

串林地すべり地の湧水量と溶存化学成分との関係

吉岡 龍馬・竹内 篤雄・神山 孝吉

INVESTIGATION ON THE DISCHARGE AND THE CHEMICAL COMPOSITION OF GROUND WATER IN THE KUSHIBAYASHI LANDSLIDE AREA

By Ryuma YOSHIOKA, Atsuo TAKEUCHI and Kōkichi KAMIYAMA

Synopsis

The variation with time in the concentrations of dissolved chemical species and the discharge of ground waters in the Kushibayashi area, Shiga Prefecture were investigated from Oct. 1972 to Nov. 1973 in order to obtain the basic data for estimate of the amounts of clay minerals produced by weathering processes through the chemical compositions of ground waters in this area.

The authors have examined the relationships among the chemical species contents of the waters, and between the chemical species contents and discharge of the waters. And the following have been attained: (1) A clear negative relationship is observed between sulfate and bicarbonate contents in the waters drained from the layer about 5 m depth under ground surface, (2) a good correlation is observed between discharge and bicarbonate and sodium contents, respectively, and (3) the transported amount of bicarbonate ions increases with an increase in discharge but suddenly the increasing rate of transported amount changes after a definite discharge and the slope in the graph tends to become steep in the order 1 m, 5 m, and 10 m depths under ground surface.

A hypothesis on the mechanism of this phenomenon is also presented.

1. 緒 言

地すべり地での粘土鉱物の生成と存在はその化学的活性が強いため、いろいろな化学成分を含んだ水と接触するとイオン交換をしたり粘土鉱物自身の変質をきたし、その粘土のもつ物理的性質、例えば粘着性・膨潤性などに影響をあたえ地盤の劣化をひきおこし地すべり発生・活動の誘因の1つになるものと考えられる。

現在、地すべり地の天然水の化学分析はかなり広くおこなわれているが、それは主に地下水の水塊分析などの目的に使われており長期間定期的に採水分析した例はあまりない。

著者の一人吉岡¹⁾は CO₂ を含む水と岩石・土壌とが接触すると、化学的風化が進み粘土化を助長し、いわゆる地すべり粘土などが生成されるという観点に立って、地すべり地の地下水の化学分析をおこない粘土鉱物の生成量のかつて推定したことがある。

こうした研究の一環として、今回は地すべり地の地下水・地表水中の化学成分量の長期間にわたる変化状況を把握するとともに流量変化と化学成分量との関係を明らかにする目的で、古びわ湖層の串林地すべり地（大津市）を対象にして、定期的に地下水・地表水を採水分析したので以下簡単に報告する。

なお、当地すべり地の応用地球物理学的調査研究は1967年²⁾よりおこなわれており、現在、著者の一人竹内³⁾と島⁴⁾により続行されている。

2. 方 法

Fig. 1 に採水地点を示す。採水地点 D-1, W-1, W-2 の3点につき、1972年10月から1973年11月にかけて原則的に毎週1回採水し、その都度水温、流量を測定した。分析は常法に従って Na⁺, Mg²⁺, Ca²⁺, Cl⁻, HCO₃⁻,

SO_4^{2-} , Soluble- SiO_2 につきおこなった。また水質の一斉調査を1973年4月に実施し分析は上記の項目に K^+ を加えた。なお流量はメスシリンダーまたはポリバケツで一定容積の水がたまるまでの時間を測定し求めた。

