

P6. 三波川帯の地すべり地形と地山透水性特性に関する考察（その3）

Comparing landslide topography and drainage for their characteristics of the Sanbagawa (Part3)

露口耕治、○青野涼音、大矢基弘、菅原大介、(株)四電技術コンサルタント、寺本光伸、栢木智明（(同）スイモンLLC）、野々村敦子、荒木裕行、山中稔、長谷川修一（香川大学）

1. はじめに

これまで筆者らは、四国西部の地すべりが多発する三波川帯を対象として、地すべり地形を含む流域と非地すべり流域の地下水流動特性に着目し、湧水比流量による地すべり地形の有無の識別が有用であることを示してきた¹⁾。一方で、研究対象地内の流域の水質は、循環の速いⅠ型と通常自然界に稀な SO_4^{2-} が多いⅢ型の水質タイプに区分され、Ⅲ型は地下深部から供給されている可能性が示唆された。本論では、特徴的なⅢ型を示す水質に着目し、継続的な流量観測に加えて更なる主要成分分析や酸素・水素同位体分析を行い、水質からみた地すべり地形における地下水流動特性について検討した。

2. 研究地の概要

本研究地は、西南西-東北東に延びる佐田岬半島の主稜軸南側で宇和海に面する東西方向約7 km、南北方向約1 kmの流域を対象とし、基盤岩として西南日本外帯の三波川変成岩類に属する塩基性片岩が多く分布する。片理面の走向傾斜は、東西～北東-南西走向が多く、20～30°でおおむね南側に傾斜している。地すべり地形は、主稜軸の一部を

なす大峰（標高358 m）から西側へ延びる尾根、および、南側に並走する標高200 m前後の尾根周辺において、幅100 m、長さ200 mの規模の地すべり地形が点在している（図1）。当該流域に分布する地すべりの約半分は海水準の低下と推測される影響で、地すべり地形が“開析の少ない”または“開析された”化石地すべりの様相となっている。

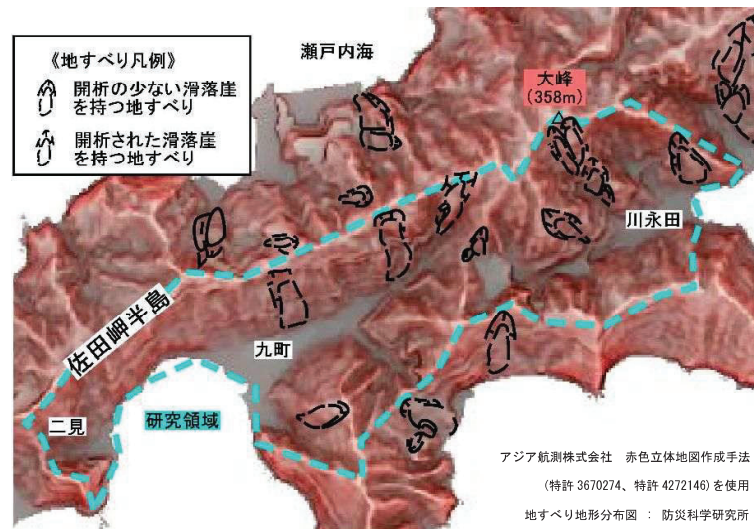


図1 研究位置図（赤色立体図）

3. 流域の比流量と地形量

本研究地内の流域を17に区分し、令和3年7月～令和5年3月の期間中、概ね2ヶ月に1回の頻度で計12回の流量観測を行った。令和4年5月～令和5年3月の比流量や地形量のデータについて露口ほか（2022）と同様に表1に整理した。降雨量によって比流量は異なるものの、流域の比流量の大小関係は同じ傾向を示す。

