

# 塩類風化に関する一実験 —風化による強度低下と岩石物性—

The Effect of Rock Properties on Rock Strength Change  
by Salt Weathering: A Laboratory Experiment

佐藤 昌人\*・八反地 剛\*\*・若狭 幸\*\*\*

Masato SATO\*, Tsuyoshi HATTANJI\*\* and Sachi WAKASA\*\*\*

## 1 はじめに

塩類風化は多くの地形の形成に重要な役割を果たしている。タフォニや cavernous weathering (Bradley *et al.*, 1978; Matsukura and Matsuoka, 1991; Matsukura and Kanai, 1988 など), 台座岩 (Chapman, 1980), 波食棚 (Bryan and Stephens, 1993) などを形成する際の主要因の一つとして, 塩類風化が挙げられている。特に乾燥地域 (Goudie and Day, 1980; Goudie and Viles, 2007) や海岸周辺地域 (Mottershead, 1989), 南極地域では, 岩屑の生産にも貢献している。また, 地形変化だけでなく, 塩類風化による建築物や石造文化財などの劣化が社会問題となっている (Gouri *et al.*, 1990; Kamh, 2005 など)。

これまで, 多くのフィールド調査や室内実験によって塩類風化に関する研究が重ねられてきた。Goudie and Viles (1997) は, 用いた岩石, 実験の手順・条件によって差異はあるが, 室内実験において,  $\text{Na}_2\text{SO}_4$ ,  $\text{Na}_2\text{CO}_3$ ,  $\text{MgSO}_4$  は塩類風化に対する影響力が大きく,  $\text{NaCl}$ ,  $\text{CaSO}_4$  は効果が小さいということを報告している。しかし, 野外での調査結果からは,  $\text{NaCl}$ ,  $\text{CaSO}_4$  は塩類風化に

有効な塩であることが示されている (高橋ほか, 1993; Clarke, 1994 など)。一方, Matsukura and Matsuoka (1996) は, タフォニの成長速度と岩石の間隙径分布, 強度の関係から, 引張強度が低く, 小さな間隙を多く持つ岩石ほど風化しやすいことを示した。山田ほか (2005) は, 物性の異なる 7 種類の岩石と  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  の飽和水溶液を用いて塩類風化実験を行い, 塩類風化によって試料の弾性波速度が低下すること, 岩石中に含まれる小間隙が多く, 引張強度が小さい岩石ほど, 弾性波速度の低下が著しいことを示した。

塩類風化が最も強く作用するのは, 乾燥と湿潤の変化が激しい岩石表面であると考えられる。したがって, 岩石表面の強度変化を把握することは, 塩類風化による地形変化を予測するうえで重要である。山本ほか (2005) は間隙率の異なる青島砂岩を用いて塩類風化実験を行い, 間隙率が大きい岩石ほど, 表面強度の低下が著しいことを報告した。しかし, 他の岩石における表面強度の変化, 岩石物性との関係についてはこれまで議論されていない。そこで本研究では, 7 種類の岩石と, 2 種類の塩溶液 ( $\text{Na}_2\text{SO}_4$ ,  $\text{NaCl}$ ) を用いて塩類風化実験を行い, 同時に表面強度の変化を測定し

\* 筑波大学生命環境科学研究科大学院生

\*\* 筑波大学生命環境科学研究科

\*\*\* 筑波大学 陸域環境研究センター

た。その結果をもとに、塩類風化による表面強度の低下と岩石物性の関係について若干の考察を行う。

## II 実験

### 1. 実験に使用した岩石と塩溶液

7種類の岩石（花崗岩2種（稲田花崗岩，真壁花崗岩），凝灰岩2種（大谷凝灰岩，白河熔結凝灰岩），砂岩2種（青島砂岩，多胡砂岩），流紋岩1種（新島黒雲母流紋岩））を一辺5cmの立方体状に整形し，乾燥炉で十分に乾燥させたものを用いて実験を行った。以下これらの岩石を，産地名を用いて，稲田石，真壁石，大谷石，白河石，青島石，多胡石，新島石と略称する。実験開始前の各岩石物性値を第1表に示す。L値はPROCEQ S. A.社製のエコーチップ硬さ試験機（D型）（以下，エコーチップ）を用いて，単打法で測定した岩石表面の強度の指標である。詳しい測定方法については後述する。塩溶液滲入率は，試料の全間隙体積に対して，実際に間隙に塩溶液が滲入した割合を示す値である。算出は以下の手順で行った，試料を24時間塩溶液に浸したのち，溶液から引き上げて試料表面の塩溶液を軽く拭き取った後，重量を測定した。測定した重量と塩溶液の密度から試料に滲入した塩溶液の体積を算出し，塩溶液が試料の全間隙に占める割合を計算した。塩溶液滲