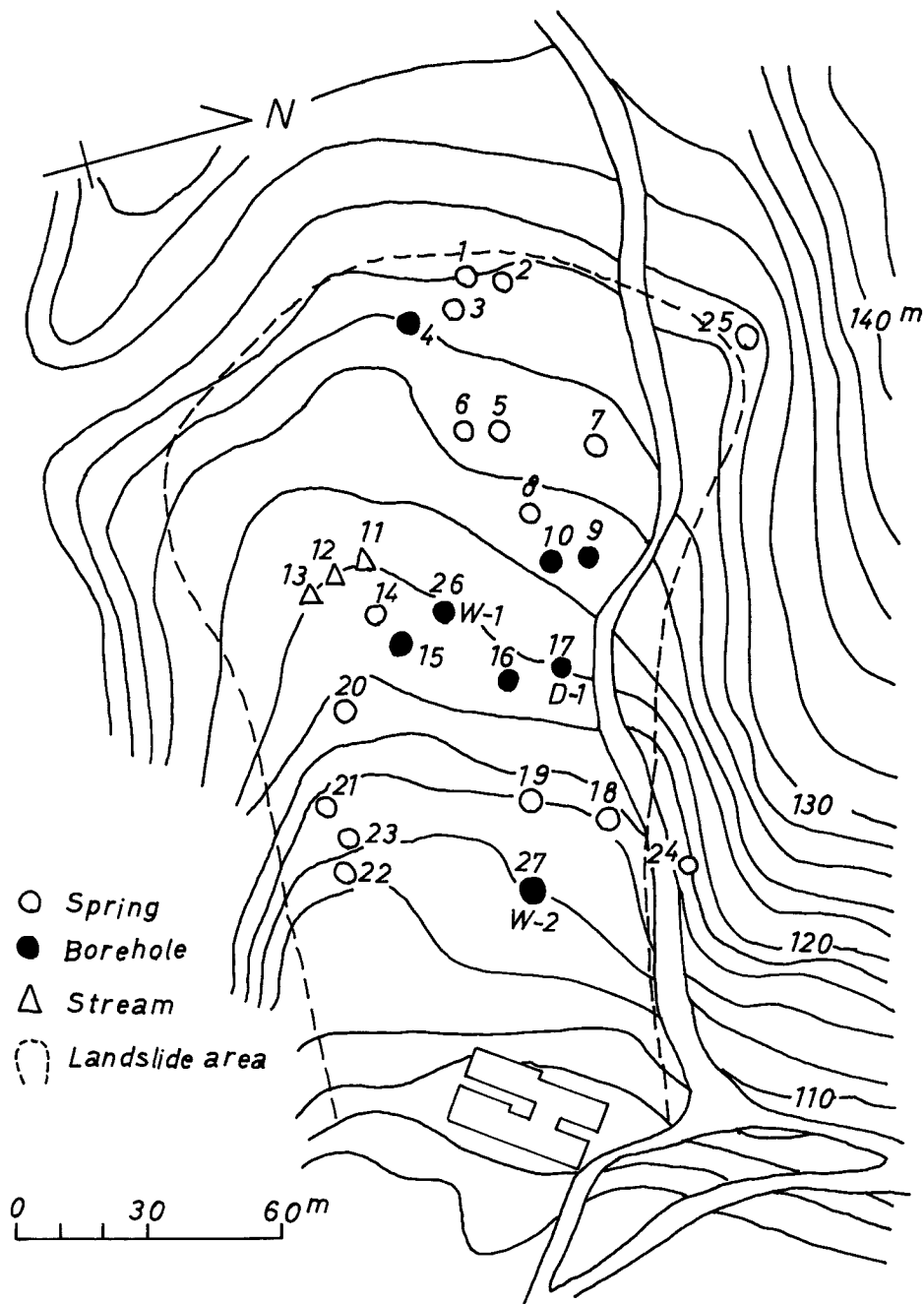


Fig. 1 Map of sampling points in the Kushibayashi landslide area.

Table 1 Chemical compositions of natural waters in the Kushibayashi landslide area
(date of sampling: April, 24, 1973).

