

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 6 月 9 日現在

機関番号：82111

研究種目：研究活動スタート支援

研究期間：2013～2014

課題番号：25892030

研究課題名(和文)融雪水と広域流動系を考慮した地すべり地の地下水起源推定手法の開発

研究課題名(英文) Estimation method of groundwater origin in a landslide block based on snowmelt effect and regional groundwater flow system

研究代表者

土原 健雄 (Tsuchihara, Takeo)

独立行政法人農業・食品産業技術総合研究機構・農村工学研究所・資源循環工学研究領域・主任研究員

研究者番号：30399365

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,000,000円

研究成果の概要(和文)：対象地すべり地において、深度別の地下水の水素・酸素安定同位体比分布及び不活性ガスおよび放射性同位体による年代推定結果から、地下水は混合が少ないまま多層的に流動し、ブロック外も含めた異なる地域から涵養を受けることが示された。流域内の河川水の水素・酸素安定同位体比は、融雪期を除いた3時期は類似した高度効果を示した。これより、出水期の一時的な同位体分布を示す融雪期を除いた他時期の高度効果が、地すべり地の涵養域の推定に有効といえる。これらのトレーサーを組み合わせることで、積雪地域の地すべり地の地下水の涵養域を推定できることが示された。

研究成果の概要(英文)：The stable isotope compositions of deuterium and oxygen-18 of groundwater, and age-dating using an inactive gas and radioisotope indicate the multi-layered groundwater flow system in the landslide block, and the difference of recharged areas including the outside of the landslide block. The clear and similar altitude effect of the stable isotope ratios of stream water in the regional watershed was observed in 3 seasons except snowmelt season. The stable isotope ratio of spring run-off in the snowmelt season is different from in other seasons, and therefore the altitude effect except in the snowmelt season can be effective for estimating groundwater recharged areas. It is thus deduced that when used together, these environmental tracers applied in this study can help to know the groundwater flow systems and the recharged area in the landslide block in snowy region.

研究分野：水資源工学

キーワード：地すべり 地下水涵養 融雪 同位体

1. 研究開始当初の背景

地すべりの発生要因には、地盤の脆弱性による「素因」と外的因子による「誘因」がある。「誘因」の中では雨と雪が最も重要であり、これらは地下水という形で直接地すべりに影響する。特に積雪地域では、平成 24 年 3 月の新潟県板倉地域、平成 21 年 2 月の山形県七五三掛地域など大規模な地すべりが頻発している。これらは大量の融雪水が地下へ浸透したことが原因と見られ、融雪水を考慮した地すべり地の地下水の流れを正確に把握し、適切な対策を講じることは、防災上の喫緊の課題となっている。

積雪・融雪期の間隙水圧の挙動と地すべり変位の関係については現地観測から明らかになりつつあるが、どこで浸透した融雪水が、どの程度地下水に寄与するかといった点については未解明なままである。特に初生的な大規模な変位は、深部のすべり面において発生することから、そのすべり面に作用する深層地下水の涵養源として、広域的な融雪水や降雨の影響を十分に検討する必要がある。

広域の降水の酸素・水素安定同位体比は、標高が高くなるにつれ軽い同位体の割合が高くなる高度効果を示し、その特性を利用し、広域的な地下水の涵養源を評価する手法が適用されてきているが、地すべり地においてはその有効性が十分に確認されていない。また、雨と雪では生成される温度環境の違いから同位体比の分布が異なるといわれており、降雨の高度効果のみで地下水の起源を推定すると見かけと異なる位置で涵養されたと誤る可能性がある。上記より、積雪・融雪を考慮した地すべり地の地下水の涵養域推定法については十分確立されていないのが現状である。

2. 研究の目的

本研究では、複数の環境同位体等を指標とし、積雪地域の地すべりブロック内外の降雨、降雪、融雪水、地表水、地下水の同位体分布特性から、融雪水・地すべりブロック外の広域流動地下水の影響を考慮し、地すべりのすべり面に作用する地下水の涵養域を推定する手法を開発することを目的とする。

