

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

The Effect of Porosity of Aoshima Sandstone
on Rates of Salt Weathering: A Laboratory Experiment

山本 まりえ*・青木 久**・松倉 公憲***

Marie YAMAMOTO*, Hisashi AOKI** and Yukinori MATSUKURA***

1 はじめに

ここ 20 ~ 30 年の間に、フィールド調査と室内実験の両面から塩類風化に関する研究が積み重ねられてきた。塩類風化の主要なメカニズムとして、(1) 塩を含む溶液から塩結晶が成長するときに発生する結晶圧、(2) 塩結晶の水和作用によって発生する圧力、(3) 塩結晶の熱による膨張圧、の 3 つが考えられている。しかし、これらの詳しいメカニズムについてはまだ不明な点が多い。

塩類風化の基本的なメカニズムや風化速度を明らかにすることを目的として多くの室内実験が行われてきた。Goudie (1974) は、塩類風化には上記 (1) の塩の結晶圧が最も効果的であることを示した。さらに、Goudie (1986) による塩類風化実験では、塩類風化に効果的な塩は Na_2CO_3 、 MgSO_4 、 Na_2SO_4 であること、 NaCl 、 CaSO_4 、 NaNO_3 は効果が小さいことが示された。また、Gauri *et al.* (1990) は、岩石の風化の程度と間隙径分布から、塩類風化に対する岩石の

抵抗性を表す指標を考案した。Matsukura and Matsuoka (1996) は、塩類風化のしやすさを表す指標 WSI を考案し、小さな間隙を多くもち、引張強度が小さい種類の岩石ほど塩類風化しやすいことを述べている。

一般に、風化速度が大きい岩石は、間隙率が高く、力学的強度が低いことが知られている。しかし、同一種の岩石において、間隙率などの物理的性質が、風化速度に与える影響に関する研究は少ない。

同じ種類の岩石における風化速度の違いを論じた研究の一例として、日南海岸・青島の弥生橋橋脚の砂岩（新第三系宮崎層群青島互層の砂岩）塊に発達するタフォニ状のくぼみを対象とした青木・松倉 (2005) の研究がある。このくぼみの形成には、塩類風化作用が大きく影響していることが既に明らかにされている（高橋ほか, 1993）。青木・松倉 (2005) は、ほぼ同じ環境下にあり、同程度の塩類風化作用を受けたとみなせる砂岩塊であっても、砂岩塊ごとにくぼみの深さが異

* 筑波大学自然学類（現：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大学院生（現：琉球大学 COE 研究員）

*** 筑波大学大学院生命環境科学研究科

なり、その違いには岩石強度の個体差が関与していることを示した。このように、異なる地形形成速度がもたらされる原因を明らかにする手段として、室内実験における実験経過の観察や測定は有効であろう。

そこで本研究では、岩石の物理的性質の一つである間隙率が、塩類風化速度に及ぼす影響を明らかにすることを目的として、間隙率が異なる青島砂岩と、2種類の塩溶液 (Na_2SO_4 , NaCl) を用いた風化実験を行った。

II 実験

1. 実験に使用した岩石と塩溶液

宮崎県の日南海岸北端に位置する青島で採取された、間隙率の異なる3種類の青島砂岩（岩石試料の大きさは $5\text{ cm} \times 5\text{ cm} \times 6\text{ cm}$ ）を用いて実験を行った。9個の岩石試料の間隙率、実験開始前の重量およびエコーチップ硬度 (L 値) を第1表に示す。岩石を識別するため、間隙率 n の大きい方から A1 ($n = 15.8 \sim 16.0\%$, $\bar{n}=15.9\%$), A2 ($n = 12.0 \sim 13.1\%$, $\bar{n}=12.5\%$), A3 ($n = 8.1 \sim 8.9\%$, $\bar{n}=8.4\%$) と略称する。岩石試料それぞれの重量の範囲は $349.5 \sim 389.0\text{ g}$ である。その差はわずかではあるが、間隙率が大きい岩石試料ほど軽くなる。 L 値は、エコーチップ硬さ試験機を用いて計測される岩石表面の強度の値であ