unit		mg/l									°C	HCO ₃ ⁻ /SO ₄ ²⁻
		Na ⁺	K ⁺	Mg ²⁺	Ca ²⁺	Cl	HCO ₃ ⁻	SO ₄ ²⁻	SiO ₂	pH	WT	
springs	1	13.4	4.5	6.6	42.1	16.3	119.5	47.3	14.9	6.6	19.0	2.5
	2	10.2	5.0	5.1	30.4	7.4	123.0	27.2	15.9	6.6	24.2	4.5
	3	24.2	7.4	10.6	68.1	31.4	93.7	34.2	12.3	6.4	14.9	2.7
	5	12.0	3.3	5.9	14.9	15.9	26.1	32.9	10.5	5.8	11.5	0.79
	6	10.6	3.3	4.2	17.8	13.6	19.5	32.0	13.1	6.8	17.8	0.61
	7	10.4	2.4	4.3	20.8	16.0	61.2	27.5	10.3	6.0	14.4	2.2
	8	7.9	1.6	2.7	8.2	9.1	11.6	27.8	11.8	5.6	15.9	0.42
	14	6.8	1.1	4.2	8.0	2.5	59.3	21.9	7.5	6.2	15.5	2.7
	18	6.8	0.9	3.6	9.1	7.2	30.1	22.2	16.2	6.0	15.9	1.4
	19	4.2	0.8	2.1	6.5	3.2	8.4	27.6	11.3	5.5	12.9	0.30
	20	1.3	5.0	0.5	4.5	2.9	13.6	30.4	6.9	6.1	15.9	0.45
	21	3.8	0.9	1.5	4.3	1.9	18.1	26.8	15.7	6.9	13.9	0.68
	22	3.1	0.8	1.9	4.9	1.6	19.4	29.4	8.7	5.8	16.8	0.66
	23	3.1	0.5	1.8	4.8	1.4	18.7	27.5	8.3	5.7	12.8	0.68
	24	4.3	0.9	0.6	1.9	3.4	7.7	25.7	19.1	6.0	14.8	0.30
	25	8.4	3.9	2.8	11.9	4.4	51.0	25.7	13.4	5.9	13.0	2.0
	Cave	8.2	2.6	3.7	16.1	8.6	42.6	29.1	12.2	6.1		1.5
	Cmin	1.3	0.5	0.5	1.9	1.4	7.7	21.9	6.9			
	Cmax	24.2	7.4	10.6	68.1	31.4	123.0	47.3	19.1			
boreholes	4	21.4	6.3	11.7	57.5	38.8	80.4	34.8	16.2	5.8	13.2	2.3
	9	8.9	1.7	4.9	12.9	8.6	56.5	22.9	20.6	5.9	13.6	2.5
	10	9.2	1.6	7.1	18.0	11.3	83.2	22.4	26.6	6.3	13.0	3.7
	15	9.2	1.0	2.6	6.8	7.2	25.7	25.4	14.6	5.9	17.2	1.0
	16	11.4	2.1	5.4	23.6	15.1	66.9	26.0	21.0	6.9	13.1	2.6
	17	7.3	0.9	1.7	8.2	6.2	21.5	26.0	13.1	6.1	15.9	0.80
	26	7.6	1.1	2.0	7.0	2.8	41.8	21.5	30.2	6.3	14.8	1.9
	27	9.7	1.4	3.4	12.1	8.9	59.9	21.5	41.0	6.2	15.8	2.8
	Cave	10.6	2.0	4.9	18.3	12.4	54.5	25.1	22.9	6.2		2.2
	Cmin	7.3	0.9	1.7	6.8	2.8	21.5	21.5	13.1			
	Cmax	21.4	6.3	11.7	57.5	38.8	80.4	34.8	41.0			
streams	11	9.4	0.9	2.5	5.9	7.6	18.5	27.2	14.6	7.0	18.5	0.68
	12	6.8	0.9	1.4	4.0	6.1	10.8	27.2	11.4	6.8	19.8	0.40
	13	3.5	0.6	0.6	2.8	3.7	8.3	24.7	11.9	7.1	18.1	0.34
	Cave	6.6	0.8	1.5	4.2	5.8	12.5	26.4	12.6	7.0		0.47
	Cmin	3.5	0.6	0.6	2.8	3.7	8.3	24.7	11.4			
	Cmax	9.4	0.9	2.5	5.9	7.6	18.5	27.2	14.6			

HCO₃⁻/SO₄²⁻.....wt. ratio.

WTtemperature of water.

Cave.....average value of composition.

Cmin.....minimum value of composition.

Cmaxmaximum value of composition.

16.....D-1, 26.....W-1, 27.....W-2.

3. 結果と考察

3.1 一斉調査時の水質の概略

Tabl 1 に一斉調査時の分析結果を示す。地すべり地の上端部での溶存化学成分含量は大部分高い値を示していることがわかる。表流水・湧水・排水孔水の水質区分をみたのが **Fig. 2** で当量百分率で表示してある。陽イオンでは点群が局所的に集中しているが、陰イオンでは湧水のバラツキが大きく排水孔水では HCO_3^- がほぼ 40~60%, SO_4^{2-} がほぼ 20~40% の範囲にある。表流水は狭い領域に集まっている。水質は概ね $\text{Ca}(\text{HCO}_3)_2$ 型と CaSO_4 型に分類することができる。

