

日本応用地質学会 東北支部

第 11 回研究発表会講演集

2003年5月23日

日本応用地質学会
東北支部

日本応用地質学会東北支部 第11回研究発表会

○日 時：平成15年5月23日（金）12:30～16:30

○場 所：仙台市青年文化センター 3F エッグホール

仙台市青葉区旭ヶ丘三丁目27-5 TEL:022-276-2110

○講演集：3,000円

○協 賛：東北地質調査業協会

○座 長：《前半》倉持 隆（東北ボーリング(株)）

小林 俊樹（(株)復建技術コンサルタント）

《後半》中里 俊行（ジオテクノ中里技術士事務所）

塚原 光（応用地質(株)）

○プログラム概要

・開会挨拶（12:30～12:35）

田野 久貴（東北支部支部長）

・一般発表①～④編（12:35～14:15）

・休 憩（14:15～14:25）

・一般発表⑤～⑧編（14:25～16:05）

・総合討論（16:05～16:25）

・閉会挨拶（16:25～16:30）

太田 保（東北支部副支部長）

○懇親会（17:30～）

場 所：仙台市青年文化センター カフェレストラン

参加費：5,000円

○プログラム

12:30～12:35 開会挨拶 田野 久貴（東北支部支部長）

12:35～13:00 ①「地質の事前予測による安全で効率的なトンネル施工について」
～長尺穿孔による前方探査に基づく地質の予測とその結果に基づく施工方法
の推定について～

○羽立 隆幸（国土交通省東北地方整備局
山形河川国道事務所）

矢崎 剛吉（同 上）

阿部 要（同 上）

13:00～13:25 ②変状トンネルの調査・診断事例
～効率的な調査と合理的な対策工検討を目指して～

○畚野 匡（日本工営株）

生形 嘉良（同 上）

鈴木 正樹（同 上）

13:25～13:50 ③重金属を含有する建設発生土に係る調査・対策の考え方
○門間 聖子（応用地質株）

13:50～14:15 ④3300年前の地下岩盤構造物の安定性に関する調査結果概要

○田野 久貴（日本大学工学部）

オメール・アイダン（東海大学海洋学部）

濱田 政則（早稲田大学理工学部）

吉村 作治（早稲田大学人間科学部）

14:15～14:25 休 憩

14:25～14:50 ⑤熱赤外線カメラによる地上リモートセンシングの2、3の課題

○渡辺 敬三（株復建技術コンサルタント）

山下 智士（同 上）

村田 暁永（同 上）

14:50～15:15 ⑥融雪期における地すべり地の地下水位変動と動態観測例

○後村 和貴（株東開基礎コンサルタント）

今野 隆彦（有ジオプランニング）

15:15～15:40 ⑦風化花崗岩における地下水開発について（千厩地域）

○荒川 雅樹（株テクノ長谷）

加藤 彰（同 上）

椎名 義徳（東北農政局）

森 一司（同 上）

15:40～16:05 ⑧鬼首カルデラ内陥没事故の成因に迫る

○大村 一夫（株大和地質研究所）

清野 茂（東北大学大学院社会人大学院生）

16:05～16:25 総合討論

16:25～16:30 閉会挨拶 太田 保（東北支部副支部長）

17:30～ 懇親会

目次

[発表講演]

- | | | | |
|--|--|---------------------------------------|----|
| ①「地質の事前予測による安全で効率的なトンネル施工について」
～長尺穿孔による前方探査に基づく地質の予測とその結果に基づく施工方法の
推定について～ | 国土交通省東北地方整備局
山形河川国道事務所 | ○羽立 隆幸
矢崎 剛吉
阿部 要 | 1 |
| ②変状トンネルの調査・診断事例
～効率的な調査と合理的な対策工検討を目指して～ | 日本工営(株) | ○畚野 匡
生形 嘉良
鈴木 正樹 | 6 |
| ③重金属を含有する建設発生土に係る調査・対策の考え方 | 応用地質(株) | ○門間 聖子 | 10 |
| ④3300年前の地下岩盤構造物の安定性に関する調査結果概要 | 日本大学工学部
東海大学海洋学部
早稲田大学理工学部
早稲田大学人間科学部 | ○田野 久貴
オメール・アイダン
濱田 政則
吉村 作治 | 16 |
| ⑤熱赤外線カメラによる地上リモートセンシングの2、3の課題 | (株)復建技術コンサルタント | ○渡辺 敬三
山下 智士
村田 暁永 | 22 |
| ⑥融雪期における地すべり地の地下水位変動と動態観測例 | (株)東開基礎コンサルタント
(有)ジオプランニング | ○後村 和貴
今野 隆彦 | 26 |
| ⑦風化花崗岩における地下水開発について(千厩地域) | (株)テクノ長谷
東北農政局 | ○荒川 雅樹
加藤 彰
椎名 義徳
森 一司 | 32 |
| ⑧鬼首カルデラ内陥没事故の成因に迫る | (株)大和地質研究所
東北大学大学院社会人大学院生 | ○大村 一夫
清野 茂 | 36 |

「地質の事前予測による安全で効率的なトンネル施工について」 ～長尺穿孔による前方探査に基づく地質の予測とその結果に基づく 施工方法の推定について～

①

国土交通省東北地方整備局山形河川国道事務所 工務第二課長 矢崎剛吉
建設監督官 阿部 要
工務第二課専門職 ○羽立隆幸

1. まえがき

一般国道13号は、福島市を起点として山形市、新庄市、横手市等を経て秋田市に至る広域主要幹線道路であり、山形県等の産業・経済・文化を支える重要な役割を担っています。

このうち、金山町主寝坂峠付近は、幅員狭小（最小幅員：6.0m）、急カーブ（最小半径：30m）、急勾配（最大勾配：6.2%）の連続している状況となっています。また、大型車のすれ違いが困難で老朽化の著しい主寝坂トンネルや通行規制（連続雨量150mm以上）の指定区間があるなど、国道13号最大の隘路区間となっています。

そのため、主寝坂道路は、広域主要幹線道路としての安全・信頼性を確保し、地域活性化を図るための基盤施設として整備を進めており、将来は、東北中央自動車道の機能を担いますが、当面は、一般国道の自動車専用道路として活用することとしています。

その中から新主寝坂トンネル工事の地質概要や長尺穿孔による前方探査、爆薬の遠隔装填システムなどについて紹介します。

2. 工事・施工概要

2. 1 工事概要

(1) 工事場所 自 山形県最上郡金山町大字中田
字主寝坂

至 山形県最上郡真室川町大字及
位字新及位

(2) 工事内容 トンネル延長2,940m

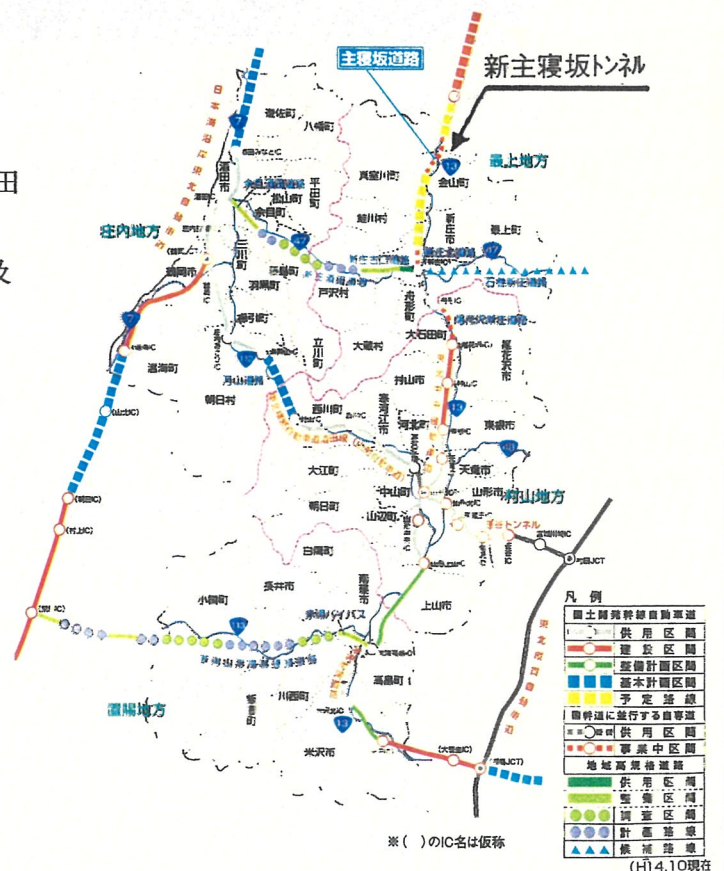
掘削断面（CⅡパターン）

75.6m²

工 法 NATMによる
発破方式

2. 2 施工概要

岩質CⅡでの掘削1サイクルは下記に示すとおりです（写真一～3参照）。



図・1 位置図

・穿孔

発破の掘削に伴う爆薬装填用の孔を穿孔の機械（油圧ドリルジャンボ）に行う。



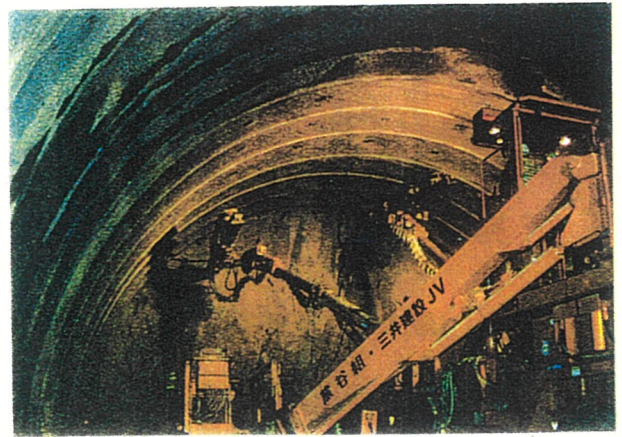
・装薬

遠隔爆薬装填システムによって爆薬を装填する。



・発破

多段の電気雷管による発破を行う。



写真—1 穿孔状況

・ズリ出し

発破の掘削によって発生した岩をダンプトラック2.5t重ダンプ)により坑外へ搬出する。



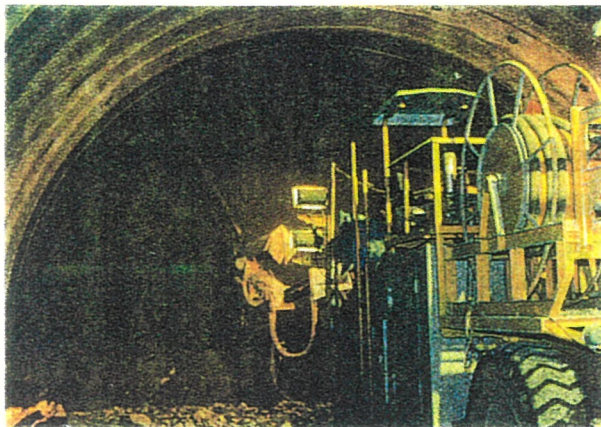
・こそく

切羽の緩んだ岩盤や浮石をバックホウやブレーカーで除去する。



・一次吹付コンクリート

地山を吹付コンクリートで覆い、風化を防止し、安定させる。



写真—2 コンクリートの吹付状況



・鋼製支保工建込

鋼製のH型支保工を油圧ドリルジャンボで建て込む。



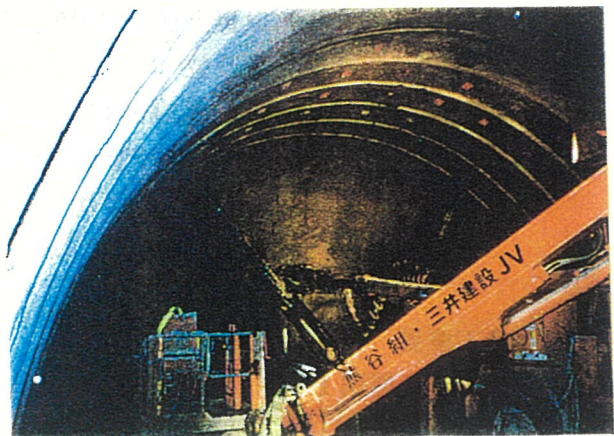
・二次吹付コンクリート

コンクリートを掘削面に吹付けて地山を安定させる。

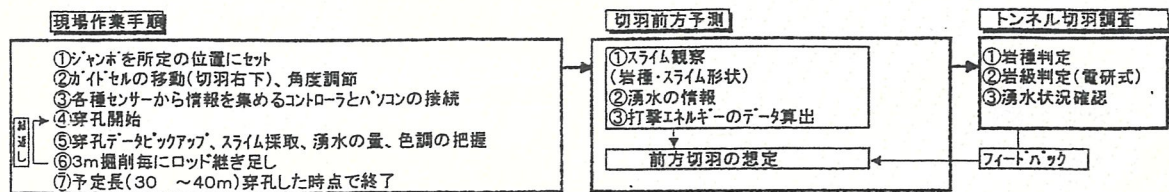


・ロックボルト

ロックボルトを岩盤に打ち込みトンネルを安定させる。



写真—3 ロックボルトの施工状況



図・3 切羽前方予測フロー

一般に、地山の岩の状態が良ければ、式1の穿孔速度が遅くなり、打撃エネルギーの平均値は大きくなると考えられます。しかしながら、貫入岩の影響を受けた安定しない地山の場合は標準偏差が大きくなり、必ずしも打撃エネルギーの大小で地山の岩の状態を評価できない場合があります。

この為、打撃エネルギーに加え、その標準偏差を用いて評価することを試みました。図・5に、標準偏差と打撃エネルギーの関係を示します。岩区分(CII, CI, DI)ごとに楕円で囲むように一定の相関が認められました。

平均打撃エネルギーの大小にプラスし標準偏差に配慮したことで、前方の地山の状況を推定し、地山モードに一致した支保パターンの変更を迅速に行うことが可能となりました(図・6参照)。なお、支保パターンの変更を迅速に行うことは、掘削のコスト縮減にも寄与していると思われます。

さらに、本システムでは切羽の前方を穿孔する為、突発湧水をトンネル掘削前に排出することができました。

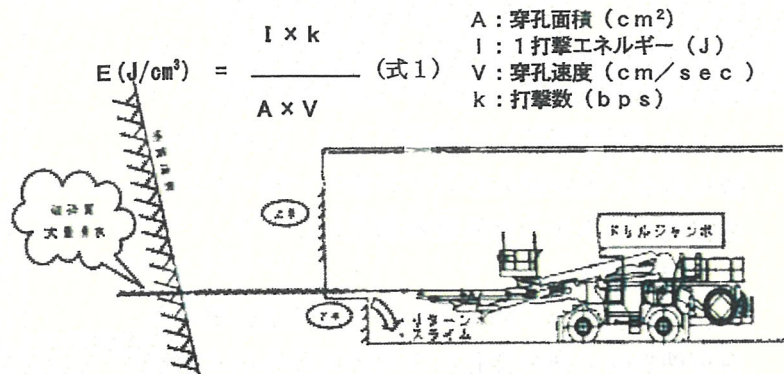
4. 2 爆薬遠隔装填システム

前段の2. 2 施工概要で記述した中で、装薬の作業は従来が人力による施工でした。

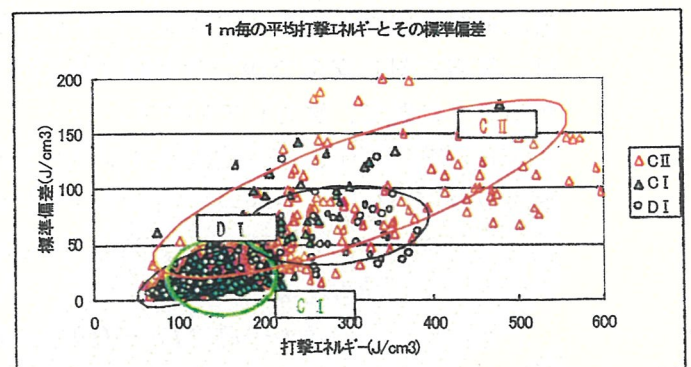
他の作業は飛躍的に機械化が図られていますが、装薬の作業が切羽に密着する作業で災害の発生の危険が高く、重大な災害に繋がる危険性をはらんでいるにも関わらず人力に頼っていました。そこで、切羽に密着せずに装薬の作業を行えるように、爆薬遠隔装填システムを本工事で本格的に導入しています。

・爆薬の遠方装薬システムによる装薬状況

写真-4に示すように切羽の面に対し、1. 5 m程度の離れで施工可能となり、切羽直上の小崩落が発生した場合、岩の直撃が回避可能となり作業員の安全性が飛躍的に向上す



図・4 穿孔状況概要図



図・5 標準偏差と平均打撃エネルギーとの関係

と思われます。

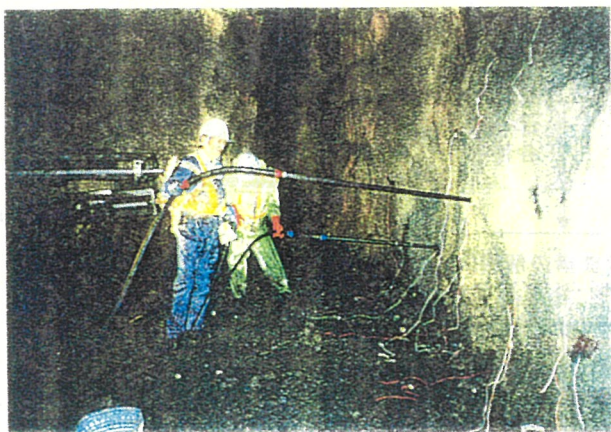
爆薬遠隔システムは爆薬供給ホッパー、アンコ整形装置、装填機などの各装置を組み込んだシステム本体と装填ホース、装填パイプ、手元スイッチとこれらを制御するコンピュータから成っています（図・7参照）。

本システムにより、装填作業を切羽から離れて行うことが可能となり作業の安全性が向上、さらに手作業に比べて爆薬、タンピング材の密充填が可能となり装填効率及び発破効果が向上しました。

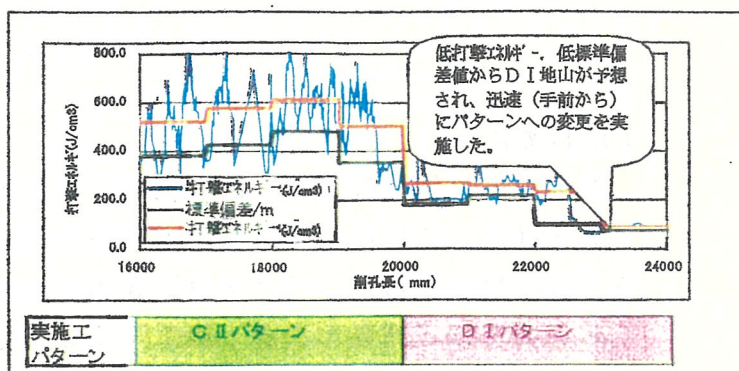
5. あとがき

長尺穿孔による前方探査で切羽前方の地質の予測を行い、安全で効率的な作業を行うことができました。

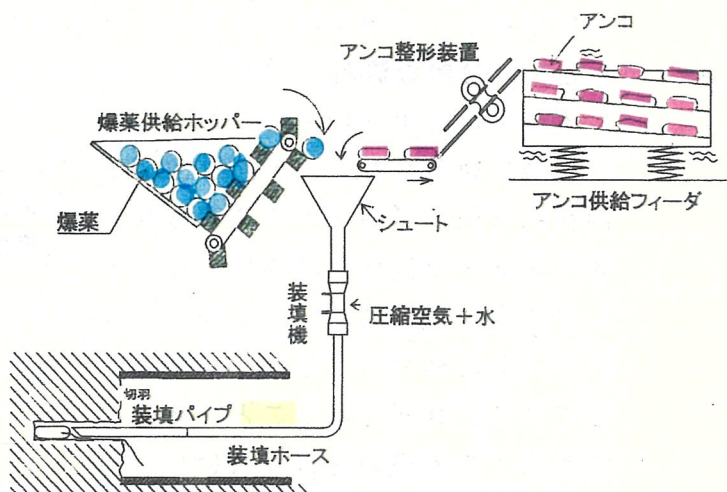
今後、地山の予測の精度を高めるためのさらなるデータの蓄積と検討が必要です。



写真一4 遠方装薬システムによる装薬状況



図・6 支保パターンの変更の例示



図・7 遠隔装填システム概念図

変状トンネルの調査・診断事例 ～効率的な調査と合理的な対策工検討を目指して～

②

日本工営(株) ○^{みこの}畚野 匡、^{うぶかた}生形嘉良、鈴木正樹 (○：発表者)

1 はじめに

社会資本整備の軸足が、大規模開発から既設土木構造物の維持管理・延命化に移ってきている昨今、如何に効率的に土木構造物の調査・診断を行ない、より合理的・経済的な補修・延命対策を講じることが重要課題として認識されるようになってきている。

本発表では、調査・設計・施工時の記録が残っていない築 20 年のトンネルに対して、システムティックな調査によってトンネル健全度の定量評価を行ない、変状発生機構を解明したこと、そして近年発達が著しい数値解析技術を適用して作用外力・緩み領域を高精度で把握し、対策工設計に生かした事例を紹介する。

2 調査・検討の流れ

本事例は、東北地方のグリーンタフ地域に建設された、長さ約 300m、内径約 8 m の道路トンネルの変状調査・診断・対策検討業務である。トンネル緊急点検において、覆工コンクリートに外力による亀裂が多数生じていると判断されたこと、多数の湧水により冬季の通行障害(つらら)が懸念されることより、補修・補強による安全性の確保・延命化を図ることとなった。