入率 $I_R$ が大きいほど，試料の間隙に対する滲入した塩溶液の体積の割合が大きく， $I_R$ が1であれば，試料のすべての間隙に塩溶液が滲入していることを示す。

実験には硫酸ナトリウムと塩化ナトリウムの飽和水溶液（20℃における溶解度は，硫酸ナトリウムが25.5 wt%，塩化ナトリウムが26.4 wt%）を用いた。また，塩類風化以外の風化，主に乾湿風化の影響を評価するため，蒸留水を用いた実験も同時に行った。

### 2. 実験方法

従来，塩類風化の室内実験には，大きく分けて二つの方法が用いられてきた。一つは，立方体状の試料を塩溶液に完全に浸したのちに，溶液から引き出し，乾燥させる方法である（Goudie, 1974；Robinson and Williams, 2000など）。もう一つは，角柱状の試料下部を塩溶液に浸し，試料上部を乾燥させる方法である（Goudie, 1986；山田・松倉, 2001など）。前者の方法では，乾燥と湿潤を交互に繰り返し，実験の進行はサイクル数で表現される。この実験方法では，実験途中における試料の物性を測定できるため，実験の各段階における物性，風化速度の変化を捉えることができる。これに対して，後者の方法では，実験の開始時と終了時の比較はできるが，実験途中の変化が捉えられない。本実験では，実験進行に伴う物

第1表 実験に用いた岩石の物性値（一部，山田他，2005表4および表6より抜粋）

| 間隙率<br>$n$<br>[%] | かさ密度 $\gamma_d$<br>[g/cm <sup>3</sup> ] | 真比重 $\gamma_r$<br>[g/cm <sup>3</sup> ] | 引張強度<br>$S_t$ (MPa) | 初期エコー<br>チップ<br>反発値 $L_0$ | 塩溶液<br>滲入率<br>(Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> ) | 塩溶液<br>滲入率<br>(NaCl) | 間隙径分布                               |                               |                               |                               |                               |       |
|-------------------|---|--|---------------------|---------------------------|--|----------------------|-------------------------------------|-------------------------------|-------------------------------|-------------------------------|-------------------------------|-------|
|                   |   |  |                     |                           |  |                      | $V_{total}$<br>(mm <sup>3</sup> /g) | $V_1$<br>(mm <sup>3</sup> /g) | $V_2$<br>(mm <sup>3</sup> /g) | $V_3$<br>(mm <sup>3</sup> /g) | $V_4$<br>(mm <sup>3</sup> /g) |       |
| 稲田花崗岩             | 1.1                                     | 2.59                                   | 2.62                | 7.82                      | 831.6  | 0.53                 | 0.47                                | 19.4                          | 5.2                           | 2.6                           | 10.4                          | 1.3   |
| 真壁花崗岩             | 1.1                                     | 2.61                                   | 2.64                | 9.00                      | 863.8  | 0.85                 | 0.80                                | 33.9                          | 7.8                           | 5.2                           | 18.3                          | 2.6   |
| 大谷凝灰岩             | 36.8                                    | 1.47                                   | 2.33                | 1.37                      | 421.0  | 0.89                 | 0.72                                | 335.3                         | 20.7                          | 46.9                          | 96.6                          | 171.1 |
| 白河熔結<br>凝灰岩       | 15.5                                    | 2.19                                   | 2.59                | 4.38                      | 613.3  | 0.92                 | 0.82                                | 380.6                         | 8.6                           | 73.1                          | 236.5                         | 62.4  |
| 新島黒雲母<br>流紋岩      | 43.5                                    | 1.33                                   | 2.36                | 0.46                      | 268.4  | -                    | -                                   | 261.8                         | 214.2                         | 36.9                          | 8.3                           | 2.4   |
| 青島砂岩              | 6.7                                     | 2.51                                   | 2.69                | 5.75                      | 540.5  | 1                    | 1                                   | 181.8                         | 7.5                           | 10.0                          | 119.5                         | 44.8  |
| 多胡砂岩              | 25.6                                    | 1.94                                   | 2.61                | 3.35                      | 256.9  | 0.67                 | 0.60                                | 434.7                         | 35.9                          | 272.2                         | 83.2                          | 43.5  |

性の変化を捉えるため、前者の方法を用いた。

風化実験は以下の手順で行った。また、実験は室温（およそ 25℃、水温は 18℃から 21℃の範囲）で行った。

- (1) 試料を各溶液に 24 時間浸す。
- (2) それぞれの溶液から取り出した試料を 75℃で 48 時間炉乾燥させる。
- (3) 試料を炉から取り出し、室温になるまで冷ました後、蒸留水に 24 時間浸し、試料から塩を取り除く。
- (4) 蒸留水から取り出した試料を 75℃で 48 時間炉乾燥させる。
- (5) 炉乾燥した試料の重量  $W_n$  とエコーチップ反発値  $L_n$  を測定する ( $n$  はサイクル数を表す)。