表1 流量観測結果と地形量に関する一覧表

流域名	流域面積 (m ²)	比流量(L/s/km ²)						平均比流量 (L/s/km ²)	地すべり 有無	谷密度 (L/km)	傾斜 (度)	水質型
		R04.5	R04.7	R04.9	R04.11	R05.1	R05.3					
A	49948	0.1	6.8	0.0	0.0	0.0	0.0	1.2	あり	3.8	25.0	Ⅲ型
B	302018	3.6	10.3	0.8	2.5	1.6	0.7	3.2	あり	4.7	29.2	I型・Ⅲ型
C	311809	2.8	1.7	0.8	0.9	0.9	0.2	1.2	あり	4.4	26.7	I型
D	84628	0.7	3.2	0.4	0.5	0.5	0.1	0.9	なし	8.1	24.8	I型
E	94766	3.0	10.1	1.9	2.5	1.4	1.3	3.4	なし	5.6	27.6	I型
F	88032	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	あり	4.5	24.9	Ⅲ型
G	398020	3.4	10.6	3.3	2.3	2.3	0.9	3.8	あり	5.3	26.5	I型
H	114926	6.6	21.9	2.5	2.5	1.6	1.1	6.0	あり	2.9	23.3	Ⅲ型
I	73270	0.2	5.8	0.3	0.5	0.1	0.0	1.2	なし	6.3	24.0	Ⅲ型
J	69642	6.8	12.7	5.4	6.2	7.9	3.4	7.1	あり	4.2	26.5	未実施
K	79682	0.0	4.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.7	なし	4.5	22.8	Ⅲ型
L	106543	3.3	11.9	1.1	2.4	1.3	0.5	3.4	なし	5.0	29.1	Ⅲ型
M	431003	1.8	4.6	0.6	0.0	0.5	0.0	1.2	あり	5.7	27.5	Ⅲ型
N	177038	1.7	4.1	0.6	0.0	0.6	0.5	1.3	あり	5.4	26.0	Ⅲ型
O	62737	0.2	3.4	0.0	0.0	0.0	0.0	0.6	あり	7.3	26.2	Ⅲ型
P	106167	0.0	3.3	0.0	0.0	0.0	0.0	0.6	あり	3.4	26.9	Ⅲ型
Q	95939	1.0	5.9	0.3	0.2	0.1	0.0	1.2	なし	4.6	27.5	Ⅲ型

また、観測前20日降水量が30mm前後で平均的な比流量分布となった令和4年1月と令和4年9月の比流量分布図を示す（図2）。2時期の近似した降雨量後の比流量分布における顕著な変化は認められなかった。

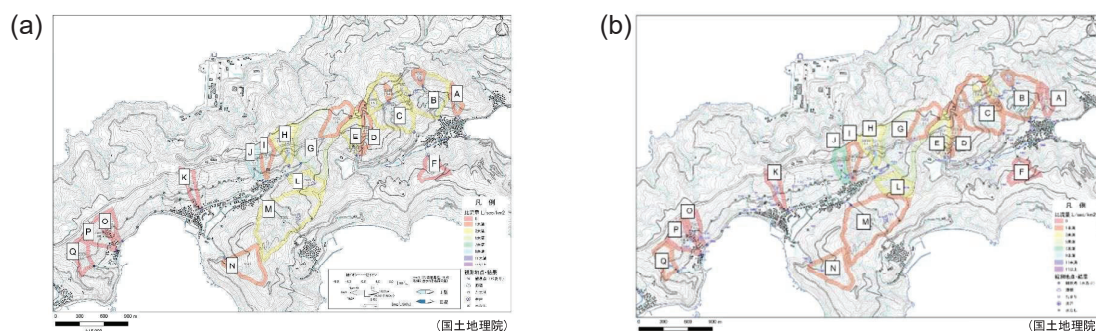


図2 比流量分布図 (a)令和4年1月 (b)令和4年9月

4. 水質分析

4.1 主要成分分析

流域観測と同時に測定した電気伝導度(EC)は、全体的に100～300 $\mu\text{S}/\text{cm}$ と一般的な値のものが多く、I、J、Q等で600 $\mu\text{S}/\text{cm}$ を超える異常箇所がみられた他、pHについても局所的に酸性傾向を強く占める箇所も散見され、観測地点によって水質が異なる傾向が認められた。そこで、より詳細な水質分布を把握するために、観測前降水量が平均的な時期となる令和4年7月と11月に、源

