

六甲山系横尾地域における化学風化速度について

吉岡龍馬・沖村 孝・高谷精二

CHEMICAL WEATHERING RATE IN THE YOKOO AREA, THE ROKKO MOUNTAINS

By Ryuma YOSHIOKA, Takashi OKIMURA and Seiji TAKAYA

Synopsis

To estimate chemical weathering rate of granitic rocks, natural waters in a very small basin in the Rokko mountains have been collected weekly over a six-year period (1980-1985). The XRD indicates that kaolinite is the main product of plagioclase alteration in the weathered granitic rocks. The water compositions are plotted in the field of stability of kaolinite in a phase diagram for the system $\text{Na-SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3\text{-H}_2\text{O}$. This fits the XRD evidence that the main product phase is kaolinite, and it indicates that solution/kaolinite equilibrium may play a role in controlling the water compositions. The amount of kaolinite produced by CO_2 -bearing water reacting with granitic rocks is estimated as $35.1 \text{ g/m}^2\text{/year}$, and the total amount of weathering rocks is estimated as $55.3 \text{ g/m}^2\text{/year}$.

1. は じ め に

わが国は、地形的・地質的環境が複雑多岐にわたるために、豪雨・融雪・地震などが誘因となり、毎年どこかで、山崩れ、がけ崩れ、地すべり、土石流などの山地災害が発生し、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。

このような山地災害の要因の一つに、岩石の風化による地盤の力学強度の低下が考えられる。すなわち、岩盤の上層部には、大小無数の割れ目が発達し、天水の循環系の媒体となり、その流動過程で割れ目周辺は変質を受ける。風化がある段階に達すると、その変質物質や粘土鉱物は、水の通路となる割れ目に集積することとなり、その系全体としての透水性は著しく低下させるであろう。したがって、上述のような山地災害は、風化層がこのような水の貯留性を帯びてくると深く関係するものと考えられる。

筆者らは、地すべり地および各種崩壊地内外の天然水中の主要成分を分析し、風化現象に重要な作用をする炭酸ガス分圧の推定¹⁾、鉱物と水との平衡関係²⁾、水質から粘土鉱物生成量の推定^{3), 4)}、あるいは豪雨時における山地地下水の水質変化⁵⁾などを調べ、その地域の風化の進行状況^{6), 7)}、地下水の水質形成機構^{8), 9)}やその動態^{10), 11)}などの究明に努めている。

この種の研究の一環として、山地地下水および渓流水の水質の長期観測を、六甲山系の西南端に近い横尾山(標高, 311 m)の北斜面で行っている。ここではその観測結果の一部として、渓流水の水質の6カ年(1980~1985)の観測に基づいて、化学風化速度の推定を行ったので、報告する。

2. 試験地の概要

神戸市は須磨ニュータウンの開発およびポートアイランド、六甲アイランド埋立造成の一環として、1959

年より土取り工事に着手した。

横尾地区は、この土取り場所の一地区で、148 ha から $4.3 \times 10^4 \text{ m}^3$ の土を採取する計画で、1971年から土取りは開始され、1981年に終了した。この土取りは横尾山北麓の一部を対象としたため、土取り跡には北向きの大きな人工切り取りのり面が出現した。

本試験地は、この切り取りのり面の残流域の一部に相当する (Fig. 1)。谷の開口部は土砂止めの小さな堰堤と水叩きに相当する小副堰堤があり、この水叩き部での水位と小副堰堤からの溢流量を測定している (ポリビーカーに一定容積の水がたまるまでの時間を測定)。

