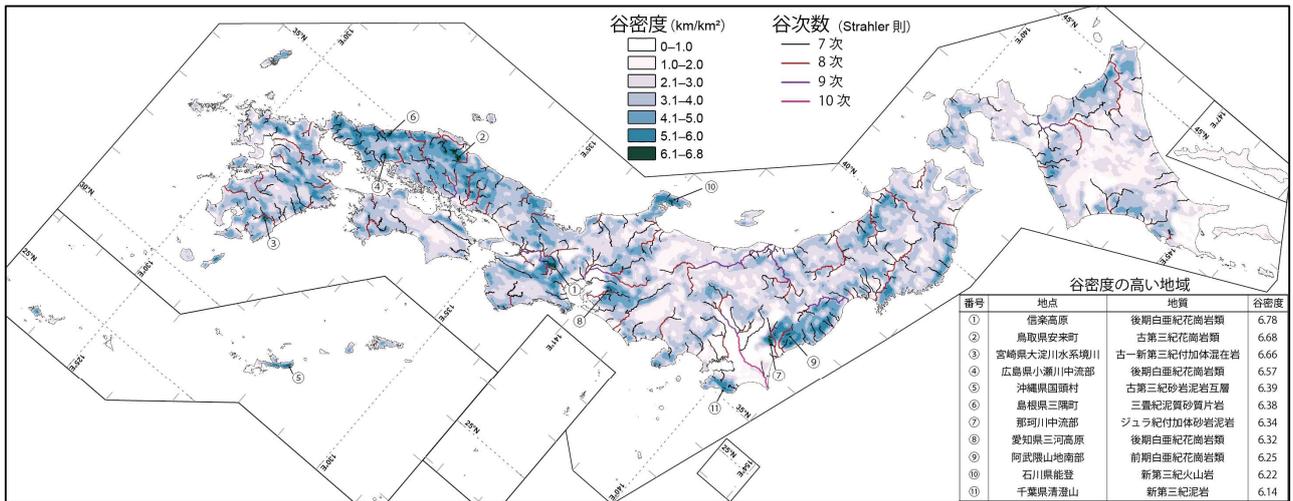


図-4 日本の水系・谷密度（国土地理院の数値標高モデルと水域データを使用して作成）

地質毎の谷密度の中央値は、花崗岩類が最も大きく（3.6 km/km<sup>2</sup>）、付加体に属さない石灰岩、未固結堆積物、火山灰で1.8 km/km<sup>2</sup>以下と小さい（図-3）。付加体、変成岩や火山岩は2.6-3.1 km/km<sup>2</sup>である。したがって、地域特性には気候だけでなく、花崗岩類や火山灰が偏在していることが影響していると考えられる。

谷密度は起伏量の変化に伴って増減した（図-4）。起伏量が0-50 mから100-150 mになると、谷密度の中央値は1.6 km/km<sup>2</sup>から3.4 km/km<sup>2</sup>へ大きくなる。起伏量がそれより大きくなると、谷密度は減少し1.6 km/km<sup>2</sup>に漸近する。柳田<sup>8)</sup>は起伏量が70-80 mの丘陵地で谷の数密度が最大（80本/km<sup>2</sup>）になることを示した。本論の谷密度の変化はそれと類似している。

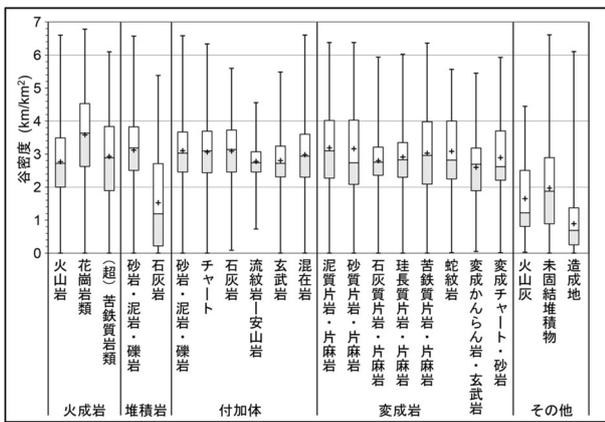


図-3 地質の区分と谷密度

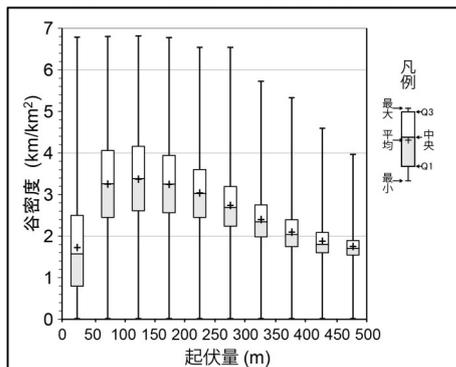


図-4 起伏量と谷密度の関係

#### 4. まとめ

全国的水系図を、既往の地形判読に調和する方法で10-20 m DEMから作成した。谷が特に高密度に分布する場所は花崗岩分布域の小起伏な山地であること、それに匹敵する密度の谷が花崗岩以外の地質においても小起伏な地形とともに存在することが明示された。

#### 文献

- 山崎 大・富樫冨佳・竹島 滉・佐山敬洋（2018）：日本全域高解像度の表面流向データ整備。土木学会論文集 B1(水工学), Vol. 74, No. 5, pp.163-168.
- 平田康人（2021）：数値標高モデルを用いた谷頭の抽出方法：等高線の折入角，1次谷の長さとの勾配に基づく計算モデル，令和3年度応用地質学会研究発表講演会, No.69, 2p.
- Oguchi, T. (1997): Drainage Density and Relative Relief in Humid Steep Mountains with Frequent Slope Failure. *Earth Surface Processes and Landforms*, Vol. 22, No. 2, pp. 107-120.
- 小松陽介（1999）：谷密度からみた蛇紋岩山地の特性-2 種類の谷の定義による評価-，*地理学評論 Ser. A*, Vol. 72, No. 1, pp 30-42.
- 産業技術総合研究所地質調査総合センター編（2018）：20万分の1日本シームレス地質図 V2，データ更新日:2018年1月10日。
- 塚本良則（1974）：侵蝕谷の発達様式に関する研究 (V) 水系網が作る流域地形とその変形過程について，*砂防学会誌*, Vol. 27, No.2, pp.19-28.
- 島野安雄（2017）：河川と流域（水系網），*自然地理学事典*（小池一之・山下脩二ほか編），株式会社朝倉書店, pp. 164-165.
- 柳田 誠・藤原 治・後藤憲央・佐々木俊法（2004）：谷密度と起伏量による丘陵の定義，*地学雑誌*, Vol. 113, No. 6, pp. 835-847.

# P21. アナログ実験による縦ずれ断層で形成される

## 副断層に関する基礎的検討

Fundamental Study on distributed fault developed by dip-slip fault based on analog experiments

○井上直人・北田奈緒子（地盤研究財団）・渡辺高志・登柳正夫（構造計画研究所）・渋谷典幸・小俣雅志（パスコ）  
Naoto Inoue, Naoko Kitada, Takashi Watanabe, Masao Tonagi, Noriyuki Shibuya, Masashi Omata

### 1. はじめに

地震により地表地震断層が発生すると、断層主部(主断層)よりも離れた場所に副次的な断層(副断層)が発生することがある。近年の航空機や衛星からのデータにより詳細に副断層の分布が得られるようになってきた(例えば、1)、2)など。これらの副断層の発生範囲や変位量は断層変位ハザードを考える上で重要な情報であり、多くの既往研究で検討されている(例えば 3)など。そこでアナログ実験にて縦ずれ断層の副断層の発生や分布について検討を行った。

### 2. 実験手法および実験結果

実験装置は逆断層、正断層ともに実験可能なように作成した(図-1)。変位の計測に用いたセンサーは、鉛直精度は  $5\mu\text{m}$ 、水平精度は  $0.1\text{mm}$ 、計測範囲は  $10\times 15\text{cm}$  である。模擬地盤には小麦粉を用いた。基底断層に与える変位は、初期では小さな変位量による構造形成をみるため細かい変位刻みになるよう、 $0\text{mm}$ 、 $0.5\text{mm}$ 、 $1\text{mm}$ 、 $2\text{mm}$ 、 $3\text{mm}$ 、 $5\text{mm}$ 、 $8\text{mm}$  とした。鉛直変位量がおよそ  $4\text{mm}$  程度になるよう、基底断層に与える変位は  $30^\circ$  の実験では  $8\text{mm}$ 、 $60^\circ$  の実験では  $5\text{mm}$  までとした。

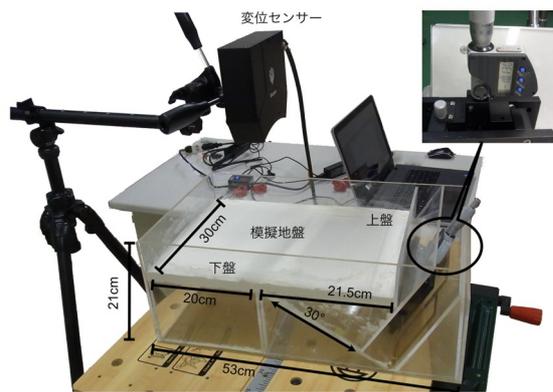


図-1 実験装置(断層傾斜角度は  $30^\circ$ )

ここで逆断層の実験結果を示す(図-2, 3)。各図にはある基底断層変位量におけるセンサーで得られた強度画像と高さ分布と、各基底断層変位量における断面図を示す。 $30^\circ$  の結果(図-2)では下盤側に基底断層からの延長に相当する主断層が形成された。各変位量における断面図(図-2c)では、基底断層での変位が

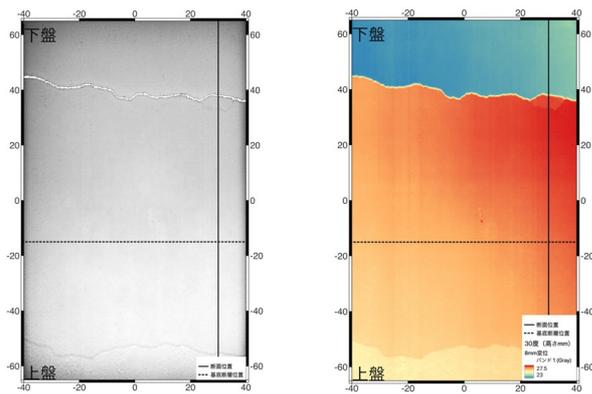
$0.5\text{mm}$  までは横軸  $50\text{mm}$  よりも上盤側で断層変位が発生しているが、基底断層変位が  $1\text{mm}$  以降は、横軸  $50\text{mm}$  付近で断層変位が大きくなり、最初に出現した断層変位は大きくなっていないようにみえる。すなわちこの断面位置での断層変位は、最初に発生した主断層変位が、その後より下盤側に移動して成長した様子がみられる。短い断層は初期段階では主断層で、主断層が下盤側に移動した後の変位はみられない。上盤側にも断層が形成され、いわゆるバックスラスト(例えば 4)に相当すると思われる。

$60^\circ$  の結果(図-3)でも下盤側に基底断層からの延長に相当する主断層が形成された。また、基底断層位置にも断層が発生している。各変位量における断面図(図-3c)では、基底断層の延長にあたる主断層は横軸  $60\text{mm}$  付近に発生しており、基底断層での変位が  $1\text{mm}$  を超えるあたりから、横軸  $40\text{mm}$  付近で傾斜交換点が生じている。また、基底断層での変位が  $2\text{mm}$  を超えるあたりから横軸  $0\text{mm}$  付近で断層変位が発生しており、基底断層変位の増大とともに断層変位が大きくなっている。

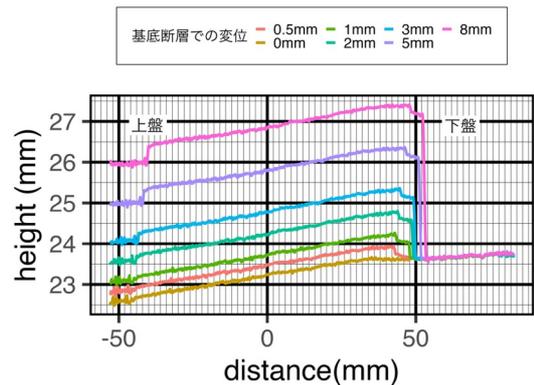
基底断層の延長に相当する断層を主断層、それ以外の断層を副断層として実験結果を整理すると、計測した範囲内だけでも主断層しか発生していない部分や副断層を伴う区間がみられ、複雑な断層分布のようすが得られた。低角逆断層で上盤側に形成される副断層は FEM の数値シミュレーションでは地盤強度が強くないと出現しないとされる<sup>5)</sup>。一方、正断層は基底断層の傾斜角に影響されず、高角な断層が形成された。

### 3. まとめ

小麦粉を模擬地盤として、模擬地盤底面の断層傾斜角度が高角( $60^\circ$ )、低角( $30^\circ$ )の逆断層・正断層の実験が可能な装置を用いて室内模擬実験を行った。逆断層の場合、低角の実験結果の方が副断層の分布範囲が広い傾向にあった。主断層の地表到達位置は低角ではおよそ模擬地盤底面の断層延長上であるが、高角の場合は模擬地盤中で低角度となり、より下盤側に出現する傾向にあった。一方、正断層では模擬地盤底面の断層傾斜角度によらず、基底断層のほぼ直上付近に主断層が出現する傾向にあった。また、高角の方が副断層の分布が広い傾向となった。

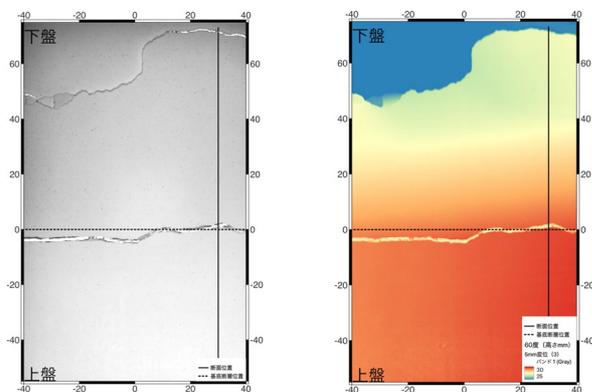


a: 強度画像．基底断層 8mm 変位．黒実線は図-2c の断面位置。  
b: 高さ分布．基底断層 8mm 変位．黒実線は図-2c の断面位置。

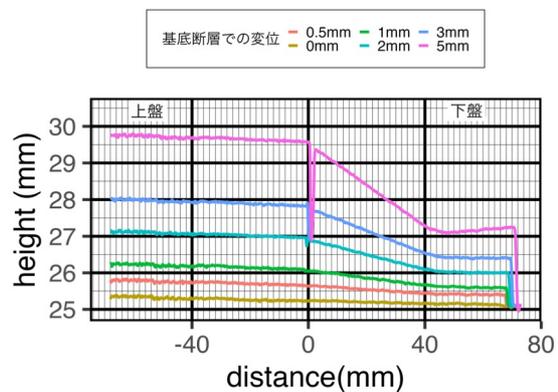


c: 横軸 30mm における断面図．基底断層は 0mm になるよう、図-2a, 2b よりシフトさせている。

図-2 逆断層実験結果 (断層傾斜角度 30°)



a: 強度画像．基底断層 5mm 変位．黒実線は図-3c の断面位置。  
b: 高さ分布．基底断層 5mm 変位．黒実線は図-3c の断面位置。



c: 横軸 30mm における断面図．HW:上盤, FW:下盤．基底断層は 0mm の位置。

図-3 逆断層実験結果 (断層傾斜角度 60°)

謝辞：本検討の一部は令和3年度原子力施設等防災対策等委託費(断層変位評価に係る調査)事業によるものである。

## 文献

- 1) Fujiwara, Satoshi, Hiroshi Yurai, Tomokazu Kobayashi, Yu Morishita, Takayuki Nakano, Basara Miyahara, Hiroyuki Nakai, Yuji Miura, Haruka Ueshiba, Yasuaki Kakiage, and Hiroshi Une (2016): Small-displacement linear surface ruptures of the 2016 Kumamoto earthquake sequence detected by ALOS-2 SAR interferometry, Earth, Planets and Space, Vol. 68, No. 1, 160.
- 2) 小俣雅志・郡谷順英・三五大輔・渋谷典幸・谷口薫 (2017): LC-InSAR 解析によって抽出される平成28年熊本地震の微小な地表変状, 日本活断層学会2017年度秋季学術大会講演予稿集, P-4.
- 3) Boncio, Paolo, Francesca Liberi, Martina Caldarella, and

Fiia-Charlotta Nurminen (2018): Width of surface rupture zone for thrust earthquakes: implications for earthquake fault zoning, Natural Hazards and Earth System Sciences, Vol. 18, No. 1, 241–256.