第1表 実験に用いた供試体の間隙率、初期重量、および初期エコーチップ硬度 (L 値)

		間隙率 (%)	重量 (g)	L 値
		n	W_0	L_0
Na_2SO_4	A1	15.8	349.5	527
	A2	13.1	365.8	538
	A3	8.9	389.0	638
NaCl	A1	15.8	356.7	544
	A2	12.0	361.3	550
	A3	8.1	377.3	590
蒸留水	A1	16.0	350.8	518
	A2	12.5	355.0	521
	A3	8.1	380.0	575

る。この試験機は金属材料の非破壊検査のために開発されたが、最近では岩石や岩盤の硬度測定にも使われるようになった（例えば、青木・松倉, 2004）。エコーチップはシュミットハンマーと比較して、測定時の打撃エネルギーは $1/200$ （青木・松倉, 2004）と小さく、風化して強度の低くなった岩石試料でも破壊せずに計測できる。風化作用を受けて岩石強度が低下し、侵食作用を受けやすくなり、地形の変化がもたらされると予想されるので、塩類風化実験において岩石強度を計測することは十分に意味がある。

岩石試料が硬いほど L 値が大きくなる。本実験では単打法により、打撃点が重ならないように10点の計測を行い、それらの平均値を L 値として算出した。ただし、実験の進行に伴い、岩石試料の風化による破壊が進み、計測面の面積が小さくなった場合は、5点のみの打撃を行い、それらの平均値を用いた。第1表に示すように、間隙率が大きいほど L 値（表面強度）が小さくなる傾向がある。また、A1 (518 ~ 544) と A2 (521 ~ 550) との L 値の差よりも、A2 と A3 (575 ~ 638) L 値の差の方が大きかった。

実験に用いた塩溶液は、破壊力の強い塩である硫酸ナトリウムと、破壊力の弱い塩化ナトリウム (Goudie and Viles, 1997) である。特に、海岸における塩類風化には塩化ナトリウムが大きく影響していると考えられる。塩溶液を用いた実験では、塩類風化と乾湿風化が同時に起こる可能性がある。乾湿風化の影響の有無を確認するために、塩溶液を用いた実験のほかに、蒸留水での実験を併行して行った。

2. 実験方法

塩類風化の室内実験においては、従来二つの方法がとられてきた。一つは、角柱状の岩石試料の下部を塩溶液に浸したままで試料上部を乾燥させる、という方法である（例えば、Rodriguez-Navarro and Doehne, 1999; 木村・松

倉, 2003). この方法では, 岩石試料に浸透する塩溶液の量が塩溶液液面からの高さによって異なるため, 岩石試料上下で風化速度に差が生じる可能性がある. また, 実験途中で析出した塩結晶を岩石試料から取り除く操作を行わないため, 重量や L 値の計測において, 塩の影響が含まれた値になる. もう一つの実験方法は, 立方体状の岩石試料を塩溶液に完全に浸した後に, それを溶液から引き上げ, 乾燥させるというものである (例えば, Goudie, 1999; 山田ほか, 2005). この実験では, 先に述べた実験方法における問題点は解消され, 風化による岩石試料の物性変化過程を容易に捉えることができる. そこで本研究では, 実験経過にともなう岩石の風化速度を得るために, 後者の方法を採用することにした.

本実験では, はじめに炉で十分に乾燥させた岩石試料の初期重量 W_0 , 初期エコーチップ反発値 L_0 , 間隙率を測定し, その後以下の (1) ~ (5) の作業を繰り返し行った.

