

論文

天然水の化学組成からみた横地地すべり地の特性

乙黒真一*・吉岡龍馬**・奥村武信***

田中一夫***

**Characteristics of the YOKOCHI Landslide Area
through the Chemical Composition of Natural Water**

Shinichi OTOGURO*, Ryuma YOSHIOKA**, Takenobu OKUMURA***

and Kazuo TANAKA***

Summary

Natural water within the Yokochi landslide area, Tottori Prefecture, have been collected weekly and temporarily from June 1977 to October 1978 in order to know the characteristics of this landslide area through these chemical composition.

The authors have examined the change with time in the concentrations of dissolved chemical species and the discharge of natural water, and the relationships among the chemical species contents of the water, and then estimated the amount of rocks disintegrated through the chemical composition of the water.

The following have been obtained: (1) the water in the upper part of the slope is qualified as Na-HCO₃ type, but it changes to Ca-HCO₃ or Mg-HCO₃ type towards the foot, (2) Ca-HCO₃ type water at one selected point turned to Mg-HCO₃ type water during two months before a small collapse occurred, (3) coexistence of kaolinite and montmorillonite is maintained only under condition of bicarbonate content over about 70mg/l, (4) the amounts of kaolinite and montmorillonite produced by interaction of CO₂ bearing water and rocks are estimated as 10.9tons/year (31.1g/m²/year) and 12.7tons/year (36.4g/m²/year) respectively, and the total amount of rocks disintegrated is estimated as 36.6tons/year

* 山梨県林務技師：Forest Officer, Yamanashi Prefecture

** 京都大学防災研究所地形土壌災害部門：Research section of Applied Geomorphology, Disaster Prevention Research Institute, Kyoto University

*** 鳥取大学農学部砂防工学研究室：Laboratory of Erosion Control Engineering, Faculty of Agriculture, Tottori University

(105g/m²/year).

The authors emphasize that the chemical composition of natural water offers us various informations concerning underground environment.

I 緒 言

わが国は、地形的、地質的、気象的環境が複雑多岐にわたるために、各地で自然災害が多発している。特に、わが国は、山地や丘陵地が全国土面積の約75%を占めているため、山崩れ・がけ崩れ・地すべり・土石流などの山地災害の発生数やその被害も非常に大きなものとなっている。

最近では、人口増加などの社会的要因により、地形的・地質的に欠陥のある場所も開発が進められている。これらの開発が山地災害の発生頻度や被害をさらに大きくしている傾向がみられる。そのため、山地災害に関する研究の必要性はますます高まってきている。

地すべりに関する研究も、このような状況のなかで、ここ30年程度の間に急速に進展してきて、この間には地すべりの発生機構¹⁰⁾ 土塊の運動形態⁹⁾などの多くの部分について知られるようになってきた。しかし、地すべりの発生原因については、素因・誘因が複雑に絡み合っているため、一面的な調査・研究だけでは、解明が困難なものとなっている。

それゆえ、従来から行なわれてきている地質・地盤の構造・土塊の安定といった、いわば構造的あるいは力学的なアプローチの他に、地下水の水質から地下の岩石や土壌の性質などを把握しようとする地球化学的なアプローチも最近では数多く試みられている^{6,8,17)}

このように、地すべりに関する研究も多数の分野から行なわれているが、砂防工学の立場から地すべり防止工事・工法などについて考える場合、地すべり地全体の地質構造や運動形態などを面的に把握することがきわめて重要なことである。

筆者の一人吉岡は、崩壊現象に重要な働きをする炭酸ガス分圧、溶存化学成分と地下水流出量との関係、または地質との関係について多くの崩壊地を対象に研究し、それらの各崩壊地の水質特性を明らかにするとともに、水質から地質状況を推定することの可能性を示し、さらに天然水と鉱物種との平衡関係についても推定し得ることなどを指摘している^{13~19)}

このように直接目でみることができない地下の岩石の状態を地下水の水質によりある程度知り得ることは、地すべり現象をとらえる上で、非常に重要なことであると考えられる。そこで、筆者らは地すべり地の地質的特性、すなわち岩石の組成・土壌の性質などを面的に把握するためには、地球化学的アプローチが非常に有益な情報をもたらすものと考え、この方法を鳥取県東部の横地地すべり地に適用し、当地すべり地の水質特性を明らかにするとともに、水質から粘土鉱物の生産量の推定や地すべり型の分類について検討を行ったので、ここに報告する次第である。

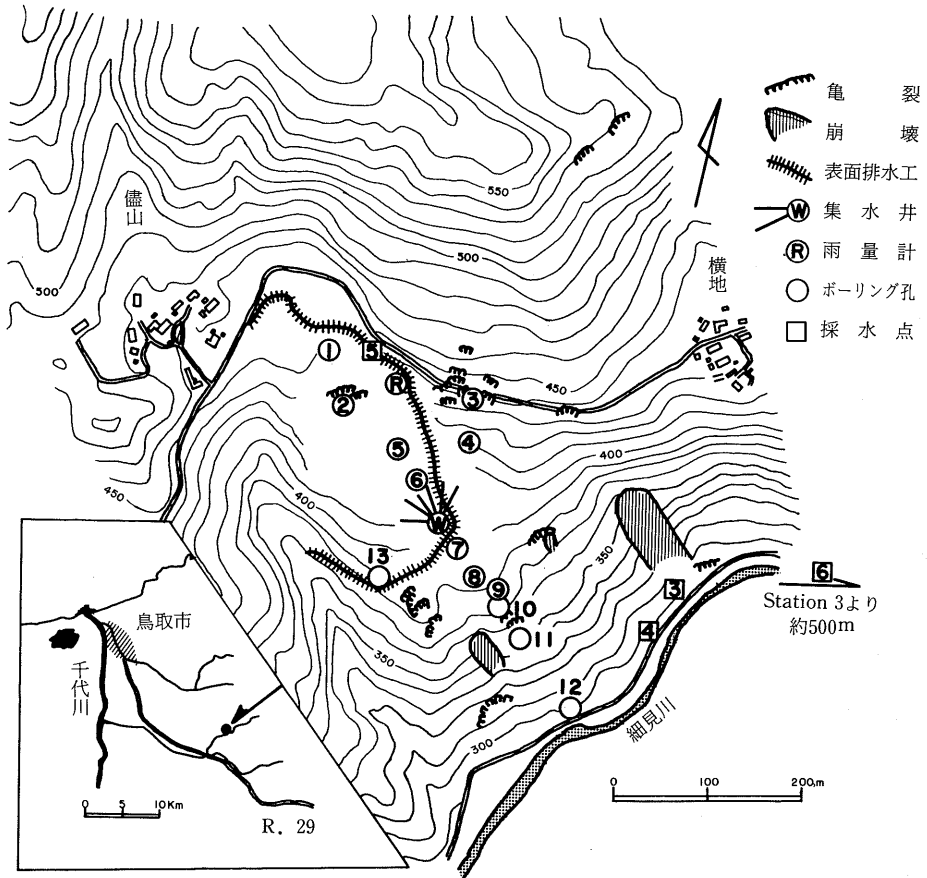


図1 採水地点図

II 横地地すべり地の概要

1. 地質・地形の特性

横地地すべり地は、鳥取県八頭郡八東町大字横地地内にあり、千代川水系八東川支流細見川右岸の標高300~500m付近に位置し、地すべり地形を呈し20haを越える広大な斜面である。図1は当地すべり地の地形図である。これからもわかるように、地すべり地内は中央部で8~15°前後の緩斜面で、その周囲は30°を越える急斜面となっている。

当地すべり地周辺の基盤を構成する地質は、古生層に属する石墨千枚岩と石英千枚岩で、これらの古生層は中国地方の脊梁山脈の北側に分布する三郡変成岩と呼ばれるものに属している。この古生層に蛇紋岩が進入しており、その露頭は横地部落の処々に現われている。さらに、この蛇紋岩の岩体は、第三紀の火成活動の産物であるとされる安山岩あるいは安山岩質集塊岩によって分断され、

またその北東には砂岩、頁岩の堆積岩よりなる新第三紀層が分布している¹²⁾。このような地質状況から、当地すべり地は第三紀層地すべりに属するといわれている。

2. 地すべり活動の経過

当地すべり地は古くからたびたび活動をくり返している。「細見」という地名も、山津波が起こり海ようになったということから、古くは「細海」と記されていたという話もある。

1943年9月に起こった鳥取地震の際にもその影響を受け、それ以来水田のかんがい用水が極度に不足するようになっていた。1965年9月の台風23号・24号の際の豪雨で突然山地や田畑に亀裂が生じ、あちこちに陥没や隆起が生じた。このため建設省により同地域22.74ha(地すべり区域12.01ha, 隣接区域10.77ha)が地すべり地域に指定された。1972年11月に地すべり地内の儘山(ままやま)と横地の住民が耕作を放棄し集団移転した後は、杉を主体にした植林が行なわれている。現在では、地すべり地斜面のほとんどが人工造林地になっている。また緩斜面上部は旧来よりの山林および杉の人工造林地である。1975年8月頃から移転が活発化し、9月の集中豪雨の後に、冠頭部に多数の引張り亀裂が生じ、舌端部で大規模な崩壊が発生している。また斜面末端部にはいくつかの崩壊地があり、豪雨後や融雪期などに崩壊を繰り返している。

3. 従来 of 調査

1965年当地すべり地で大規模な変動が発生して以来、鳥取県により地質や地盤変動量などを解明するために、鉛直ボーリング・パイプ歪計によるすべり面の探査・測量・傾斜計・伸縮計による地表面の変動調査・垂直検層・水位測定・地下水追跡調査などが行われた⁷⁾。これらの調査により、地すべり面の推定、地すべり地の地形的な変動、地すべり地上流部で沢水が伏流しこれが地下水流となって地すべり現象を活発化させていることなどが知られている。

III 水質分析

1. 採水期間と地点

採水期間は1977年6月から1978年10月までの17ヶ月間に、図1に示すNo.3, 4, 5, 6, 集水井(W)の5ヶ所で、各51回の採水を行った。なお、雨量計で受けた雨水についても分析を行った。

これらの採水地点のうち、No.3, 4は地すべり斜面の舌端部にあたる。No.3は舌端部崩壊地からの湧水を崩壊地脚部で採水した。またNo.4は、斜面脚部から30m上部にある擁壁脚部の湧水を斜面脚部で採水した。

No.5は斜面上部に位置し、表面排水を目的として施工されたコルゲート排水路の下に埋設された暗渠からの湧水を採水した。No.6は地すべり地から東500mで細見川に流入する中規模の谷を流れる表流水で、地すべり地内のものとの対比ができるものと考えていたが、その後の詳細な踏査による

