

玉の木地すべり地の地下水の水質*

—地すべり地の陸水の水質 5—

佐藤 修**

Water quality of the Tamanoki landslide area

— Chemical composition of ground water in landslide area 5 —

by

Osamu SATO

(Abstract)

This paper is dealing with classification of waters from the investigated area and weathering process in the Tamanoki landslide which occurred on the 15th of February, 1985.

The water was classified into three types, calcium bicarbonate type, sodium chloride type and valley water type which contained small amounts of electrolytes. The sodium chloride type water was found on the outskirts of a sliding mass and the calcium bicarbonate water was collected from a hole bored in the middle of the landslide. Their chemical composition was explained as the mixing of sea salt and dissolution products on weathering process.

Sea salt carried by strong wind was the main source of sodium chloride. Contribution of chemical weathering was estimated by subtracting the contribution of the sea salt from the analytical results. The main components of the remaining salt was calcium bicarbonate. The low concentration of the remaining calcium bicarbonate suggests weak chemical weathering in this area.

I は じ め に

これまで、新潟県下に広く分布する新第三紀層に生ずる、小出(1955)の地すべり分類による第三紀地すべりの地下水の水質について調査研究結果を報告してきた(佐藤, 1981; 佐藤, 1982; 佐藤・青木・矢沢・鈴木, 1984)。その結果、地すべりの後に湧出している地下水の多くは、雨水にみられない高濃度の塩化物イオンを含んでいたり、融雪水や、降雨が短時間の間に土壤に反応して出来たとは考え難い程高濃度の炭酸水素イオン、硫酸イオン、ナトリウムイオン、カルシウムイオン等を含んでおり、地すべり後の地下水の一部は長時間地下に滞留した古い地下水であると結論した(佐藤・青木・鈴木, 1983)。また

* 本研究の研究費の一部は、文部省科学研究費(No.59020203)自然災害特別研究突発災害研究費によった。また本研究の一部は速報として、新潟県青海町地すべり災害に関する総合的研究に発表した。

** 新潟大学積雪地域災害研究センター

虫亀や濁沢地すべり地の融雪期の地下水水質の観測結果から、融雪期や、その後に地すべり地で地下水位が上昇する時には、融雪水そのものが地下水表面に加わるのではなく、地下の深い部分の水が上昇してくることを明らかにした。

本研究の対象とした、新潟県青海町の玉ノ木地すべりは、古第三紀の凝灰岩の強く風化した崩積物中に発生したものであり(藤田, 1985; 吉村, 1985; 高浜, 1985), これまでに報告した地すべりとは地質, 地形条件をまったく異にしている。それ故, 水質もまったく異なっていることが予想される。本論では, 地すべり調査用に掘られたボーリング孔内の水と湧水の化学分析を行い, その化学組成から, 以下の諸点を考察する。

1. 地下水の分類と混合系の解析
2. 地下水質の形成過程と化学風化
3. 融雪水の挙動

なお, 試料の採取に協力いただいた, 新潟大学積雪地域災害研究センター技官・鈴木幸治氏, 水の分析を手伝っていただいた, 新潟大学農学研究科大学院生白田卓弘, 農学部4年生菅原修の両氏に対し謝意を表する。

II 調査地域

この地すべりは, 新潟県と富山県の県境を流れる境川の東, 新潟県西頸城郡青海町玉ノ木地区で融雪期の, 1985年2月15日発生した。地すべりの斜面長70m, 幅150m, 移動層約5m, 推定崩壊土砂量5万 m^3 の小規模なものであった。地すべりによる被害, 地すべり地の地形, 地質, 岩石・鉱物などの調査結果は, 自然災害特別研究突発災害研究成果(藤田編, 1985)としてすでに報告されており, また, その概要は本年報にも報告してあるので省略する。

III 水の分析方法

ボーリング孔からの採水には吉野計器製作所のSY-1K-B型採水器を用いた。採水した水はポリエチレンビンに蓄え, 実験室において0.45 μ のメンブランフィルターでろ過し, ろ液について既報の方法に従って分析を行った(佐藤, 1981)。

IV 水質の概況

水位のデータと分析結果を表-1に示し, 図-1に, 採水地点と同地点の水質をヘキサダイアグラムとして示した。

玉ノ木地すべり地の地下水の導電率は64~209 $\mu\text{s}/\text{cm}$ で, これまでに報告してきた, 新第三紀層の水の導電率[虫亀の最高値は5 ms/cm 以上であった(佐藤, 1983)]に比べて低い。

濃度の項を無視して主成分相互の組成を比較するために, 玉ノ木のトリリニアダイアグラムを図-2に, 虫亀と高倉の図を図-3に再録した(佐藤, 1981)。

虫亀の陰イオンは硫酸イオンが主要イオンである水がほとんどで, 塩化物イオンや炭酸水素イオンが主要である水が若干みとめられた。高倉では, 硫酸イオン, 塩化物イオンが最も多い陰イオンである水も存在するが, 主に炭酸水素イオン系の水であった。

これに対し玉ノ木の水は、硫酸イオンの寄与は10%以下ではほぼ一定で、陰イオンの組成の違いは、炭酸水素イオンと塩化物イオンの割合の差違にもとづくものであることが図-2の陰イオンの三角形からうかがえる。