- (1) 岩石試料を 2 mm メッシュのふるいの上に載せ, 室温 (約 25 °C) で 8 時間溶液に浸した.
 - (2) 溶液からふるいごと岩石試料を取り出し, 110 °C で 16 時間炉乾燥させた.
 - (3) 手順 (2) の乾燥過程で岩石表面および岩石中に析出・結晶化した塩を取り除くため, 岩石試料を蒸留水中に室温で 8 時間浸した.
 - (4) 再び岩石試料を 110 °C で 16 時間炉乾燥させた.
 - (5) 風化の指標として, 塩類風化により変化する重量 W , エコーチップ反発値 L を計測した. 重量については, ふるいの上に残った岩石試料の重量を測定した. すなわち, ふるいのメッシュからぬけ落ちたものを風化による欠損とみなした.
- (1) ~ (5) の一連の過程を 1 サイクルとして, 実験の進行をサイクル数で表すことにする. 岩石

試料の風化の進行状況に応じ, 7 サイクルから 21 サイクルの実験を行った.

III 実験結果

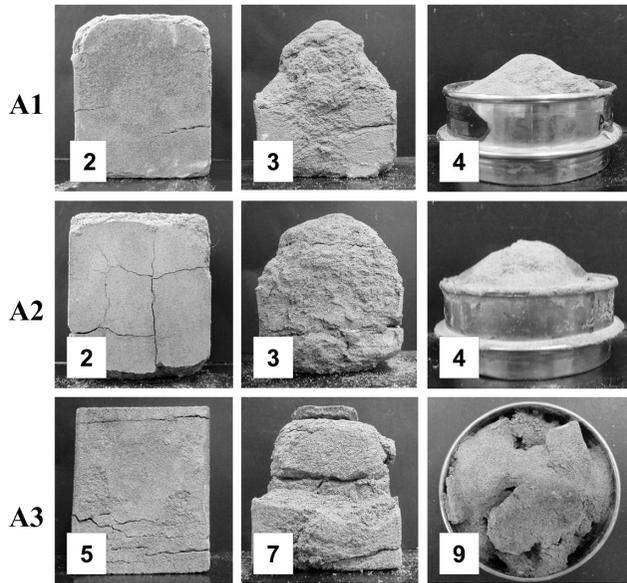
実験サイクルの進行に伴う岩石試料の破壊の様子を第 1 図 (硫酸ナトリウム), 第 2 図 (塩化ナトリウム), 第 3 図 (蒸留水) に示した. また, 岩石試料の重量変化および L 値の変化を第 4 図に示した. ただし, W_0 , L_0 は 0 サイクルの値を意味する. 以下では溶液ごとに, 岩石試料の破壊の様子, 重量変化, L 値の変化の順にまとめて記載する.

1. 硫酸ナトリウムを用いた実験

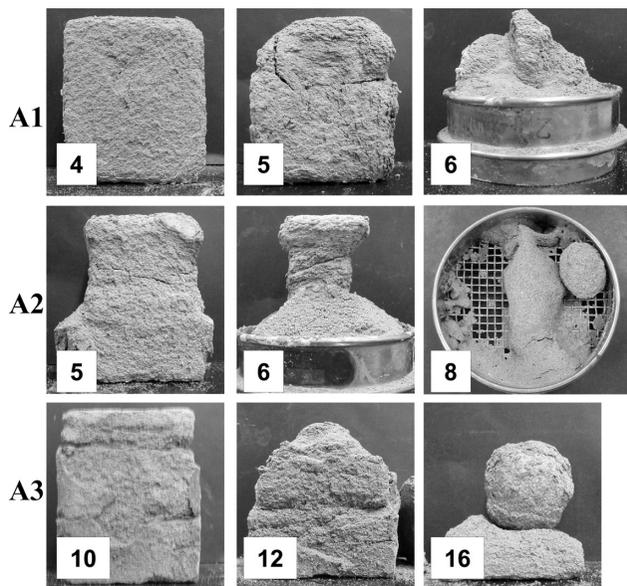
A1 では 2 サイクル目で岩石試料の角が少し取れ, 大きい亀裂が入った. 3 サイクル目に岩石試料上部が崩れ, 4 サイクル目には原形をとどめないほどに崩れた. A2 も A1 と同じような変化をたどった. A3 には 3 サイクル目に亀裂が入り始め, 6 サイクル目には大きく破損した. 7 サイクル目には岩石試料上部が崩れ, 9 サイクル目には原形をとどめないほどに崩れた.

