

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

吉岡 龍馬・奥田 節夫

ESTIMATE OF THE AMOUNTS OF CLAY MINERALS FORMED BY WEATHERING PROCESSES THROUGH THE CHEMICAL COMPOSITIONS OF WATERS IN THE KAMENOSE LANDSLIDE AREA

By Ryuma YOSHIOKA and Setsuo OKUDA

Synopsis

64 water samples have been collected from the Kamenose landslide area, Osaka Prefecture, to estimate the amounts of weathering products through the chemical compositions of the waters.

When equilibrium is maintained between silicate minerals and water, certain relationships among chemical species contents of the water should be assumed. Then, the authors have examined the relationships among the chemical species contents of the waters, and the following have been obtained: Montmorillonites and kaolinite are in equilibrium with the waters of the Kamenose landslide area, and the amounts of montmorillonites and kaolinite produced by CO₂-bearing waters reacting with parent rocks are estimated as several tons per year in this area.

1. 結 言

地すべり地帯における粘土鉱物の生成と存在は、その膨潤性にもとづく粘着力の低下、あるいは化学的活性にもとづくイオン交換等により地盤劣化の一因になるとも考えられ、その定量的確立はきわめて重要な意義をもつものと考えられる。そこで著者等は造岩鉱物の粘土化という現象を定量的に検討するために、(1)地すべり地の水がどんな鉱物種と平衡状態になっているか、(2)その水質からいかなる造岩鉱物が風化して、いかなる粘土鉱物が生産されるかの2項目に重点をおき調査、研究を実施した。

なお、(1)項目では Garrels^{1),2)}, Feth³⁾, Kramer⁴⁾, Tardy⁵⁾ 等、(2)項目で Mackenzie⁶⁾, Garrels^{7),8)} 等の研究を参考にして研究を進めた。

2. 方 法

以上の2項目について、従来の調査、研究によって地すべりの発生機構、水文現象、地質、水質等がかなり明確にされている亀の瀬地すべり地(大阪府柏原市)を研究対象に選定した^{9),10),11),13),14),15)}。

今回はとくに、建設省が水抜きのために掘った横穴排水トンネル内の湧水に重点をおき、昭和46年6月1日から3日にわたり54点を採水分析した(pH, Na⁺, K⁺, Mg²⁺, Ca²⁺, Cl⁻, HCO₃⁻, SO₄²⁻, Soluble-SiO₂)。採水地点の概略図は Fig. 1 に示す。

3. 結 果 と 考 察

分析結果は Table 1 に示すとおりである。なお表流水および浅井戸の採水分析は前回に終了したものである。

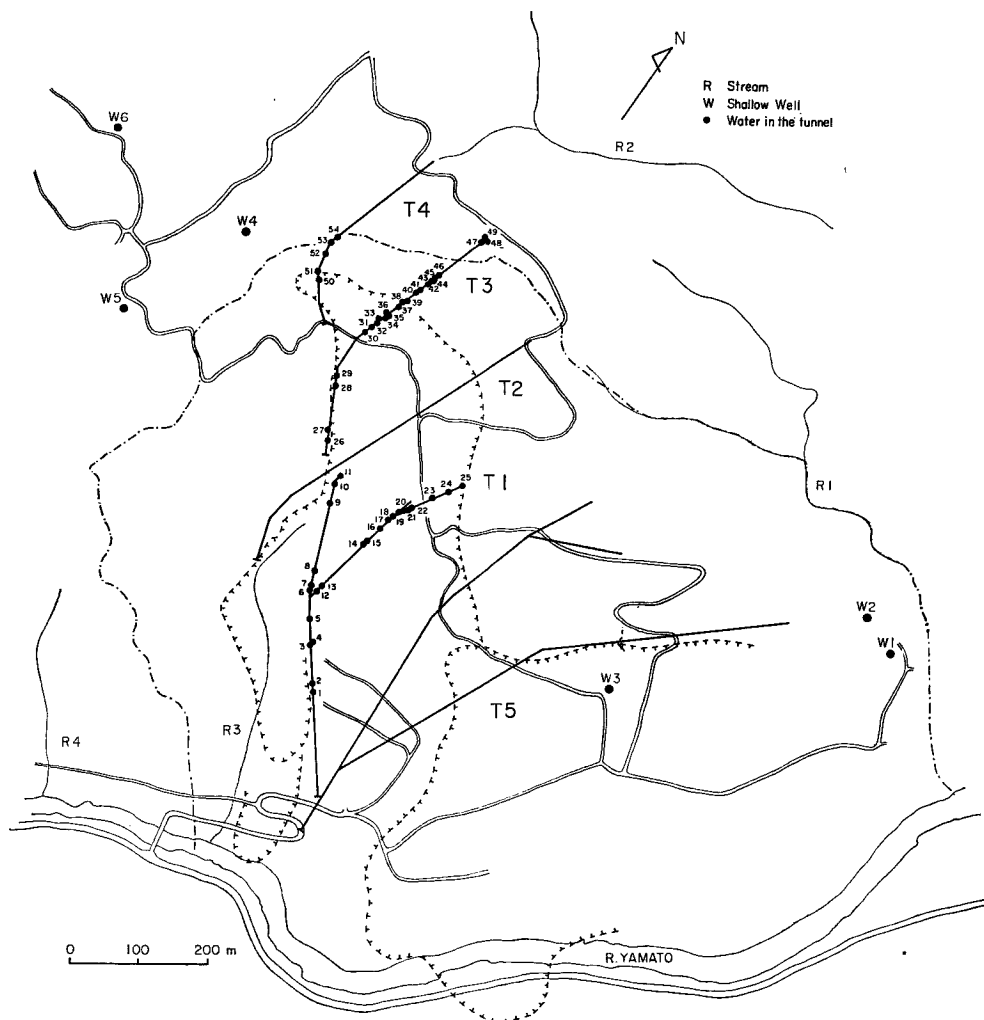


Fig. 1 Map showing sample localities in the Kamenose landslide area.