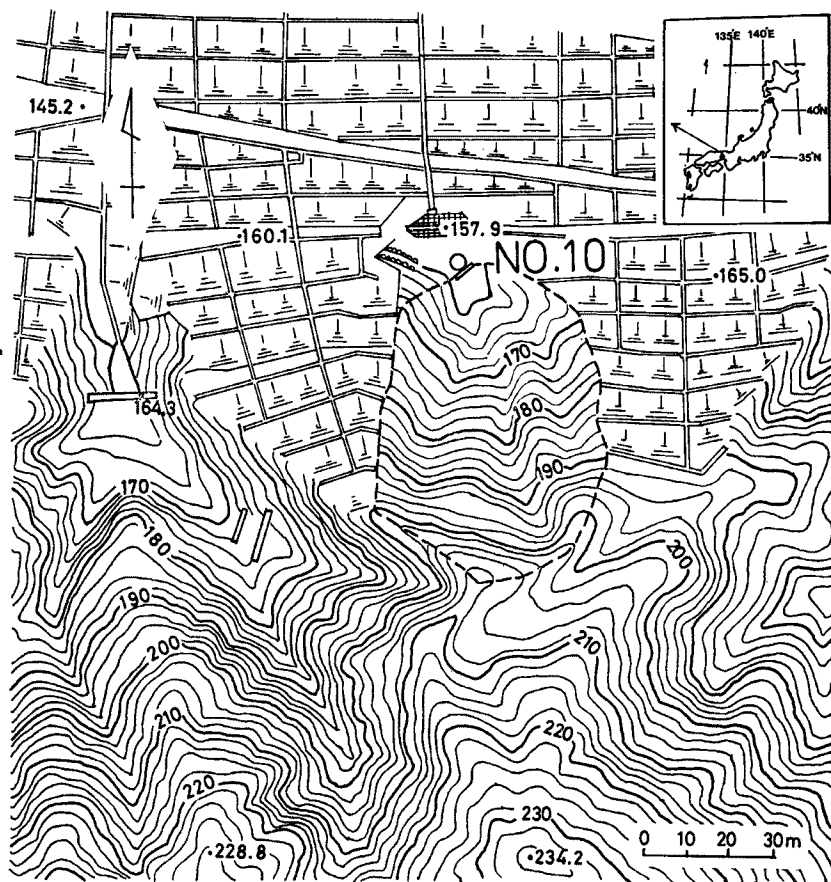


Fig. 1. Map of Yokoo experimental basin.

流域面積は 0.298 ha と非常に小さく秋季を除いて、年中流出がみられる。流域は六甲花崗岩が風化したマサ土で覆われており、植生は低雑木が主体である。地表は枯葉で常時覆われており、常時の流出は主として中間流と思われる。

3. 観測期間・項目および分析項目

観測は1980年1月より1985年12月まで、試料は週1回小副堰堤からの溢流水を採取した。観測項目は降水、水位、流量 (採水時)。分析項目としては、 Na^+ , K^+ : 炎光光度法; Ca^{2+} , Mg^{2+} : 原子吸光光度法; Cl^- : チオシアン酸水銀比色法; HCO_3^- : HCl 滴定法; SO_4^{2-} : クロム酸バリウム酸懸濁法; SiO_2 : モリブデン黄色法。

4. 結果と考察

Fig. 2 に Na^+ , Ca^{2+} , HCO_3^- , Cl^- , SO_4^{2-} の濃度と流量の経年変化および降水量を示した。流量の降水に対する応答性はおおむね良好といえるが、無降雨日数が長く継続した後の 10~20 mm 程度の降水では、そのうちの相当量が欠損雨量となるため、流量の増加は期待できない。一方、降雨日数がある程度継続し、風化帯の水分飽和度が高くなっている時期では、10~20 mm 程度の降雨でも流量の増加をもたらす、それに伴って各成分濃度は減少する傾向にあることが読みとれる。