- 4) Butler, Robert W.H (1982): The terminology of structures in thrust belts, Journal of Structural Geology, Vol. 4, No. 3, 239 - 245.
- 5) Lin, Ming-Lang, Chun-Fu Chung, and Fu-Shu Jeng (2006): Deformation of overburden soil induced by thrust fault slip, Engineering Geology, Vol. 88, No. 1–2, 70 - 89.

## P22. 多変量解析による羊蹄火山山麓地下水の分類と水質形成モデルの推定

Classification and Modeling of Groundwater Chemistry Formation in Yotei Volcano by Multivariate Analysis

○太田岳洋 (山口大学), 久保佑佳 (山口大学, 現アサノ大成基礎エンジニアリング), 川上千尋 (山口県環境保健センター, 現山口県環境政策課), 金子伸生 (鉄道・運輸機構北海道新幹線建設局)

Takehiro Ohta, Yuka Kubo, Chihiro Kawakami, Nobuo Kaneko

### 1. はじめに

火山体山麓のトンネル工事では、高圧・多量な湧水による切羽崩壊や水没、周辺の水源の枯渇などの問題が発生している。火山山麓では火山噴出物が旧地形に依存した分布となるため、地質構造を推定することが難しく、地下水解析に必須となる水理地質モデルの構築が重要な課題となる。一方、地下水の水質は涵養域に供給された水の水質と、地下水が地下を流下する間の岩石との化学反応によって決定される。涵養域が火山体と想定できる場合には、湧水点での地下水の水質の相違から流下経路の違いや環境変化による水位低下の影響範囲を推定することが期待できる。そこで、本発表では独立峰で涵養域がその山体と想定できる羊蹄火山山麓に分布する地下水の主要イオン濃度の分析値についてクラスター分析、主成分分析による解析を行うことにより、地下水を分類し水質形成モデルを推定した結果を報告する。

### 2. 調査地の概要と調査方法

羊蹄火山は、北海道南西部の東北日本弧と千島弧の会合部に位置する成層火山である。山麓部の標高は約200mで、山頂標高は約1800mである<sup>1)</sup>。山体西麓には山頂火口から噴出した溶岩流や側火山である火砕丘が分布する<sup>2)</sup>。山麓には広く火山麓扇状地堆積物が分布し、南西麓には岩屑なだれ堆積物が分布する<sup>3)</sup>。これらの火砕物層が透水層となり帯水層を形成している。羊蹄山麓には多くの湧水が分布する。これらは水温や水質は一定であるが、イオン濃度は帯水層の地質を反映して、各湧水点で異なる<sup>4)</sup>。

羊蹄山麓に分布する湧水、ボーリング孔内水およびトンネル坑内湧水計32カ所について、2020年11月、2021年10月に調査を行い、計56試料の水試料を採取した。現地調査時に、水位、水温、pH、電気伝導率(EC)、酸化還元電位(ORP)を測定した。採取した水試料について、主要イオン濃度(Ca, K, Mg, Na, F, Cl, NO<sub>2</sub>, Br, NO<sub>3</sub>, SO<sub>4</sub>, PO<sub>4</sub>, HCO<sub>3</sub>)を測定した。また代表的な試料について、酸素同位体比、水素同位体比を測定した。

### 3. 結果

図-1に主要イオン濃度に基づいたトリリニアダイアグラムを示す。羊蹄火山周辺の湧水、ボーリング孔内水およびトンネル坑内湧水は、概ね重炭酸カルシウ

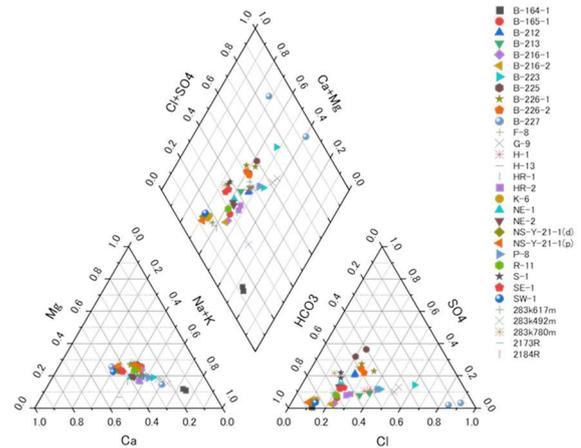


図-1 トリリニアダイアグラム

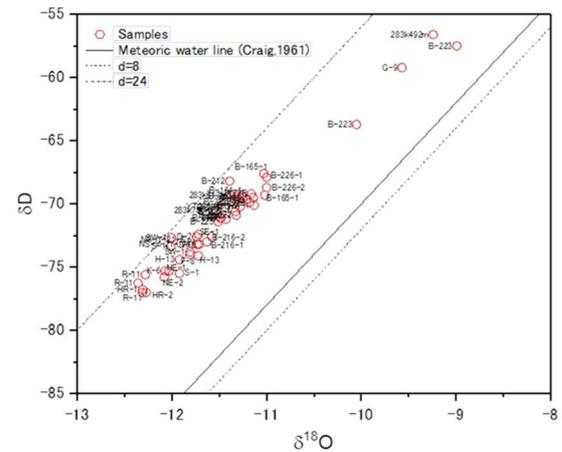


図-2 羊蹄火山周辺地下水の酸素水素同位体比

ム型を示す。B-227のみが非重炭酸カルシウム型、B-164-1のみが重炭酸ナトリウム型を示す。重炭酸カルシウム型の地下水は流動性地下水起源とされることから、羊蹄火山周辺の地下水は流動性に富む地下水であると想定される。

図-2に羊蹄火山周辺の地下水等の酸素水素同位体比を示す。すべての試料が天水線の幅にあることから、羊蹄火山周辺の地下水の起源は天水と推定される。酸素同位体比、水素同位体比から推定される地下水の涵養標高は580m~1450mであり、羊蹄山の中腹を涵養源とする地下水と推定される。

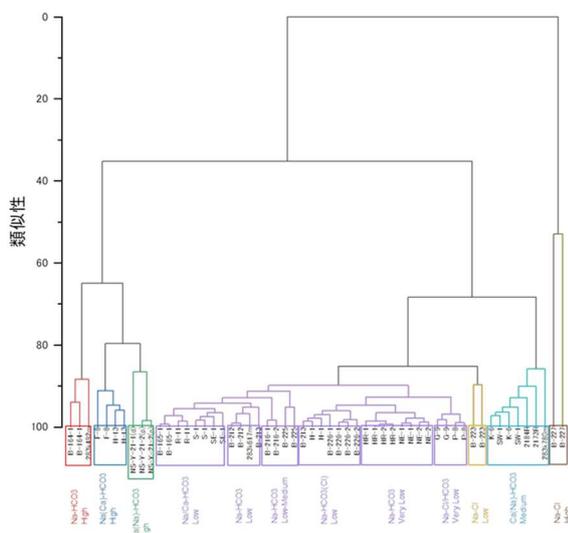


図-3 クラスタ分析による分類結果

#### 4. 考察

羊蹄火山周辺に分布する地下水の水質は、定性的にいくつかの種類に分類できる。そこで階層的クラスタ分析により、定量的な地下水の分類を試みた。クラスタ分析では、変数として主要9イオンのモル濃度を用いた。クラスタの方法は群平均とし、クラスタ間の距離はユークリッド距離を採用した。クラスタ分析の結果と各クラスタの水質分析値の特徴から、羊蹄火山周辺の地下水等の水質型は以下の通りにまとめることができることが分かった(図-3)。

- ・ クラスタ1: 高濃度の Na-HCO<sub>3</sub> 型
- ・ クラスタ2: 高濃度の Na(Ca)-HCO<sub>3</sub> 型
- ・ クラスタ3: 高濃度の Ca(Na)-HCO<sub>3</sub> 型
- ・ クラスタ4-1: 低濃度の Na/Ca-HCO<sub>3</sub> 型
- ・ クラスタ4-2: 低濃度の Na-HCO<sub>3</sub> 型
- ・ クラスタ4-3: 低～中濃度の Na-HCO<sub>3</sub> 型
- ・ クラスタ4-4: 低濃度の Na-HCO<sub>3</sub>(Cl)型
- ・ クラスタ4-5: ごく低濃度の Na-HCO<sub>3</sub> 型
- ・ クラスタ4-6: ごく低濃度の Na-Cl/HCO<sub>3</sub> 型
- ・ クラスタ5: 低濃度の Na-Cl 型
- ・ クラスタ6: 中濃度の Ca(Na)-HCO<sub>3</sub> 型
- ・ クラスタ7/8: 高濃度の Na-C 型

次に、水質分析値を用いて主成分分析を行い、水質形成機構の推定を試みた。主成分分析は9イオンのモル濃度を用いて相関行列による分析を行った。その結果、第1主成分の寄与率が40%で、第1～4主成分で累積の寄与率が80%に達するため、当該地域の地下水水質はこの4主成分により説明することができる。それぞれの主成分の各変数の固有ベクトル値から、第1主成分はCO<sub>2</sub>を含む天水による水-岩石反応を表し、第2主成分は正の値は人為汚染、負の値は人為汚染または含水鉱物の分解を示すと推定される。第3主成分も人為汚染を示し、第4主成分は人為汚染のうち主に施肥の影響を表すと考えられる。

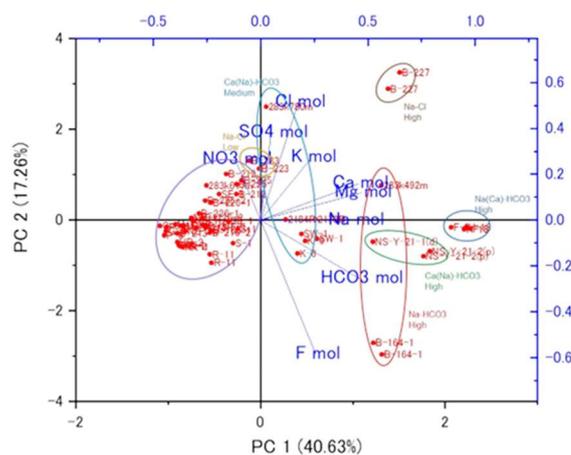


図-4 各試料の第1主成分、第2主成分のスコア値とクラスタ分析による分類結果

図-4に第1, 2主成分のスコア値分布とクラスタ分析による分類を対比した。クラスタ2が第1主成分のスコア値が最も大きく、水-岩石反応が最も進んだ水質である。次いでクラスタ3が高く、水-岩石反応がある程度進んだ状態である。クラスタ1も3と同程度の第1主成分のスコア値を示し、水-岩石反応が進んだ状態といえるが、第2主成分のスコア値に幅があり、第2主成分において異なった機構が作用している。クラスタ6は第1主成分が小さな正の値を示し、水-岩石反応の影響が認められ、トンネル坑内湧水は湧水とほぼ同じスコア値を有し、湧水と同じ水と推定される。クラスタ4は第1主成分が負の小さな値を示し、第2主成分も値も小さいため、水-岩石反応、人為汚染の影響ともに小さいといえる。クラスタ5はクラスタ4よりも第1, 2主成分のスコア値がわずかに大きく、水-岩石反応、人為汚染の影響をわずかに受けている。クラスタ7は第1, 2主成分のスコア値が共に大きく、水-岩石反応、人為汚染の影響を大きく受けているといえる。

#### 5. まとめ

羊蹄火山周辺の地下水の水質について、クラスタ分析を行い、これら水質型を定量的に分類できた。さらに主成分分析を行うことにより、分類されたそれぞれのクラスタについて、水質形成機構を推定できることが明らかとなった。

#### 文献

- 1) Uesawa et al. (2016): *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 325, 27-44.
- 2) 勝井義男 (1956): 羊蹄火山の地質と岩石, 5万分の1地質図福説明書「留寿都」附録.
- 3) 守屋以智雄 (1983): 日本の火山地形, 135p.
- 4) 鶴巻道二 (1989): 名水を訪ねて (7) 羊蹄のふきだし湧水と湧水群, 地下水学会誌, 31, 3, 165-173.

# P23. トンネル施工に伴う地下水流動変化予測結果の一考察

A Study of Prediction Results of Groundwater Flow Changes Associated with Tunnel Construction

○風見健太郎, 原伸匡, 澤田弦一郎 (株式会社エイト日本技術開発)

Kentarou Kazami, Nobumasa Hara, Genitirou Sawada

## 1. はじめに

トンネル施工を行う際には、事前調査が行われ地山の状態が把握される。また、トンネル周辺で水利用がある場合は、水質分析や地下水の流動を把握するための調査が行われ、施工影響の有無に関する評価が行われる。本報告では計画トンネル下方に重要水源が位置しており、この重要水源は施工中に一時的に水量の低下が見られたものの、施工後は水量が施工前に回復していた。このトンネルにおいては事前調査として電気探査、調査ボーリングによる地質構造の把握の他に、トンネル周辺の地下水について、施工前、施工中、施工後にイオン分析、酸素水素同位体比分析の水質分析を実施していた。水質の観点から水量回復の要因について、水質分析結果、主成分分析により検討を行った。

## 2. 地形地質概況・調査位置

本調査箇所は福井県の東部に計画・施工されているトンネルであり、図 2.1 に示す地質および調査位置平面図が示すようにトンネルは標高 1523m の山地山すそに計画され、路線長約 2500m のトンネルである。トンネルの西側および東側坑口には沢水が流下しており、東から西側に流下する河川に合流する。当該地の地質年代は中新世前期の新第三期であり、地質は花崗閃緑岩と安山岩類からなる地域である。

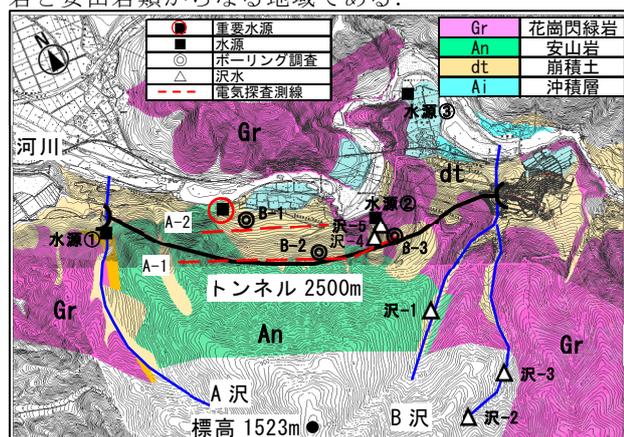


図 2.1 地質および調査位置

## 3. 調査項目・方法

地下水流動を把握するための調査として施工前、施工中・施工後調査として以下に示す調査を実施した。

**施工前(平成 27 年)調査** 電気探査、ボーリング調査、水質分析 (イオン分析、酸素水素同位体比分析)

**施工中(平成 31 年)・施工後(令和 3 年)調査** 水質分析 (イオン分析、酸素水素同位体比分析)

調査位置は図 2.1 に示す位置で実施し、計画道路に

平行な測線で地質構造を把握するための電気探査を実施した。(弾性波探査も別途実施) また、ボーリング調査は探査の補足評価を行うとともに採水実施のための観測孔とした。採水はボーリング観測孔、周辺沢水イオン分析は水源と地下水のイオン組成の把握、酸素水素同位体比分析は水源の涵養標高の把握を行うことを目的に実施した。

