

【課題番号】 2024#02

【研究テーマ】 滝坂大規模地すべりにおける深層地下水の水質および動態の特徴

【採 択 者】

清瀬莉花（新潟大学大学院自然科学研究科博士前期課程 1 年）

【要 旨】

福島県滝坂地すべりは、東北地方における最大級の活動中地すべりの一つであり、地下水排除の効果により近年その活動が沈静化していることが確認されている。しかしながら、本地すべりの水文地質構造には未解明な点が多く、地すべり発生メカニズムの解明および対策効果の評価のためには、複数の手法による総合的な水文地質解析が不可欠である。

本研究では、以下の 3 点を目的とする調査を実施した。

- (1) 水温および電気伝導度の簡易観測による深部地下水の流動特性の把握、
- (2) 安定同位体比の測定およびその変動から推定される地下水の起源と年代、
- (3) 水温トレーサーを用いたトンネル排水に関する貯留層分布の特定。

2023 年度から 2024 年度にかけて、滝坂地すべり地において水温、pH、電気伝導度の定期的な測定、および水試料の採取を実施した。採取された 239 試料に対して酸素安定同位体比の測定を行い、うち 7 試料に関しては SF_6 を用いた年代測定を実施した。涵養年代の推定にはピストン流モデル（PFM）を採用した。さらに、2024 年 8 月 7 日には、北部ブロック頭部域の逆断層近傍に位置する観測孔 BV-11 において、水温および電気伝導度の検層を実施するとともに、深度 100 m を超える地点にセンサーを設置し、継続的な簡易観測を開始した。

BV-11 孔では、大石西山排水トンネルの掘削以降、地下水位の変動が観測されており、図 1(a) に検層結果を示す。水温および電気伝導度の検層により、地下深部における異常な地温勾配が確認された。水頭から深度 60 m までは、100 m あたり 1°C 未満という異常に小さい地温増加率を示したのに対し、深度 60~100 m では約 $2^\circ\text{C}/100\text{ m}$ 、さらに深度 108 m 以深では $18.67^\circ\text{C}/100\text{ m}$ と顕著に高い地温増加率を示した。このような低い地温勾配は、BV-11 孔が尾根付近に位置していることから、鉛直下降流による低温地下水の供給が卓越している可能性をつしさする。

異常が検出された境界付近の地下水を詳細に把握するため、2024 年 8 月 7 日より深度 100 m 超の定点にセンサーを設置し、水温および電気伝導度の簡易観測を継続的に実施した。その結果（図 1(b)）、地下約 100 m の深部においても水温および電気伝導度の変動が観測され、排水トンネルによる排水効果が地下水の流動経路に変化をもたらしている可能性が示唆された。さらに、水位低下に伴い水温および電気伝導度が上昇する傾向も確認された。これは、水位低下に連動して、鉛直下降流による低温地下水の供給が徐々に減少し、下降流の影響が弱まりつつあることを示している可能性がある。

2019 年に瀬戸（2020MS）が実施した調査では、酸素安定同位体比の高度効果に基づき、地すべり地外の高所で涵養された地下水の存在が示唆された。一方、本研究で 2023~2024 年に採取した試料では、2019 年のデータと比較して有意に高い δ 値が得られた。特に、トンネル内の各排水ボーリング孔における酸素安定同位体比の経年変化を解析した結果、2019 年には -10.85‰ 以下であったボーリング孔排水の値が、2023 年には -10.26‰ 以上に変化していた。このことは、涵養標高 500 m 超の地下水が排出されていた 2019 年当時とは異なり、2023 年までには地すべり地付近で涵養された地下水へと置換されている可能性を示している。これらの変化は、排水トンネルによる流動経路の変化、または採取時期による年変化・季節変動の影響によるものと考えられる。