本トンネルは、在来工法によって建設されたこと以外は、調査時・設計時・施工時の記録が全く残っておらず、覆工厚・支保間隔・施工状況・地質状況等が不明の状態であった。

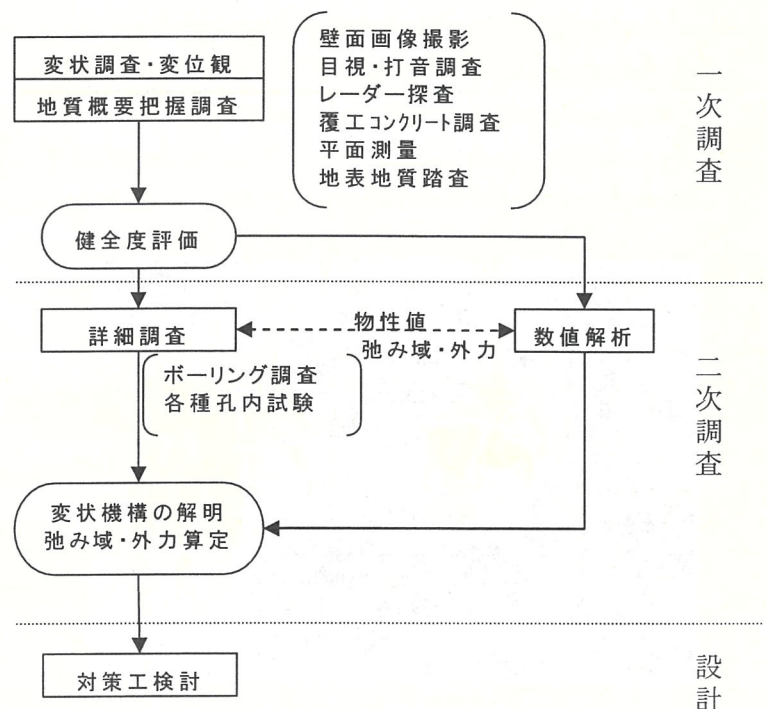


図 1 調査・検討のながれ

そこで、図 1 に示すような流れで調査・検討を進めた。1 次調査では、トンネル変状調査・変位観測により、トンネル健全度を定量的に評価して変状箇所（要対策箇所）を抽出し、あわせて地質概要把握調査により、基本的な地山条件を確認した。2 次調査では、変状の顕著な（要対策）箇所について詳細調査および数値解析を実施し、変状機構・緩み領域・作用外力を高精度で把握することにより、標準設計・類似設計に則った経験的な対策では無く、より合理的・経済的な対策工検討を目指すものとした。（なお、対策工検討・設計の詳細については別途発表の機会を待つこととし、ここでは割愛する。）

3 トンネル健全度の調査・評価（1次調査）

3.1 変状調査

トンネルの変状状況・覆工厚・支保間隔・
空洞の有無・コンクリートの品質・亀裂の性
状等を把握し、トンネル健全度の定量評価・
補修対象箇所および詳細調査実施箇所選定の
基礎資料とするため、右表の調査を実施した。

その結果、変状（ひび割れ・湧水）は T.D.20～77.5m に集中していること、右アーチ肩部に水平ひび割れが特徴的に発達することが確認された。特に、T.D.47～58m は二重支保工となっており、難工事区間であったことが示唆された。なお、空洞は極一部（全長の 4 %）にしか見られないこと、覆工厚・コンクリート強度とも充分であることより、覆工の品質不良や裏込め不足などが変状の原因である可能性は低いと判断した。

項目	方法	目的
目視・打音調査		亀裂・湧水等変状箇所の抽出
壁面画像撮影	CIMEDAS システム	変状箇所の分布状況
レーダー探査	電磁波レーダー	覆工厚・支保間隔・空洞の有無
覆工コンクリート調査	コア抜き、圧縮試験、シュミットハンマー、中性化試験	覆工コンクリートの厚さ・品質(強度)

JOINT	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	
評価	ひび割れ	B	B	2A	2A	2A	2A	B	A	A	B	B	B	B	A	B	A	B	B	A	B	2A	B	B	B	B	B	B	B	B	B	B	B	B	B	B	-	B
漏水	3A	B	A	B	B	3A	3A	3A	A	A	B	B	B	B	-	-	B	-	B	A	B	B	A	A	B	-	-	B	B	B	B	B	A	A	A	B	B	
	0	50					100					150					200					250					300					320						

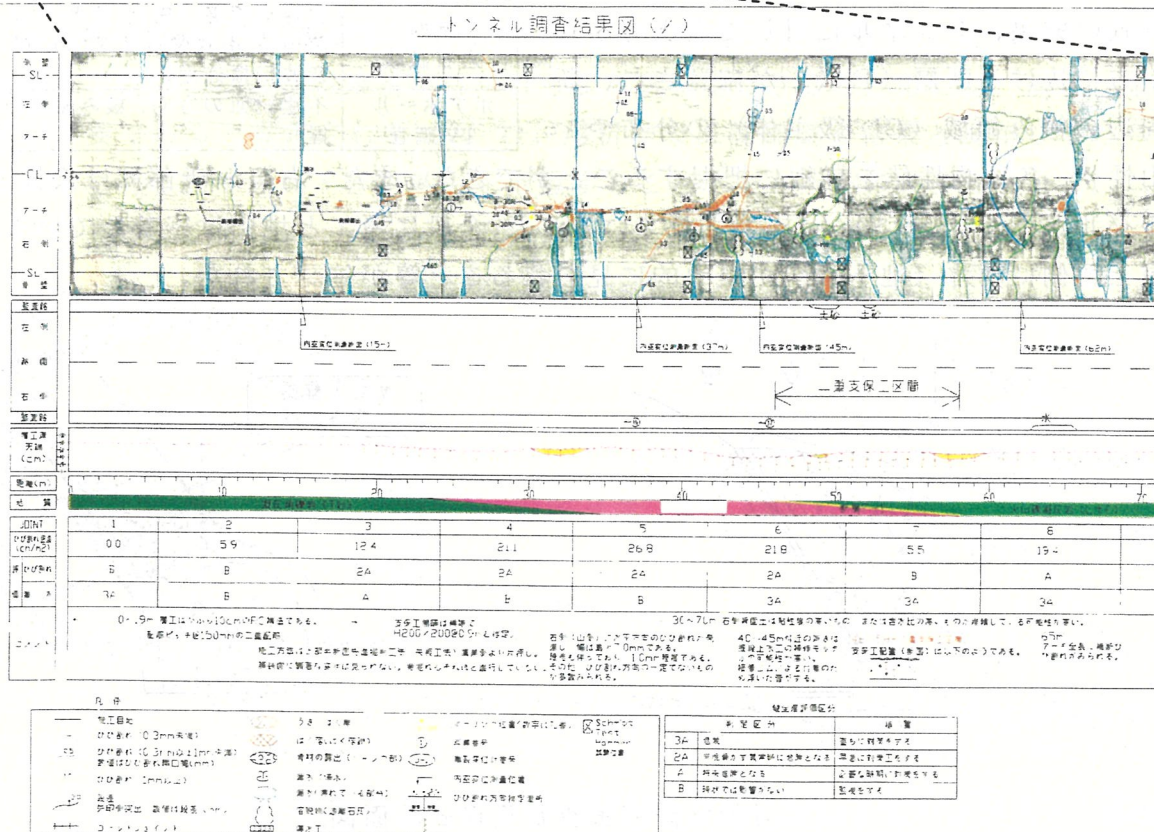


図 2 トンネル総合評価図(一部)

3.2 変位観測

変状の進行状況を把握するため、主要な亀裂開口幅の長期間連続観測と、断面測量によ

る内空変位の観測を実施した。その結果、開口幅の季節変動（0.3mm 程度）が認められるが、亀裂変位・内空変位ともに明瞭な累積傾向は殆ど確認できなかった。ただし、1 箇所のみ 0.1mm/年程度の明瞭な亀裂変位の累積傾向が認められ、緊急度は低いものの維持管理上長期的な安全性を確保する必要があると判断した。

4 地質概要把握調査

地表地質踏査の結果、トンネル地山は新第三紀中新世の凝灰角礫岩・火山礫凝灰岩類より構成されており、トンネルに対してやや斜交する断層が変状発生箇所を通過することが確認された。なお、地山全体（あるいは一部）が地すべり等によって大きく変位している可能性は低いと判断された。

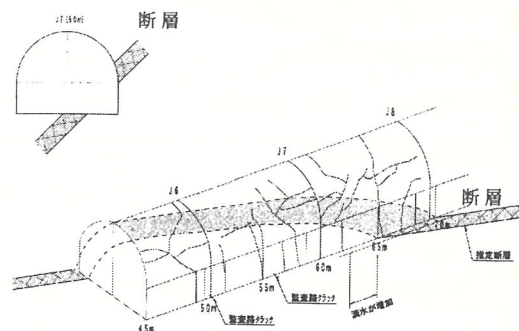


図 3 クラックと背面地質状況模式図

5 変状機構の解明と外力算定（2次調査）

5.1 変状箇所詳細調査

上記調査結果を受けて、変状の最も激しい箇所に対して右表に示す詳細調査を実施し、変状機構を解明し、地山物性値を把握した。

調査の結果、トンネルに対して右上方から左下方に抜ける断層（D級）が確認され、断層周辺の緩み領域（CL級主体）の分布や、地山性状・各種物性値を詳細に把握することができた。また、右アーチ部には矢板・裏込めモルタルが厚く（40～50cm）施工されていること、全般に覆工と地山は密着していること、断層上盤側に湧水（地下水）が集中的に見られること等が確認された。

項目	目的	数量
ボーリング調査	地質構造把握、地山状況把握	7 孔 64m
孔内水平 載荷試験	地山の物性地(変形係数)把握、緩み領域推定	18 点
PS 検層	緩み領域把握	5 孔 50m
室内 岩石試験	物性地把握（密度、吸水、有効間隙率、引張強度、ポアソン比、超音波伝播速度）	6 試料
ポアホール TV 調査	不連続面の方向、緩み領域把握	3 孔 32m

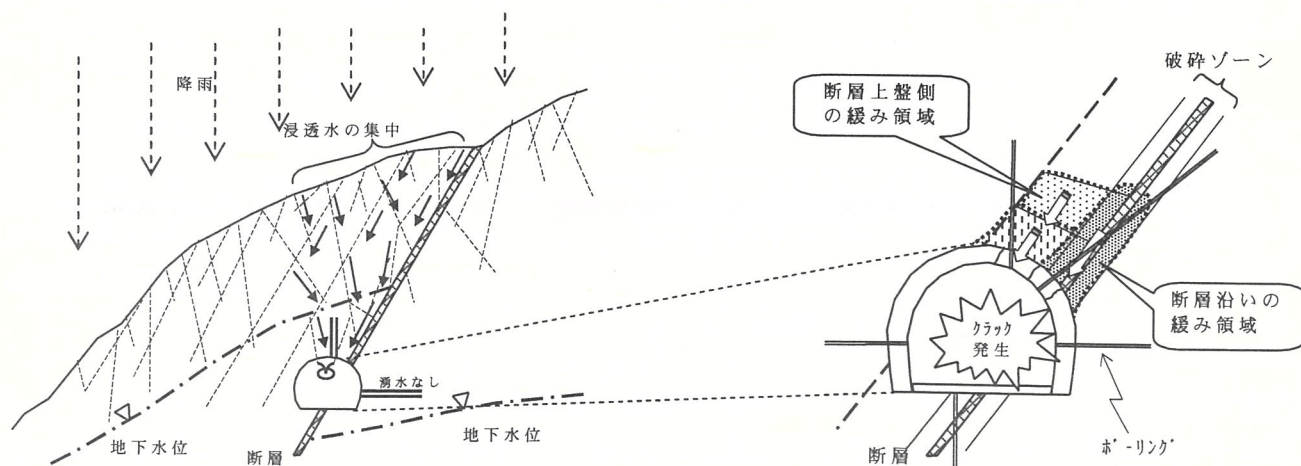


図 4 詳細調査結果模式断面図

5.2 変状発生機構

調査結果を総合すると、図 4 に示すように断層および断層周辺部の緩み岩盤により、トンネル右斜め上方から偏土圧が作用して覆工コンクリートに亀裂が生じているものと解釈された。また、断層（粘土化部）が遮水層として機能することにより、広範囲の地下浸透水が断層上盤側に帯水し、覆工の亀裂を通過してトンネル内に多量の漏水をもたらしている

ものと解釈された。

5.3 数値解析

変状メカニズムおよび作用外力・緩み領域の推定精度向上を図り、対策工設計の合理化に反映させることを目的とし、数値解析技術（覆工ひび割れ解析*・弾性解析）による作用外力の定量評価を行った。覆工のひび割れ変状からトンネル作用外力を算定するまでの流れを右に示す。

解析断面は、最も変状の顕著な T.D.40m 付近（右アーチ部に開口幅 7mm の亀裂が存在）とした。

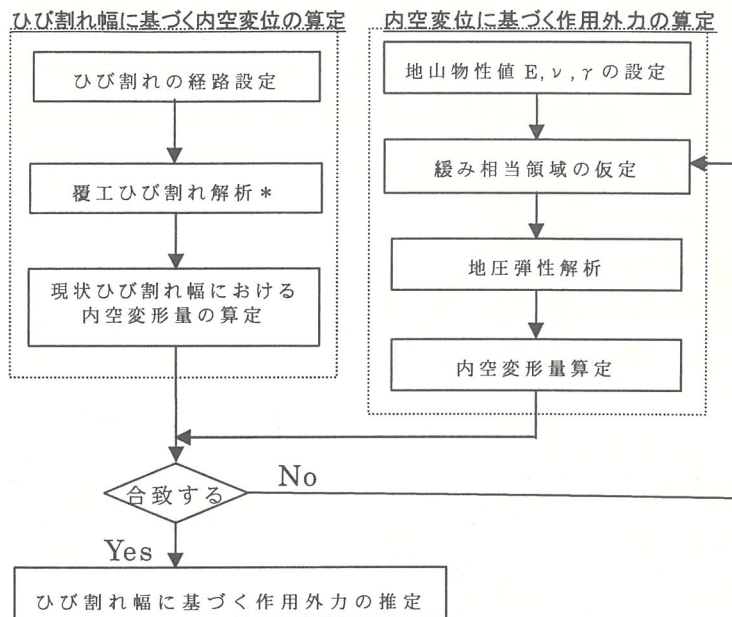


図 5 数値解析の流れ

* 参考文献：1) Z. Shi, M. Ohtsu, M. Suzuki and Y. Hibino : Numerical analysis of multiple cracks in concrete using the discrete approach, J. Struct. Engrg , ASCE. 2001 ; 127 (9), pp1085-1091.

ひび割れ解析の結果、右上方からの偏圧により幅 7mm の亀裂が生じた時点でトンネル中心方向に約 28mm の変位量が発生していることが分かった（図 6）。そして、自重による弾性解析の結果、ひび割れ解析で得られた変形量を生じさせるためには、高さ 9m の緩み領域が必要であると算定された（図 7）。解析結果は詳細調査結果と調和しており、高精度かつ定量的な緩み領域・作用外力を把握することができたものと評価される。

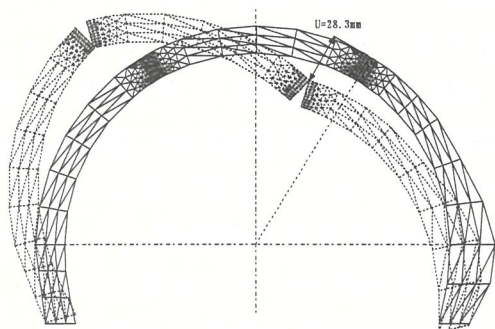


図 6 ひび割れ解析図(幅 7mm 時の変形)

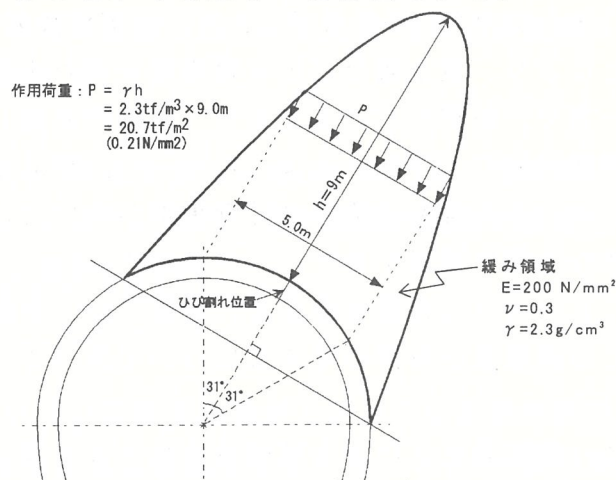


図 7 ひび割れ幅 7mm 時の緩み相当領域と作用荷重

6 まとめ

変状トンネルに対して、段階を追って各種調査を効果的に適応することにより、効率的・定量的な調査・診断が実施できた。また、数値解析技術の活用により、外力の作用が詳細かつ定量的に把握され、合理的な対策工選定に寄与することができた。これらの数値解析技術については、各種調査の限界（調査密度）を補間し、過不足の無い合理的な対策工のために必要不可欠な技術として更なる発展と活用が期待されるとともに、今後の変状トンネルの性能評価ツールとして一般化を目指して行きたい。

重金属を含有する建設発生土に係る調査・対策の考え方

③

応用地質(株)東北支社 ○門間 聖子

1. はじめに

旧来、建設工事の際発生する掘削土（以下、「建設発生土」）について、その工学的性質は調査されてきたが、化学的性質については一部で硫化土問題が取り上げられた程度であり、通常は調査対象にはならなかった。しかし、昭和 50 年代頃から、計画ルートが鉱山跡地を通過するような場合に、建設発生土あるいは掘削面から重金属を含む酸性水が浸出し、周辺環境を汚染する可能性があることが問題視され始めた^{1) 2)}。このような建設発生土による環境汚染に対して、当時は然るべき法令等が整備されておらず、廃棄物処理法や鉱山保安法における処理場浸出水、あるいは坑内排水に対する規定に準ずる形で調査・対策が検討されていた。

その後、「市街地土壤汚染に係る暫定対策指針」（昭和 61 年環境庁水質保全局）、「土壤の汚染に係る環境基準について」（平成 3 年 8 月 23 日環境庁告示第 46 号）、「重金属等に係る土壤汚染調査・対策指針及び有機塩素系化合物等に係る土壤・地下水汚染調査・対策暫定指針」（平成 6 年 11 月、環境庁水質保全局）、「建設発生土利用技術マニュアル」（第 2 版は平成 9 年 10 月、(財)土木研究センター、以下「発生土マニュアル」）あるいは「土壤・地下水汚染に係る調査・対策指針運用基準」（平成 11 年 1 月、環境庁水質保全局）などのように、土壤及び建設発生土そのものに対する各種の基準、指針等が策定され、これらを拠り所として取り扱いが検討されるようになった。

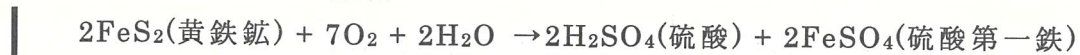
そして平成 15 年 2 月 15 日、土壤汚染対策法（以下「対策法」）が施行された。このことにより、重金属などの有害物質を含む土壤に対する考え方が今まで以上に厳しくなった一方で、地質などに由来する「自然的原因」による汚染の取り扱いをどうするかといった問題が取り上げられるようになった。東北地方においては、鉱山地帯や火山性地質分布域における高規格道路等の計画事例が多いことから、このような自然的原因により重金属を含む地質に遭遇するケースが少なくない。

このような背景を踏まえ、本稿では、自然的原因により重金属を含む建設発生土についての調査及び対策の考え方について述べていきたい。

2. 掘削発生土による環境汚染のメカニズム

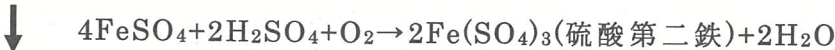
火山性地質分布域や鉱山地帯近傍では、岩石が熱水による変質作用を受け、重金属を含む鉱物の生成や岩石の強度低下（著しいものは粘土化）といった現象が生じていることがある。そして、熱水変質作用を受けた岩石中には、しばしば黄鉄鉱などの硫化鉱物が含まれる。このような岩石が掘削発生土として排出され野外に堆積された場合、空気に触れて図.1 に示すような化学反応を引き起こし、雨水等の浸透とともに有害な滲出水を発生して周辺環境に影響を及ぼす可能性が考えられる。また、自然状態ではこれらの化学反応の過程に鉄酸化バクテリアが関与することがあり、その場合溶出が著しく早められることも知られている。

硫化鉱物（黄鉄鉱）の酸化

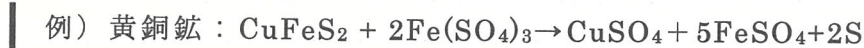


生成した硫酸が各種鉱石を溶解

硫酸第一鉄の酸化



硫酸第二鉄が各種硫化鉱物を溶解



重金属類を含む酸性水の発生

図.1 硫化鉱物の酸化による有害性の発生機構³⁾

また、昨今耳にすることの多い砒素について、自然状態の土壌・岩石から検出される要因を列举すると、以下のとおりである⁴⁾。これらの要因を見ると、鉱山跡地や火山性地質だけでなく、堆積岩からも重金属（砒素）が検出される可能性があることがわかる。

- ① 地殻内部の高温・高圧下で砒素鉱物が生成する
- ② 地下において熱水作用により砒素鉱物が生成する
- ③ 温泉水、鉱泉水より砒素が濃縮する
- ④ 火山ガス等に含まれる砒素が濃縮する
- ⑤ 風化作用による砒素鉱物が溶解し、別の場所で濃縮する
- ⑥ 河川水中の微量の砒素が鉄鉱物に吸着し、沈殿する
- ⑦ 海中において、海底熱水作用により砒素が濃縮する
- ⑧ 海中において、海水中の砒素が生物体に濃縮され、それらの死骸が堆積物へ取り込まれることにより砒素が濃縮する

このようにして自然状態で分布する重金属は、工事着手前には地山内部にあり化学的に安定な状態にあるが、施工に伴い掘削されることにより、酸化・還元環境の変化や細粒分発生による溶出促進が生じ、溶出基準を超過する場合がある。

3. 自然的原因による汚染に係る法的な対応

環境省では、対策法で特定有害物質に指定されている重金属等がこのような自然的原因によるものかどうかの判定方法として、表.1 に示すような基準を示している（「土壌汚染対策法の施行について（別紙1）」平成15年2月4日環水土第20号、環境省環境管理局水環境部長通知）。

通常、このように土壌中に含まれる重金属等が自然的原因による場合、土壌汚染対策法の適用にはならない。しかし、この通知では、自然的原因による場合でも、基準に適合しない土壌を当該地域の外に搬出する際には、都道府県と相談して適切に措置がなされるよう、都道府県知事が土地所有者等に指導することを求めている。