と、地すべり地内の水が流入している形跡もみられ、この点では所期の目的にあわなかった。集水井は斜面のほぼ中央部に位置し、この集水井天端から約10mの深さで北の方向に掘さくされた横ボーリング排水孔からの水を採水した。

また当地すべり地の水質特性を知る目的で、上記の定点以外に鉛直ボーリング孔からの採水を1977年8月10日に行なった。

採水に際しては、現場でpH、水温、流出量を測定した。pHは比色法により測定し、流出量は水をポリバケツに受け、その量と時間から算出した。

試料水は、ポリ広口ビン(500cc)に密封し実験室に搬入し、以下の方法で可能な限り、迅速に分析を行った。

2. 分析方法

Na⁺, K⁺: 炎光分光分析法⁵⁾

Mg²⁺, Ca²⁺: 原子吸光分析法³⁾

Cl⁻: 硝酸第二水銀法(滴定)³⁾

HCO₃⁻: MR-BCG混合指示薬法³⁾

SO₄²⁻: クロム酸バリウム-酸懸濁比色法⁵⁾

Soluble SiO₂: モリブデン酸アンモニウム比色法⁵⁾

3. 分析結果と考察

各試料採水時の流出量、水温、pHおよび分析値を別表1~7にとりまとめた。

(1) 各溶存成分量の時間的変動

図2に各溶存成分と流出量の経時変化および採水期間の積算降水量を示した。この図から読みとれることを個条書にすると、次のとおりである。

HCO₃⁻については、(1)各地点の濃度は0.3~1.0mM/lの範囲内にある。(2)冬期に各地点の濃度が特に低下し、その低下の度合いは斜面下部の地点ほど大きい。(3)各地点の変動は降水量とかなりよい対応性がみられるが、斜面上部のNo.5と集水井の変動は小さい。(4)斜面上部から下部に行くほど増加の傾向がみられる。

Cl⁻については、(1)各地点の濃度は0.10~0.25mM/lの範囲内にある。(2)1~5月にかけて増加の傾向がある。これは季節風により運ばれた海塩粒子の影響によるものと推定される²⁰⁾ 1~5月以外の変動は比較的小さい。

Na⁺については、(1)各地点の濃度は0.20~0.33mM/lの範囲内にある。(2)冬期に濃度が低下し始め、その濃度が回復するのは7月である。(3)斜面下部で濃度が比較的高く、またその変動も大きい。(4)No.3, 4では降水量との対応が比較的よい。

Ca²⁺については、(1)各地点の濃度はおおよそ0.10~0.25mM/lの範囲内にある。(2)斜面上部から下

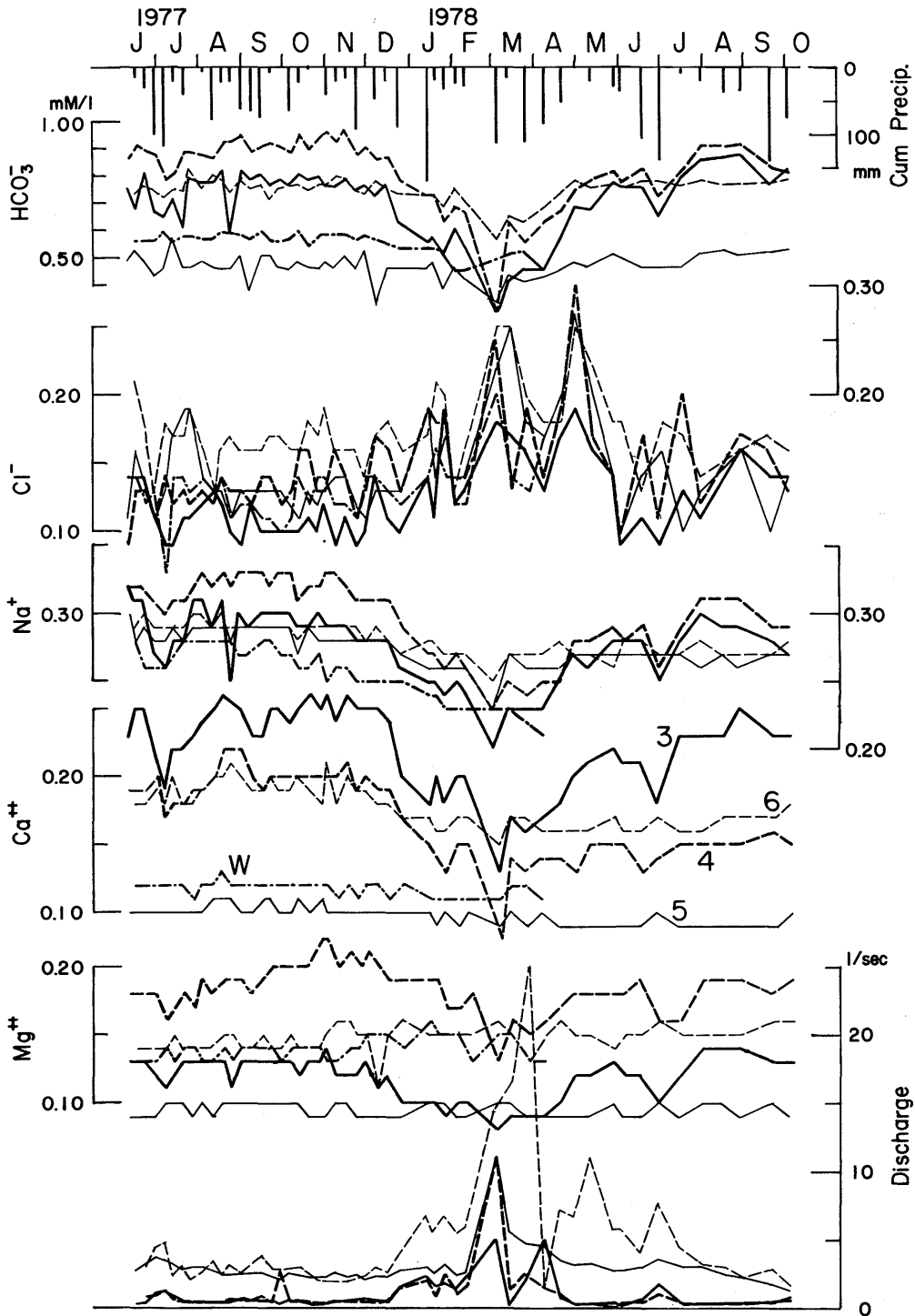


図2 各溶存成分および流量の経時変化と降水量

部にいくにしたがい濃度は高くなる傾向がある。(3)斜面上部のNo.5と集水井では濃度も低く、降水量との明確な対応はみられないが、No.3, 4, 6では濃度変動も大きく、降水量との対応性も比較的良好的である。この傾向は HCO_3^- の変動とよく類似している。

Mg^{2+} については、(1)各地点の濃度は、おおよそ0.10~0.20mM/lの範囲内にある。(2)採水期間中あまり大きな変動はみられない。(3)No.4は他の地点に比べてやや高い値を示している。(4)降水量との対応性はあまりよくない。

(2) HCO_3^- 濃度と他成分濃度との関係

横地における地質構造を知る上で重要と考えられる HCO_3^- と Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ , SiO_2 との関係を示すと図3~5のようになる。これらの図中の数字は採水地点を示し、○でかこんだものは定期的に採水した地点の平均値(51試料)であり、○印のないものは鉛直ボーリング孔からの試料である

(1977・8・10採水)。

これらの図から、 HCO_3^- と Ca^{2+} の間には良好な相関がみられる。 HCO_3^- と Mg^{2+} の間には、 HCO_3^- と Ca^{2+} との間のような良好な相関はみられないが、全体としては HCO_3^- が増加するにつれて Mg^{2+} も増加する傾向を示している。 HCO_3^- と Na^+ との関係は HCO_3^- と Mg^{2+} との関係と類似している。

HCO_3^- と SiO_2 との関係については、一般に次のように考えられている。すなわち、天然水中の Ca^{2+} , Mg^{2+} がケイ酸塩鉱物からの溶解に起因するならば、それらが多量に溶出するときには、ケイ酸も同時に多量に溶出するはずである。したがって、天然水中の Ca^{2+} , Mg^{2+} の濃度が高いにもかかわらず、ケイ酸濃度が低いばあいには、その多量の Ca^{2+} , Mg^{2+} の大部分は石灰石からの溶解によるものと考え

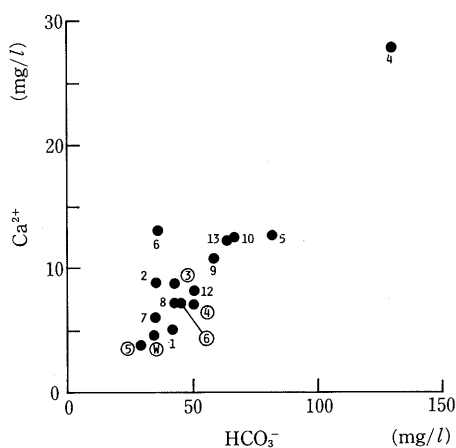


図3 HCO_3^- 濃度と Ca^{2+} 濃度との関係

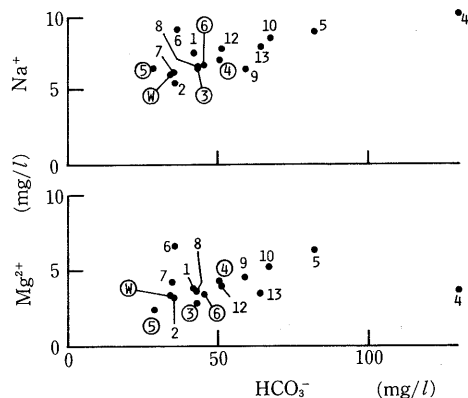


図4 HCO_3^- 濃度と Mg^{2+} , Na^+ 濃度との関係

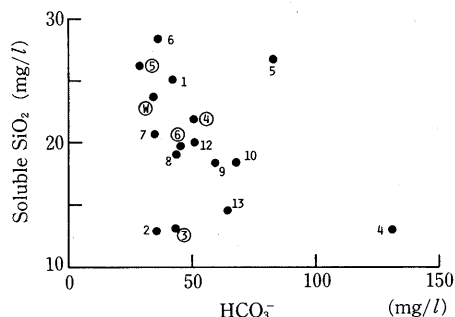


図5 HCO_3^- 濃度とSoluble SiO_2 濃度との関係

えられている⁴⁾。

横地の HCO_3^- と SiO_2 との関係を見るとケイ酸濃度はおおよそ13~28mg/lの範囲にあり、通常の天然水中の濃度と比較しても低い値を示しているとは考えられないが、No. 3, 鉛直ボーリング孔2, 4, 13などのケイ酸濃度は、 Ca^{2+} , Mg^{2+} の濃度に比較すると相当低濃度といえる。このことから、これらの地点の水は方解石や閃緑岩などのように SiO_2 を含まないか、また含んでいても非常に少ない岩石が多く存在している場所を通過してきた水と考えられる。吉岡・古谷は第三紀層地すべり地では SiO_2 濃度が30mg/lを越えるものが多いことを指摘しているが¹⁵⁾ 第三紀層地すべり地といわれている当地すべり地の SiO_2 濃度は相当小さい値といえよう。

