

# 化学的風化の指標について

## A Review of Chemical Weathering Index

小口 千明\*・松倉 公憲\*\*

Chiaki, T. OGUCHI and Yukinori MATSUKURA

### I はじめに

化学的風化の程度を評価するための様々な指標が、多くの研究者により提示されている。風化の研究において風化指標を用いる際には、その研究目的に沿って、多くの風化指標の中から適当なものを取捨選択して使い分ける必要がある。そのためには、それぞれの指標のもつ特徴および問題点を予め把握しておかなければならない。化学的風化の程度を示す指標をレビューした従来の報告には、Jenny (1941, pp.24~27), Carroll (1970, pp.88~99), 一国 (1972, pp.51~56), 西田 (1986, pp.25~33), 天田・岡谷 (1989), および石井 (1993) などがある。とくに天田・岡谷 (1989) においては、化学分析値より求められる風化指標の相互比較がなされている。本稿においては、従来の風化指標を新たな観点より分類し、それらの特徴および問題点を報告する。

### II 化学的風化の指標の分類

#### 1. 鉱物分析による指標

鉱物分析による指標は、風化に対して抵抗性のある鉱物の定量、もしくは粘土鉱物の定量により提案されている。前者の方法に際して、風化に対する鉱物の抵抗性を論じた Goldich (1938) の安定系列 (stability series) がしばしば引用される。たとえば、Lumb (1962) は、長石が石英よりも変質しやすいことを利用して次のような風化指標を提案した。

$$X_d = \frac{N_q - N_{q0}}{1 - N_{q0}}$$

ここで、

$$N_q, N_{q0} = \frac{\text{石英}}{\text{石英} + \text{長石}}$$

であり、 $N_q$  は風化物、 $N_{q0}$  は未風化岩の値をそれぞれ示している。たとえば、花こう岩に対してこの指標を適用すると、 $X_d$  が 0.1~1.0 の値をとる (Lumb, 1962)。

風化の進行にともない、一次鉱物は変質する。とくに深成岩においては顕微鏡下の観察を比較的容易に行えることから、一次鉱物の変質程度を指標とすることができる。たとえば、九里ほか (1971) は、花こう岩中の長石とその変質物を定量することにより、

$$\text{長石の変質部量} = \frac{\text{変質長石}}{\text{変質長石} + \text{未変質長石}}$$

を提案した。また、一次鉱物がさらに変質して形成された粘土鉱物の量を求める方法もある。とくに、カオリン鉱物に着目した風化指標がいくつか提案されている。たとえば、Brewer (1955) は、長石、角閃石、黒雲母がカオリナイトへ変化した割合を求めることにより風化程度を表しており、天田・岡谷 (1991) は、カオリナイト/(正長石+斜長石)の比をとることにより風化度の指標とした。

風化過程においては、しばしば非晶質(アモルファス)物質が生成される。西田ほか (1984) は、花こ

\* 筑波大学大学院・地球科学研究科 \*\* 筑波大学地球科学系

う岩の風化物質であるまき土中の  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{SiO}_2$  などの成分を,  $\text{HCl}$  と  $\text{NaOH}$  で溶出させることにより求めた非晶質物質の量も風化の指標になるとしている。

## 2. 化学分析による指標

### 1) 元素の易動度の相違による方法

化学的風化にともない岩石(鉱物)中の元素は徐々に溶脱するが, 一般に, その溶脱量および溶脱速度は元素により異なる。これを利用し, 易動度の大きい化学種(アルカリ金属・アルカリ土類金属)と, 小さい化学種( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ,  $\text{TiO}_2$ )との比をとることにより風化の程度を表すことができる。

岩石中に含まれる元素の易動度の相違に基づく風化指標を第1表にまとめた。古くから提案されているものに, 岩石の最多成分である  $\text{SiO}_2$  に着目した  $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$  値(いわゆる珪バン比)がある。この値には提案者により異なる指標名が与えられており, Harrassowitz (1926) は *ki* 値, Marbut (1935) は *sa* 値, 大見ほか (1975) は SAR 値(シリカーアルミナモル比)と呼んでいる。類似の指標としては,  $\text{Al}_2\text{O}_3$  の代わりに易動度の小さい化学種である  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  を用いた *sf* 値および  $\text{Al}_2\text{O}_3$  と  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  との和を用いた *ss* 値(Marbut, 1935)がある。また, SAIR 値(大見ほか, 1975)は  $\text{SiO}_2$  と  $\text{Al}_2\text{O}_3$  のほか