3. 研究の方法

(1) 積雪・融雪地域の地すべり地及びその流域内の地表水、地下水、天水の採取

積雪・融雪地域の地すべり地及びその流域内の地表水、地下水、天水の採取を行い、水素・酸素安定同位体比 (δD , $\delta^{18}O$)、放射性同位体トリチウム、六フッ化硫黄 (SF_6)、主要イオンの分析を実施した。本研究では、2009 年に大規模な地すべりが発生した山形県鶴岡市七五三掛区域の地すべり地およびその周辺流域を対象とした。

地表水については、図 1 に示すように、最高標高地点の月山(標高 1,984m)から地すべりブロックが位置する北西側の流域を中心

に、標高が異なる小集水域の河川水の採取を行った。地すべりブロックの標高がおよそ 250~350m であるのに対し、採取した河川水の集水域の平均標高は 170~1,370m であった。なお、ここでの標高は採取した地点ではなく、50m メッシュ標高データより算出した集水域の平均標高である。採水は、季節による差異を比較するため、2, 5, 8, 11 月に実施した。この際、降雨イベントの影響が少ない河川水の基底流を採取するため、採取時は無降雨期を選定した。ただし、5 月は融雪の影響が残っており、融雪出水により河川水が増水する時期にあたる。

地下水については、地すべりブロック内において、観測孔内の地下水及び対策工(ディープウェル、集水井)より排出される地下水の採取を行った。観測孔においては井戸用採水器を用いて、対策工においては排水される地下水を直接採取した。

降水については、蒸発防止機構を設けた採取器を標高が異なる地点に設置し、約 1 ヶ月ごとに定期的に回収を行い、降雨を採取した。ただし、冬季の積雪期間は採取器を設置せず、積雪については、積雪上面より 50cm を塩ビ管により採取し、融解させた水を試料とした。これらサンプルの採取は当該研究期間に行ったが、比較のために当該研究期間以外に採取したサンプルの分析結果についても併せて検討を行った。

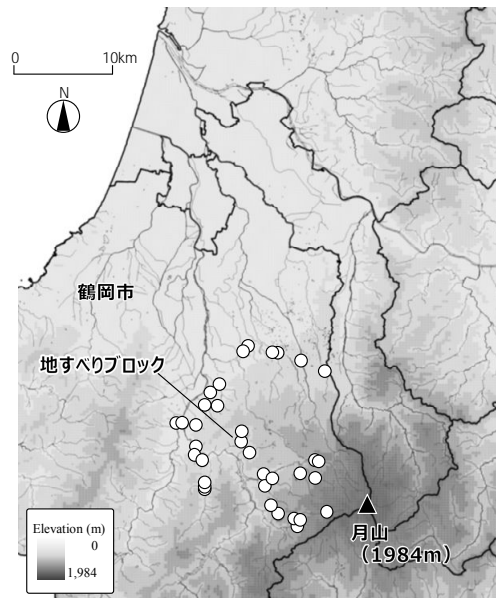


図 1: 河川水採取地点位置図

(2) 水質分析方法

δD , $\delta^{18}O$ の測定は、それぞれ水素、二酸化炭素ガスを試料瓶の気相部分に加え、水とガスを同位体交換平衡の状態にさせ、得られた平衡ガスを安定同位体比質量分析計 (Thermo Fisher Scientific 社製, DELTA V Advantage) に導入し、測定を行った。放射性同位体トリチウムについては、固体高分子電解質型自動トリチウム濃縮装置を用いて電解濃縮を行い、

蒸留精製した試料を液体シンチレーションカウンタ (ALOKA 社製, LSC-LB5) により測定した。SF₆ については、試料水中の SF₆ を純窒素のパプリングによって追い出し、冷却トラップに捕集後、ECD 検出器付きガスクロマトグラフ (島津製作所製, GC-8A) により測定した。主要イオンについては、イオンクロマトグラフ (東亜 DKK 社製, ICA2000) により測定を行った。重炭酸イオン (HCO₃⁻) は滴定法 (pH4.8 酸消費量) により測定を行った。