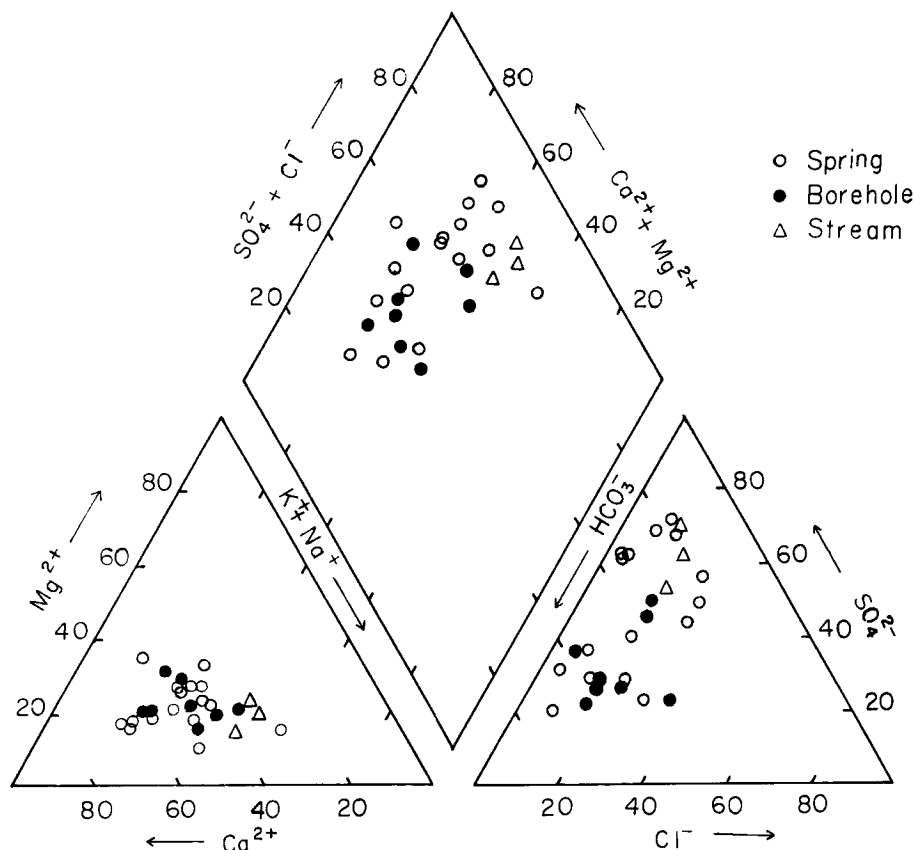


Fig. 2 Key diagram of major ionic constituents in natural waters in the Kushibayashi landslide area.

一般に比較的深層から湧出してくる水は SO_4^{2-} 含量は少なく、 HCO_3^- 含量は大きい値を示す傾向がある。従って水中の $\text{HCO}_3^-/\text{SO}_4^{2-}$ が大きい程深層起源の水であるといえる。**Table 1** から、表流水の $\text{HCO}_3^-/\text{SO}_4^{2-}$ (重量比) は 0.34~0.68 (平均 0.4), 湧水 0.30~4.5 (平均 1.5), 排水孔水 0.8~3.7 (平均 2.2) となり、 $\text{HCO}_3^-/\text{SO}_4^{2-}$ の平均値では排水孔水 > 湧水 > 表流水の順になり上述の理にかなっているといえる。

湧水点 5, 6, 8, 19, 20, 21, 22, 23, 24 と排水孔 15, 17 はいずれも $\text{HCO}_3^-/\text{SO}_4^{2-}$ (重量比) が 1 以下となることから、これらの地点での水は浅い所から湧出してきているものと考えられる。排水孔 9, 10, 16 の $\text{HCO}_3^-/\text{SO}_4^{2-}$

は高い値を示すが SiO_2 含量は前述の各地点よりは多く、後述の排水孔26, 27よりは少ないので中間層の地下水を排出しているものと思われる。排水孔26, 27は $\text{HCO}_3^-/\text{SO}_4^{2-}$ と SiO_2 含量がいずれも大きいことから比較的深い所から排出してくるものと考えられる。

湧水点3, 排水孔4では Cl^- 含量が $31.4\sim 38.8 \text{ mg/l}$ と非常に高い値を示している。この Cl^- の供給源として、同水の $\text{HCO}_3^-/\text{SO}_4^{2-}$ が $2.3\sim 2.7$ であることからかなり深い所から湧出してきているものと考えられるが、一方 SiO_2 含量が $12.3\sim 16.3 \text{ mg/l}$ と小さいことから、多分浅い水で人為的汚染を相当強く受けているものと思われる。事実当地すべり地の南西側に旅館がありその下水路は地すべり地のすぐ西側を北に向って設置されていて、この下水路からの漏水があることが確認されその水は湧水点1, 2, 3, および排水孔4に流出している。