同様に陽イオンもマグネシウムイオンの割合がほぼ一定で、カルシウムとアルカリ類との割合の相違によって、説明できることが図-2の陽イオンの三角形からよみとれる。これらをまとめたキ-ダイアグラムから、玉ノ木の水質は2、3の水質を異にする水の混合により説明しうるようにみえる。この点については次章で論議する。

既報の地すべり地では、地すべり地内の水の電解質濃度が高く、不動地では低い傾向が認められたが(佐藤, 1981, 1982), この地すべり地でも差は小さいながら、図-1からその傾向を認めることができる。

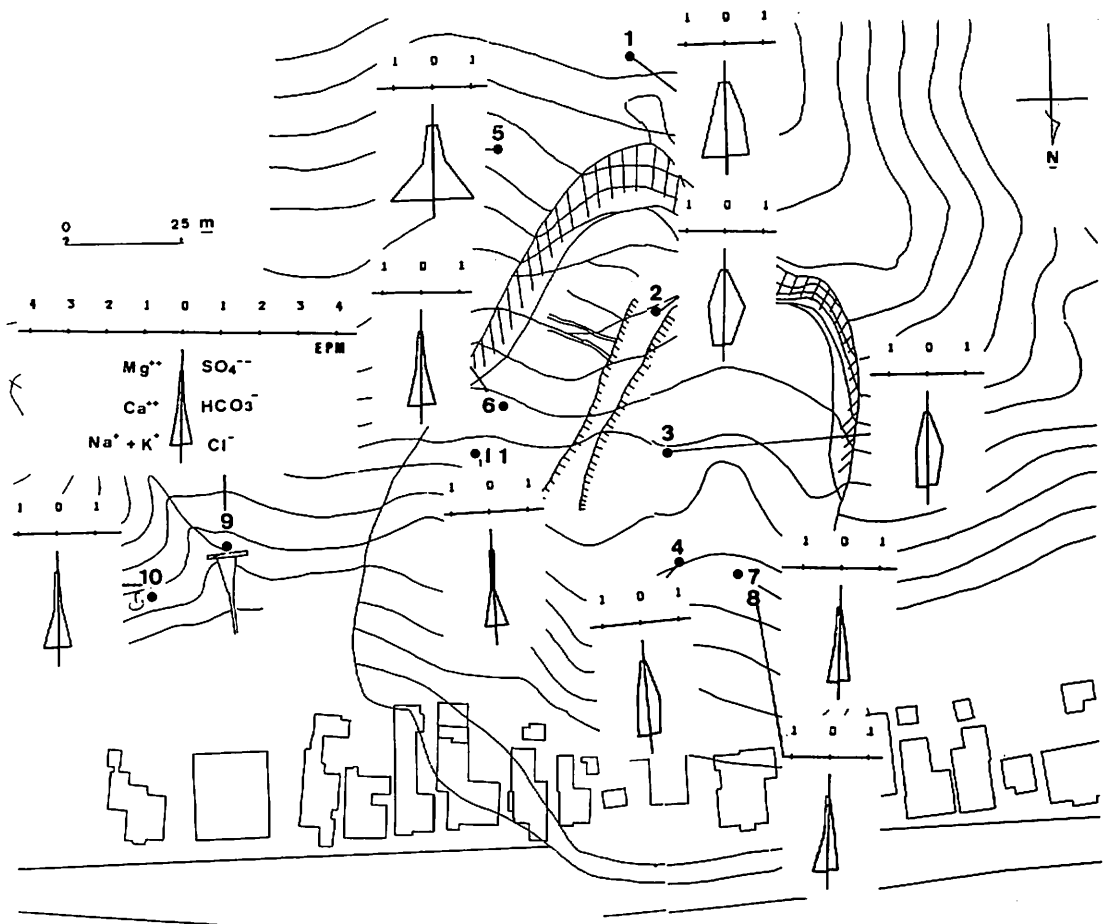


図-1 玉ノ木地すべり地の採水点と主成分のヘキサダイアグラム
 Fig. 1 Sampling location and pattern diagram for major ions in waters from the Tamanoki landslide.

表-1 水の化学組成

Table 1 Chemical composition of groundwater.