第1表 従来提案されている化学分析による指標

指標名	著者	内 容
<i>ki</i> 値 <i>sa</i> 値 SAR 値	Harrassowitz (1926) Marbut (1935) 大見ほか (1975)	$\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$
<i>sf</i> 値 <i>ss</i> 値 SAIR 値 Silica -Titania Index	Marbut (1935) Marbut (1935) 大見ほか (1975) Jayawardena and Izawa (1994)	$\text{SiO}_2/\text{Fe}_2\text{O}_3$ $\text{SiO}_2/(\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3)$ $\text{SiO}_2/(\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{H}_2\text{O}^+)$ $\{(\text{SiO}_2/\text{TiO}_2)/[(\text{SiO}_2/\text{TiO}_2) \times (\text{Al}_2\text{O}_3/\text{TiO}_2) \times (\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3)]\} \times 100$
<i>ba</i> 値 <i>ba</i> <sub>1</sub> 値 <i>ba</i> <sub>2</sub> 値	Harrassowitz (1926) Harrassowitz (1926) Harrassowitz (1926)	$(\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O} + \text{CaO})/\text{Al}_2\text{O}_3$ $(\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O})/\text{Al}_2\text{O}_3$ $(\text{CaO} + \text{MgO})/\text{Al}_2\text{O}_3$
<i>af</i> 値 <i>ps</i> 値 <i>cm</i> 値	Harrassowitz (1926) Harrassowitz (1926) Harrassowitz (1926)	$\text{Al}_2\text{O}_3/\text{Fe}_2\text{O}_3$ $\text{K}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O}$ $\text{CaO}/\text{MgO}$
V 値 SIW 値 <i>ff</i> 値	Vogt (1927), Roaldset (1972) 天田・岡谷 (1989) 平山・井口 (1965)	$(\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{K}_2\text{O})/((\text{Na}_2\text{O} + \text{CaO} + \text{MgO})$ $\text{Na}_2\text{O}/(\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{強熱減量})$ $\text{Fe}_2\text{O}_3/\text{FeO}$
WPI 値	Reiche (1943)	$100 \times (\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O} + \text{CaO} + \text{MgO} - \text{H}_2\text{O})$ $/(\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O} + \text{CaO} + \text{MgO} + \text{Fe}_2\text{O}_3)$
WPI 値	Reiche (1950)	$100 \times (\text{K}_2\text{O} + \text{MgO} + \text{CaO} + \text{MgO} - \text{H}_2\text{O})$ $/(\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O} + \text{CaO} + \text{MgO} - \text{H}_2\text{O})$
PI 値	Reiche (1943)	$100 \times \text{SiO}_2/(\text{SiO}_2 + \text{Fe}_2\text{O}_3 + \text{Al}_2\text{O}_3)$
CIA 値 CIW 値 DF 値	Nesbitt and Young (1982) Harnois (1988) 三浦 (1973)	$100 \times \text{Al}_2\text{O}_3/(\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O} + \text{CaO})$ $100 \times \text{Al}_2\text{O}_3/(\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Na}_2\text{O} + \text{CaO})$ $(\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O} + \text{CaO} + \text{MgO} + \text{FeO} + \text{MnO})$ $/(\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3 + \text{H}_2\text{O})$
LF 値 ADF 値	Jenny (1941) 三浦 (1973)	(風化層の <i>ba</i> <sub>1</sub> 値) / (母岩の <i>ba</i> <sub>1</sub> 値) (風化岩の DF 値) / (新鮮岩の DF 値)

に、風化にともなう  $H_2O$  の増加に着目したものであり、Silica-Titania Index (Jayawardena and Izawa, 1994) は易動度が最も小さいとされている  $TiO_2$  に着目したものである。