各成分の濃度の変化について、ここでは風化の指標の一つとなる HCO_3^- 濃度の変化の様相をみてみよう。

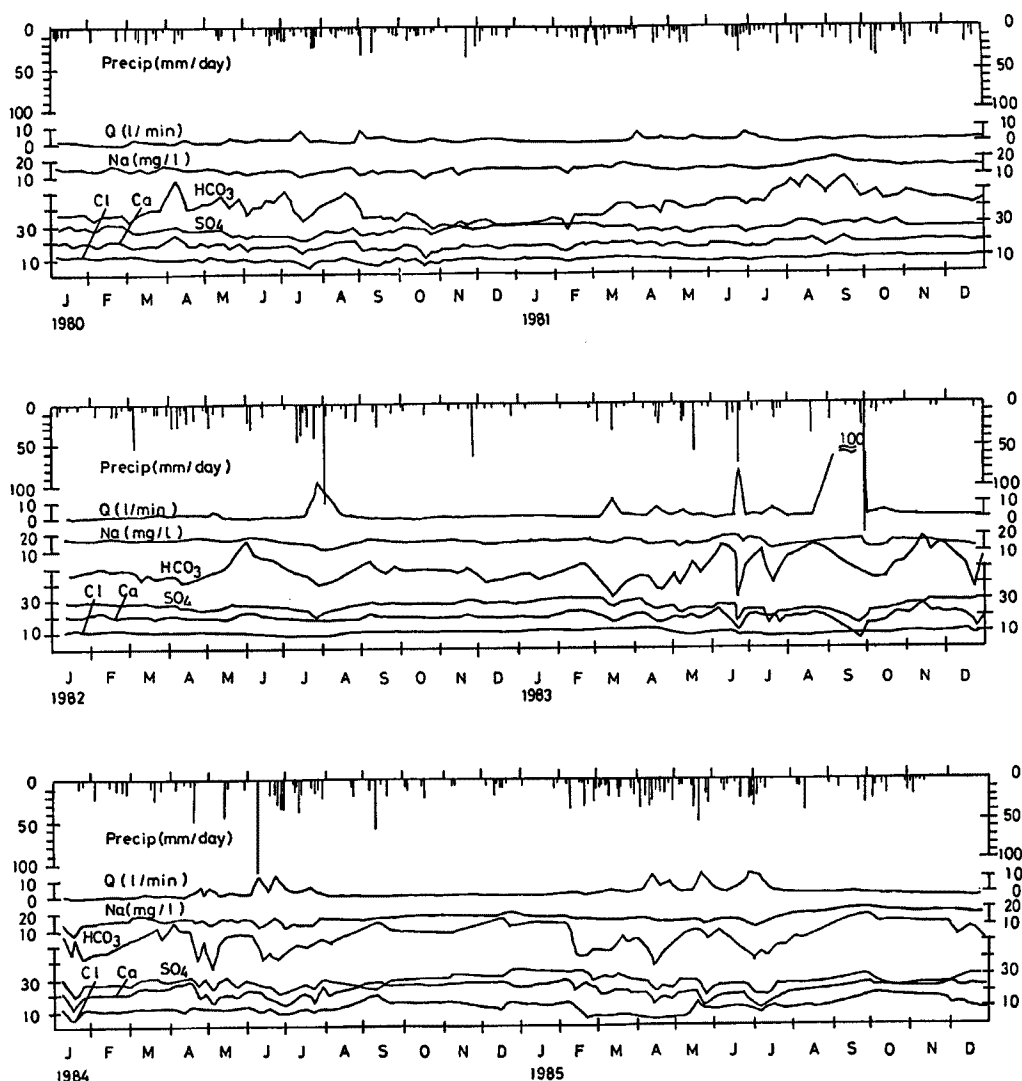


Fig. 2. Changes in discharge, precipitation and concentrations of sodium, calcium, chloride, bicarbonate, and sulfate over a six-period (1980-1985). The discharge was measured weekly at the time of sample collection. The relationships between solute concentrations and discharge are highlighted. The concentration of bicarbonate shows an increasing tendency with time.

一口にいて、 HCO_3^- 濃度は年々増加の傾向がみられることが特徴的といえよう。例えば、 HCO_3^- 濃度が 50 mg/l 以上の値を示す時期をみると、観測開始の1980年では4月初旬のみであったが、1981年は8～9月、1982年は5月中旬～6月、1983年は6～9月中旬と10～12月中旬、1984年は3～4月中旬、5月および8～12月、1985年は1～2月中旬、5～6月中旬および8～12月と、年々、 HCO_3^- の高濃度化の出現時期の間隔が長くなっていることが分る。

このような経年的な HCO_3^- の高濃化現象は、本試験地の近傍の人工切取り斜面の安定化対策用に掘削された水平ボーリング孔からの湧水、あるいは本試験地から北東へ直線距離で約 8 km に位置する新神戸トンネル内の布引断層からの湧水、および同方向の約 14 km に位置する山陽新幹線六甲トンネル鶴甲斜坑内の大月断層からの湧水にもみられた¹²⁾。

この HCO_3^- の高濃度化の一つの解釈として、通常は、これらの地下水に地下深層起源の CO_2 が定常的に供給されているが、地殻変動などにより、この CO_2 の上昇経路が開閉したりして、その供給量に変化をきたしたものと考えられる。現在、六甲山周辺の微小地震、測地測量、検潮などの資料を収集・解析中であるので、この問題については別途報告する予定である。