間隙率の大きい A1 の重量は 3 サイクル目から顕著に減少した. 3 ~ 5 サイクル目では 1 サイクルごとにおよそ 100 g ずつ減少し, 5 サイクル目でふるい上に岩石試料はほとんどなくなった. A2 も A1 と同じような重量変化をした. しかし, 5 サイクル目で残った岩石試料の重量は A1 よりも若干多かった. 間隙率の小さい A3 の重量は 7 ~ 10 サイクル目まで, 1 サイクルあたり 100 g 前後の割合で減少し, 11 サイクル目でほとんど岩石試料がなくなった.

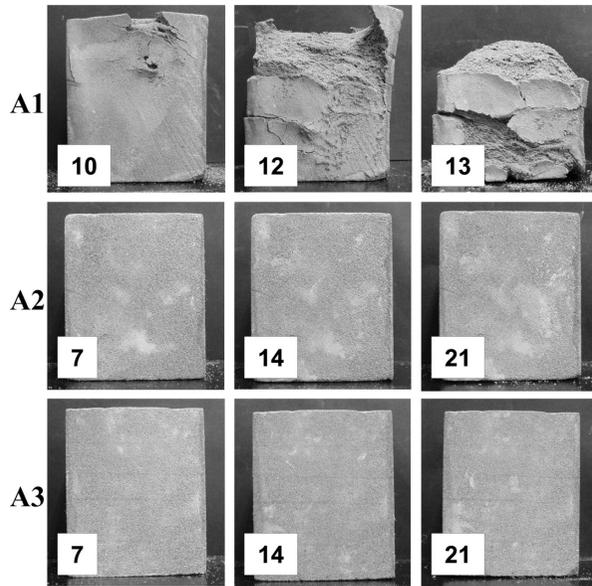
A1 と A2 の L 値は 1 サイクル目から急激に低下した. A1, A2 の 3 サイクル目以降は, 岩石試料が崩れてしまったために L 値の測定はできなかった. 間隙率が小さい A3 では, L 値は 4 サイクル目までは徐々に低下し, 5 サイクル目から 7 サイクル目まで急激に低下した. 6 サイクル目の



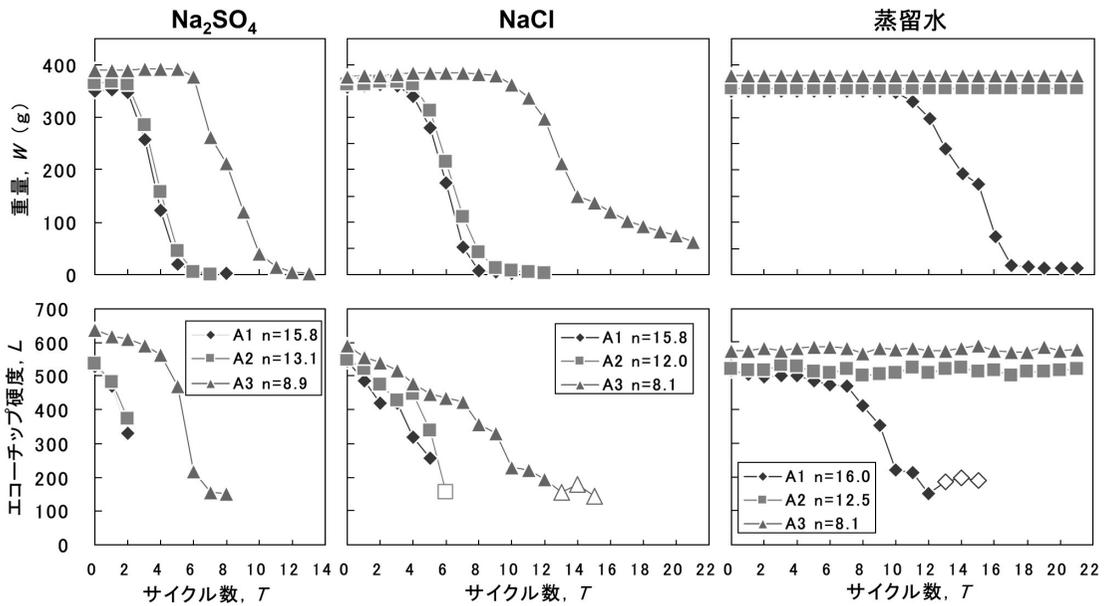
第1図 飽和硫酸ナトリウム溶液を用いた実験における
青島砂岩の風化過程
(写真の中の数字はサイクル数を示す)