(1) ~ (5) を 1 サイクルとし、各試料の風化の程度合わせて、9 ~ 20 サイクルの実験を行った。重量の測定は試料をメッシュ 2 mm の篩にのせた状態で行い、篩から抜け落ちたものを風化による欠損とみなし、篩上に残った試料の重量を測定した。

エコーチップは反発硬度試験機の一つであり、球状のテストチップ (D 型では直径 3 mm) を有するインパクトボディが、一定の力で試料表面を打撃する際の打撃速度と反発速度から、試料の硬さの指標  $L$  を求める。一般に試料が硬くなれば、 $L$  の値は大きくなる。反発硬度試験機の一つにシュミットロックハンマーがあるが、エコーチップ (D 型) は測定時の打撃エネルギーが 11 N・mm と、シュミットロックハンマーの 200 分の 1 程度ときわめて小さく、ほぼ非破壊で試料表面の強度を測定できる (青木・松倉, 2004)。Aoki and Matsukura (2007) は、単打法と連打法の二つの測定方法を提案している。岩石表面の強度を評価するため、本実験では単打法を用いた。具体的には、1 点を 1 回ずつ、10 点で打撃を行い、10 点の算術平均を  $L$  値として算出した。ただし、実験の進行に伴い、岩石表面が風化により

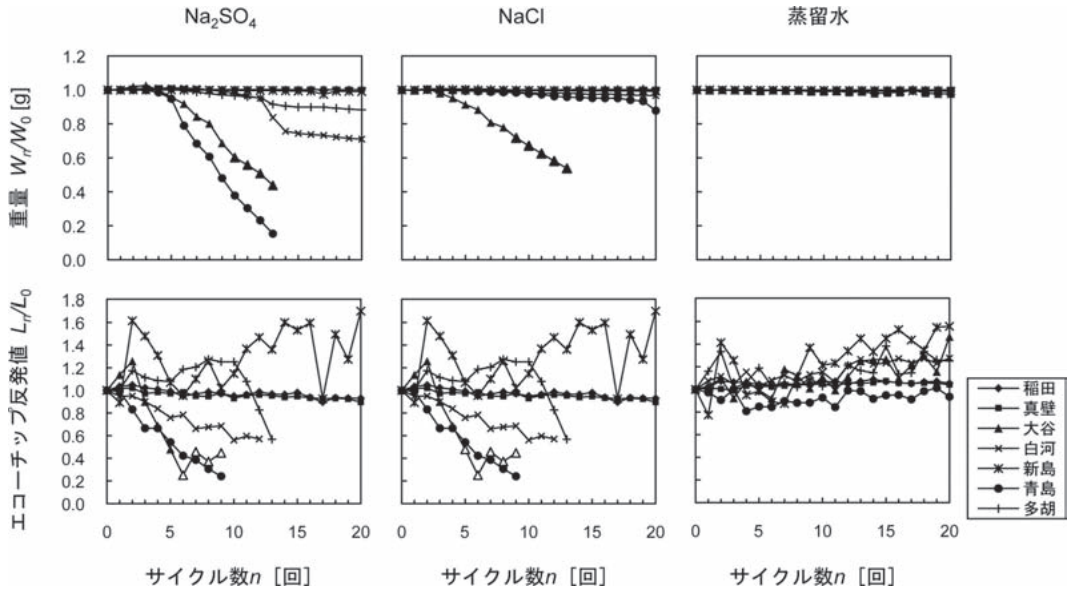
破壊され、10 点での計測が困難になった場合は、5 点での打撃を行い、平均値を算出した。川崎ほか (2000) は、試料の厚さが 3 cm 以下になると  $L$  値が一定値を示さなくなることを報告しているため、本実験では、試料の厚さが 3 cm 以下になるまで測定を行った。

### III 結果および考察

#### 1. 試料の変化

実験の進行に伴う試料の質量と  $L$  値の変化を第 1 図に示す。ただし、値は初期値からの変化率で示した。硫酸ナトリウムを用いた実験では砂岩 2 種と凝灰岩 2 種、塩化ナトリウムを用いた実験では大谷石と青島石の重量が明瞭に減少している。どの溶液を用いた実験でも花崗岩 2 種と新島石の重量は変化せず、また、蒸留水を用いた実験では、どの岩石にも重量の変化はみられなかった。したがって、重量の変化については、塩溶液を用いた実験には塩類風化以外の風化作用 (乾湿風化など) の影響は含まれていないと判断した。一方、 $L$  値は、試料ごとにバラつきがあるものの、塩溶液を用いた実験では減少する傾向を示し、蒸留水を用いた実験ではわずかに増加する傾向を示した。ただし、新島石を用いた実験では、試料の凹凸により、 $L$  値を正確に測定することができなかつたため、以下の議論から除外する。塩溶液を用いた実験と比較すると、従来、塩類風化による変化が起きていないとされてきた花崗岩において、20 サイクル経過後の  $L_n/L_0$  に差が生じており、塩類風化によって試料表面の強度が低下したことが示唆される (Goudie and Viles, 1997; 山田ほか, 2005 など)。ただし、蒸留水を用いた実験において、 $L$  値が上昇する傾向を示した原因は明らかではない。以下、塩溶液を用いた実験における変化は塩類風化によるものとして、議論を行う。

