■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～

The groundwater flowing features in large scale landslide

～Takisaka landslide in Fukushima Pref.～

財団法人 砂防・地すべり技術センター／相楽 渉
SABO Technical center／Wataru SAGARA

新潟大学積雪地域災害研究センター／佐藤 修
Research Institute for Hazards in Snowy Areas, Niigata University
Osamu SATO

財団法人 砂防・地すべり技術センター／山邊康晴
SABO Technical center／Kousei YAMABE

国土交通省北陸地方整備局阿賀野川工事事務所／大海寺 勲
Aganogawa Work Office of Hokuriku Regional Bureau, MLIT
Isao DAIKAIJI

キーワード：地下水，水質，解析手法

Key words：groundwater, water quality, analysis method

1. まえがき

地すべり発生の原因は，地形・地質特性の素因と，地下水位（間隙水圧）の上昇をもたらす融雪，降雨による誘因とに大別される。地下水位の上昇は，地すべりの発生が豪雨時，融雪時に多発することからみて発生原因の主要なものと考えられている。地すべり調査における地下水の調査は，発生機構の解明，対策工法の決定等に必要不可欠なものである。地下水調査には，地下水検層，地下水追跡調査，地下水位調査，間隙水圧測定，揚水試験，地下水温度調査，水質調査がある。これらの調査・試験は，必要に応じて選択され各地すべり地において行われる。調査結果をもとに地すべりの機構解析が行われ，対策工施工時の基礎資料とされる。しかし大規模かつ複雑な地下水流動機構をもつ地すべりの場合，個々の地下水調査結果を総合的視点から解析しなくては有益な地下水情報が得られない。

滝坂地すべりは，面積が大きくすべり面が深い日本有数の大規模な地すべりである。当該地すべりの活動誘因となっている地下水について，これまでその流動経路，賦存状況の調査が実施され，対策工立案において重要な基礎資料となった。しかしながら，地すべり地における地下水水質の解析手法は確立されていないのが現状である。本報告では，大規模地すべりににおける地下水賦存状況，地下水流動状況の新たな知見を得るため，これまでの水質分析結果，地下水追跡結果，地下水位観測結果を中心とした調査資料をとりまとめ，総合的視点から地下水解析を行い，地下水水質調査による地下水賦存状況を解析した結果について述べる。

2. 調査地域概要

2.1 調査地域の概要

滝坂地すべりは福島県西会津町豊洲地内に位置している（図－1）。JR磐越西線上野尻駅の北2.5kmにあり，

図－1 滝坂地すべり位置図

新潟県境まで約4kmの地点にある。地すべり地末端を一級河川阿賀川が北流し，その右支である笹川が地すべり地南端を西流して阿賀川と合流する。

滝坂地すべりの規模は，南北約2,100m，東西約1,300m，面積約150haである。すべり面は調査ボーリング，孔内傾斜計，すべり面検出器による測定，観測結果から強風化凝灰岩中，及びその下面と判断された。この位置をすべり面とした地すべり層厚は南部ブロックで最大約100m，北部ブロックで最大約120mである。航空写真測量による移動状況調査（昭和50年～60年実施），現地踏査（昭和60年～平成2年実施），GPS測量結果（平成7年～）から確認された変動状況の相違により，滝坂地すべりは堰沢を境として大きく北部ブロックと南部ブロックに区分されている。さらに昭和35年の大変動時に形成された地すべり変動地形の状況から北部ブロックは3地区に，南部ブロックは6地区に区分されている（図－2）。

滝坂地すべり地は，明治年間，第二次世界大戦後に顕著な活動が記録されている。明治21年に滝坂地すべり防

図－2 滝坂地すべり地ブロック区分図

止区域の西部に位置する松坂地区において地すべりが発生したとされるが、現在のように広範囲に変状が発生したという記載はない。その後安定化の方向に向かいつつあったが、明治38年に松坂地区と堰沢を隔てた南側に位置する常盤地区一帯で地すべり活動が活発化し、一部の民家は移転せざるをえなかった。それ以降地すべり活動は、松坂、常盤地区を主として緩慢な移動を繰り返した。昭和に入って大規模に地すべりが活動したのは昭和35年

5月1日であった。このときの発生原因については特定されていないが、地すべり防止区域の実に67%の面積が地すべり活動により変動した。その後昭和40年代前半は地すべり活動は緩慢となったが、昭和44年8月の降雨を契機として再び地すべりが活動し、阿賀川河岸部の隆起が著しくなった。昭和61年より北部ブロックを含めた全域の調査・対策工が福島県により着手された。