3.2 定期観測による溶存化学成分濃度の時間的変動

採水地点 D-1, W-1 W-2 の1週間毎の観測値の月平均値の変動を Figs. 3, 4, 5 に示した。Fig. 3 の D-1 (St. 17) は地表下 1~2 m 位の所から排水している。なお当地すべり地は湿地帯になっており、至る所に水溜りがみられる。流量は1973年4月と5月にそれぞれ 24 l/min , 11 l/min と大きな値を示しているが、他の月は約 3 l/min 程度で一定の値を示している。溶存化学成分の HCO_3^- , SO_4^{2-} , SiO_2 含量の月別変動は大きく、 HCO_3^- , SiO_2 はほぼ同じパターンを示しているが、 SO_4^{2-} はこれらとは逆のパターンを示す。すなわち、流量の最大値を示した4月に $\text{HCO}_3^- 50.4 \text{ mg/l}$, $\text{SiO}_2 18.5 \text{ mg/l}$ と最小値を示し、 SO_4^{2-} はその逆に 23.7 mg/l と最大値を示している。 Cl^- 含量は7月から急激に増加し、 Ca^{2+} 含量は増減をくりかえしながら漸次増加しつつある。 Mg^{2+} , Na^+ の変動はほとんどみられない。なお Cl^- 含量の急激な増加は前項の終りで述べた下水路からの漏水が排水孔内に流入したことによると推定される。D-1 (St. 17) に排出している水は St. 10, 9 から北西方向に 50 m の長さにはられた横孔排水孔であり、この長さは下水路の下に充分とどくものである。

Fig. 4 の W-1 (St. 26) は地表下 4~5 m 位の所から排水している。この流量は4月に 39 l/min 5月に 31 l/min と D-1 と似たピークが出現しているが、全体的には流量は減少の傾向を示している。D-1 に比較して各溶存成分の変動は少ないといえる。 HCO_3^- , SiO_2 含量は4月にそれぞれ 37.2 mg/l , 24.2 mg/l と最小値を示している。これらの成分はその濃度が平均的な値（平常時）に回復するのに要する時間は流量のそれより時間を要し2ヶ月程かかることがわかる。D-1 の場合にはこれが等しくなっている。 SO_4^{2-} は概ね HCO_3^- , SiO_2 とは逆の傾向を示しているが Mg^{2+} , Ca^{2+} , Cl^- においては変動はほとんどみられない。

Fig. 5 の W-2 (St. 27) は地表下 10 m 位の所から排水している。流量は約 30 l/min とほぼ一定であるにもかかわらず、 HCO_3^- の濃度は増減

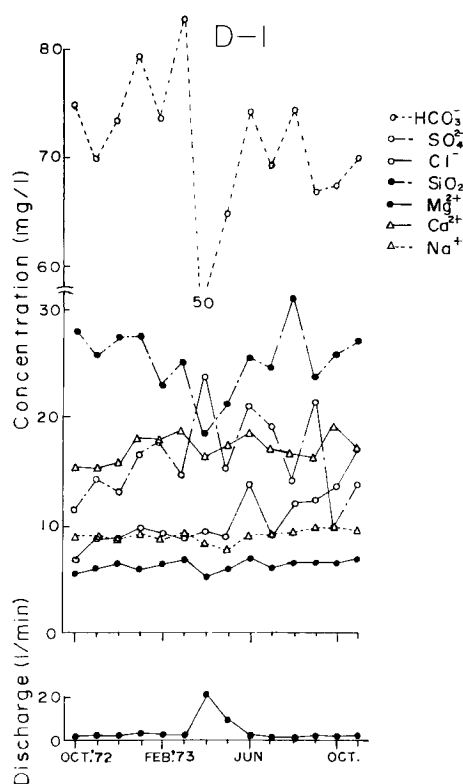


Fig. 3 Variation of ground waters and variation of the chemical composition concentration of the dissolved salts a function of time. Each point is monthly average, D-1.

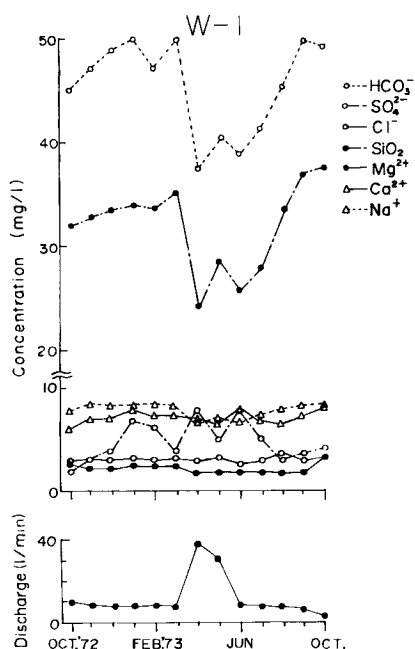


Fig. 4 Same as Fig. 3, W-1.