風化による破壊の様子は用いた塩溶液によって



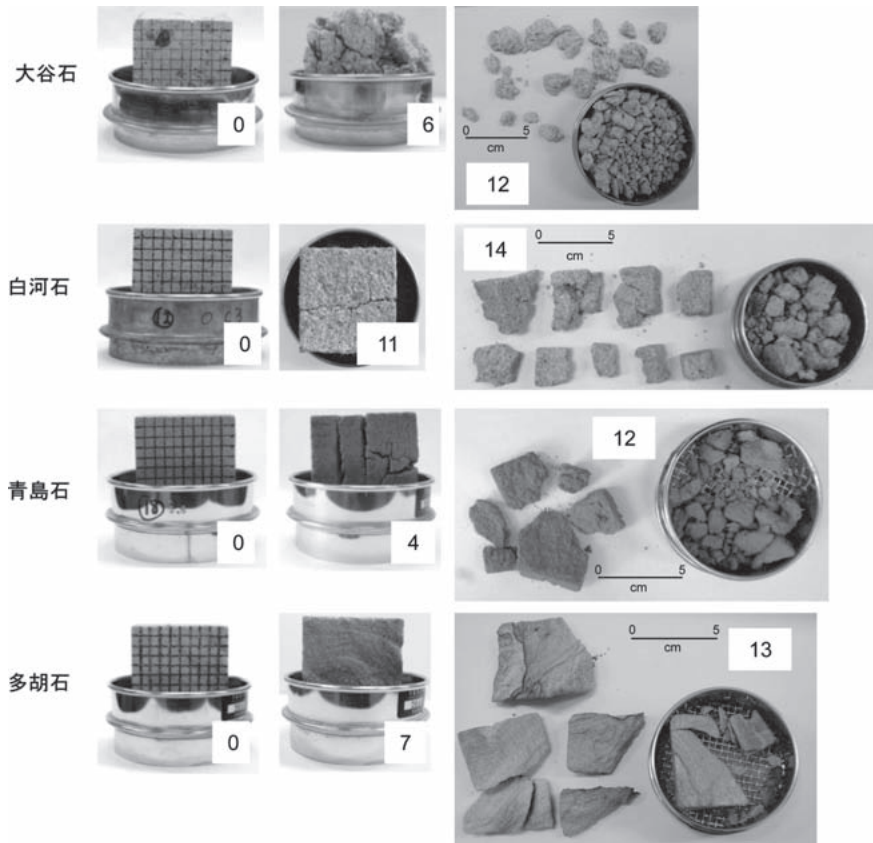
第1図 重量とエコチップ反発値の変化（ただし、白抜きは5点測定の平均値を示す。）

異なり、硫酸ナトリウムを用いた実験では、実験が進むにつれて試料全体に多数のクラックが網状に生じ、ある段階で複数のブロックに分解した（第2図）。一方、塩化ナトリウムを用いた実験では、主に試料表面から1～2mm径の小片が剥離するように破壊した。また、クラックが生じて、クラックが試料内部まで伸張して試料が破壊するには至らなかった（第3図）。重量の減少は、前者の方が著しい。試料への塩溶液浸透率を比較すると、どの岩石でも硫酸ナトリウムの方が浸透率は大きな値を示しており、試料内部に多くの塩溶液が浸透している（第1表）。それぞれの塩溶液の溶解度はほぼ同じであることから、硫酸ナトリウムの方が乾燥時に岩石中で析出する塩の量が多く、破壊過程に違いが生じた可能性が挙げられる。