3-1, 溶存イオンの相対濃度

Fig. 2 はこの地域の水質を相対的濃度で表示したもので水質区分のためによく使用される。これによると、陰イオンでは海拔の高い所のトンネル程 SO_4^{2-} 、 Cl^- 含量が多く低くなるにつれて、 HCO_3^- 含量が多くなる。一方陽イオンでは海拔の高い所程 Na^+ 含量（一部では Ca^{2+} 含量）が多いが、低くなるにつれて、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 含量が増加する傾向がある。とくに、その傾向は Ca^{2+} において顕著である。従って海拔の高い所のトンネルは CaSO_4 、 NaCl 型の水であるが、低くなるにつれて $\text{Ca}(\text{HCO}_3)_2$ 、 $\text{Mg}(\text{HCO}_3)_2$ 型の水に遷移する。

またこの図から、 SO_4^{2-} 含量と Cl^- 含量は正の相関関係を、 HCO_3^- 含量と SO_4^{2-} 、 Cl^- 含量はそれぞれ負の相関関係を示していることもわかる。

Table 1 Chemical compositions of natural waters in the Kamenose landslide area.

	Na ⁺ (mg/l)	K ⁺ (mg/l)	Mg ²⁺ (mg/l)	Ca ²⁺ (mg/l)	Cl ⁻ (mg/l)	HCO ₃ ⁻ (mg/l)	SO ₄ ²⁻ (mg/l)	Soluble SiO ₂ (mg/l)	pH	Water temp. (°C)	Dis- charge (ml/sec)	Date of sampling
T1- 1	12.3	7.5	17.8	51.8	2.8	214.9	64.6	22.7	7.1	17.2	1.3	1971, 6. 3
2	10.8	4.9	7.5	25.7	2.5	101.8	36.6	28.2	6.5	17.3	1.3	"
3	13.1	4.8	10.6	31.8	6.3	133.6	29.5	19.6	7.0	16.6	12.0	"
4	9.6	3.6	7.5	24.0	4.9	86.5	28.5	27.9	6.7	16.7	19.0	"
5	11.9	4.4	10.2	32.2	6.0	128.2	30.3	28.6	6.7	16.5	2.9	"
6	12.5	4.0	10.6	33.2	7.5	94.4	45.4	29.9	6.6	17.2	2.4	"
7	13.1	3.5	9.6	34.9	7.3	111.9	49.1	31.8	6.6	16.2	2.5	"
8	12.9	4.5	9.7	38.7	9.7	149.4	26.0	37.3	6.7	18.0	1.1	"
9	14.7	6.1	12.4	41.0	9.2	220.7	8.1	33.8	6.9	18.1	1.0	"
10	16.1	6.1	11.8	49.2	12.5	214.6	26.0	45.2	6.9	17.5	4.7	"
11	15.3	6.3	13.8	43.6	10.6	216.1	23.4	45.4	7.0	17.6	9.2	"
12	10.9	4.1	10.2	33.9	9.0	115.0	27.8	30.1	6.9	17.0	75.0	"
13	11.7	4.1	13.1	39.6	9.0	155.5	26.0	32.8	6.9	16.8	46.0	"
14	11.1	3.8	10.4	32.0	8.7	72.3	37.4	34.5	6.5	17.0	10.0	"
15	11.1	3.6	12.2	41.3	11.3	136.4	27.1	35.8	6.7	17.0	4.9	"
16	14.2	4.0	11.6	31.9	9.9	101.9	30.8	28.0	6.6	17.0	14.0	"
17	11.7	3.6	11.0	34.9	10.3	91.6	33.4	29.0	6.6	17.0	60.0	"
18	13.9	4.0	11.8	31.6	9.8	102.4	31.9	26.4	6.6	17.2	7.0	"
19	10.6	3.4	10.5	34.7	10.7	83.3	35.4	29.6	6.5	16.2	300.0	"
20	9.6	4.5	15.1	25.7	4.1	179.1	8.0	62.2	7.1	18.0	21.0	"
21	10.9	4.0	12.2	30.9	11.7	91.3	28.6	28.1	6.7	17.0	9.4	"
22	10.7	4.2	12.3	29.8	10.7	94.4	26.6	27.9	6.5	17.0	2.8	"
23	10.1	3.9	11.9	28.8	9.4	71.3	34.6	31.8	6.6	—	30.0	"
24	10.4	4.6	13.1	26.8	7.0	154.7	9.4	17.5	6.9	18.0	1.6	"
25	9.3	4.2	16.0	22.6	4.5	166.7	8.3	63.0	6.9	18.0	—	"
T3-26	11.7	2.6	5.0	19.1	13.9	26.7	46.1	15.2	6.0	14.5	8.7	1971, 6. 2
27	16.1	4.3	6.3	34.3	13.1	126.5	32.5	24.7	7.4	16.3	0.99	"
28	7.6	3.2	3.2	14.4	9.2	27.9	32.4	10.8	7.1	16.3	3.4	"
29	14.7	2.9	3.1	10.4	11.1	57.2	13.6	43.0	6.9	16.0	5.0	"
30	10.0	4.7	10.6	45.0	7.5	187.2	21.4	37.8	7.5	16.5	3.0	"
31	12.2	6.1	14.7	44.8	10.2	103.2	46.9	33.0	7.7	16.0	7.1	"
32	12.9	3.5	6.6	29.4	10.9	66.0	33.1	36.6	7.1	15.1	100.0	"
33	12.7	3.7	7.5	30.5	9.7	39.3	47.1	35.9	7.0	—	3.2	"
34	10.7	3.6	12.9	33.0	9.2	103.0	40.3	27.0	7.5	17.0	1.9	"
35	12.5	3.1	8.5	31.9	10.5	40.3	52.2	34.2	7.0	15.8	30.0	"
36	12.5	3.1	8.3	32.3	10.0	40.4	51.6	34.2	7.0	15.8	75.0	"
37	7.7	2.7	8.3	25.7	6.6	82.5	32.6	33.6	7.7	16.0	4.8	"
38	7.9	3.3	10.0	25.1	10.2	54.1	36.5	34.4	7.6	16.0	43.0	"
39	8.0	3.4	12.2	26.8	11.5	49.9	39.1	35.4	7.5	16.8	2.7	"
40	7.6	3.0	11.0	28.0	10.7	62.3	32.8	35.8	7.6	16.6	6.0	"
41	7.8	3.1	11.5	29.4	9.5	99.5	26.4	35.8	7.6	16.3	4.3	"
42	8.0	3.6	15.2	29.6	6.3	165.7	20.0	38.4	7.6	17.0	0.91	"
43	8.1	2.9	15.5	33.0	6.2	184.1	20.4	35.6	7.7	17.0	1.4	"
44	8.0	2.7	16.0	31.1	6.4	178.3	20.2	40.0	7.8	17.0	2.4	"
45	7.8	2.6	14.0	31.7	6.2	167.4	20.8	39.5	7.7	16.7	2.1	"
46	8.3	2.9	15.2	35.5	8.1	192.7	20.0	35.0	7.9	16.2	2.5	"
47	8.7	2.1	13.7	27.2	7.9	109.0	22.3	58.8	7.4	16.2	3.9	"
48	8.7	1.7	9.8	21.3	6.6	108.9	10.5	64.0	7.1	16.1	6.4	"
49	9.3	1.9	10.5	24.8	9.5	127.0	20.1	64.6	7.2	16.0	22.0	"
T4-50	21.8	2.7	7.2	34.9	22.0	25.7	63.6	36.9	6.8	15.1	6.1	1971, 6. 1