(3) キーダイアグラムからみた水質特性

図6にキーダイアグラムを示す。この図から当地すべり地の水は、湧水、表流水、鉛直ボーリング孔の水のいずれも $\text{Ca}(\text{HCO}_3)_2$, $\text{Mg}(\text{HCO}_3)_2$ に富んだ水質を示していることが読みとれる。この水質特性は海水や火山活動などの影響を受けない場所では、ごく普通にみられる水質である。

(4) ヘキサダイアグラムからみた水質特性

図7は、No. 3, 4, 5, 6, 集水井における月ごとの平均値を用いたヘキサダイアグラムである。これによると、融雪期までの冬期間に溶存成分濃度は大きく減少しているが、これは増大した流出量が各成分を希釈したためと考えられる。

このなかで、No. 4の溶存成分濃度の変化は特異なものとなっている。すなわち、1977年6~12月まではわずかではあるが、 Ca^{2+} が Mg^{2+} に比べて大きな濃度を示している。しかし流出量が増えてくる1978年1月になると、逆に Mg^{2+} が Ca^{2+} に比べて大きな濃度を示すようになる。そしてこの傾向は採水を中止した1978年10月まで継続している。

このNo. 4の地点では、1978年3月4日に70m³程度の土砂崩壊が発生しており、この崩壊の2ヶ月前にNo. 4の溶存成分量が変化していたことは興味深いことである。この現象は冬期の多量の降水が地中に浸透することにより、地中の間隙水圧を高め、小規模の亀裂の発生などの地盤の構造に変化をもたらし、水みちが変化した結果現われたものと考えられる。

一般に地下水の滞留時間が長いと、溶存酸素は消費され SO_4^{2-} は次第に還元されて H_2S となり水溶液から除かれていくため、 $\text{HCO}_3^-/\text{SO}_4^{2-}$ の比の値が大きい程深層起源の水であると考えられている^{15,19)} ただしこの考えは SO_4^{2-} の起源となるパイライトとか硫黄バクテリアが地中に存在しないとき、あるいは温鉱泉や人為汚染のない場合に限るものである。

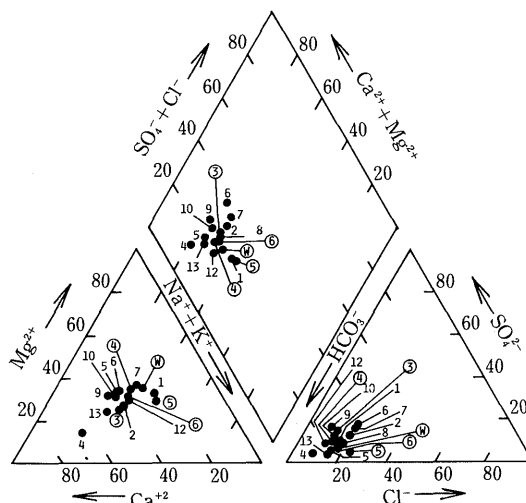


図6 キーダイアグラムによる水質区分

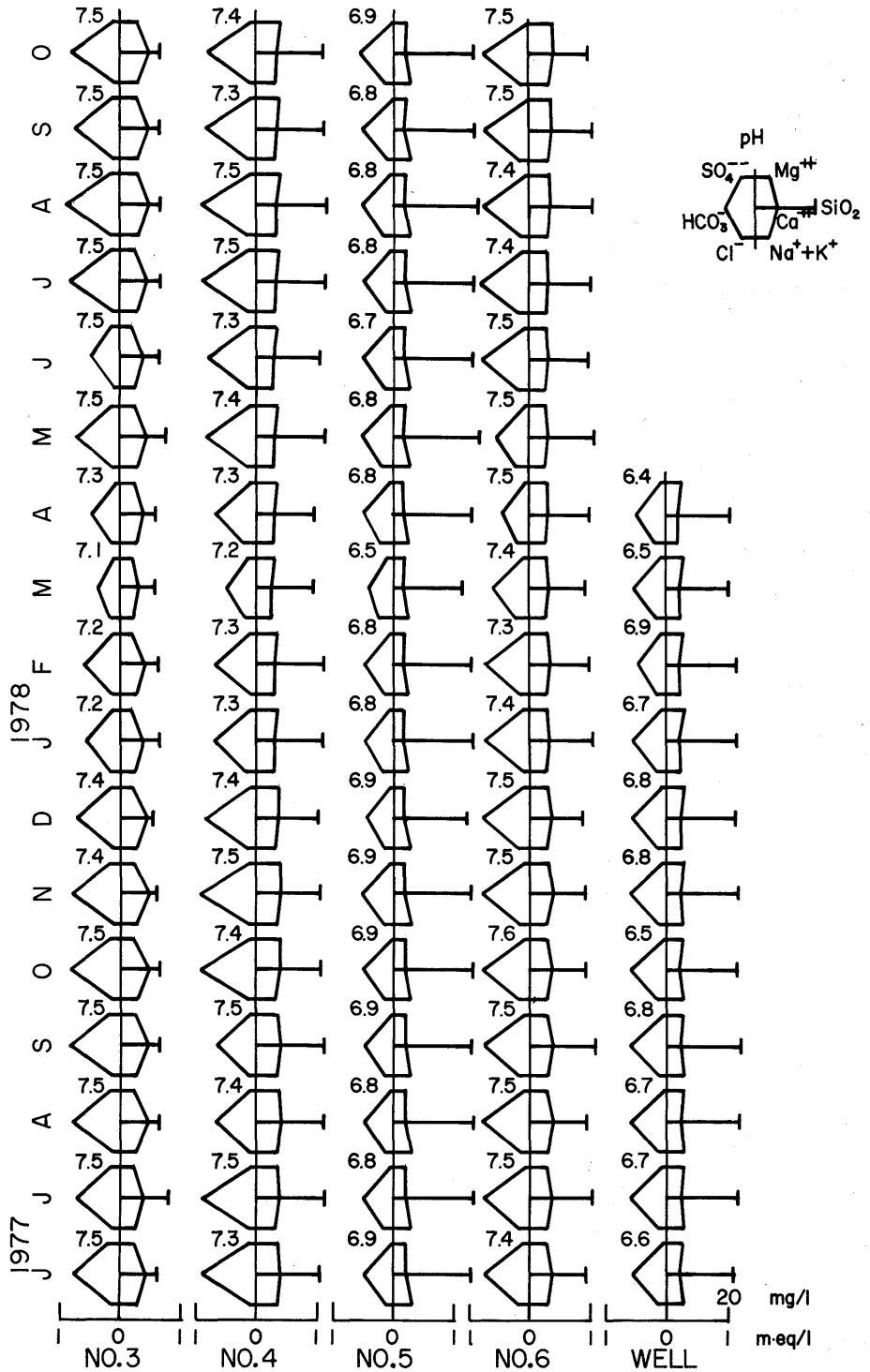


図7 ヘキサダイアグラムからみた月別の水質変動

No. 4の1977年12月以前と1978年1月以降の $\text{HCO}_3^-/\text{SO}_4^{2-}$ の値を比較すると、後者が前者よりやや大きな値を示す傾向がみられた。これらのことから、No. 4においては地下水の流出量が増加した冬期に、前述のような理由で以前よりさらに深い地層部分に水みちができたものと考え、上記の土砂崩壊は説明できよう。また Mg^{2+} 濃度が増加したことは、この付近に存在すると予想されている蛇紋岩の化学的風化が進行していることを示している。

さらに、小規模な崩壊であったにもかかわらず、この崩壊が起る約2ヶ月前にその地点での水質型が変化したこと、横地のような地質的に複雑な地帯では、長期間にわたる水質調査により崩壊の前駆現象をある程度とらえることが可能となることを示唆するものである。

鉛直ボーリング孔内の水質は1の NaHCO_3 型、7の $\text{Mg}(\text{HCO}_3)_2$ 型を除くと、いずれも $\text{Ca}(\text{HCO}_3)_2$ 型の水質を示していた。また、定期的に採水したNo. 3, 4, 5, 6, 集水井のそれぞれの平均的な水質型をみると、No. 3と6は $\text{Ca}(\text{HCO}_3)_2$ 型、No. 4と集水井は $\text{Mg}(\text{HCO}_3)_2$ 型、No. 5は NaHCO_3 型を示していた。これは斜面上部で NaHCO_3 型を示し、下部に行くにしたがって $\text{Ca}(\text{HCO}_3)_2$ 型または $\text{Mg}(\text{HCO}_3)_2$ 型に移行することを示している。

(5) 水質からみた粘土鉱物生産量の推定

水質分析により粘土鉱物の安定領域を溶存成分の濃度によって区分する図がいくつか提案されている^{11,13,17}

図8は粘土鉱物の安定領域を Ca^{2+} , H^+ , H_4SiO_4 の濃度関数として表わしたものである。図中の数字は図3～5と同じである。当地すべり地の湧水、表流水、鉛直ボーリング孔水のいずれも、カオリナイトの安定領域内にプロットされているが、集水井の掘さく時に採取した粘土のX線回折によるとモンモリロナイトが同定された。

以上のことから当地すべり地内の粘土鉱物として、少なくともカオリナイトとモンモリロナイト

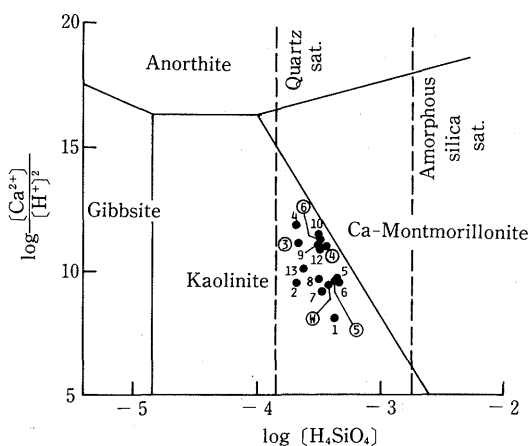


図8 各粘土鉱物の安定領域図 (25°C, 1気圧)