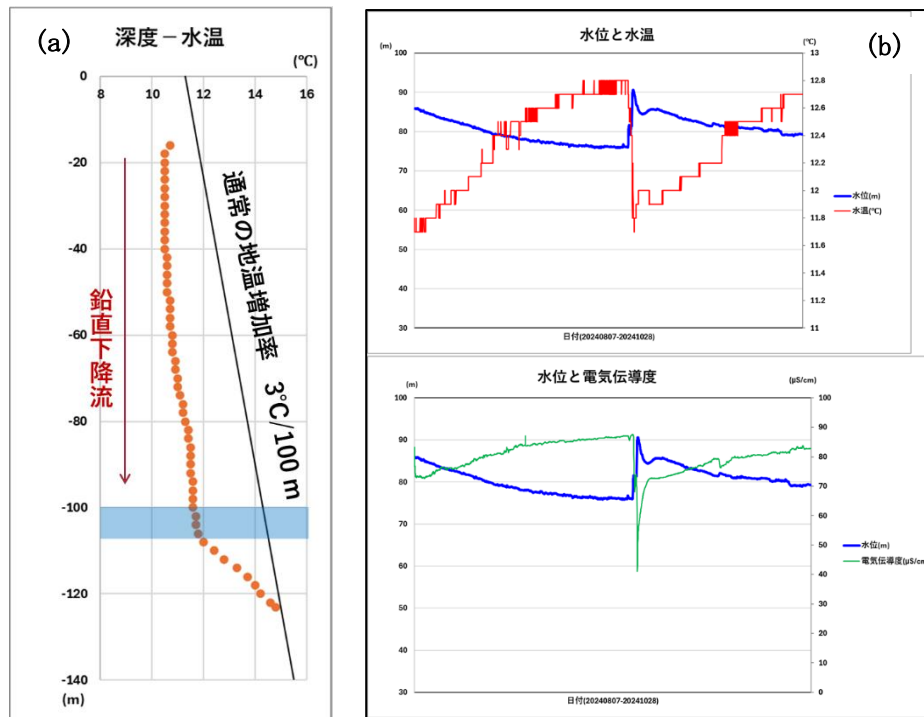


図 1. (a) BV-11 における水温検層結果. (b) 同孔地下 108 m における簡易観測結果.

袖の沢排水トンネルおよび北部排水トンネルでは、実測した水温と、標高および地温増加率から算出される理論地下水温との比較を行った。計算に際し、水温測定誤差 $\pm 0.2^{\circ}\text{C}$ 、気温減率 $-0.6^{\circ}\text{C}/100\text{ m}$ 、地温増加率 $+3.0^{\circ}\text{C}/100\text{ m}$ 、恒温層の地下水温は AMeDAS 西会津の 30 年平均である 11.3°C と設定した。図 2 には、標高と地温増加率に基づく理論水温（青実線）と実測水温（オレンジ点）を示した。

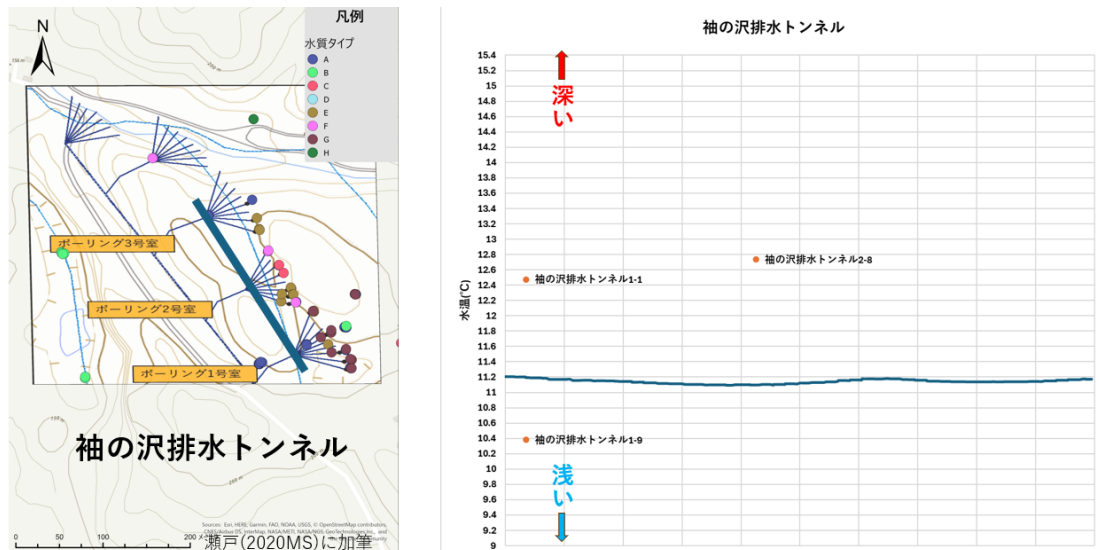


図 2. 標高と地温増加率から算出される理論的地下水温および実際に測定された水温の分布.