Table 1 continued.

	Na ⁺ (mg/l)	K ⁺ (mg/l)	Mg ²⁺ (mg/l)	Ca ²⁺ (mg/l)	Cl ⁻ (mg/l)	HCO ₃ ⁻ (mg/l)	SO ₄ ²⁻ (mg/l)	Soluble SiO ₂ (mg/l)	pH	Water temp. (°C)	Dis- charge (ml/sec)	Date of sampling
T4-51	23.7	2.9	5.5	34.4	16.9	65.3	51.5	38.0	6.8	17.0	0.45	1971, 6. 1
52	26.7	3.1	6.9	17.9	28.4	60.2	39.9	35.4	7.0	17.0	0.90	"
53	15.3	2.2	5.1	14.0	19.9	52.1	21.3	48.0	7.0	17.0	0.56	"
54	20.5	2.0	4.6	17.1	19.7	18.7	30.4	55.2	6.9	17.5	0.63	"
R 1	8.7	—	5.4	9.7	7.9	29.6	—	24.5	7.0	—	—	1967, 5.18
2	7.7	—	3.8	10.0	11.8	16.4	19.0	25.8	6.9	20.0	—	1969, 8.26
3	18.3	—	7.2	22.6	9.8	74.5	—	20.5	8.2	—	—	1967, 5.18
4	24.1	—	5.0	19.7	10.4	8.0	—	22.1	6.8	—	—	"
# 1	6.6	—	3.4	3.8	4.8	5.7	—	17.6	5.7	—	—	"
2	4.0	—	1.2	0.7	3.8	3.4	—	10.9	5.0	—	—	"
3	11.0	—	9.4	19.2	12.8	21.1	—	33.1	6.5	—	—	"
4	26.5	—	7.5	22.8	31.8	36.3	41.5	32.4	6.6	17.7	—	1969, 8.26
5	22.9	—	6.4	25.1	21.1	45.1	46.8	32.7	6.2	16.3	—	"
6	37.7	—	4.7	25.4	23.4	37.8	50.1	27.6	6.4	20.2	—	"

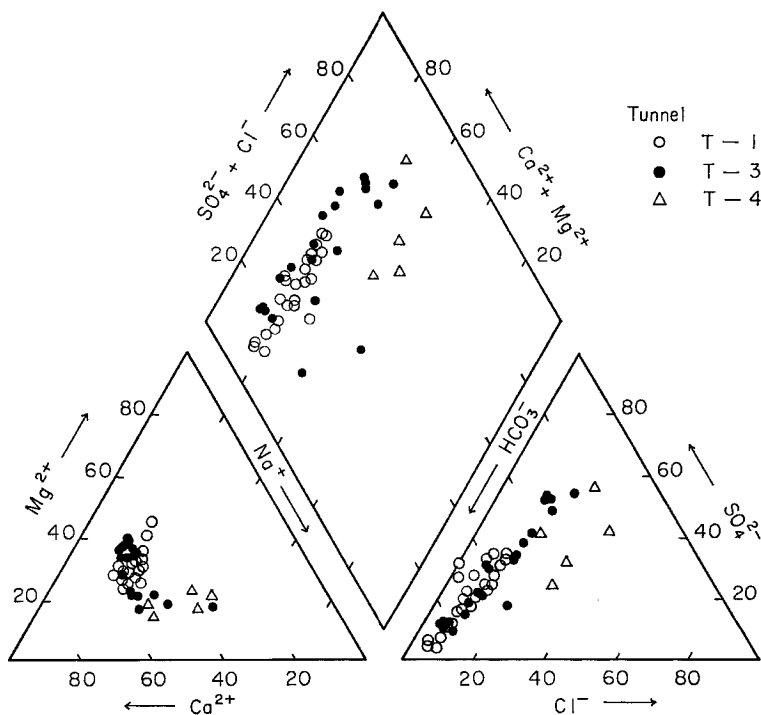


Fig. 2 Trilinear diagram used to represent relative percentage of milligram equivalents of major ionic constituents in natural waters in the Kamenose landslide area.

3-2. 鉱物と水との平衡関係

一般にケイ酸塩鉱物の風化現象で考慮されるべき主要化学成分は Na_2O , K_2O , MgO , CaO , SiO_2 , Al_2O_3 , H_2O , CO_2 等であるが、水溶液中ではこれらの成分は、 Na^+ , K^+ , Mg^{2+} , Ca^{2+} , H_4SiO_4 , AlO_2^- , H^+ , OH^- , H_2CO_3 , HCO_3^- , H_2O として存在している⁴⁾。

一方、鉱物種は数多くあり変化にとむが、熱力学的データの不足のためここではやむをえず Ca-Na-長石、微斜長石、白雲母、Na-Ca-モンモリロナイト、カオリナイト、ギブサイト等を考察対象とし、これらの鉱物種と水との平衡関係について以下簡単に述べる。

ケイ酸塩鉱物と水溶液との平衡関係を厳密に論じえるのは、母岩の鉱物種の化学成分と風化により生じた鉱物の化学成分が明確にわかったとき、はじめて可能である。従って、通常自然現象において上述の問題を論じることはかなりむずかしいことであるが、相対的に単純な地域（地質、鉱物学的にみて）を調査、研究することにより相当のアプローチは可能である。