このように、法的に見ても、重金属を含んだ建設発生土を地域外に搬出する場合には何らかの措置が必要になるものと考えられる。

表.1 自然的原因によるものかどうかの判定方法

(1) 土壌溶出量基準に適合しない場合の判定基準									
下記①～③の全てについて以下の条件を満たすときは、自然的原因によるものであると判断する。									
① 特定有害物質の種類等	土壌溶出量基準に適合しない特定有害物質が、砒素、鉛、ふっ素、ほう素、水銀、カドミウム、セレン又は六価クロムのいずれかであること。								
② 特定有害物質の含有量の範囲等	特定有害物質の含有量が概ね以下の表に示す濃度の範囲内にあること。								
	物質	砒素	鉛	ふっ素	ほう素	水銀	カドミウム	セレン	六価クロム
	上限値の目安	39	140	700	100	1.4	1.4	2.0	—
(単位：mg/kg)									
③ 特定有害物質の分布特性	特定有害物質の含有量の分布に、使用履歴のある場所等との関連性を示す局在性が認められないこと。								
(2) 土壌含有量基準に適合しない場合の判定基準									
下記①、②について以下の条件を満たすときは、自然的原因によるものであると判断する。									
①	バックグラウンド濃度との比較又は化合物形態等の確認から、自然的原因によるものであると確認できること。								
②	特定有害物質の含有量の分布に、当該特定有害物質の使用履歴のある場所等との関連性を示す局在性が認められないこと。								

4. 重金属を含む建設発生土に対する調査方法

土壌汚染対策法に示されている調査手法は、基本的に汚染の可能性のある土地（土壌）を対象としたものであり、これを建設発生土に対して適用するにはいくつかの問題点がある。それらの問題点について、サンプリング方法、試験方法に分けて以下に考察する。

4. 1 サンプリング方法

対策法では、調査対象として平坦な土地を想定し、汚染の可能性のある区域は 100m² に 1 地点、汚染の可能性が低い区域は 900m² に 1 地点というグリッドを設定して土壌のサンプリングを行う。また、汚染原因は人為的なものを想定しているため、サンプリング対象は表層土壌である。

一方で、建設発生土の場合、切土やトンネル掘削により発生する土や岩石が対象であることから、グリッドを設定して表層土壌を採取する方法では評価できないことが多い。このため、通常は調査ボーリングのコア試料を用いて、掘削対象となる深度のコア試料を用いて試験を行うことで有害性の評価を行うことが多い。図.2 に示した調査例では、トンネルの掘削発生土を切羽単位で評価するために、ボーリングコアのうち掘削断面に該当する範囲から一定間隔でコアを抽出し、それらを粉碎・混合・縮分して 1 断面あたりの試料として試験を行い、有害性の評価を行っている。これは、建設発生土について処理を考える場合、実質的には区間ごと、あるいは 1 回（1 日）の掘削ごとといった単位での評価及び処理となることから、上記のようなサンプリングの工夫を行ったものである。

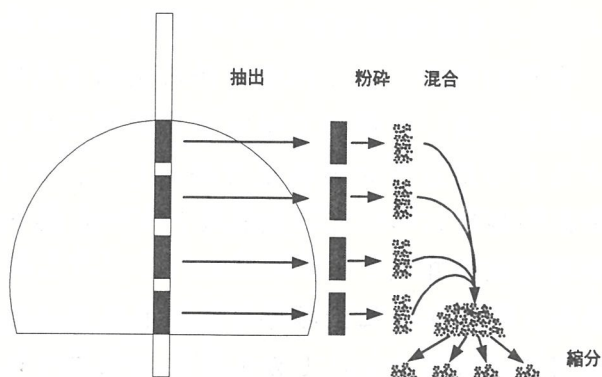


図.2 コア試料を用いた調査例

4. 2 試験方法

土壤汚染対策法では、有害性を判断するための試験方法として、下記の2種類の試験を行う。

1) 環境庁告示第46号に基づく溶出試験（以下、「46号試験」）

2) 酸抽出法による含有量試験

このうち、46号試験は、塩酸でpH調整した蒸留水で6時間振り混ぜた後の上澄みを分析するものである。この場合、先に述べた硫化鉱物の酸化による溶出が生ずるようなケースでは、掘削された発生土が長期的に空気と水に曝されて硫化物の酸化が進行し、その後溶出が促進されるという酸化溶出のメカニズムを踏まえた有害性の評価が十分にできるとは言い難い。このような場合には、酸化という要素を加味した試験方法で将来的な危険性を予察するという方法が考えられる。

その一例として、カラム通水による溶出試験を紹介する(福田,平野(1977))⁵⁾。これは、粉碎試料を図.3に示すようなアクリル製のカラムに充填し、溶媒を降雨に見立てて散布するという試験方法である。実際の試験事例では、試料は粒度を0.5~5mmに調整し、1kgをカラムに充填した。溶媒は、先に述べた自然界でのバクテリアの作用を再現するため、硝酸カルシウム、塩化カリウム等の栄養源を添加した蒸留水を硫酸でpH=6.1~6.2(降雨のpH)に調整したものを用いた。また、バクテリアは市販の鉄酸化バクテリア

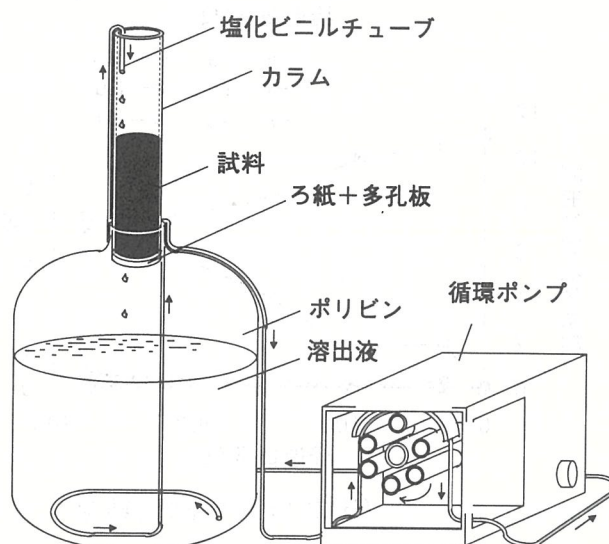


図.3 カラム溶出試験装置概念図

(*thiobacillus ferrooxidans*) を約2週間培養したものを懸濁液としてカラムに上から

250ml ずつ加えた。その上で、先ほど調整した溶媒を、試料 1kg あたり 1 日約 1000ml 通水する程度の量で上方より散布・循環させた。

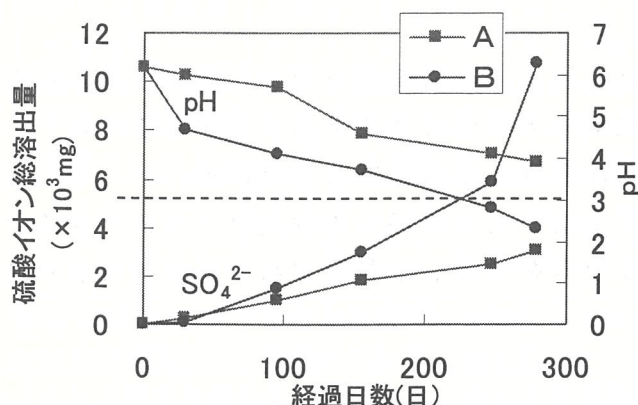
試験に用いた試料はA：石英安山岩、B：凝灰岩（黄鉄鉱、黄銅鉱を含む）の2試料で、重金属類と硫黄の含有量は表.2のとおりである。なお、同表には参考として地殻中の元素の存在量⁶⁾を併記した。

表.2 試料中の重金属類と硫黄の含有量（単位：mg/kg）

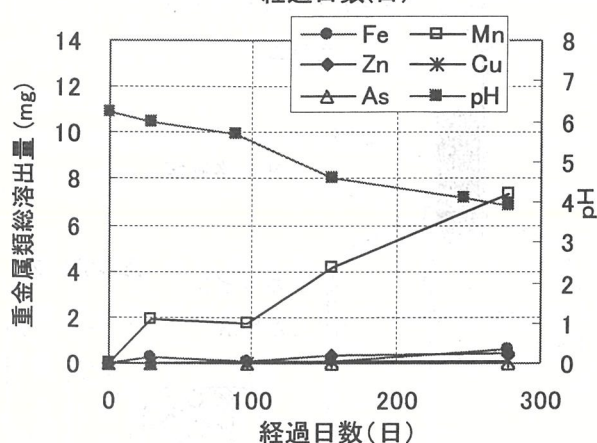
試料名	鉄	マンガン	亜鉛	銅	カドミウム	鉛	砒素	硫黄
A	6900	99	19	1.9	<0.1	3.0	0.1	1200
B	56000	320	21	230	<0.1	6.2	8.8	31000
地殻	5600	95	70	55	0.2	0.1	1.8	280

このカラム試験の結果の一例を図.4に示す。この例では、硫黄含有量の多いBでは硫酸イオンが約240日目以降急激に増加したほか、鉄、マンガン、銅が150日目以降大きな増加を示した。一方、Aではマンガンが直線的に増加したものの、それ以外にはBのような変化は

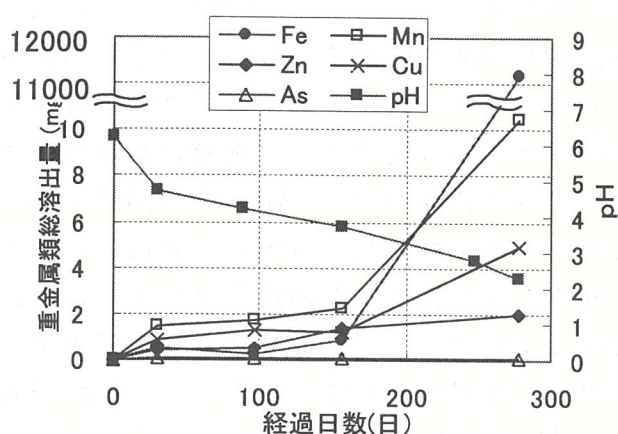
認められなかった。この試験で添加したバクテリアはpH3付近で活動が活発になることから、Bは約240日目以降バクテリアが活発となる環境になっており、その作用により硫酸イオンや重金属類の溶出量が増加したことがわかる。



(i) pHと硫酸イオン溶出量の経時変化



(ii) 試料 A の試験結果



(iii) 試料 B の試験結果

図.4 バクテリアを添加したカラム溶出試験結果

このように、建設発生土を野外に堆積した場合、当初は重金属等が溶出しなくとも、長期的には溶出量が増大するケースもあるため、通常行われる46号試験に加え、上記のような試験を実施して将来的な有害性の有無や程度について把握することも必要である。

5. 対策の考え方

土壤汚染対策法では、土壤含有基準値を超える土壤については立入り禁止、舗装等、覆土、土壤入れ替え、封じ込め、浄化といった対策が示されている。一方、土壤溶出基準値を超過した土壤については、不溶化等、覆土、遮水工封じ込め、遮断工封じ込め又は浄化が対策として掲げられている。このうち、処理と同時に掘削発生土の有効利用を図ることを目的とした、盛土内封じ込めの例を図.5に示す。

この場合の処理のポイントは次のとおりである。

- ① 掘削発生土は不溶化処理を施し、地震などで万一遮水層が損傷を受けた場合でも重金属が容易に溶出しないようにする。

②掘削発生土の表面は50cm以上の覆土またはアスファルト舗装等により、降雨等の浸透を防止するとともに、空気との接触を遮断して酸化防止を図る。

③地山との境界は遮水層または遮水シートにより、地下への溶出水の浸出を防止する。

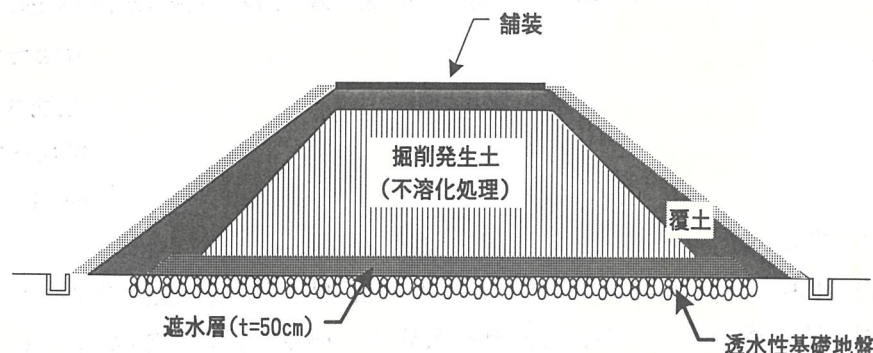


図.5 盛土内封じ込め処理概念図

なお、溶出量基準を超過した掘削発生土は地下水に影響を及ぼす可能性があるため、年4回程度の地下水モニタリングを行い、措置が万全であることを確認することが望ましい。

6. 今後の課題

重金属を含む建設発生土の処理にあたり、現在準拠できる法・基準等はいずれも土壌を対象としたものである。しかし、建設発生土は大量の岩塊を含むことが多く、そのようないわゆる岩ズリに対しては明確な規定はないのが現状である。一般的に粉碎が進み、粒子が細くなればなるほど、物質の表面積が大きくなり酸化反応などの進行は早くなる。したがって、岩塊を含む建設発生土に対して粒径2mm以下の微粉碎を行って試験をすることは過大評価することになると考えられる。これはいわゆる安全側の値ではあるが、一方で処理対策の費用を増大させる要因にもなりうる。このため、岩塊を含む場合の合理的な有害性評価方法の確立が望まれるところである。

7. おわりに

以上、自然的原因により重金属を含有する建設発生土に対する汚染防止の方策について、いくつかの事例を挙げて説明してきた。このような建設発生土の取り扱いについては、未だ法的に明確な規定のない部分が残されている。今後、様々な建設現場で同様の問題に遭遇することが少なくないと推察されることから、そのような機会に更にこれらの問題について考察が重ねられて調査・対策の手法として確立され、以って建設事業による環境への負荷が少しでも低減されることを切に望む。

参考文献

- 1) 佐々木祐三, 田中栄(1985): 旧鉱山地域におけるトンネル工事について—東北自動車道 亀田山トンネル—, 日本道路公団技術情報, No.77, p.80-85.
- 2) 佐々木祐三 (1986): 東北自動車道・亀田山トンネルの鉱山廃坑・重金属対策, 日本道路公団技術情報, No.81, p.101-105.
- 3) 地下水問題研究会(1991): 「地下水汚染論—その基礎と応用」, p.311, 共立出版(株).
- 4) 日本地質学会環境地質研究委員会(1998): 砒素をめぐる環境問題, p.10-24, 東海大学出版会.
- 5) 福田修三, 平野嘉隆(1977): 硫化鉱物を含む岩石のバクテリアを考慮した溶出試験, 第7回環境地質学シンポジウム予稿集, p.75-80.
- 6) 地質調査所(1975): 「地球科学的試料の化学分析法3および付録」, 付録 p.65-66, 地質調査所.

3300年前の地下岩盤構造物の安定性に関する調査結果概要

④

日本大学工学部 ○田野久貴

東海大学海洋学部 オメール・アイダン

早稲田大学理工学部 濱田政則

同上 人間科学部 吉村作治

1. まえがき

約3400年前に構築されたアメンヘテプⅢ世地下王墓の壁画修復を主目的とした調査と並行して、岩盤構造物の観点からの調査と計測を実施する機会を得た。本文はこれらの結果の概要を報告するものである。この種の遺跡の安定問題は人類の共通の遺産としての意義のほか、一万年を意識しているという高レベル放射性廃棄物地層処分の観点からも重要と考えられる。

2. 調査地と地質

2.1 地下王墓の位置と構造：対象王墓はエジプトアラブ共和国ルクソール市（図1参照）のナイル河西岸のいわゆる「王家の谷」として知られている谷の西谷に位置する。数多くのファラオが葬られている地下墳墓の一つで、アメンヘテプⅢ世は新王国時代の紀元前約1400年前の、いわゆる新王国時代、すなわち今から約3300前に掘削された地下岩盤構造物である。発見され修復された王墓の多くは公開されているが、現在も調査・修復中の王墓もあり、この王墓（KV22）もその一つで早稲田隊によって約20年前から調査が実施されている。王墓の入口は石灰岩の崖下に位置し（写真1）、その入口から地下に約25mほど下るが、この崖の高さを含めるとそのかぶりは約80数mと見積もられる。王墓の全体の構造を図2に示す。A～J室まで階段室を含めて10個の空間と6個の副室から構成される。王の棺のための部屋、すなわち玄室はJ室であり、その空間を支えるために6本の柱（残柱）がもうけられている。死後の世界を表す壁画は、E室、I室とJ室に描かれている。これらは、岩壁面を極力平滑に仕上げた上に石膏を上塗りした下地に描かれた。表面は汚れており、また、石膏自身の剥離や背面の岩盤の動きに連動したと思われる亀裂が壁画表面の随所に観察される。汚れは有機溶剤等でぬぐい取り、浮いている部分は裏側の隙間に樹脂状接着剤を流し込んで固定するという方法が実施されている。すべてが手作業で多くの日数を必要とする。

2.2 王墓の地質：周辺の地質は、ターベ層群のセライ累層の石灰岩、というよりマールに近い始新世（Eocene）の地質である。この地層中に掘られた王墓壁面では構成する岩質

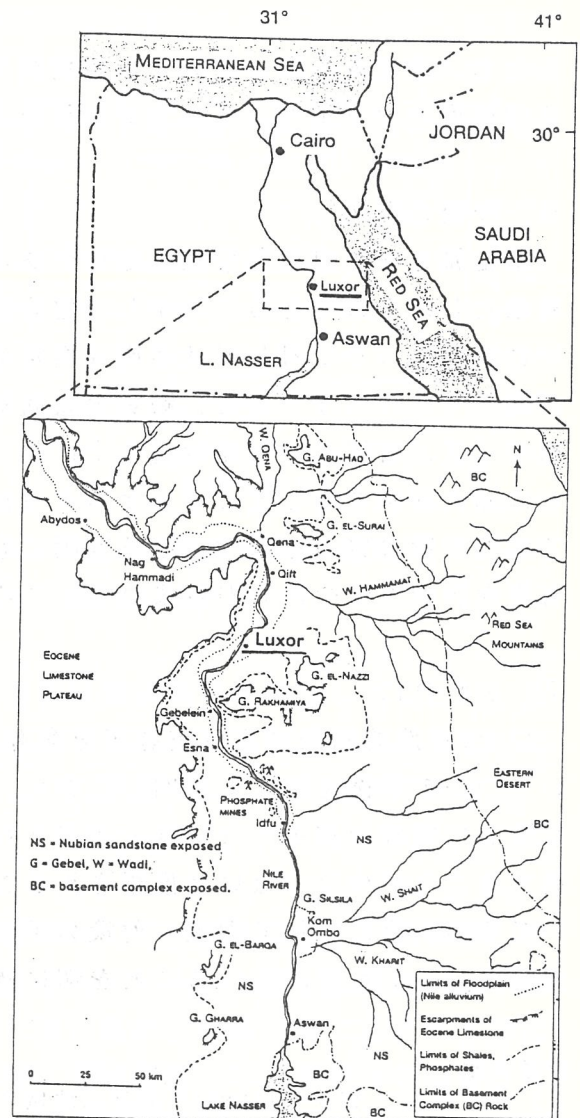


図1 現場（ルクソール市）周辺の地質概要



写真1 アメンヘテプⅢ世地下王墓入口と周囲の地形

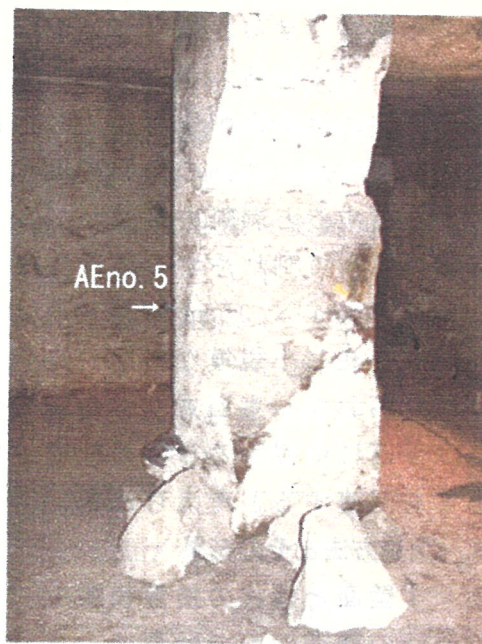


写真2 J e室柱の破壊状況とAEセンサー

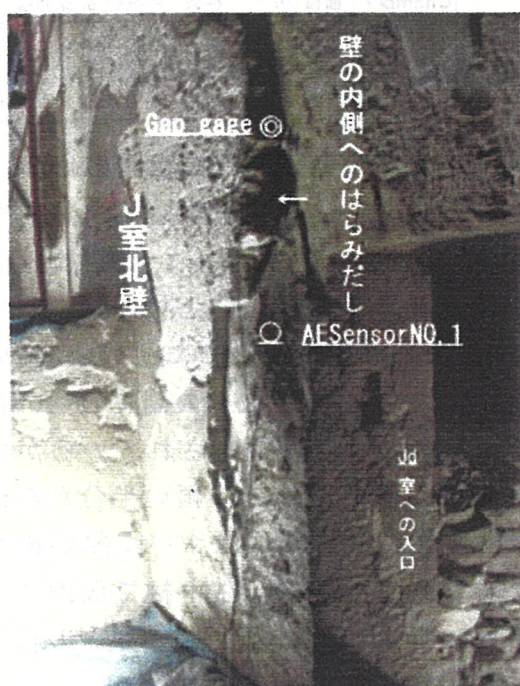


写真4 J室北壁の破壊状況と、変位計・AEの配置



写真3 J室NO.3柱の破損状況

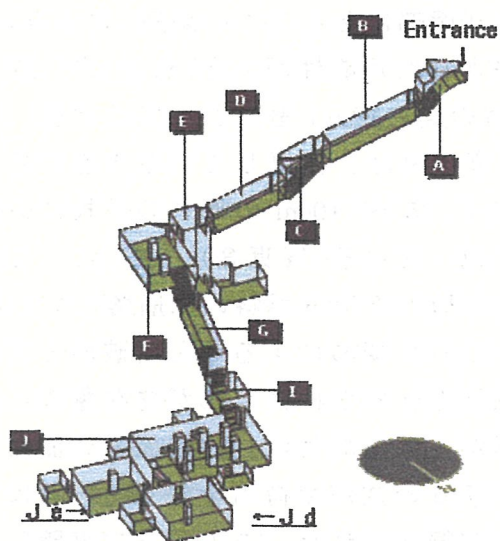


図2 王墓全体の3D配置図

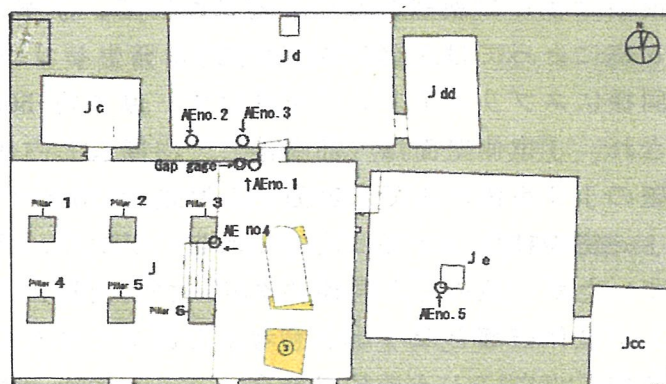


図3 AEセンサー、変位計配置図

をよく観察できる。扁平なノジュール状のフリントを幾枚も含み、あたかもこれらとの互層状をなしている。幸い、このフリント部分は離散的であり、当時は鉄器がなく銅器と木製くさびによる掘削を可能にしたようである。母岩の石灰岩は時として貝化石を含み一見塊状をなすが、外部の類似の風化層を観察すると、小判状に小片化しており現地でコアを得ようとする剥離することからも明らかなように潜在葉理が発達している。したがって、打撃によって割れやすく現地に今も残されているノミ跡のある岩片（ずり）の大きさは 30 cm × 30cm × 15cm 程度のものが多いようである。王墓はいくつかの主要な亀裂（節理）が存在し小規模な断層も見受けられる。主要亀裂は王墓掘削時から存在したものと思われ、おおむね東西方向が卓越している。J e 室の東壁・天井・床を切る亀裂のうちの一つは、西に位置する J 室の北壁を切っているようであるが、これは後述するこの北壁の損傷とも関連すると考えられる。