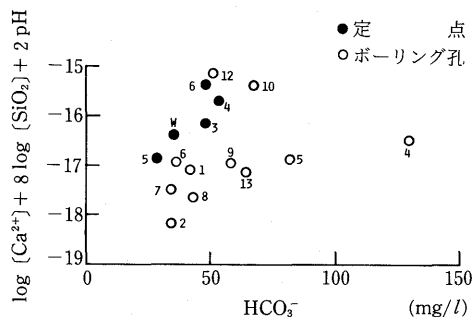
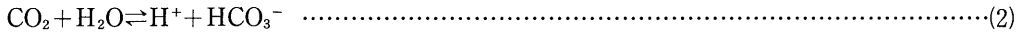


図9 HCO_3^- と $\log [\text{Ca}^{2+}] + 8 \log [\text{SiO}_2] + 2 \text{pH}$ との関係

が共存していることが推測される。そこで、いま当地すべり地の水がカオリナイトとモンモリロナイトとで平衡状態になっているとすれば、その反応式は次のように書ける²⁾



また、CO₂とH₂Oとの間に平衡関係が成立すれば、



となる。

(2)式を(1)式に代入し、水、固体の活動度を1とし、また溶存成分の活動度係数を1とすれば、

$$\log[\text{Ca}^{2+}] + 8 \log[\text{SiO}_2] + 2 \text{pH} = \text{Const.} \dots\dots(3)$$

となる。ただし、ここで〔 〕はモル濃度を表す。

したがって、当地すべり地の水がカオリナイトとモンモリロナイトとでは平衡関係が成立しているかどうかは、(3)式の左辺が一定になっているかどうかを検討すればよいことになる。

この関係を検討するために(3)式の左辺の定数項を縦軸に、HCO₃⁻濃度を横軸にとり図示したのが図9である。HCO₃⁻濃度がおよそ70mg/l以上からは平衡状態に達していることがわかる。このことは地すべりを惹起しやすい粘土（モンモリロナイト系粘土）の生成条件ともなることから、上記の水と鉱物との平衡論的な取り扱い、地すべり現象を説明するのに重要な概念となるものと考えられる^{13-15,17)}

次に、水質から粘土鉱物の生産量の推定を試みよう。表1に当地すべり地の天然水の平均化学組成を示す。当地すべり側斜面の粘土鉱物の生産量を推計するためには、地下水の流量の値が必要であるが、本観測では地すべり側斜面地下水の流量は実測されていない。表1の(7)と(8)からわかるように、No.5の比負荷量とNo.3, 4, 5, 6および集水井の平均比負荷量との間に大きな差がみられないので、ここでは、便宜上No.5の実測値から流出率を求め、その値を用いて地すべり側斜面の地下水の流量の推定を行うことにする。具体的には、次のような計算を行った。

$$\text{No.5の流量(降水からの推定値)} = 1,874 \text{mm/y} \times 0.08 \times 10^6 \text{m}^2 = 1.499 \times 10^5 \text{m}^3/\text{y} \dots\dots(4)$$

表1 天然水の平均化学組成

	Na ⁺	K ⁺	Mg ²⁺	Ca ²⁺	Cl ⁻	HCO ₃ ⁻	SO ₄ ²⁻	SiO ₂	pH	平均 流量 (l/sec)	年 降水量 (mm)	集水 面積 (Km ²)
(1)定点 No.5 mg/l	6.3	0.5	2.4	3.8	5.3	28.7	1.6	26.3	6.8	2.97	—	0.080
(2)全定点平均 //	6.4	0.4	3.3	6.3	5.1	40.5	4.2	20.9	7.2	9.41	—	0.348
(3)降水 //	1.4	0.2	0.9	1.6	2.8	1.2	3.1	0	6.3	—	1,874	—
(4)定点 No.5 g/m ² /year	7.4	0.59	2.8	4.4	6.2	33.6	1.9	30.8				
(5)全定点平均 //	7.4	0.48	3.9	7.3	5.9	47.0	4.9	24.2				
(6)降水 //	2.6	0.37	1.7	3.0	5.3	2.3	5.8	0				
(7) (4) - (6) //	4.8	0.22	1.1	1.4	0.9	31.3	-3.9	30.8				
(8) (5) - (6) //	4.8	0.11	2.2	4.3	0.7	44.8	-1.0	24.2				

$$\text{No.5の流量(実測値)}=2.97(1/\text{sec})\times 3.15\times 10^7\text{sec}=9.36\times 10^4\text{m}^3/\text{y}\dots\dots\dots(5)$$

$$\text{No.5の流出率}=\frac{(5)}{(4)}=0.62\dots\dots\dots(6)$$

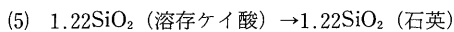
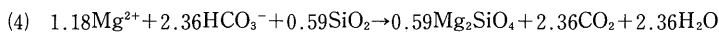
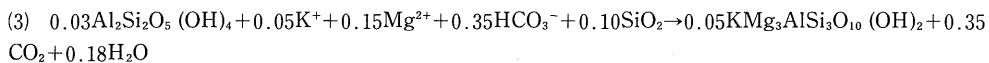
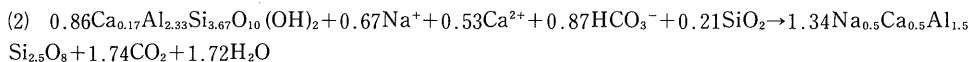
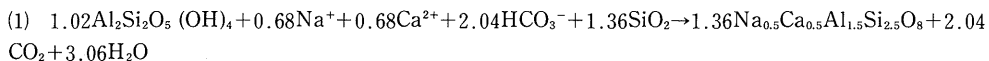
したがって、地すべり側斜面の面積(0.348Km²)の年間の地下水の流量(推定値)は1.874m×0.348×10⁶m²×0.62=4.04×10⁵m³となる。

ところで、当地すべり地の造岩鉱物は斜長石、黒雲母、苦土カンラン石および石英が、また粘土鉱物としてカオリナイトとモンモリロナイトが、それぞれ卓越しているものとする。一般に斜長石がCO₂を含む水と反応すると、カオリナイトとモンモリロナイトが生成する。黒雲母が同じ系で反応するときには、カオリナイトの生成がみられる。これらの反応式を用いて、当地すべり地の水質からいかなる造岩鉱物がどの程度風化して、カオリナイトおよびモンモリロナイトがどの程度生成されているかを表2に示す。

表2 地下水水質と風化生成物の逆反応による造岩鉱物の再形成

	濃 度 (moles/liter)×10 ⁴							
	Na ⁺	K ⁺	Mg ²⁺	Ca ²⁺	SiO ²	HCO ³⁻	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻
地下水	2.77	0.10	1.37	1.57	3.48	6.64	1.44	0.43
降水	0.06	0.05	0.04	0.04	0.00	0.02	0.08	0.03
地下水—降水	2.71	0.05	1.33	1.53	3.48	6.62	1.36	0.40
Cl ⁻ =Na ⁺ , SO ₄ ²⁻ =Ca ²⁺ とする	1.35	0.05	1.33	1.13	3.48	6.62	0	0
カオリナイト→斜長石 (1)	0.67	0.05	1.33	0.45	2.12	4.58	0	0
モンモリロナイト→斜長石 (2)	0	0.05	1.33	-0.08	1.91	3.71	0	0
カオリナイト→黒雲母 (3)	0	0	1.18	-0.08	1.81	3.36	0	0
苦土カンラン石の分解 (4)	0	0	0	-0.08	1.22	1.00	0	0
石英の溶解 (5)	0	0	0	-0.08	0	1.00	0	0
残 余	0	0	0	-0.08	0	1.00	0	0

(注) 反応式



この計算結果は当地すべり地の地下水1 l当りの値として算出されているので、地下水の1年間の流量をこの計算値に掛ければ、1年間当りのこれらの物質の流出量になる。このようにして計算した結果を表3に示す。当地すべり地では年36.6トン(105g/m²/y)の造岩鉱物が風化して、年10.9トン(31.1g/m²/y)のカオリナイトと12.7トン(36.4g/m²/y)のモンモリロナイトが生成されたことになる。

表3 年間に生成される粘土鉱物量

斜長石	14.8 (42.4)	→	カオリナイト	10.6 (30.4)
	14.6 (41.8)	→	モンモリロナイト	12.7 (36.4)
黒雲母	0.84 (2.4)	→	カオリナイト	0.26 (0.74)
苦土カンフン石	3.35 (9.62)			
石英	2.96 (8.51)			
計	36.55 (104.7)			23.56 (67.5)

(注) 単位はtons/year, カッコ内g/m²/year

表4 天然水中の溶存成分の平均当量比

	Ca/Na	Ca/Mg	HCO ₃ /SO ₄	SO ₄ /Cl
1	0.81	0.81	6.90	0.63
2	1.78	1.52	5.27	0.69
ボ ー リ ン グ 孔	4 3.32	4.48	23.67	0.41
5	1.75	1.19	12.27	0.44
6	1.71	1.18	3.53	0.85
7	1.11	0.86	4.07	0.78
8	1.29	1.20	7.89	0.50
9	2.00	1.42	4.41	1.69
10	1.72	1.41	5.79	0.95
12	1.24	1.24	8.50	0.83
13	1.97	2.10	21.00	0.26
3	1.57	1.83	4.73	1.25
定 点	4 1.17	0.97	7.55	0.73
5	0.68	0.95	15.67	0.20
6	1.29	1.24	9.38	0.47
W	0.88	0.82	9.33	0.46
降 水	0.50	1.50	1.00	0.30
三紀層 地すべり*	0.55~ 1.90	1.14~ 1.99	0.51~ 7.47	0.17~ 6.82
破碎帯 地すべり*	0.53~ 14.40	1.65~ 12.70	1.82~ 17.80	1.01~ 7.32

(注) *印吉岡・古谷(1973)による

(6) 水質からみた地すべり型

当量比を用いて各成分の量的比較を行ったのが表4である。鉛直ボーリング孔については、1977年8月10日に採水した試料の値を、No. 3, 4, 5, 6, 集水井および降水については、51試料の平均値を用いてある。