Figs. 3, 4, 5 は Tardy⁵⁾ が Kramer⁴⁾, Robie¹⁶⁾ 等の自由エネルギーの値から求めた平衡定数を用いて、各種鉱物間の熱力学的安定領域を示したものである。

鉱物の安定領域を Ca^{2+} , H^+ , H_4SiO_4 の濃度関数として表示した Fig. 3 からは次のことがいえる。すなわち、① 表流水、浅井戸はモンモリロナイト領域内に所属している一点を除き全部カオリナイトの安定領域内に入っている。この一点は清水谷の表流水 (R3) で、地すべり地内の湧水と混合しているためと考えられる、② 一方トンネル内の湧水はカオリナイトと Ca-モンモリロナイトの両安定領域内にまたがって存在しているが、後者の領域内の方により多く分布している。

Fig. 4 は鉱物の安定領域を Na^+ , H^+ , H_4SiO_4 の濃度関数として図示したものであり、この場合も表流水、浅井戸の水はカオリナイトの領域内に入っている。例外は清水谷の表流水 (R3) だけである。トンネル内の湧水はカオリナイトと Na-モンモリロナイトの両安定領域内に半々位に分布している。

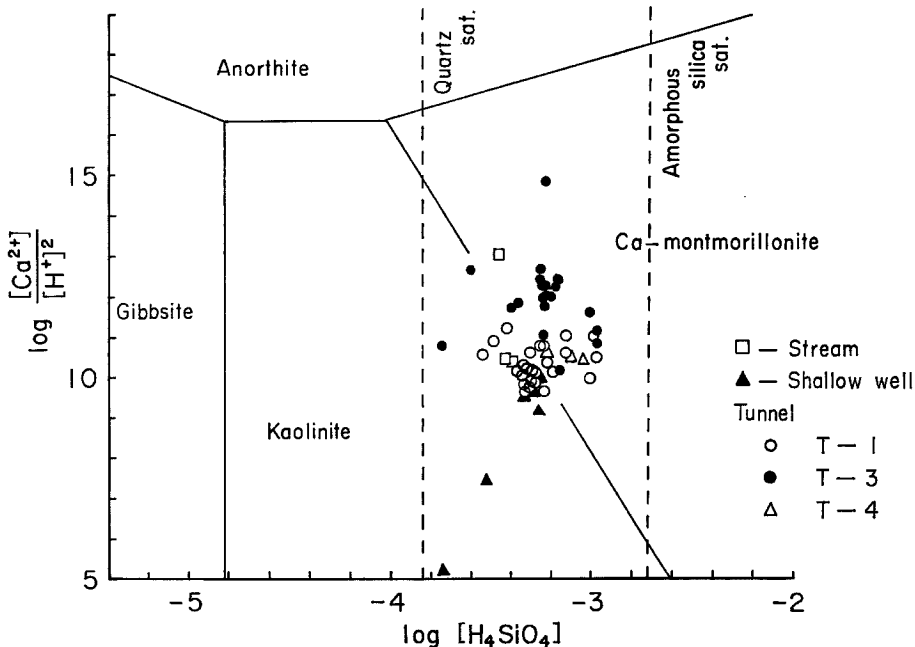


Fig. 3 Stability relations of anorthite, Ca-montmorillonite, kaolinite and gibbsite at 25°C and 1 atm. as function of $[\text{Ca}^{2+}]$, $[\text{H}^+]$ and $[\text{H}_4\text{SiO}_4]$.

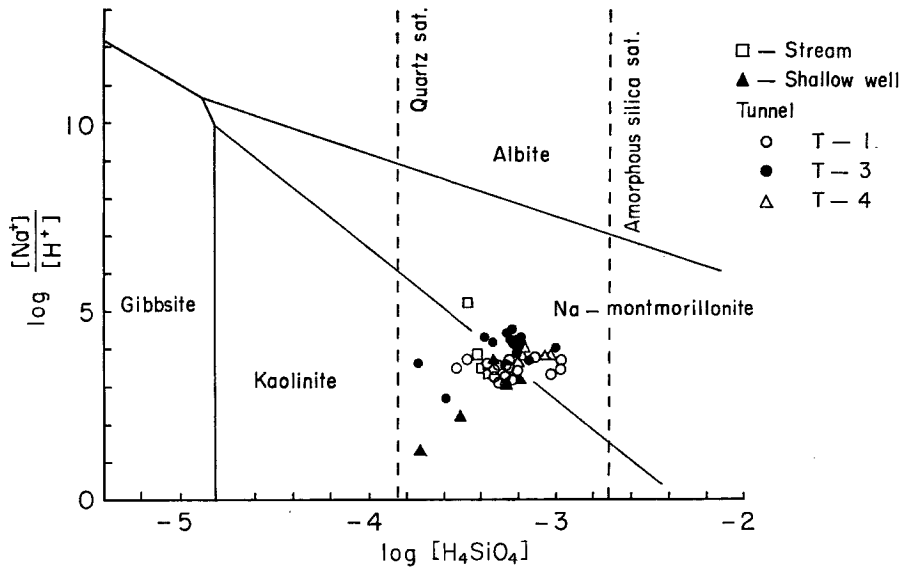


Fig. 4 Stability relations of albite, Na-montmorillonite, kaolinite and gibbsite at 25°C and 1 atm. as function of $[Na^+]$, $[H^+]$ and $[H_4SiO_4]$.