平成7年には直轄地すべり対策事業として国の所管となり、調査、対策が継続され現在に至っている。

2.2 地質の概要

滝坂地すべり地の地質平面図を図－3に示す。滝坂地すべり地の地質構成は、基盤の花崗閃緑岩を新第三系の花崗砂岩（利田層：Gss）が不整合に覆い、その上位に凝灰岩類（荻野層：OGr～OPt）、泥岩類（縄沢層：Md）が重なる。地すべり地の東西には南北方向の断層（F-1、F-2）が分布し、断層に挟まれた地すべり地塊（主に湯出野沢地区）には新第三系、それ以外の地域には主に花崗岩が露出している。東西に露出している花崗岩の性状は異なっており、F-1断層より東方の大石田山地区ではマサ化が著しく深層風化が激しいのに対し、F-2断層西方の三年林地区では風化層が薄く新鮮・堅硬な花崗岩が浅く分布している。また、すべり面を形成している凝灰岩類の最下部層である緑色凝灰岩層（OGr）は、乾燥による亀裂発達が著しく、水を含むと泥濘化する特徴がある。地質構造は、花崗岩、新第三系ともに東西方向に見ると5～15°で東方へ傾斜し、南北方向には概ね5～10°で南方へ傾斜している。

2.3 既往地下水調査

滝坂地すべりでは地すべり地内に設置された地下水位観測孔による地下水位の継続観測、地下水の流路を判断するための地下水追跡調査（昭和37年から38年に実施）、

図－3 滝坂地すべり表層地質平面図

平成12年度滝坂地すべり対策検討委員会資料より引用、一部修正

地下水の賦存状況, 流動経路を解析する目的で地下水水質調査が行われている。平成13年度までの主要な水質調査は以下のように実施された。

- ・昭和37年 松坂, 湯出野沢, 常盤, 引牧, 袖の沢等の湧水, 表流水水質調査
- ・平成2年 袖の沢, 湯出野沢, 堰沢, 笹川, 阿賀野川の集水井排水, 表流水水質調査
- ・平成7年 沼田, 大石田, 堰沢, 大石出口, 袖の沢等の地表水水質調査
- ・平成9年 袖の沢排水トンネル排水水質調査
- ・平成10年 ボーリング孔内水採水・水質調査
- ・平成11年 湧水期水質調査
(平成11年9月29日～10月1日)
- ・平成12年 豊水期水質調査
(平成12年7月20日～22日)
- ・平成13年 融雪期水質調査
(平成13年4月17日～19日)

3. 地下水流動機構

3.1 地下水形成機構

平成12年度までの地下水解析では, 水質分析結果(ヘキサダイアグラム, キーダイアグラム)を用いて地下水水理構造が検討された。この結果, 滝坂地すべり地の地下水構造が徐々に明らかになってきた。

滝坂地すべり地では, 凝灰岩層の下位に他の岩層と比べると比較的透水性の高いルーズな花崗砂岩が存在する。この上部の緑色凝灰岩層最下部にすべり面が存在し, そこに作用する地下水が, すべり面のせん断抵抗力を低下させ地すべり滑動を誘発すると考えられている。地すべり活動を抑制するためにはすべり面に作用する地下水がいかなる起源の水なのかを把握し, これを排除する対策工の効果的な配置が重要である。このためには, 地すべり地内における各岩種毎の水質の違いを把握し, すべり面にどのような水が作用するか特定することが必要である。

滝坂地すべり地における各岩種毎の地下水水質特性を把握するため, 平成11年度には湧水期(平成11年9月29日～10月1日)に, 地すべり地内のほぼ全域において水質調査が実施された。平成12年度は, 地すべり地の地下水水質の季節的差異の有無を確認し, 地下水流動経路を推定することを目的として, 豊水期(平成12年7月20日～7月22日)の水質調査が行われた。この結果, 湧水期と豊水期の比較では, 局所的な水質組成の違いが確認された。滝坂地すべりでは, 過去融雪期に活発に滑動した履歴がある。このため, 平成13年度にも地下水水質の季節的差異の有無を確認するため融雪期(平成13年4月17日～4月19日)に水質調査が行われた。