## 4. 電気探査結果

施工前に実施した図 4.1 に示す電気探査結果を示す。電気探査はトンネルに平行に 2 測線実施し、山側の A-1 測線、谷側の A-2 測線でそれぞれ、低比抵抗帯が確認された。A-1 測線の距離程 170~270m、570~620m、A-2 測線の距離程 300~420m でトンネルと交差する箇所で低比抵抗帯が確認された。2 測線の低比抵抗帯から南側、南西側の地下水流動の 2 方向の地下水の流れが考えられた。この結果を図 4.2 に示す地質図との重ね合わせ図に示すと、重要水源は流動①と流動②の地下水の混合で形成されると予想した。なお、流動①は花崗閃緑岩と安山岩の地質境界を流動する地下水、流動②は安山岩を伏流する地下水と考えた。

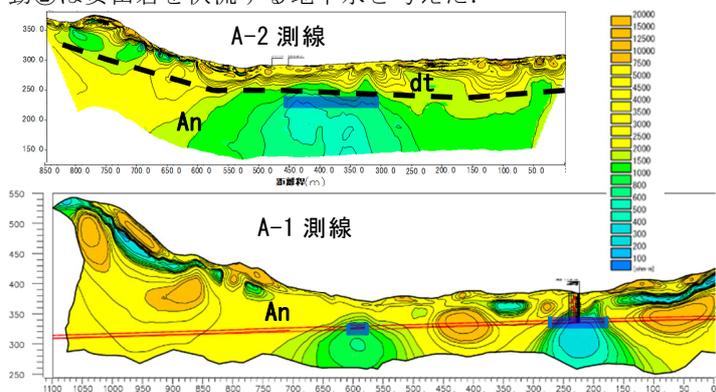


図 4.1 電気探査結果

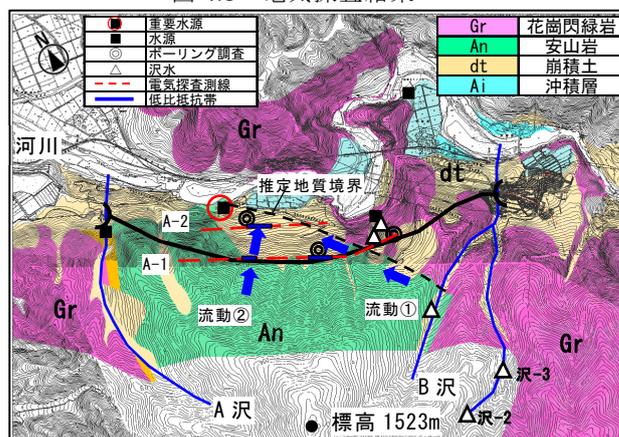


図 4.2 想定される地下水流動方向

## 5. 酸素水素同位体比分析結果

施工前、施工中、施工後において酸素水素同位体比分析を行った。水質分析は重要水源、水源②、水源③、B-2、B-3、沢-5 で実施した。採水時期は季節変動を考慮し同一時期に実施した。分析結果は事前に求めている推定涵養標高線から推定涵養標高を求め、施工前、施工中、施工後の涵養標高の変化で比較した。図 5.1 に示すように施工前と施工中および施工後の涵養標高の変化をグラフ化した。その結果、施工前に比べ、施工中、施工後にかけて涵養標高が低下した。施工の進捗とともに、高標高からの地下水はトンネルに排水されていると考えられる。

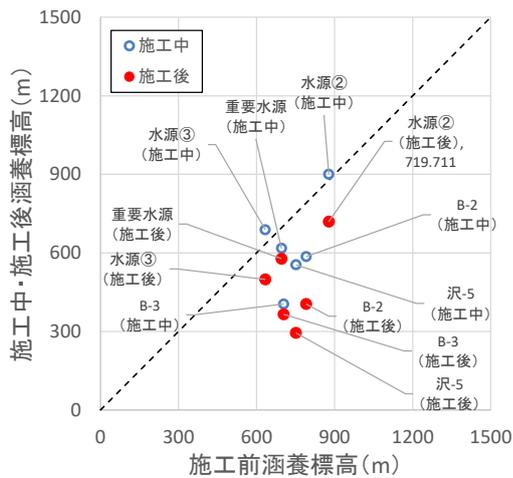


図 5.1 施工前、施工中・施工後の涵養標高の比較

## 6. イオン分析データを用いた主成分分析

6.1 主成分分析を用いた三角形エンドメンバーズ法による地下水組成の検討

イオン分析データを用い主成分分析を行った。主成分分析の結果は図 6.1 に示すように第 1 主成分得点、第 2 主成分得点に整理を行った。その結果、当該地の地下水は沢-2、B-1、B-3 が端成分となる 3 成分の地下水成分で表現できるものと考えた。なお、図中に各箇所へのヘキサダイアグラムを示す。それぞれ、成分の特徴が見られ沢-2 は、高標高部の表流水である。ヘキサダイアグラムの形状が、他の成分に比べて小さく、イオン濃度が低い。B-1 は  $Mg-HCO_3$  型、B-3 は  $Ca-HCO_3$  型を示しており、それぞれ、ボーリング調査結果から安山岩の地下水、花崗岩由来の地下水と考えられた。

### 6.2 施工前、施工中、施工後の地下水組成の変化

図 6.1 より 3 つに分類した端成分における重要水源の濃度を求め、施工前、施工中、施工後の各水質成分の変化を図 6.2 示す。図 6.2 より重要水源においては、施工前の地下水組成は当初予測していたように流動①、流動②の混合であり、各成分の濃度がバランス良く混合されていることが分かる。また、施工前に比べ施工中にわずかに高標高部からの表流水成分が減少したが、施工後には水質成分も回復した。なお、重要水源は施工中に多少の水量の変化は見られたものの、施工後に

水量が回復しており、成分組成の変化と一致している。また、図 6.3 に示すように施工前・後で推定涵養標高が大きく変化したところは高標高部地下水が大きく減少していた。

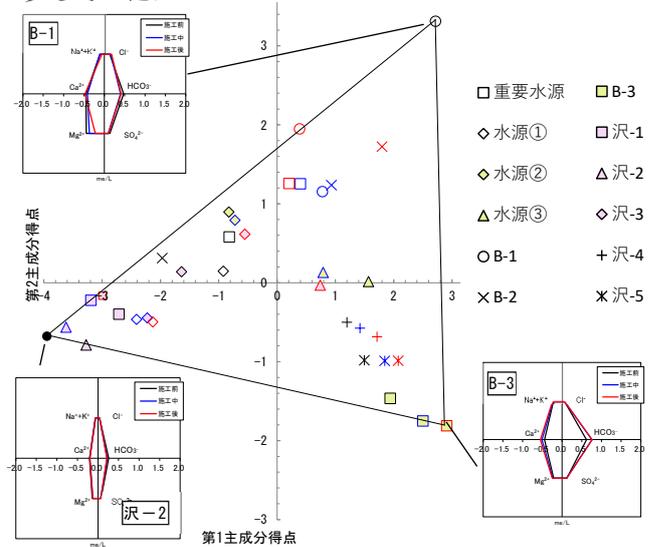


図 6.1 主成分分析により求めたエンドメンバー

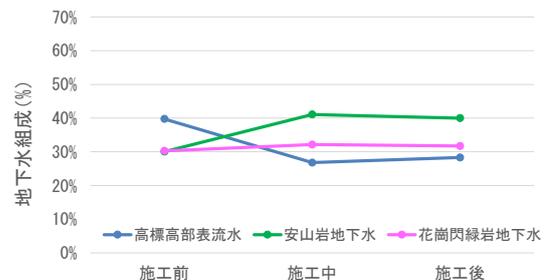


図 6.2 重要水源の水質組成の変化

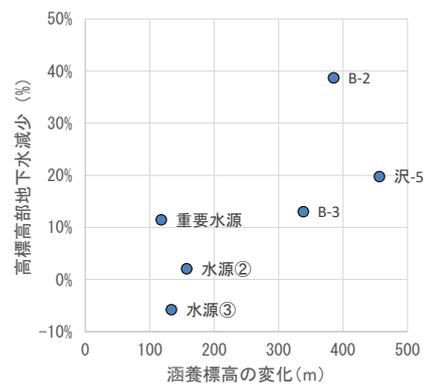


図 6.3 施工前後における涵養標高と高標高地下水の減少割合の関係 (施工前—施工後)

## 7. まとめ

重要水源において電気探査、ボーリング調査等の地質調査結果で事前に予測した地下水流動状況は、水質組成や施工前後の涵養標高の変化から水質分析による検討結果と符合するものであった。地下水位の測定だけでなく、水質分析を行い詳細な評価を行うことも重要であることが分かった。本報告はトンネル下流の施工でも、水源水量が回復した事例として報告したものである。

## P24. 地表の水銀蒸気の挙動に着目した水銀探査法の提案

The proposition of mercury exploration method aiming at behavior of mercury gas in the surface of the earth.

○板井秀典（ジオクロノロジージャパン(株)）、野田徹郎（国立研究開発法人 産業技術総合研究所）  
Hidenori Itai, Tetsuro Noda

### 1. はじめに

安価に極微量測定が可能な水銀は、地下深部の高温環境下で高い揮発性があり、移動して地表で水銀分散ハローを形成するため、地熱調査では多くの報告事例があるが、土壌水銀と水銀蒸気との基礎的な関係が究明されていないのが、水銀探査の認知が進まない一因と思われる。

そこで野外実験と実際の環境を模した室内実験を行うことにより、両者の基礎的な関係を以下のように結論づけた。

i.その関係は、土粒子表面の単位面積に対する蒸発可能な液体水銀と土壌間の気相における水銀蒸気の間で生じている。

ii.その関係は、温度依存した気液平衡に関するヘンリーの法則に従う拡散に規制される（図-1）。

iii.その関係は、土表面乾燥時の水銀固定と湿潤時のガス化による発散に規制される（図-2および3）。

iv.その関係は、ii に比べiiiの影響がはるかに大きい。

これらの知見から従来の水銀探査手法の改良を提案し水銀分散ハローマップの高性能化を目指した。この改良は水銀探査法の再評価に寄与し、地熱、温泉、活断層、鉱床および水銀汚染等の諸問題に対し有効な手法として再認識されることが期待される。

### 2. 研究の背景

水銀は金属鉱床（椎川<sup>1)</sup>）や地熱の探査で1970年代から利用されてきた（古賀他<sup>2),3),4)</sup>、Matlich他<sup>5)</sup>等）。Siegel and Siegel<sup>6)</sup>は1988年に、土壌に含まれる水銀と土壌空気間の水銀蒸気の関係が、基本的にアレニウス式に従うことを発表し、野田他<sup>7)</sup>は1993年にこの原理を利用した水銀蒸気の探査法を提案している。今世紀初頭の2003年にScholtz他<sup>8)</sup>は「温度依存したヘンリーの法則に従った気液平衡に支配されて拡散する」ことを提唱した。一方、1999年にLindberg他<sup>9)</sup>はフィールド実験で土壌乾燥後の降雨で水銀蒸気圧が急上昇することを発見した。Scholtz他<sup>8)</sup>はこの現象に否定的であったが、2005年にSong<sup>10)</sup>はこの現象を室内実験で確認したことを報告した。また板井他<sup>11)</sup>は2006年に土壌が乾燥していることで土壌への水銀の固定が進むことを発表し、地表付近の水銀が乾燥時の固定と降雨時の発散を繰り返していると発表した（図-3）。

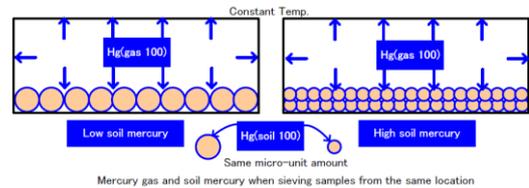


図-1 閉鎖系における液相（固相を含む）と気相の水銀の関係  
気液平衡でバランスされている。

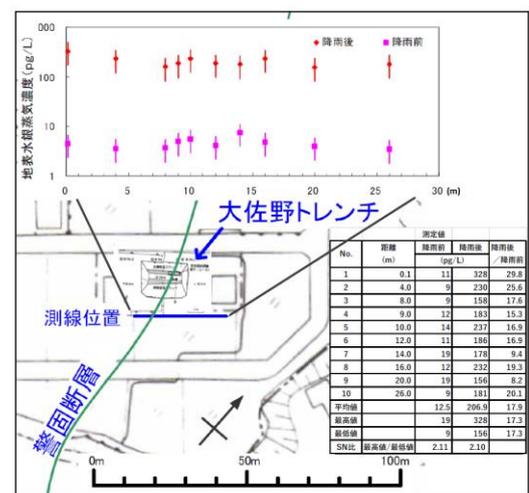


図-2 同一測線における降雨前後の水銀蒸気濃度変化

この降雨による水銀蒸気の上昇について、Lindberg 他<sup>9)</sup>は「浸透した(雨)水により水銀蒸気を含む土中ガスが物理的に置換される一方、乾いた土粒子表面に吸着していた液体水銀(Hg<sup>0</sup>)が(雨)水分子に交換され、さらに土粒子の表面に吸着されていた2価水銀が加水により離脱して液体水銀に還元される」と提案している。

このように今世紀に入り次第に地表付近の水銀の挙動が明らかとなってきた。しかし、椎川<sup>1)</sup>、古賀他<sup>2),3),4)</sup>および野田他<sup>7)</sup>などの探査法の提案は、これらの知見が得られる以前に提案されたものであり、改良の余地がある。そこで本論では新たな知見を踏まえ、これらの探査法の改良を提案した。

### 3. 水銀探査法の提案

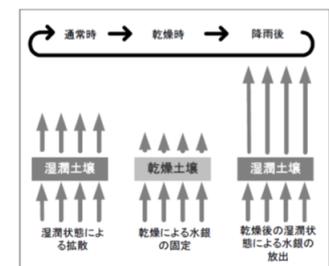


図-3 土壌の乾湿の繰り返しによる水銀の固定と放出の模式図

試料の採取地点について、以下の条件を提案する。

- ・土壌地面の表土であること。
- ・洞窟内や軒下等の常時乾燥している場所は水銀の固定が進んでいるので不適。
- ・常時湿潤状態の場所は土表面の水により水銀の蒸発が妨げられるので不適。

また、測定するときは以下のやり方を推奨する。

- ・土壌の水銀を測定する場合は、粒度を一定とするフルイ分けが必要（椎川<sup>1)</sup>）。
- ・現地で測定する SS 法（野田他<sup>7)</sup>）を行う場合は、降雨、乾燥、日照対策が必要。
- ・精密な測定が必要な場合は、乾燥表土加水金線法が有効。

乾燥表土加水金線法は、φ20cm、H20cmのパッカー内に室内乾燥させた土壌試料400gを入れ、試料が飽和せず湿潤状態になるように一定量加水して、一定温度下で水銀蒸気を発生させる。それを金線法（古賀他<sup>2),3),4)</sup>）に用いる金線（加熱処理して試験管に封入した純金線φ1mm、長さ10cm）に24時間暴露し、金線に吸着した水銀を測定するものである（図-4）。本手法の特徴は、土壌測定における粒度調整の困難を回避し、温度や土壌の湿潤状況による水銀蒸気濃度の変動要因を排除して、多数の試料を同時に測定できるので、高効率で精度の良い水銀分散ハローの等高線図の作成が可能である。

本法による活断層の検出例を図-5に示した。板井他<sup>11)</sup>は、福岡県太宰府市の警固断層大佐野トレンチにおいて、既知の活断層における本手法の適用実験を行った。その結果、統計処理による危険率が2%で、活断層と水銀蒸気には関連性があることを証明し、埋伏した活断層の位置の把握に本手法が有効であると提案した。