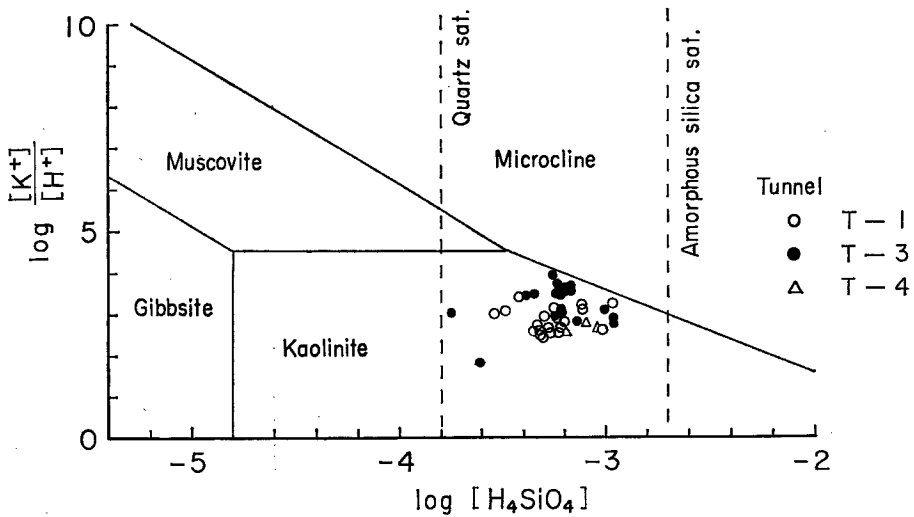
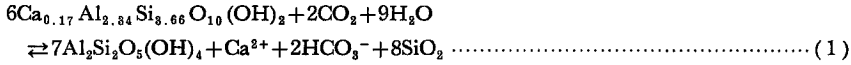


Fig. 5 Stability relations of microcline, muscovite, kaolinite and gibbsite at 25°C and 1 atm. as function of $[K^+]$, $[H^+]$ and $[H_4SiO_4]$.

Fig. 5 は同じく鉱物の安定領域を K^+ , H^+ , H_4SiO_4 の濃度関数として示したものである。この場合にはすべての水はカオリナイトの安定領域内に入っている。

以上のことから亀の瀬地すべり地内の水はカオリナイト、Ca-モンモリロナイト、Na-モンモリロナイトと平衡状態にあることが判明した。そこで Garrels⁷⁾ の考え方を用いて、Ca-モンモリロナイトとカオリナイトの関係について少し解析を試みる。

今、Ca-モンモリロナイトとカオリナイトの間に平衡が成り立つとすれば



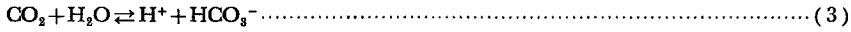
と書ける。

水、固体の活動度を1とすれば、(1)式は

$$\frac{a_{\text{Ca}^{2+}} a_{\text{HCO}_3^-}^2 a_{\text{SiO}_2}^8}{a_{\text{CO}_2}^2} = K_{\text{mont-kaol}} \quad (2)$$

となる。ただし、ここで a は活動度を表わす。

また、 CO_2 と H_2O との間に平衡関係が成立すれば、



となる。従って(3)式は

$$\frac{a_{\text{H}^+} a_{\text{HCO}_3^-}}{a_{\text{CO}_2}} = K_{\text{CO}_2} \quad (4)$$

と書ける。

(2), (4)式から

$$\frac{a_{\text{Ca}^{2+}} a_{\text{SiO}_2}^8}{a_{\text{H}^+}^2} = \frac{K_{\text{mont-kaol}}}{K_{\text{CO}_2}^2} \quad (5)$$

となる。両辺対数をとると

$$\log a_{\text{Ca}^{2+}} + 8 \log a_{\text{SiO}_2} - 2 \log a_{\text{H}^+} = \text{Const} \quad (6)$$

となり、活動度係数を1とすれば、(6)式は

$$\log [\text{Ca}^{2+}] + 8 \log [\text{SiO}_2] + 2\text{pH} = \text{Const} \quad (7)$$

となる。ただし、ここで $[\]$ はモル濃度を表わす。

従って、Ca-モンモリロナイトとカオリナイトの間に平衡関係が成立しているかどうかは、(7)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。

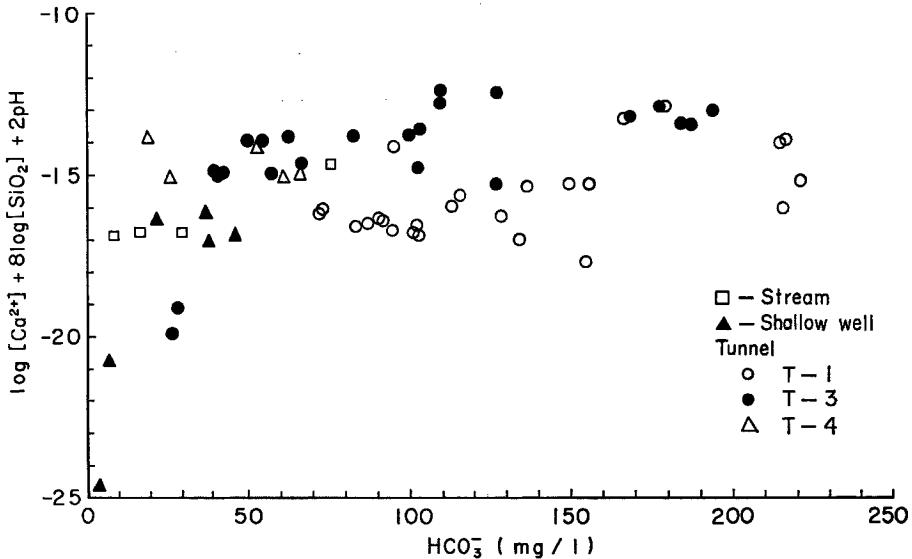


Fig. 6 Plot of $(\log [\text{Ca}^{2+}] + 8 \log [\text{SiO}_2] + 2\text{pH})$ versus HCO_3^- mg/l for waters from the Kamenose landslide area.