3. 調査方法とその結果

3. 1 壁面と残柱の損傷状態

今回の調査の中で計測は、1) A E、2) 亀裂間変位、3) 温度・湿度、4) シュミットハンマ

Chamber	面積(m ²)	柱数	柱総断面/床面積	比率
J	125.36	6	0.045	1
F	63.71	2	0.031	0.69
J e	49.05	1	0.016	0.36
J d	65.24	1	0.012	0.27

表 1 各室の残柱と床面積の比率

ー、5) 弾性波伝搬速度などが主なものであり、このほか簡易型一軸圧縮試験装置を試作・持参し、現地で強度・変形試験も実施した。また、レーザー距離計やレーザー水平・鉛直ライン投影器などを持参し、残柱の鉛直度や床・天井の水平度などもチェックした。岩盤力学的な見地からは、壁と柱の損傷状態に注目した。先に示した図 2 の王墓全体の各室の配置からも明らかなように、(残)柱のある室は玄室 J (6 本) と F (2 本) の二つであり、これに 1 本を持つ 2 つの副室(J d 室、J e 室)の計 4 室である。このうち、J e 室の柱は絵のための石膏は塗布されているが絵を描くまでには至らずこの王墓の柱の中ではもっとも損傷が激しい。その幅の半分から破断して床に岩塊崩落している(写真 2 参照)。一方、玄室 J の柱 6 本にはすべて絵が描かれている。そのうち、NO.3 は上部から割れて崩落寸前であるため、現在木材で仮押さえされている(写真 3)。そのほかの J 室の柱には構築後に発生したと推定されるヘアークラックが柱にはほぼ平行に見受けられ、クリープ条件下におけるいわゆるスプリッティング破壊の初期と推定されるが、これらは緊急な不安定状態にはないと判断された。表 1 に柱を持つ各部屋の総柱断面積と床総面積との比を示した。より深部にある二つの副室(Jd、Je)の面積比が異常に小さく、これらは設計変更により拡張された可能性が大きい。一方、壁の損傷は多くの副室を持つ J 室において、J 室と J d 室の間の壁(J 室にとっては北壁、J d 室にとっては南壁に相当する)に発生している。損傷状況は、損傷している J 室の柱と同様にスプリッティングを受けて、厚さ約 50cm の壁が、5 ～ 10cm の厚さの数枚に分離され、J 室側壁面は一部崩落して、開口し内側にそり返っている(写真 3)。さらに、この壁の J d 室側はすでに表面から厚さ約 10cm の部分が面積の下半分が斜めに崩落している。J e 室の柱についてはすでに報告¹⁾があり、長期のクリープ変形によるせん断破壊とされていたが、他の柱と同様にクリープ変形による縦割れをきっかけにこれが先在亀裂に達して全体破壊となったとも考えられる。クリープ変形が主体であれば、柱断面と床面積比の最も小さい J d の柱が健全である説明がつかない。J e の柱が耐荷力を失ったあとは、周りの壁に負担され J e と J 室との間の壁の損傷が当初懸念された。この J 室の東壁に描かれた壁画は下過半分の石膏が剥落しているものの、大きな損傷は見受けられていない。

3. 2 A Eと変位計による計測

変形や微小破壊を伴う変形が現在も生じているかは、壁面の描かれた石膏部位の安定性にも関わる問題である。現場は作業のための照明と換気のための電源が外部仮設された発電機によって供給されるが、作業の終了する午後にはA Eや変位計測のための電源は期待できない。そこで開発中のA Eカウント装置（乾電池で約6か月間駆動・記録可能）設置する事とした。明らかに不安定に見えるJ e室柱（AEno..5）とJ室の no..3の柱（AEno.4）にそれぞれ1個、損傷の激しいJ室北壁のJ室側に1個（AEno.1）,その反対側すなわちJ d室南壁に2箇所（AEno.2と AEno.3）設置した（図3）。また、高感度変位計（Gap gage）を1台J室北壁のA E NO.1の近くの開口亀裂を挟んで設置した。

3. 3 計測結果と考察

（1）A Eの計測結果：平成15年3月中旬に設置し、4月下旬に再訪したがこの間約40日余である。5ヶ所に設置したA Eの計測結果の1例を図4に示す。この例では多くの場合、時間帯で7時から14時にかけてA Eがカウントされている。現場は午前7時前後に現地監督官が王墓の鍵を開けることにより作業が始まる。発電機が発電を開始すると、王墓の各所に配置した照明やモーターに電源が一斉に入る。このような場合一般に電気的ショックでノイズとしてのA Eがカウントされる。また、13時頃その日の作業がすべて終了するとこの手順の逆で、すべての照明がOFFになるときにも同様にノイズとしてのA Eの発生が認められることが判明した。その他、センサーの近くの壁面のクリーニング作業によっても発生している。したがって、この時間帯（7時から14時）のA Eをノイズとして無視することとした。

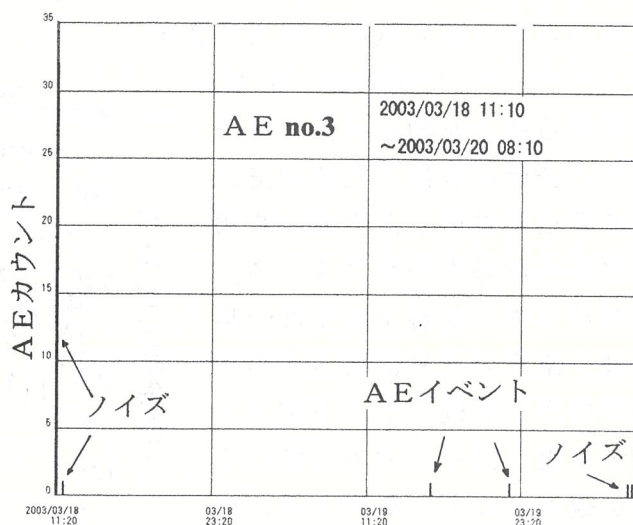


図4 A E計測結果の例（A E no.3, J d室南壁）

AEno.	Date-Time	Counts	Total Count
1	31, March, 5:30	1	1
3	19, March, 16:20	1	2
	March, 22:30	1	3
	24, March, 17:20	1	4
	1, April, 15:30	1	

表2 A E発生センサーno.・日時と数
このような整理を約43日間のデータについて行った結果を表2に示す。これから明らかに、no.2, no.4と no.5は全くA Eがカウントされていない。no.3がトータル4カウント、no.1が1カウントであった。いずれも発生数は決して多くないが、互いに比較することにより次のことが言えよう。

1) J室 NO.3柱（A E no.4）とJ e室柱（A E no.5）は明瞭に破壊しており明らかに不安定に見えるものの、現時点では安定している（偽安定）と判断される。

2) 一方、J室とJ d室間の隔壁を挟んでほぼ対向している（A E no.1：J室側北壁表面、A E NO.3：J d室側南壁表面）2個のセンサーはA Eをカウントしている。また、同じJ d室側の南壁に約1.5 m離れたA E NO.2にはカウントが見られない。したがって、A Eの発生を見た付近において、微視破壊を伴う変形が現在も進行中である可能性が高いが、隔壁全体に及ぶまでには至っていないようである。なお、現地は金曜日が休業であり、このような場合上記のようなノイズは発生しないはずである。この意味で休業日のデータ

ーは貴重であり、特に通常日の作業時間帯（7時から13時）に注目したが、現時点で5個のセンサーとともに全くAEはカウントされていない。現場でのAE計測は理想的にはアクティブ・ダミー方式²⁾を採用すべきであるが、アクティブのみとした。上記の結果はその必要がないほど、AE観測としてはきわめて良好な現場であるといえよう

（2）変位計の計測結果：変位計は高感度タイプを、J室北壁側において分離破壊して壁本体から反り返り気味の部分に設置した（写真4）。主として室内側に亀裂が開く成分を測定することとした。表面に設置した変位計は、温度変化に対応した岩盤の膨張・収縮の影響を一般に受ける。したがって、亀裂を挟まない場合は、温度の上昇によって引っ張りひずみ（変位）が、温度が下降する場合はその逆の圧縮ひずみが観察される。亀裂を挟んだ場合にはこれと反対の現象となる。得られた変位に関するデータを観察すると、1日において午前7時頃変位が最大値を示し

13時頃最小値を示すことがわかった。これは、毎日7時頃より作業が開始され電源供給による点灯や扇風機の使用、作業員などにより王墓内において温度の上昇がはじまり1日の全作業が終了する13時頃までこれが続くためと考えられる。すなわち、温度上昇による膨張によって前述したように亀裂の間隔が減少する。作業終了後現場が閉鎖されると内部の温度が次第に低下しこれによって亀裂は再度開きはじめ、翌日の作業開始時までこの傾向は継続する。

図5に設置初期のひずみを基準とした、毎日の午前7時と13時のひずみを変位に換算して示した。プラスは亀裂間の拡大を表す。これら二つの値は、一日単位で見ると午前7時における変位量が同日の13時の値まで変化することを表している。午前7時（実線）と13時（波線）が時々接近あるいはほぼ一致する現象が見受けられるが、これらは

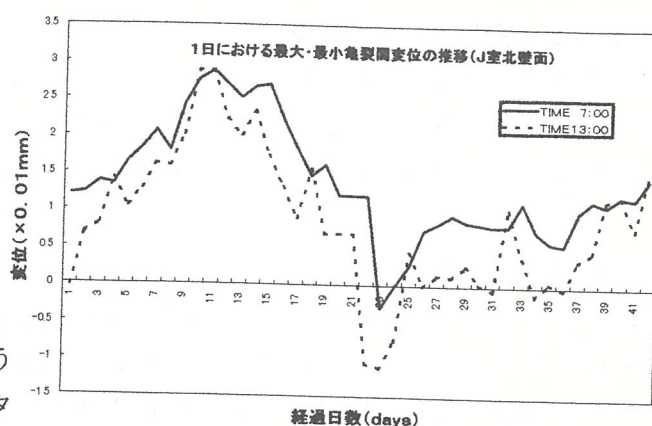


図5 J室北壁面亀裂間変位の挙動
実線：午前7時、破線13時

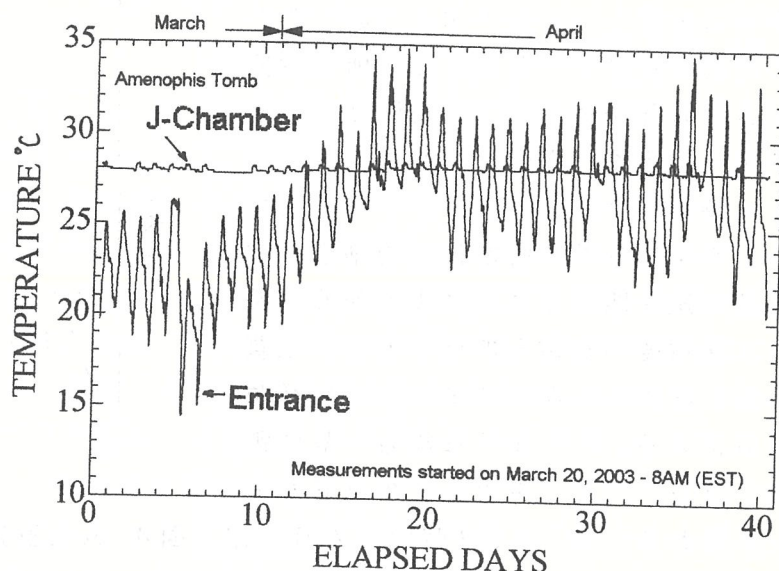


図6 入り口とJ室の気温の変化

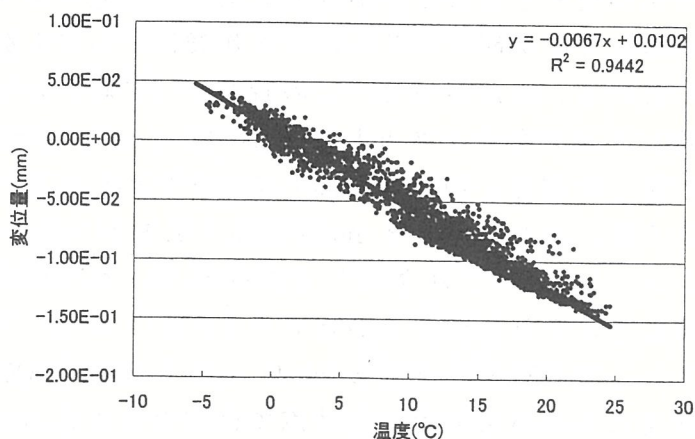


図7 中・古生層凝灰岩の亀裂間変位と気温の相関

休日と一致し作業による一時的な温度変化を壁面が受けず、温度がほぼ一定である。ことと、短期的には王墓内の温度が周囲の影響を受けにくいためである。全体的には、最大でも拡大変位は $3 / 100\text{mm}$ 程度で一方向に変位が増加するという傾向は認められず、初期値にもどることが観察される。しかし、拡大傾向が優勢であることは明らかである。また、20日～24日間で変位に周期性が認められるようである。

(3) 温度観測の結果と変位の関係：王墓内の温度は、入り口、J室、Jd室、Je室など計6カ所に設置した。もっとも温度の変化の激しいものが、入り口(Entrance)、ほとんど変化しないものはJe室であった。湿度は12%から25%の範囲にあった。これらのうち、入口とJ室の温度の測定結果を図6に示す。変位計を設置したJ室は28度前後でほぼ一定しており、小刻みな上下は前述したように作業による温度変化で、これも約0.5度程度できわめて小さいことがわかる。一方、図7は日本における中・古生代の玄武岩質凝灰岩で、圧縮強度は王墓を構成するマール(石灰岩)の4～5倍程度あるが、類似の変位計による亀裂間変位と岩盤表面の温度との相関図の例である。前述したように、気温変化と変位の間には負の相関が明瞭である。これを用いて 0.5°C の温度変化による変位の変化量を試算すると、約 $0.34\text{ mm}/100$ を得る。一方、図5に示すようにJ室北壁の変位の変化はおよそ $1\text{ mm}/100$ を示しており、少なくともこちらの方が数倍大きいことがわかる。したがって、図5における全体の変化の傾向は王墓内の局所的な温度変化では説明できず、どちらかという、図6に示す入口(Entrance)の温度と関係しているように見える。しかし、厳密にはその周期は一致しないようであり、変位の大きな変化の理由解明にめには、さらなるデータ収集が必要である。

4. まとめ

- 1) 損傷の激しいJ室北壁の一部分であるが、2カ所のAEセンサーに数カウントの信号が観測されたが、損傷した柱など3カ所では現時点で全く認められなかった。
 - 2) したがって、王墓全体の現状は比較的安定していると判断されるが、J室北壁の一部は微視的な破壊を伴う変形が現在も時々生じていると考えられる。
 - 3) この損傷部分の開口亀裂は、開口傾向にあるが拡大－縮小という周期性が認められる。王墓内の温度変化は作業時を含めても小さく、これが主要因とは考えにくい。
 - 4) J室やF室とJd室、Je室面積比(表1)を比較すると、これら副室は途中で拡張されたと考えられ、考古学的にも裏付けられている。
 - 5) 古代の技術者が安定に関する一定の経験や知見を有していたとすると、上記4)と同様な理由でJe室の柱の破壊の主原因はクリープ変形ではないと考えられる。
- 低成長期に入った今日、土木構造物の維持管理の観点から簡易的手法による長期の計測の必要性が増しているが、古代遺跡においてもこのような視点からの取り扱いが望まれる。なお、現在も計測を継続中であり、他の計測結果も別途報告したいと考えている。

謝辞：本プロジェクトはユネスコの支援の下に行われておりここに記して謝意を表する。

参考文献

- 1) 谷本親伯(1994)：古代エジプト遺跡の長期安定性と断層の影響、－WV22王墓、未完成オペリスク、大スフィンクスでの観察－、エジプト学研究、第2号、pp. 30－41.
- 2) 芹澤 恒、田野久貴(2003)：簡易的AEカウント装置の試作と現場への適用、土木学会東北支部技術研究発表会講演概要、pp. 334－335.

熱赤外線カメラによる地上リモートセンシングの2、3の課題

⑤

(株)復建技術コンサルタント ○渡辺敬三

同上 山下智士

同上 村田暁永

1. はじめに

常温付近の物質自体は温度に依存して熱赤外線 ($3\sim 12\mu\text{m}$ の波長帯にあたる赤外線) を放出しており、この現象を熱放射という。熱赤外線カメラは広範囲の熱放射強度を瞬時に捉え、温度数値データとして記録する。近年、カメラの小型化・低価格化が進み(表-1)、「吹付のり面や橋梁等のモルタル・コンクリート劣化診断」¹⁾、「植生の活性度や屋上緑化のヒートアイランド抑制効果」²⁾、「湖や沿岸の水面温度調査」等に利用されている。本論文は吹付のり面と湖水温調査の事例から、熱赤外線カメラによる地上リモートセンシングを活用する上での問題点について考察する。

表-1. 熱赤外線カメラ

項目	機器・ソフト
装置	Neo ThermoTVS-610 (日本アビオニクス製) 重量2.6kg、最小検出温度0.1℃。

2. 吹付のり面に関する熱赤外線リモートセンシングの問題点

吹付のり面のモルタル背後の空洞化は、主に軟質な岩石や強い風化を受け土砂化した背後地山が、吹付け面のキレツや水抜き孔等から吸出され発生すると考えられている。ここでは、背後地山の性状に着目し、吹付のり面における熱赤外線+コア抜き工調査の事例を述べ、空洞化の評価及び背後のり面の安定性評価法について述べる。

2-1. 代表的吹付のり面の調査例

「硬岩のり面」：施工後約30年経過、高さ20~30m、ダム湖畔付替え道路、現況のり面平均勾配1:0.6。背後の地下水の浸出と凍結融解、地山表層の緩みによって形成されたとみられる法面中・下部の水平亀裂が特徴的である。地質は石英安山岩の貫入岩体から成る。数箇所の空洞部と地山の風化変質が確認された。(図-1)

「軟岩のり面」：施工後約20年経過、高さ20~30m、奥羽山脈脊梁、高標高積雪寒冷地、現況のり面勾配は上部1:0.8~1.0、下部1:0.8~0.5。劣化や凍結融解によると考えられる亀甲状亀裂が発達するが、連続性の良い亀裂は見られない。地質は溶結凝灰岩(非溶結、弱溶結)から成る。明瞭な空洞は検出されず、地山の顕著な風化や軟質化が認められた。(図-2)

「膨潤性岩のり面」：施工後約10年経過、高さ30m、平均のり面勾配1:0.6。地すべり地周辺に位置する。背後地山緩み帯の押出しによって中腹の亀裂が発達したものと推察され、のり面下端の側溝側壁の明瞭な押出しが発生している。地質はスメクタイトを多量に含有する新第三紀凝灰岩から構成される。横断方向に連続する明瞭な