まずこの表で $Ca/Na > 1$, $Ca/Mg > 1$ となる水が多いことから、当地すべり地の水は陽イオンでは Ca^{2+} に富むものが多いことがわかる。水質分析結果と鳥取県のボーリング調査結果⁷⁾を考え合わせると、鉛直ボーリング孔水4, No. 5および集水井のように $Ca/Na < 1$ かつ $Ca/Mg < 1$ の水はCaに比較してNaを多く含む斜長石や角閃石、輝石、黒雲母などから成る安山岩とMgを多く含むカンラン石から成る蛇紋岩などが存在する地帯を通過してきた水と考えられる。また鉛直ボーリング孔水7, No. 4のように $Ca/Mg < 1$ の水はMgを多く含む造岩鉱物から成る安山岩や蛇紋岩などが存在する地帯を通過してきた水と推定される。集水井の地点では、相当な厚さの蛇紋岩の風化層が存在していたことがわかっており⁸⁾、この蛇紋岩が広範囲に分布していることが推測される。

地下水の起源が浅層か、あるいは深層かを判断する1つの規準として HCO_3^-/SO_4^{2-} の値が用いられ、この値が大きいほど深層起源の水であるとされている^{15,19)}。表4によると、鉛直ボーリング孔水4, 5, 13, No. 5などは、他の水に比べ比較的深いところを通過してきた水と判定できる。とくにNo. 5は図2から読みとれるように、 HCO_3^- 濃度の値が小さいこと、また流量の変動に対して HCO_3^- 濃度の変動が小さく安定していることなどからみて、相当深いところを通ってきた水と推定される。

吉岡・古谷¹⁵⁾は主に西日本における第三紀層地すべり地と破砕帯地すべり地の湧水の水質が、表4の下二段に記したような実測値の範囲にあることを示している。それと比較すると、当量比をみただけの限りにおいては、横地地すべり地がいずれの範ちゅうに入るものかは断定できない。しかし前述のように SiO_2 濃度が他の第三紀層地すべり地に比べて相当低い30mg/l以下の値を示すこと、また地質図が第三紀以前の侵入岩の存在することを示していることなどから判断すると、横地地すべりが第三紀層地すべり地であると言われてきていることは疑問視される。

IV 結 論

本研究は天然水の化学組成から横地地すべり地の特性を知る目的で行い、次のような結論をえることができた。

- (1) キーダイアグラムによると、当地すべり地の水は淡水型の水質で $Ca(HCO_3)_2$ または $Mg(HCO_3)_2$ を主成分とした水である。
- (2) 斜面上部では $NaHCO_3$ 型を示し、斜面下部に行くにしたがって $Ca(HCO_3)_2$ 型あるいは $Mg(HCO_3)_2$ 型に移行している。
- (3) 定点No. 4において、小規模な崩壊が起る2ヶ月前に $Ca(HCO_3)_2$ 型の水質から $Mg(HCO_3)_2$ 型の水質に変っている。
- (4) 熱力学的安定領域図からみると当地すべり地の水はカオリナイトの安定領域にプロットされ

るが、 HCO_3^- 濃度が約70mg/l以上になるとカオリナイトとモンモリロナイトとの間に平衡関係が成立している。

(5) 年36.6トン (105g/m²/y) の造岩鉱物が風化して、年10.9トン (31.1g/m²/y) のカオリンと12.7トン (36.4g/m²/y) のモンモリロナイトが生成されている。

(6) 当量比による比較などから、従来考えられていたよりも安山岩が広く分布し、また蛇紋岩は西南部の斜面に多く分布していると考えられる。

(7) 従来第三紀層地すべりと分類されていたが、この分類には疑問がある。

今後さらに観測を継続することにより、水質変動と地すべり運動との間に何らかの関係があるかどうかをさらに明らかにしていくことが必要である。

また、当地すべり地の集水井は期待通りの成果をあげていないものもある。これは地下水脈を十分に把握していないことに起因している。水質分析により明らかにされた $\text{HCO}_3^-/\text{SO}_4^{2-}$ の値は地下水の相対的深さを知るために利用する価値がある。 $\text{HCO}_3^-/\text{SO}_4^{2-}$ の値を電気探査、垂直検層、地温探査などの幅広い分野からの調査結果と総合判断していくためには、地下水の水質変動を単に長期間追跡するだけでなく、可能な限り採水地点を増やしていく方向の調査もまた重要である。

謝 辞

水質分析に当り御指導・御便宜をいただいた本学農学部農芸化学科 松本 聡助教授、また資料提供その他の面で御援助いただいた鳥取県郡家土木出張所に対し深く謝意を表します。

参 考 文 献

- 1) 伊達美幸・乙黒真一：鳥取県横地地区の地すべりについて。鳥取大学農学部卒業論文 (1977)
- 2) Garrels, R. M. : Genesis of some ground waters from igneous rocks, in Abelson, P. H. (ed.), Geochemistry Vol. 2, John Wiley & Sons (1967)
- 3) 日本分析化学会北海道支部編：水の分析 (新版)。化学同人 (1972)
- 4) 北野 康・加藤喜久雄・金森 悟・金森暢子・吉岡龍馬：水質調査による岩石崩壊の予知の可能性。京都大学防災研究所年報, 10-A (1967)
- 5) 三宅泰雄・北野 康：新水質化学分析法。地人書館 (1976)
- 6) 中村誠佑・北野 康・飯田 修・片岡 順：地すべり地帯の地下水の水質, 1, 一新潟東野名および湯本地域一。地球化学, 6-1 (1973)
- 7) 日本工営株式会社：鳥取県横地地区地すべり防止工事報告書 (1976)
- 8) 佐藤 修：地すべり地の陸水の水質・2・一濁沢・上馬場地すべり一。新潟大学積雪地帯災害研究センター研究年報, 4 (1982)
- 9) 例えば、竹内篤雄・島 通保：地すべり地上部攪乱による土塊変動について。地すべり, 12-3 (1975)

- 10) 例えば, 玉田文吾: 口之津地区における表層地すべりの発生機構, 地すべり, 14-3 (1977)
- 11) Tardy, Y.: Characterization of the principal weathering types by the geochemistry of waters from some European and African crystalline massifs. Chem. Geol., Vol. 7 (1971)
- 12) 鳥取県地質図 (1966)
- 13) Yoshioka, R.: Estimation of amounts of weathered products through chemical composition of waters in the Kamenose landslide area. Bull. Disaster Prevention Res. Inst., Kyoto Univ., 25-1 (1975)
- 14) Yoshioka, R.: Chemical composition of natural water in landslide areas. 応用地質, 17-4 (1976)
- 15) 吉岡龍馬・古谷尊彦: 地質的環境のことなる地すべり地の水質特性について. 京都大学防災研究所年報, 16-B (1973)
- 16) 吉岡龍馬・金井忠一: 地すべり地地下水の炭酸ガス分圧について. 同上, 18-B (1975)
- 17) 吉岡龍馬・奥田節夫: 水質からみた亀の瀬地すべり地帯の粘土鉱物生産量の推定. 同上, 15-B (1972)
- 18) 吉岡龍馬・高谷精二: 兵庫県一宮町崩壊地の水質と粘土鉱物. 同上, 21-B (1978)
- 19) 吉岡龍馬・竹内篤雄・神山孝吉: 串林地すべり地の湧水量と溶存化学成分との関係. 同上, 17-B (1974)
- 20) 吉岡龍馬・富野孝生・滋賀地学研究会有志: びわ湖集水域の陸水化学的研究(1) - 降水について. 日本陸水学会第50回大会講演要旨集 (1985)

別表1 天然水の化学成分・流量・水温総括表 (No.3)

年月日	流量 l/sec	水温 °C	pH	Na ⁺	K ⁺	Mg ⁺⁺	Ca ⁺⁺	Cl ⁻	HCO ₃ ⁻	SO ₄ ⁻⁻	SiO ₂
'77. 6. 9	—	25.0	7.5	7.3	0.5	3.3	9.2	5.0	46.4	8.8	13.2
15	0.23	19.8	7.5	7.2	0.4	—	9.8	5.0	41.5	8.7	12.6
22	0.23	19.5	7.5	7.2	0.4	3.3	9.8	5.0	50.0	8.7	11.3
29	1.08	19.6	7.4	6.3	0.3	2.8	8.2	3.9	40.9	6.9	11.9
7. 6	1.35	18.9	7.5	6.0	0.3	2.7	7.6	3.2	39.7	5.7	13.2
13	0.9	24.2	7.5	6.5	0.3	2.9	8.6	3.2	43.9	7.5	13.2
20	0.54	21.7	7.5	6.5	0.3	3.0	8.8	3.9	37.2	7.7	13.6
27	0.40	29.3	7.6	7.1	0.4	3.0	9.2	3.9	48.8	7.9	14.5
8. 3	0.33	30.0	7.7	7.2	0.4	3.2	9.6	4.3	47.6	8.2	12.3
10	0.35	20.8	7.5	6.8	0.3	3.2	9.8	4.6	47.6	7.8	13.6
17	0.26	23.2	7.5	7.0	0.3	3.3	10.6	4.3	50.0	8.0	12.9
24	0.40	20.5	7.3	5.8	0.3	2.7	8.2	3.6	36.0	5.6	12.6
31	0.69	24.0	7.5	6.8	0.3	3.0	10.0	3.2	50.0	7.1	15.2
9. 7	0.49	21.8	7.5	6.6	0.3	3.0	9.2	4.3	48.2	5.8	11.9
14	0.57	23.5	7.6	7.0	0.4	3.0	9.2	3.6	49.4	6.2	14.0
21	0.41	18.0	7.4	6.9	0.3	3.2	10.2	3.6	47.0	7.6	14.5
28	0.19	20.0	7.5	7.0	0.3	3.3	9.8	3.6	48.2	8.9	12.6
10. 5	0.61	18.5	7.5	6.8	0.4	3.0	9.4	3.6	47.0	6.5	12.6
12	0.43	17.2	7.4	6.7	0.3	2.9	9.8	3.6	49.4	7.5	13.2
19	0.23	14.7	7.5	6.7	0.2	3.2	10.4	3.9	48.2	7.5	13.2
27	0.24	14.1	7.5	6.8	0.3	3.2	10.2	3.6	48.8	7.0	13.6
11. 2	0.22	16.1	7.4	6.7	0.3	3.4	10.6	4.3	47.0	7.6	13.2
9	0.36	14.8	7.5	6.6	0.3	2.8	9.6	3.2	46.4	6.7	13.2
16	0.30	12.0	7.4	6.6	0.3	2.9	10.4	3.9	48.2	7.3	12.9
24	0.69	10.2	7.5	6.5	0.3	2.9	9.8	3.2	45.8	6.5	11.9
30	0.73	9.0	7.3	6.5	0.3	3.2	10.0	3.6	47.0	7.6	11.6
12. 7	0.64	10.5	7.5	6.5	0.3	2.7	10.0	5.0	44.5	6.5	10.3
14	0.69	10.7	7.4	6.4	0.3	2.8	9.4	3.9	47.0	6.7	11.9
23	1.67	8.0	7.3	6.0	0.3	2.4	8.0	3.6	38.4	6.1	12.3
'78. 1. 13	2.22	9.3	7.3	5.7	0.2	2.6	7.4	5.0	34.2	6.2	13.9
19	1.56	6.8	7.2	5.8	0.2	2.6	8.0	3.9	35.4	7.0	13.9
25	1.82	7.7	7.2	5.5	0.3	2.3	7.2	6.7	31.1	5.8	13.2
2. 2	1.54	5.5	7.2	5.8	0.2	2.6	8.0	4.3	37.2	7.0	13.2
9	2.32	6.2	7.2	5.4	0.2	2.4	8.0	4.6	33.0	7.0	12.9
3. 4	5.00	8.0	7.0	4.7	0.2	2.0	5.4	6.4	18.3	6.5	12.6
12	0.10	4.0	7.1	5.2	0.2	2.3	6.8	—	25.6	6.6	10.3
25	0.93	12.1	7.2	5.4	0.2	2.2	6.7	5.7	28.1	5.8	12.9
4. 8	5.00	15.5	7.3	5.4	0.2	2.3	6.8	4.6	28.1	6.2	14.5
20	0.87	12.0	7.3	5.7	0.2	2.6	7.4	6.0	35.4	5.9	10.3
30	0.41	18.0	7.4	6.6	0.2	2.8	8.0	6.7	42.1	8.5	11.6
5. 11	0.36	15.0	7.4	6.1	0.2	3.0	8.4	5.7	41.5	7.2	16.5
27	0.36	21.3	7.5	6.4	0.1	3.2	8.8	5.0	47.6	9.1	15.1
6. 2	0.25	21.0	7.5	6.3	0.1	3.0	3.2	3.2	46.4	7.6	13.2
17	0.60	22.3	7.5	6.3	0.1	3.0	8.2	3.9	46.4	7.6	12.9
30	1.80	18.4	7.5	5.7	0.2	2.6	7.2	3.2	39.7	5.8	13.2
7. 15	0.34	25.0	7.5	6.4	0.2	2.8	9.2	4.6	48.8	8.7	12.6
30	0.16	24.5	7.4	6.8	0.1	3.4	9.2	3.9	52.5	8.6	14.5
8. 15	0.14	25.5	7.5	6.8	0.1	3.4	9.2	—	53.1	7.9	14.5
29	0.07	25.0	7.5	6.7	0.2	3.4	9.8	5.7	53.7	7.3	13.2
9. 19	0.45	21.5	7.5	6.3	0.3	3.2	9.2	5.0	47.0	6.9	12.6
10. 2	0.80	19.0	7.5	6.3	0.3	3.2	9.2	5.0	50.0	6.5	12.9