この関係を検討するために、(7)式の左辺の定数項を縦軸に、 HCO_3^- 含量を横軸にとり図示したのが Fig. 6 である。 HCO_3^- 含量が大略 80 mg/l 以上からは平衡状態に達していることがわかる。またこの図は造岩鉱物が CO_2 を含む水と反応すると、 HCO_3^- が大略 80 mg/l まではカオリナイトを生成し、それ以上の値からは Ca-モンモリロナイトが生成されることを意味している。

同様を取り扱い方をして、昭和46年7月に地すべりが発生した長野県小谷村小土地山地すべり地内の湧水とその付近の湧水と表流水¹⁷⁾、および山陽新幹線六甲山トンネル内の断層粘土層の湧水とその付近の表流水¹⁸⁾に適應したのが Fig. 7 である。この場合もやはり HCO_3^- が大略 80 mg/l 以上から平衡状態になっていることがわかる。ここで小土地山地すべり地内の湧水点は HCO_3^- が大略 80 mg/l を示している2カ所だけであり、 HCO_3^- が大略 140 mg/l の値を示す点は酸性白土が露頭している所の湧水点である。

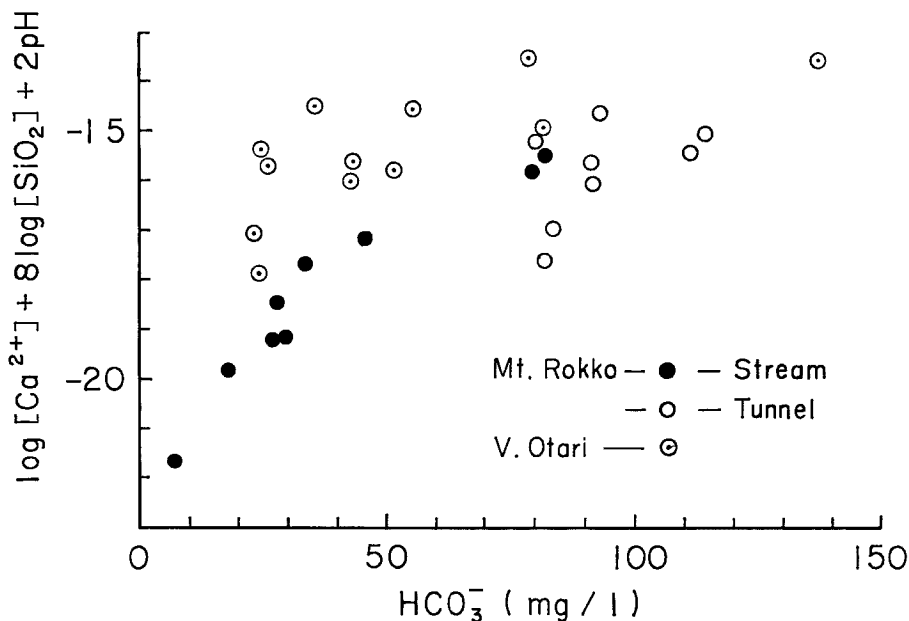


Fig. 7 Plot of $(\log [\text{Ca}^{2+}] + 8 \log [\text{SiO}_2] + 2 \text{pH})$ versus HCO_3^- mg/l for waters from the Mt. Rokko and V. Otari areas.

以上 Figs. 6, 7 からカオリナイトと Ca-モンモリロナイトとの間に平衡関係が成立するためには HCO_3^- が大略 80 mg/l 以上存在する必要がある。またこのことは地すべりを惹起し易い粘土（膨潤し易いモンモリロナイト系粘土）の生成条件となることから、このような鉱物と水との平衡論的な取り扱い方は、地すべり現象を解明する1つの有力な手段になりえるものと考ええる。

3-3. 粘土鉱物の生産量の推定

ケイ酸塩鉱物が CO_2 を含む水と反応し風化生成物を生ずるときには、十分に化学反応が進行しているならば、水溶液中の HCO_3^- と SiO_2 の濃度比は一定となるはずである。それ故に、種々な母岩鉱物の風化生成反応において、母岩鉱物から水溶液中に輸送される化学元素種およびその量を予測することは可能である⁷⁾。

地すべり地内の水質がどんな鉱物種によって規制されているかを検討したのが Fig. 8 である。この図の水平線は母岩鉱物が CO_2 を含む水と反応したときに生ずるであろう HCO_3^- と SiO_2 のモル比を示している。この図から母岩鉱物として、長石類、黒雲母、輝石、かんらん石等が、この水質を第一義的に規制して

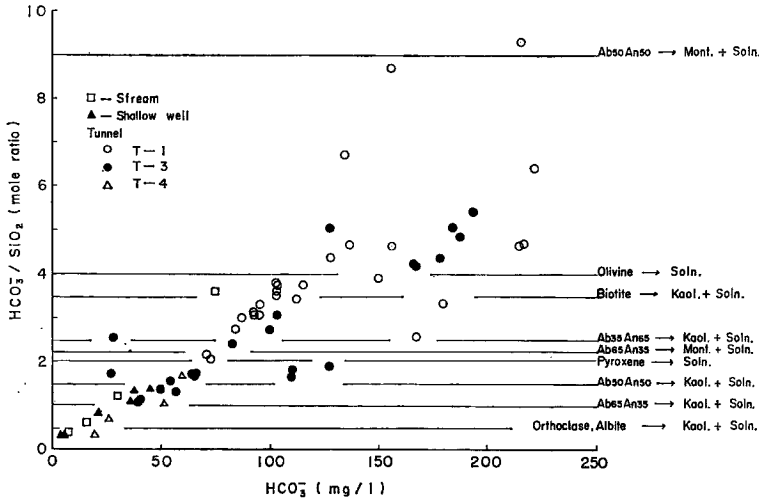


Fig. 8 $\text{HCO}_3^-/\text{SiO}_2$ mole ratio plotted versus HCO_3^- mg/l for waters from the Kamenose landslide area.

いることがわかる。ただし炭酸カルシウム、石英等の溶出、沈殿反応が起こっていないと仮定したときに限る。

また、一般的に $\text{HCO}_3^-/\text{SiO}_2$ のモル比が大略2以上からはモンモリロナイトの生成が、大略2以下ではカオリナイトの生成がおこり易いことがわかる。 CO_2 を含む水の系 ($\text{CO}_2 + \text{H}_2\text{O} \rightleftharpoons \text{H}^+ + \text{HCO}_3^-$) で、 CO_2 の濃度を一定とするならばその溶液中の pH は HCO_3^- の濃度によって決まるから、上記の現象は、水溶液中の pH が大きいとモンモリロナイト、pH が小さいとカオリナイトが生成し易くなるという従来の説と符合する。また、このことはカオリナイトと Ca-モンモリロナイトの平衡関係を述べたときに、 HCO_3^- が大略 80 mg/l が1つのメルクマークになりえるとした考えにもよく一致する。

一般に火成岩地帯の地下水中の Na^+ 、 Ca^{2+} の大部分は、 Cl^- 、 SO_4^{2-} 等の汚染がない限り、斜長石の風化によって供給される。従って水中の Na^+ と Ca^{2+} の比は当然母岩中の斜長石のそれに対応するものと期待される⁷⁾。