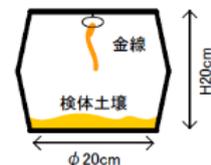


図-4 乾燥表土加水金線法模式図

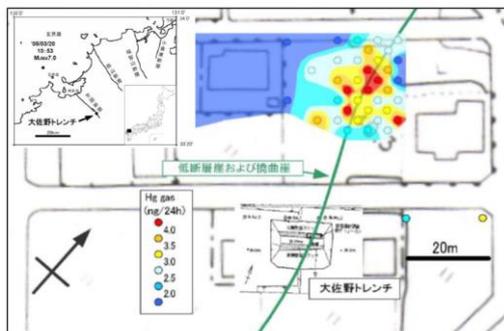


図-5 活断層の検出例（板井他<sup>11)</sup>）

#### 4. まとめと展望

地表付近の水銀の挙動から水銀分散ハローの正確な位置情報を得る手法を提案した。安価に超微量の測定が可能な水銀探査法は汎用性が高く、以下の諸問題

に対し有効な情報をもたらすと考えている。

- i.熱源に関連のある断層を指示することから、地熱発電や温泉掘削を目的とした基礎調査。
- ii.表土に覆われた金属鉱床の性状把握。
- iii.水銀が地下深部から連続し地表に達していることから、埋伏した活断層の認定。
- iv.原因不明の水銀汚染の解明。

#### 文献

- 1) 椎川 誠(1971): 地球化学探査について、金属鉱床探査における指示元素としての水銀 (1): 日本鉱業会誌. Vol.87, No.1001, pp.538-542.
- 2) 古賀昭人(1973): 地熱地帯のナウな化学診断法, 温研紀要, Vol.25, No.4, pp.167-177.
- 3) 古賀昭人・野田徹郎(1974): 地熱地帯の噴気をもたらすもの, 大分県温泉調査研究会報告, Vol.25, pp.48-52.
- 4) 古賀昭人・野田徹郎(1975): 地熱地帯の蒸気系における地球化学的探査法, 地熱, Vol.12, No.4, pp.18-21.
- 5) Matlich, J.S., Buseck, P. R. (1975): Exploration for geothermal areas Using mercury; *A new geochemical technique, 2nd U. N. Symposium on the Development and Use of Geothermal Resources. San Francisco*, Vol. III, pp.785-792.
- 6) Siegel, S. M., Siegel, B.Z. (1988): Temperature determinants of plant-soil-air mercury relationships. *Water Air Soil Pollut.*, 40, 443-448.
- 7) 野田徹郎・谷田幸次・内海衛・高橋正明 (1993): N パッカー～携帯型気体水銀測定装置による地表地熱探査. 日本地熱学会誌. Vol.15, No.3, pp.207-230.
- 8) Scholtz, M.T., Van Heyst, B.J., Schroeder W. H. (2003): Modelling of mercury emissions from background soils. *The Science of the Total Environment*. Vol.304 (2003), pp.185-207.
- 9) Lindberg, S. E., Zhang, H., Gustin, M., Vette, A., Marsik, F., Owens, J., Casimir, A., Ebinghaus, R., Edwards, G., Fitzgerald, C., Kemp, J., Kock, H. H., London, J., Majewski, M., Poissant, L., Pilote, M., Rasmussen, P., Schaedlich, F., Schneeberger, D., Sommar, J., Turner, R., Wallschlager, D., and Xiao, Z. (1999): Increases in mercury emissions from desert soils in response to rainfall and irrigation. *J. Geophys. Res.*, Vol.104, No.D 17, pp.21,879-21,888.
- 10) Song, X., Heyst, B, V. (2005): Volatilization of mercury from soils in response to simulated precipitation. *Atmospheric Environment*, Vol.39, pp. 7494-7505.
- 11) 板井秀典・中川康一(2006): 新しい水銀探査法の開発と活断層への適応, 日本地球惑星科学連合大会予稿集, 2006, pp.S107-001.



### 3. 試験結果と考察

#### 3.1 屋外大型土槽実験結果

土槽内部の各深度に埋設した酸化還元電位計の観測結果を図-3に示す。測定深度と酸化還元電位の値は逆相関を示し、1.8 mまでの土槽表層部では500 mV前後、2.8 m以深の深部では200~350 mVのより還元的な値が観測された。これは、土槽深部における土丹試料の酸化反応が浅部よりも抑制されていることが示唆される。深さ2.3メートルの酸化還元電位は、春から値の上下動が見られることから、土槽内の酸化還元反応の境界領域であると考えられる。

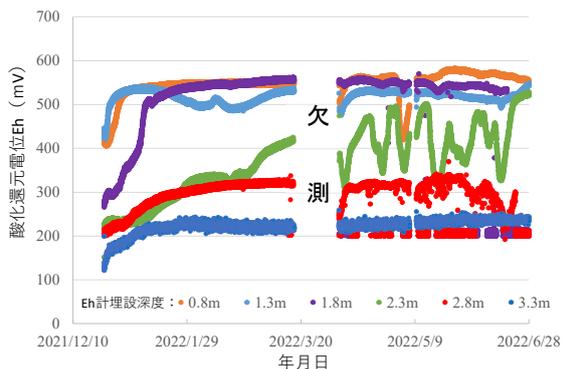


図-3 酸化還元電位計の観測結果

#### 3.2 攪拌翼繰り返し溶出試験結果

累積液固比と pH, Eh, As との関係を図-4に示す。

まず、液固比の増加に伴い蒸留水の pH は低下し、脱気水の pH は高くなった。特に、液個比が30以降の試験結果において、蒸留水と脱気水の pH の差が最大で2程度開いた。これは、大気環境下で行われた蒸留水の試験では、開放容器での攪拌により溶存酸素濃度が常に大気平衡となり酸化反応が促進されたことのほか、より静的な条件となる攪拌翼による溶出試験では動的な振とう試験に対して中和反応が抑制され酸化反応が進行したことが可能性として示唆される。

次に Eh は、蒸留水で412~460mV (平均444mV) を示し、脱気水では324~389mV (平均352mV) を示した。As は、蒸留水と脱気水ともに液固比が20で最大値を示し。液固比30以降は低下傾向を示した。また、液固比20~30の値を除き脱気水の As 濃度が蒸留水の As 濃度よりも高い値を示した。これは、貧酸素環境下では、黄鉄鉱などの硫化物態の酸化分解が抑制され、よりアルカリ側の条件でイオン交換態として存在するヒ素の溶出が促進されたと考えられる<sup>2)</sup>。

#### 3.3 盛土内の環境特性を踏まえた溶出試験の適用性

屋外大型土槽実験による土槽内部の Eh は、1.8mまでの土槽表層部で500 mV前後、2.8m以深の深部で200~350 mV程度のやや還元的な環境であった。一方、攪拌翼繰り返し溶出試験結果から蒸留水を用いた試験の Eh は、412~460mV を示し、脱気水を用いた試験の Eh は324~389mV を示した。これらのことから、蒸留水を用いた攪拌翼繰り返し溶出試験は盛土天端から深さ

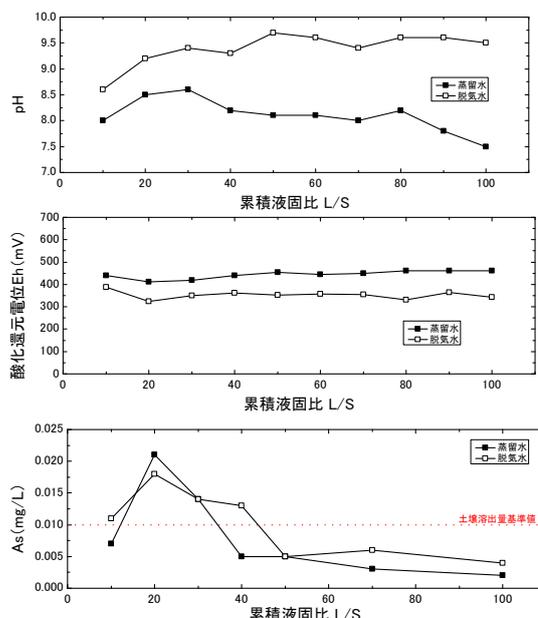


図-4 酸化還元累積液固比と pH, Eh, As との関係

2.3 m での酸化還元電位に相当し、また脱気水を用いた攪拌翼繰り返し溶出試験は盛土天端から深さ2.8 mより深部の還元的な酸化還元電位に相当したものと考える。一方、As の溶出傾向は、脱気水の As 濃度が蒸留水の As 濃度よりも高い値を示した。このことから、サイト概念モデルによるリスク評価を実施するにあたり、発生源となる盛土の浅層を蒸留水による試験結果に加えて、盛土深層を脱気水による試験結果をそれぞれ入力することで、より合理的な評価が行えるものと考えられる。

### 4. おわりに

ヒ素を含むトンネル掘削ずりを用いた屋外大型土槽実験および大気環境下と貧酸素環境下での攪拌翼繰り返し溶出試験を行い、酸化還元電位を比較した。屋外大型土槽実験結果から蒸留水を用いた攪拌翼繰り返し溶出試験は盛土天端から深さ2.3 mでの酸化還元電位に相当し、脱気水を用いた攪拌翼繰り返し溶出試験は盛土天端から深さ2.8 mより深部の還元的な貧酸素環境における酸化還元電位に相当したことが明らかとなった。

今後は、屋外大型土槽実験を継続すると共に、重金属等の拡散挙動を把握するモニタリング技術の開発が挙げられる。

### 文献

- 1) 田本修一, 山崎秀策, 倉橋稔幸 (2022) : 自然由来ヒ素を含む掘削岩石を用いた実現現象再現溶出試験方法に関する一考察, 寒地土木研究所月報, No.828, pp.10-13.
- 2) 島田允亮 (2014) : 自然由来重金属と環境汚染一応用地質学・地球化学的データバンク, 愛智出版, 240p.

# P26. 濁水解析による伏流水取水施設の原水濁度の現況再現

Reproduction of raw water turbidity at subsoil water intake facilities by turbidity analysis

○西山 浩平, 松浦 祐樹, 山本 晃(八千代エンジニアリング), 渡邊 修(水文企画),  
鷲見 浩司, 吉川 修一, 原昌成(八千代エンジニアリング)

Kohei Nishiyama, Yuki Matsuura, Akira Yamamoto, Watanabe Osamu,  
Washimi Koji, Shuichi Yoshikawa, Masanari Hara

## 1. はじめに

A 川では、整備計画に基づく治水対策のため、流下能力不足箇所を対象とした河道（河床・高水敷）掘削が計画されている。対象地の河床下～高水敷には、地域の重要水源である伏流水取水施設が埋設されており、本対策が施設に及ぼす影響予測並びに取水機能確保が課題であった。上記の背景を踏まえ、調査・試験・解析を実施し、取水施設の原水濁度を現況再現することで、取水施設への影響有無・移設計画立案に資する知見を得た。

## 2. 調査対象地の概要

対象地の伏流水取水施設近傍で実施したボーリング調査より、砂混じり礫を主体とする Ag 層とシルト混じり砂礫を主体とする Dg 層が確認された。伏流水取水施設の集水管は、Ag 層が分布する深度 (T.P. -6.0m 付近) に設置されており、現河床までの土被り厚は約 8.0m であると想定された (図-1)。

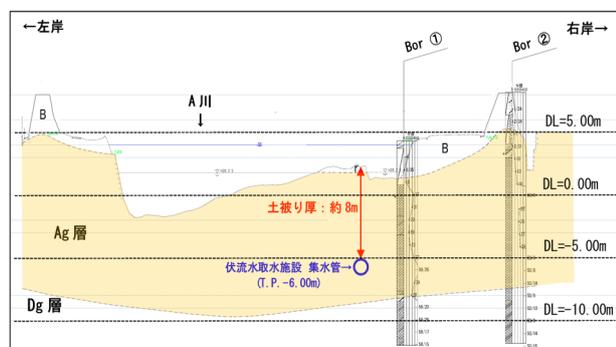


図-1 伏流水取水施設近傍の地質横断面図

## 3. 伏流水取水施設の取水源(伏流水)の濁り特性

伏流水取水施設では、取水源となる伏流水の他、A 川の河川水の濁度を観測しており、西日本豪雨 (2018 年.7 月) において以下の濁り特性が認められた。

- ①西日本豪雨 (2018 年.7 月) に伴い A 川河川水の水位の上昇と濁水化が発生した。
- ②伏流水取水施設にも河川水の濁度変化に呼応した伏流水の濁度の上昇,低下が発生した。
- ③その濁度は最大 10 度であり、河川水の最大濁度約 300 度に比べ低かった。

## 4. 検討の手順

### 4.1 室内カラム試験による濁り特性の把握

Ag 層について、濁度を低減させる効果が想定されたため、室内カラム試験を実施した。試験は、ISO/TS 21268-3(2007)<sup>1)</sup>に準拠し、上向流カラム通水試験とした(表-1)。本試験は、濁水源となり得る A 川の河床砂礫を純水に投入し攪拌・放置した懸濁液(約 300 度)をカラム試料に注水することで、濁度の低減効果を確認する「濁水試験」と、塩水を注入することで、カラム試料中に含まれる吸着イオンによる Na<sup>+</sup>あるいは Cl<sup>-</sup>への吸着効果を把握する「塩水試験」を実施した(表-2, 写真-1)。

表-1 カラム試料の仕様

試料の最大粒径	4mm 以下
試料径	φ 50mm
試料長	10cm, 20cm, 30cm
充填方法	<ul style="list-style-type: none"> <li>・1 層 2cm に分割して充填</li> <li>・125g のおもりを用いて、20cm の高さから 3 回落下させて締め固める</li> <li>・試料の両端にはガラスビーズを充填することで密実性を高める</li> </ul>

表-2 塩水試験および濁水試験の概要

塩水試験	<ul style="list-style-type: none"> <li>①純水の注水・飽和</li> <li>②塩水の注水</li> <li>※塩水は溶質：NaCl / 溶媒：純水、濃度は 1,000mS/m</li> </ul>
濁水試験	<ul style="list-style-type: none"> <li>①純水の注水・飽和</li> <li>②濁水の注水</li> <li>※A 川の河床砂礫を純水に投入して攪拌させた懸濁液(約 300 度)を注入</li> </ul>
試料長	10cm, 20cm, 30cm
注水量	5ml/min (300ml/hr)
試験時間	液固比 (L/S) : 1/10 まで (または通過水の水質安定まで)
採水頻度	L/S (液固比) : 0.1, 0.3, 0.5, 0.7, 1, 1.5, 2, 5, 10
分析項目	<ul style="list-style-type: none"> <li>・電気伝導度 (塩水注水時)</li> <li>・濁度 (濁水注水時)</li> <li>・SS (濁水注水時)</li> </ul>

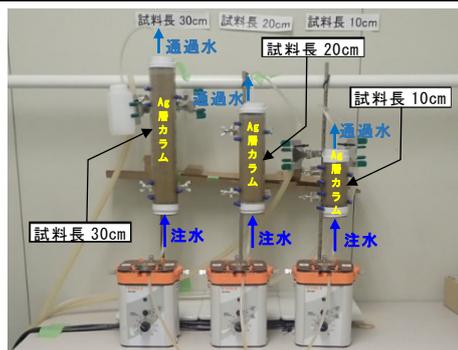


写真-1 室内カラム試験の実施状況

## 4.2 三次元解析モデルの構築

ボーリング調査結果から、盛土層(B層)の下面と沖積砂礫層(Ag層)の下面の標高を読み取り、それぞれの層の下面等高線図を作成した。これらの図から、伏流水取水施設の取水帯水層であるAg層の分布域を想定し、三次元解析モデルに反映した(図-2)。

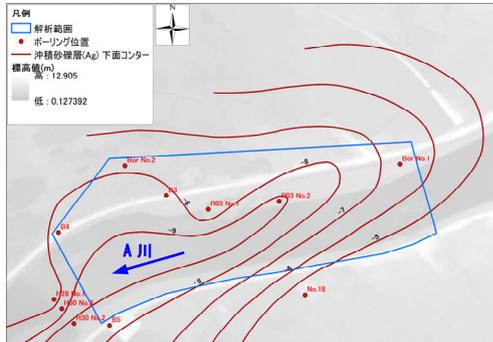


図-2 沖積砂礫層(Ag層)の下面等高線図の例

## 4.3 解析で用いる条件の設定

解析では、地形、地質、透水係数、地下水位、河川水位等の条件と共に、伏流水施設の構造や取水量、原水濁度を加味した(表-3)。なお、本解析では西日本豪雨時の原水濁度を再現するために、当時の表流水の最大濁度(約300度)を河川水濁度として設定した。