別表2 天然水の化学成分・流量・水温総括表 (No.4)

年月日	流量 l/sec	水温 °C	pH	Na ⁺	K ⁺	Mg ⁺⁺	Ca ⁺⁺	Cl ⁻	HCO ₃ ⁻	SO ₄ ⁻	SiO ₂
'77. 6. 9		16.0	7.3	7.3	0.3	4.3	7.6	3.2	53.1	5.6	21.6
15		15.0	7.3	7.3	0.4	4.3	7.6	4.6	56.1	5.6	21.3
22	0.23	14.5	7.3	7.5	0.4	4.4	7.6	4.6	54.9	5.3	20.3
29	0.91	15.0	7.3	7.0	0.4	4.4	8.0	3.9	54.3	6.4	21.0
7. 6	1.22	15.7	7.5	7.0	0.4	3.9	6.8	5.0	48.2	4.5	21.6
13	0.51	18.7	7.5	7.2	0.4	4.1	7.4	4.3	49.4	5.7	23.2
20	0.35	17.5	7.5	7.2	0.4	4.3	7.4	4.6	54.3	5.6	23.2
27	0.26	19.5	7.5	7.4	0.4	4.1	7.6	4.3	54.3	4.7	23.6
8. 3	0.19	20.0	7.4	7.7	0.4	4.5	7.6	4.6	53.7	4.7	21.3
10	0.34	17.9	7.4	7.4	0.4	4.4	8.0	4.3	54.1	5.5	22.3
17	0.19	18.5	7.4	7.6	0.4	4.6	8.6	5.0	56.8	5.6	23.2
24	0.63	17.9	7.5	7.4	0.7	4.6	8.6	4.6	56.8	4.8	23.2
31	0.32	19.0	7.4	7.6	0.4	4.5	8.6	4.6	58.0	6.8	23.2
9. 7	0.37	18.0	7.4	7.6	0.4	4.4	8.0	4.3	54.3	4.6	21.6
14	0.80	18.5	7.5	7.5	0.4	3.4	7.6	5.0	55.5	5.7	23.2
21	0.35	16.8	7.4	7.4	0.5	4.5	8.0	5.0	56.1	4.7	24.5
28	2.50	16.3	7.5	7.5	0.4	4.7	8.0	4.3	55.5	5.9	21.9
10. 5	0.46	15.7	7.5	7.6	0.4	4.6	7.8	4.6	54.3	5.1	21.6
12	0.30	14.5	7.4	7.2	0.3	4.7	8.0	5.7	58.0	4.8	22.3
19	0.28	14.0	7.4	7.4	0.3	4.7	7.8	5.7	54.9	4.9	21.9
27	0.23	13.8	7.4	7.3	0.3	5.0	8.0	4.6	58.0	3.8	22.6
11. 2	0.36	15.0	7.5	7.5	0.4	5.0	8.0	4.6	58.6	5.7	22.9
9	0.50	14.0	7.5	7.5	0.4	4.7	8.0	5.7	56.8	4.8	22.6
16	0.25	12.0	7.4	7.3	0.4	4.9	8.2	5.0	59.2	4.9	21.3
24	0.40	10.2	7.5	7.0	0.3	4.5	7.6	3.9	53.7	5.5	21.0
30	0.36	9.6	7.5	7.0	0.3	4.9	7.8	4.6	55.5	4.7	21.3
12. 7	0.43	10.1	7.4	7.1	0.4	4.7	7.6	6.0	52.5	5.4	21.0
14	0.53	10.3	7.5	7.1	0.4	4.4	7.6	5.7	53.1	5.5	19.7
23	1.67	8.8	7.4	6.7	0.3	4.3	6.8	4.6	48.2	5.6	21.0
'78. 1. 13	2.00	8.7	7.3	6.3	0.3	4.4	6.2	6.7	44.5	6.5	22.6
19	0.97	7.5	7.3	6.2	0.3	4.3	5.8	6.4	45.2	5.4	23.2
25	2.56	7.7	7.3	6.0	0.3	3.9	5.4	6.4	39.1	4.9	22.3
2. 2	1.02	6.0	7.3	6.1	0.2	3.8	6.0	4.3	43.1	5.5	23.9
9	1.72	6.5	7.3	6.0	0.3	4.1	6.2	4.3	40.9	7.0	21.0
3. 4	11.11	8.5	7.0	5.4	0.3	3.0	3.2	8.5	18.3	7.0	17.4
12	1.54	6.5	7.3	5.8	0.3	3.8	5.8	4.6	37.8	5.8	20.0
25	2.44	10.5	7.3	5.5	0.3	3.7	5.4	6.7	34.2	6.0	20.0
4. 8	1.56	12.7	7.3	5.9	0.3	4.0	5.8	5.0	39.1	6.3	20.0
20	0.98	11.0	7.3	5.8	0.3	3.9	5.8	6.7	40.9	4.0	18.4
30	0.31	13.0	7.2	6.4	0.3	4.4	5.4	9.9	45.8	6.4	20.3
5. 11	0.33	13.2	7.3	6.5	0.3	4.3	6.2	6.0	48.2	4.7	24.5
27	0.13	16.0	7.4	6.7	0.3	4.4	6.2	5.0	50.0	5.5	22.6
6. 2	0.33	16.0	7.4	6.5	0.3	4.4	6.0	3.6	47.6	4.6	21.0
17	0.44	17.8	7.3	6.6	0.3	4.5	5.4	6.0	50.7	5.6	21.9
30	1.05	17.0	7.3	6.0	0.4	3.9	5.8	3.9	44.5	5.6	20.3
7. 15	0.21	21.0	7.5	6.8	0.4	3.9	6.0	7.1	50.7	6.8	22.6
30	0.23	20.6	7.4	7.2	0.3	4.7	6.2	4.3	56.1	5.7	23.9
8. 15	0.22	21.0	7.4	7.1	0.3	4.6	6.2	—	55.5	5.6	23.6
29	0.17	21.0	7.5	7.2	0.4	4.7	6.2	6.0	56.1	4.6	22.9
9. 19	0.43	19.0	7.3	6.7	0.3	4.3	6.4	5.7	50.7	4.3	22.3
10. 2	0.43	17.0	7.4	6.7	0.3	4.5	6.2	4.6	49.4	4.4	21.9

別表3 天然水の化学成分・流量・水温総括表 (No.5)