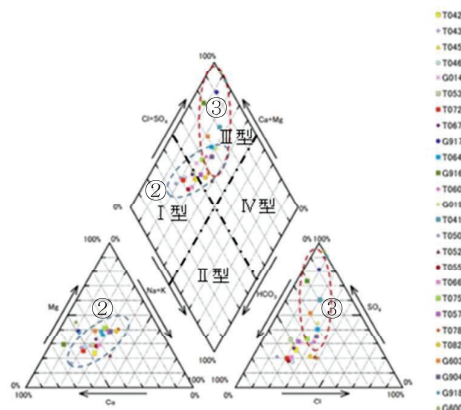


図3 トリリニアダイアグラム

頭湧水、渓流水を対象とした網羅的な主要成分分析を行った。主要成分分析の項目は、陰イオンとして SO_4^{2-} 、 HCO_3^- 、 Cl^- 、 NO_3^- 、陽イオンは Mg^{2+} 、 Ca^{2+} 、 Na^+ 、 K^+ 、その他、 SiO_2 である。

結果より、以下の①から③の特徴が見られた。①I型とIII型の2領域にプロットされること、②その中間領域に多くプロットされること（図中の破線②）、③III型の上部にプロットされる高い硫酸イオンに特徴付けられる水質が認められる（図中の破線③）ことである（図3）。アルカリ土類炭酸塩型と呼ばれるI型は、日本で最も一般的な循環の速い浅層地下水の組成で、アルカリ土類非炭酸塩型のIII型は、熱水や化石水の組成を持つものと言われ、自然界には稀な水質とされる。

4.2 酸素・水素同位体分析

露口ほか（2022）では、自然界で溶存することが稀な硫酸イオンを多く溶存する地下水の組成について、表層からの循環の速い地下水に地下深部からの水が影響している可能性を示唆した。つまりI型とIII型とでは、地下水の循環速度や涵養域標高が異なる可能性が考えられることから、ここでは、水循環・地下水流動のトレーサーとして最も利用される酸素および水素の安定同位体を用いて、それらの同位体比の分布や高度効果の特徴について検討した。

採水は、主要成分分析の試料とほぼ同地点で令和4年11月に実施した。 $\delta^{18}\text{O}$ と δD 値から d 値（ $=\delta\text{D} - (8 \times \delta^{18}\text{O})$ ）を求め、 δ ダイアグラムで示した（図4）。求められた d 値に多少の開きがあるが、日本の冬季の平均的な値の $d=30$ と夏季の値である $d=10$ の天水線の範囲内にプロットされることから、III型であっても降雨を起源とする循環水と判断できる。

次に、高度効果を検証するために、 $\delta^{18}\text{O}$ 値と5 mDEM より求めた涵養域の平均標高の散布図を示した（図5）。高度効果は、気団が山腹にぶつかり連続的に降雨をもたらす時、低標高での降雨の $\delta^{18}\text{O}$ は大きく、高標高の降雨の $\delta^{18}\text{O}$ は小さくなる傾向を示し、平均的には、 $\delta^{18}\text{O}$ は0.2 ‰/100 m 程度の割合で減少するとされている。図5からは、 $\delta^{18}\text{O}$ 値と涵養域の平均標高との間にほとんど相関が無く、 $\delta^{18}\text{O}$ 値がほぼ同じ値であっても、涵養域平均標高には最大100 m 程度乖離する傾向が認められる。そこで、I型とIII型の水質を区分して色付け