表-3 濁水解析で用いた設定条件

条件設定項目	設定値等	備考	
① 地形	現地地形	堤外(水面下含む)は実測測量結果 堤内は5mDEM	
② 地質	3層(盛土・沖積層・洪積層) (洪積層を3m厚までモデル化)	周辺のボーリング調査結果に基づき作 図した地層下面等高線	
③ 透水係数	盛土: $2.0 \times 10^{-4}$ m/s 沖積層: $2.0 \times 10^{-4}$ m/s 洪積層: $2.0 \times 10^{-4}$ m/s	既往資料、原位置試験より設定	
④ 地下水位	施工前の地下水位(豊水期)	解析対象期間と同じ豊水期の地下水位のため	
⑤ 河川水位	定点の水位変化から 補間した水位	近傍に位置する堰の放流量から換算	
⑥ 河川水濁度	4.0~299.6度	表流水の濁度	
伏流水取水施設	集水管	T.P. -6.00m (直径1m)	伏流水施設の縦断面図の記載値
	水位	T.P. 0.66~5.97m	伏流水施設の資料
	取水量	0または18,370~19,402m <sup>3</sup> /d (0または89~94m <sup>3</sup> /d/m)	伏流水施設の資料
⑩ 原水濁度	0.60~10.0度	伏流水施設の資料	
⑪ 堤内地下水位	周辺井戸の 実観水位で固定	周辺井戸の水位変化データ	

## 5. 室内カラム試験の結果

### (1) 塩水試験

カラムを通過した水(通過水)について、設定した時間(液固比)毎に採水し、電気伝導率(mS/m)を測定した。さらに、各通過水の電気伝導率 C(mS/m)と注水した塩水の電気伝導率 1,000mS/m(C0)を用いて C/C0 を算出し、塩水試験による C/C0 変化グラフを作成した(図-3 左図)。いずれのカラム長も C/C0=1.0 まで電気伝導率が上昇し、その後、値が安定した。また、カラム長が長いほど電気伝導率の濃度変化が遅延した。

### (2) 濁水試験

カラムを通過した水(通過水)について、設定した時間(液固比)毎に採水し、濁度を測定した。さらに、各通過水の濁度 C(度)と注水した濁水の濁度 300度(C0)を用いて C/C0 を算出し、C/C0 変化グラフを作成した(図-3 右図)。いずれのカラム長においても濁度の低減

効果が認められ、その効果はカラム長が長いほど大きくなる結果となった。

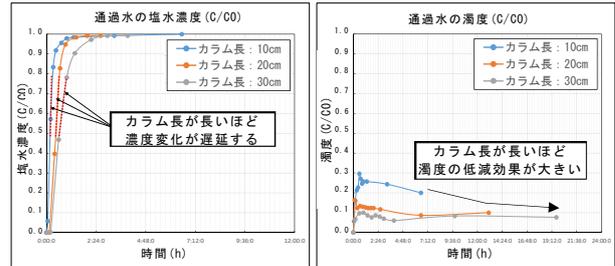


図-3 C/C0 グラフ(左図:塩水試験, 右図:濁水試験)

## 6. 豪雨時の原水濁度の再現

西日本豪雨が発生した期間(2018年7月3日~2018年7月16日)について移流分散解析を実施した。また、解析に用いた解析定数は、西日本豪雨時の現地観測結果や室内カラム試験の結果を用いて設定した(表-4)。

表-4 解析定数の設定値

定数	記号	単位	設定値	備考
スケール長	L	cm	1,000	河床~集水管までの距離
ペクレ数	Pe	-	7.5	塩水試験の平均値(供試体:3本) (スケール長と分散長の比率)
分散長(縦)	$\alpha_L$	cm	132.5	塩水試験より算出( $=L/Pe$ )
分散長(横)	$\alpha_r$	cm	13.25	分散長(縦)の1/10
有効空隙率	ne	-	0.31	塩水試験の平均値(供試体:3本)
半減期	$T_{1/2}$	h	5.0	Ag層を通過することで濁度が半分となる時間
減衰定数	$\lambda$	1/day	3.327	$\lambda=1n2/T_{1/2}$

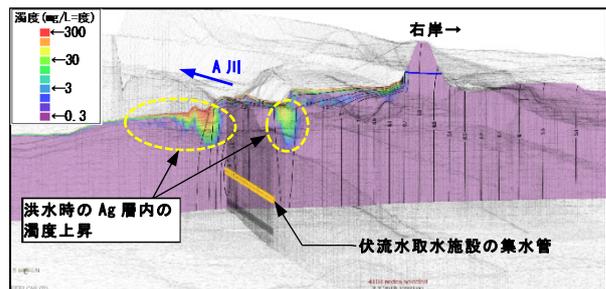


図-4 移流分散解析による濁度分布変化(豪雨時)

## 7. まとめ

西日本豪雨時の伏流水取水施設周辺の濁度変化を移流分散解析により可視化することができた。これにより、将来想定される河道掘削に伴う取水施設への影響有無・移設計画立案に資する知見を得た。

## 8. 今後の展開

本法は、様々な建設工事で伴う掘削作業にも適用できるため、保全対象への濁水影響予測や、施工方法・工程や事前対策を検討する上で有用と考える。今後は、様々な取水帯水層について事例<sup>2)</sup>を蓄積し、本法の有効性を確認していきたい。

## 文献

- ISO/TS 21268-3(2007):Soil quality-Leaching procedures for subsequent chemical and ecotoxicological testing of soil and soil materials -Part 3: Up-flow percolation test
- 西山浩平(2021):水源井戸の濁水影響予測・評価と地下水質モニタリング計画, 一般社団法人建設コンサルタント協会 近畿支部,第54回研究発表会

## P27. 福島県沖地震に伴う薬師堂石仏の劣化とその評価

Deterioration of the Yakushido Stone Buddha after the Fukushima Prefecture Offshore Earthquake and its evaluation

朽津信明, 白石明香 (東京文化財研究所)

Nobuaki Kuchitsu, Sayaka Shiraiishi

### 1. はじめに

地震などの自然災害によって自然地形が変化したり人工的な構造物が損傷を受ける場合があるが、もしもそれ以前に対象の三次元形状が把握されていれば、被災後の三次元形状を計測することによってその災害に伴う変化を厳密に評価できることになる。そのような過程を経れば、次の災害を想定して起こる被害を予測し、予め対策を検討していくことにも寄与できると期待され、こうした考え方は文化財を災害から守ることに貢献可能となるだろう。

本研究では、2022年3月に起きた福島県沖地震に伴って被災した、国指定史跡である薬師堂石仏において、震災前に取られていた三次元データと、震災後に取られた三次元データとを比較することから、この地震によって引き起こされた劣化を評価し、今後の保存方針の検討に寄与していくことを目標とする。

### 2. 薬師堂石仏とこれまでの保存のあゆみ

薬師堂石仏は、福島県南相馬市に位置する、新第三紀の凝灰質岩（砂岩及び泥岩）の岩盤に平安時代に造られたと考えられている磨崖仏群（図-1）で、1930



図-1 薬師堂石仏全体（2020年時点の三次元データに基づく）  
右から順に、1号像、2号像、3号像、4号像、5号像、6号像までが現存し、6号像の左に過去には7号像があったと言われる。

年に国の史蹟（現在は史跡）に指定されている<sup>1)</sup>。磨崖仏は過去には7体あったとされるが、現在は6体が残存している。これは、元々の自然地形が洞窟状になっていた岩盤を人為的に掘り広げることで石仏龕が造られ、そこに東西方向に並んで磨崖仏群が築造されたものと考えられるが、西端の像（7号像）が後世の崩落で失われた状況と考えられる。1953年に龕の正面を覆う木造覆堂が建てられ、石仏の環境変動はある程度軽減されてきたと考えられるが、その後も塩類風化や凍結破砕によると見られる表面崩落が指摘されていた<sup>2)</sup>。その後、正面だけでなく岩体上部まで屋根がかけられて雨水の供給が軽減され、また覆堂内の気密性向上が図られて今日に至っている（図-2）。

### 3. 2020年以前に認知されていた劣化

1953年の覆堂構築に伴い、その直前の様子が撮影された写真が市に残されており、その後も1966年、1994年にそれぞれ多方向から撮影された写真が残されて



図-2 薬師堂石仏を覆う建物

いるため、それらに基づいて多視点ステレオ技術によりそれぞれの撮影された時点での三次元形状を構築した。また2010年と2017年に行われたレーザー測定のデータが市に残されていたことから、それらのデータも加え、さらに2020年に新たに写真撮影して三次元データを構築し、筆者らはそれぞれの時代ごとの形状変化を論じて結果を公表していた<sup>3)</sup>。

それによれば、既に失われている西端の7号像の隣の6号像で劣化が目立ち、特に6号像下部では木の根が岩盤に入り込んでいてその付近での表面崩落は2020年まで継続していると考えられた。崩落は東端の1号像でも認められたが、2～5号像においては、両端の像に比べると2020年までに検知される形状変化（劣化）は相対的に乏しいと判断された（図-3）。



図-3 2010年～2020年に劣化が検知された箇所  
1cm以上のずれが検知された箇所を着色（中心投影表示）

### 4. 2022年福島県沖地震とその後の調査

2022年福島県沖地震は3月16日に発生しており、南相馬市では2011年3月11日を上回る震度6強を記録している。この際、薬師堂石仏を覆う覆堂も損傷を受けており、1号像近傍の東側で建物と岩盤との取り付け部が毀損して隙間が空き（図-4）、6号像近傍の西側でも同様に取り付け部に隙間が新たに生じた。その後、4月13日に石仏群の写真撮影を行った。

#### 4.1. デジタル写真と三次元形状の構築

多視点ステレオ技術<sup>4)</sup>に基づき、磨崖仏群をオリンパス製デジタルカメラ Tough TG-5 にて多方向から1900枚撮影し、(株)オークの Agisoft Metashape を用いて撮影時点での三次元形状モデルを構築した。



図-4 1号像付近の取り合い部の隙間(木の根が入り込む)

#### 4.2. ずれの検証

オープンソフトウェアの Cloud Compare を用いて2020年に構築されていたデータ<sup>3)</sup>と位置合わせを行い、2022年4月13日の形状との差異をオルソ画像上に表示して検知した(図-5)。その結果、両者で3mm以上のずれが検知された箇所は西端の6号像近傍と東端の1号像近傍とにほぼ限定され、その間に存在する2号~5号の像では大きな差異は検知できなかった。1号像においては、像そのものよりも東側の龕の入り口付近の建物との間の取り合い部近傍の光背部分で比較的多く差異が検知された。6号像においては、像の肩付近で差異が認められた他、像より西側の龕の入り口に近い部分の建物との取り合い部近傍の光背部分、そして台座部分で大きな差異が認められた。



図-5 2020年と2022年とで差異が検知された箇所3mm以上の差異が検知された箇所を着色(中心投影表示)

### 5. 考察

今回の福島県沖地震の影響で劣化が検知されたのは、おおむね現状で龕の東西両端に位置する1号像と6号像周辺に限定された。2020年以前に検知されていた劣化も1号及び6号像付近で目立っていたことが報告されており<sup>3)</sup>、特に木の根が岩盤に入り込んでいる部分では、それが今回の地震で揺さぶられたことで表面崩落が直接引き起こされた可能性も考えられる。つまり、今回の地震による磨崖仏の被害は、新たに亀裂が生じたというような概念の新規の劣化というよりは、既に劣化が進行していた部分で最終的な崩落が引き起こされたという面が大きいと考えられる。これは、龕の奥部と周縁部とでは環境条件が異なり、岩盤の乾燥しやすさや木の根の入り込み易さなどの条件が異なってい

たことで、地震前の段階から龕の周縁部で既に劣化が進行していたことによると考えられる。さらに今回の地震で岩盤と建物との取り合い部が損傷を受けて隙間が空いており(図-4)、それにより隙間付近の岩盤ではさらに乾燥化が進み、龕の周縁部ではこの先表面崩落がさらに進行する可能性も否定できない。

以上に基づいて、今後の保存や防災の可能性について検討する。まず、薬師堂石仏で覆堂の建物が損傷した部分については早急に補修して、さらなる岩盤の乾燥化を軽減し、表面崩落を予防することが必要だろう。また、他地域の磨崖仏群を考えた場合でも、龕の周縁部で特に劣化が引き起こされやすい可能性が今回指摘されたため、薬師堂石仏も含めて今後の防災を考える上では、特に石仏龕周縁部の像についての詳細な検証が望まれることになろう。既に岩盤自身が強度低下していたり、木の根が入り込んでいる部分について次の地震での崩落を予防することは容易ではないが、崩落が起きやすい箇所を予め認識して現状の詳細な形状を記録しておき、また監視カメラによる継続的な観察を行うなど、後からでも崩落箇所を確認できる体制を築くことも検討される余地がある。また、薬師堂石仏はかつては7号像まで存在していたものが過去に崩落し、現在の覆堂はそれを前提に6号像までを覆うように建てられたと考えられることから、結果として周縁に存在するに至った6号像でその後の劣化が引き起こされやすくなっている可能性が考えられる。ならば本来の龕の範囲を理解し、それに見合う建物のあり方を再検討することも保存対策の一つとなる可能性がある。本来の龕全体を覆う建物は6号像を龕周縁部から遠ざけることで乾燥化や植物の根のさらなる入り込みを軽減する可能性が考えられ、そのような考え方は、他の磨崖仏の保存を今後考えていく上でも応用可能だろう。

**謝辞** 南相馬市教育委員会から過去の薬師堂石仏の写真のご提供をいただき、また現地調査に際して便宜をお図りいただいた。以上を記して御礼申し上げます。

#### 文献

- 1) 福島県相馬郡小高町編(1968): 史跡薬師堂石仏付阿弥陀堂石仏・史跡観音堂石仏修理工事報告書
- 2) 関陽太郎・平野富雄・渡辺邦夫(1987): 福島県小高町薬師堂石仏群の劣化と水・岩石相互作用, 岩石鉱物鉱床学会誌, 82, pp.269-279
- 3) 白石明香・朽津信明(2021): 過去の写真・三次元測量データを用いた薬師堂石仏の崩落の検証, 文化財保存修復学会第43回大会研究発表集, 170-173
- 4) 朽津信明・酒井修二・藤田将人(2020): 過去の写真に基づく恐竜足跡化石の風化速度の検証, 日本応用地質学会令和2年度研究発表会講演論文集, 167-168

## P28. 衛星干渉 SAR 解析による静岡県内の地すべり調査

Landslide monitoring and detection with InSAR technique in Shizuoka Prefecture

○杉本 惇, 下村 博之, 柴山 卓史 (株式会社パスコ), 杉本 敏彦, 芹澤 啓, 大石 理智, 木ノ内 慎 (静岡県)  
Jun Sugimoto, Hiroyuki Shimomura, Takashi Shibayama, Toshihiko Sugimoto, Kei Serizawa, Norisato Oishi, Maki Kinouchi

### 1. はじめに

定期的に計測される SAR 衛星の位相データを用いた干渉 SAR 解析は、地表面の変動を把握する技術であり、広域での地すべり活動を測ることに用いることが可能である。静岡県では土砂災害防止法に基づく二巡目基礎調査を実施しており、地滑りの基礎調査対象箇所を抽出するため、干渉 SAR 解析を用いて調査を実施した。調査は、地滑りの土砂災害警戒区域（以下、地滑りの警戒区域）を対象とした変動の確認に加えて、地すべり変動の可能性のある箇所の抽出を行い、現地調査を実施した。