$ba$ ,  $ba_1$ ,  $ba_2$  値 (Harrassowitz, 1926), および V 値 (Vogt's Residual Index; Vogt, 1927; Roaldset, 1972) は、いずれも  $SiO_2$  の代わりに易動度の大きい  $CaO$ ,  $Na_2O$ ,  $K_2O$  などの化学種に着目した指標である。これに関連して、天田・岡谷 (1989) は易動度の大きい  $Na$  に関して  $Al_2O_3$  と強熱減量の和との比をとり、SIW 値 (Simple Index of Weathering) として提唱している。また、 $ff$  値 (平山・井口, 1965) は、化学分析が主として湿式法により行われていた頃、他の元素と比較して相対的に容易に求められる  $Fe_2O_3$  と  $FeO$  に着目して提案された指標である<sup>1)</sup>。

多数の元素を用いた風化指標においては、Reiche (1943) による WPI (Weathering Potential Index), PI (Product Index もしくは Weathering Direction) が古典と言えよう。WPI 値はその後改良され、 $Fe_2O_3$  の代わりに  $H_2O$  を取り入れたもの (Reiche, 1950) や  $H_2O$  を除いた MWPI 値 (Modified Weathering Potential Index; Vogel, 1975) が提案された。また、DF 値 (化学的新鲜度; 三浦, 1973), CIA 値 (Chemical Index of Alteration; Nesbitt and Young, 1982) および CIW 値 (Chemical Index of Weathering; Harnois, 1988) も提案された。しかし、多数の元素を用いても、指標の構築における基本概念は上述の簡潔なものとは変わらない。

第 1 表に掲げた風化指標のほかに、岩石の標準構成単位中の陽イオン数で風化程度を評価する方法 (Barth, 1948) がある。また、 $TiO_2$  が溶脱されないと仮定して化学分析値を補正することにより、他の化学種の減少の程度を調べる方法 (一国, 1972, pp.53~56) もある。しかし、これらの指標も元素の易動度に基づいて提案されたものである。

## 2) 指標値を用いて風化の程度を表す方法

風化物および新鮮岩のそれぞれについて前述 1) の指標を求め、さらに新鮮岩に対する風化物の比を求めることにより風化程度を表現できる別の指標となる。LF 値 (Leaching Factor; Jenny, 1941) と

ADF 値 (絶対的化学的新鲜度; 三浦, 1973) はそのような風化指標の例である (第 1 表)。

2 つの指標の相関をとることもまた、風化の程度を表すことができる。たとえば、WPI を縦軸、PI を横軸にとり、対象とした試料が化学的風化の最終産物までのどの段階にあるのかを知る WPI-PI (Reiche, 1943) や、CIA を縦軸、酸化物/ $TiO_2$  の変化率を横軸にとり、元素の易動度と風化程度との関係を知る CIA-酸化物/ $TiO_2$  (Nesbitt and Wilson, 1992) がある。

また、目的に応じた化学種の組み合わせを三角ダイヤグラムの各頂点にとることも風化程度を表すのに有効である。たとえば、カオリナイト化の程度を見るためには  $H_2O$ ,  $SiO_2$  および  $Al_2O_3$  を各頂点にとればよく (Goldich, 1938; Ruxton, 1968, など)、溶脱の程度を調べるためには  $SiO_2$ ,  $Al_2O_3$  および  $(Na_2O + MgO + K_2O + CaO)$  を頂点にとればよい (Goldich, 1938; Reiche, 1943; Roaldset, 1972; Smith *et al.*, 1987, など)。