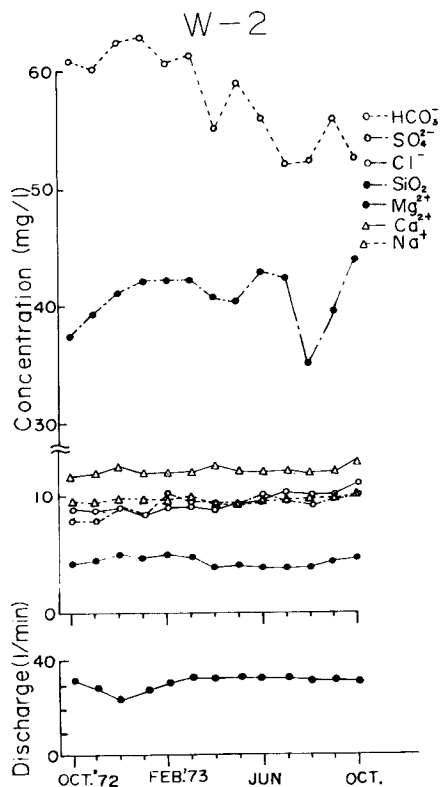


Fig. 5 Same as Fig. 3, W-2.

しながら時間とともに減少しているが、この原因は現在の所不明である。SiO₂ は最初 37.5 mg/l から1973年1月の 42.2 mg/l まで漸次時間とともに増加し、4月、5月に若干減少するがそれ以後8月の 35.2 mg/l と減少するまではほとんど変らない。HCO₃⁻, SiO₂ 以外の成分はほとんど変動していない。

Table 2 Coefficient of correlation between discharge and dissolved salts of ground waters, but except abnormal discharge.

	D-1			W-2			W-2		
	N	r	S	N	r	S	N	r	S
Na ⁺	45	-0.65	⊙	40	-0.68	⊙	43	0.87	⊙
Mg ²⁺	"	-0.51	⊙	"	-0.17	×	"	-0.35	○
Ca ²⁺	"	-0.44	⊙	"	-0.26	×	"	0.05	×
Cl ⁻	"	-0.14	×	"	-0.36	○	"	0.42	⊙
HCO ₃ ⁻	"	-0.71	⊙	"	-0.75	⊙	"	-0.46	⊙
SO ₄ ²⁻	"	0.47	⊙	39	0.52	⊙	"	0.17	×
SiO ₂	"	-0.70	⊙	40	-0.72	⊙	"	-0.04	×

N: Number of analyses, r: Coefficient of correlation

S: Significance (⊙: 99%, ○: 95%, ×: none)

Table 3 Coefficient of correlation between HCO_3^- and other dissolved salts of ground waters, but except abnormal discharge.

	D-1			W-1			W-2		
	N	r	S	N	r	S	N	r	S
Na^+	47	0.64	◎	42	0.86	◎	43	-0.30	○
Mg^{2+}	//	0.68	◎	//	0.48	◎	//	0.38	○
Ca^{2+}	//	0.69	◎	//	0.01	×	//	-0.32	○
Cl^-	//	0.01	×	//	0.30	×	//	-0.68	◎
SO_4^{2-}	//	-0.59	◎	41	-0.60	◎	//	-0.05	×
SiO_2	//	0.82	◎	42	0.89	◎	//	0.06	×

N: Number of analyses, r: Coefficient of correlation

S: Significance (◎: 99%, ○: 95%, ×: none)

3.3 溶存化学成分と流量との関係

Table 2 に平常時流出量と溶存化学成分濃度との相関係数を示す。1%の危険率で有意性の高い成分から順番にならべると

D-1: HCO_3^- , $\text{SiO}_2 > \text{Na}^+ > \text{Mg}^{2+} > \text{SO}_4^{2-} > \text{Ca}^{2+}$ W-1: $\text{HCO}_3^- > \text{SiO}_2 > \text{Na}^+ > \text{SO}_4^{2-}$ W-2: $\text{Na}^+ > \text{HCO}_3^- > \text{Cl}^-$