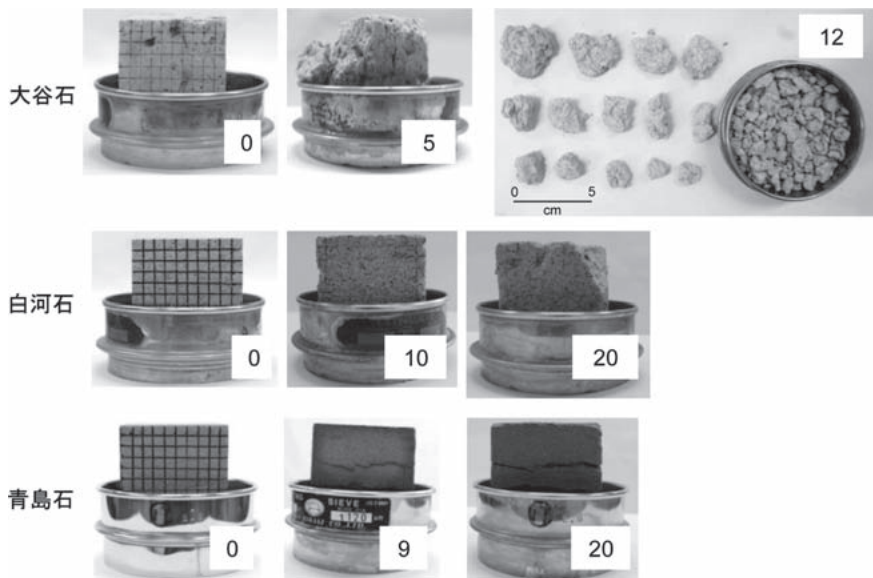
## 2. 重量とL値の関係

実験開始直後の数サイクルでは試料の重量はほとんど変化せず、数サイクル経過後、一定のペースで減少する傾向がみられた（第1図）。一

方、L値は実験開始直後から低下する傾向がみられる。そこで重量変化率  $W_n/W_0$  と反発値変化率  $L_n/L_0$  の関係を第4図に示した。どちらの塩溶液を用いた実験でも、 $W_n/W_0$  が1に近い領域では  $L_n/L_0$  も高い値を示す。しかし、 $L_n/L_0$  がある値よりも低い（硫酸ナトリウムを用いた実験では  $L_n/L_0$  が0.5～0.6以下、塩化ナトリウムでは0.8以下）領域では  $W_n/W_0$  が低い値を示している。これらの結果から、風化による試料の変化は以下のように説明される。実験開始直後、試料表面は強度が高い状態にあり、重量は一定に保たれる。その後、風化が進行して試料表面の強度が初期値に対して一定の割合を下回ると、塩の析出時に試料が破壊し、重量が減少し始める。ここで、硫酸ナトリウムを用いた実験で重量の減少がみられた白河石、多胡石は、第4図では重量が変化していないように見える。しかし、これは試料が破壊してL値の測定が行えなくなったためで、実際には白河石、多胡石ともに、 $L_n/L_0$  が0.5～0.6以下になると試料が破壊し、重量が減少している。山本ほか（2005）は青島砂岩を用いた風化実験の結果、



第2図 硫酸ナトリウム溶液を用いた実験における試料の様子（数字はサイクル数）



第3図 塩化ナトリウム溶液を用いた実験における試料の様子（数字はサイクル数）

同様の現象を報告している。本実験の結果は、この関係が岩石の種類によらないものであることを示している。

### 3. 風化速度と岩石物性

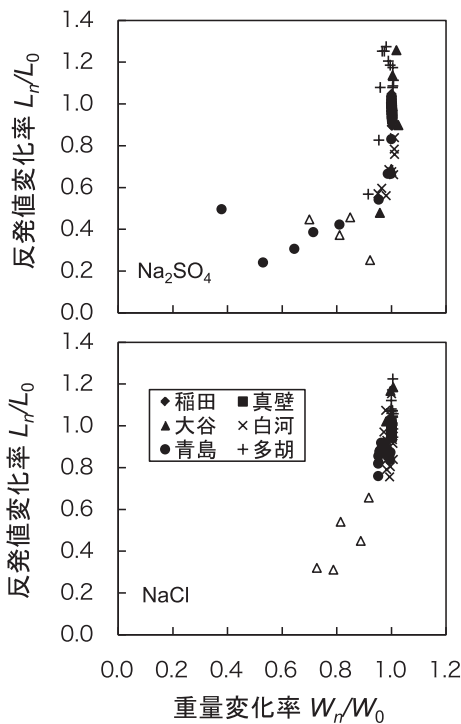
塩類風化速度の指標として、過去の多くの実験では試料の重量減少量を用いている (Goudie, 1993 など)。一方、山田ほか (2005) はサイクル

ごとに P 波速度を測定し、その変化を塩類風化速度の指標としている。本研究では、表面強度、すなわち  $L$  値の変化を塩類風化速度の指標として用いる。サイクル毎の反発値変化率  $L_n/L_0$  を、サイクル数  $n$  を用いて以下の (1) 式で近似した。

$$L_n/L_0 = 1 - C \cdot n \quad (1)$$

ここで表面強度低下率  $C$  は  $L$  値の低下率を表す係数で、値が大きいほど風化が速いことを示す。実験条件ごとに求めた  $C$  を第 2 表に示す。ただし、多胡石については、硫酸ナトリウムを用いた実験では、他の試料とは異なり、 $L_n/L_0$  が 10 サイクル目以降に急激に変化している (第 1 図)。したがって、(1) 式では表面強度の変化を表すことができないため、計算から除外した。間隙率  $n$  と表面強度低下率  $C$  の関係を第 5 図に示す。また、山本 (2005) は間隙率が異なる青島石を用いた実験の結果、 $L$  値の変化から算出した塩類風化速度が岩石の間隙率と比例関係にあることを示した。しかし、複数の種類の岩石を用いた本実験では、間隙率が大きい岩石ほど  $C$  が大きくなる傾向はみられるが、あまり明瞭ではない。