Fig. 9 は水中の Na^+ 、 Ca^{2+} 、 HCO_3^- 、 SiO_2 が斜長石の風化によつてのみ供給されたと考えた場合の図である。図中の A, B, C, D は固固体である斜長石が風化し、それぞれの粘土鉱物を生じた場合の理論曲線であり、また An_{30-40} (灰長石が 30-40%、ソ長石が 60-70% の割合からなる斜長石を表わす) および An_{60-70} は当地すべり地内で最も広く分布している斜長石を表わしている¹³⁾。

実際の各点は人為的汚染、風送塩等の影響を除くため、 Cl^- は Na^+ と、 SO_4^{2-} は Ca^{2+} と等量にし、それぞれ除去した後の値をプロットしたものである。T-1 は概ねカオリナイトと Na-モンモリロナイトの理論曲線間に分布しているが、T-3 はカオリナイトの理論曲線上付近に分布している。この地域に広く存在していると考えられている2種類の斜長石の $\text{Na}^+/\text{Ca}^{2+}$ の範囲内に分布している点は An_{60-70} の方により多く分布している。また $\text{Na}^+/\text{Ca}^{2+}$ の比 0.2-0.4 の間にもかなり多く分布している。このことは、水溶液中の Na^+ 、 Ca^{2+} と土壌とのイオン交換または炭酸カルシウム、石英等の溶解、沈殿が無視できるならば、 An_{70-80} の斜長石もかなり多く分布しても不都合ではないことを意味している。一方、上述の2種類の斜長石のみが存在するとするならば、イオン交換、溶解、沈殿等の諸反応が活発に起こっていることを意味する。

いずれにしても、この地域では CO_2 を含んだ水が斜長石と反応しカオリナイトとモンモリロナイトが生

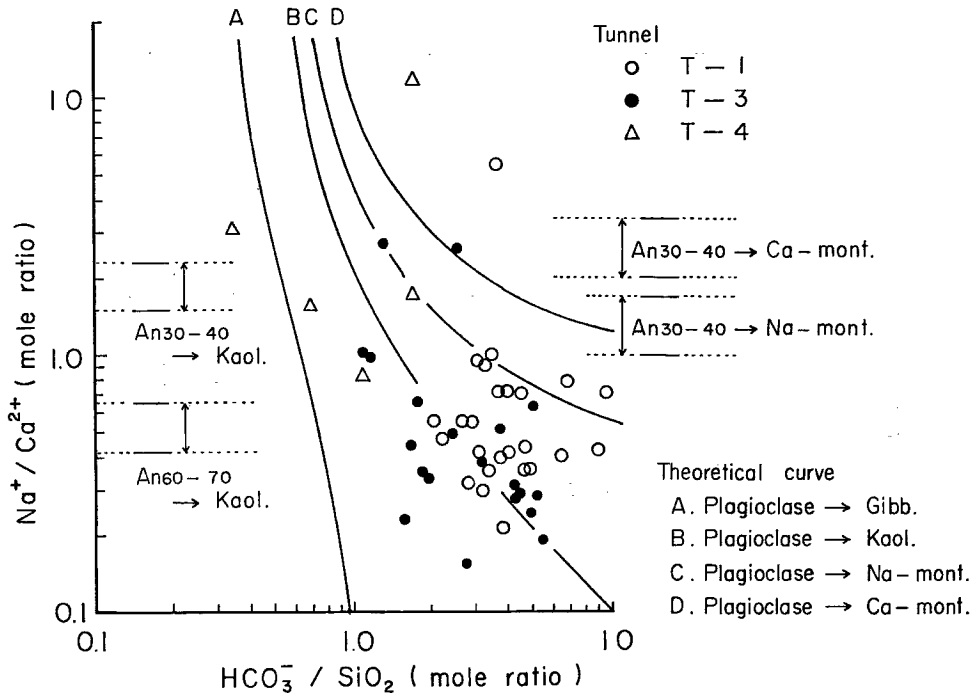


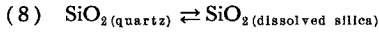
Fig. 9 $\text{Na}^+/\text{Ca}^{2+}$ mole ratio plotted versus $\text{HCO}_3^-/\text{SiO}_2$ mole ratio for waters from the Kamenose landslide area.

成されることを示していることにはわかりはない。

一般にカリ長石が CO_2 を含む水と反応するとカオリナイト，斜長石が同じ系で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。

そこで Na^+ と Ca^{2+} が25%イオン交換するものとし⁶⁾， Cl^- は Na^+ と SO_4^{2-} は Ca^{2+} と等量にして差引き，次に全陽イオンの電荷と HCO_3^- とを電氣的に中和するように調整し⁸⁾，また当地すべり地域水中の Mg^{2+} 含量は高いので，その供給源は輝石からくるものと仮定し，通常の花崗岩地帯における粘土鉱物の生産量を推定するとき用いる式に⁹⁾，輝石の分解反応式を加えた以下の各方程式を解いて粘土鉱物の生産量を推定した。