さて、本試験地の化学風化速度を推算するためには、一次および二次鉱物として、どんな種類の鉱物が存在しているのかを知る必要がある。そこで、本試験地で採取した六甲花崗岩（風化岩）の X 線回折（粉末法）を行った。試料をメノー乳鉢で粉碎した後、100メッシュのふるいにかけ粒径を調整した。なお、X 線回折測定機器および条件は次のとおりである：島津製作所 VD1A 型；対陰極 Cu, フィルター Ni；管球電圧 30 KV；管電流 10 mA, フルスケール 1, 2. Kc.p.s（各試料の X 線反射強度に応じて変更）；時定数 4 sec；チャートスピード $2^\circ/\text{min}$ 。

Fig. 3 は風化岩（六甲花崗岩）の X 線回折結果の一部である。これより一次鉱物は石英、長石および黒雲母からなり、2次鉱物はカオリンとモンモリロナイト（少量）であることがわかる。

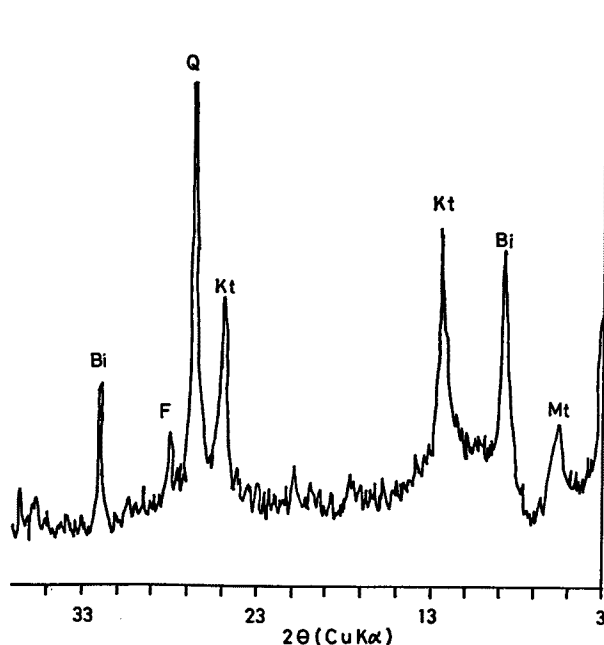


Fig. 3. X-ray diffraction pattern of weathered granitic rock (powder method). Phases include: Bi, biotite; F, feldspar; Q, quartz; Kt, kaolinite; Mt, montmorillonite.

次に、水質からみて、本試験地においていかなる鉱物が安定相であるかを検討する必要がある。花崗岩の風化（溶解）反応において、 $\text{Na-SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3\text{-H}_2\text{O}$ 系、 $\text{K-SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3\text{-H}_2\text{O}$ 系および $\text{Ca-SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3\text{-H}_2\text{O}$

系の安定図（各種鉱物間の熱力学的安定領域図）を考慮する必要がある。実際に、これら3つの安定図を作成し分析値（渓流水の流量で重みをつけた年平均値）をプロットしてみると全てカオリンの安定領域に分布していた。

そこで、ここでは $\text{Na-SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3\text{-H}_2\text{O}$ 系の安定図を代表として、**Fig. 4** に示した。これらの水はカオリンと平衡になっていることが分る。なお、この安定図を作成するのに必要な平衡式および平衡定数は Tardy¹⁸⁾ が使ったものを採用した。