第2図 飽和塩化ナトリウムを用いた実験における
青島砂岩の風化過程
(写真の中の数字はサイクル数を示す)



第3図 蒸留水を用いた実験における
青島砂岩の乾湿風化過程
(写真の中の数字はサイクル数を示す)



第4図 岩石試料の重量 W およびエコーチップ硬度 L とサイクル数 T との関係
(ただし、白抜きのプロットは5回測定の実験値を示す)

L 値の低下量が最も大きかった。8サイクル目で
は L 値はあまり変化しなかった、9サイクル目以

降は、岩石試料が崩れてしまったため L 値は測
定できなかった。

2. 塩化ナトリウムを用いた実験

塩化ナトリウムを用いた実験では試料に亀裂がそれほど入らず、岩石試料表面から細粒物が剥がれるように風化した。A1では2サイクル目から表面が剥がれ始めた。5サイクル目には岩石試料の角が取れるように大きく破損し、6サイクル目には崩れた。A2では3サイクル目から表面が剥がれ始め、5サイクル目には元の岩石試料の形を失い始めた。8サイクル目には、岩石試料中心部が球状に残り、その他の部分は細かく崩れた。この球状に残った岩石試料は、サイクルを重ねるにつれて小さくなっていった。A3では6サイクル目になって表面が剥がれ始め、岩石試料上部にわずかに亀裂が入り始めた。12サイクル目には亀裂から割れ、岩石試料上部が板状になって分離した。14サイクル目には、岩石試料は元の岩石試料中心部が球状、元の岩石試料の底面が板状になって、ふるいの上に残った。サイクルを重ねるにつれて、残った岩石試料は表面から風化して小さくなっていった。

A1とA2の重量は、3～4サイクル目までほぼ一定だったが、4～8サイクル目で急激に減少し、8～9サイクル目で重量はほとんど0となった。A3の重量は、9サイクル目までほとんど変化しなかったが、10サイクル目から目立って減少し始めた。特に13サイクル目では約90gという最大の減少量を示した。15サイクル目からの減少量は15g前後ずつとほぼ一定だった。

A1のL値は5サイクル目まで、60前後ずつ値が低下した。岩石試料が破壊されたため6サイクル目以降L値を計測できなくなった。A2のL値は、3サイクル目まで30～50ずつ低下したが、4サイクル目でわずかに上昇し、5サイクル目から再び低下した。ただし、6サイクル目は5点しかエコーチップ反発値を測定できなかった。岩石試料が破壊したため7サイクル目からL値を計測できなかった。A3のL値は15サイクル目まで、約10～40ずつ減少する傾向を示した。ただ

し、8、10サイクル目では、L値が急激に低下し、14サイクル目にはL値がわずかに上昇した。13～15サイクル目のL値は5点の測定結果から求めた。

3. 蒸留水を用いた実験

A1は8サイクル目で岩石試料上部にわずかに亀裂が入り、10サイクル目には岩石試料内部が膨張するように破壊された。13サイクル目には岩石試料上部がなくなり、岩石試料内部のもろい部分から細粒化して崩れていった。A2とA3は21サイクル目までほとんど変化しなかった。

A1の重量は11サイクル目から1サイクルあたり約50gずつ減少した。17サイクル目には、ふるいのメッシュの上にはほとんど岩石試料が残らなかった。A2とA3は実験中ほぼ一定の重量であった。