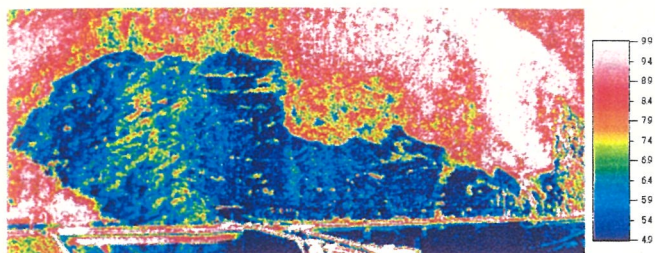


図-1. 「硬岩吹付のり面」温度差画像例

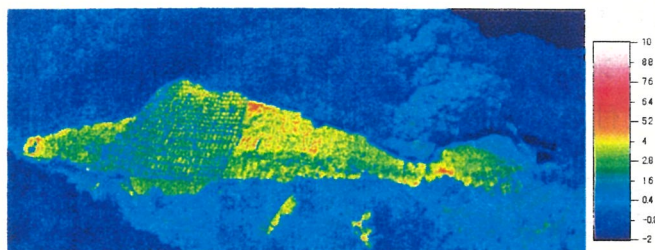


図-2. 「軟岩吹付のり面」温度差画像例

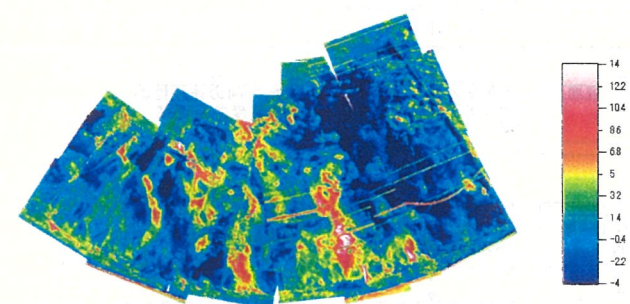


図-3. 「膨潤性岩吹付のり面」温度差画像例

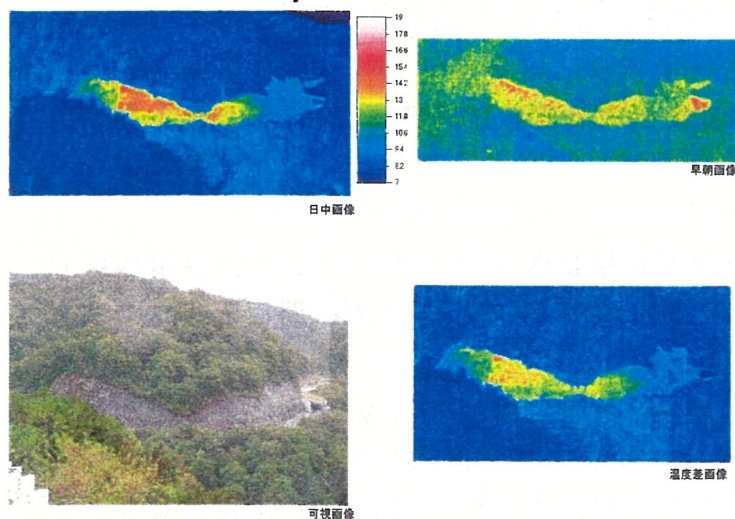


図-4. 撮影角度による吹付のり面温度画像例

【撮影角度=90°】
 実測=31.0℃
 赤外線観測=29.6~30.9℃
 ●実測と赤外線観測で、ほぼ一致した水温が得られる。
 ※対流による渦模様が明瞭に観察できる。

【撮影角度=45°】
 実測=30.4℃
 赤外線観測=28.2~29.8℃
 ●赤外線観測の水温は、実測より0.5℃ほど低い。

【撮影角度=20°】
 実測=30.4℃
 赤外線観測=27.2~28.8℃
 ●赤外線観測の水温は、実測より1.6~3.2℃低い。

【撮影角度=5°】
 実測=30.0℃
 赤外線観測=25.5~27.5℃
 ●赤外線観測の水温は、実測より2.5~5.0℃ほど低い。
 ※低角になると、距離による入射角の差が大きく影響するため、手前側が高温に観測される。

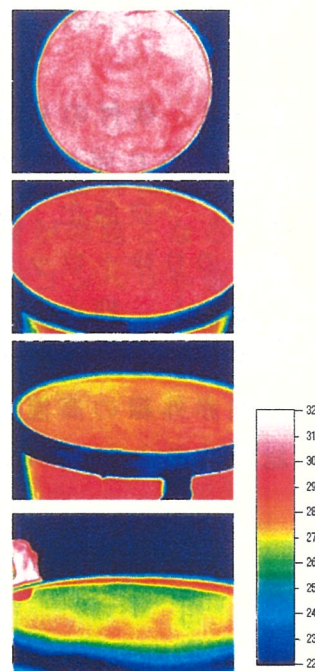


図5. 撮影角度と表示水温の関係

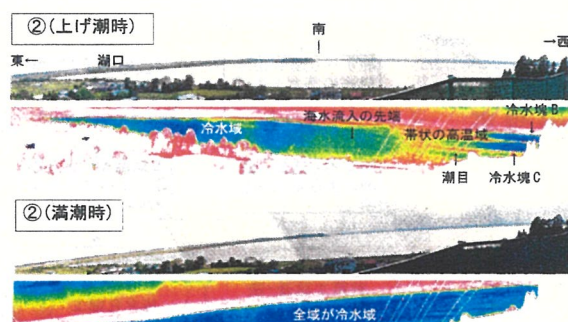


図6. 湖水面可視及び熱画像例1
 [温度範囲15~20℃]

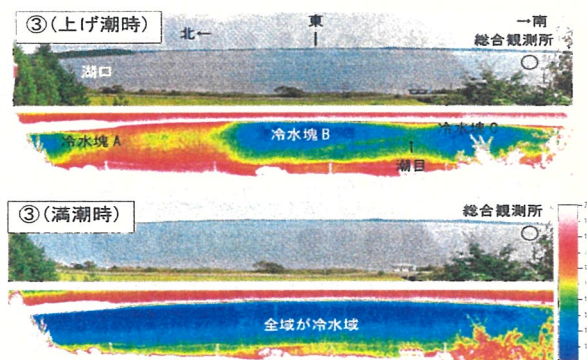


図7. 湖水面可視及び熱画像例2
 [温度範囲15~20℃]

空洞部（コア抜き掘削水が多量に流入）を検出した。（図-3）

2-2. 吹付のり面評価法

吹付のり面の補修工は、一般に、「モルタルの顕著な劣化部：はつり+再吹付け工」、「空洞化：鉄筋挿入工、セメントミルク注入」、「経年風化による緩み帯の形成：のり枠+ロックボルト（+アンカー工）」が選定される¹⁾。

しかし、抑止工の採用は30年余おおむね安定を保っていたのり面に対して必要抑止力を想定する必要がある、管理者から厳密な安定性評価を求められる。

熱赤外線の高温度部あるいは低温度部パターンの特徴、背後地山特性（地山分類）を総合すると、図-8のような「熱画像による吹付のり面診断評価法」が提案される。

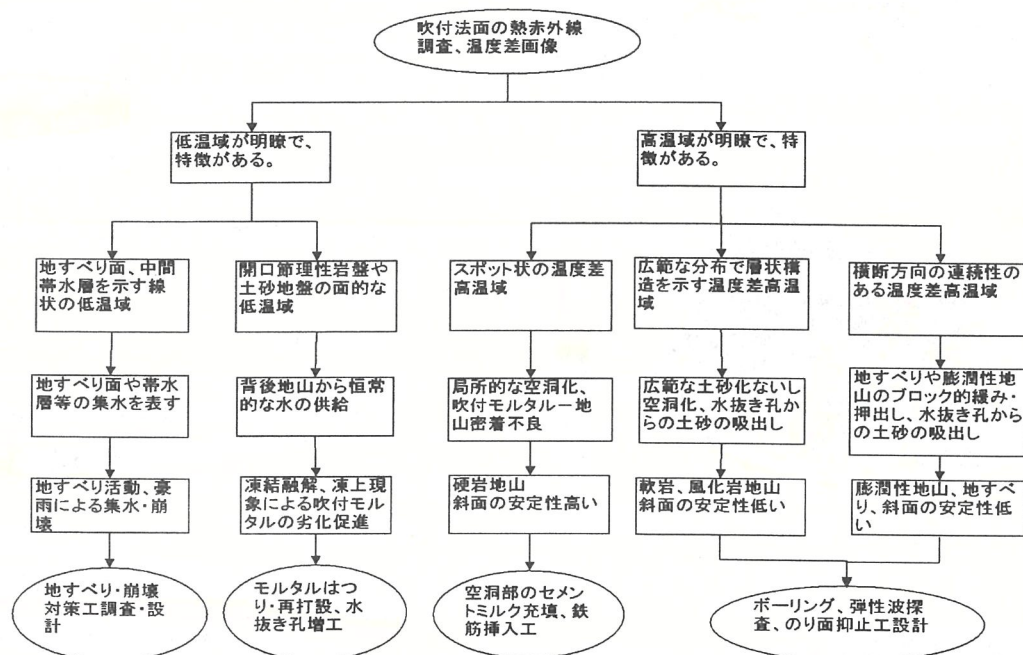


図-8. 熱画像による吹付のり面診断評価法

3. 被写体との撮影角度問題

汽水湖の水温分布傾向が塩水遡上流の分布推定に適用できるものとし、熱赤外線リモートセンシングを行った。撮影は湖面より比高 30m の丘陵で行うため、湖面とカメラ光軸の角度（撮影角度）が 5 度以下となる。

事前に室内実験により撮影角度 ANG(deg) と測定温度℃（温度計による実測水温 T_t と熱赤外線カメラ検出温度 T_m ）の関係を検討した（図-5）。実験結果より $(T_t - T_m) = -1.0 \ln(ANG) + 5.3 (\pm 0.8)$ の関係式が求められ、撮影角度が 5 度以下の条件では、熱赤外線カメラの指示する温度は実温度より 2.5~4.5℃ 以上低く、さらに近地点の水面と遠地点のそれでは指示温度に違いが生ずることが分かった。このため、沿岸部の温度と湖中央部の温度が同様でも熱画像では有意な温度差として表され、誤った解釈をする可能性がある。従って、熱画像による水面温度の不均質性認知は、同

じ撮影角度の箇所について適用性がある（図-6、図-7）。同様な留意は撮影角度の小さいのり面や構造物に対しても重要となる（図-4）。

4. 熱赤外線カメラ連続撮影の方法

道路、河川の線形で長い区間の被写体は、動画データの撮影及び自動画像解析が期待される。この場合、プラットホームの移動速度、位置、撮影経費が問題となる。プラットホームは有人ヘリコプターが確実であるが経費が高く、ラジコンヘリや気球式の高い制御機能、安全性をもつツールの開発が強く望まれる。画像処理による連続静止画像製を行う場合、移動速度は下記のように拘束される。

4-1. 熱赤外線カメラの視野

熱赤外線カメラ（表-1の機器）の視野は下表の通りである。

表-2. 熱赤外線装置の観測距離と視野の関係

観測距離	標準35mmレンズ視野
50m	V : 16m × H : 22m
100m	V : 33m × H : 45m
200m	V : 66m × H : 90m
300m	V : 99m × H : 135m

4-2. 熱赤外線連続撮影の適正速度

撮影対象の法面からの距離（道路中心線に直交方向）を L (m) とすると、視野幅 $H(L)$ は、式(1) で表される。

$$H(L) = 0.45 \times L \text{ (m)} \text{ ----- 式(1)}$$

いま、道路と平行に走るプラットホーム（自動車、ヘリコプター等）の速度を V とする。ここで、 $L=100$ m のとき、熱赤外線連続撮影装置は $1/30$ 秒で1コマの熱画像温度データを保存するため、各画面が $1/30$ 秒前のカメラ図枠と水平方向で $1/100$ ずれて撮影を行うことの出来る速度 V は次のように考えられる。

条件例：撮影距離 $L=100$ m の場合

$$V/30 \leq H(L)/100 \text{ ----- 式(2)}$$

$$V \leq 0.3 \times 0.45 \times 100 = 13.5 \text{ m/s (48.6 km/h)}$$

参考文献

- 1) 建設省土木研究所（現独立行政法人）：熱赤外線映像法による吹付けのり面老朽化診断マニュアル, 1996.
- 2) 藤原鉄朗・金本康宏：熱赤外線映像法による斜面調査、地すべり学会誌. Vol. 38, No. 1, pp9-13, 2001.

融雪期における地すべり地の地下水位変動と動態観測例

⑥

○(株)東開基礎コンサルタント 後村和貴
(有) ジオプランニング 今野隆彦

はじめに

東北地方の日本海側で発生する地すべりの再活動には、融雪期の地下水に関係するものが多い。

しかしながら、融雪期の地下水位の測定は容易ではなく、多くの時間と費用を要する。特に多雪地帯の山岳地では観測自体が困難なことが多い。山形県最上地方の地すべり調査の現場で、ボーリング孔のパイプひずみ計と、携帯用水位計による孔内水位観測などの動態観測を行う機会があり、実際に融雪期に動態観測を行った結果について報告する。

本報告では、既存の亜炭鉱の影響と思われる深い孔内水位が観測されたあと、融雪期の地すべりの再活動に伴って推定すべり面付近に孔内水位が観測された事例を紹介する。

1. 地すべり地の概要

本報告の対象の地すべり地は山形県新庄市に位置し、新庄盆地の東縁の丘陵地である。調査地付近には地すべり地形が指摘されており、地質的にも活断層の分布も指摘されている。調査地に分布するのは新第三紀鮮新世の本合海層川口部層と柴倉山層である。川口部層は夾炭砂岩泥岩互層から構成され、亜炭を挟む。この亜炭は以前調査地の近くで、稼行されたことがある。柴倉山層は浮石質凝灰岩からなる。層序表を表.1に示す。

調査地の地質構造は、地すべりブロックの中央をほぼ南北に切る断層を境に大きく異なる。すなわち、この断層の西側には泥岩・シルト岩と砂岩の互層を主とする川口部層の Dwm が N15w, 25w で西に傾斜して分布する。これに対し、断層より東側では軽石凝灰岩主体の Dwt, 細粒砂岩主体の Dws が分布し、N7~11E, 57W~63E を示し、急立している。

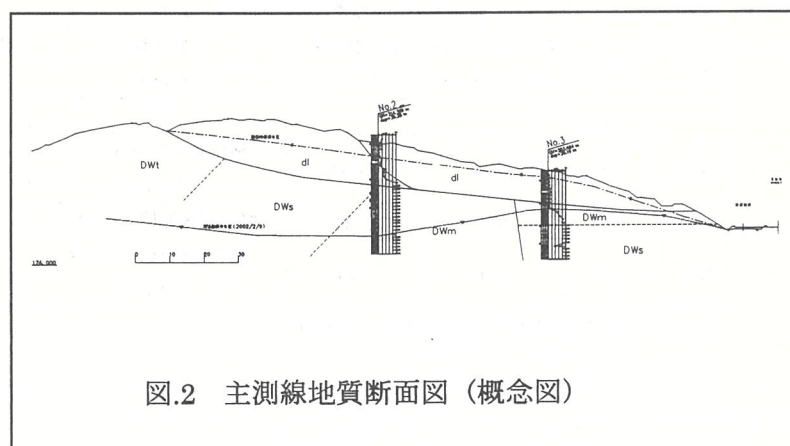
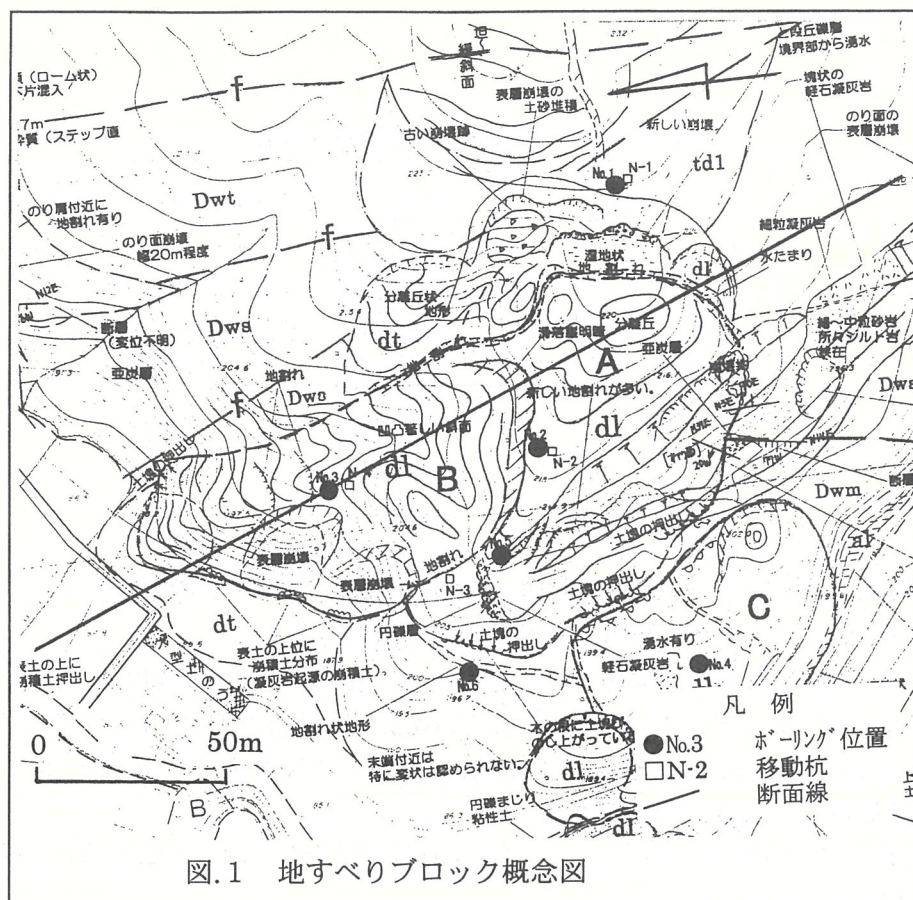
また、調査地の最も東側の断層では、相対的に西側上り、東側落の段丘を切る「活断層」も確認した。

したがって、地質構造的には、多数の南北性の断層が集合している地域であり複雑である。この断層の集中により、基盤岩の劣化、地下水の滞溜などがひきおこされ、地すべりの素因に深く関係しているものと推定される。(図.1, 図.2)

地すべりは道路の新設工事に伴う切土工事中に発生しており、移動土塊中の岩塊はスレーキングが著しく、ほとんど粘土化していた。

表.1 地質層序表

時 代	地層名	記号	N 値	記 事	
第 四 紀	完 新 世	地すべり 堆 積 物	dl	1～18	礫混じりシルト，粘土および粘土化した風化岩塊
		崖錐堆積物	dt	—	礫混じり粘性土，砂質土からなる。
		現河床堆積物	al		円礫，砂，シルトから構成され，新田川と支流に分布。
	更 新 世	段丘堆積物	td3,td4	5～20 (一部 50 以上)	砂混じり礫で，安山岩や凝灰岩の円礫を含む。標高 184～187m (t d3) ,177～181m (td4)
		盆地性堆積物	bd	—	td2 の上位に分布。砂層を夾在する軟質なローム，シルトで，未炭化木片も含む。
		段丘堆積物	td1,td2	5～20 (一部 50 以上)	礫混じり砂～シルトで，安山岩や凝灰岩の円礫を 30～40％含む。 標高 210～220m付近 (td1) ,195～196m付近 (td2)
新 第 三 紀	鮮 新 世	本合海層 川口部層	Dwm	風化部 20 以上 新鮮部 50 以上	泥岩，凝灰質シルト岩と砂岩の互層。亜炭を夾在する。砂岩は風化が進み褐色を呈することが多い。泥岩は新鮮な部分が多い。
			Dws	50 以上 (一部 風化部は 17, 34 を示す)	凝灰質砂岩を主とし，シルト岩，軽石凝灰岩を夾在する。
			Dwt	—	軽石凝灰岩を主とし凝灰岩，凝灰質砂岩を夾在する。



2. 動態観測の方法

動態観測は、ボーリング孔内に設置したパイプひずみ計、携帯用水位計による孔内水位の測定、移動杭の観測などである。観測位置は図.1 に示した。なお、融雪時の参考として現場近くの気象観測データ（仙台管区气象台「新庄」より）から気温（日最高、最低、平均）、積雪深を図にプロットした。パイプひずみ計は1方向2ゲージで、1mごとに設置し5～7日ごとに観測した。設置してから2週間程度たった時点で基準日とした。

ひずみの測定はひずみ測定器「BMD-200B」（共和電業製）を使用した。結果の整理は各深度ごとに基準日との差を計算して変動図を作成した。

孔内水位は、携帯用水位計により、有孔パイプ中の水位を測定した。No.2、No.4 孔では孔底を推定すべり面付近までとした別孔を設け同時に観測した。

移動杭は地すべり地内に設置した観測くいを地すべり地外から距離、方向角を計測した。

各観測地点の概要を表.2 に示す。

表.2 観測地点一覧表

地すべり ブロック	規模	パイプひずみ計、 孔内水位	移動標柱	備考
A	幅 110m、長さ 150m	No2, No3	N-2	No1, N-1 は A ブロック外
B	幅 60m、長さ 100m	No3	N-3, N-4	
C	幅 100m、長さ 60m	No4		

3. 観測結果

(1) パイプひずみ計観測

調査地の気象データでは調査地付近の融雪が明瞭になるのは平均気温が 0℃ 以上を継続的に示す 3 月はじめと考えられ、積雪深の減少傾向が明瞭である。

パイプひずみ計の観測は 2003 年 1 月～8 月（4 月から 6 月中旬は休止）まで行った。この結果を図.3 と表.3 に示す。パイプひずみ計は No2, No3 孔で 3 月 14 日からひずみが観測され、19 日には No2 の深度 13.0m のゲージで 9800 マイクロ、No3 の 9.0m のゲージで 7800 マイクロのひずみを観測している（図.3 参照）。

その後、平成 14 年度に横ボーリングにより排水工をおこなったところ、平成 15 年の融雪期には大きな動きは観測されていない。

表.3 パイプひずみ計観測結果一覧表

孔 No	基準日	最大ひずみの 深度 (GL-m)	最大ひずみ (マイクロ)	土質・地質 (N 値)	最大ひずみ の観測日
No1	3/5	-	-		
No2	2/8	13.0	9,864	風化凝灰質シルト岩 (N=13)	3/19
No3	2/15	9.0	7,799	軽石凝灰岩塊 (N=3)	3/17
No4	1/8	6.0	163	風化凝灰質シルト岩 (N=16)	3/19

注) No1 孔はひずみが 100 マイクロ未満なので省略した

(2) 孔内水位観測

孔内水位の観測は No1～No4 孔と NO2, No4 の別孔で行った。図.3 に各孔の水位変動を示す。この結果、融雪期には水位の上昇とともに興味深い現象が記録された。A ブロック内の No2 では 3/17 に GL-29.66m であった孔内水位が 3/23 には GL-5.36m と 24.3m 急上昇し、直近の No2 孔別孔の水位 GL-4.77m と約 0.6m の差まで近づいたのである。さらに、No3 孔では 3/17 に GL-14.11 m であった水位が 3/20 には GL-1.93m まで急上昇している。

この間にパイプひずみ計は約 7000～10000 マイクロのひずみを記録し、地すべり活動が活発化した。No3 では 3 月上旬に一時水位の低下傾向が認められたが、この原因は地下の岩盤の亀裂の開きなどによるものか不明である。