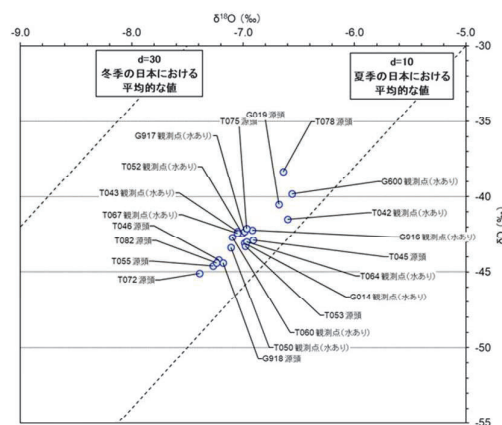


図4 δ ダイアグラム

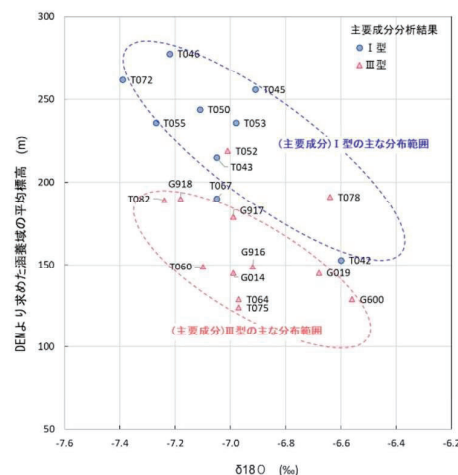


図5 $\delta^{18}\text{O}$ 値と涵養域の平均標高の関係

すると、多少のばらつきは認められるが、同じ $\delta^{18}\text{O}$ 値で比較すると、I 型より III 型の水のほうが涵養域の平均標高は低くなっている傾向がみられる。

4.3 クラスタ分析

主要成分分析データを類似度を手がかりに階層クラスタ分析を行い、地下水の水質組成区分の特徴について検討した。

本研究では、主要成分分析結果のイオン 8 成分 (SO_4^{2-} 、 HCO_3^- 、 Cl^- 、 NO_3^- 、 Mg^{2+} 、 Ca^{2+} 、 Na^+ 、 K^+) のモル等量を入力値として最小分散法 (Ward 法) でクラスタ分析を行い、樹形図として図化し、ヘキサダイアグラムを併記した (図 6)。観測地点の水質は、 SO_4^{2-} 濃度が顕著に高い III 型のみからなる A 区分と I 型と III 型が混合するそれ以外の B 区分の水質組成に大別される。さらに、B 区分の中で、III 型が優勢となる B-1 タイプ、溶存イオン量が相対的に小さく I 型と III 型のいずれも含む B-2 タイプ、I 型が優勢で溶存イオン量が他の B 区分の中で比較的大きい B-3 タイプの 3 つに細分できる。

クラスタ分析結果を平面図上に区分ごとにプロットした (図 7)。本研究地範囲の東側には、概ね B-2、B-3 タイプに分類される水質が広く一様に分布する。一方で、西側には主に B-1 タイプが断片的であるが広域に分布し、中央北側 (九町地区) と西端 (二見地区) に A 区分の水質が分布している。全体を俯瞰してみれば、東側には I 型、西側には III 型の水質分布となっているのが一つの大きな特徴である。また、図中の九町地区、町見地区、二見地区では含銅硫化鉄鉱床が知られており、A 区分の分布範囲とほぼ近似した位置となっていることから、硫酸イオン濃度が高い A 区分の水質はこれらの鉱床が影響している可能性が挙げられる。また、B-1 タイプにおいては、A 区分に隣接している地点が多く、A 区分の水が I 型の流動の速い浅層地下水と混合し、やや硫酸イオン濃度が高くなっている可能性が考えられる。

また、図中の九町地区、町見地区、二見地区では含銅硫化鉄鉱床が知られており、A 区分の分布範囲とほぼ近似した位置となっていることから、硫酸イオン濃度が高い A 区分の水質はこれらの鉱床が影響している可能性が挙げられる。また、B-1 タイプにおいては、A 区分に隣接している地点が多く、A 区分の水が I 型の流動の速い浅層地下水と混合し、やや硫酸イオン濃度が高くなっている可能性が考えられる。

5. 地形量と比流量・水質

「谷密度」や「傾斜」に着目した地形量と「湧水比流量」との相関から、地すべり地形が含まれる流域 (谷密度・傾斜が小さい流域) は、若干であるが湧水比流量が増加する傾向が