A1のL値は、4サイクル目まで大きく変化しなかったが、5サイクル目から低下し始め、8サイクル目から急激に低下した。11サイクル目以降のL値はほぼ一定となった。ただし、13～15サイクル目のL値は5点の打撃から求めた。また、16サイクル目以降のL値は岩石が壊れてしまったため測定できなかった。A2とA3のL値は、多少ばらつきがあるが実験開始前の値からほとんど変わらず、実験中ほぼ一定であった。

IV 考察

蒸留水を使った実験では、大きい間隙率を持つA1だけが乾湿風化により崩壊した。しかし、顕著な乾湿風化を受けたA1であっても、A1が壊れ始めたサイクル数は、硫酸ナトリウムや塩化ナトリウムによる塩類風化によってA1が十分に破壊され終えたサイクル数よりも大きかった。また、乾湿風化の顕著だったA1と、乾湿風化の影響が見られなかったA2で、飽和塩溶液を用いた実験時の重量・L値の変化に大きな差はなかつ

た。このため、飽和塩溶液を使用した本実験における乾湿風化の影響は十分無視できるものと考えられる。これをふまえ、以下に、硫酸ナトリウムおよび塩化ナトリウムによる実験結果について考察を行う。

まず、重量と表面強度の時間変化を比較すると、岩石試料の重量 W は実験開始後の数サイクルでは変化しないのに対し、表面強度 L は 1 サイクル目から低下している (第 4 図)。このことから、岩石試料の重量変化は、表面強度 L が低下した後に起こることがわかる。次に、重量変化がおきる条件について検討する。重量 (W) と表面強度 (L 値) をそれぞれの初期値で規格化したものを、ここではそれぞれ重量変化率 W/W_0 、表面強度変化率 L/L_0 と定義し、両者の関係を調べた (第 5 図)。その結果、実験開始後

何サイクルかのデータは L/L_0 値の減少に関わらず、 $W/W_0 \approx 1$ にプロットされた。それに対し、サイクルが進み L/L_0 値が 0.5 ~ 0.6 (図中のメッシュ部分) より小さくなると、 L/L_0 値の減少に伴い W/W_0 値も減少する傾向が見られた。この傾向は塩溶液の種類や間隙率に依存しない。したがって、本研究においては、表面強度が新鮮な岩石の 50 ~ 60 % の強度まで低下したときに、重量変化が起きたことがわかる。

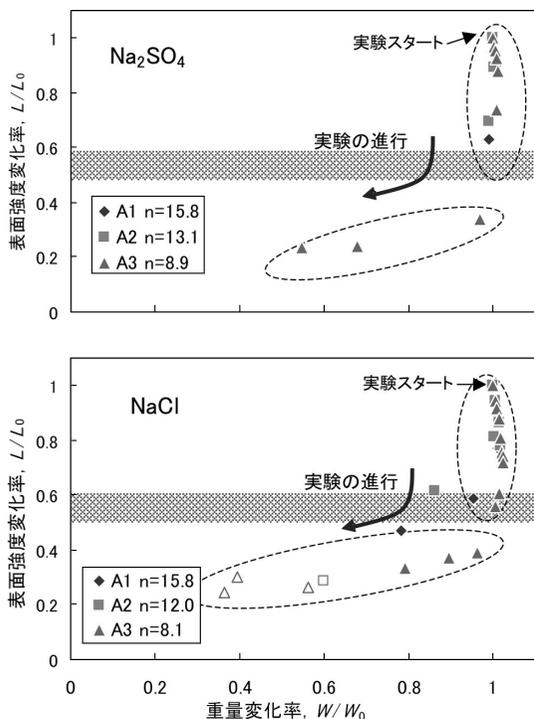
従来の実験では、塩類風化の進行を重量減少によってとらえたケースが多かった。また、山田ほか (2005) では、P 波速度の減少を風化の進行を示す指標として塩類風化速度の実験式を導いた。しかし、本論では表面強度変化率 L/L_0 を塩類風化指数として用いる。これまで述べてきたように、 L 値の変化は重量変化に先行して起こる。また、 L 値の変化は亀裂や剥離など試料表面の変化よりも早く始まる。このことから、表面強度変化率 L/L_0 は風化に対してきわめて鋭敏に反応し、塩類風化の進行を表す指標として適当であると考えられる。