## III 従来の指標に対する評価

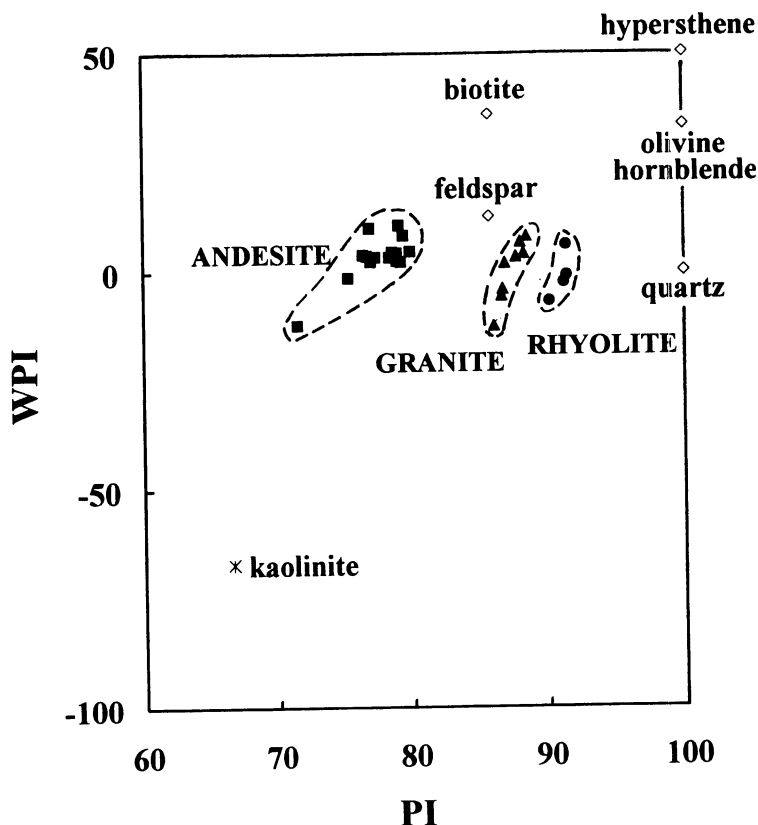
化学的風化にともない粘土鉱物が形成される。しかし、鉱物の変質過程は第 2 表のように複雑であり、その原因として、風化環境の多様性などが考えられる。さらに、粘土鉱物の同定は、一般に顕微鏡下における判定が困難である上、XRD (X線回折分析法) による定量分析もきわめて精度が悪いと言われている。また、顕微鏡下において造岩鉱物の面積を求めることにより提案された指標の場合は、深成岩 (とくに、花こう岩質岩石) を対象として行われることが多いようである。XRD による定量分析および顕微鏡下における鉱物定量は、いずれも全岩の化学分析と比較し、手間がかかる上に精度も悪い。鉱物分析による風化指標に基づいて精密な議論をすることには問題があり、これらの指標は目安としてのみ使用されるべきである。

化学分析による指標は化学組成のみの比較検討であるため、簡便で一般的である。 $SiO_2/Al_2O_3$  に関しては、Si は岩石と反応する水がアルカリ性の環境下で溶出しやすい (Magistad, 1925) ため、およ

第2表 造岩鉱物および火山ガラスの風化変質過程

長石	→アロフェン→ハロイサイト→カオリナイト →イライト→イライト/スメクタイト混合層鉱物→スメクタイト→スメクタイト/ハロイサイト混合層鉱物→ハロイサイト→カオリナイト
白雲母	→白雲母/パーミキュライト混合層鉱物→パーミキュライト →イライト/スメクタイト混合層鉱物→スメクタイト
黒雲母	→黒雲母/パーミキュライト混合層鉱物→パーミキュライト→パーミキュライト-カオリナイト中間種鉱物→カオリナイト →緑泥石化した黒雲母→緑泥石/パーミキュライト混合層鉱物→パーミキュライト →パーミキュライト-カオリナイト中間種鉱物→カオリナイト
かんらん石 輝石 角閃石	→(緑泥石)→パーミキュライト→モンモリロナイト→モンモリロナイト/ハロイサイト混合層鉱物→ハロイサイト→カオリナイト →緑泥石→緑泥石/パーミキュライト混合層鉱物→パーミキュライト→モンモリロナイト →モンモリロナイト/ハロイサイト混合層鉱物→ハロイサイト→カオリナイト
高シリカ火山ガラス	→アロフェン→ハロイサイト→ハロイサイト/メタハロイサイト混合層鉱物→メタハロイサイト
低シリカ火山ガラス	→アロフェン→ハロイサイト →アロフェン→イモゴライト