### 2. 調査方法

静岡県全域を対象として、広域の干渉 SAR 解析を実施する。干渉 SAR 解析には宇宙航空研究開発機構（以下、JAXA）が運用する ALOS-2 の観測データを用いることとした。同衛星は 2014 年 5 月に打上げられ、同年から現在に至るまで JAXA による観測が行われている。ALOS-2 の定常観測には、地球の周りを北から南へ下りながら右方向（おおむね西向）を観測する「南行軌道」と、南から北へ昇りながら右方向（おおむね東向）を観測する「北行軌道」がある。2 軌道を使用した干渉 SAR 解析は、検出感が低い斜面を補間することができる（図-1）ため、本研究では南行軌道と北行軌道の 2 軌道分の解析を実施する。干渉 SAR 解析に使用したデータの諸元を表-1 に示す。ALOS-2 データは東西の観測幅が 50km 程度であるため、南行軌道と北行軌道それぞれ 3 軌道分のデータを使用した。データの観測時期は対象範囲において降水量の多かった令和元年東日本台風（2019 年 10 月）や、令和 2 年 7 月豪雨（2020 年 7 月）、令和 3 年 7 月 1 日からの大雨（2021 年 8 月）の前後のデータを含む 6 時期分とした。

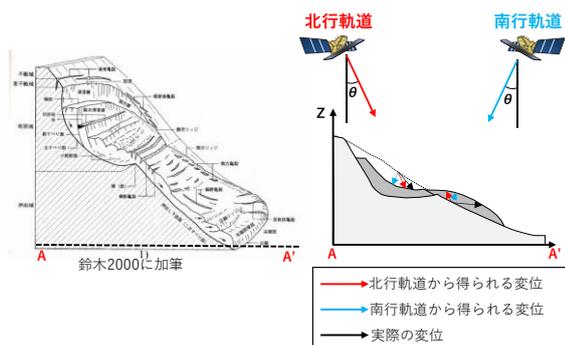


図-1 干渉 SAR で地すべりを測るイメージ

表-1 干渉 SAR 解析に使用する衛星 SAR データ

観測日	時期	北行軌道			南行軌道		
		おおむね西部の範囲 (U2-7モード)	おおむね中部の範囲 (U2-8モード)	おおむね東部の範囲 (U2-6モード)	おおむね西部の範囲 (U2-8モード)	おおむね中部の範囲 (U2-7モード)	おおむね東部の範囲 (U2-6モード)
観測日	1時期目	2018/3/16	2018/3/30	2019/5/19	2018/3/13	2018/2/27	2019/2/12
	2時期目	2019/2/15	2019/3/1	2019/11/3	2019/3/12	2019/2/26	2019/7/30
	3時期目	2019/5/24	2019/6/7	2020/5/17	2019/8/27	2019/8/13	2019/10/22
	4時期目	2019/11/8	2019/11/22	2021/2/7	2019/11/19	2019/11/5	2020/7/28
	5時期目	2020/5/22	2020/6/5	2021/5/16	2020/8/25	2020/8/11	2020/10/20
	6時期目	2021/2/12	2021/2/26	2021/10/31	2020/11/17	2020/11/3	2021/7/27

### 3. 結果と考察

#### 3.1 地滑りの警戒区域の変動の確認

地滑りの警戒区域 345 箇所を対象に、変動の有無を判定した。変動有無の判定には、既往の判読方法<sup>2)</sup>を採用し、さらに複数の干渉 SAR 解析結果を用いて地すべり変動としての時系列的な整合性を確認し判定を行った。判定結果は、「変動あり」、「変動なし」、「判定不能」（ノイズなどによって干渉 SAR では判定ができなかった箇所）の 3 種類に分類した。判定結果を表-2 に示す。「変動あり」が 54 箇所、「変動なし」が 198 箇所、「判定不能」が 93 箇所であった。「変動あり」と判定された箇所は、令和元年東日本台風（2019 年 10 月）や令和 2 年 7 月豪雨（2020 年 7 月）の干渉 SAR 解析結果で変動が確認された箇所が多い。一方で、判定不能が 93 箇所であった原因は地滑りの警戒区域が急斜面で不可視領域となる場合や、干渉性が低く変動状況を確認することができない場合が多かった。

大雨前後で変動がある箇所や、明らかな変動がない箇所を判定することはできたが、地形条件や地表の変化状況によっては判定不能になってしまう箇所も一定数あることが確認できた。干渉 SAR 解析ではすべての箇所を把握することができないことにも留意が必要である。

表-2 地滑りの警戒区域の判定結果

判定	変動あり	変動なし	判定不能	合計
箇所数	54	198	93	345

#### 3.2 地すべり変動の可能性のある箇所の抽出

広域における変動箇所の抽出を行うため、既往の判読方法<sup>2)</sup>にしたがって変動候補箇所を抽出した後、3.1 と同様に複数の干渉 SAR 解析結果を用いた時系列的整合性を確認し変動箇所として抽出した。

抽出結果の分布を図-2 に示す。西部の天竜川流域や中部の大井川流域に多く分布する一方、東部地域で

は変動抽出箇所はほとんど確認されなかった。また、変動抽出箇所の変動時期は 3.1 の結果と同様に、令和元年東日本台風や令和 2 年 7 月豪雨の前後で変動が発生している箇所が多い。以上の結果は地形・地質条件の違いに加え、変動が発生したと考えられる大雨の降水量等の地域的な特徴が関係していると考えられる。

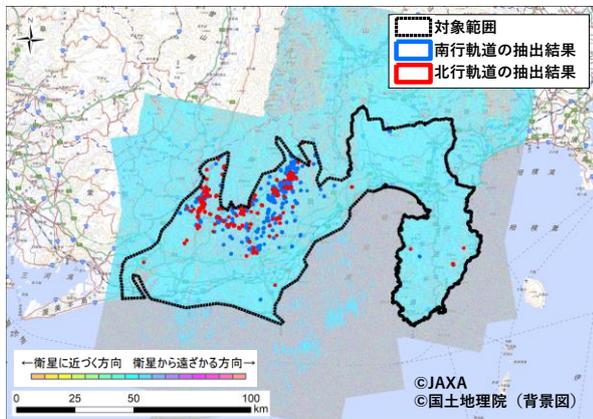


図-2 干渉 SAR による変動抽出結果分布図

変動抽出箇所のうち、新規に地滑りの警戒区域となりうる可能性のある（変動範囲内またはその周辺に人家もしくは将来的に人家等の立地の可能性がある土地が存在する）64 箇所について、地すべりの兆候を示す変状の現地調査を実施した。その結果、46 箇所において抽出箇所周辺に路面や擁壁の変状が確認できた。変状が確認できた箇所の 1 例を示す。図-3 に干渉 SAR 解析結果、図-4 に現地調査による変状確認位置を示す。当箇所は南行軌道 15 回分の干渉 SAR 解析結果のうち、複数時期において変動が確認された箇所である。当箇所の LP データから作成した微地形強調図に、現地の変状位置をプロットした。路面の変状や、擁壁の亀裂等、抽出箇所の境界（赤枠）において、複数の変状が確認できた。

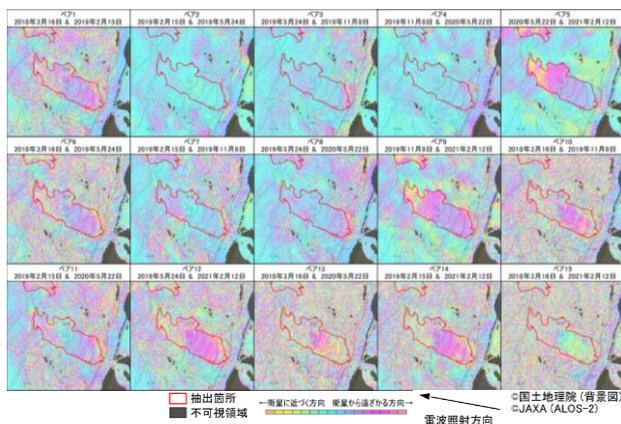


図-3 新規に変動を抽出した箇所の干渉 SAR 解析結果（南行軌道の結果）

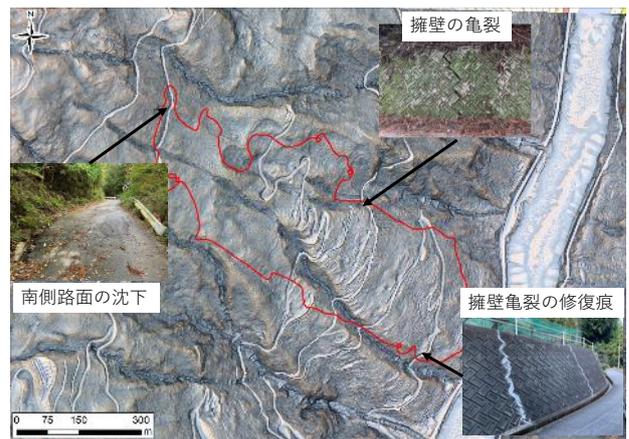


図-4 変動抽出箇所例における変状位置

#### 4. まとめ

干渉 SAR は、広域を一度に把握可能であることから、既往箇所の活動状況および新規の活動箇所の予備調査への活用の有効性が示された。また、豪雨や地震後に活発化する地すべり性の変動監視においても有用であると考えられるため、定期モニタリングに加え、緊急モニタリングも状況によって実施することも望まれる。これまで地滑り防止区域や地滑り危険箇所として抽出されていない箇所も、干渉 SAR 地すべり解析によって抽出される可能性がある。これらは基礎調査対象箇所あるいは地滑り対策事業の対象箇所となる可能性がある。また、基礎調査対象箇所の抽出にあたっては、土砂災害警戒区域の指定要件を満たすか否かを判断するため、現地調査により土地利用状況や変動範囲の妥当性を確認する必要がある。

なお、本研究において使用した ALOS-2 は年に数回程度対象地域を観測するが、ALOS-2 の後継機である ALOS-4 は年に 20 回程度の高頻度観測が見込まれる。今後は高頻度に観測されるデータを活用した精度の高い手法<sup>3)</sup>を用いてモニタリングを実施していくことが望ましい。

#### 文献

- 1) 鈴木隆介 (2000) : 建設技術者のための地形図読図入門第 3 巻段丘・丘陵・山地, 朝倉書店.
- 2) 平田育士ほか (2017) : 干渉 SAR 解析における変動縞判読方法の検討, 平成 29 年度砂防学会研究発表会概要集, p.458-459.
- 3) 松本史子ほか (2022) : 宮井地区地すべりを対象とした時系列干渉 SAR 解析による変動検出, 令和 4 年度砂防学会研究発表会概要集, p.309-310.

## P29. 道路に接する斜面上の転石等の安定性評価事例

Stability evaluation example for boulders on slopes in contact with roads

○西川 大亮, 五反田 光彦 ((株) パスコ), 向井 淳, 上山 暁一 (神戸市), 土佐 信一 (国土防災技術 (株))

Daisuke Nishikawa, Mitsuhiko Gotanda, Jun Mukai, Akikazu Ueyama, Shinichi Tosa

### 1. はじめに

斜面上の露岩や転石の安定性を評価する方法はその評価対象等によっていくつかの手法がある。本報告では同じ露岩や転石を対象に、4つの定性的な評価手法を用いて評価しその結果を比較検討したので報告する。

また、評価結果から危険側に評価されたものと安全側に評価されたものを対象に「振動計測に基づく斜面上転石の落石危険度評価方法<sup>1)</sup>」(以下振動調査と略す)を実施したので、合わせて報告する。

### 2. 定性的な安定性評価方法

転石等を対象とした定性的な安定性評価方法は、対象の転石等に対して目視点検や打音点検を実施し、その見た目や感触等により技術者が主観的に安定性を評価するものである。

本報告ではこのタイプの定性的評価手法として以下の4つの手法を適用した。

- (1) 道路防災点検の手引き(豪雨・豪雪等)<sup>2)</sup>の安定度調査による評価(以下道路防災点検の手引と略す)
- (2) 落石対策便覧<sup>3)</sup>の安定度ランクによる安定性評価
- (3) 落石対策技術マニュアル<sup>4)</sup>の落石発生に関わる素因、誘因の抽出を考慮した方法による安定性評価
- (4) 樹木の成長を誘因とする新しい落石災害に着目した点検手法<sup>5)</sup>の降雨及び樹木に対する落石安定度評価(以下樹木の成長を誘因とする点検と略す)

同じ転石等対象にこれら4つの評価手法を適用して評価した。その評価結果を比較検討するため、それぞれの手法で評価した結果を不安定側から順位付けし、その順位を比較することで評価結果を比較検討することとした。

### 3. 定性的な安定性評価結果の比較方法

各評価手法から得られる評価結果は以下のようなものである。

- (1) 道路防災点検の手引：点数
- (2) 落石対策便覧：安定度ランク
- (3) 落石対策技術マニュアル：チェック方式
- (4) 樹木の成長を誘因とする点検：優先度

これらの評価結果を並べて比較するため、それぞれの評価結果を点数評価に置き換えるものとした。

道路防災点検の手引と落石対策便覧については、評価結果をそのまま点数に読み替えた。落石対策技術マニュアルについてはチェック結果を検証し、評価項目

ごとに安定側評価か不安定側評価かの2択となるよう閾値を設け、不安定側評価となった項目の数を点数とした。図1に例として落石対策技術マニュアルの評価項目の1つである「割れ目・構造等の状況のチェック結果」を示す。この例では①～④にチェックされたものは不安定評価、⑤に評価されたものは安定評価と判定した。

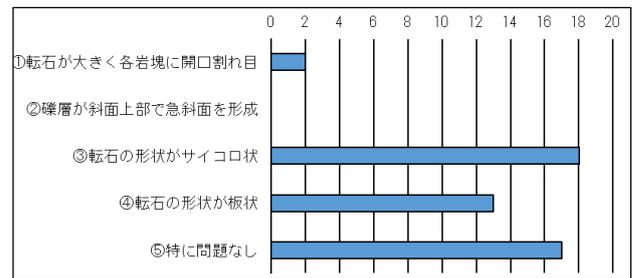


図1 割れ目・構造等の状況のチェック結果の分布例

樹木の成長を誘因とする点検では、結果は優先度 A～C の3ランクの評価結果となるが、同一ランク内でのさらに詳細な優先順位をつけるために A) 降雨に伴う落石の安定性評価表と B) 樹木との関係による安定性評価表を利用し、A) のチェック数と B) の得点を組み合わせ点数化した。

4つの評価結果を並べて比較するため、同じ評価手法内での得点数に対応して不安定側から安定側への順位付けを行い、その順位を比較することとした。

### 4. 定性的な安定性評価の結果比較

評価は斜面内に散在する平均直径400mm以上の転石等50個を対象に実施した。

4つの評価結果は道路防災点検を比較対象として、その他3つの評価結果を比較するものとした。

横軸は1から50までの転石等の番号、縦軸に不安定側から並べた順位としたグラフを作成した。

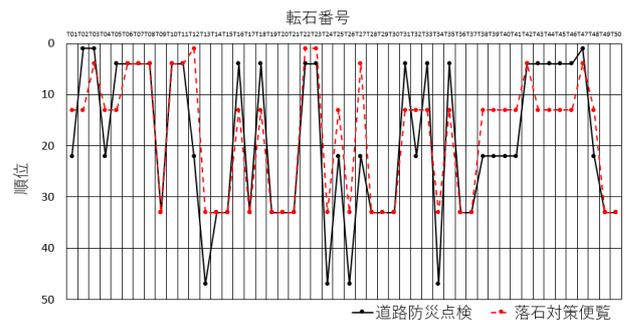


図2 道路防災点検の手引と落石対策便覧の評価結果比較

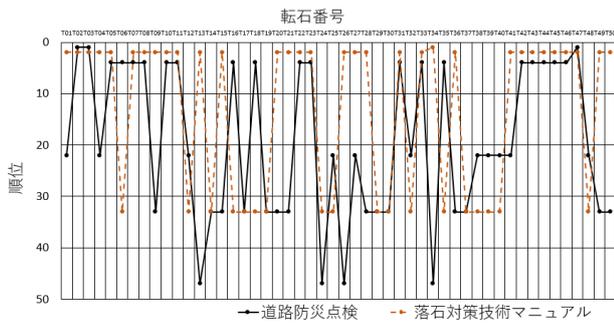


図3 道路防災点検の手引と落石対策技術マニュアルの評価結果比較

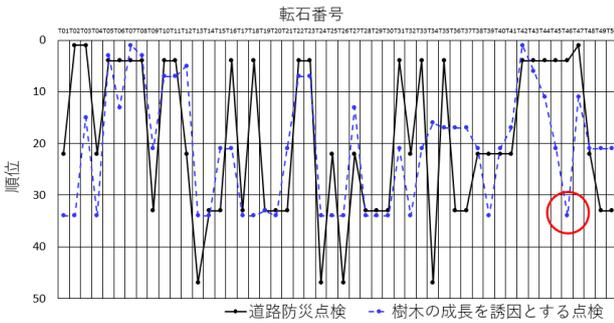


図4 道路防災点検の手引と植物の成長を誘因とする点検の結果比較

同じ順位となる転石等が多くみられるのは、同得点の転石等は同じ順位に評価したからである。

図2から図4の各評価結果図から、評価結果の傾向（グラフの折れ線の傾向）は概ね合致する。一部で個々評価結果に差が見られるところの理由は、評価基準の内容によるものが多い。例えば図4の赤丸の転石の評価に相違がみられる理由は転石の周囲に樹木がないためであり、評価対象の違いに起因する。