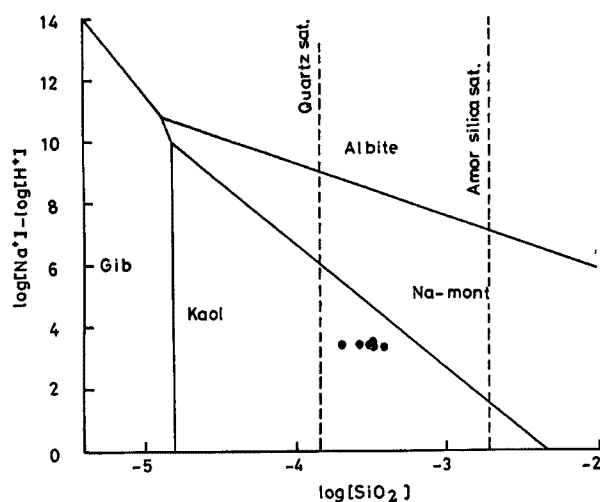


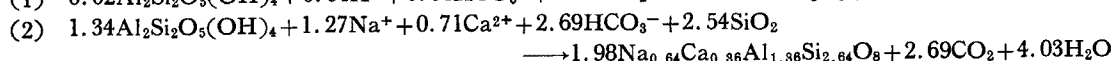
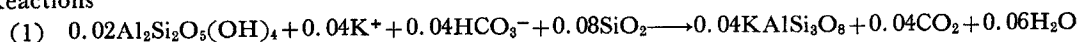
Fig. 4. Predominance diagram for the system $\text{Na-SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3\text{-H}_2\text{O}$ after Tardy. The weighted mean annual solute concentrations of stream water from the weathered granitic basin are plotted on the diagram.

天然水の化学組成から、化学風化速度を推算するためには、前述のように一次および二次鉱物を知る必要がある。X線回折および安定図から、一次鉱物として、黒雲母、正長石および斜長石、二次鉱物としてカオリンが存在していることが分ったので、**Table 1** の下段に示す式を用いて化学風化速度を推定することにする。

Table 1. Reconstitution of original minerals by back-reaction of stream water constituents and weathering products

	Mass balance ($\times 10^{-1}$ moles/ $\text{m}^2 \cdot \text{year}$)								
	Na^+	K^+	Mg^{2+}	Ca^{2+}	SiO_2	Cl^-	HCO_3^-	SO_4^{2-}	
Stream water	2.01	0.08	0.11	1.29	1.03	0.84	2.17	0.75	Amount of material produced by the back reaction of stream water with weathered rock ($\times 10^{-1}$ moles/ $\text{m}^2 \cdot \text{year}$)
Rain water	0.34	0.04	0.25	0.05	0	0.44	0	0.24	
Difference	1.67	0.04	-0.15	1.24	1.03	0.40	2.17	0.51	
Remove $\text{Cl}^- = \text{Na}^+$ and $\text{SO}_4^{2-} = \text{Ca}^{2+}$	1.27	0.04	-0.15	0.73	1.03	0	2.17	0	
Kaol $\rightarrow$ K-feld (1)	1.27	0	-0.15	0.73	0.95	0	2.13	0	
Kaol $\rightarrow$ Plagio (2)	0	0	-0.15	0.02	-1.59	0	-0.56	0	0.04 K-feldspar $\rightarrow$ 0.02 Kaolinite
Residual	0	0	-0.15	0.02	-1.59	0	-0.56	0	1.98 Plagioclase $\rightarrow$ 1.34 Kaolinite

Reactions



まず、その前に、化学風化速度を推定する根拠となる化学成分収支の式を次のように表わす。

$$F_i = \frac{1}{tA} [\sum_k (C_{ki} \cdot out \cdot Q_{k \cdot out} - C_{ki} \cdot in \cdot Q_{k \cdot in})] \dots \dots \dots (1)$$

ここで、 F_i ：各化学成分の比フラックス (mole/m²・year)， $C_{ki} \cdot out$ ：採水時の値を1週間の代表値とした流出水中の各化学成分濃度 (mole/m³)， $Q_{k \cdot out}$ ：1週間の総流出量 (m³)， $C_{ki} \cdot in$ ：1週間の降水中の各化学成分濃度 (mole/m³)， $Q_{k \cdot in}$ ：1週間の総降水量 (m³)， t ：総観測期間 (year)， A ：流域面積 (m²)

Table 1 の3行目は流出水の化学成分フラックスから降雨の化学成分フラックスを差し引いた値が記されている。ここで Mg^{2+} は負の値を示していることから、本試験地内に黒雲母が存在しているが、化学的風化に関与していないことにする。つまり黒雲母が風化してカオリンが生成される反応は考慮しないことにする。4行目は、 Cl^- は Na^+ と、 SO_4^{2-} は Ca^{2+} と等量にして除いた値を記している。5行目は、 K^+ がカオリン→正長石の逆反応で、6行目は、 Na^+ および Ca^{2+} がカオリン→斜長石の逆反応で、それぞれ使用された結果が記されている。

