

多変量解析による地すべり斜面における地下水の流動状況の検討

国立研究開発法人 土木研究所 雪崩・地すべり研究センター ○丸山清輝、石田孝司

1. はじめに

地すべり斜面内の平面的な地下水流動状況調査法として、地下水追跡がある。地下水追跡は、食塩等のトレーサーを用いた方法により実施されているが、多くの時間と労力が必要である。それに対して、広域の地下水流動系を明らかにするための研究では、地下水の水質分析結果を用いた多変量解析による方法が用いられている<sup>1), 2)</sup>。この方法では、地下水流動系は散在するボーリング孔内からの地下水を1回採水し、その水質分析結果を用いて求められることから、現場での時間と労力が地すべり調査で実施する地下水追跡に比べて格段に少ない。そこで、地下水追跡調査の時間と労力を縮減することを目標に、地下水の水質分析結果の多変量解析により地すべり斜面内の地下水流動状況について検討したので、その結果を報告する。

2. 研究方法

今回は、多変量解析による地すべり地内の地下水流動状況調査法について検討するために、宇津俣地すべり（新潟県）における地下水の水質分析結果を用いた。地下水の水質分析結果の多変量解析では、主成分分析とクラスター分析により地下水採水地点をグループ化し、グループの水質の特徴から地すべり斜面における地下水の流動状況について検討した。なお、主成分分析は多変量解析法の一つであり、多くの変数の値をできるだけ情報の損失なしに1個または少数個の総合的指標（主成分）で代表させる方法である。

3. 研究結果

宇津俣地すべりは、新潟県上越市牧区に位置している。地すべりの規模は幅40~120m、長さ800mであり、基岩の地質は寺泊層、椎谷層の泥岩及び砂質凝灰岩である。また、地すべり斜面内には鷹羽断層が通っている。今回の解析では、古谷ほかの論文<sup>3)</sup>で公表されている水質分析結果を利用させていただいた。

図-1には、宇津俣地すべり（石倉地区）における採水地点を示した。サンプルはボーリング孔内と湧水から採水されたものである。

表-1は、サンプルの水質分析結果をヘキサダイアグラムの項目別に示したものである。ヘキサダイアグラムは水質の組成の違いを表すことから、この項目を主成分分析の入力変数とした。なお、SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>については、測定不能のもの

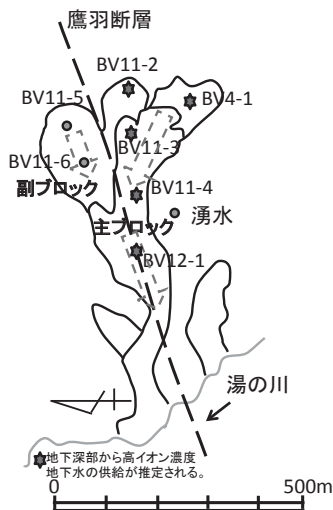


図-1 採水地点

表-1 サンプルの水質分析結果（古谷ほか<sup>3)</sup>に加筆）

No.	サンプル名	Na <sup>+</sup> +K <sup>+</sup>	Ca <sup>+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	Cl <sup>-</sup>
1	湧水	0.22	0.30	0.09	0.02	0.45	0.12
2	BV4-1 6m	0.61	0.40	0.12	0.16	0.91	0.13
3	BV4-1 20m	32.55	0.40	0.12	(0.21)	8.57	23.66
4	BV11-2 7.5m	0.73	0.42	0.17	0.75	0.38	0.26
5	BV11-2 24m	29.68	0.62	0.20	0.39	9.66	27.05
6	BV11-4 6m	13.34	1.91	1.06	(1.70)	11.39	3.90
7	BV11-4 28m	270.76	15.37	6.44	(10.25)	8.65	301.95
8	BV11-3 10m	6.91	2.94	1.04	8.55	2.16	0.77
9	BV11-3 28m	222.09	14.57	5.08	(8.09)	10.94	234.02
10	BV12-1 3m	1.04	1.63	0.67	1.47	1.42	0.44
11	BV12-1 24m	172.52	7.88	3.29	(5.25)	11.66	174.34
12	BV11-5 5m	0.31	0.09	0.07	0.12	0.14	0.20
13	BV11-5 29m	0.31	0.10	0.08	0.13	0.19	0.16
14	BV11-6 11m	0.66	1.43	0.47	0.39	2.17	0.21
15	BV11-6 39m	0.59	1.48	0.49	0.49	2.09	0.14