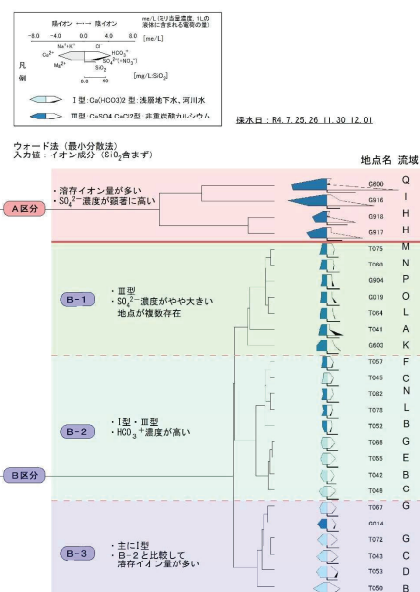


図 6 クラスタ分析結果

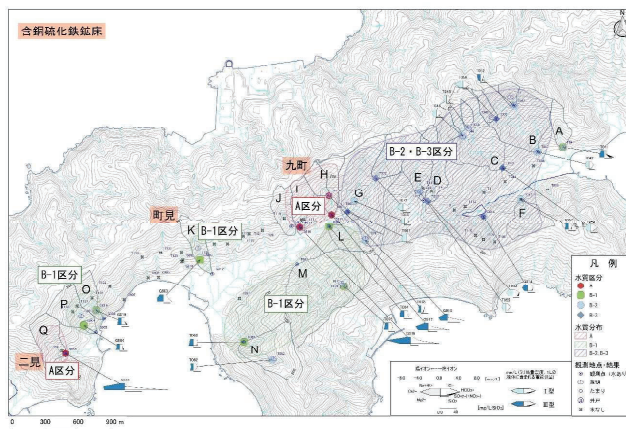


図 7 クラスタ分析結果による水質分布

みられる（露口ほか、2022）。地山の透水性を評価するにあたっては一般的に湧水比流量に着目して評価する場合が多いものの、本研究地において湧水比流量となる11月から3月の流量は極めて少なく、流量と地形量の関係の傾向を読み取りづらい。そこで、表1で示した平均比流量を用いて、地形量（谷密度・傾斜・地すべりの有無）との相関性について整理した（図8、図9）。なお、これらの図では、主要成分分析結果から判断される水質組成（Ⅰ型・Ⅲ型）についても区分した。

傾斜および谷密度が小さくなるほど地下水を貯留する間隙の多い地すべり土塊が多く分布し、比流量が大きくなると仮定すると、谷密度についてはそのような傾向が認められるものの（図8）、傾斜についてはばらつきが多く相関性は小さい（図9）。また、水質のタイプについては、特筆するような傾向はみられない。

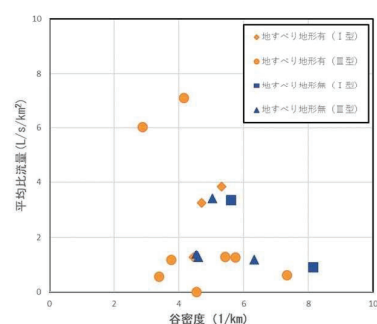


図8 比流量と谷密度の関係

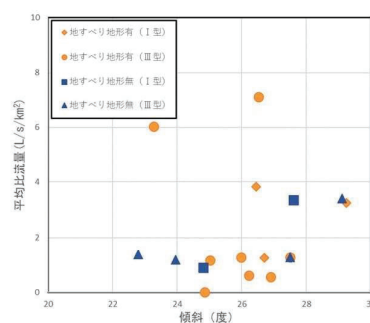


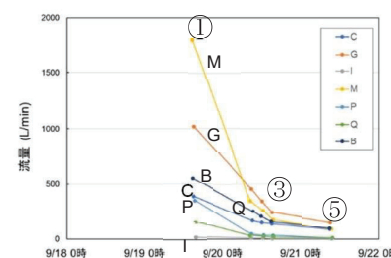
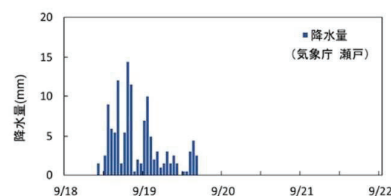
図9 比流量と傾斜の関係