Matsukura and Matsuoka (1996) は、塩類風化によって形成したとされるタフォニの成長速度が、岩石物性から計算される Weathering Susceptibility Index ( $WSI$ : 易風化指数) に比例することを示した。同様の目的から、本実験で得られた塩類風化速度についても、 $WSI$  との比較を行う。 $WSI$  は以下の (2) 式で計算される。



第 4 図 重量変化率と反発値変化率 (ただし、白抜きは 5 点測定の実験値を示す。)

第 2 表 表面強度低下率  $C$  と易風化指数  $WSI$

|         | 表面強度低下率 $C$    |                | 易風化指数 $WSI$ |        | 滲入率を考慮した易風化指数 $WSI'$ |        |
|---------|----------------|----------------|-------------|--------|----------------------|--------|
|         | $Na_2SO_4$     | $NaCl$         | $Na_2SO_4$  | $NaCl$ | $Na_2SO_4$           | $NaCl$ |
| 稲田花崗岩   | 0.0033 (0.579) | 0.0004 (0.049) | 0.014       | 0.012  | 0.007                | 0.006  |
| 真壁花崗岩   | 0.0043 (0.791) | 0.0013 (0.002) | 0.004       | 0.003  | 0.003                | 0.003  |
| 大谷凝灰岩   | 0.0764 (0.683) | 0.0698 (0.739) | 2.931       | 2.495  | 2.420                | 1.678  |
| 白河熔結凝灰岩 | 0.0390 (0.950) | 0.0083 (0.010) | 0.283       | 0.241  | 0.236                | 0.180  |
| 青島砂岩    | 0.0881 (0.977) | 0.0103 (0.414) | 0.094       | 0.080  | 0.094                | 0.080  |
| 多胡砂岩    | —              | -0.0048(0.103) | 0.116       | 0.099  | 0.072                | 0.055  |

$$WSI = \frac{P}{St} \quad (2)$$

分母の  $St$  は岩石の引張強度を、分子の  $P$  は岩石内部で発生する結晶圧を示している。したがって、 $WSI$  が大きくなるほど、塩類風化作用が強く作用することを示す。結晶圧  $P$  は以下の (3)、(4) 式から求めることができる。

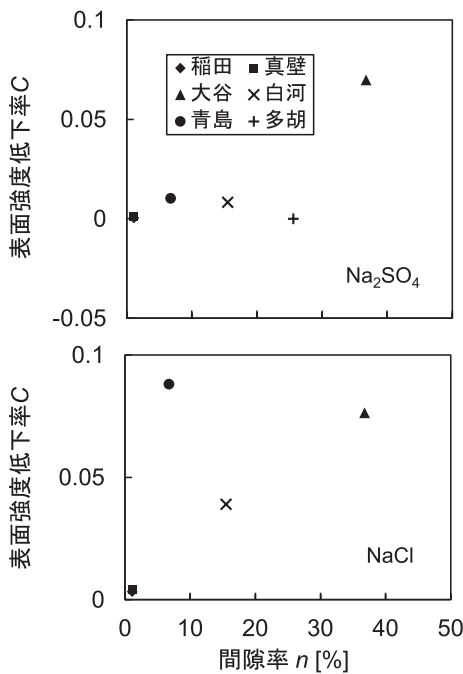
$$P = \sum_{i=1}^4 p_i V_i \gamma_d \quad (3)$$