相対的に評価結果の傾向が類似するのは、それぞれの評価手法が点検者の主観による判定は評価手法が違っていても同傾向（目視で不安定と判定した転石は表現方法が異なっても不安定側の評価になる）になることが原因と推定される。

### 5. 定量的な安定性評価方法

定性的な評価で危険側に評価されたものと安全側に評価されたものを対象に定量的な安定性評価（＝振動調査）を実施した。振動調査は、転石に振動を与え、転石の振動特性を把握し、転石の根入れ深さを推定した上で力学的安定度を計算し、安全率（ $F_s$  および  $F_r$ ）で転石等の安定性を評価するものである。

調査対象は定性的評価で危険側に判定されたもの6個と安全側に評価されたもの3個の計9個とした。



振動調査の手順は以下のとおりである。図5 振動調査対象の転石の例(T10)

- ① 調査対象落石に加速度計を固定し、ゴムハンマーで打撃した時の加速度波形をAD変換してパ

ソコンに記録する。またに示すように、計測はゴムハンマーによる加振を行う者と、パソコンを操作する者の2名で行う。

- ② 計測した加速度波形を高速フーリエ変換し、フーリエスペクトルが最大となる卓越振動数を、調査対象落石の固有振動数として算出する。

### 5. 定量的な安定性評価の結果

振動調査の結果は表1の通りとなり、定性的な評価で不安定と評価したものも含めてすべての転石等が安定という結果となった。

表1 振動調査結果

転石No.	安定度		定性的評価	振動調査判定
	滑動	転倒		
	$F_s$	$F_r$		
T03	9.6	1000	不安定	安定
T06	3.2	1000	不安定	安定
T10	4.4	1000	不安定	安定
T11	4.1	1000	不安定	安定
T33	4.3	1000	不安定	安定
T47	7.9	1000	不安定	安定
T01	7.8	1000	安定	安定
T26	8.7	1000	安定	安定
T27	6.0	44	安定	安定

### 6. まとめ

同じ対象に対し、4つの定性的な評価で安定性の評価を実施したところ、個々の転石では評価結果に相違がみられるものもあるが、相対的には同傾向を示した。これは、点検者の主観が同一の対象に対しては同傾向となることが原因と推定される。

定性的に不安定側と安定側に判定された転石等に対し、定量的な調査手法である振動調査を実施したが、すべて安定（安全率1以上）となった。点検者が主観的に不安定と評価した転石等は、点検者が目視で想定したよりも根入れが深いなどの原因があると考えられる。

### 文献

- 1) 深田 隆弘, 谷口 達彦, 澁谷 啓: 振動計測に基づく斜面上転石の落石危険度評価方法の提案, 土木学会論文集 C (地圏工学), Vol.69, No.1, p140-p151, 2013
- 2) 全国地質調査業協会連合会 (2014): 道路防災点検の手引き (豪雨・豪雪等) [増補版]
- 3) 落石対策便覧: 日本道路協会 2017
- 4) 落石対策技術マニュアル: 公益財団法人鉄道総合技術研究所 2019
- 5) 安藤 伸, 沖村 孝, 鳥居宣之, 鍋島康之: 樹木の成長を誘因とする新しい落石災害に着目した点検手法 地盤工学会誌 2019

# P30 竹林斜面における土層強度検査棒による表層厚さの空間分布

Distribution of surface layer thickness measured by soil strength probe on bamboo forest slope

○鶴澤 貴文(環境地質), 竹村 貴人, 谷 野々香(日本大学), 稲垣 秀輝(環境地質)

Takafumi Uzawa, Takato Takemura, Nonoka Tani, Hideki Inagaki

## 1. はじめに

古くから竹は、建材、調理器具、食器、楽器や食材としての筍として我々の生活と大きくかかわってきた。そのため日本では多くの竹林が集落の周辺に存在しており管理されていた。しかしながら、国内での竹の需要が減るとともに、竹林は放置竹林として放置されるようになってきた。竹は地下茎を周囲に伸ばし、地下茎から分布を広げる。タケノコは地下の貯蔵養分を使って伸長するため、竹は暗い林床でも十分に成長することができる。そのため、竹は春から夏の間に樹木の背丈を追い越し、樹木よりも高いポジションで枝葉を展開し、竹の被陰下になった樹木は次第に衰退していく<sup>1,2)</sup>。現に、本研究の調査地でも自然拡大した竹林内には立ち枯れ状態の樹木がしばしば観察された(図-1)。その結果、竹林は平均して年間 1~2m, 速いところでは年間 7~8m の速さで拡大していく<sup>3)</sup>。このような放置竹林は近年でも増加しており、竹林は地すべりを起こしやすいと言われ問題視されることも少なくない<sup>4)</sup>。竹林で地すべりが生じやすい理由として、竹林が地盤の柔らかい場所に繁茂するからであると考えられている。しかしながら、竹林の繁茂する斜面の地盤特性については、実測例も少なく他の広葉樹や針葉樹などの



図-1 調査地での広葉樹が竹林に囲まれている

繁茂する雑木林の地盤との違いもよくわかっていない。本研究は、なぜ竹林では地すべりが生じやすいのかを竹林と雑木林での地盤の状態の対比を行うことを通して明らかにすることを目的に行う。

## 2. 調査・実験方法

横浜市内の竹林約 1.6ha にて調査を行った。本地域は竹林を主体として、雑木林がその周囲に繁茂している斜面である。また、地質は表層が崖錐堆積物、表土で覆われ、表土はその下位の固結した凝灰質シルトが風化したものである。また、凝灰質シルトは薄い礫層をはさみ、さらにその下位には三浦層群と見られる固結したシルト岩が見られた。

調査では土層強度検査棒を用いた複数地点での表層の厚さの測定と表層から土壌試料の採取を実施した。土層強度検査棒による表層の厚さの測定は 142 地点で実施した。調査地で表層の厚さを計測したのち、QGIS に調査地点および表層の厚さをプロットし考察を行った。土壌試料では透水係数と間隙率の測定を行った。土壌試料は複数個所の表層とその下の風化した固結した凝灰質シルト(凝灰岩層)で実施した。採取した土壌試料は直径 5cm、高さ 5cm の筒状のステンレス容器で行った。容器を採取したい試料のある地面に押し込み、5cm の高さいっぱいまで試料が入ったところで周りの土を掘り容器を取り出すことで、合計 6 地点で試料採取を行った。

土壌試料は実験室に持ち帰り、容器ごと十分に水で飽和させたのちに透水試験を実施し、透水係数を求めた。その後、飽和質量と水中重量を測定したのちに 110°C の乾燥機で 24 時間の乾燥を行い、強制乾燥質量を測定した。これらの飽和質量、水中重量、強制乾燥質量を用いて有効間隙率を求めた。

## 2. 結果および考察

土層強度検査棒を用いて実施した複数地点での表層の厚さの測定の結果を QGIS にてまとめたものを図-2 に示す。表層厚さのプロット結果と地形から、谷地形となっている場所では表層が薄く、尾根地形となっている場所では表層が厚く堆積していることが分かった。また竹が生えている場所では表層が薄く、広葉樹や針葉樹が生えている場所では表層が厚く堆積しているという傾向があることが分かった。さらに、斜面の上側と下側を比較すると、斜面の上側では表層が薄く、

表-1 室内試験の結果

地点		透水係数(m/s)	有効間隙率(%)
①	急斜面上の表層	8.80E-04	57.95
②	急斜面下の表層の下	2.30E-06	37.15
③	凝灰岩層	4.19E-06	54.38
④	凝灰岩層の上の根が多い層1	1.93E-03	54.51
⑤	凝灰岩層の上の根が多い層2	4.57E-02	63.36
⑥	急斜面上の表層2	8.96E-03	44.84

下側では厚く堆積していることが分かった。QGIS のみでは厚さの分布がわかりにくかったため、標高と表層の厚さの断面図を作成した(図-3)。竹は二次林に拡大・進出している傾向があり、二次林は滑落崖などの地すべり地にもみられるという傾向を考えると、本調査地では、崖錐堆積物に竹林が繁茂していると考えられ、拡大により尾根部の雑木林に進出しているものと考えられる。

透水係数と有効間隙率の測定の結果を表-1にまとめた。表層の堆積物は、竹の根が多く見られることや、間隙が多いことから透水係数は  $10^{-4}$  から  $10^{-2}$  m/s であったのに対して、その下位の固結した凝灰岩では  $10^{-6}$  m/s ほどであり、2 から 4 オーダーの違いが見られた。このことは、降雨時の浸透水が表層にしみ込み、飽和した後、凝灰岩層を境として浸透流れを発生させ浸透力や過剰間隙水圧を發揮するであろうことを示唆している。このような斜面災害を引き起こす可能性のある力が表層に発生したとき、植物の根茎による緊縛力で抵抗することもできるが、竹林の場合、根が非常に浅いため広葉樹に比べ非常に低い抵抗力となる。図-3に示した断面図をみると、広葉樹であれば根の緊縛力により表層下位の固結した層と一体化することができるが、竹の場合、それができない。従って、崖錐堆積物に繁茂した竹林は根による緊縛力を發揮できないため、広葉樹林に比べて、降雨による斜面災害が発生しやすい条件下にあるといえる。

今後、竹の根による緊縛力の影響深度、表層の厚さ分布と透水係数の深度分布を併せて竹林斜面における斜面災害の発生リスクを考えていく必要があると考える。

#### 文献

- 1) Rui Li・Werger Marinus J. A.・During Heinjo J.・Zhong Zhang C.(1999): Biomass distribution in a grove of the giant bamboo *Phyllostachys pubescens* in Chongqing, China, *Flora*, Vol. 194, No. 1, pp. 89-96.
- 2) 林 加奈子・山田 俊弘(2008): 竹林の分布拡大は地形条件に影響されるのか?, *保全生態学研究*, Vol. 13,

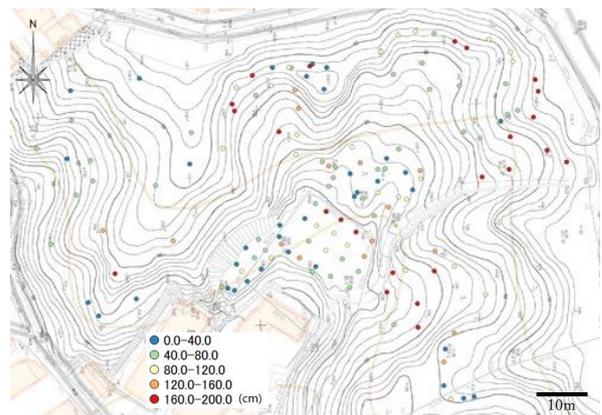


図-2 土層強度検査棒による表層厚さの分布。判例は表層厚さ。

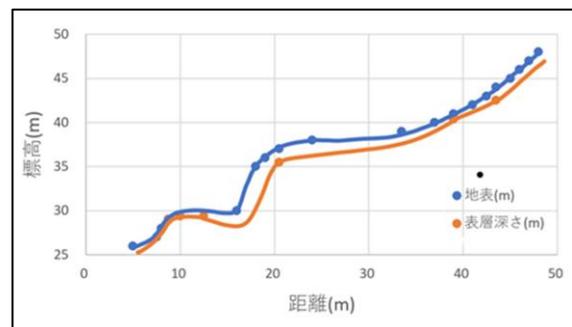


図-3 表層の厚さの断面図。断面位置は図-2中の中央の谷地形の部分である。

No. 1, pp. 55-64.

3) 鳥居 厚志・奥田 史郎(2010): タケは里山の厄介者か?, *森林科学*, Vol. 58, No., pp. 2-5.

4) 日浦 啓全・有川 崇・バハドゥール ドウラドゥルガ(2004): 都市周辺山麓部の放置竹林の拡大にともなう土砂災害危険性, *日本地すべり学会誌*, Vol. 41, No. 4, pp. 323-334.

# P31. QGIS を用いた表層崩壊危険度評価ソフトウェアの開発

Development of shallow landslide risk assessment software using QGIS

金澤瑛, 木下篤彦, 中谷洋明 (国土技術政策総合研究所), 山本武文, ○土屋絵菜, 佐々木達哉 (応用地質株式会社)  
Akito Kanazawa, Atsuhiko Kinoshita, Hiroaki Nakaya, Takefumi Yamamoto, Ena Tsuchiya, Tatsuya Sasaki

## 1. はじめに - 開発に至る経緯と開発の概要

国土交通省では、表層崩壊による災害の防止・軽減を図るために、急傾斜地崩壊対策事業を進めている。

この方針をふまえ、国土技術政策総合研究所では、山間地の斜面において崩壊発生危険性がある箇所を予測する手法の確立を目指し、表層崩壊発生危険度の評価手法について検討を行ってきた。

本研究では、「表層崩壊に起因する土石流の発生危険度評価マニュアル(案)」(独立行政法人土木研究所, 2009) で示された「H-SLIDER 法」, 「C-SLIDER 法」に加え、「H-SLIDER 法」に一定降雨強度条件下での地下水上昇過程に伴う影響を考慮できる、「idH-SLIDER 法 (秋山・木下・内田・高原・石塚, 2015)」<sup>2)</sup>の3種の表層崩壊発生危険度の評価手法について、汎用 GIS (QGIS) 上で効率的かつ客観的に解析を実施するための環境整備の一環としてソフトウェア開発を実施した。

本稿では、上記のソフトウェア開発に際しての課題、開発結果の概要、ならびに今後の利活用の可能性について紹介する。

## 2. 危険度評価手法の環境整備における課題

### 2.1 ソフトウェア化の必要性

山間地の斜面において表層崩壊発生危険度を評価し、崩壊発生可能性が高い箇所を予測する手法の確立には、複数の危険度評価手法による解析を、様々なパラメータ設定により試行し、結果を比較検討する必要がある。このような作業は、旧来の紙地図ベースで効率的に実施することは困難であると考えられる。

また、評価手法をソフトウェア化することにより、客観性を向上させることができるものと考えられる。

### 2.2 様々なデータの利活用

表層崩壊発生危険度を評価する際には、評価対象範囲を任意の大きさのメッシュに分割後、基岩面の標高の算出や勾配・集水面積の計算の際に、膨大な DEM データを解析する必要がある。DEM データの精度向上に応じ、信頼性も高くなるものと考えられるが、反面データ量が膨大となり、処理に時間を要する。また、解析後に航空写真等による地形判読などの様々なデータから、評価の妥当性を評価する必要があると考えられることから、GIS を使い、地理情報を含む様々なデータが利用可能なソフトウェア環境とすることを目指した。

### 2.3 ソフトウェアの拡張性・利便性の確保

利用しやすい GUI を採用し、利用者の利便性を確保するとともに、最新の知見が公表された際に、新たな表層崩壊危険度評価ソフトウェアの追加・変更が、できるかぎり容易となる必要がある。