No.	Sample	W. T. ℃	E. C. μs/cm	PH	Cl ⁻ ppm	HCO ₃ ⁻ epm	SO ₄ ²⁻ ppm	Na ⁺ ppm	K ⁺ ppm	Ca ⁺⁺ ppm	Mg ⁺⁺ ppm	W. L. m	Date	A. T. ℃
1	Bore BV-1	9.4	173	7.8	21.5	0.47	5.0	13.6	1.8	15.9	3.4	29.07	60.3.9	6.0
2	Bore BV-2	11.1	131	7.7	7.2	0.54	2.0	6.3	0.8	16.1	2.3	10.10	60.3.9	
3	Bore BV-3	11.4	106	7.5	8.3	0.40	2.0	6.3	0.6	12.3	1.8	11.86	60.3.9	
4	Bore BV-4	11.1	99.5	7.2	9.2	0.33	2.0	6.7	0.6	10.2	1.8	14.70	60.3.9	
5	Bore BV-5	12.2	209	6.9	37.2	0.32	6.0	23.1	4.2	10.2	3.2	24.59	60.3.5	
6	Bore BV-6	10.9	80.1	6.4	13.3	0.13	1.0	7.9	0.5	5.0	1.4	6.26	60.3.9	
7	Bore BV-7	11.1	73.4	6.9	10.0	0.18	0.5	6.4	0.5	4.8	1.4	12.50	60.3.9	
8	BV-7 deep	11.3	69.4	6.9	10.4	0.17	0.5	6.3	1.0	4.8	1.3		60.3.9	8.4
9	Valley water	7.6	64.4	6.8	11.1	0.09	1.0	6.2	0.4	3.9	0.9		60.3.5	
10	Spring water	9.5	75.9	6.9	13.6	0.12	2.0	8.4	0.3	4.1	1.4		60.3.5	
11	Rain water	6.2	57.3	5.7	11.7	0.00	2.5	5.8	0.4	2.4	1.0			

V 地下水の分類と混合系の解析

図-1のヘキサダイアグラムの型の類似性と、分布位置から、試料2, 3, 4と、試料7, 8がそれぞれ一群となり、これらは塩化物イオンが少なく炭酸水素イオンが多いことから大きく一群にまとめられると予想できる。しかし試料1とこれらの水の関係、さらに試料5とその他の水との関係を図-1から判断するのは困難である。

そこで、陽イオン5種と陰イオン4種の濃度を用いて、クラスター分析を行い、図-4のクラスターデンドログラムを得た。試料2, 3, 4と、試料7, 8がそれぞれ一群でしかも近い関係にあること、試料10, 9, 6, 11, 5は類似性の程度は高くないが、他の試料よりは類縁性があることが判る。

以上の分類に基づき、試料2, 3, 4, 7, 8およびこの地の表流水の代表として谷水9について、導電率とナトリウムイオン、カルシウムイオン、塩化物イオン濃度の関係を検討した(図-5)。

試料2, 3, 4, 7, 8の系では、カルシウムイオンは導電率の増加にともない8→2の方向に増加した。塩化物イオンは導電率の増加、いいかえれば、電解質の増加とは逆に減少した。ナトリウムイオンは塩化物イオンと同じ傾向を示すことが多いが、この系ではほぼ一定の傾向を示している。いずれの関係も危険率0.01以下で有意である。

谷川の水は、クラスター分析では別の群に分類されたが、図-4では各イオンとも同一線上に位置し、一群の端に位置する水と考えられる。試料3, 4, 7, 8の水は試料2と試料9との混合により説明できる。試料2の水は炭酸水素カルシウムに富む水であり、イオン濃度が高くなるためには、谷川の融雪水を含む試料9よりは、長時間地下に滞留したと予想でき、古い水であるといえる。試料7と8は同一の孔内水で深さの違う水である。8と7の水温の差は有意ではないが、導電率の差は明瞭であって、上の方が電解質濃度が高い。通常、電解質濃度の高い、換言すれば密度の高い水が同一水柱の表層に分布することはないが、ここでは試料2型の電解質濃度の高い水が表層に分布し、試料2型の水が比較的浅い所を流れていることを示唆している。

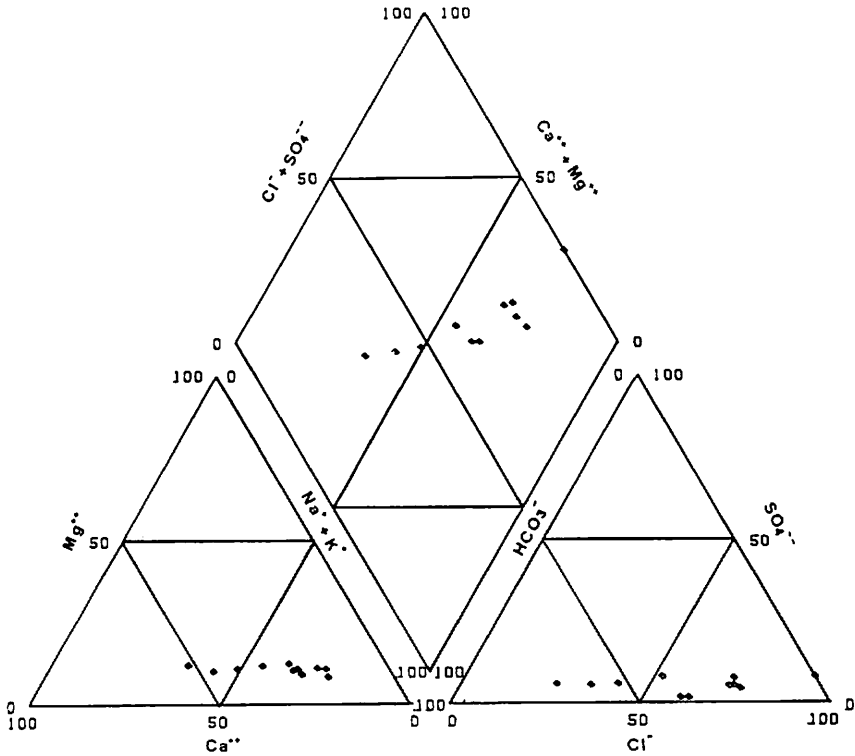


図-2 玉ノ木地すべり地の水の主成分のトリリニアダイアグラム
 Fig. 2 Trilinea diagram of major ions in water from the Tamanoki landslide.