$$P = \frac{4\sigma}{d} \quad (4)$$

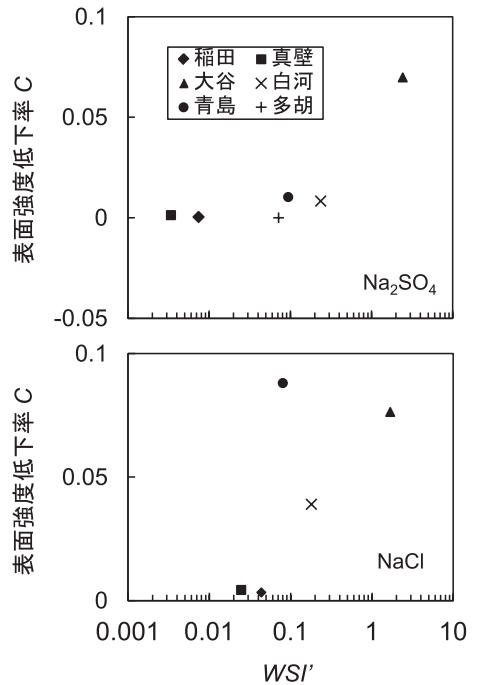
ここで、 $p$  は結晶圧 (MPa)、 $d_1, d_2, d_3, d_4$  は間隙径分布を大間隙 ( $10^{1.5} \mu\text{m}$  から  $10^{0.5} \mu\text{m}$ )、中間隙 ( $10^{0.5} \mu\text{m}$  から  $10^{-0.5} \mu\text{m}$ )、小間隙 ( $10^{-0.5} \mu\text{m}$  から  $10^{-1.5} \mu\text{m}$ )、極小間隙 ( $10^{-1.5} \mu\text{m}$  から  $10^{-2.5} \mu\text{m}$ ) に 4 区分した際の各区分の間隙径の代表値 ( $d_1 = 10 \mu\text{m}$ ,  $d_2 = 1 \mu\text{m}$ ,  $d_3 = 0.1 \mu\text{m}$ ,  $d_4 = 0.01 \mu\text{m}$ ) である。 $V_1, V_2, V_3, V_4$  は岩石の単位体積重量当たりの、各間隙区間に含まれる間隙の総容量 ( $\text{mm}^3/$

$\text{g}$ )、 $\gamma_d$  は岩石のかさ密度 ( $\text{g}/\text{mm}^3$ )、 $\sigma$  は塩溶液の表面張力 ( $\text{N}/\text{mm}$ ) である。表面張力  $\sigma$  は溶液の種類によって異なる。各間隙区間の間隙径総容量  $V_i$ 、引張強度  $St$  は山田ほか (2005) の値 (表 2) を用いた。また、表面張力の値は Navarro and Doehine (1999) の値 (硫酸ナトリウム:  $\sigma = 8.35 \times 10^{-3} \text{N}/\text{mm}$ , 塩化ナトリウム:  $\sigma = 7.66 \times 10^{-3} \text{N}/\text{mm}$ ) を用いた。 $WSI$  は、岩石のすべての間隙に塩溶液が滲入し、乾燥時にはすべての間隙で結晶圧が発生することを想定している。しかし、第 1 表の塩溶液滲入率からもわかるように岩石中のすべての間隙に塩溶液が滲入するわけではない。したがって、実際に滲入した塩溶液が間隙中で結晶圧を発生させることになる。山田ほか (2005) は、以下の (5) 式のように  $WSI$  を変形し、 $WSI'$  として用いている。

$$WSI' = I_R \times \frac{P}{St} \quad (5)$$



第 5 図 試料の間隙率  $n$  と表面強度低下率  $C$



第 6 図 試料の易風化指数  $WSI'$  と表面強度低下率  $C$

ここで、 $I_R$ は塩溶液滲入率である。そこで本実験においても  $WSI'$ を計算し、表面強度低下率  $C$ の関係を第6図に示した。 $WSI'$ が0.1程度よりも大きくなると  $C$ の値が急激に大きくなっており、塩類風化による破壊には閾値が存在する可能性が示唆される。

## V まとめ

本研究では、岩石物性が異なる7種類の岩石を用いて、塩類風化実験を行い、エコーチップ硬さ試験機によって測定した岩石表面の強度変化と岩石物性の関係について検討した。結果は以下のとおりである：

- (1) 過去の研究においては塩類風化による変化が認められなかった花崗岩において、岩石表面の強度が低下している可能性が示唆された。
- (2) 新鮮時の測定値に対して、エコーチップ反発値が一定の割合を下回ると、岩石試料の重量が減少する。この関係は、重量の減少が起きた大谷凝灰岩、白河熔結凝灰岩、青島砂岩、多胡砂岩に共通してみられた。岩石の種類によらず閾となる割合が一定であることから、塩類風化による岩石表面の構造変化は岩石の種類に依らないことを示唆される。本実験の結果からは、用いた塩溶液により閾となる値が異なるようにもみえるが、これについてはさらに検討が必要であろう。
- (3) エコーチップ反発値  $L$ を指標とした塩類風化速度  $C$ は、易風化指数  $WSI$ が大きい岩石ほど、大きな値を示した。この結果は、小さい間隙を多くもち、引張強度が小さい岩石ほど塩類風化を受けやすいという従来の見解を支持するものである。