- (1) $2\text{KAlSi}_3\text{O}_8 + 2\text{CO}_2 + 3\text{H}_2\text{O} \rightleftharpoons \text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4 + 2\text{K}^+ + 2\text{HCO}_3^- + 4\text{SiO}_2$
- (2) $2\text{KMg}_3\text{AlSi}_3\text{O}_{10}(\text{OH})_2 + 14\text{CO}_2 + 7\text{H}_2\text{O} \rightleftharpoons \text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4 + 2\text{K}^+ + 6\text{Mg}^{2+} + 14\text{HCO}_3^- + 4\text{SiO}_2$
- (3) $2\text{Na}_{0.5}\text{Ca}_{0.5}\text{Al}_{1.5}\text{Si}_{2.5}\text{O}_8 + 3\text{CO}_2 + 4.5\text{H}_2\text{O} \rightleftharpoons 1.5\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4 + \text{Na}^+ + \text{Ca}^{2+} + 3\text{HCO}_3^- + 2\text{SiO}_2$
- (4) $2\text{Na}_{0.5}\text{Ca}_{0.5}\text{Al}_{1.5}\text{Si}_{2.5}\text{O}_8 + 2.6\text{CO}_2 + 2.58\text{H}_2\text{O} \rightleftharpoons 1.28\text{Ca}_{0.17}\text{Al}_{2.33}\text{Si}_{3.67}\text{O}_{10}(\text{OH})_2 + \text{Na}^+ + 0.79\text{Ca}^{2+} + 2.6\text{HCO}_3^- + 0.31\text{SiO}_2$
- (5) $2\text{Na}_{0.5}\text{Ca}_{0.5}\text{Al}_{1.5}\text{Si}_{2.5}\text{O}_8 + 2.6\text{CO}_2 + 2.58\text{H}_2\text{O} \rightleftharpoons 1.28\text{Na}_{0.33}\text{Al}_{2.33}\text{Si}_{3.67}\text{O}_{10}(\text{OH})_2 + 0.58\text{Na}^+ + \text{Ca}^{2+} + 2.6\text{HCO}_3^- + 0.31\text{SiO}_2$
- (6) $\text{Mg}_2\text{Si}_2\text{O}_6 + 4\text{CO}_2 + 2\text{H}_2\text{O} \rightleftharpoons 2\text{Mg}^{2+} + 4\text{HCO}_3^- + 2\text{SiO}_2$
- (7) $\text{CaCO}_3 + \text{CO}_2 + \text{H}_2\text{O} \rightleftharpoons \text{Ca}^{2+} + 2\text{HCO}_3^-$



その結果この地域で生産されるカオリナイト、モンモリロナイトはともに年間数トン程度であった。ただしこの地域の水の流出量は現在測定されていないので、昭和40年から42年にかけて当地域の水収支計算を行なった奥西の値 $3 \times 10^5 \text{ t/年}^{15)}$ を採用し計算した。

4. 結 論

本研究は水中の溶存元素含量から、地すべり地内に生産される粘土鉱物の種類と量を推定し、次のような結論をえることができた：

- (1) トンネル内の湧水の水質は CaSO_4 , NaCl 型から $\text{Ca}(\text{HCO}_3)_2$, $\text{Mg}(\text{HCO}_3)_2$ 型へと変わる。
- (2) トンネル内の湧水はカオリナイト、モンモリロナイトと平衡状態に、表流水、浅井戸の水はカオリナイトと平衡状態になっている。
- (3) HCO_3^- 含量が大略 80 mg/l 以上からカオリナイトとモンモリロナイトとに平衡関係が成り立つ。
- (4) カオリナイト、モンモリロナイトの年間生産量はともに数 ton 程度である。

今後の問題として、亀の瀬、小土地地すべり地と地質、地形、水分条件等がことなる地すべり地と比較検討しながら、以上の取り扱いがどの程度有効性を示しえるものであるかを更に究明したい。

また、亀の瀬地すべり地内では表流水およびトンネル内の湧水の流量測定、雨水の化学分析および岩石、粘土の化学分析、X線分析、示差熱分析等をおこないあわせて岩石、粘土のイオン交換量測定および溶出実験を実施し、当地すべり地内の岩石の粘土化の問題を更に定量的に追求していきたい。

謝 辞

本研究を遂行するに当り終始御指導と御教示を賜った名古屋大学理学部北野康教授に対し深甚なる謝意を表します。また、試料採取に際し積極的な御援助を賜った元京都大学理学研究科大学院生北岡豪一氏および大和工事事務所の各位にあわせ深甚なる謝意を表します。

参 考 文 献

- 1) Garrels, R.M.: Some free energy from geologic relations, *Am. Mineralogist*, Vol. 42, 1957, pp. 780-791.
- 2) Garrels, R.M. and C.L. Christ: *Solutions, Minerals and Equilibria*, 1965, Harper and Row, New York, N. Y., pp. 352-362.
- 3) Feth, J.H., C.E. Roberson and W.L. Polzer: Sources of mineral constituents in water from granitic rocks, Sierra Nevada, California and Nevada, U.S. Geol. Surv. Water Supply Paper, 1535-1, 1964, pp. 1-70.
- 4) Kramer, J.R.: Mineral-water equilibria in silicate weathering, *Intern. Geol. Congr.*, 23rd, Prague, Vol. 6, 1968, pp. 149-160.
- 5) 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, pp. 253-271.
- 6) Mackenzie, F.T. and R.M. Garrels: Chemical mass balance between rivers and oceans, *Am. J. Sci.*, Vol. 264, 1966, pp. 507-525.
- 7) Garrels, R.M.: Genesis of some ground waters from igneous rocks, in Abelson, P.H. (ed.), *Geochemistry* Vol. 2, 1967, John Wiley & Sons, pp. 405-420.
- 8) Garrels, R.M. and F.T. Mackenzie: Origin of the chemical composition of some springs and lakes, in Stumm, W. (ed.), *Equilibrium concepts in natural water systems*, *Adv. in Chemistry*, Amer. Chem. Soc. publ. 67, 1967, pp. 222-242.
- 9) 市原優子：大阪府中河内群岬地回り地域における湧水について、*地質雑*、第62巻、1956、pp. 244-

249.

- 10) 建設省大和工事事務所：亀の瀬地すべり調査報告書（その1），昭 38.
- 11) 同 上（その2），昭 40.
- 12) 同 上（その3），昭 44.
- 13) 藤田 崇：亀の瀬地すべりの研究（3）—亀の瀬地域の地質について—，地すべり，第4巻，昭 42，pp. 29-38.
- 14) Okunishi K.: Ground water regime of the Kamenose landslide area, Osaka Prefecture, Special Contributions, Geophysical Institute, Kyoto Univ., No. 10, 1971, pp. 105-126.
- 15) 奥西一夫：亀の瀬地すべり地の地下水流について，京都大学防災研究所年報，第14号B，昭 46. pp. 677-689.
- 16) Robie, R. A. and D.R. Waldbaum: Thermodynamic properties of minerals as related substances at 298.15°K (25.0° C) and one atmosphere (1013 bars) pressure and higher temperatures. U.S. Geol. Surv. Bull., 1259, 1968.
- 17) 吉岡龍馬：未発表
- 18) 笠間太郎・鶴巻道二：六甲山地のトンネル湧水状況とその水質，応用地質，第12巻，昭 46. pp. 16-28.