

塩類風化に与える岩石物性の影響： 特に間隙径分布について

The effect of pore size distribution of rocks on salt weathering susceptibility:
a preliminary experiment

山田 剛*・高橋 学**・松倉公憲***

Takeshi YAMADA*, Manabu TAKAHASHI** and Yukinori MATSUKURA***

1. はじめに

ここ最近20~30年の間に、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。それらの成果はGoudie & Viles (1997)などにまとめられているが、たとえばalveolesやhoneycombs (Mustoe, 1982), tafoniやcavernous weathering (Bradley *et al.*, 1978), pedestal rocks (Chapman, 1980) など多くの地形の形成に塩類風化は重要な役割を果たしている。また特に乾燥地域 (Goudie & Day, 1980)、海岸周辺地域 (Mottershead, 1989)や南極大陸 (Prebble, 1967)では、岩屑の生産にも貢献している。最近では、地形変化のみならず、建築物や石造文化財などの塩類風化による劣化が社会問題となってきた (例えばWinkler, 1994)。

塩類風化のメカニズムに対する理解は徐々に進んでいるものの、不明な点も多い。そこで筆者らは塩類風化の基本的なメカニズムを明らかにする目的で室内実験を行ってきた (山田・松倉, 2000; 2001)。とくに前報 (山田・松倉, 2001) では3種の塩溶液をそれぞれ凝灰岩の

柱状試料に供給し乾燥させるという実験を行った。その結果、破壊の様子から判断される塩類風化の程度は Na_2SO_4 の溶液に浸したものが最も大きく、 MgSO_4 、 CaSO_4 の順に小さくなった。すなわち、 Na_2SO_4 の破壊力が最も大きく、 MgSO_4 、 CaSO_4 の順に破壊力が小さくなっているという従来の指摘が確かめられた。そして、このような塩類風化速度の差異は、それぞれの塩の結晶圧の差異と、塩の供給量に依存しているのではないかという解釈をした。

塩類風化速度に影響を与える要因は大きく二つに分けられる。一つは前報 (山田・松倉, 2001) で議論されたような、破壊を引き起こす側の要因 (塩の破壊力等) であり、もう一つは塩類風化に抵抗する要因 (岩石物性等) である。そこで本研究では、岩石物性の異なる3種類の岩石と4種類の塩を用いて、塩類風化に対する岩石の抵抗性、すなわち塩類風化のうけやすさに影響する岩石物性を明らかにすることを主目的として予察的な室内実験を行った。

* 筑波大学大学院生命環境科学研究科

** 産業技術総合研究所深部地質環境研究センター

*** 筑波大学地球科学系

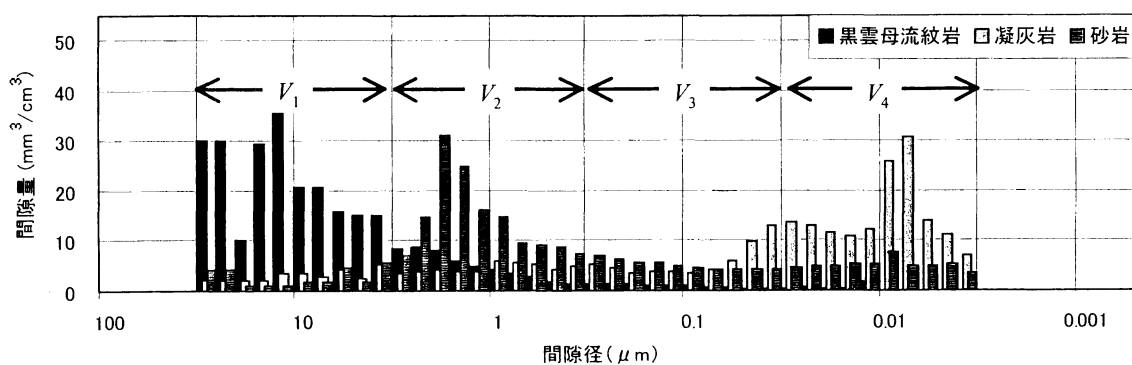
第1表 間隙径の大きさで分類した間隙量

間隙径範囲 (μm)	V_1 $10^{1.4}-10^{0.5}$	V_2 $10^0-10^{-0.5}$	V_3 $10^{-0.5}-10^{-1.5}$	V_4 $10^{-1.5}-10^{-2.4}$
黒雲母流紋岩	223	50	10	4
凝灰岩	30	45	57	149
砂岩	27	142	51	51

(単位: mm^3/cm^3)

第2表 実験に用いた岩石の諸物性

岩石	かさ密度 (g/cm^3)	引張強度 (kgf/cm^2)	間隙率 (%)
黒雲母流紋岩	1.25	4.71	47.0
凝灰岩	1.36	13.95	41.9
砂岩	1.88	34.14	28.0

(単位: mm^3/cm^3)