塚本・水谷(1988, 表-4)による

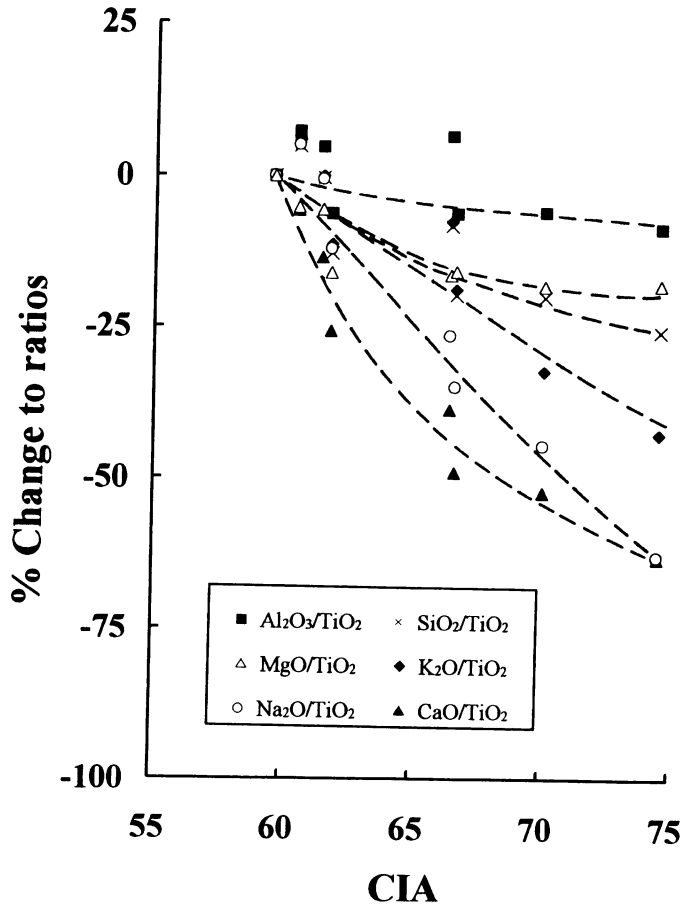


第1図 PI(Product Index)とWPI(Weathering Potential Index)との関係(Reiche, 1943による)。ただし、データには、大見ほか(1975)：ANDESITE(安山岩)、松倉ほか(1983)：GRANITE(花こう岩)、高嶋(1993)：RHYOLITE(流紋岩)を用いた。また、鉱物の理想的な化学組成式には次のものを用いた。hypersthene： $MgSiO_3$ 、olivine： $Mg_2SiO_4$ 、hornblende： $Ca_2Mg_5Si_8O_{22}(OH)_2$ 、biotite： $KMg_3AlSi_3O_{10}(OH)_2$ 、feldspar： $KAlSi_3O_8$ 、quartz： $SiO_2$ 、kaolinite： $Al_2Si_2O_5(OH)_4$ 。