表面強度変化率 L/L_0 は、サイクル数 T が増加するにつれて減少するが、その減少の傾向は塩溶液の種類によって異なる。硫酸ナトリウム溶液を用いた実験では、 L/L_0 の減少の傾向は、上に凸の曲線を描く一方、塩化ナトリウム溶液を用いた実験では、 L/L_0 は直線的に減少する傾向を示す。また、どちらの溶液においても、 L 値の減少程度は間隙率ごとに異なる。

そこで、それぞれの塩、間隙率について、表面強度変化率 L/L_0 とサイクル数 T の関係を表す近似式を求めることにする。硫酸ナトリウムの場合には、以下のような上に凸の放物線を示す 2 次式で近似させた。

$$L/L_0 = -aT^2 + 1 \quad (1)$$

ここで係数 a は、 L/L_0 の T に対する変化率 (こ



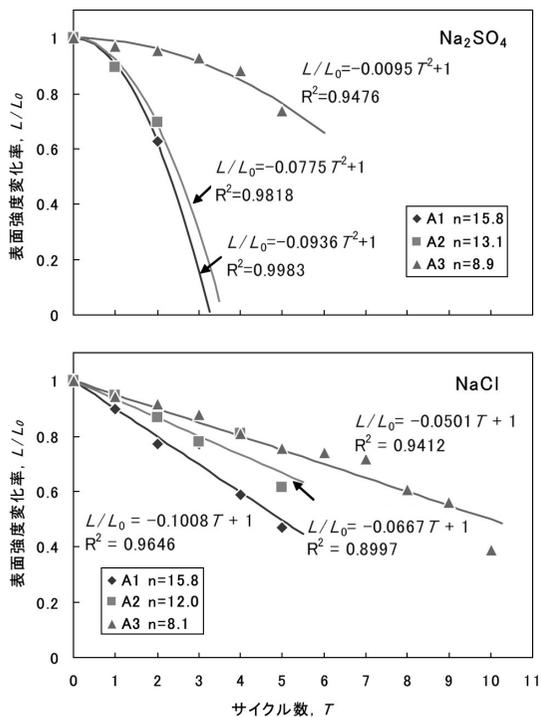
第 5 図 岩石試料の表面強度変化率 L/L_0 と重量変化率 W/W_0 との関係 (ただし、白抜きのプロットは 5 回測定 の平均値を示す)

ここでは強度低下速度と呼ぶことにする)であり、その値は間隙率に依存する。係数 a の値は A1 では 0.0936, A2 では 0.0775, A3 では 0.00952 と求まった。ただし、A3 の場合では 5 サイクル目までの値で近似した。なぜなら、6 サイクル目、A3 には A1, A2 と比較して特に顕著な亀裂が入っており、測定値に亀裂が影響している恐れがあるためである。

塩化ナトリウムの場合には、以下のような直線を示す一次式で近似させた。

$$L/L_0 = -bT + 1 \quad (2)$$

ここで b は、強度低下速度を示す係数であり、間隙率によって変化する。係数 b の値は A1 では 0.1008, A2 では 0.0667, A3 では 0.0501 と求まった。A3 では 11 サイクル目に岩石試料上部が崩れ