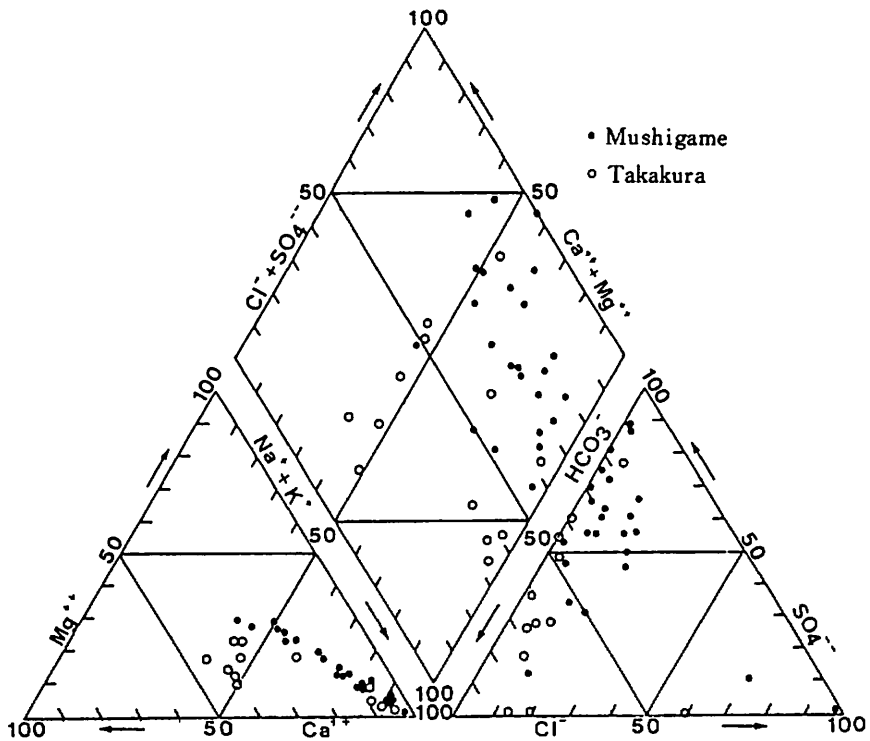


図-3 虫亀・高倉地すべり地の水の主成分のトリリニアダイアグラム
 Fig. 3 Trilinea diagram of major ions in water from the Mushigame and Takakura landslide.

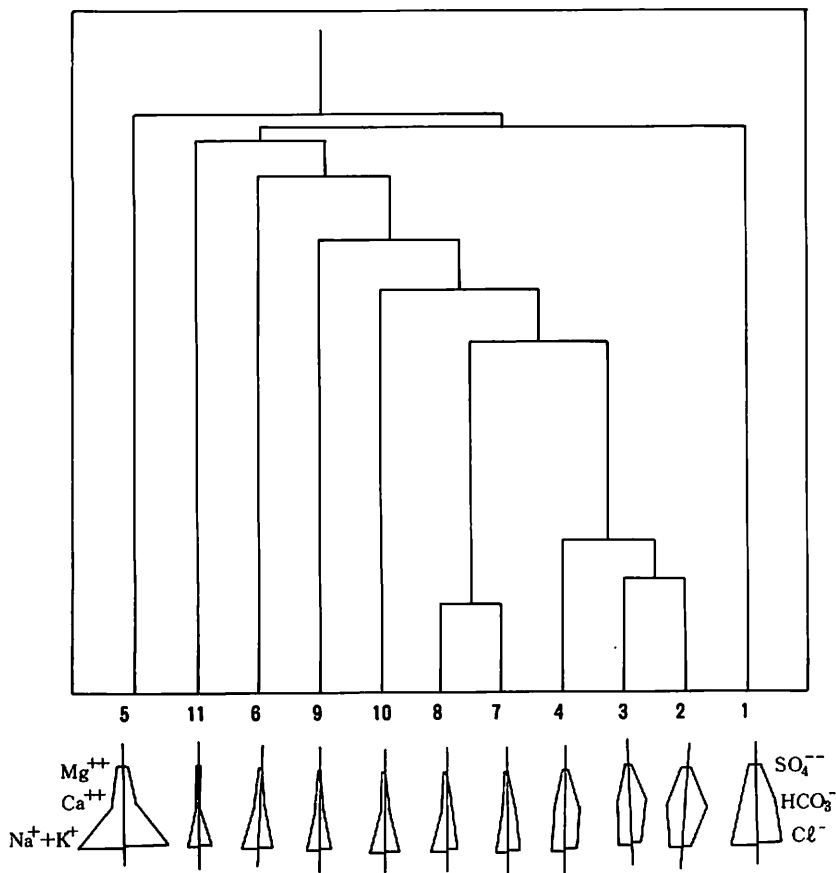


図-4 玉ノ木地すべり地の水のクラスター・デンドログラム
 Fig. 4 Cluster dendrogram for water from the Tamanoki landslide.