4. 研究成果

(1) 地すべり地内の地下水の同位体組成

異なる深度で採取した地下水の δ¹⁸O と EC の分布を図 2 に示す。30m 未満の浅い観測孔は全開口であるが、地表面付近の浅層地下水とみなし、図では採水深度を地下水の深度としている。地すべりブロック内の地下水は水深が深くなるほど δ¹⁸O は低下、EC は増加する傾向を示した。また δD は -68.45 ~ -48.59‰ を示し、δ¹⁸O と同様に、深度が大きくなるにつれて δD は低下する傾向を示した。EC や水質組成については地下水が流動する過程で通過した地層の種類や地層との接触時間によって変化する可能性があるが、δ¹⁸O、δD についてはそれらの変化は原則として生じておらず、涵養域の違いにより生じると考えられる。次々節で示すように、天水の δ¹⁸O、δD は高度効果の影響により標高が高いほど、その値は低下する。つまり、地すべり地の地下水は、ブロック上流域を含めて異なる標高から涵養された地下水の供給を受けていることを示すと考えられる。また、図が示すように、地下水の δ¹⁸O、EC は概ね深度ごとに段階的に変化していることから、地すべりブロック内の地下水は、多層的な流動機構を有し、混合が少ないままピストン流によって流動していると考えられる。

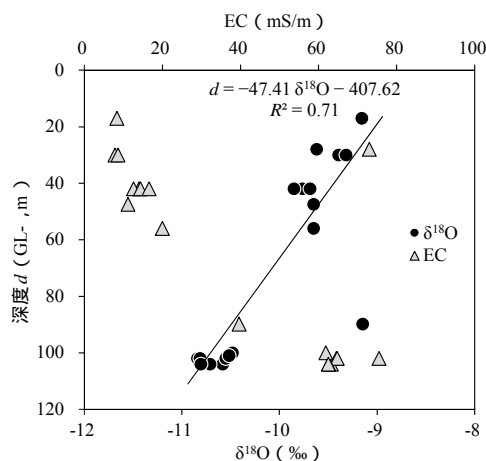


図 2：地下水の深度別 δ¹⁸O 及び EC 分布

(2) 地すべり地内の地下水の滞留時間

地すべり地の地下水の滞留時間は、SF₆ を指標としておよそ 4 ~ 16 年と推定され、涵養年代は 1997 ~ 2009 年であった。図 3 に地下

水の採取深度と涵養年代の関係を示す。比較的浅部の地下水 (図中の DW2, CW3) は若い。浅いが泥岩を通過する集水井 (同 CW1, 2) の地下水は相対的に滞留時間が長い。また、深部まで到達するディープウェルはそれぞれ異なった涵養年代 (2001 ~ 2008 年) を示した。これは同程度の深さのディープウェルであっても異なる流動層の地下水を排出しているためと考えられる。また、すべり面付近の地下水 (図 4 中の OW1) はトリチウムを指標として、少なくとも 60 年以上前に涵養された相対的に古い地下水であることが確認された。涵養年代が異なり、地下水の滞留時間が長くなると、地下水の水質は流動過程における粘土鉱物とのイオン交換によりその組成に変化が生じる。特に、イオン交換による Ca²⁺、Mg²⁺ の減少 (と Na⁺ の増加) と地層からの溶出による HCO₃⁻ の増加により、地下水涵養年代が古いほど (Ca²⁺+Mg²⁺)/HCO₃⁻ 比は減少する傾向にある (図 4)。推定された地下水の滞留時間は、流動過程による地下水の「化学的進化」として生じた水質変化と整合的であり、年代推定結果は妥当といえる。

これらの結果より、ブロック外も含めた異なる涵養域から滞留時間の異なる地下水が地すべり地に流入していることが推察され、水素・酸素安定同位体比による涵養域区分の有効性が裏付けられたといえる。