表-2 主成分分析結果

主成分No.	固有値	寄与率	累積寄与率
1	5.11	85.20%	85.20%
2	0.62	10.27%	95.47%
3	0.24	3.96%	99.43%
4	0.03	0.46%	99.89%
5	0.01	0.11%	99.99%
6	0.00	0.01%	100.00%

があった。また、Mg<sup>2+</sup>とSO<sub>4</sub><sup>2-</sup>との相関係数は0.78であり、高い相関関係を示した。そこで、SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>が測定不能の箇所のデータにつ

いては、Mg<sup>2+</sup>とSO<sub>4</sub><sup>2-</sup>との線形回帰式を作成し推定した（表中の（）のデータ）。

表-2には、表-1の水質分析結果の主成分分析結果（データは基準化した）を示した。第1主成分の固有値は1以上の値であり、第1主成分は変数1個以上の情報量を有し、合成変数として使えることが分かる。また、第1主成分の寄与率は85%を示し、第2主成分までの累積寄与率は95%を示す。このことは、6変数の水質データの95%が、第1と2主成分によって説明できることを表している。

図-2は、第1主成分の主成分負荷量を示したものである。主成分負荷量が全て正であることから、第1主成分得点は溶存イオン全体の濃度を表していると考えられる。

図-3には基準化した第1主成分得点と第2主成分得点との関係を、図-4には表-1の水質分析結果のクラスター分析結果をそれぞれ示した。なお、クラスター分析では、サンプル間の距離には基準値のユークリッド距離を、クラスター間の距離にはウォード法をそれぞれ用いた。図-3ではプロットされた得点の分布形状がほぼ三角形を呈しており、各サンプルの起源水が3つあることが推定される<sup>4)</sup>。また、図-4においてサンプルを3つに分類した場合、No.7、9、11のグループ、No.3、5、6、8のグループ、No.1、12、13、2、4、10、14、15のグループになる。各グループの起源水は図-4のクラスター間の距離及び図-3の第1主成分得点と第2主成分得点との関係から判断すると、No.7、5、13に近い地下水であると推定される。

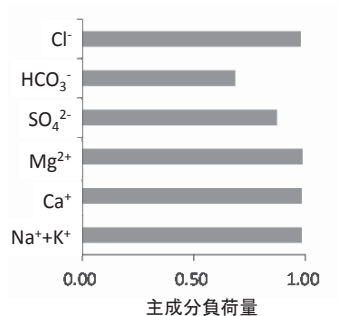


図-2 第1主成分の主成分負荷量

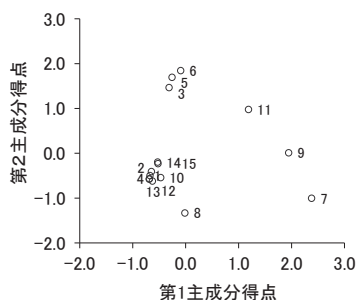


図-3 第1主成分得点と第2主成分得点との関係

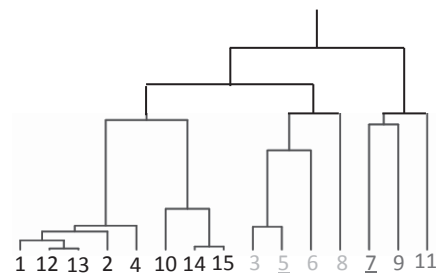


図-4 クラスタ分析結果

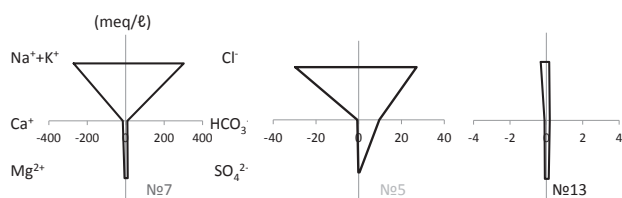


図-5 起源水No.7、5、13のヘキサダイアグラム

グループは、溶存イオン濃度が低い地下水であることから雨水が起源水と推定される。中間層グループは、溶存イオン濃度が深層グループより低いNa-Cl型等の地下水であり、深層グループの地下水が浅層グループの地下水で希釈されたものが起源水と推定される。このような関係から、No.5、3の下部深度にもNo.9、7、11のような地下水の存在が推定される。

