塩類風化に関する一実験 一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***

I 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、Na₂SO₄、Na₂CO₃、MgSO₄は塩類風化に 対する影響力が大きく、NaCl、CaSO₄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、NaCl、CaSO₄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 Na₂SO₄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(Na₂SO₄, 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.

|| 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5 cm 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	ふと家庄	直比重	打正改座	初期エコー	塩溶液	塩溶液	間隙径分布				
	n [%]	$[g/cm^3]$	具比里 γ_t [g/cm ³]	S_t (MPa)	チップ 反発値 <i>L</i> ₀	滲入率 (Na ₂ SO ₄)	滲入率 (NaCl)	$V_{total} \ (mm^3/g)$	$V_l \ (\mathrm{mm}^3/\mathrm{g})$	$\begin{array}{c} V_2 \\ (\mathrm{mm^3/g}) \end{array}$	$\begin{array}{c} V_{\scriptscriptstyle 3} \\ (\mathrm{mm^3/g}) \end{array}$	$\frac{V_4}{(\mathrm{mm^3/g})}$
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 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 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2mm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種であり, 球状のテストチップ(D型では直径3mm)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 できなかったため、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L₂/L₀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 重量とエコー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 も、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、試料への塩溶液滲入率を比較 すると、どの岩石でも硫酸ナトリウムの方が滲入 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/W₀と反発値変化率 L_n/L₀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/W₀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*/ L₀が0.5~0.6以下,塩化ナトリウムでは0.8以 下)領域では W₂/W₀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 いようにみえる、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/L₀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



第4図 重量変化率と反発値変化率(ただし, 白抜きは5点測定の平均値を示す.)

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/L₀ を、 サイクル数nを用いて以下の(1)式で近似した。

$$L_n/L_0 = I - C \cdot n \tag{1}$$

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/L₀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2表 表面強度低下率 C と易風化指数 WSI

	表面強度	度低下率	易風亻	匕指数	滲入率を考慮した易風化指数		
		C	W	SI	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	

$$WSI = \frac{P}{St}$$
(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.

$$P = \sum_{i=1}^{4} p_i V_i \gamma_d \tag{3}$$

$$P = \frac{4\sigma}{d} \tag{4}$$

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 ($10^{15} \mu m$ から $10^{05} \mu m$)、中間隙 ($10^{0.5} \mu m$ から $10^{-0.5} \mu m$)、小間隙 ($10^{-0.5} \mu m$ から $10^{-1.5} \mu m$)、極小間隙 ($10^{-1.5} \mu m$ から $10^{-2.5} \mu m$) に 4 区分した際の各区分の間隙径の代表値 (d_1 = $10 \mu m$, $d_2 = 1 \mu m$, $d_3 = 0.1 \mu m$, $d_4 = 0.01 \mu m$) 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 (mm^3 /



第5図 試料の間隙率 n と表面強度低下率 C

g), γ_d は岩石のかさ密度 (g/mm³), σ は塩溶液 の表面張力(N/mm)である.表面張力 σ 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. 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: σ = 8.35×10^{-3} N/mm. 塩化ナトリウム: σ = 7.66 × 10⁻³ N/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。

$$WSI' = I_R \times \frac{P}{St} \tag{5}$$



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回に示した.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的実験,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 regon, 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)