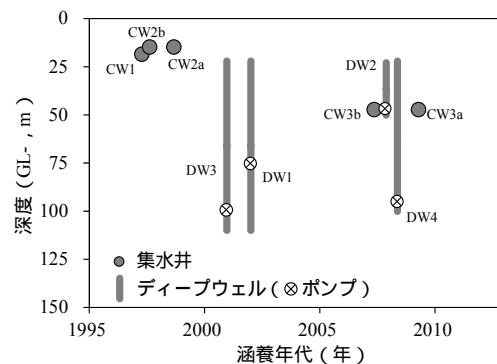


図 3：地下水の採取深度と涵養年代の関係

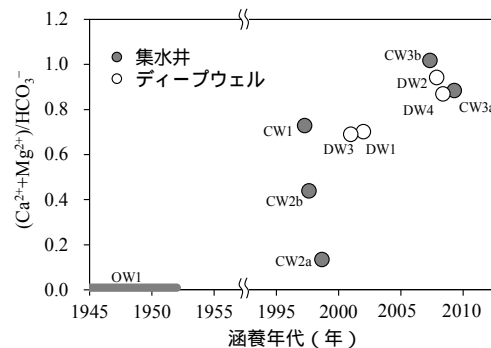


図 4：地下水の採取深度と涵養年代の関係

(3) 地すべり地を含めた流域内の同位体組成および高度効果 河川水の水素・酸素安定同位体比 (δD,

$\delta^{18}\text{O}$)と標高が大きくなるにつれて同位体比が低下する高度効果が確認された(図5). 図6に河川水の $\delta^{18}\text{O}$ と集水域の平均標高の関係を示す. 夏季(8月), 降雪初期の秋季(11月), 冬季(2月)は同位体比分布の差異は小さく同様の傾向を示した(図6). 一方, 融雪期(5月)は特に $\delta^{18}\text{O}$ が他の3時期と異なる傾向を示した. これは, 採水を実施した5月は低標高域では融雪が終了しているが, 標高が高い地域においては融雪水が河川に多く供給されている時期であり, 無降雨期の基底流を採取した3時期とは異なる同位体組成となっていたためといえる. これより, 融雪による出水(増水)によって一時的な同位体比分布を示す融雪期を除いた他時期の高度効果が, 地すべり地の涵養域の推定に有効であることが明らかとなった. また, 流域内の湧水についても, $\delta^{18}\text{O}$ と採取地点標高は河川水と同様, 標高が高いほど $\delta^{18}\text{O}$ が低下する高度効果が見られた. ただし, 湧水は正確な集水域が不明であるため, 湧水の示す同位体比が採取地点の標高を代表していることにはならない. このため, 高度効果の推定には河川水のデータを用いる方が妥当と考えられる.