年月日	流量 l/sec	水温 °C	pH	Na ⁺	K ⁺	Mg ⁺⁺	Ca ⁺⁺	Cl ⁻	HCO ₃ ⁻	SO ₄ ⁻	SiO ₂
'77. 6. 9	—	12.0	6.9	7.0	0.5	2.3	4.0	3.9	30.0	1.5	26.8
15	2.70	12.0	6.9	7.4	0.4	2.3	3.8	5.7	32.3	0.4	26.8
22	3.23	11.0	6.9	6.7	0.4	2.3	3.8	4.6	30.0	1.7	25.8
29	3.85	12.2	6.7	6.4	0.5	2.3	4.0	3.9	26.9	3.1	24.2
7. 6	3.70	13.0	6.7	6.4	0.5	2.4	3.8	4.6	28.1	1.3	25.5
13	3.23	13.7	6.8	6.6	0.4	2.4	3.8	6.0	35.4	1.1	27.1
20	3.03	12.8	6.9	6.5	0.5	2.4	4.0	6.7	28.7	1.7	27.4
27	3.09	12.5	6.8	6.6	0.4	2.3	3.8	6.7	28.7	1.5	27.7
8. 3	3.08	12.3	6.9	6.7	0.5	2.4	4.0	5.0	30.0	1.0	25.5
10	2.91	12.0	6.7	6.7	0.5	2.3	4.2	4.6	28.7	1.5	28.7
17	2.44	13.0	6.8	6.8	0.5	2.4	4.2	4.6	28.0	0.6	26.5
24	2.54	12.5	6.7	6.5	0.6	2.4	4.2	3.9	28.1	1.2	26.8
31	2.44	13.0	6.7	6.6	0.5	2.4	4.0	4.6	31.1	1.0	27.4
9. 7	2.44	12.0	6.8	6.6	0.4	2.4	3.8	4.6	23.2	0.6	23.2
14	2.53	12.5	6.8	6.6	0.5	2.4	4.2	4.6	31.1	0.5	28.0
21	2.27	12.0	6.9	6.7	0.5	2.4	4.2	4.6	31.1	1.2	28.7
28	2.00	12.2	6.9	6.6	0.4	2.4	4.0	4.6	28.7	1.1	25.5
10. 5	2.56	12.0	6.7	6.7	0.5	2.4	4.0	4.2	28.1	0.6	25.8
12	2.38	11.8	6.9	6.2	0.4	2.4	4.2	3.9	29.9	1.0	26.5
19	2.08	11.5	6.9	6.7	0.5	2.3	4.0	4.6	28.7	0.6	27.1
27	2.08	11.4	6.9	6.3	0.4	2.3	4.2	4.3	28.7	0.1	27.1
11. 2	2.17	11.8	6.8	6.4	0.5	2.3	4.0	4.6	30.0	2.1	26.5
9	2.50	12.0	6.9	6.4	0.5	2.4	3.8	5.0	28.7	1.5	26.1
16	2.22	11.0	6.9	6.3	0.6	2.4	4.0	5.0	31.1	0.9	25.5
24	2.40	11.0	7.0	6.4	0.5	2.3	4.0	4.3	28.1	1.2	25.8
30	2.04	10.7	7.0	6.3	0.4	2.3	4.0	3.9	32.3	0.7	25.5
12. 7	2.33	11.0	6.9	6.4	0.5	2.3	3.8	4.6	20.8	1.3	25.5
14	2.27	11.0	6.9	6.4	0.5	2.3	3.8	4.6	28.1	1.7	24.5
23	2.73	10.0	6.9	6.1	0.6	2.3	3.8	4.6	28.1	2.5	24.2
'78. 1. 13	3.13	9.5	6.8	6.1	0.5	2.4	3.8	6.7	28.1	2.9	25.2
19	2.50	10.0	6.8	6.1	0.4	2.4	3.6	5.0	29.9	1.6	28.1
25	3.33	9.6	6.7	5.9	0.5	2.4	3.8	6.0	23.8	2.4	25.8
2. 2	2.38	10.0	6.9	6.1	0.4	2.3	3.6	5.0	28.7	1.2	27.1
9	2.56	9.0	6.7	6.1	0.4	2.3	3.8	5.0	25.6	2.8	25.8
3. 4	10.00	7.0	6.4	5.3	0.9	2.4	3.6	7.8	20.1	6.0	21.0
12	5.82	10.2	6.5	6.2	0.5	2.4	3.8	8.9	26.2	3.2	24.2
25	4.76	11.0	6.7	6.0	0.5	2.3	3.6	6.4	25.0	4.8	25.5
4. 8	4.55	11.7	6.7	6.1	0.4	2.3	3.8	6.0	26.2	2.2	25.5
20	3.70	11.2	6.8	6.1	0.3	2.3	3.6	7.1	27.5	0.1	25.8
30	3.3	13.0	6.8	6.2	0.3	2.3	3.6	9.2	29.9	1.9	26.1
5. 11	3.3	11.6	6.8	6.2	0.3	2.3	3.6	7.1	28.7	0.5	30.0
27	2.78	12.0	6.8	6.2	0.3	2.4	3.4	5.0	31.1	1.6	27.1
6. 2	2.86	12.0	6.8	6.3	0.3	2.3	3.4	3.6	30.5	0.5	26.5
17	3.03	12.9	6.8	6.2	0.4	2.3	3.4	5.0	28.7	1.8	25.8
30	3.70	12.8	6.6	6.2	0.6	2.4	3.8	5.7	28.7	2.3	26.5
7. 15	2.94	12.5	6.8	6.2	0.5	2.3	3.6	3.6	28.7	3.7	26.5
30	3.03	12.5	6.8	6.0	0.4	2.4	3.4	4.6	31.3	2.5	27.4
8. 15	2.38	12.3	6.8	6.3	0.4	2.4	3.4	—	32.3	1.7	28.1
29	2.17	13.1	6.8	6.1	0.4	2.3	3.6	5.7	31.1	1.2	28.1
9. 19	1.92	12.0	6.8	6.3	0.4	2.4	3.4	3.6	31.7	0.6	26.5
10. 2	1.18	12.2	6.9	6.3	0.4	2.3	3.8	5.0	32.3	1.0	26.1

別表4 天然水の化学成分・流量・水温総括表 (No.6)

年月日	流量 l/sec	水温 °C	pH	Na ⁺	K ⁺	Mg ⁺⁺	Ca ⁺⁺	Cl ⁻	HCO ₃ ⁻	SO ₄ ⁻⁻	SiO ₂
'77. 6. 9				—	—	—	—	—	—	—	—
15		13.0	7.4	6.6	0.5	3.4	7.4	7.5	45.2	3.2	19.7
29	4.35	14.0	7.4	6.8	0.5	3.4	7.6	4.6	45.8	4.0	18.4
7. 6	4.76	13.8	7.5	6.7	0.5	3.4	7.4	6.4	44.5	2.4	19.4
13	2.50	14.2	7.5	6.7	0.5	3.5	7.8	6.0	45.8	3.5	20.3
20	3.13	15.6	7.4	6.7	0.5	3.4	7.4	6.0	45.8	3.9	20.3
27	2.23	16.7	7.5	6.9	0.5	3.4	7.2	6.7	50.0	3.0	24.2
8. 3	2.73	17.9	7.5	6.9	0.5	3.4	7.6	5.7	46.4	2.7	18.1
10	3.49	15.0	7.5	6.6	0.5	3.4	8.0	4.6	48.8	2.6	19.4
17	2.50	16.3	7.5	6.8	0.5	3.5	8.0	5.7	47.6	3.8	20.3
24	3.17	14.8	7.5	6.7	0.6	3.7	8.2	6.0	45.2	3.2	20.3
31	2.44	16.0	7.4	6.7	0.5	3.4	8.0	5.7	48.2	3.7	19.7
9. 7	3.23	15.5	7.4	6.8	0.5	3.4	7.6	5.7	45.8	3.0	20.0
14	3.85	15.8	7.5	6.7	0.5	3.5	7.6	5.6	47.0	4.2	25.2
21	2.86	14.0	7.4	6.8	0.5	3.4	8.0	6.0	43.9	3.6	25.2
28	2.86	14.2	7.5	6.8	0.5	3.4	7.6	6.0	46.4	3.5	19.0
10. 5	2.86	14.2	7.6	6.7	0.5	3.5	7.6	5.7	47.0	2.7	18.7
12	2.94	13.7	7.8	6.5	0.5	3.4	8.0	5.7	47.0	3.8	19.4
19	2.27	13.0	7.3	6.7	0.5	3.4	7.6	6.4	45.8	3.3	19.0
27	2.03	12.8	7.6	6.7	0.5	3.4	7.2	6.0	47.0	2.6	19.7
11. 2	2.00	13.5	7.4	6.6	0.6	3.7	8.2	6.7	47.0	3.9	20.3
9	1.85	12.8	7.6	6.6	0.7	3.9	7.4	5.7	48.8	3.9	19.7
16	1.88	12.0	7.5	6.8	0.5	3.8	8.0	5.7	48.2	3.3	18.4
24	2.22	10.2	7.5	6.6	0.5	3.7	7.6	5.7	45.8	4.5	18.4
30	2.22	9.5	7.4	6.5	0.5	3.5	7.6	5.0	45.2	3.5	18.7
12. 7	2.94	11.2	7.6	6.6	0.6	2.7	7.2	6.0	47.6	3.3	17.7
14	2.38	11.5	7.6	6.5	0.6	3.7	7.2	6.4	46.4	4.3	18.1
23	4.00	9.0	7.4	6.3	0.5	3.8	7.0	5.7	45.2	4.8	18.4
'78. 1. 13	6.67	10.0	7.4	6.4	0.5	3.7	6.8	6.0	44.5	4.6	21.0
19	5.56	8.8	7.4	6.4	0.5	3.5	6.6	7.5	44.5	4.4	21.6
25	6.67	9.5	7.5	6.2	0.5	3.5	6.6	7.1	42.1	2.9	20.0
2. 2	4.76	7.5	7.3	6.3	0.5	3.5	6.8	4.6	45.8	3.1	20.1
9	5.00	8.5	7.3	6.3	0.4	3.7	6.8	5.7	43.3	4.9	19.7
3. 4	14.30	10.0	7.3	5.8	0.5	3.9	6.2	8.9	34.2	5.6	20.0
12	16.67	8.8	7.3	6.2	0.5	3.5	7.0	8.9	39.7	5.6	16.8
25	25.00	11.5	7.5	6.3	0.5	3.3	6.8	7.1	38.4	5.1	19.7
4. 8	1.43	12.0	7.4	6.2	0.5	3.5	6.6	6.4	42.1	4.8	18.7
20	7.14	11.3	7.4	6.4	0.5	3.8	6.4	6.3	45.2	1.5	19.0
30	6.67	14.2	7.5	6.3	0.3	3.5	6.4	8.9	48.2	3.6	21.6
5. 11	11.11	12.1	7.4	6.3	0.4	3.5	6.4	7.8	46.4	2.1	23.2
27	5.88	14.0	7.5	6.1	0.4	3.4	6.8	6.4	47.0	3.7	20.0
6. 2	5.88	13.0	7.5	6.4	0.4	3.5	6.4	6.3	46.4	2.3	19.0
17	4.00	15.5	7.5	6.3	0.4	3.7	6.4	4.6	47.6	3.8	20.3
30	7.69	14.5	7.5	6.3	0.5	3.8	6.8	6.4	47.6	4.1	20.0
7. 15	4.55	15.0	7.4	6.3	0.5	3.5	6.4	6.0	46.4	4.7	19.4
30	3.03	16.0	7.4	6.5	0.4	3.7	6.4	5.0	48.2	4.2	20.0
8. 15	3.13	17.0	7.4	6.2	0.4	3.5	6.8	—	47.0	4.3	20.9
29	2.33	16.6	7.4	6.2	0.5	3.7	6.8	5.7	47.0	2.7	21.0
9. 19	2.70	16.0	7.5	6.3	0.5	3.9	6.8	6.0	47.0	2.6	20.3
10. 2	1.47	15.8	7.5	6.4	0.6	3.9	7.2	5.7	48.2	3.2	18.7