これらの水と他の水との関係を明らかにするために、導電率と各イオン濃度の関係（図-6）を検討した。試料2, 3, 4, 7, 8についてはその関係を点線で示した。

地すべり東部に位置する5, 6, 10, 9に注目すると、これらの水については、上に述べた試料2, 3, 4, 7, 8とはまったく違った線上に各イオンが分布し、それぞれに正の相関がみとめられた（危険率0.01以下）。

試料5の水は、25mのボーリング孔の底に10cm程度水が溜っているにすぎないが、かなり激しく水滴が落ちる音が孔口から聞こえていた。この水が今回の調査で最も高い塩類濃度の水であって、この地の典型的な水の一つと考えられる。

試料6は激しい流水音のするボーリング孔から得られた水であり、この水だけが濁りがなかった。試料10は崖面から浸み出していた水で、一部融雪水が混入している可能性がある。水温は9.5℃で、融雪水温（約0℃）、気温（7℃、この日の最高気温は糸魚川で11℃であった。）よりも高いから地下水が相当量含まれていることはまちがいない。これらの水と試料5の水、谷川の水の成分と試料6, 10の水の成分との間には正の相関がみられるから、これらの水は試料5と、谷川の水の混合で説明できる。こ

の系の水は塩化ナトリウムの割合が高く、カルシウムイオンの割合が低い特徴があり、図-3に示した群が導電率の増加に反して塩化物イオンが減少し、カルシウムイオンが著しく増加したのと対照的である。

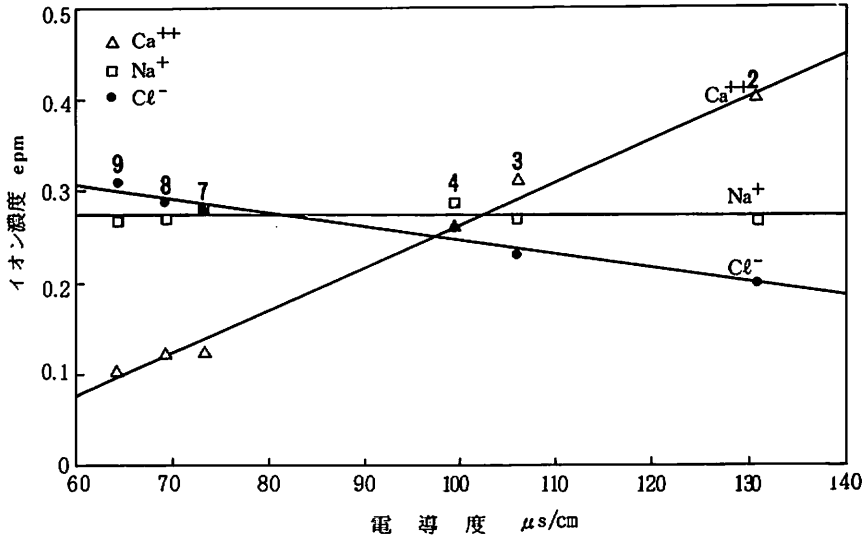


図-5 地すべり地中央部の地下水の導電率とカルシウム、ナトリウム、塩化物イオン濃度の関係

Fig. 5 Correlation between electrical conductivity and ions (calcium, sodium and chloride ions) in groundwater from the central part of the landslide.

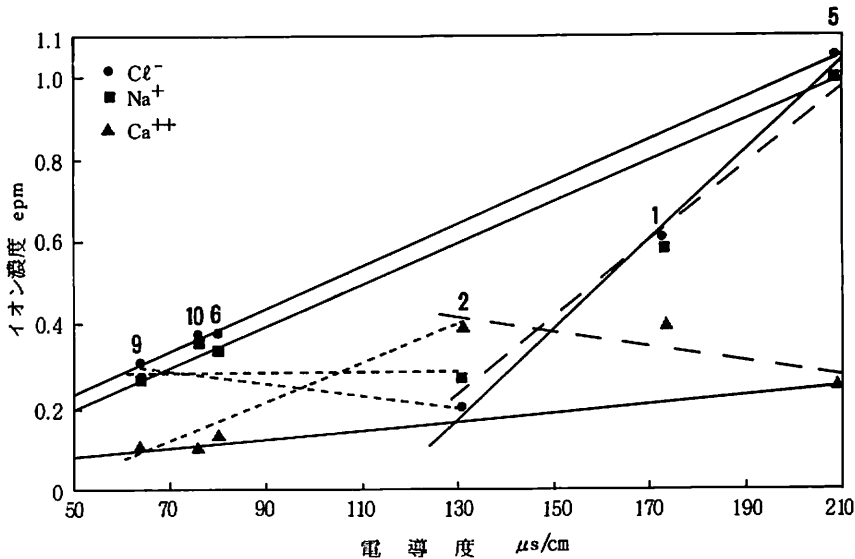


図-6 地すべり地の水の導電率とカルシウム、ナトリウム、塩化物イオン濃度の関係

Fig. 6 Correlation between electrical conductivity and ions (calcium, sodium and chloride ion) in water from landslide.