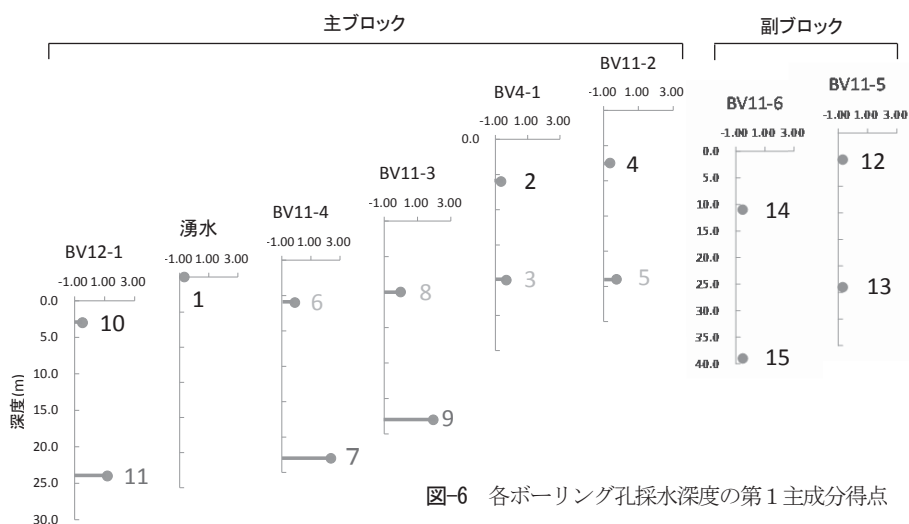


図-6 各ボーリング孔採水深度の第1主成分得点

図-5は、起源水と推定されるNo.7、5、13のヘキサダイアグラムを示したものである。No.7及び5は、Na-Cl型（非炭酸ナトリウム型：海水が混入した地下水）に分類される。また、No.13は、溶存イオン濃度が低く水質の分類は難しい。

図-6には、各ボーリング孔採水深度におけるサンプルの第1主成分得点を、主ブロックと副ブロックに分けて各ボーリング孔が位置する標高を考慮して示した。主ブロックの地下水は第1主成分得点の大小から判断すると、鷹羽断層沿いに位置するNo.9、7、11（深層グループ）の深度24～28m、No.5、3、8、6（中間層グループ）の深度6～24m、No.4、2、1、10（浅層グループ）の0～7.5mにおいて異なった水質で流下していることが分かる。また、副ブロックの地下水は第1主成分得点が深度5～39mにわたって小さな値を示し、主ブロックの浅層グループの地下水と類似した地下水が深度5～39mにわたって流下していることが分かる。

各グループの起源水については、深層グループは溶存イオン濃度の高いNa-Cl型の地下水であることから、起源水は鷹羽断層沿いの地下深部からのものと推定される。浅層

以上のことから、地すべり斜面内の地下水流動状況として、図-1に示すように主ブロックの鷹羽断層沿いのBV11-2、BV4-1、BV11-3、BV11-4、BV12-1の地下深部から溶存イオン濃度の高いNa-Cl型の地下水が、主ブロック地表面及び副ブロックからは雨水や融雪水が、それぞれ供給され、地下深部からの地下水の表層が地表面からの雨水等で希釈されながら斜面を流下していることが推定される。

#### 4. おわりに

地下水の水質分析結果の多変量解析により、地すべり斜面内の

地下水流動状況について検討した。その結果、地下水採水地点をグループ化し、各グループの起源水、それらを基にした地すべり斜面内の地下水流動状況を明らかにすることができた。今後は、他の地すべりについても同様な検討を実施する計画である。最後に、今回の検討では、古谷ほかの論文<sup>1)</sup>で公表されている水質分析結果を利用させていただいた。ここに記して、感謝の意を表す。

#### 参考文献

- 1) 安池慎治: 多変量解析を用いた地下水の混合状況の推定手法の開発、地下水学会誌、第36巻、第4号、pp. 405-422、1994。
- 2) 神谷浩二・真鍋 洋・山崎 勲: 溶存イオンデータの多変量解析に基づいた広域地下水流動系の評価、地盤工学ジャーナル Vol. 9、No.2、pp. 219-231、2014。
- 3) 古谷 元・渡部直喜・小松原岳史・佐藤 修・丸井英明: 新潟県東頸城地域の地すべり土塊内における高濃度Na-Cl型地下水の分布とその起源、応用地質、第45巻、第6号、pp. 281-290、2005。
- 4) 丸山清輝: 地すべり地における地下水の流動状況推定法に関する検討、地すべり、第33巻、第4号、pp. 26-32、1997。