この表の計算結果は年間 1 m² あたりの風化された造岩鉱物量と生成された粘土鉱物量をモルで表わされているので、これを重量に換算すると、年間 1 m² あたり 1.11 g の正長石が風化して 0.52 g のカオリンが、また年間 1 m² あたり 54.2 g の斜長石が風化して 34.6 g のカオリンが、それぞれ生成されていることになる。また、この表から、 Mg^{2+} の年間平均降水量の約1/2 (0.36 g/m²・y) は本試験地内に固定されている。さらにK—長石および斜長石が風化してカオリンが生成されるさいに、流出水に放出される SiO_2 もまた同試験地内に固定されることになる (9.54 g/m²・y)。

なお、本試験地内の1980年から1985年の6年間の年平均降水量は 1134 mm であり、また年平均流出高は 344 mm であった。したがって、試験地の概要の項で述べたように、本試験地の常時の流出は主として中間流と考えられるので、降水量の約40%は土壌と岩盤の境界面から岩盤中に浸透し地下水流となり、より深部の地下水を涵養する(蒸発散による損失率を約30%とすると、その損失量は 340 mm となり、地下水涵養量は 1134-(344+340)=450 mm となる)と同時に、化学的風化も深部にわたり進行しているものと推定される。

5. お わ り に

六甲山系の小流域での6年間にわたる水質観測に基づいて、化学風化速度の推定を行った。今後、他の花崗岩地域との比較研究を行い、風化速度と風化帯の発達過程に関するモデルの構築に努めたい。

謝 辞

本研究を進めるにあたり、試験地の選定と観測に種々便宜を賜った神戸大学の田中茂名誉教授、および有益な助言を賜った防災研究所の奥田節夫教授に対し厚くお礼を申し上げます。

参 考 文 献

- 1) 吉岡龍馬・金井 忠：地すべり地地下水の炭酸ガス分圧について、京大防災研年報，第18号B，1975，pp. 271-282.
- 2) Yoshioka, R.: Chemical Composition of Natural Water in Landslide Areas, 応用地質，第17巻4号，1976，pp. 187-196.
- 3) 吉岡龍馬・奥田節夫：水質からみた亀の瀬すべり地帯の粘土鉱物生産量の推定，京大防災研年報，第15号B，1972，pp. 171-182.
- 4) Yoshioka, R.: Estimation of Amounts of Weathered Products Through Chemical Composition

- of Waters in the Kamenose Landslide Area, Bull. Disas. Prev. Res. Inst., Kyoto Univ., Vol. 25, Part 1, 1975, pp. 1-15.
- 5) Tanaka, S., R. Yoshioka and T. Okimura: Researches on Water Levels, Discharges and Chemical Compositions of Ground Waters Obtained by Boring Exploration During Heavy Rains at a Mountain Range in Japan, Proc. 2nd Intern. Sym. Water-Rock Interact., 1977, pp. I 267-I 276.
- 6) 吉岡龍馬：水質からみた岩石の風化現象，豪雨時における自然斜面の安定に関するシンポジウム，土質工学会，1978，pp. 47-54.
- 7) Yoshioka, R.: Geochemical Study of Weathering Through Chemical Composition in Natural Waters, (in press).
- 8) 高松信樹・下平京子・今橋正征・吉岡龍馬：花崗岩地帯湧水の化学組成に関する一考察，地球化学，第15巻1号，1981，pp. 69-76.
- 9) 吉岡龍馬：六甲山系の地下水の水質特性について，日本地下水学会会誌，第26巻4号，1984，pp. 147-166.
- 10) 北岡豪一・吉岡龍馬：トリチウム濃度から推定される六甲山系の水循環の速さについて，同上，第26巻4号，1984，pp. 131-145.
- 11) 吉岡龍馬・小泉尚嗣・日下部 実・千葉 仁：長野県西部地震による斜面崩壊地周辺の天然水の化学成分および同位体組成について，京大防災研年報，第29号B-1，1986，pp. 379-390.
- 12) 吉岡龍馬：六甲山の水質と地殻変動，地震予知「きんき・けいはんしん」会報，第14号，1987，pp. 13-22.
- 13) 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.