滑落崖上の試料1は試料2と試料5の中間的性質を示している。試料5, 1, 2の系では塩化物イオンのみ正の相関がみとめられ(危険率0.05以下), その他は試料数が少なく統計的には, 有意な相関はみとめられなかった(破線)。したがって今回の試料のみから断定はできないが, 試料1は, 試料2と試料5の混合した水と考えるのが妥当であろう。

地域的にみると, 地すべり中央部には試料2で代表される炭酸水素イオンとナトリウム, カルシウムで特徴づけられる水が分布し, 地すべり地の東側には, 試料5によって代表される, 塩化ナトリウム型の水が分布していることになる。谷水は融雪水など電解質濃度の低い水と, これらの水の混合物であろう。試料1は滑落崖の上部の水であるが, 試料5型の水が東南から流入してきて, もともとあった試料2型の水と混合したものと考えられる。

VI 地下水質の形成過程と化学風化

トリリニアダイアグラムからもうかがえるように, この地の水は基本的に塩化ナトリウム型の水であり, わずかに炭酸水素型の水が存在する。塩化物イオンとナトリウムイオンの間には正の相関関係(危険率0.01以下)が認められる(図-7)。塩化物イオンの濃度の低い水では, この関係が逆の部分もみられるが, これについては図-5についてみたように, ナトリウムイオンが一定で塩化物イオンが変化する水が存在することによる。全体的には, ナトリウムイオンと塩化物イオンは同じ行動をしている。

玉ノ木地すべりは日本海に近く, 海塩が飛来しやすい位置にあり, 塩化ナトリウムは海塩に由来する可能性が高い。地下水の塩類組成を海塩の組成と比較することより, 塩類に対する海塩の寄与を推定できる。風によってはこぼれる海塩の組成は海水とは若干異なっていることが知られている(角皆, 1972)。玉ノ木はきわめて海に近いから, この地に到達する海塩の組成の推定には同じような環境条件で測定された値を利用するのがのぞましい。ここでは, MIYAKE など(1965)の八丈島の雨の分析値を利用する。

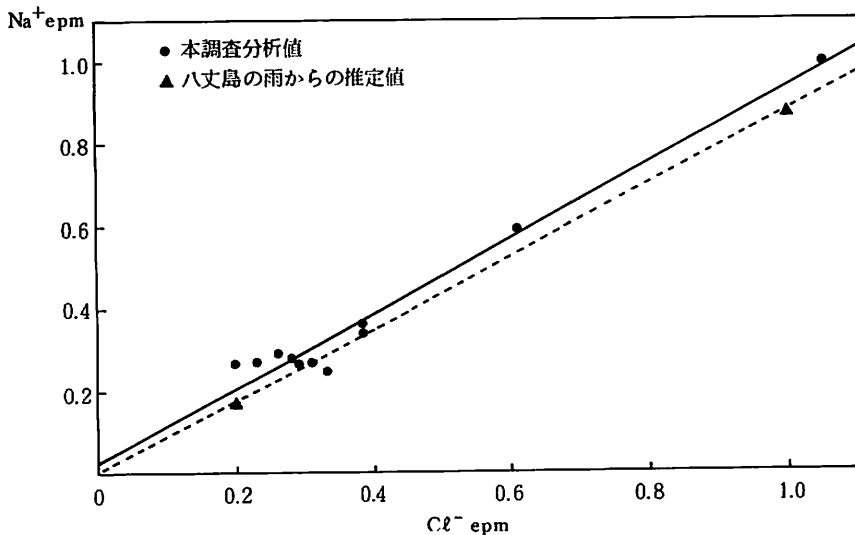


図-7 玉ノ木地すべり地の水の塩化物イオンとナトリウムイオンの関係

Fig. 7 Correlation between chloride ions and sodium ions in the groundwater from the Tamanoki landslide and the rain water collected in the Hachijo island.

この雨の分析値からナトリウム対塩化物イオン比を計算し、図-7に三角と点線で記入した。地下水の値はMIYAKEなどの値より若干ナトリウムの割合が高いが、ほとんどの塩化ナトリウムが海塩に由来すると考えてよいことを示している。しかしながら、八丈島の雨の塩化物イオン濃度が0.18epmであるのに対し、試料5では1epm以上の塩化物イオンを含んでいた。玉ノ木など、日本海沿岸では、冬期の強い北西風により、八丈島などより多量の塩類がはこばれたことによる。海岸からの距離が玉ノ木と似ている新潟大学構内の雪について、和泉(1984)は導電率200 μ s/cm以上の雪を観察しており、玉ノ木でもこのような高塩分の水が供給されることがあると考えられる。

海から直接玉ノ木地すべり地へ供給される海塩成分が陸成の成分の影響が極めて小さい、MIYAKEなどの雨の成分と同じで、塩化物イオンがすべて海塩起源であると仮定して、塩化物イオン濃度と表-2の八丈島の雨の化学組成から各々の水の成分の海塩に由来する組成を求めた。表-1の水の分析値を等量に換算して、海塩由来の値を差し引くと表-2の右に示した残分が出る。これらの値は海塩とは別に、水が岩石、土壌と反応した結果を示している。

表-2 海塩成分の分離
Table 2 Separation of sea salt components.