平成12年度, 平成13年度の滝坂地すべり地における岩種毎の地下水の水質タイプを円グラフに表した(図-4)。

平成12年度の調査時期は7月(豊水期), 平成13年は

図-4 滝坂地すべり地における岩種別の地下水の化学組成

4月(融雪期)である。通常地下水の水質タイプ分類にはトリリニアダイアグラムが主に用いられるが, 今回は陽イオン, 陰イオンそれぞれにおいて, 濃度の高いイオンで水質分類を行った。これにより水質の季節的変化が視覚的にとらえることができる。その結果以下のような傾向が見られた。

- ・泥岩中にはNa-HCO₃, Na-SO₄, Ca-SO₄型の水が卓越する。
- ・花崗岩体(大石田山)の水はNa-Cl, Na-HCO₃型の地下水である。
- ・凝灰岩中の水は泥岩, 花崗岩中双方に見られる型の地下水が分布する。

泥岩中の地下水は陽イオンにNa⁺, Ca²⁺, 陰イオンはSO₄²⁻が卓越する。いわゆる新潟県の第三紀泥岩に典型的に見られるタイプと同様である。花崗岩の陽イオンNaは岩石中の主要造岩鉱物であるNa長石からもたらされたもの, HCO₃⁻は地下におけるCO₂ガス(地下深部からの脱ガス作用によるものと, 生物による呼吸によって供給されたものが考えられる。)から形成したものである。凝灰岩中の地下水は泥岩, 花崗岩双方に見られるタイプの地下水が存在する。凝灰岩層には上部の泥岩からの地下水の流入と, 花崗岩からの地下水の流入が考えられる。特に注目すべき点として, 融雪期にCl⁻イオンに卓越する地下水が大石田山花崗岩地帯に分布することが確認されたことである。

鈴木・佐藤(2000)は, 次式で示すソーンスウェイトの最大可能蒸発散量を考慮することにより, 天水と風送塩としてもたらされるCl⁻イオン濃度の上限は6.4mg/lであると報告している。

図-5 地下水のClイオン濃度平面分布 (地質凡例図は図-3 と同様)

$$E_{PT} = 0.533D_0(10t/J)^a$$

$$a = 6.75 \cdot 10^{-7}J^3 - 7.71 \cdot 10^{-5}J^2 + 1.79 \cdot 10^{-2}J + 0.49$$

$$J = \sum (t_i/5)^{1.514}$$

ここで E_{PT} : 月平均日蒸発散量 (能) (mm/day)

D_0 : 可照時間 (12hr/day)

t : 月平均気温 (°C)

j : 月 (1~12)

J : 年の指数

この濃度よりも高いCl⁻イオン濃度を持つ地下水は地下深部に起源を持つと考えられる。

平面的に見ると, Cl⁻イオン濃度の比較的高い地下水が, 北部ブロック大石田山, 湯出野沢頭部, 堰沢に分布している (図-5)。特にQ-Q' 測線上は地形上の弱線, 陥没帯, および断層付近に位置しており, 測線上のBV-224, 225, 226孔の水は高いCl⁻イオン濃度を呈している。表-1 はQ-Q' 測線上の調査孔における水質分析地点の地質とCl⁻イオン濃度の一覧である。いずれの調査孔の地下水も最大で10mg/l以上のCl⁻イオン濃度を示す。大石田山花崗岩体中BV224孔の水のCl⁻イオン濃度は最大で28.02mg/lと特に高い値を示している。当該孔では深度30m, 80mにおいて, いずれも融雪期にCl⁻イオン濃度が上昇する。深度的に50mも異なる位置のCl⁻イオン濃度が同様に高くなることから, 地下深部に存在するNa-Cl

型の深層地下水が断層, 地質構造上の弱部を通過して上昇してくることが推定される。

3.2 地下水流動機構

過去に滝坂地すべりが大きく活動したのは, 昭和35年の5月, 平成6年の3月である。3月の融雪期と, 融雪

表-1 Q-Q' 断面上の調査孔における水質分析地点の地質とCl濃度

ボーリングNo.	採水地点深度 (m)	採水地点の地質	Cl濃度 (mg/l)
BV224	29.5~33	Gd	6.09~28.02
	43	Gd	8.9
	64	Gd	10.3
	80~81	Gd	5.15~24.4
BV225	22	Ot	8.4
	45	Ot~OGr	8.2
	52~55	OGr	8.1~11.2
	82	OPt	7.2
	120	Gss	6.9
BV226	52	OPt	13.0
	60~65	OPt	4.8~7.0
	90	Ot	8.0
	106~107	OGr~Gss	4.79~7.2