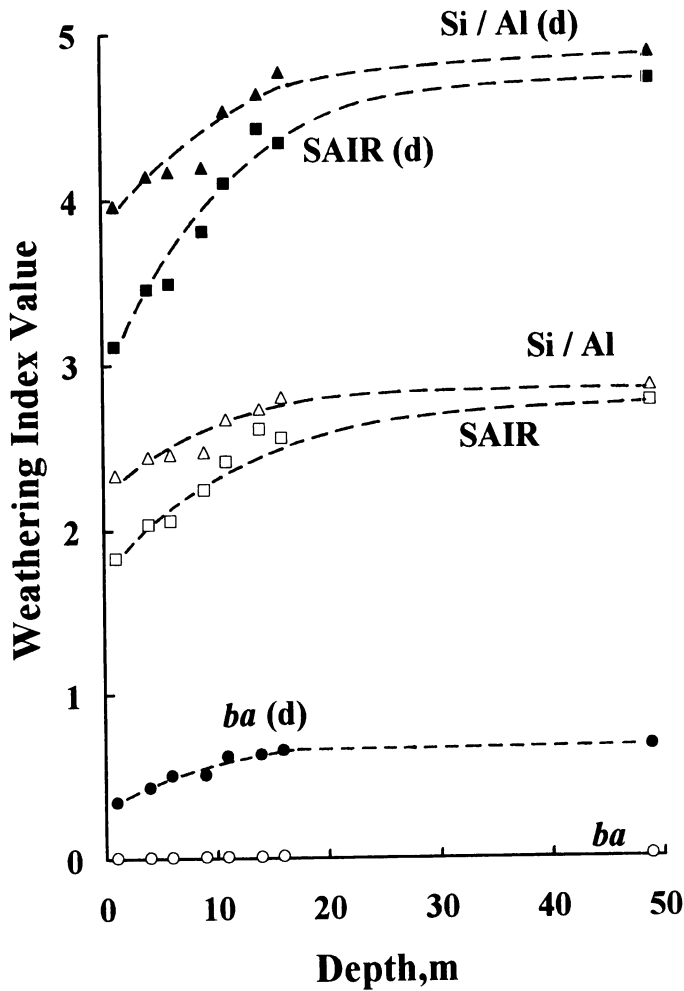
その風化環境の推測に活用できるというメリットを持つ。しかし、これは同時に、 $\text{Al}_2\text{O}_3$  を基準として規格化することの不確かさをも示している。同様のことは新鮮岩と風化物との比をとる方法に対しても言える。この種の指標は、化学組成の異なる同一岩型のみならず、すべての岩型に対しても同一の尺度で風化程度を議論するとき有効である。しかし、その議論はあくまでも相対論でしかない。たとえば、LF 値について考えてみる。LF 値は  $ba_1$  値をもとに作られた指標であるので、ここでまず、 $\text{K}_2\text{O} + \text{Na}_2\text{O}$  が  $\text{Al}_2\text{O}_3$  よりも相対的に溶脱されやすいことを前提としている。次に、新鮮岩と風化物との比を求めるわけであるが、新鮮岩が絶対的に新鮮である

か否かを知ることは不可能であり、調査地点において最も新鮮に見えたものを新鮮岩として採取したにすぎない。極論すれば、相対的に風化が進行していないものを基準として指標となり得る値を算出することもできるのである。

WPI-PI (Reiche, 1943) は、対象とした試料が化学的風化の最終産物に至るまでのどの段階にあるのかがわかる。たとえば、カオリナイトを最終産物としたときの風化過程を考える。第1図は、主な造岩鉱物の理想式および大見ほか (1975) の安山岩、松倉ほか (1983) の花こう岩、小口ほか (1994) の流紋岩のデータより求めた WPI 値、PI 値をプロットしたものである。風化の進行方向はグラフの右上



第2図 CIA (Chemical Index of Alteration) と化学種の易動度との関係 (Nesbitt and Wilson, 1992による)。ただし、データには松倉ほか (1983) を用いた。



第3図 稲田型花こう岩の同一風化断面より求められたデータ (松倉ほか, 1983) をもとに計算された風化指標値の比較. Si/Al:  $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ , SAIR: SAIR 値, ba: ba 値, (d)のついているものは, いずれもかさ密度を考慮して求めた値.

から左下であり, 各岩型もカオリナイトに至る風化系列上に乗っている. しかし, 単純にカオリナイトに近い位置において, より風化が進行しているとすると, かんらん石よりも石英の方が風化していることになり, 従来の見解と矛盾する. したがって, WPI-PI 図は, 様々な化学組成および鉱物種より構成される岩石オーダーの風化を示しているにすぎず, この図から詳細な風化過程を論ずるには無理がある.

同様に, CIA - 酸化物/ $\text{TiO}_2$  の変化率 (Nesbitt

and Wilson, 1992) について, 松倉ほか (1983) の花こう岩のデータを用いてプロットしてみた (第2図).

この指標は, 風化程度と化学種の相対的な溶脱速度との関係を調べるために提案されたものである. 第2図を見ると, 岩石中にわずかにしか含まれていない  $\text{TiO}_2$  で他の化学種を規格化しているため, ばらつきが大きい. このばらつきを無視して議論できる内容の精度は, 決して高くはないと考えられる.