結果として、両トンネルにおいて、理論水温よりも有意に高い実測値と低い実測値の両方が確認された。前者は高温の地下水が断層を通じて上昇してきたことを、後者は高所で涵養された低温地下水が亀裂などを通じて急速に流入したことを示唆する。

水温と酸素安定同位体比の関係性に着目した解析（図3）、涵養標高の高い地下水は深部を、涵養標高の低い地下水は浅部を通過しているという、山地における一般的な水理モデルと整合的な結果が得られた。また、下降流を示す地下水群では水温と同位体比に比較的良好な相関が認められたのに対し、上昇流を示す地下水群ではその相関が不明瞭であった。これは、深部で加温された地下水が涵養標高と水温の関係を曖昧にしているためと考えられる。

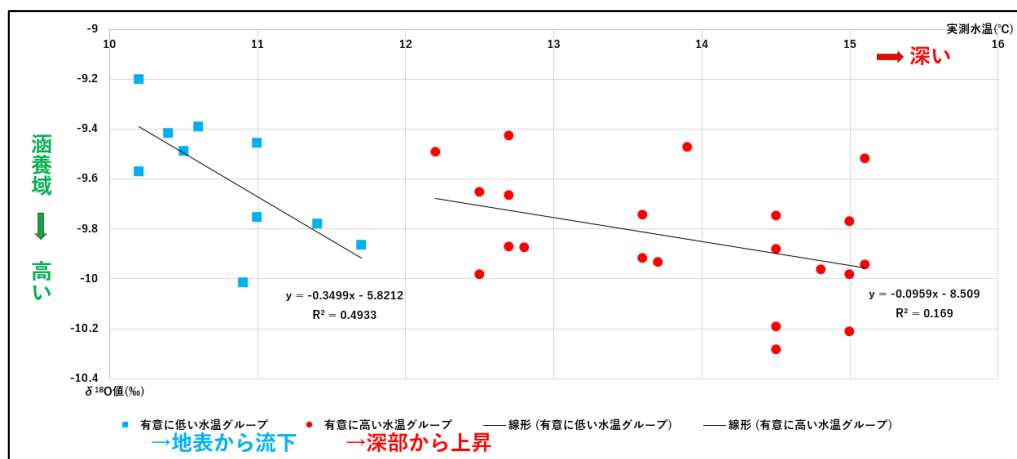


図3. 理論値と実測値に有意に差のある水温と酸素安定同位体比の関係。

さらに、年代測定によって滞留時間が判明している地下水についても、水温および酸素安定同位体比との関係を図4に示した。年代測定の結果、地下水の滞留時間は11～21年の範囲であり、滞留時間を利用して地下水の流動速度を検討することが可能となった。低標高涵養・浅部通過の地下水が21年の滞留時間を示した一方で、高標高涵養・深部通過の地下水は14年であった。これは、滝坂地すべり地においては、地下深部を通過する地下水が必ずしも流速が遅いとは限らないことを示す。

以上の成果より、滝坂地すべり地における地下水動態の一端が明らかとなった。今後も継続的な観測および解析を通じて、当該地域の水文地質構造のさらなる解明を進めていく予定である。