No	Sample	Sea salt components estimated by chloride ion					Cations supplied by rock weathering			
		Cl ⁻ epm	Na ⁺ epm	K ⁺ epm	Ca ⁺⁺ epm	Mg ⁺⁺ epm	Na ⁺ epm	K ⁺ epm	Ca ⁺⁺ epm	Mg ⁺⁺ epm
1	Bore BV-1	0.61	0.53	0.01	0.04	0.13	0.06	0.04	0.36	0.01
2	Bore BV-2	0.20	0.17	0	0.01	0.04	0.10	0.02	0.39	0.06
3	Bore BV-3	0.23	0.20	0	0.01	0.05	0.07	0.02	0.10	0
4	Bore BV-4	0.26	0.23	0.01	0.02	0.05	0.06	0.01	0.24	0.02
5	Bore BV-5	1.05	0.91	0.02	0.06	0.22	0.09	0.09	0.20	-0.09
6	Bore BV-6	0.38	0.33	0.01	0.02	0.08	0.01	0	0.12	-0.02
7	Bore BV-7	0.28	0.24	0.01	0.02	0.07	0.04	0.02	0.04	-0.03
8	BV-7 deep	0.29	0.25	0.01	0.02	0.06	0.02	0.02	0.10	-0.01
9	Valley water	0.31	0.27	0.01	0.02	0.07	0	0	0.08	-0.03
10	Spring water	0.38	0.33	0.01	0.02	0.08	-0.03	0	0.08	-0.02
11	Rain water	0.33	0.28	0.01	0.02	0.07	-0.03	0	0.04	-0.03
12	Rain in island*	0.180	0.156	0.004	0.010	0.037				

* Miyake and Taunogai (1965)

計算結果でもっとも注目されるのは、カルシウムイオンの余剰が多いことと、マグネシウムイオンが負になることがあることである。マグネシウムイオンが負になるのは、風化により供給されるマグネシウムが少なく、海塩中のマグネシウムが土壌に吸着されたり、植物により吸収利用されることによるのであろう。カルシウムの増加は現地の化学風化の結果である。

陰イオンについては塩化物イオンはすべて海塩に割り当て、硫酸イオンは少ないから、この風化は主に炭酸によるものと予想できる。炭酸水素イオン濃度と余剰のカルシウムイオン濃度の間には正の相関関係(危険率0.01以下)があり、この予想を裏づけている(図-8)。

風化に使われた炭酸水素ナトリウムの量は玉ノ木では0.6epm以下であった。活発な化学風化が進行しており、風化が崩壊の原因になっていると指摘されている。兵庫県の六甲の花崗岩地帯では炭酸水素イオン濃度は、2epmにも達しているという。それに比べれば、玉ノ木の化学風化は微弱なものであり、現在活発な化学風化が進んでいるとはいえない。

地すべり地の滑落崖や崩土の一部は古赤土類似の色を呈しており（高浜，1985），それ以外の部分も黄褐色を示し，全体によく風化が進んでしまっているといえる。いいかえれば，現在の風化はそれほど活発ではないことになり，水の分解結果と矛盾しない。

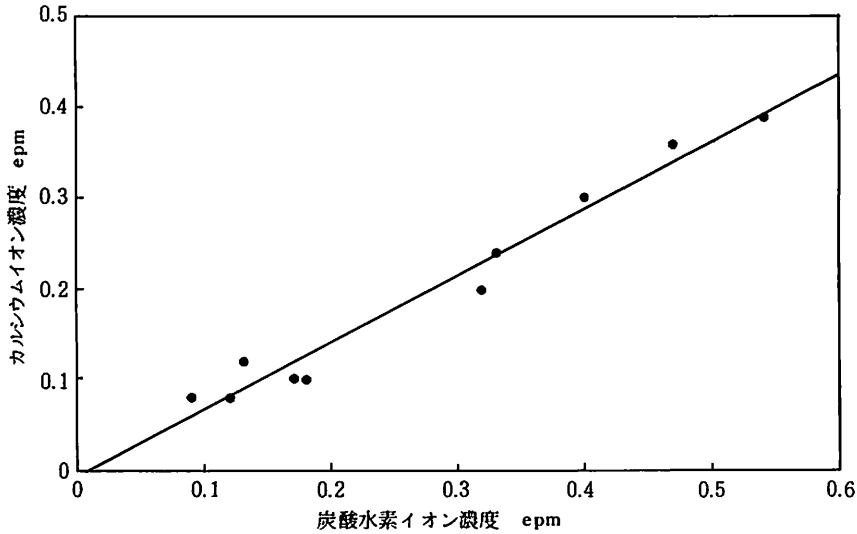


図-8 土壤・岩石由来のカルシウムイオンと炭酸イオンとの関係
 Fig. 8 Correlation between hydrogencarbonate ions and calcium ions from soil and rock.