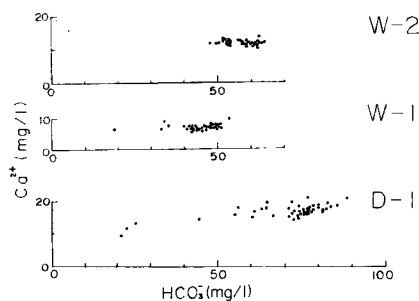
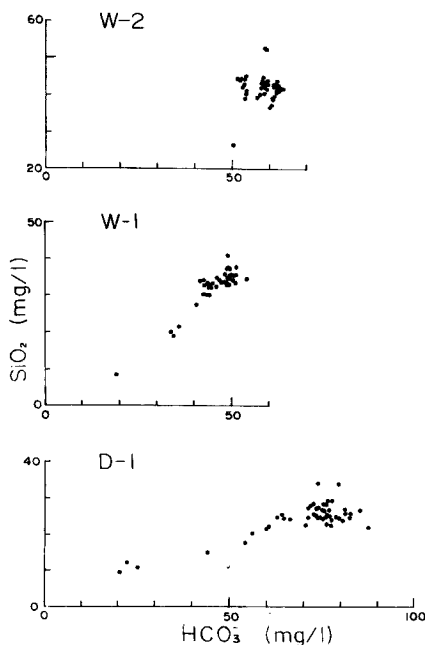
となる。D-1, W-1, W-2 のいずれの場合にも HCO_3^- , Na^+ は流量との相関は高いといえる。

HCO_3^- と他の成分との相関係数を Table 3 に示す(平常時)。風化の目安となりえる HCO_3^- と Ca^{2+} および SiO_2 との関係を Figs. 6, 7 に示す。危険率1%で相関係数の高い成分から順にならべると

D-1: $\text{SiO}_2 > \text{Ca}^{2+}$, $\text{Mg}^{2+} > \text{Na}^+ > \text{SO}_4^{2-}$ W-1: $\text{SiO}_2 > \text{Na}^+ > \text{SO}_4^{2-} > \text{Mg}^{2+}$

となり、W-2 では Cl^- のみ相関がある。

Table 4 に D-1, W-1, W-2 の溶存化学成分の最小値, 最大値, 平均値, 標準偏差と化学成分の相対的な変動の大小を示すと考えられる変動係数

Fig. 6 Plots of Ca^{2+} content against HCO_3^- content of ground waters.Fig. 7 Plots of SiO_2 content against HCO_3^- content of ground waters.

このように相対的に深い所から湧出してくる水のある種の溶存化学成分の変動係数が流量のそれより大きいということは、ある成分の変動の主な原因が流量にのみ依存するのではなく、ある種の化学反応によるものであることを意味していると思われる。例えば SO_4^{2-} の場合には地下での酸化還元反応がある時期に意外と速やかに進行しているものと考えられる。

流量と最も相関の高かった HCO_3^- の輸送量（濃度×流量）と流量との関係をみたのが Fig. 8 である。地表下 1 m 位の浅い所から排水している D-1 では流量が約 10 l/min 以下の場合に流量の増加とともに HCO_3^- の輸送量は増加するが、約 10 l/min 以上の場合には図上での勾配が急激に小さくなる。

この現象の説明の 1 として次のことが考えられる。降雨量の増加は浸透水量の増加をまねき、流量が約 10 l/min 以下ではその土壤構造を破壊させないで浸透さす許容量があり、水の単位体積当りの岩石・土壤との接触面積も大きい。約 10 l/min 以上になると土壤構造が破壊され、それによって土壤粒子間の微細粒子が洗い流され土壤中の水の通りみち（土中間隙）が大きくなり、単位体積当りの浸透水と岩石・土壤との接触面積は相対的に減少してくるために両者間での化学反応も減少してくるであろう。もしこの考えが正しいとするならば、流量約 10 l/min 以下の場合には単純な希釈効果で HCO_3^- 濃度と流量とのバランスがうまくとれて HCO_3^- の輸送量は流量とともに増加するが、約 10 l/min 以上になると流量の増加の割りに HCO_3^- 濃度がほぼ一定（20 mg/l）となり、輸送量の増減にはほとんど無関係になってくる。また再び流量が減少すれば地中間隙は上層より運ばれてきた粘土粒子などでふさがれその間隙は減少し、相対的に水との接触面積は増加し溶存成分もまた増加するであろう。