観測された最高、最低水位を表.4 にまとめて示す。

表4 最高・最低水位一覧表

孔No.	最高水位 (GL-m)	最高水位のある 地層	最低水位 (GL-m)	水位差 (m)	孔口標高 (m)
No1	2.06	地すべり堆積物 (礫混じりシルト)	3.45	1.39	227.80
No2	5.36	地すべり堆積物 (軽石凝灰岩塊)	30.15	24.79	214.31
No2(別孔)	4.35	地すべり堆積物 (軽石凝灰岩塊)	5.72	1.37	214.31
No3	1.93	地すべり堆積物 (礫混じりシルト)	14.11	12.18	203.40
No4	10.40	凝灰質砂岩	11.75	1.35	196.47
No4(別孔)	0.25	地すべり堆積物 (礫混じりシルト)	0.35	0.10	196.47

(3) 移動杭観測

移動杭の観測は2002年12/28から2003年3/19まで約10日おきに行った。最終的な結果は図.4に示す。また、移動量を表.5にまとめて示す。

A,Bブロック中のN-3,N-4の移動杭は地すべり主断面方向に移動の方向がほぼ一致するが、最大の移動量39.5cmを示すN-2は道路工事による切土のり面直交方向への動きを示している。表層の移動土塊に設置した観測杭であり、一部の表層の動きを反映したものと考えられる。

表.5 標柱観測結果一覧表

標柱 No	ブロック	移動量 (cm) (設置点からの合成量)	地すべりとの関係
N-1	地すべり地外	5.8	
N-2	A	39.5	道路切土のり面直交方向
N-3	B	14.7	主測線方向とほぼ一致
N-4	B	26.5	主測線方向とほぼ一致

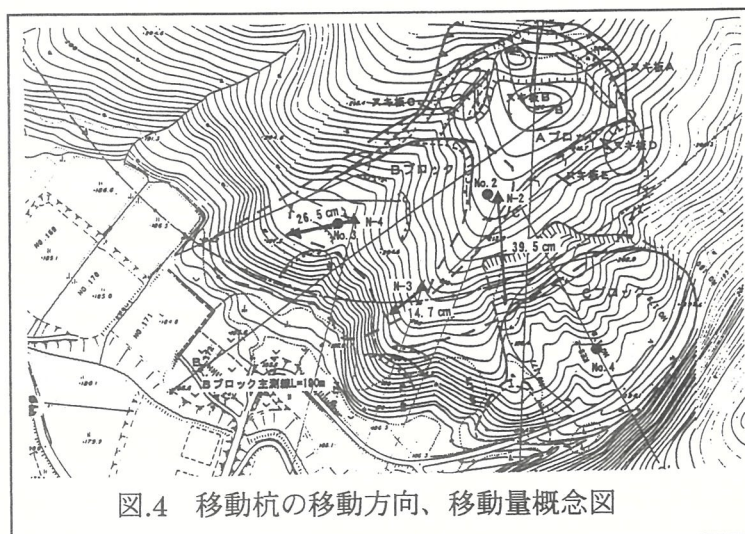


図.4 移動杭の移動方向、移動量概念図

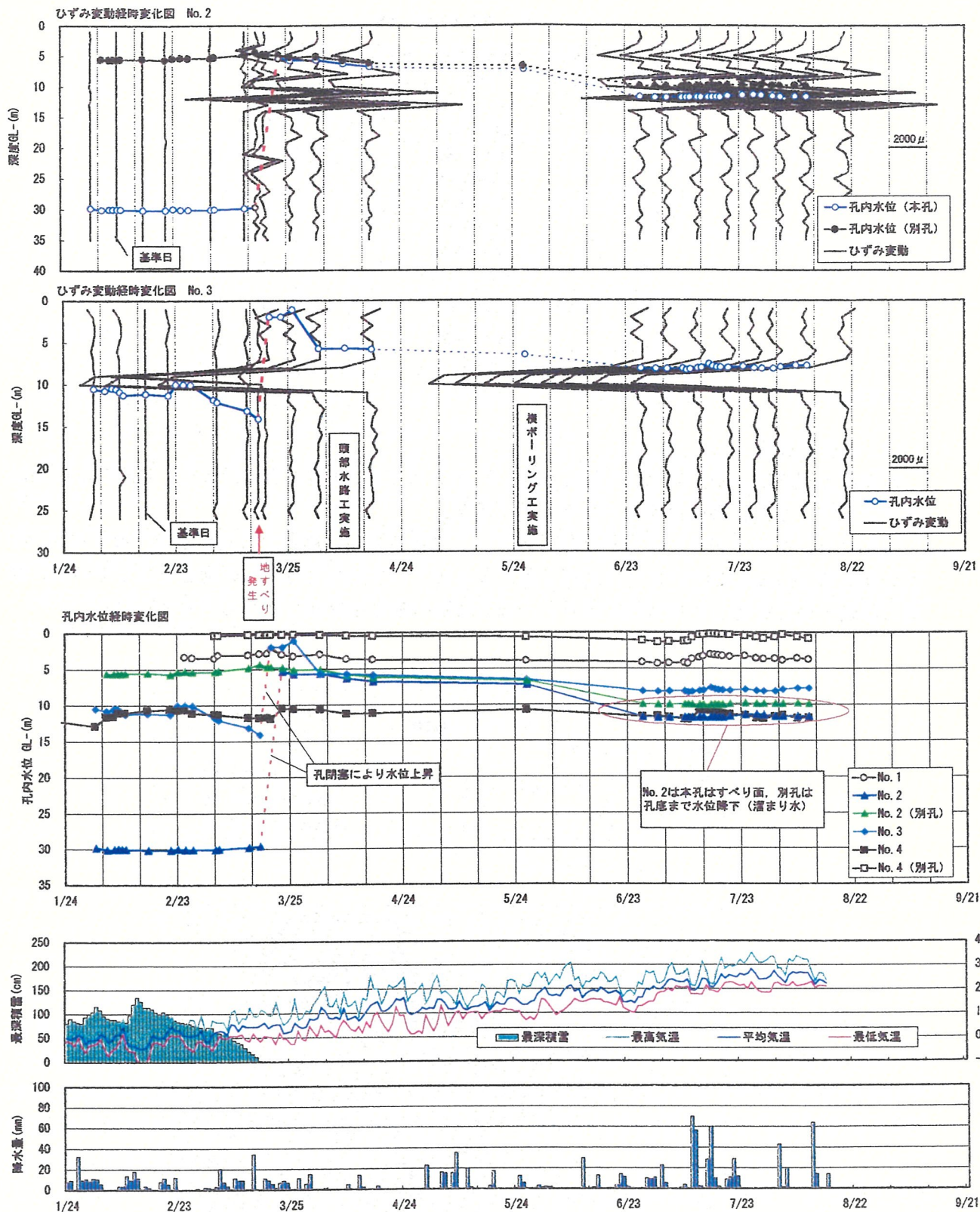


図. 3 ひずみ変動・孔内水位観測結果一覧図

4. まとめ

調査地の地すべりは踏査の結果、過去に何度かのすべりを引き起こしており、古い滑落崖がそのまま再活動していたことがわかった。南北性の断層が多数存在し、地質構造が複雑であり、地下水もこれに伴って複雑な分布をするものと考えられる。さらに、かつて亜炭を採掘した炭鉱が近くにあると伝えられているがその詳しい分布は不明であり、異常に低い（付近の段丘面と同レベル）孔内水位はこの影響があると推定される。

しかし、今回のようにやや詳しい観測を行うことで融雪期の地すべりの再活動を的確に捉えることができ、水位の上昇が地すべり活動に密接に関係していることを証明できる。現場で調査中には、ボーリング、パイプひずみ計の設置、水位の測定など様々な仕事があり、データの量、質についてあとで反省することが多いが、今回のようにボーリングの孔内水位が推定すべり面に対して異常に低い時には、別孔を推定すべり面付近に設置して水位観測をすることが有効な手段の一つと考えられる。

本地すべりは、対策工として頭部排土、横ボーリングによる地下水排除工を提案し、道路の計画はルートを迂回させることを提案した。現在、横ボーリングと滑落崖直下の水路工を行って融雪期を越したところである。パイプひずみ計では昨年とほぼ同様の値が観測され、再活動の兆候は認められていない。今後、道路の建設と同時に地すべり対策工が進められることを期待している。

参考文献

北村 信 編 (1986) : 新生代東北本州弧地質資料集 島弧横断ルート No21

地すべり学会東北支部 (1992) : 東北の地すべり・地すべり地形 1/20 万地すべり地形分布図 14

風化花崗岩における地下水開発について(千厩地域)

⑦

○荒川雅樹・加藤彰(㈱テクノ長谷)
椎名義徳・森一司(東北農政局)

1. はじめに

農林水産省では、地下水確保が困難な中山間地域における地下水開発手法を確立するため、平成元年度よりモデル地区を選定し地下水調査を行っている。本論文では、全国で7箇所目のモデル地区となる「北上山地南部地区」で、精査エリアとして選定した千厩地域において、風化花崗岩を対象に行った地下水開発調査の中からVLF電磁探査の有効性と、今回試掘したテストボーリングの結果を紹介する。

2. 調査地の概要

千厩地域は、北上山地の南部にあり、全国でも有数の花崗岩分布地帯である(図-1)。本地域に分布する花崗岩類は、風化が進んでマサ化し、新鮮部はほとんど残ってない状況にあり、標高150~200mの準平原を形成している。地域東部には基岩を構成する中生層(ホルンフェルス)が分布し、花崗岩に比べ風化の程度は弱く相対的に急傾斜で尾根を形成している。

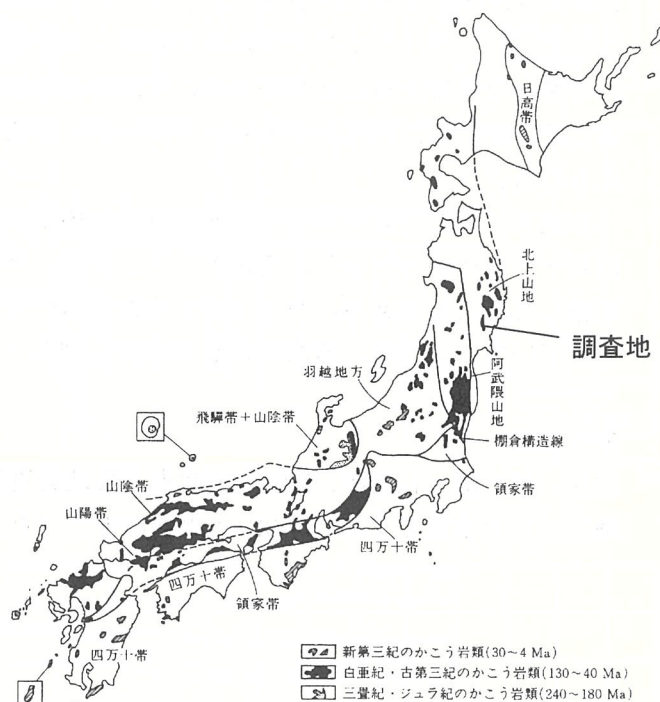


図-1 調査位置および日本列島の花崗岩の分布

(久城ほか,1989¹⁾)

3. 地下水開発方針

花崗岩や中生層の地下水開発では、風化部の層状水を対象とした浅層地下水の開発と、断層・破碎帯から裂か水を狙った深層地下水の開発に二分されるが、裂か水については高透水性ゾーンが期待できるような新しい活構造は当地においては望めない。このため、地下水開発の方針として、風化の進んだ花崗岩類を取水対象とし、風化層が地下水の容器になると考え、より深部まで風化の及んでいる場所が地下水を多く賦存しているものと仮定し調査を開始した。

4. 調査方法

花崗岩では、大局的に地表から深くなるにつれて順次未風化部へと移行するため、表層部が風化しているものほど、風化深度が深くなると想定し、土壌硬度計・ピック貫入試験・簡易貫入試験・簡易弾性波探査・マンボーン・表面波探査・現場透水試験・VLF電磁探査等の種々の測定を実施した(前田ほか, 2003²⁾)。

この結果、比較的簡易な手法であるVLF電磁探査が風化度の指標として有効で、また、花崗岩の風化層を取水対象とした既設井戸の揚水量とも相関がとれることを確認した。言い換えれば、花崗岩の浅層地下水開発では、風化深度が深いほど取水量が期待できることがわかった。

5. VLF電磁探査による比抵抗と岩級区分

図-2 は、調査地内 37 箇所の花崗岩露頭においてVLF電磁探査により測定した比抵抗値と岩級区分との相関を表したものである。ここで岩級区分は、山中式土壤硬度計により27mm 未満をDL級、28mm 以上 32mm 未満をDH級、32mm 以上をCL級とし、CH級については、土壤硬度計では測定できないため便宜上 40mm 以上としている。図-2 では、比抵抗値が小さくなる程風化の進んでいる相関が読み取れる。ただし、バラツキがあり、コアストーンが存在と表層の緩みが原因と考え、これらを取り除いた 28 箇所の測定値で作成したものが図-3 である。図-3 では値が整然として良い相関が現れ、コアストーンの有無等周辺露頭の状態を加味すれば、精度良く風化度の指標として利用できること示している。

6. VLF電磁探査による比抵抗と井戸の揚水量・比湧水量と地下水位

図-4 は、千厩町で開発した井戸 10 箇所に、今回施工した 3 箇所の井戸、計 13 箇所において測定したVLF電磁探査の比抵抗と揚水量・比湧水量の関係を示したものである。ここで、グラフに利用した井戸は、何れも口径は 100mm 以上で、花崗岩の風化層を主な取水対象としている。

図-4 から、比抵抗が小さくなるほど揚水量と比湧水量、ともに増加する傾向にあり、風化の進行している箇所ほど取水能力が増していることがわかる。この結果は、今回の調査で仮定した”風化層が厚い場所＝地下水を多く賦存する”ことを裏付けるものである。なお、井戸の揚水量は 100 l/min 未満が大部分であり地下水開発が難しい地域といえる。

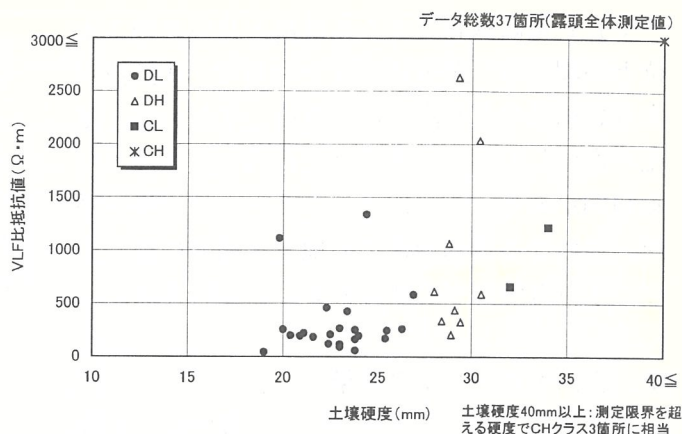


図-2 比抵抗と岩級区分(露頭全体)

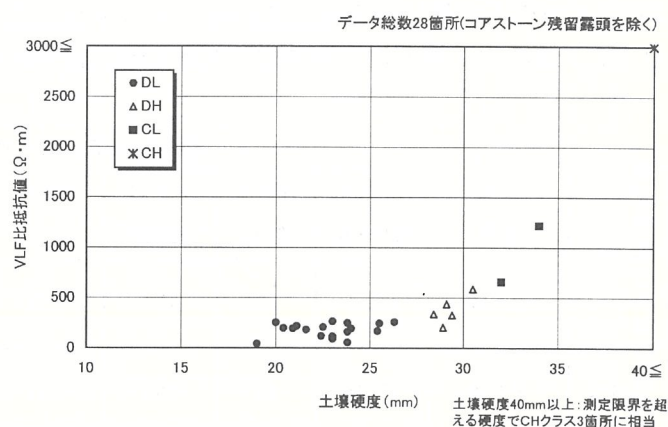


図-3 比抵抗と岩級区分
(コアストーン残留露頭・表層緩み露頭を除く)

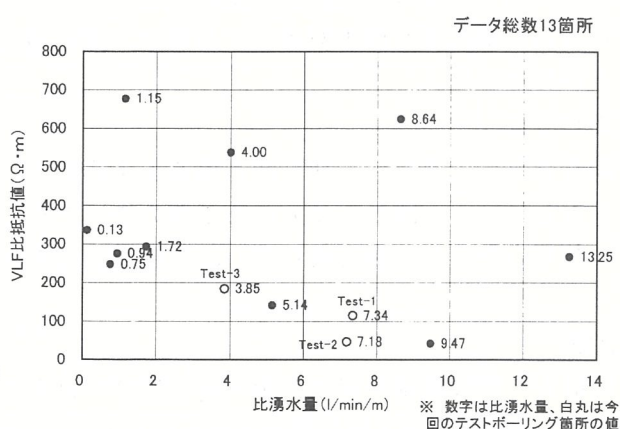
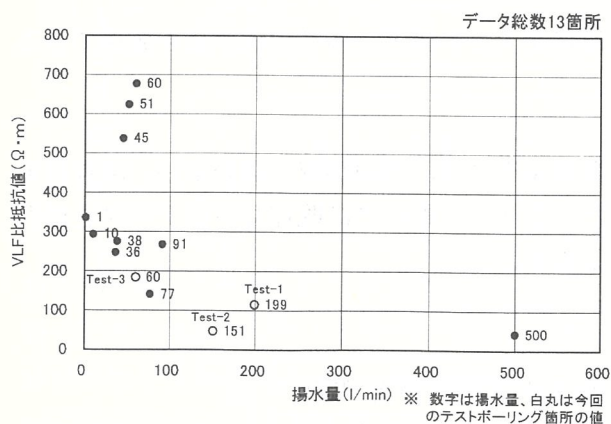


図-4 比抵抗と井戸の揚水量と比湧水量

V L F 電磁探査による比抵抗と井戸の地下水位との関係は、図-5 に示すとおりで、比抵抗が大きい箇所ほど孔内水位は浅い、すなわち、風化の進行していない箇所ほど孔内水位は浅くなる傾向がある。これにより、孔内水位の浅い箇所、いわゆる湧水地帯での地下水開発に際しては、十分な吟味が必要であることがいえる。

7. テストボーリング結果

今回施工したテストボーリング箇所は、3 箇所、どれも V L F 電磁探査による比抵抗は

200 $\Omega \cdot m$ 以下の低い値を示している。テストボーリングの諸元および結果は、表-1・図-6 に示すとおりで、3 箇所中 2 箇所については、150 l/min 以上の取水に成功した。

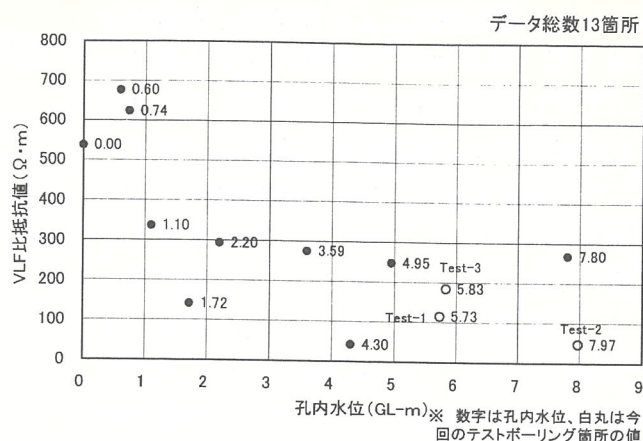


表-1 テストボーリングの諸元

井戸 No.	立地 条件	VLF 比抵抗 $\Omega \cdot m$	井戸深 度 m	井戸口 径 mm	地下水 位 m	揚水量 l/min (揚水時間)	水位降 下量 m	限界揚水 量 l/min	周辺井戸 の状況
Test-1	丘陵	115.1	55	150	5.73	200 (7 時間)	27.13	230 以上	ボ-リング井戸が大部分。
Test-2	平坦地	47.28	45	200	7.97	150 (7 時間)	21.04	200	浅井戸が大部分。
Test-3	山地の裾部	184.3	45	150	5.83	60 (7 時間)	15.60	90	浅井戸が大部分。湧水地帯。

※ T-1 および T-3 は事前に $\phi 66mm$ オールコアリングを実施。

8. まとめ

花崗岩分布地域での地下水開発に際し、V L F 電磁探査結果を基に検討した結果、次のことがわかった。

- ① V L F 電磁探査による比抵抗は、風化程度、すなわち岩質と相関があり、コアストーンの影響や斜面の緩み具合など地質状態を加味することにより、精度の良いデータが得られることがわかった。
- ② 花崗岩の風化層の相対的な厚さは、表層の風化程度から推定することができ、V L F 探査によって推定可能であることがわかった。
- ③ 花崗岩の風化部を取水対象とする場合、風化層の厚さが大きいほど、多くの取水量を確保できることがわかった。

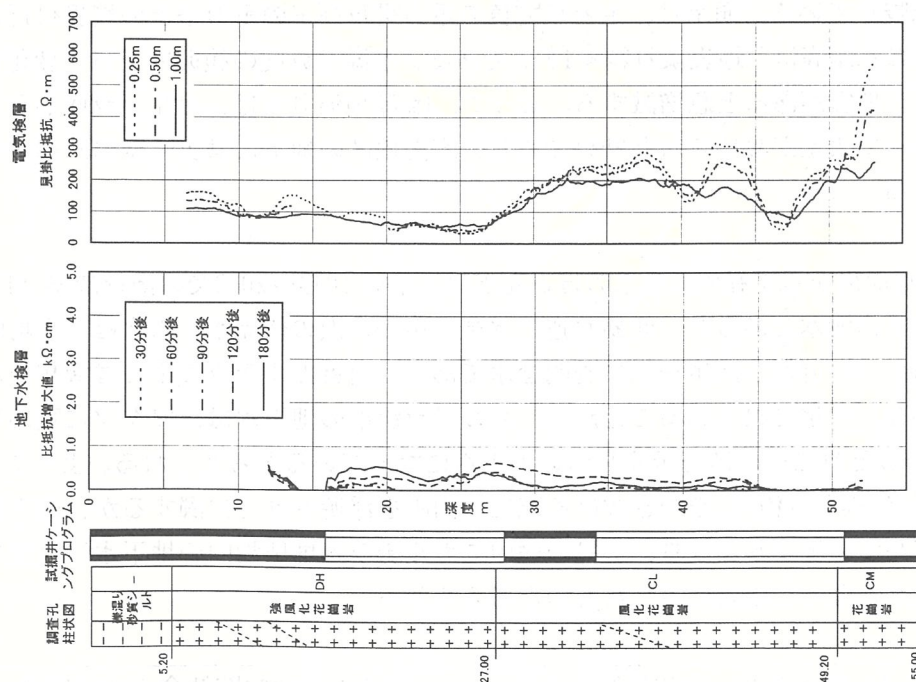
9. おわりに

本調査を行うにあたり、独立法人農業工学研究所の関係諸氏には、現地調査、調査手法、調査結果のとりまとめなどに関して多大なるご協力をいただいた。また、千厩町には既存井戸のデータを提供していただいた。この場を借りて心より感謝の意を表します。

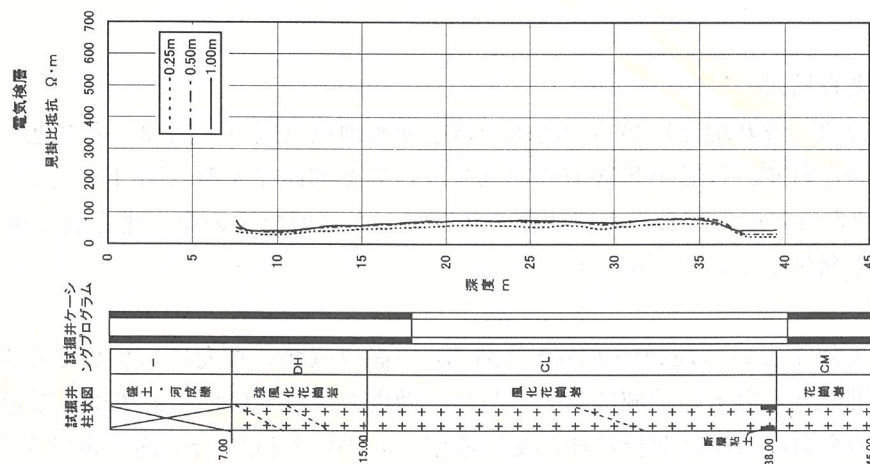
引用文献

- 1) 久城郁夫・荒牧重雄・青木 謙一郎(1989)「日本の火成岩」：岩波書店, 206p.
- 2) 前田修吾・荒川雅樹・椎名義徳・森一司(2003) 花崗岩の風化度調査手法について：日本応用地質学会東北支部第 10 回研究発表講演集, pp31-36.