花崗閃緑岩・・・Gd
 浮石質凝灰角礫岩・・・OPt
 浮石質砂質凝灰岩・・・Ot
 緑色浮石質凝灰岩・・・OGr
 花崗砂岩 (ルーズ)、礫岩・・・Gss

図-6 平成13年度融雪期(4～5月)の大石田山地区の地すべり計器変動傾向
…平成13年度滝坂地すべり対策検討委員会資料より引用, 一部修正

図-7.1 H12.12/16～12/24(冬期)のQ-Q'断面における地下水の塩素イオン濃度分布
(地質断面図凡例は図-3同様, 以下図-7.2～7.5も同様)

図-7.2 H11.1(冬期)のQ-Q'断面における地下水のClイオン濃度分布

図-7.3 H11.9/29～10/1のQ-Q'断面における地下水の塩素イオン濃度分布

期後の5月に活動したことになる。平成13年度の融雪期(4～5月)の北部ブロック大石田山地区の計器による観測結果では, 当該地区が湯出野沢地区を押すような形態で変動していることが確認されている(図-6)。

Cl⁻イオン濃度の高い地下水が分布する, Q-Q'測線上(北部ブロック大石田山, 湯出野沢頭部)での地下水のCl⁻イオン濃度の断面分布を把握するため, 地下水試料の採水深度ごとにCl⁻イオン濃度をプロットした(図-7.1～5)。大石田山のBV224孔では他の時期と比較して相対的に冬期, 融雪期にCl⁻イオン濃度が高くなる。特に融雪期には28.02mg/lと最も高い値を示した。

北部ブロック主動域である湯出野沢, 及び融雪期に高い地下水のCl⁻イオン濃度を呈する大石田山をはじめとした滝坂全域の地下水流動機構についての考察を行うため, 今年度の地下水調査結果(水質と水位変動, 過去の地下水追跡調査結果)を含めた過去のデータを総合的に解析した。

図-8は, 地下水位とCl⁻イオン濃度変化との関係について解析するため, BV224孔地下水位変動図に, 採水時期を記載したものである。平成11年9月, 平成12年7月の試料は孔内水位が低い時期, 平成13年4月の試料は孔内水位が最も高い時期の水に相当する。この結果, 融雪期の地下水位は他の時期と比較し相対的に約5m上昇しており, 通常時5～7mg/l→融雪期28.02mg/lとCl⁻イオン濃度も高い。Cl⁻濃度の低い融雪水により孔内水位の上昇がおきたのであれば, Cl⁻濃度の低下が期待されるが, 観測結果は逆にCl⁻濃度が上昇している。すなわち, 融雪期のCl⁻イオン濃度(28.02mg/l)が天水から供給されたものではないから, この時期の大石田山花崗岩体中の孔内水位上昇には, Cl⁻イオンの卓越する深層地下水が関与していると判断できる。

滝坂地すべり地の各水位観測孔の水位変動パターンは

図-7.4 H12.7/20～7/22のQ-Q'断面における地下水の塩素イオン濃度分布

図-7.5 H13.4/17～4/19の融雪期のQ-Q'断面における地下水の塩素イオン濃度分布

図－8 花崗岩体中BV224孔内水位変動図

大きく分けて3種類が確認できる(図－9)。

- ・大石田山に代表されるような、個々の降雨には応答しないが、それぞれの季節の給水量に反応(Aタイプ)
- ・松坂地区に代表されるような降雨に対して地下水位の応答がよく、季節的変動が小さいもの(Bタイプ)
- ・上述の2タイプの中間的なもの(A-Bタイプ)・・・湯出野沢地区

地下水位が同じような変動状況を示すことは、地すべり地塊内部において同様な亀裂状況を呈していると考えられ、水みちとして繋がっているということが出来る。水みちとして繋がっている範囲では、地下水は水位の高い位置から低い位置に向かって流動すると考えられる。

昭和38年10月～12月にかけて、滝坂地すべり地の地下水流下経路を推定するため、重クロム酸カリウムをトレーサーとした地下水追跡調査が行われた。調査範囲は以下のとおりである。

- ・大石田山地区の北部
- ・松坂地区
- ・南部ブロック

この調査結果からは、北部ブロックでは北から南に流下する地下水経路、南部ブロックでは大石出口から阿賀野川に向かって東から西に向かう地下水経路が推定されている。今回区分した3タイプ(A, B, A-Bタイプ)の地下水を、同じ変動状況を示す観測孔の位置に平面図で落とし、更に昭和37, 38年の地下水追跡調査結果をも考慮した結果、滝坂地すべり地について現時点では図－10のような地下水流動機構が推定される。