地表下 5 m の水を排出している W-1 では流量約 20 l/min の所で直線が折れ、それ以後の勾配は D-1 にくらべて大きい。これは W-1 近辺の土壤の粒子間隙が土圧のために小さくなるので、それだけ水との接触面積が大きくなり、また降水が浸透し湧出してくるまで距離・時間が長くなるために HCO_3^- 濃度（約 30 mg/l）が流量に比べて相対的に大きくなるためであろう。このことは地表下 10 m から排水している W-2 とくらべると一層明瞭である。

4. 総 括

以上の調査結果と考察により次の点が明らかになった。

- 1) 当調査地区の水質は $\text{Ca}(\text{HCO}_3)_2$, CaSO_4 型の水である。
- 2) 当調査地区の地下水は浅層水 (St. 5, 6, 8, 15, 17, 19, 20, 21, 22, 23, 24)、中間層水 (St. 9, 10, 16) と深層水 (St. 26, 27) の 3 種に分類できる。
- 3) D-1, W-1 においては HCO_3^- , SiO_2 , SO_4^{2-} の濃度の月別変動は大きく、前二者は同一パターンを示すが、後者は逆のパターンを示す。流量との関係は D-1 では上記の溶存成分の時間的遅延はないが、W-1 では溶存成分の方が回復力は弱く約 2 カ月間の時間を要して平常値にもどる。

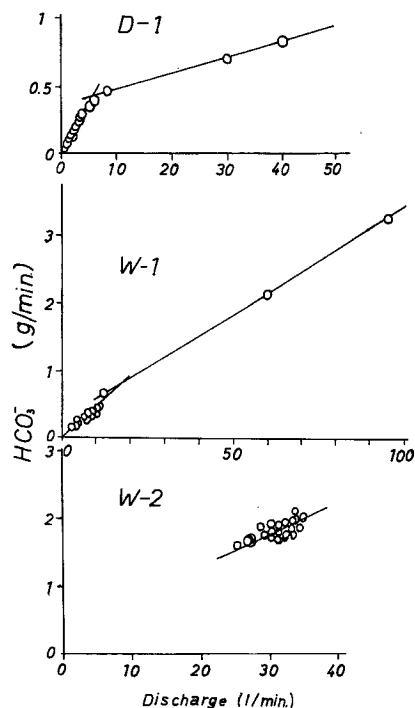


Fig. 8 Plots of transported amount of HCO_3^- against discharge of ground waters.

- 4) W-2 は流量変化があまり見られないのに HCO_3^- , SiO_2 に原因不明の変動が出現している。
- 5) D-1, W-1, W-2 いずれにおいても HCO_3^- , Na^+ は流量との相関性が高い。
- 6) 流量の変動係数と各成分のそれを見ると相対的に深い所から排出される水ほどある成分 (SO_4^{2-} , Mg^{2+}) の変動係数は流量のそれより大きくなる。

7) 流量と最も相関性の強い HCO_3^- の輸送量と流量との関係をみると、ある流量を境にしてその直線勾配は急に変化することがわかった。そしてこの変化の仕方は深い水ほど小さくなる傾向にある。この現象を1つの仮説として浸透水量と土壌構造との関係で説明した。

今後の問題として、当地すべり地の粘土鉱物生成量を推定するとともに、土壌試料の化学分析、X線分析、示差熱分析、イオン交換測定、溶出実験などのデータと比較し推定値の妥当性を検討する。またユニットハイドログラフを作成し流量と溶存化学成分の時間的遅延、および溶出化学成分量の変化が地すべり土塊変動とどのような関係にあるかなどの問題を明らかにする予定である。なお現在も定期観測は続行中であるので W-2 における HCO_3^- , SiO_2 の原因不明の変動を明らかにしたい。

最後に、この研究を遂行するにあたり終始御指導と御教示を賜った名古屋大学水圏科学研究所北野康教授ならびに本研究所奥田節夫教授に対し深甚なる謝意を表します。また当地すべり地での調査・研究にあたっては本研究所島通保教授にいろいろと御指導を賜ったことを記し謝意を表します。

参 考 文 献

- 1) 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，京都大学防災研究所年報，第15号 B，昭47，pp. 171-182.
- 2) 山口真一・高田雄次・竹内篤雄：串林地すべりについて，京都大学防災研究所年報，第12号 B，昭44，pp. 25-45.
- 3) 竹内篤雄・島通保：串林地すべり地における土地ひずみについて—その観測体系—，京都大学防災研究所年報，第16号 B，昭48，pp. 151-176.
- 4) 島通保・竹内篤雄：串林地すべり地における土地ひずみについて，京都大学防災研究所年報，第15号 B，昭47，pp. 209-218.