Test-1 揚水量 200 l/min



Test-2 揚水量 150 l/min



Test-3 揚水量 60 l/min

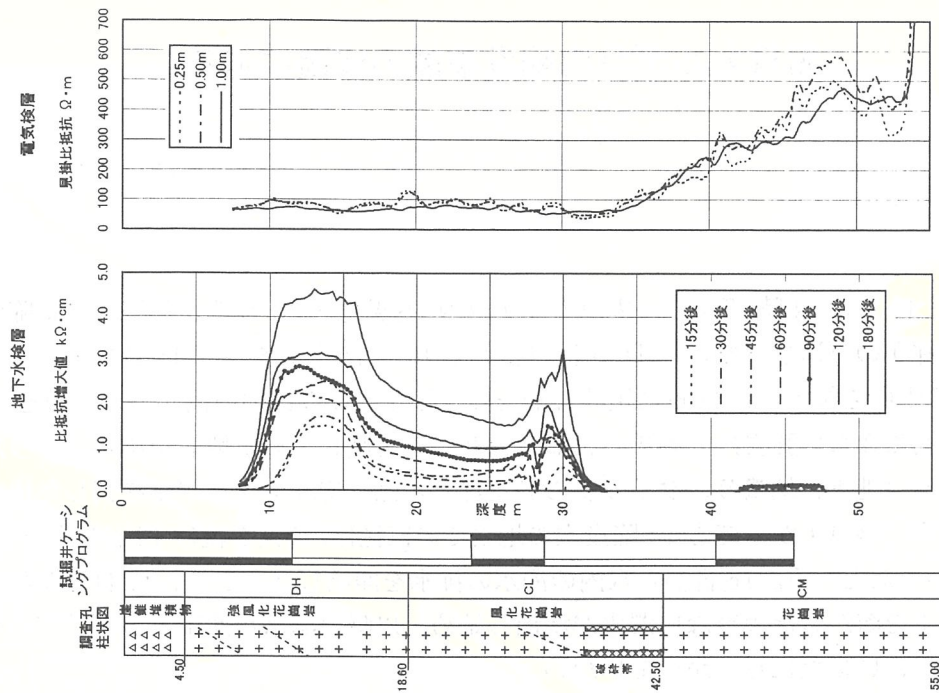


図-6 テストボーリングの井戸構造および検層結果

鬼首カルデラ内陥没事故の成因に迫る

⑧

○大村 一夫¹⁾・清野 茂²⁾

はじめに

平成13年7月12日の14時、突然に、鬼首カルデラ内(寒湯地区)の高橋正伸宅前庭に陥没が生じ、小型乗用車、電柱がのみ込まれた。19日から、陥没穴内に、11トンドンプ15台分の玉石と、4トンドンプ50台分の土砂を投入し、23日に現状復帰を完了した。陥没は強い雨がトタン板をたたくような音(人の声が聞こえない強さ)で始まり、轟音と共に車を載せたまま地面が沈んでいったという。陥没に先立つ地変(地震、地鳴り、クラックの発生など)は一切なく、車が姿を消した後、茶色に濁った地下水が穴内に盛り上がってきた。陥没穴の地表での直径は、拡大を続け18日になって、径11m、深さ7mで落ちついたという。16日から穴内の濁水の排水を開始したところ、17日になり茶色の濁水に代わって、白土を溶かしたような白濁水が湧出し始め、以降白濁水が湧出しつづけている。自動車は数分で姿を消し、いまだに見つかっていない。

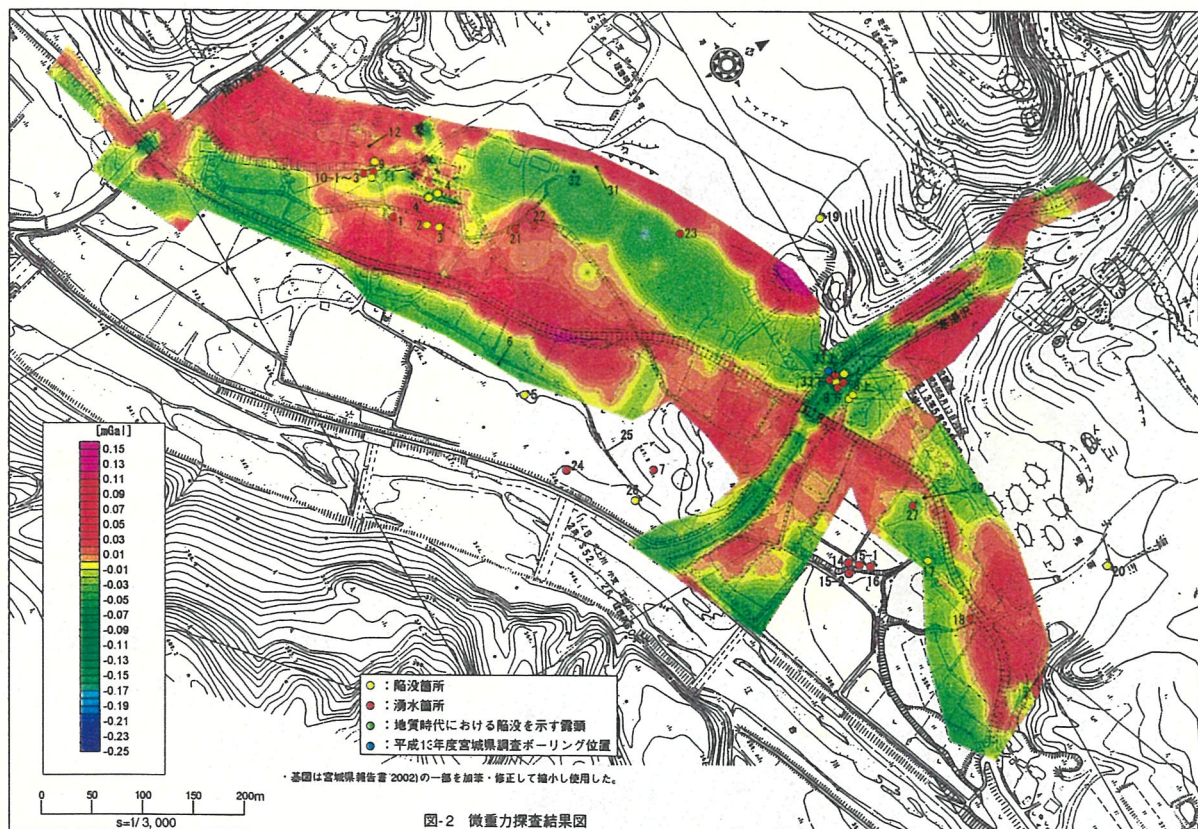
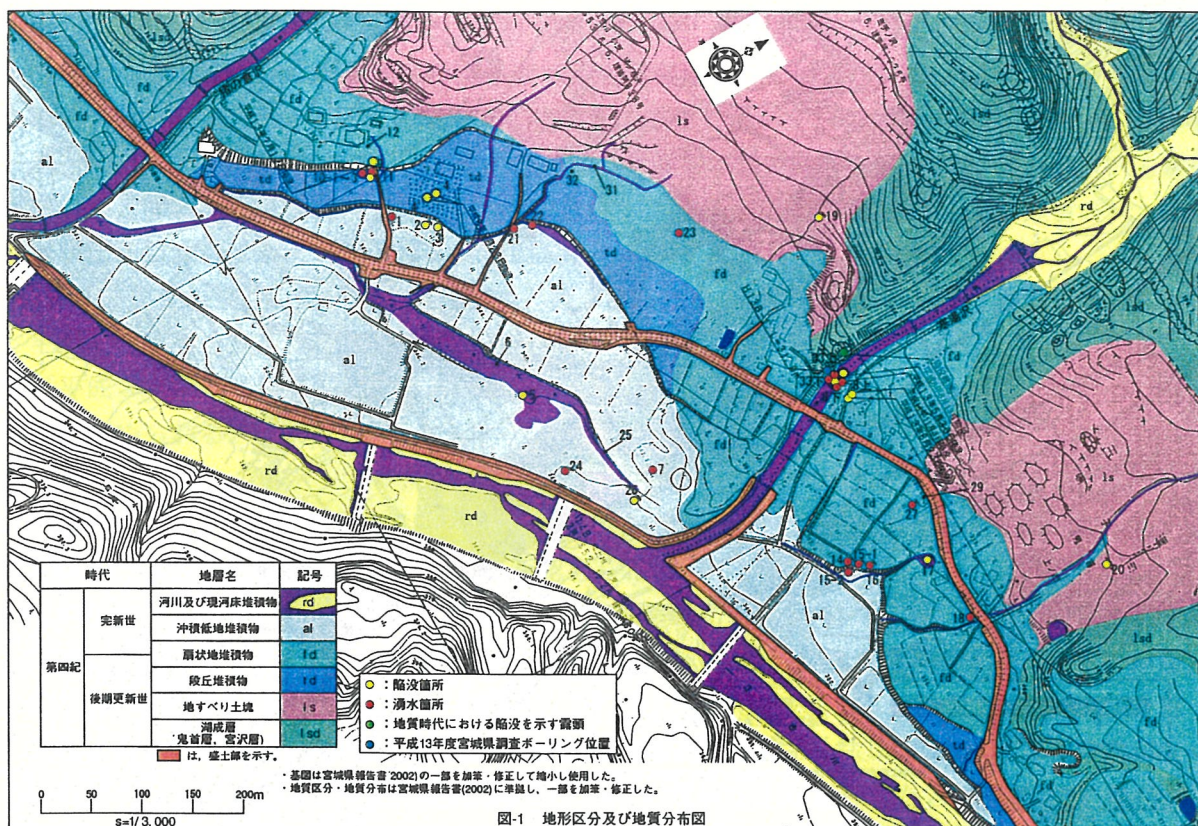
1. 調査結果

1) 湧水についての調査結果

- a. 陥没穴(図-1~図-3 黄丸地点)からの湧水を含む湧水地点(図-1~図-3 赤丸地点)は、地形面や段丘崖に規制されず、NE-SW方向の列をなして2列存在する(図-1)。また、これらの湧水地点は、2列の負の重力帯の円の縁辺部や小ブロック状態で正の重力帯と負の重力帯が入り交じる部分に集中発生している(図-2)。
- b. 1m深地温温度4℃以下という地域が広がる(図-3)雪融け直後の春先にもかかわらず、湧水のほとんどは、1m深地温5℃以上の地域に認められた。微重力探査の負の重力帯は、県道の北と南に合せて2帯認められ江合川に並行に伸びているが、北の帯は5℃以下、南の帯は5℃以上の地温を示している。これらを分かつ正の重力帯は、負の重力帯上に薄層の密度の大きな地質が分布することを示唆している。湧水は、主として負の重力帯及び正の重力帯との境界付近に湧出しており、各湧水の水頭高は、地表より精々10cmである。水温は数度の範囲内で日々変化し、湧出量も日々変化し、地震があると急増減する。よって、1m深地温分布は、カルデラ底から上昇してきた微温水によって表土が暖められた結果であり、寒湯地区の地下には広く微温水塊が潜在していると考えられる。
- c. 地表水が5℃前後を示す春先、湧水のほとんどは、水温10℃~20℃で、溶存酸素(DO)が1mg/l未満を示す白濁水であった。簡易水道(水源は猪の倉沢の伏流水)の水は、平均的な地表水のDO値12mg/lに近似した値を示す透明な水である。鬼首カルデラの下には液相を示す物質(マグマ)の存在が推定されていることから、カルデラ深部の地下水は、マグマに暖められ、DOが0mg/lないしそれに近い値を示す高温の地下水になっていると考えられる。よって、湧水は白色細粒火山灰(“みがき粉”)をつき抜ける際に火山灰を浮遊させて白濁するが、雨水がカルデラ深部に達して高温の地下水となり、上昇の途中でカルデラ内堆積物内の地下水に温度をうばわれながら、微温水となって地表に達したものと考えられる。

1) 株式会社 大和地質研究所

2) 東北大学大学院社会人大学院生



陥没穴・湧水地点位置図

図-1 (上図) : 地形との関係

図-2 (下図) : 微重力探査結果との関係

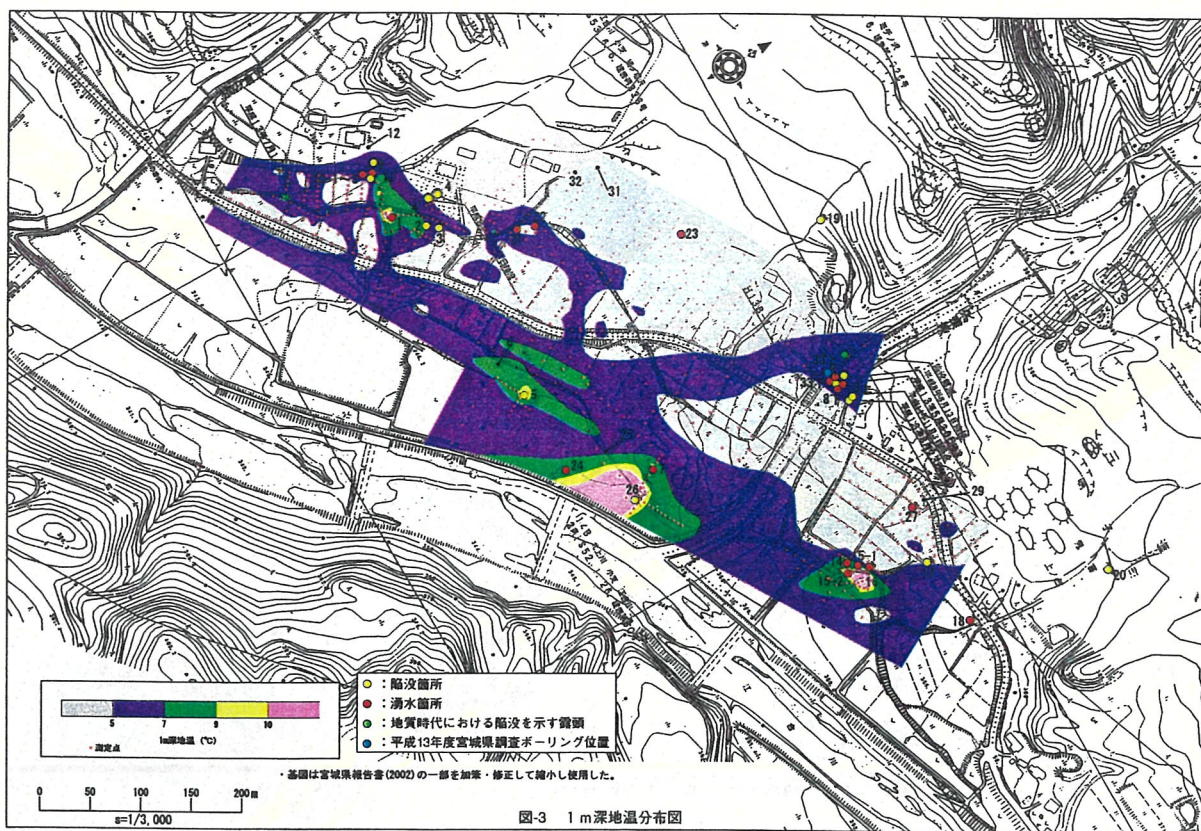


図-3：陥没穴・湧水地点と地温（1m 深地温）との関係

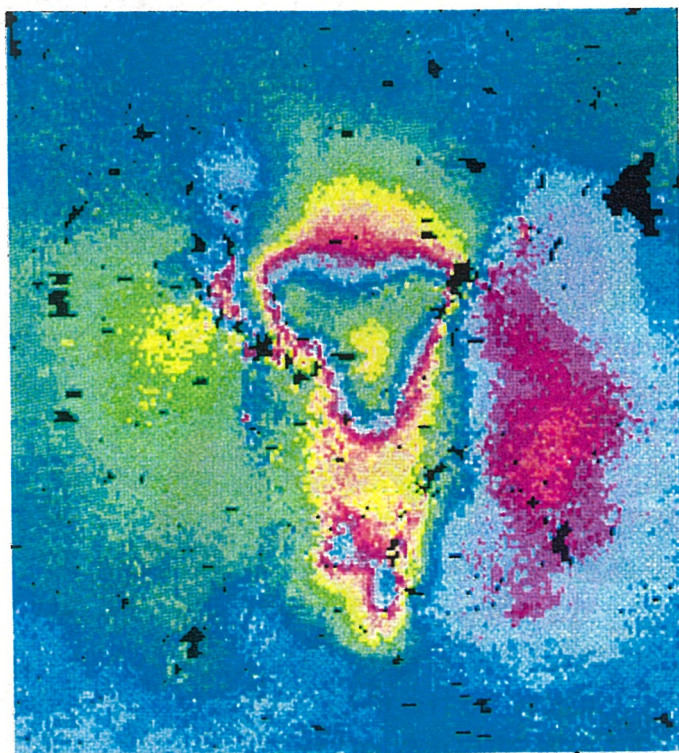


図-4：1996 年、鬼首付近に発生した地震の合成開口レーダー干渉画像解析結果（1992.10.15、1998.5.1 の合成開口レーダー写真による）
矢来・飛田（2003）

2) 陥没穴発生時期についての調査結果

a. 陥没穴の発生時期は、「地質時代」、「約 30 年前以前」、「平成 8 年以降」に 3 分できる。

「地質時代」の陥没は寒湯地区林道法面で 1 箇所発見されているが、同一場所に陥没が 4 回くり返して発生しており、4 回目の陥没穴の寒湯沢川床部において、白濁水が湧出しているのが平成 14 年 11 月 23 日確認されている。この場所は、平成 8 年以降陥没がくり返し発生している寒湯沢堰堤直近であり、陥没は同一場所に発生しやすいことを示唆している。なお、「地質時代」の寒湯沢川床底は現在よりも約 20m 高い位置にあったと考えられる。

「約 30 年前以前」の陥没は 7 箇所あり、内 3 箇所は県道の南側に、2 箇所は高橋 学・高橋正伸宅前に、残る 2 箇所は地すべり土塊分布地内に認められる。

「平成 8 年以降」の陥没は寒湯沢堰堤直下及び直近に 4 箇所、高橋 学・高橋正伸宅の直近に 3 箇所認められる。

b. 陥没穴の発生日は、「平成 8 年以降」のもののみで知られている。5 月末～9 月末に発生したのが 6 箇所、11 月初めに発生したのが 1 箇所認められる。

これらの内、1996 年（平成 8 年）8 月 13 日（寒湯沢）、9 月 23 日（高橋 学宅）に発生した陥没では、鬼首で発生した 8 月 11 日の M5.9、M5.7 の地震と 8 月 13 日に発生した M4.9 の地震及びこれらの地震の余震が関与していると考えられる。しかし、2001 年（平成 13 年）5 月 30 日（寒湯沢）、7 月 12 日（高橋正伸宅）、8 月 23 日（寒湯沢）の陥没については直接対応する地震がなく、2002 年（平成 14 年）11 月 3 日の陥没は鳴子町での震度 3.1 を記録した宮城県沖地震（M6.2）のゆれによって、平成 13 年 8 月 23 日の陥没地の埋戻し場所が再陥没したものである。

c. 「約 30 年前以降、平成 8 年以前」では、宮城県内を激しくゆすぶった地震として昭和 39 年の新潟地震や昭和 53 年の宮城県沖地震などが知られているが、寒湯地区では陥没は発生していない。これは、この期間、寒湯地区の地下は、陥没が発生しにくい状況にあったことを示唆していると考ええる。

3) 鬼首カルデラ内地震の特徴と地震動がカルデラ内堆積物に与える影響

a. 地元の方は、寒湯地区は、地鳴りがすごく、地震の数も多く、地震の巣と言っても良い状況にあるとしているが、それらの地震はカルデラ外では感知されないことが多かったという。