6. 豊水期連続流量観測

本研究地内の主要流域において、流域の流出特性（降雨と流量の応答性と流量減少速度）を把握するために、豪雨ピーク直後から約3日間かけて連続流量観測を行った。

令和4年9月18日～19日にかけて台風14号の接近に伴う累積降水量122.5 mm（気象庁 瀬戸）が観測され、その豪雨直後に本研究地内の主要7流域において実施した。降水量と流量変化の関係を示す（図10）。降雨後12時間程度で、流量は大きく減少しており、降雨に伴う流量への応答は早いことが分かった。

また、流量増減比と平水期の平均比流量（5・7・9月の平均値）の相関図を作成した（図11）。流量増減比については比較する2つの観測時の流量の比を百分率で示したものである。平均比流量が大きいB・C・G流域はそれ以外の流域よりも高い流量増減比を保持しており、緩やかな減少を示している。つまり、比流量が大きい流域については、間隙が大きく浸透量が多い地質を多く内



①9/19 夕 ②9/20 朝 ③9/20 昼 ④9/20 夕 ⑤9/21 朝

図10 降水量と流量観測結果

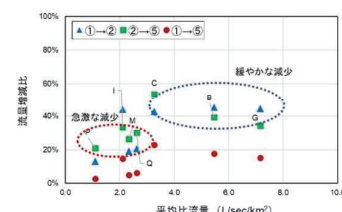


図11 流量増減比

在する地すべり地形の影響を強く受けていることを示唆すると考えられる。

7. まとめ

本研究は、令和3年度のデータで検討を行った露口ほか(2022)と同様の研究地で、継続的な流量観測、網羅的に行った主要成分分析、同位体分析、豪雨直後の沢水流量変化の特性等のデータを蓄積した結果を整理し、更なる地下水流動特性について検討したものである。これまでの検討結果を以下に総括する。

①本研究地内の比流量について

- ・雨量に応じて流域ごとの比流量は異なるものの、渇水時期、平水時期、豊水時期の比流量分布傾向は、露口ほか(2022)と同様の結果となった。

②水質分析について

- ・主要成分分析：硫酸イオン濃度が顕著に高い特異的な水質が認められる。
- ・同位体分析：研究地内の源頭湧水および渓流水は、全て降雨起源である。また、高度効果を検証するために作成した $\delta^{18}\text{O}$ 値と涵養域の平均標高の散布図において、I型の流動の速い浅層地下水とIII型の硫酸イオン濃度の高い水質分布は異なる。
- ・クラスター分析： SO_4^{2-} 濃度が顕著に高いIII型のみからなるA区分とI型とIII型が混合するそれ以外のB区分の水質組成に大別される。A区分の水質は含銅硫化鉄鉱床の影響を受けていると考えられる。

③地すべり地形の指標となる地形量と平均比流量の関係

- ・地すべり地形を有する流域において、谷密度が小さくなるほど渇水比流量のみならず平均比流量についても大きくなる傾向が見られた。

④豊水期連続流量観測について

- ・比流量が大きい地山では、豪雨直後の流量の減少は緩やかであり、一方で比流量の小さい地山では流量は急激に減少する傾向がある。

最後に、本研究の今後の課題と発展について述べる。酸素・水素同位体分析結果を用いた高度効果の検証のため作成した $\delta^{18}\text{O}$ 値と涵養域の平均標高の散布図において、I型の水とIII型の水では分布が異なる理由を明らかにできなかった。今後、 $\delta^{18}\text{O}$ 値は季節変化が大きいため、他の季節においてどのような結果を示すのか調査を行いたい。また、地下水の滞留時間を推定することができるフロン類(CFCs)や六フッ化硫黄(Sf_6)等のトレーサーを使用して、I型とIII型の水における滞留時間の差異を明らかにするなど、水質と地下水流動特性についてさらなる検討を深めたい。

参考文献

- 1) 露口耕治・大矢基弘・菅原大介・青野涼音・寺本光伸・栢木智明・野々村敦子・荒木裕行・山中稔・長谷川修一(2022): 三波川帯の地すべり地形と地山透水性特性に関する考察(その2), 日本応用地質学会 中国四国支部令和3年度研究発表会要旨