従来の指標の問題点は, いずれの指標も相対的な

風化程度を求めているにすぎないことにある。風化程度の相対的な議論から脱却するためには、化学種の実際の溶脱量を求めなければならない。これは、次のような概念をもとに求めることができる。一般に化学種の溶脱にともない岩石の単位体積当たりの重量が減少する。ところが、従来の化学分析による指標は、いずれも岩石の単位重量当たりにおける各化学種の重量変化を、重量パーセントあるいはそれより求めたモルパーセントで示される。これでは、風化にともなう「かさ密度」(岩石の単位体積重量)の変化を考慮していないことになる。しかし、単位体積当たりの化学種の重量パーセントと単位体積重量との積で表される値を用いると、単位重量当たりにおける各化学種の重量変化(すなわち、全ての化学種の実質の変化量)を議論することができ、相対的な風化指標に依存する必要がなくなる。この値を用いた研究には、Hendricks and Whittig (1968) および松倉ほか (1983) などがあるが、大多数の風化研究では、かさ密度が考慮されていない値が用いられている。

II.2.1)で述べた指標のうち、かさ密度を考慮した場合と考慮しない場合について、どちらが風化程度をよく表しているかを、 $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ 、*ba* 値および SAIR 値を用いて吟味してみた(第3図)。ここに掲げたすべての指標値は、松倉ほか(1983)のデータを用いて計算した。第3図によれば、従来提案されてきた指標より求められた値の変化は、かさ密度を考慮して得られる絶対量をもとに計算された値の変化よりも小さい。したがって、従来の風化指標は、風化程度を過小評価していると考えられる。

#### IV おわりに

従来の風化研究において提案された化学的風化の程度を示す指標をレビューし、比較検討した。鉱物分析による指標は分析にかかる手間のために、最近新しい提案がほとんどなされていないのに対し、化学分析によるものは従来のものに改良が重ねられて多くの指標が提案されている。後者の指標はいずれも、元素の易動度の相違に基づいているという点で指標構築における基本的な考え方が等しい。この種

の風化指標の提唱は、風化程度を示す化学種間の組み合わせのある限り続きそうである。

化学的風化により、化学的性質のみならず岩石物性なども変化する。とくに、密度の低下は化学種の溶脱と密接な関連がある。同じ指標でもかさ密度を考慮したものは、従来のものよりも良好に風化程度を表すことが明らかになった。

#### 注

1) ただし、XRF(蛍光X線分析法)による化学分析が多く行われるようになった現在においては、 $\text{Fe}_2\text{O}_3$ とFeOの分別定量をXRFで行うことができないこともあり、この指標を算出することは、逆に手間のかかる作業となっている。

#### 謝辞

本稿を作成するにあたり、国際農林水産業研究センター主任研究官の八田珠郎氏には有益な議論をしていただいた。また、本研究は、深田研究助成金(財団法人深田地質研究所)および文部省科学研究費補助金(一般B, 課題番号05452340)を受けて行われたものである。ここに記して謝意を表する。

#### 文献

- 天田高白・岡谷 直 (1989): 化学的風化指数に関する一考察. 新砂防, **41**, 3-11.
- 天田高白・岡谷 直 (1991): 花崗岩の風化に関する実験的研究. 新砂防, **43**, 3-10.
- 一国雅巳 (1972): 無機地球化学. 培風館, 東京, 148p.
- 石井 卓 (1993): 建設工事における風化・変質作用の取扱い方(11): 風化・変質作用による地盤の長期耐久性や土木構造物への影響. 土と基礎, **41**, 57-62.
- 大見美智人・本田彰義・井上正康・吉田幸信 (1975): 風化安山岩の化学的・物理的性質の関係について. 応用地質, **16**, 169-177.
- 小口千明・八田珠郎・松倉公憲 (1994): 神津島における多孔質流紋岩の風化とそれに伴う物性変化. 地理評, **67**, 775-793.