VII 融雪水の挙動

地すべり地中央部の代表的な水である試料2の塩化物イオン濃度は現在の谷水より少なく，現在の谷水が地下に浸透したと考えたのでは説明出来ない。融雪期の水より塩化物イオン濃度が低い水は，南あるいは東風によってはこぼれた雨によって形成された水である可能性が高い。

試料5に代表される塩化物イオン濃度の高い水も現在の谷水そのものではないことは明らかである。地すべり地の崩積土は強く風化されており，崩積土中に多量の塩化物イオンの給源があるとは考え難いとすれば，この水の塩化物イオンは先に述べた強風によって運ばれた海塩と，蒸発による濃縮に起源を求めるべきである。したがって玉ノ木地すべり地のもう一つの代表的な水である試料5もこの時期の融水によっては説明し得ない。

流水音の聞こえるBV-6のボーリング孔の試料6の水質はかなり谷水に近いが水温が高く，すべて融雪水とは考え難い。しかしこの水の水温は他の水に比べて低くし，融水の影響が比較的大きい水と考えられる。その他BV-4，BV-7といった地すべり地末端に近いボーリング孔の水も融雪水の影響をうけている可能性はあるが，その程度は水温を変化させない程度のものである。

地すべり発生直後の観察によると，滑落崖の二三の地点からかなりの湧水があったといわれている。しかし，筆者が翌日現場に行ったときには，湧水の跡がみとめられたにすぎなかった。このことは，地すべりに関与した地下水の量は少なかったことを示しており，融水が次々と地すべり地の地下に浸透する必要もないことを暗示している。

地すべり前の5日間に600mmの水がすべて地盤に供給されたとしても(中俣, 1985), この崩積土の固相率は34.4%(吉田, 1985)にすぎないから, 不飽和な状態での浸透(吉田, 1985)を考慮しても, 融雪水は2m以深にまでは達しないことになり, ボーリング孔中の水は, はるかに古い水ということになる。地すべり地内にはBV-6号孔のように音が聞こえるような水脈もあることから, 上のような全地表面からの均一な水の浸透を考えるよりも, 基岩と崩積土の接触面, 古い亀裂等を通じて, 大量の水が流れていると考えられる。このような水脈と独立して, 塩類濃度の高い水があり, 原因は不明だがこの水と, 浸透してきた融水とが連結して急に間隙水圧が高くなることにより地すべりを引き起こすのであろう。

Ⅷ ま と め

1. 玉ノ木地すべり地の水の塩類濃度は, 新第三紀層に多発する地すべりに比べて低い。
2. 多くの水の主成分は, 海塩に由来する塩化ナトリウムであり, 化学風化に起源をもつ炭酸水素カルシウムは比較的少ない。
3. 玉ノ木地すべりの水の水質は, 3種の水①融雪水の混入した塩類濃度の低い谷水, ②塩化ナトリウムに富んだ地すべり東側の地下水, ③地すべり地内の炭酸水素カルシウムを主成分とする水, の混合により説明しうる。
4. 谷水と同じ水質の水は地下水にはみられず, 融雪水, 雨水など地表に供給される水は間接的に地下の間隙水圧を上げることにより地すべりの発生を促がすと推定した。

文 献

- 中俣三郎・青山清道・和泉 薫(1985):地すべりと融雪水との相関.新潟県青海町地すべり災害に関する総合的研究(藤田至則編), 45-47.
- 和泉 薫(1984):新潟における新積雪の密度と電気伝導度.新潟大災害研年報, 6, 103-109.
- 北野 康・加藤喜久雄・金森 悟・金森暢子・吉岡龍馬(1967):水質調査による岩石崩壊の予知の可能性.京大防災研究所年報, 第10号A, 555-587.
- 小出 博(1955):日本の地すべり—その予知と対策.東洋経済新報社.
- 佐藤 修(1981):地すべり地の陸水の水質, 1.虫亀・高倉地すべり.新潟大災害研年報, 3, 4-58.
- (1982):地すべり地の陸水の水質, 2.濁沢・上馬場地すべり.新潟大災害研年報, 4, 77-85.
- ・青木 滋・鈴木幸治(1983):虫亀地すべり地の地下水のアニオンの起源—地すべり地の陸水の水質3—新潟大災害研年報, 5, 33-42.
- ・青木 滋・矢沢茂伸・鈴木幸治(1984):虫亀地すべり地周辺の湧水の水質—地すべり地の陸水の水質4—新潟大災害研年報, 6, 63-72.
- 高浜信行(1985):親不知~玉ノ木海岸部の地すべり地形・崩積土の分布.新潟県青海町地すべり災害に関する総合的研究(藤田至則編), 18-22.
- 角皆静男(1972):雨水の分布.講談社, 東京
- 藤田至則・青木 滋(1985):新潟県西頸城郡青海町玉ノ木地すべりの要因.新潟県青海町地すべり災害に関する総合的研究(藤田至則編), 66-75.
- MIYAKE, Y. and S. TSUNOGAI (1963):Evapolution of iodine from the Ocean. *J. Geophys. Res.* 68, 3989.

吉田昭治(1985):融雪浸透水の地すべりに対する影響.新潟県青海町地すべり災害に関する総合的研究(藤田至則編),55-57.

吉村尚久(1985):青海町玉ノ木地すべり崩積土および母岩の粘土鉱物組成.同上,27-31.