東北大資料では、平成 8 年 8 月 11 日の M5.7 の地震は、寒湯地区直下の右横ずれの地震断層（NE-SW 方向に伸びる）の活動によって生じたとされている。昭和 61 年に左横ずれの地震断層（NW-SE 方向に伸びる）の活動によって、カルデラ内に発生した M5.3 の地震と組み合わせると、両地震断層はカルデラ内に開く、逆 L 字型に配列していることになる。地震が発生すると、両断層に沿ってカルデラ側が引張り場となりカルデラ内側が沈降、カルデラ壁側（外側）は圧縮場となり、寒湯地区の北東の芦沢上流（右横ずれ断層の北東端部）を中心とした隆起が生ずると推定できる。

b. 寒湯地区の地下の多孔質・未固結～弱固結の火砕物からなる堆積物（カルデラ内堆積物）中には、右横ずれの地震断層によって粉碎された軽石凝灰岩を主とする破砕帯が複数併走していると推定できる。この破砕帯中には多くの「水の溜り（空洞）」が形成されている可能性が高い。

また、カルデラ外に生ずる地震は逆断層型であり、地震断層ののびの方向も一定していない。これらの地震によってカルデラ内堆積物はゆすぶられ、カルデラ内堆積物中の軽石片を主体とする破砕物質も「水の溜り」と共に激しくゆさぶられるため、「水の溜り」は複雑にからみ合い連続してカルデラ底まで深く伸びてゆくことが想定される。

- c. カルデラ内の深部まで滲透した雨水は、D Oを消費し地熱で温水となる。カルデラ底深くまで伸びていった破碎帯中の「水溜り」の列が、この温水にまで達すると、マグマに暖められて体積を増し比重が小さくなった温水は「水溜り」の列を伝って、滲透に要した時間に比すると、極めて短い時間で、地表まで達すると考えられる。この間、途中の地下水とは比重が異なるので混合しにくく、D Oが付加されることもなく、熱のみが吸収される。よって、上昇スピードや水量に応じて地表に達するまでにほとんどの温水は温度を下げ、微温水化すると考えられる。
- d. 横ずれ断層に屈曲が生ずると、断層の活動によって屈曲部分には、屈曲の形状の違いによって、引張りによる開口・沈下（図-5）あるいは圧縮による隆起が生ずる。高橋正伸・高橋 学宅付近と寒湯沢堰堤の2箇所では、古くより、くり返し陥没が生じているのは、現在の右横ずれ断層の地表近くの現れが、この2地点を結んだ線上にあり、この2地点が引張り領域となって、地震動によって開口・沈下を生じる部分になるため、地中の「水溜り」部分が拡大されやすい。「水溜り」が拡大されると一時的な真空の空間が形成され、この空間の天井部分（地表部分）を形成する白色細粒火山灰を吸い込み、陥没が発生すると考えられる。

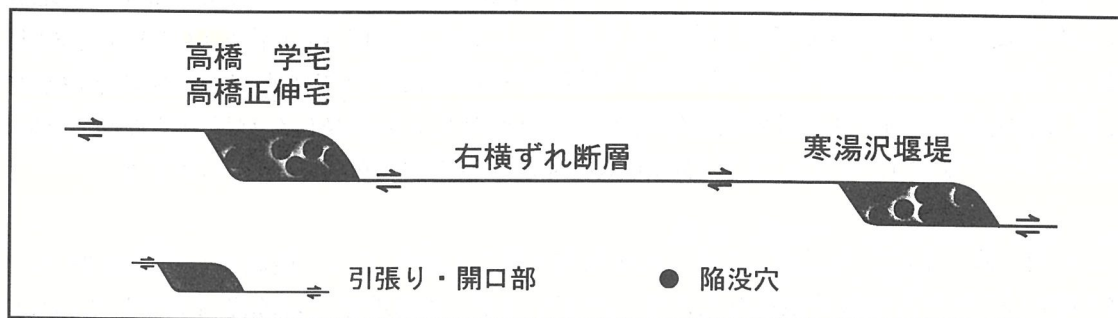


図-5：右横ずれ断層の屈曲部分に生ずる引張り・開口部の模式図

4) 開口レーダー干渉画像解析結果

矢来・飛田（2003）は、1996年8月11日と同年8月13日に鬼首で発生した地震の前後（1992年10月15日と1998年5月1日）の合成開口レーダー写真の干渉画像解析を行った（図-4）。その結果は以下のように要約できる。

- a. 1992年10月15日以前及び1998年5月1日以降では震源域に明瞭な変位は表れていないが、それらの間に於いては震源域及び震源域の西側では衛星に近づく向きの変位（隆起）があり、変位量は最大16 cmと推定される。震源域の東側では衛星から遠ざかる向きの変位（沈下）がある。
- b. 震源域南部の地震発生領域外に、衛星に近づく向きの変位（隆起）が認められるが、この変動域には地震は発生していない（非地震性の変動）。しかし、地震による地すべりや液状化によるものの可能性は低いと考えられる。

5) 国土地理院発行の旧版地図による変位地形及び地盤変動の解析

鬼首カルデラ内の寒湯地区は、5万分の1地形図「秋ノ宮」に載っている。この図幅の旧版地図を表-1に示す。

a. 大正 2 年測図から昭和 26 年応修までは、沖積低地の開墾が進んだ他は、地形改変はほとんどなく、寒湯沢下流、杉の森沢下流、仙北沢下流及び軍沢下流などの形状は、寒湯地区を通る右横ずれの「活断層」やこれに併走する右横ずれ「活断層」の存在を示唆する河川の系統的屈曲状態を示している。これらの「変位地形」は昭和 43 年編集の旧版地図では河川改修や道路整備で改変され、消失している。旧版地図（大正 2 年測図）と旧版地図上の「変位地形」を拾い、平成 10 年要修上の地形的特徴と、高橋 学・高橋正伸宅と寒湯沢堰堤を結んだ線（地震断層）とから選び出した右横ずれ「リニアメント」を図-6 に示した。

b. 江合川は、昭和 43 年編集から平成 10 年要修までの間で、まず蛇行が大きくなり、次いで両岸を護岸壁で規制されたが、時代が若くなるに従い北へ北へと寄っているのが分かる。これは、寒湯沢-杉の森沢にかけての沖積低地に北へ沈む沈下が生じ、江合川が沈下の中心部分に向けて移動していったことを示唆している。

c. 寒湯沢下流・猪の倉沢下流（いずれも県道の南側）は、昭和 43 年編集以降に、江合川との合流点を約 500m 下流に移し、川筋を変えろという改修と、上流から直線状に流下して江合川へ注ぐ分水路の川床の盤下げと護岸壁の新設が順次行われてきている。これは、寒湯沢・猪の倉沢の下流部分に隆起が生じ、沢水がうまく流れなくなったため、隆起部の南翼に沿って河川を移動させたことを示唆している。

d. 寒湯地区の県道は昭和 26 年応修と昭和 43 年編集との間で北側へ移し、直線性を増すよう改修されている。これは、寒湯沢下流・猪の倉沢下流に生じた隆起により、寒湯沢の沢水に浸されるようになったため北へ移設したものと考えられる。

2. まとめ

a. 合成開口レーダー干渉画像分析と旧版地図による地盤変動解析とでは、隆起量の絶対値は一致しないが、震源域となる右横ずれ断層の位置（高橋 学・高橋正伸宅と寒湯沢堰堤を結ぶ線）は一致していると考えられる。そして、その南側に幅 100m の震源域に並行する帯状の隆起が生じているのは間違いないと考えられる。そのため、その北側の震源域は相対的な沈降域となった可能性が高い。この事態の変化が平成 8 年以降の集中的な陥没穴の発生を招いたと考えられる。しかし、この地域では地質時代にも陥没が多発していたことと、ほぼ昭和 43 年編集以降平成 6 年修正までの間、陥没の発生がなかったことは明らかである。これは、震源域では、周辺地区との比較で相対的な隆起・沈降がくり返し生じていたこと、地表の隆起・沈降の開始と陥没の発生・中断の開始にはタイムラグがあったことを示唆している。

表-1 「秋ノ宮」旧版地図一覧

5 万分の 1 図名：秋ノ宮あきのみや					
リスト番号		図 歴			発行年月日
62-7-1	*	大正	2	測図	T03/08/30
62-7-2	*	大正	2	測図	T05/03/30
62-7-3	*	昭和	9	修正	S11/01/30
62-7-4	*	昭和	9	修正	S21/11/31
62-7-5	*	昭和	9	修正	S22/06/30
62-7-6	*	昭和	26	応修	S27/04/30
62-7-7		昭和	43	編集	S44/01/30
62-7-8BC		昭和	46	修正	S48/01/30
62-7-9AB		昭和	56	二編	S58/02/28
62-7-10		欠			
62-7-11		平成	6	修正	H08/04/01
62-7-12		平成	10	要修	H11/05/01
No.1～No.2 は図名「鬼首村」					
No.3～No.7 は図名「鬼首」					

*は一色刷

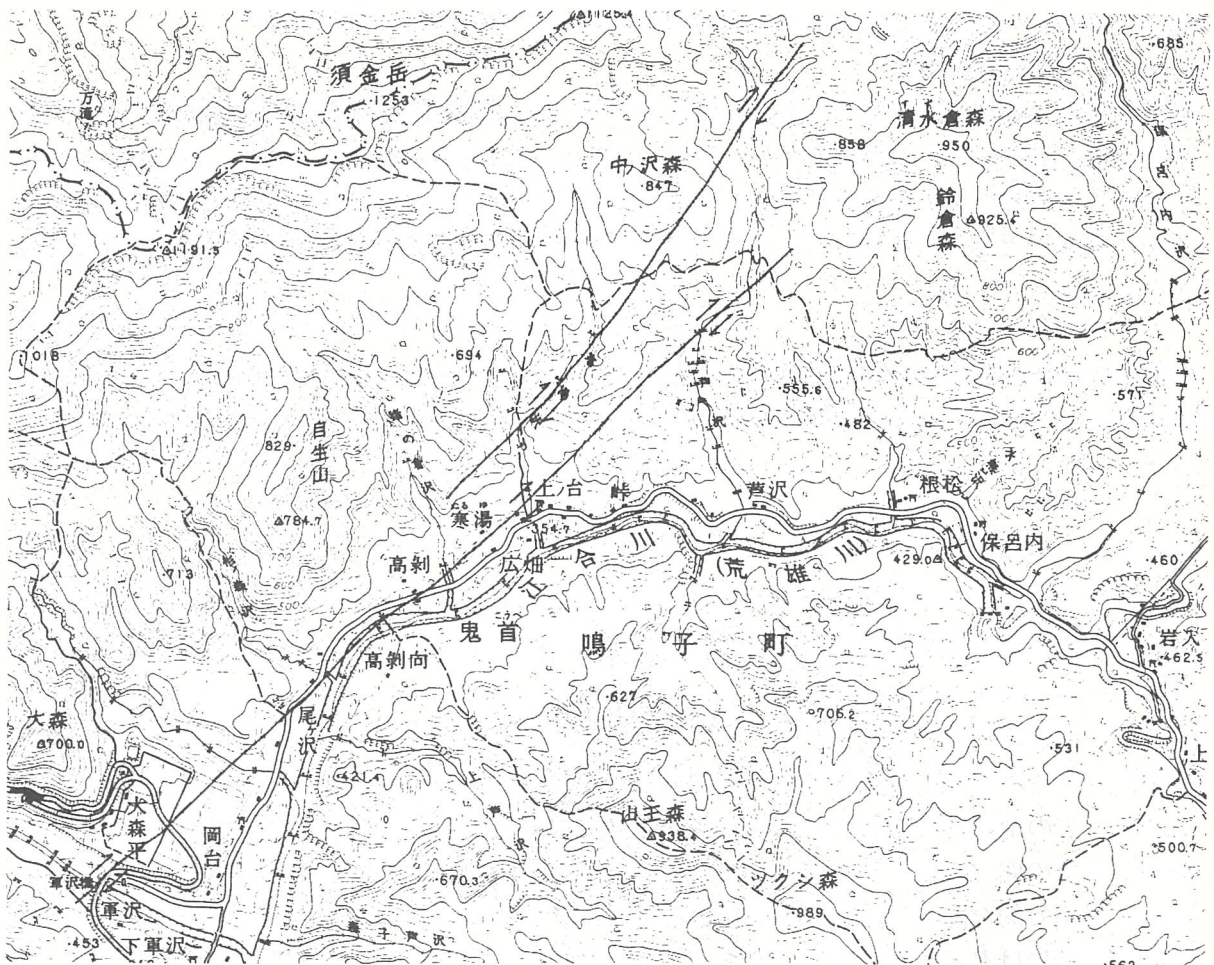
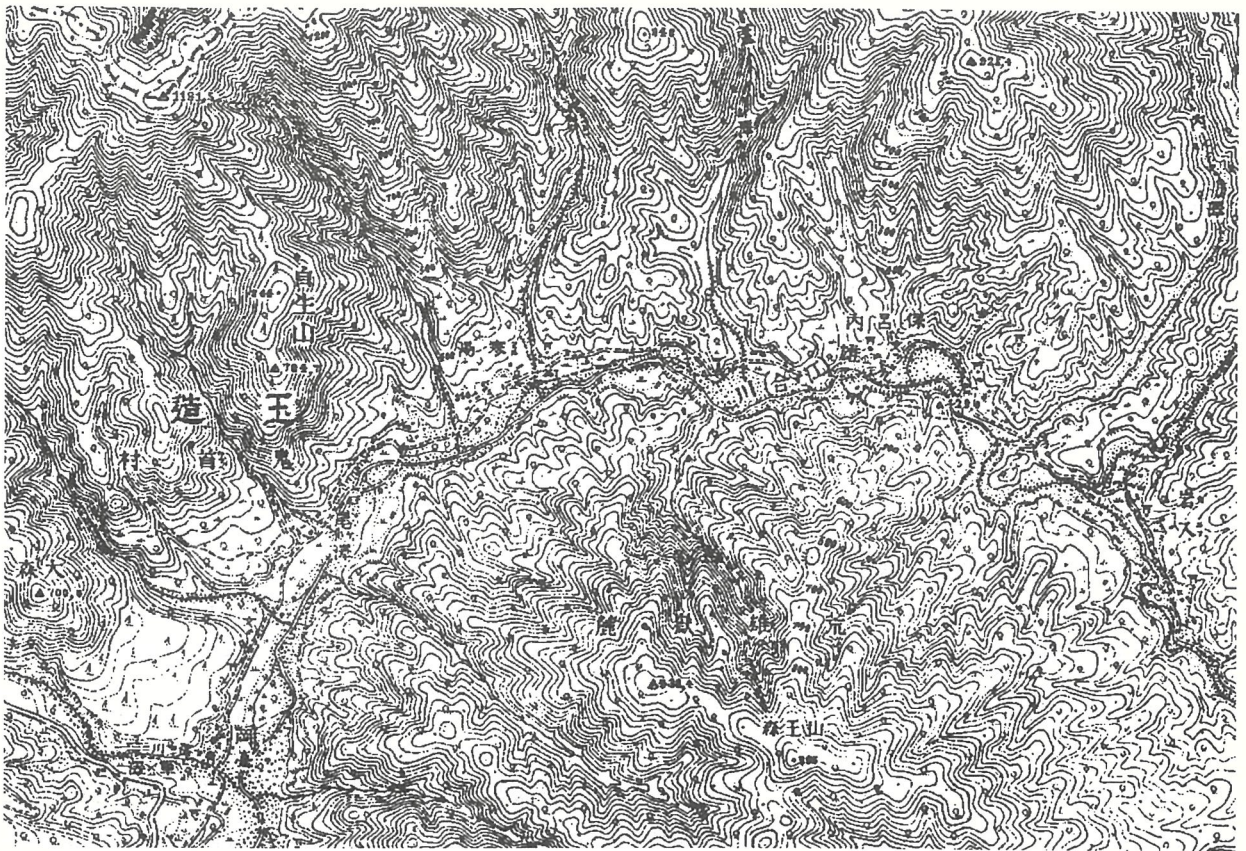


図-6：大正2年測図（上図）の河川の屈曲を参考に、平成10年要修（下図）に示した寒湯地区の右横ずれ断層（国土地理院発行5万分の1地形図「秋ノ宮」より抜粋・加筆）。

- b. 寒湯地区の沖積低地面上にも、右横ずれ変位の存在を示す変位地形が存在していた。しかし、昭和43年編集以降、開墾や農地整備・河川改修などがなされていた（旧版地図による）ため、現在市販されている地図上から消えていた。これに気付くのが遅れたことが陥没の成因に迫るのを妨げていたと考えられる。

陥没穴は、今も昔も、「活断層」上の引張りの場でくり返し発生していたと想定されるため、これを人力で阻止することは不可能であろう。

しかし、陥没穴の発生の可能性は、高橋 学・高橋正伸宅付近と寒湯沢堰堤付近の2箇所が最も大であると考えられるため、これらを観測・監視し、できれば警報を発することができる前兆を見つけたことが必要である。

- c. 溶存酸素（DO）がほぼ0 mg/lの白濁した微温水が、上記の2箇所に集中発生している陥没穴や湧水点から盛んに湧出している。これは、カルデラ内の縦型の水の循環、カルデラ内堆積物中の破碎帯に形成されているであろう多数の「水溜り」の存在などに規制されていると考えられる。これらの成因は、カルデラ内で発生する地震であり、その結果が陥没と考えられる。これらの関連状況は、合成開口レーダー干渉画像解析結果や旧版地図解析結果とも矛盾しない。

- d. 平成8年に再発した陥没は、7年間に7回発生しており、そのうちの6回は5月末から9月末までの5箇月間に発生している。しかも、カルデラ外に発生した地震のゆれ（鳴子町で震度3.1）によっても発生することが確認された。

- e. 寒湯地区は、現在（平成8年以来）陥没が発生しやすい地下地質条件に転じていることは明らかであり、成因解明までには、まだまだ時間が必要である。

しかし、この間にも陥没発生は起こり得る。平成8年以来、寒湯地区で変化した事象は何かというと、合成開口レーダー干渉画像解析によって判明した震源域での最大16 cmと推定される隆起現象であり、旧版地図解析と現地調査で得られた寒湯沢橋から猪の倉沢橋を結ぶ幅100m程度の帯状地域における約2mの隆起と、これにより派生した高橋 学・高橋正伸宅前と寒湯沢堰堤を結ぶ幅50m程度の帯状地域（地震断層の位置と考える）の相対的沈降が考えられる。これにより、地震断層沿いで、地下水（被圧地下水）が上昇し、陥没が発生しやすい条件に変化したことが想定される。

寒湯沢の「地質時代」の陥没跡の白色細粒凝灰岩（“みがき粉”）は、寒湯沢の川床が約20m下がったことで、液状化を発生させえないほどの固結度の高い岩盤に変化していることから、陥没を防ぐ有効手段として、寒湯地区の地下浅所に広く分布していると考えられるこの“みがき粉”の乾燥化を図ることが考えられる。

- f. 発表者の一人である大村は、6月1日に発足予定のNPOふるさと研究所の活動として、この陥没問題に取り組む予定である。タイミング良く、5月7日に（株）大和地質研究所は地盤変動計2台を現地に設置する。このデータを基に、地盤の動きを捉える試みに着手する予定である。なお、国土地理院地殻変動研究室の矢来氏は「寒湯地区の合成開口レーダー干渉画像解析は始まったばかりである。今後も解析を続けてゆく。」としている。これまでの寒湯地区の陥没事故は成因に迫る手がかりはほとんど無いに等しかった。しかし、今回の成果によって、視点を変えて、手法を近代化して、原因追及を加速できる可能性が生じてきたと考える。

この書は、明治三十二年（一八九九年）に刊行された。その頃、日本は明治維新の成果を享受し、急速な近代化を遂げていた。この書は、その時代の精神を反映している。著者は、この書を通じて、読者に新しい知識と技術を伝えることを目指している。この書は、当時の教育制度や社会制度を詳しく説明している。また、著者は、読者に新しい思想や価値観を伝えることを目指している。この書は、当時の教育制度や社会制度を詳しく説明している。また、著者は、読者に新しい思想や価値観を伝えることを目指している。

この書は、明治三十二年（一八九九年）に刊行された。その頃、日本は明治維新の成果を享受し、急速な近代化を遂げていた。この書は、その時代の精神を反映している。著者は、この書を通じて、読者に新しい知識と技術を伝えることを目指している。この書は、当時の教育制度や社会制度を詳しく説明している。また、著者は、読者に新しい思想や価値観を伝えることを目指している。

この書は、明治三十二年（一八九九年）に刊行された。その頃、日本は明治維新の成果を享受し、急速な近代化を遂げていた。この書は、その時代の精神を反映している。著者は、この書を通じて、読者に新しい知識と技術を伝えることを目指している。この書は、当時の教育制度や社会制度を詳しく説明している。また、著者は、読者に新しい思想や価値観を伝えることを目指している。

この書は、明治三十二年（一八九九年）に刊行された。その頃、日本は明治維新の成果を享受し、急速な近代化を遂げていた。この書は、その時代の精神を反映している。著者は、この書を通じて、読者に新しい知識と技術を伝えることを目指している。この書は、当時の教育制度や社会制度を詳しく説明している。また、著者は、読者に新しい思想や価値観を伝えることを目指している。

この書は、明治三十二年（一八九九年）に刊行された。その頃、日本は明治維新の成果を享受し、急速な近代化を遂げていた。この書は、その時代の精神を反映している。著者は、この書を通じて、読者に新しい知識と技術を伝えることを目指している。この書は、当時の教育制度や社会制度を詳しく説明している。また、著者は、読者に新しい思想や価値観を伝えることを目指している。

この書は、明治三十二年（一八九九年）に刊行された。その頃、日本は明治維新の成果を享受し、急速な近代化を遂げていた。この書は、その時代の精神を反映している。著者は、この書を通じて、読者に新しい知識と技術を伝えることを目指している。この書は、当時の教育制度や社会制度を詳しく説明している。また、著者は、読者に新しい思想や価値観を伝えることを目指している。

この書は、明治三十二年（一八九九年）に刊行された。その頃、日本は明治維新の成果を享受し、急速な近代化を遂げていた。この書は、その時代の精神を反映している。著者は、この書を通じて、読者に新しい知識と技術を伝えることを目指している。この書は、当時の教育制度や社会制度を詳しく説明している。また、著者は、読者に新しい思想や価値観を伝えることを目指している。

日本応用地質学会東北支部
第 11 回研究発表会講演集

平成 15 年 5 月 23 日発行

編 集 日本応用地質学会東北支部事務局

応用地質株式会社 東北支社 内
仙台市宮城野区萩野町 3-21-2
TEL:022-237-0471