別表5 天然水の化学成分・流量・水温総括表(集水井)

年月日	流量 l/sec	水温 °C	pH	Na ⁺	K ⁺	Mg ⁺⁺	Ca ⁺⁺	Cl ⁻	HCO ₃ ⁻	SO ₄ ⁻⁻	SiO ₂
'77. 6. 9	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
15	0.010	12.0	6.5	6.5	0.5	3.3	4.6	5.0	34.8	2.1	23.2
22	0.012	11.6	6.7	6.1	0.4	3.3	4.8	4.3	34.8	2.7	22.9
29	0.014	11.9	6.7	6.0	0.5	3.3	4.6	4.6	34.8	3.4	22.3
7. 6	0.014	12.6	6.7	6.1	0.5	3.4	4.8	2.5	36.6	2.6	23.2
13	0.013	13.2	6.7	6.1	0.5	3.3	4.8	5.0	34.8	3.3	24.5
20	0.011	13.7	6.7	6.3	0.5	3.4	4.6	5.0	36.0	3.0	25.2
27	0.012	13.8	6.5	6.5	0.6	3.4	4.4	4.6	36.0	2.5	25.5
8. 3	0.011	14.0	6.7	6.4	0.5	3.3	4.8	5.0	35.4	2.0	22.9
10	0.013	13.5	6.7	6.4	0.5	3.3	5.0	4.6	35.4	3.7	24.8
24	0.011	14.2	6.6	6.5	0.5	3.3	4.8	3.9	36.6	1.7	25.5
31	0.012	13.8	6.6	6.2	0.5	3.4	4.8	4.3	36.0	2.4	25.2
9. 7	0.013	13.7	6.6	6.3	0.5	3.4	4.6	4.3	35.4	1.9	22.9
14	0.013	14.2	6.5	6.4	0.5	3.4	4.8	3.9	36.6	2.1	25.8
21	0.010	13.5	7.1	6.3	0.5	3.4	4.8	3.9	34.8	1.9	26.8
28	0.011	13.5	6.8	6.3	0.5	3.3	4.8	3.6	34.8	2.5	24.2
10. 5	0.011	13.7	6.6	6.3	0.5	3.4	4.6	3.9	35.4	1.8	23.6
12	0.009	14.0	6.6	6.1	0.4	3.4	4.8	5.0	36.6	2.1	24.8
19	0.008	13.6	6.5	6.0	0.4	3.4	4.6	4.3	33.6	2.7	23.9
27	0.008	13.5	6.3	6.2	0.4	3.4	4.6	5.0	36.0	1.1	24.5
11. 2	0.009	13.1	6.6	5.8	0.4	3.3	4.8	5.0	36.0	3.1	25.5
9	0.009	13.0	6.7	6.1	0.4	3.3	4.4	4.3	36.0	3.0	24.2
16	0.008	12.5	6.8	6.0	0.4	3.4	4.8	4.3	36.0	2.1	22.9
24	0.008	12.6	6.8	5.9	0.4	3.4	4.4	3.9	34.8	2.4	24.2
30	0.008	11.5	7.1	5.8	0.4	3.5	4.6	5.0	36.0	1.8	23.2
12. 7	0.007	12.8	6.8	5.8	0.4	3.4	4.6	5.0	34.8	3.0	22.6
14	0.008	12.2	6.8	5.8	0.4	3.5	4.4	4.6	33.6	3.5	22.6
23	0.010	11.5	6.7	5.5	0.3	3.8	4.4	5.0	33.0	4.1	24.5
'78. 1. 13	0.010	11.5	6.7	5.5	0.3	3.8	4.4	5.0	33.0	4.1	22.9
19	0.009	11.0	6.7	5.4	0.3	3.7	4.2	6.0	33.0	3.5	24.2
25	0.009	11.0	6.7	5.4	0.3	3.5	4.4	5.0	31.7	3.7	22.9
2. 2	0.008	9.5	7.1	5.4	0.3	3.5	4.4	5.0	28.1	3.5	22.9
9	0.008	10.8	6.7	5.2	0.3	3.3	4.2	5.0	28.1	4.5	22.6
3. 4	0.014	10.3	6.3	5.3	0.3	3.5	4.4	7.1	30.5	4.7	21.6
12	0.013	9.0	6.6	5.2	0.4	3.5	4.6	5.0	31.7	4.9	20.0
25	0.014	10.7	6.5	5.2	0.4	3.3	4.6	4.6	32.3	4.8	21.6
4. 8	0.009	11.2	6.4	4.9	0.3	3.3	4.4	6.0	27.5	4.3	21.6

別表 6 期間降水量および降水の化学成分の一覧表

年 月 日	積算降水量 mm	pH	Na ⁺	K ⁺	Mg ⁺⁺	Ca ⁺⁺	Cl ⁻	HCO ₃ ⁻	SO ₄ ⁻
'77. 6. 15	14.2	6.8	2.4	1.2	0.9	3.8	1.8	14.6	6.0
22	30.1	6.6	1.2	0.4	0.7	2.0	1.1	5.5	3.3
29	99.3	6.4	0.1	0.0	0.6	1.4	1.8	0	1.0
7. 6	116.7	5.9	0.0	0.0	0.6	1.2	1.4	0	1.9
13	21.2	6.2	0.0	0.0	0.6	1.6	0.7	0.6	3.8
20	39.8	6.4	0.2	0.1	0.6	1.4	0.7	1.2	2.1
27	0.1	—	—	—	—	—	—	—	—
8. 3	6.2	6.7	—	—	—	—	—	—	—
10	78.1	6.1	0.2	0.0	0.6	1.6	0.4	1.2	2.3
17	22.6	6.3	0.1	0.0	0.6	1.4	0.7	1.2	2.1
24	21.5	6.5	0.2	0.1	0.6	1.6	0.7	1.8	1.9
31	61.1	6.4	0.0	0.0	0.6	1.4	1.8	1.2	1.1
9. 7	67.6	5.8	0.0	0.0	0.6	1.2	1.1	0	2.0
14	73.7	6.3	0.0	0.0	0.6	1.2	0.7	0	0.4
21	9.7	6.4	—	—	—	—	—	—	—
28	2.1	6.8	—	—	—	—	—	—	—
10. 5	63.8	6.4	0.1	0.1	0.6	1.2	0	0	1.0
12	22.1	6.4	0.5	0.0	0.7	1.4	1.8	0.6	3.9
19	0.7	6.7	—	—	—	—	—	—	—
27	—	6.5	—	—	—	—	3.6	—	—
11. 2	39.2	6.4	0.4	2.3	0.7	2.8	24.1	0	1.5
9	32.0	6.5	0.6	0.0	0.7	1.2	0.7	0	1.0
16	15.9	6.6	2.1	0.3	1.0	1.6	6.0	1.2	3.9
24	90.7	6.4	0.0	0.0	0.6	1.2	0	0	0.1
30	0.1	6.9	—	—	—	—	—	—	—
12. 7	49.2	6.5	6.3	0.3	1.5	1.4	6.0	0	0.1
14	33.4	6.7	3.0	0.2	1.1	1.6	4.6	1.2	4.5
23	88.8	6.7	5.1	0.2	1.3	2.4	7.8	0	6.3
'78. 1. 13	168.7	6.7	3.1	0.0	1.0	1.2	3.9	0.6	2.2
19	18.8	6.3	2.6	0.1	1.0	1.4	5.0	0.6	5.8
25	39.6	6.0	5.0	0.2	1.3	2.0	4.3	0.6	3.7
2. 2	30.9	6.3	4.4	0.2	1.1	2.0	3.2	1.2	5.5
9	48.5	5.8	2.4	0.1	1.0	1.4	3.6	0	2.1
3. 4	151.8	5.8	3.6	0.1	1.1	1.6	5.0	1.2	3.3
12	16.7	6.1	7.7	0.4	1.7	2.4	1.1	3.7	6.7
25	108.5	6.0	1.3	0.1	0.9	1.4	6.0	0.6	3.0
4. 8	83.2	6.0	2.6	0.0	1.0	1.4	—	1.8	3.3
20	51.2	6.2	0.2	0.0	0.7	1.8	—	1.8	5.3
30	3.8	6.6	—	—	—	—	—	—	—
5. 11	21.5	6.6	0.5	0.2	0.7	3.0	0.4	4.3	5.8
27	30.7	6.5	0.4	0.1	0.7	1.6	0.4	3.7	2.5
6. 2	37.4	6.2	0.6	0.0	0.7	1.6	0.7	0.6	4.2
17	106.6	6.1	0.1	0.0	0.6	1.4	1.4	0	4.5
30	138.5	6.2	0.0	0.0	0.6	1.2	0	0	2.4
7. 15	9.5	—	—	—	—	—	—	2.4	4.8
30	21.3	6.1	0.5	0.2	0.7	1.8	0.4	3.1	5.4
8. 15	37.2	6.3	0.2	0.1	0.6	1.4	—	3.1	2.4
29	36.3	6.2	0.0	0.0	0.6	1.4	0	3.1	1.8
9. 19	140.7	6.2	0.1	0.0	0.6	1.2	—	1.8	0.6
10. 2	76.4	6.2	0.0	0.0	0.6	1.2	1.4	0.6	1.9

別表7 鉛直ボーリング孔水の化学成分 (1977. 8. 10採水)

No.	pH	Na ⁺	K ⁺	Mg ⁺⁺	Ca ⁺⁺	Cl ⁻	HCO ₃ ⁻	SO ₄ ⁻⁻	SiO ₂
1	6.0	7.4	3.1	3.9	5.2	5.7	42.1	4.7	25.2
2	6.6	5.4	3.1	3.3	8.2	5.7	35.4	5.4	12.9
4	7.5	9.9	0.8	3.8	27.9	7.8	130.0	4.3	12.9
5	6.6	8.3	0.7	6.4	12.6	8.9	82.4	5.1	26.8
6	6.5	8.8	1.6	6.7	13.0	7.1	36.6	8.2	28.4
7	6.5	6.1	0.8	4.3	6.0	6.4	34.8	6.9	20.7
8	6.7	6.4	0.6	3.7	7.2	6.4	43.3	4.4	19.0
9	7.3	6.3	0.6	4.6	10.8	4.6	59.2	10.7	18.4
10	7.5	8.3	0.7	5.4	12.4	7.1	67.1	9.1	18.4
12	7.3	7.6	0.8	4.0	8.2	4.3	51.9	4.9	20.0
13	6.8	7.1	0.5	3.5	12.2	6.7	64.1	2.6	14.5