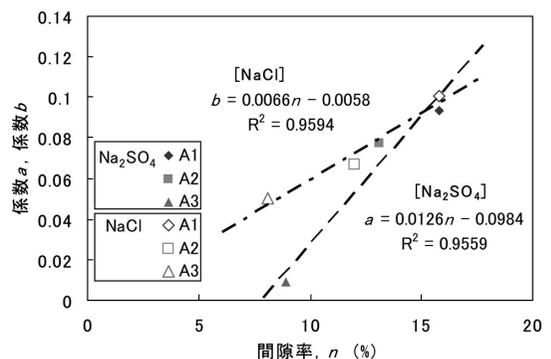
第 6 図 岩石試料の表面強度変化率 L/L_0 とサイクル数 T との関係

ため、測定値に測定面の形状が影響している可能性がある。このため、A3 の場合は 11 サイクル以降の値を除外して近似した。

強度低下速度を示す係数 a および b を縦軸、間隙率 n を横軸にとってプロットした結果、間隙率 n が大きくなるにしたがって、 a および b が大きくなる傾向があることがわかった (第 7 図)。すなわち、塩溶液の種類によらず、間隙率が大きい岩石試料ほど、強度低下速度が大きい。前述したように、青島砂岩は、間隙率が大きいものほど強度が小さいという傾向を持つ。これらは、青島砂岩においては、間隙率が大きく強度が小さいほど、塩類風化による強度低下速度が大きいことを示す。青木・松倉 (2005) は、橋脚を構成する海水飛沫帯に位置する青島砂岩の中で、岩石強度が小さいものほどくぼみ量が多いことを報告している。本実験の結果はこれと調和的であり、くぼみ量の差異が間隙率の差に起因する塩類風化速度の違いによることを示唆する。

V 結論

本研究では、同一種の岩石における間隙率の差異が塩類風化速度に及ぼす影響を明らかにするために、青島砂岩を用いて室内実験を行った。塩類風化の進行を示す指標として重量とエコーチップ反発値を採用し、両者の変化を計測した。結論



第 7 図 係数 a および b と間隙率 n との関係

は以下の3点である：(1) 青島砂岩では、用いた塩溶液に関わらず、間隙率が大きいほど塩類風化速度が大きい。(2) 塩類風化作用によって重量が減少し始めるのは、表面強度の値が実験開始前の50～60%程度まで低下したときである。(3) 塩類風化による表面強度の変化は、使用する塩溶液によって異なる傾向を示す。

謝辞

本研究を行うに際し、学術振興会・科学研究費・基盤研究B(課題番号16300292 研究代表者・松倉公憲)を使用した。

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。
- 青木 久・松倉公憲 (2005)：海水飛沫帯における橋脚砂岩塊のくぼみ深さに関する定量的把握：日南海岸・青島弥生橋の事例。地形，**26**，175-196。
- 木村知子・松倉公憲 (2003)：塩化ナトリウムによる大谷石の塩類風化実験。筑波大学陸域環境研究センター報告，**4**，149-155。
- 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・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。

- Gauri, K. L., Chowdhury, A. N., Kulshreshta, N. P. and Punuru, A. R. (1990) : Geologic features and durability of limestones at the Sphinx. *Environmental Geology and Water Science*, **16**, 57-62.
- Goudie, A. S. (1974): Further experimental investigation of rock weathering by salt and other mechanical processes. *Zeitschrift für Geomorphologie, Supplementband*, **21**, 1-12.
- Goudie, A. S. (1986): Laboratory simulation of 'the wick effect' in salt weathering of rock. *Earth Surface Processes and Landforms*, **11**, 275-285.
- Goudie, A. S. (1999): Experimental salt weathering of limestones in relation to rock properties. *Earth Surface Processes and Landforms*, **24**, 715-724.
- Goudie, A. S. and Viles, H. A. (1997): *Salt Weathering Hazards*. John Wiley and Sons, Chichester, 241p.
- Matsukura, Y. and Matsuoka, N. (1996): The effect of rock properties on rate of tafoni growth in coastal environments. *Zeitschrift für Geomorphologie N.F., Supplementband*, **106**, 57-72.
- Rodriguez-Navarro, C. and Doehne, E. (1999): Salt weathering: Influence of evaporation rate, supersaturation and crystallization pattern. *Earth Surface Processes and Landforms*, **24**, 191-209.
- (2005年5月31日受付, 2005年8月8日受理)