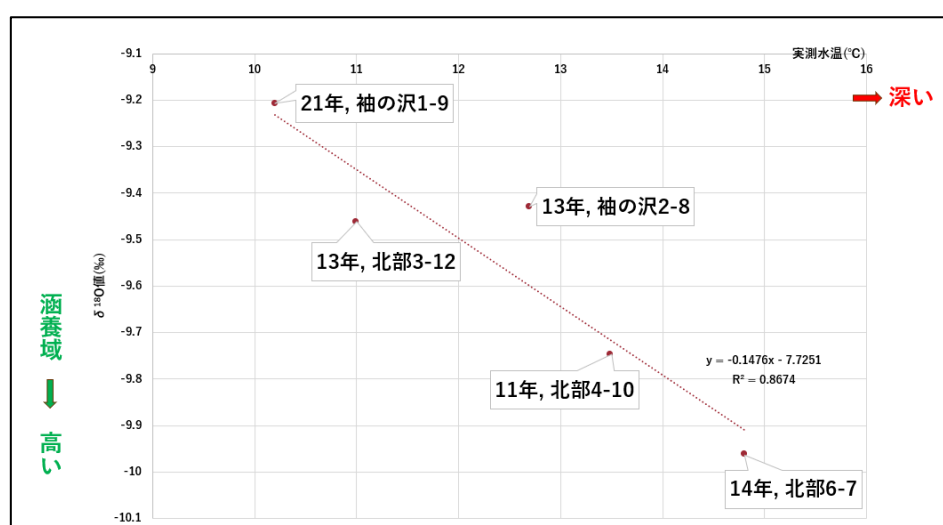


図4. 年代測定試料における水温と酸素安定同位体比の関係およびその滞留時間。

【研究成果・まとめ】

- (1) BV-11 孔における水温および電気伝導度の検層結果から、地下深部において異常な地温勾配が確認された。深度 100 m 以浅で地温勾配が低いことについては、BV-11 孔が尾根付近に位置する地形的条件から、卓越した鉛直下降流により低温の地下水が速やかに流下・供給されている可能性が考えられる。
- (2) 同孔の深度 100 m 以深の定点における簡易観測の結果、水位の低下に伴い水温および電気伝導度に上昇傾向が認められた。この変化は、鉛直下降流による低温地下水の供給が次第に減少し、その影響を受けない状態へと遷移する過程を示している可能性がある。
- (3) 2023 年から 2024 年にかけて採取された試料の酸素安定同位体比は、2019 年のデータと比較して有意に高い値を示した。トンネル内の各排水ボーリング孔における変動を解析した結果、2019 年時点で酸素同位体比が低かった孔の排水において、2023 年までに高い値への変化が確認された。このことは、2019 年当時には涵養標高 500 m を超える地下水が排出されていたが、2023 年には地すべり地付近で涵養された地下水に置き換わった可能性を示唆している。
- (4) 排水トンネルにおいて実測された水温と、地表面の標高および地温増加率から算出される理論的地下水温とを比較した結果、理論値に対して有意に高いまたは低い実測値が確認された。前者は地下水の上昇流、後者は下降流の存在を示唆する。
- (5) 理論的地下水温と比較して有意な差異を示す地下水に着目し、水温と酸素安定同位体比の関係を検討した。その結果、涵養標高の高い地下水は主に深部を、涵養標高の低い地下水は主に浅部を流動していることが、大局的な傾向として示された。
- (6) 年代測定の結果、地下水試料の滞留時間は 11~21 年と推定された。この滞留時間を基に流動経路ごとの地下水の流動速度を考察したところ、深部を経由する地下水よりも浅部を経由する地下水の方が長い滞留時間を有することが判明した。これにより、滝坂地すべり地においては、地下深部を通過する地下水が必ずしも遅い速度で流れているとは限らないことが明らかとなった。

参考文献

- 1) 堀耕陽, 2021MS, 福島県滝坂地すべりにおける水文地質学的特徴 水収支による地下水の流出解析. 新潟大学理学部卒業論文, 1-43.
- 2) 相楽渉, 2005, 大規模地すべり地における地下水流動特性に関する研究. 新潟大学博士論文, 1-128.
- 3) 相楽渉・山邊康晴・佐藤修・大海寺勲, 2003, 大規模地すべりの地下水流動特性～福島県西会津町滝坂地すべりを例として～. 日本地すべり学会誌, **40**, 34-40.
- 4) 相楽渉・丸井英明・吉松弘行, 2005, 大規模地すべり地の地下水流動特性に関する考察～東北地方の第三紀層地すべりを例として～. 日本地すべり学会誌, **42**, 51-62.
- 5) 瀬戸朝香, 2020MS, 福島県滝坂地すべりにおける地下水の水文地質学的研究. 新潟大学理学部卒業論文, 1-56.
- 6) 鈴木将之, 2003, 地すべり地における地下水挙動の地球化学-福島県滝坂地すべり地を対象として-. 新潟大学博士論文, 1-124.
- 7) 鈴木将之・佐藤修, 2002, 同位体からみた福島県滝坂地すべり地における地下水の起源. 日本地すべり学会誌, **39**, 33-39.
- 8) 鈴木将之・佐藤修, 2003, 水質からみた福島県滝坂地すべり地における排水機構. 日本地すべり学会誌, **40**, 117-123.

【参考資料（学会発表）】

清瀬莉花・渡部直喜・上松昌勝・相楽 渉・清水一浩・渡邊重紀：多変量解析に基づく滝坂地すべり地の深層地下水の形成過程，日本地すべり学会第 63 回研究発表会（宮城大会）