## 3. 表層崩壊危険度評価ソフトウェアの開発

### 3.1 ベースシステムの選定

プログラム構造の拡張性を確保するために、クロスプラットフォームのオープンソースソフトウェア・GIS ソフトである「QGIS」をベースシステムとした。

QGIS はインターネットから無償ダウンロードが可能な GIS エンジンである。インターネット環境があればだれでも入手・利用することができ、DEM データの処理 (座標値ポイント作成から画像化まで) が基本機能として搭載されている。

QGIS は、多数のバージョンが利用可能であるが、開発当時最も安定しているとされた「QGIS 3. 16. 10 'Hannover」を使用した。

また、ソフトウェアのソースコードは利用者の多いプログラミング言語 python で記述することで、拡張しやすいモジュール化を行った。

加えて、解析時に用いる各種パラメータ等は、可能な限り自動入力とし、必要に応じて利用者により容易に変更可能なインターフェイスとすることを旨とした。

### 3.2 表層崩壊危険度評価ソフトウェアの開発

参考文献等の技術資料をもとに、前述した3種の解析を行い、斜面スケールの表層崩壊の発生危険度を評価できるソフトウェアを作成した。解析時の算定フローを以下に示す (図 - 1)。

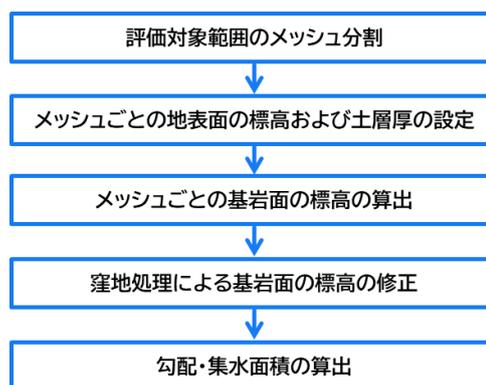


図 - 1 解析時の算定フロー

### 3.3 解析結果例

メッシュ生成からメッシュごとの安全率算出までの解析例のイメージを示す（図 - 2）。

自動メッシュ分割の際には各パラメータ（土層厚など）のデフォルト値がメッシュに自動入力される。

解析範囲の DEM 処理後、任意の勾配率で窪地処理を行い、各メッシュの勾配・集水面積が自動算出される。

これらの結果を基に、各手法による表層崩壊危険度評価の解析を行い、結果はメッシュに属性データとして格納される。GIS 化・自動化により、解析の効率性を向上できるものと考えられる。

### 4. 課題

土層厚・地下水状況、また対象地域の地形・地質特性、崩壊発生履歴など、解析に際して十分に考慮すべき情報について、利用者による管理が必要と考えられる点が、利用上の課題として想定される。

### 5. おわりに - 今後の展開

今回の環境整備によって、既存の崩壊危険度評価の効率性・客観性の向上が可能となると考えられる。

このことから、災害時には、現地調査・応急復旧対策等の迅速・客観的な計画立案に活用が期待できる。

また、平常時に危険度評価を行うことにより、潜在的な崩壊危険度の高い斜面の抽出、対策計画の立案に活用できるものと考えられる。

併せて、既存の被災実績との比較検討により、危険度評価手法自体の課題の明確化と、今後の評価手法検討に資することができるものと考えられる。

### 文献

- 1) 独立行政法人土木研究所土砂管理研究グループ火山・土石流チーム (2009) : 表層崩壊に起因する土石流の発生危険度評価マニュアル (案), 土木研究所資料, 第 4129 号.
- 2) 秋山怜子・木下篤彦・内田太郎・高原晃宙・石塚忠範 (2015) : 簡易な水文モデルを用いた崩壊発生時刻予測手法, 砂防学会誌, Vol. 68, No. 2, pp. 3-13.

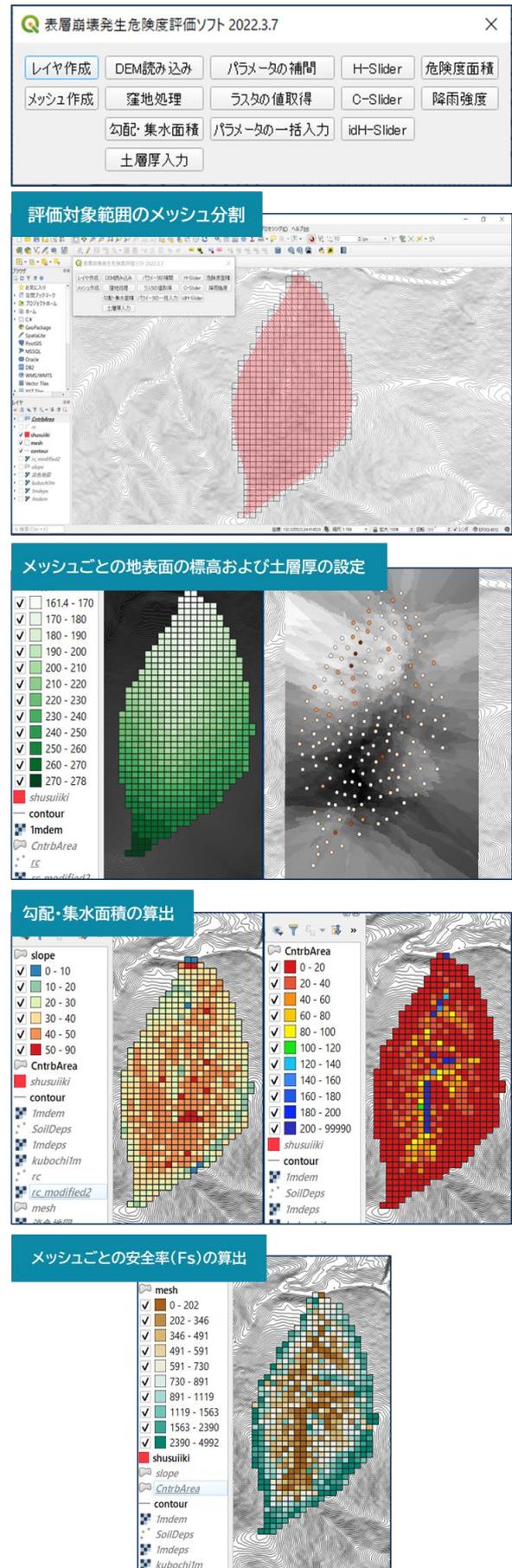


図 - 2 表層崩壊危険度評価ソフトの解析例

## P32. 防災まち歩きにおける地域住民の地図活用に関する検討

### Study on the use of maps by local residents during the filed survey

○野々村敦子（香川大学）

高尾則光・佐藤 豊（富熊校区コミュニティ協議会）

#### 1. はじめに

まち歩きは、地域の防災活動において重要な取り組みの一つである。防災まち歩きのマニュアルは、自治体のホームページなどで公表されている<sup>1)</sup>。マニュアルには、防災まち歩き実施事項として、「自分たちの住む地域の避難場所の確認」「危険な場所の確認」「救助が必要な一人暮らしの家の確認」などが挙げられている。これらの事項の確認は地域防災力強化のために大切であるが、避難計画立案のためには、これらの項目に加えて、自分たちが住んでいる地域にはどのような災害が起こりうるのか、どのような危険性があるのかを把握することも重要である。

ハザードマップでは、地域の災害特性を調べることができる。しかし、自宅から学校までの通学路はどのような場所か、そこにいた場合に自分の身にどのようなことが起こるかなど局所的な詳細について、ハザードマップからは読み取ることができないこともあるため、実際にまち歩きを実施して現地でも考えることも不可欠である。

まち歩きでは、周りとの高低差など局所的な地形の変化を調べることでその場所の浸水危険性について把握することができる。一方、地形調査の経験が浅い人にとって、自分がいる場所がどのような地形なのかを知ることは容易ではない。地形の成り立ちを知るとその土地が本来持っている自然災害リスクに対する理解を深めることができることから、まち歩きの際に地形の理解を促す工夫が必要である。

本研究の目的は、参加者の地形の理解を促すためには、まち歩き支援として、どのような地図を提供すれば良いかを検討することとした。

#### 2. 研究対象地域

研究対象地域は、香川県丸亀市富熊校区とした。富熊校区には、丸亀平野の南東に位置する沖積平野が広がる。富熊校区を流れる河川は大東川水系に属し、東大東川が校区のほぼ中央部を流れている。想定最大規模の洪水ハザードマップでは、富熊校区の東に位置する綾川が氾濫した場合には校

区の広い範囲で浸水すると想定されている。指定避難所である富熊コミュニティセンター、富熊小学校、富熊保育所も浸水想定区域にあることから、大雨の際にはいつ、どこに避難するか地区ごとに検討する必要がある。

校区東部には、山頂部の標高が 250m 程度の横山の山麓に位置する自治会もある。コミュニティの指定避難所までは 3 km 以上離れていること、避難所へのルートおよび避難所も浸水の危険性があることから、自治会内に避難場所を見つける必要があることが認識されている。

このようなことから富熊校区コミュニティ協議会では、地区防災計画の作成に取り掛かっている。そのために、まず、地域を知ることが必要であるという考えのもと、2020 年から校区内で防災まち歩きを実施している。現時点では、地域の防災活動を中心に行うコアメンバーがまち歩きを計画し、まち歩きを実施している。まち歩きには自治会の代表者も参加している。

#### 3. まち歩きの実施と使いやすい地図に関する調査結果について

まち歩きの調査項目は、大雨および地震の際に危険な場所、災害のときに安全な場所とした。まち歩きでは、これらの項目を現地を確認し、参加者で手分けをして、地図上に位置を記録し、写真を撮影している。

まち歩きの様子を見てみると、記録係ではないけれど地図を頻繁に見ている人、地図を全く見ない人、取り組みの様子はさまざまである。地形を説明するための資料として、どのような地図が利用しやすいのか、人によって分かりやすいと思う地図は異なるのか、という点について明らかにすることができれば、地図を見て地形を理解しながらまち歩きを実施できるのではないかと考えた。そこで、日頃の地図利用状況と分かりやすいと思う地図との関係についてアンケート調査を実施した。アンケートでは、まち歩き参加者の地図に対する感想、まち歩き中の地図の利用頻度などについて質問した。

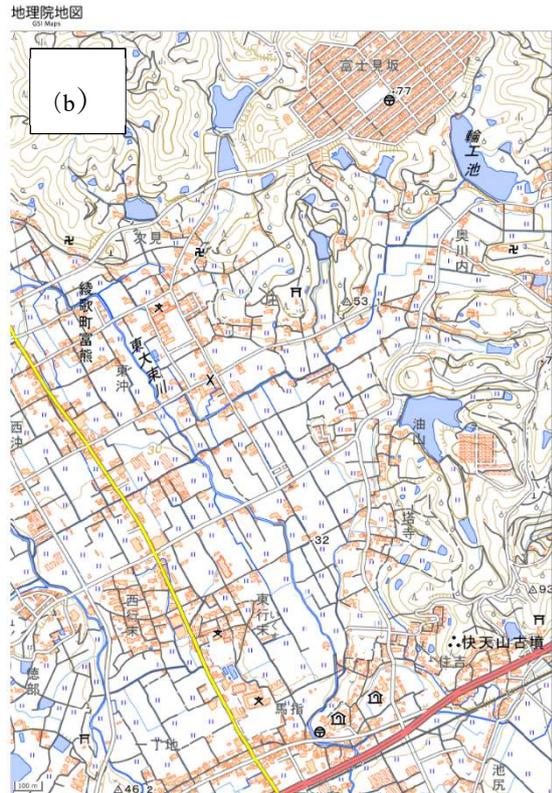
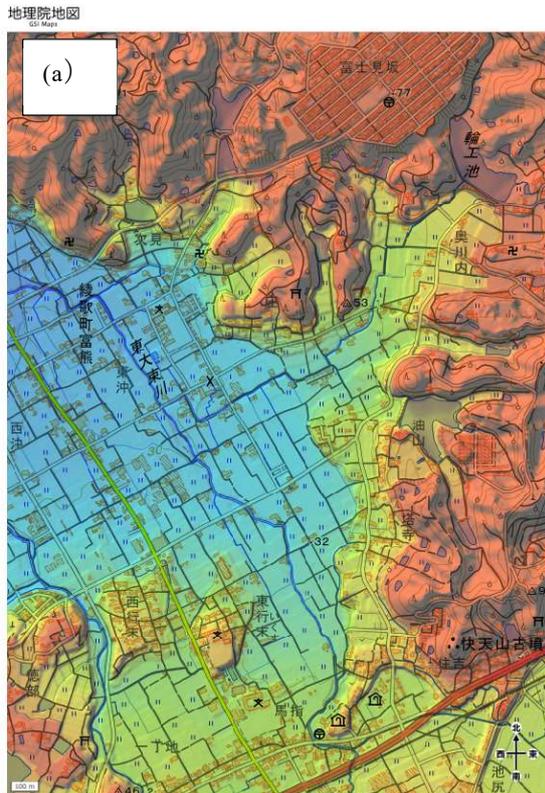


図1 参加者に配布した地図 (a)色別標高図と標準地図の重ね合わせ (b)標準地図

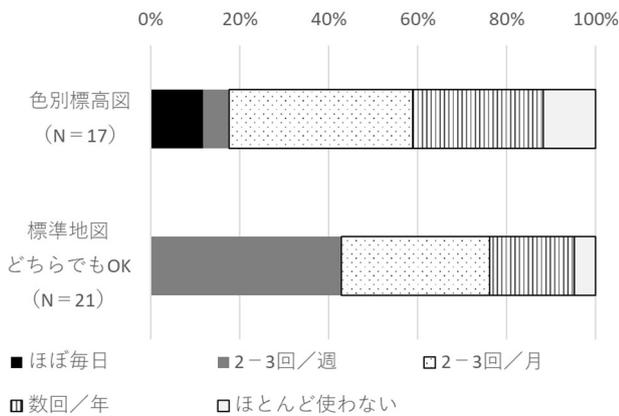


図2 使いやすい地図と地図利用頻度との関係

参加者にはまち歩きの資料として図1に示す地図を配布した。まち歩き後、どちらの地図が使いやすかったかを質問した。色別標高図が使いやすいと回答した人の地図利用頻度を見たところ、地図の利用頻度が2-3回/月よりも低頻度である人が8割以上を占めることが分かった。それに対して、標準地図の方が使いやすい、もしくはどちらでもOKとした人の地図の利用頻度は、2-3回/週が4割程度であることが分かった。標準地図を選んだ人の自由記述意見として、「標準地図は見慣れている」「色別標高図は道路が見えにくい、建物が見えにくい」というコメントがあった。一方、色別標

高図を選択した人の自由記述意見には、色分けされていて分かりやすいという意見がある一方、地形の起伏や谷筋がもっと鮮明であれば良いという意見があった。色合いや重ねるレイヤを工夫することで色別標高図の利用しやすさも改善されることが考えられる。また、紙地図ではなくタブレットの利用なども今後検討する必要がある。

#### 4. まとめ

本研究では、分かりやすいと思う地図についてまち歩き参加者へのアンケートをもとに調査した。その結果、地図利用経験によって使いやすい地図の傾向が異なることが確認できた。

#### 謝辞

本研究は科学研究費（基盤研究 18K04660）の助成を受けて行った。

#### 文献

- 1) 玉野市, まち歩き防災マップの作り方  
<https://www.city.tamano.lg.jp/uploaded/attachment/1049.pdf>

令和4年度 日本応用地質学会研究発表会 講演論文集  
Proceedings of the 2022 Annual meeting of the Japan Society of Engineering Geology

---

令和4年10月1日発行

編集発行 一般社団法人 日本応用地質学会  
Japan Society of Engineering Geology  
東京都千代田区神田駿河台 2-3-14 お茶の水桜井ビル 7F  
TEL 03-3259-8232 FAX 03-3259-8233

---

ご注意 当該出版物の内容を複製したり、他の出版物への転載するような場合は、必ず日本応用地質学会の許可を得てください。