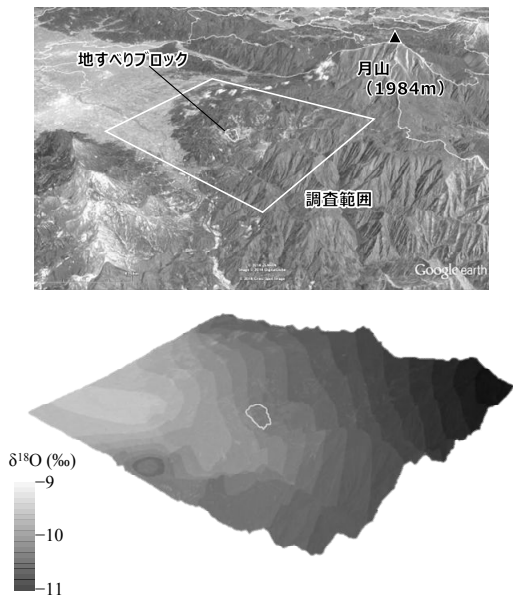


図5: 河川水の $\delta^{18}\text{O}$ の空間分布

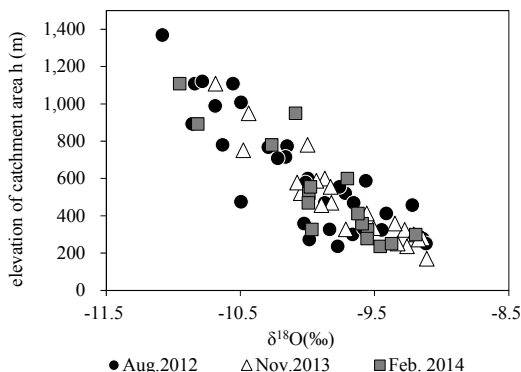


図6: $\delta^{18}\text{O}$ と集水域の平均標高との関係

(4) 雨と雪の同位体比の差異

流域内で採取した降雨と雪試料の同位体比は, 他の地域との比較も行ったところ, 雨と雪が異なる切片を持つ直線上に分布することが示された(図7). これは, 夏季と冬季の気団の違いに起因すると考えられ, 夏季の降水が太平洋側からの湿潤な気団の影響を強く受けるのに対し, 冬季は大陸側からの乾燥した気団が日本海上において雨雲を生成することによるものといえる. 地すべり地の地下水, また流域内の異なる集水域の河川水はその雨と雪の両者の回帰直線の間に分布する. これは, 河川水の同位体比が, 降雨・降雪の同位体比の季節的な変動やバラつきが平均化されたものであることを示しており, 地下水の涵養域推定のためには, 河川水の高度効果の適用が有用であることを示している. ただし, 融雪期の河川水の同位体比は雪の回帰直線に漸近するため, 涵養域推定には適さないと考えられる. また, 雨と雪では回帰直線が大きく異なることから, d 値 ($\delta\text{D} - 8 \times \delta^{18}\text{O}$) は地すべり地の地下水への降雨と降雪の影響(寄与度)を評価する指標として活用できると考えられる.

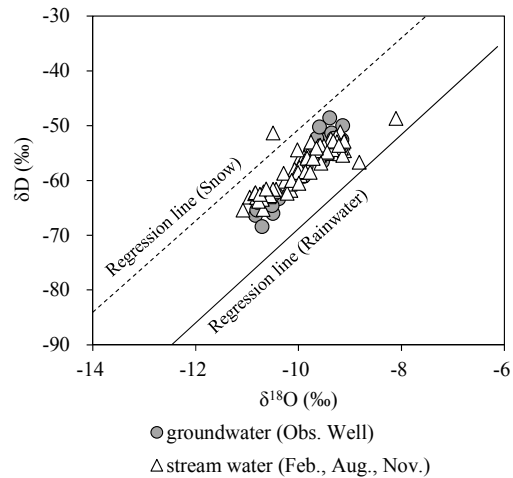


図7: 地下水, 河川水, 降雨, 降雪の $\delta^{18}\text{O}$ と δD の関係

以上より, 地すべり地内の地下水の水素・酸素安定同位体比, 不活性ガス, 流域内の融雪期を除いた河川水の水素・酸素安定同位体比, 降水の水素・酸素安定同位体比を測定することにより, 広域流動地下水の影響を考慮した地すべり地の地下水の涵養域を推定できることが示されたといえる. 地すべり地域において涵養域が推定されることにより, 地すべり保全区域の設定, 浸透流解析等の解析範囲の適切な設定, 地表排水工の選択の根拠等への活用が期待される.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計1件)

土原健雄, 奥山武彦, 吉本周平, 白旗克志, 石田 聡, 六フツ化硫黄を指標とし

た山形県七五三掛地すべり地における地下水の年代推定，農業農村工学会論文集，査読有，294，2014，pp.65-74．

〔学会発表〕(計3件)

土原健雄，奥山武彦，吉本周平，白旗克志，石田 聡，水素・酸素安定同位体比の高度効果からみた地すべり地の地下水涵養源の検討，平成26年度農業農村工学会大会講演会要旨集，pp.630-631，2014年8月28日，朱鷺メッセ新潟コンベンションセンター（新潟県新潟市）

土原健雄，奥山武彦，吉本周平，白旗克志，石田 聡，水素・酸素安定同位体比，六フッ化硫黄，トリチウムを指標とした地すべり地における地下水流動特性の検討，日本地下水学会2014年春季講演会予稿集，pp.90-93．2014年5月24日，東京大学（東京都文京区）

土原健雄，吉本周平，石田 聡，白旗克志，降水・河川水・地下水の長期同位体変動からみた地下水浸透特性の検討，日本雨水資源化システム学会大会第21回研究発表会講演要旨集，39-44，2013年11月2日，島根大学（島根県松江市）

6．研究組織

(1)研究代表者

土原 健雄（TSUCHIHARA Takeo）

独立行政法人農業・食品産業技術総合研究機構・農村工学研究所・資源循環工学研究領域・主任研究員

研究者番号：30399365