- 九里尚一・阿部 司・齊藤徳美 (1971): 花崗岩の風化に関する研究 (I). 物理探鉱, **24**, 6-17.
- 塚本 齊・水谷伸治郎 (1988): 風化粘土の生成と変遷. 応用地質, **29**, 231-241.
- 西田一彦・佐々木清一・久保利達 (1984): まさ土の非晶質物質とその特性について. 土質工学会論文報告集, **24**, No.2, 181-190.
- 西田一彦 (1986): 風化残積土の工学的性質. 鹿島出版会, 東京. 192p.
- 平山光衛・井口正男 (1965): 岩石の風化指数  $ff$  とその地形学的意義. 資源研彙報, **65**, 17-21.
- 松倉公憲・前門 晃・八田珠郎・谷津榮壽 (1983): 稲田型花崗岩の風化による諸性質の変化. 地形, **4**, 65-80.
- 三浦 清 (1973): 深成岩類の風化に関する研究 (第1報): 新第三紀末の赤色風化作用による江津深成岩体の風化. 応用地質, **14**, 1-16.
- Barth, T. W. (1948): Oxygen in rocks: a basis for petrographic calculations. *J. Geol.*, **56**, 50-61.
- Brewer, R. (1955): Mineralogical examination of a yellow podzolic soil on granodiorite. *Commonwealth Sci. Indust. Research Organization (Australia) Soil Publ.*, No.5, 28p.
- Carroll, D. (1970): *Rock Weathering*. Plenum Press, New York, 203p.
- Goldich, S. S. (1938): A study in rock weathering. *J. Geol.*, **46**, 17-58.
- Harnois, L. (1988): The CIW index: A new chemical index of weathering. *Sediment. Geol.*, **55**, 319-322.
- Harrassowitz, H. (1926): Laterit: Material und Versuch erdgeschichtlicher Auswertung. *Forsch. Geolog. und Paleont.*, **4**, 253-566.
- Hendricks, D.M. and Whittig, L.D. (1968): Andesite weathering: II. Geochemical changes from andesite to saprolite. *J. Soil Sci.*, **19**, 147-153.
- Jayawardena, U. S. and Izawa, E. (1994): A new chemical index of weathering for metamorphic silicate rocks on tropical regions: A study from Sri Lanka. *Engng. Geol.*, **36**, 303-310.
- Jenny, H. (1941): *Factors of Soil Formation*. McGraw Hill, New York, 281p.
- Lumb(1962): The properties of decomposed granite. *Géotechnique*, **12**, 226-243.
- Magistad, O. C. (1925): The alminum content of the soil solution and its relation to soil reaction and plant growth. *Soil Sci.*, **20**, 181-213.
- Marbut, C. F. (1935): *Soils of the United States. Atlas of American Agriculture, Part III*, U. S. Government Printing Office, Washington, D. C.
- Nesbitt, H. W. and Young, G. M. (1982): Early proterozoic climates and plate motions inferred from major element chemistry of lutites. *Nature*, **299**, 715-717.
- Nesbitt, H. W. and Wilson, R. E. (1992): Recent chemical weathering of basalts. *Amer. J. Sci.*, **292**, 740-777.
- Reiche, P. (1943): Graphic representation of chemical weathering. *J. Sediment. Petrol.*, **13**, 58-68.
- Reiche, P. (1950): A survey of weathering processes and products. *New Mexico Univ. Publ. Geology*, **3**, 95p.
- Roadset, E. (1972): Mineralogy and geochemistry of Quarternary clays in the Numedal area, Southern Norway. *Norsk Geol. Tidsskr.*, **52**, 335-369.
- Ruxton, B. P. (1968): Measures of the degree of chemical weathering of rocks. *J. Geol.*, **76**, 518-527.
- Smith, K. L., Miles, A. R., and Eggleton, R. A. (1987): Weathering of basalt: Formation of iddingsite. *Clays and Clay Miner.*, **35**, 418-428.
- Vogel, D. E. (1975): Precambrian weathering in acid metavolcanic rocks from the Superior Province, villebon Township, south-central Quebec. *Can. J. Earth Sci.*, **12**, 2080-2085.
- Vogt, T. (1927): Sulitjelmafeltets geologie og petrografi. *Nor. Geol. Unders.*, **121**, 1-560.