今後、塩類風化により試料が破壊される際、岩石の表面状態はどのような状態であるのか、具体

的に確かめることが必要であろう。

## 謝辞

本研究を進めるにあたり、大東文化大学経営学部の青木久准教授からは、多くの貴重な意見を賜りました。ここに記して御礼申し上げます。

## 参考文献

- 青木 久・松倉公憲 (2004): エコーチップ硬さ試験機の紹介とその反発値と一軸圧縮強度との関係に関する一考察, 地形, **25**, 267-276.
- 川崎 了・谷本親伯・小泉和広・石川正基 (2000): 簡易反発硬度試験による岩質材料の物性評価手法の開発－試験条件の影響と基本特性に関する調査－, 応用地質, **41**, 244-248.
- 高橋健一・松倉公憲・鈴木隆介 (1993): 海水飛沫帯における砂岩の侵蝕速度－日南海岸・青島の弥生橋橋脚の侵蝕形状－, 地形, **14**, 143-164.
- 山田 剛・松倉公憲 (2001): 凝灰岩の柱状試料を用いた塩類風化に関する予察の実験, 筑波大学陸域環境センター報告, **2**, 19-23.
- 山田 剛・青木 久・高橋 学・松倉公憲 (2005): 塩類風化速度に与える岩石物性の影響に関する一実験, 応用地質, **46**, 72-78.
- 山本まりえ・青木 久・松倉公憲 (2005): 青島砂岩の塩類風化速度に与える間隙率の影響に関する一実験, 筑波大学陸域環境センター報告, **6**, 23-31.
- Aoki, H. and Matsukura, Y. (2007): A new technique for non-destructive field measurement of rock-surface strength: an application of the Equotip hardness tester to weathering studies. *Earth Surface Process and Landforms*, **32**, 1759-1769.



- Bradley, W. C., Hutton, J. T. and Twidale, C. R. (1978): Role of salts in development of granitic tafoni, South Australia. *Journal of Geology*, **86**, 647-654.
- Bryan, W. B. and Stephens, R. S. (1993): Coastal bench formation at Hanauma Bay, Oahu, Hawaii. *Geological Society of America Bulletin*, **105**, 377-386.
- Chapman, R. W. (1980): Salt weathering by sodium chloride in the Saudi Arabian desert. *American Journal of Science*, **280**, 116-129.
- Clarke, J. D. A. (1974): *Geomorphology of the Kambalda region, Western Australia. Australian Journal of Earth Science*, **41**, 229-239.
- Goudie, A. S. (1974): Further experimental investigation of rock weathering by salt and other mechanical process. *Zeitschrift für Geomorphologie, Supplementband*, **21**, 1-12.
- Goudie, A. S. (1986): Laboratory simulation of 'The wick effect' in salt weathering of rock. *Earth Surface Process and Landforms*, **11**, 275-285.
- Goudie, A. S. (1993): Salt weathering simulation using a single-immersion technique. *Earth Surface Process and Landforms*, **18**, 369-376.
- Goudie, A. S. and Day, M. J. (1980): disintegration of fan sediments in Death Valley, California, by salt weathering. *Physical Geography*, **1**, 126-137.
- Goudie, A. S. and Viles, H. A. (1997): *Salt Weathering Hazards*. John Wiley & Sons, 241p.
- Goudie, A. S. and Viles, H. A. (2007): Rapid salt weathering in Coastal Namib desert: Implications for landscape development. *Geomorphology*, **85**, 49-62.
- Gouri, K. L., Chowdhury, A. N., Kulshreshta, N. P. and Punuru, A. R. (1990): Geologic features and durability of limestones at the Sphinx. *Environmental Geology*, **16**, 57-62.
- Kamh, G. M. E. (2005): The impact of landslides and salt weathering on Roman structures at high latitudes—Conway Castle, Great Britain: a case study. *Environmental Geology*, **48**, 238-254.
- Matsukura, Y. and Kanai, H. (1988): Salt fretting in the valley cliff of the Asama volcano region, Japan. *Earth Surface Process and Landforms*, **13**, 85-90.
- Matsukura, Y. and Matsuoka, N. (1991): Rates of tafoni weathering on uplifted shore platforms in Nojima-zaki, Boso peninsula, Japan. *Earth Surface Process and Landforms*, **16**, 51-56.
- Matsukura, Y. and Matsuoka, N. (1996): The effect of rock properties on rates of tafoni growth in coastal environments. *Zeitschrift für Geomorphologie, Supplementband*, **106**, 57-72.
- Mottershead, D. N. (1989): Rates and patterns of bedrock denudation by coastal salt spray weathering: a seven-year record. *Earth Surface Process and Landforms*, **14**, 383-398.
- Navarro, C. R. and Doehne, E. (1999): Salt weathering: Influence of evaporation rate, supersaturation and crystallization pattern. *Earth Surface Process and Landforms*, **24**, 191-209.
- Robinson, D. A. and Williams R. B. G. (2000): Experimental weathering of sandstone by combinations of salts. *Earth Surface Process and Landforms*, **25**, 1309-1315.
- (2011年8月3日受付, 2011年10月27日受理)