北部ブロック(大石田山, 湯出野沢, 松坂地区)

→ 南部ブロック

大石田山 → 湯出野沢

大石出口 → 下沢の目

水質分析調査から得られた大石田山花崗岩体中を通過してくるC1型の深層地下水は、北部ブロック主動域である湯出野沢へ影響を与えている大石田山の地下水の変動に関与している可能性が高い。

4. 結 論

滝坂地すべりにおける過去の地下水調査結果を総合的に解析した結果、平面的な地下水の大まかな賦存状況は、北部ブロックから南部ブロックに連なる3系統の流れ、北部大石田山から湯出の沢に向かう流れ、南部ブロック大石出口から下沢の目に向かう流れが確認できる。また、北部ブロック主動域である湯出野沢の変動に影響を与えている大石田山地区を構成する花崗岩体中の地下水は、

図－9 滝坂地すべり地における孔内地下水位波形タイプ分類

図-10 滝坂地すべり地地下水位変動タイプ区分及び地下水の賦存状況

融雪期に孔内水位が平水位と比べ相対的に約5m上昇し、この時期に通常時5~7mg/l→融雪期28.02mg/lとCl⁻イオン濃度も高くなる。従って、当該地区の融雪期の地下水位の上昇には、花崗岩体中を通過してくる深層地下水の影響が関与する可能性が考えられる。大石田山の地下水賦存量に関しては調査段階である。また、地質構造上特定の位置を占めるすべり面に作用する深層地下水の関与度合が定量化されていない。今後、これら未解明の事象についてさらに調査を進めることが目標であると考えられる。

謝辞

本報告をまとめるにあたり、新潟大学積雪地域災害研究センター丸井英明教授には解析を行う上で貴重なご意見、ご指摘を多数いただいた。また、国土交通省阿賀野川工事事務所には貴重なデータを使用させていただいた。財団法人砂防・地すべり技術センター吉松弘行斜面保全部長には、全般的に多大なご支援、ご指導を賜った。ここに記してお礼を申し上げる次第である。

参考文献

- 1) 池谷 浩, 吉松弘行, 南 哲行, 寺田秀樹, 大野宏之(2001):

現場技術者のための砂防・地すべり・がけ崩れ・雪崩防止工事ポケットブック, 山海堂, 213p.

- 2) 渡邊一也, 坪井正由, 根本正一(1995): 東北の巨大地すべり…滝坂地すべり…, 地すべり, 第32巻, 第3号, pp.55-70.
- 3) 財団法人 砂防・地すべり技術センター(2001): 平成13年度滝坂地すべり対策検討委員会 委員会資料.
- 4) 財団法人 砂防・地すべり技術センター(2000): 平成12年度滝坂地すべり対策検討委員会 委員会資料.
- 5) 鈴木将之・佐藤修(2000): 福島県滝坂地すべり地の地下水の水質とその変動, 新潟大学災害研年報 第22号, pp.61-77.
- 6) 渡 正亮(1968): 地すべり調査と対策講座(I 地すべりの地下水とその調査) 全国地すべり対策協議会, 75p.
- 7) 古谷尊彦(1996): ランドスライド-地すべり災害の諸相-, 古今書院, 124p.
- 8) JAMES I.DREVER(1988): THE GEOCHEMISTRY OF NATURAL WATERS~SECOND EDITION~PRENTICE HALL, 151p.
- 9) W. Stumm・J.J. Morgan(著), 安倍喜也・半谷高久(訳)(1974): 一般水質化学(下), 共立出版, pp.361-367.
- 10) 佐藤 修(1993): 地すべり地における地下水水質調査法(その1), 地すべり技術, Vol.20, No.1, pp.11-23.
- 11) 佐藤 修(1993): 地すべり地における地下水水質調査法(その2), 地すべり技術, Vol.20, No.2, pp.18-28.
- 12) 佐藤 修(1994): 地すべり地における地下水水質調査法(その3), 地すべり技術, Vol.20, No.3, pp.16-26.
- 13) 佐藤 修(1990): 地すべり地内外の水質の特徴-第三系泥岩の地すべりを例として-, 地すべり, 27巻1号, pp.27-33.

(原稿受付2002年10月8日, 原稿受理2003年3月24日)