第1図 各岩石の間隙径分布

II. 実験

1. 実験に使用した岩石

今回の実験では、比較的塩類風化しやすいと思われる強度の小さい3種の岩石を使用した。黒雲母流紋岩、凝灰岩、砂岩の3種である。黒雲母流紋岩は、東京都新島の向山(完新世の溶岩円頂丘)産の「抗火石」である。ガラスに富む多孔質な岩石であり、黒雲母、石英、アルバイト、灰長石なども含んでいる。砂岩は群馬県多野郡吉井町で採石される「多胡石」で、茶褐色で木目縞模様を示す。この砂岩は主に黄鉄鉱、オパール、アルバイト、灰長石からなっている。XRDの結果で測定されたオパール($\text{SiO}_2 \cdot n\text{H}_2\text{O}$)は石英(SiO_2)が水和したものである。凝灰岩は、栃木県宇都宮市大谷町で採石される「大谷石」で、海水中に堆積したデイサイトまたは流紋岩質の軽石塊と同質の火山灰からなり、粗い堆積層理を示す。軽石塊はしばしば変質して、暗緑～暗褐色のFeに富むモンモリロナイトの塊となり「みそ」と呼ばれている。この凝灰岩は主に石英、輝沸石、束

沸石、アルバイト、アノーサイトからなっている。モンモリロナイトはX線の回折強度が低く明瞭ではない。

それぞれの岩石の物性値(かさ密度、間隙率、間隙径分布、引張強度など)を計測した。かさ密度は乾燥重量と試料体積から算出した。また間隙率はかさ密度と真密度を求め両者の値から計算した。引張強度は直径3.5 cm、高さ3.0-3.5 cmの供試体を用いて、圧裂引張試験によって求めた。間隙径分布の測定はカルロ・エルバ社製のポロシメーター2000を用いた。この装置は、真空状態から約200MPaまで徐々に加圧することによって岩石試料内に水銀を圧入し、圧入圧力と水銀圧入量を測定する仕組みとなっている。間隙径分布で測定された間隙径 $10^{1.4} \mu\text{m}$ から $10^{-2.4} \mu\text{m}$ の範囲を、Suzuki and Matsukura (1992)の区分を参考に4つに分けた。それぞれの範囲内の間隙径がもつ間隙量の値を V_1 , V_2 , V_3 , V_4 と定義する。 V_1 , V_2 , V_3 , V_4 はそれぞれ間隙径 $10^{1.4} \mu\text{m}$ から $10^{0.5} \mu\text{m}$, $10^{0.5} \mu\text{m}$ から $10^{-0.5} \mu\text{m}$, $10^{-0.5} \mu\text{m}$ から $10^{-1.5} \mu\text{m}$, $10^{-1.5} \mu\text{m}$ から $10^{-2.4} \mu\text{m}$ の範囲内にある間隙の総量を示して

いる。間隙径の測定結果を第1図に示した。第1表には、それぞれの試料の V_1 , V_2 , V_3 , V_4 の値を示した。

岩石物性の測定結果を第2表にまとめた。黒雲母流紋岩の間隙率は47.0%と最も高く、間隙径は $10^1 \mu\text{m}$ 以上の大きいものが卓越している。一方、砂岩の間隙率は28.0%と最も低く、その間隙径は $10^{0.5} \sim 10^{0.5} \mu\text{m}$ 以上のものが多く分布している。凝灰岩（大谷石）の間隙率は41.9%と高く、また、間隙径は $10^{-2} \sim 10^{-1} \mu\text{m}$ と比較的小さなものが卓越している。

2. 塩溶液

今回の実験で使用した塩溶液はすべて20℃においての飽和溶液とした。溶液に使用した塩は Na_2SO_4 , MgSO_4 , CaSO_4 , NaCl の4種である。20℃においての溶解度は NaCl が26.4 wt%, MgSO_4 が16.0 wt%, Na_2SO_4 が25.5 wt%, CaSO_4 が0.21 wt%である。

3. 実験方法・条件

実験方法は次の通りである。

縦横5 cm, 高さ15 cmに整形した岩石試料を、3種の岩石についてそれぞれ5個作成した。

密閉容器(タッパーウェアを利用)の蓋に縦横5 cmの穴を開け、その穴を通して岩石を容器に立てる(岩石試料は下部の4.5 cmが容器に入っており、それ以上の高さが容器外に出ていることになる)。岩石の下部3 cmが常に溶液が浸るようにし、50℃のオーブンに入れた。使用した溶液は5種類で Na_2SO_4 , MgSO_4 , CaSO_4 , NaCl の飽和溶液と蒸留水である。

溶液の高さを保持するために1日ごとに溶液を補充した。

1日ごと、岩石の同一面をカメラの位置を固定して写真撮影した。この写真から容器より上部の岩石の輪郭をトレースし、その範囲の面積を計測した(すなわち、岩石の膨張量を計測したことになる)。ただしこの場合、析出した塩と岩石との境界が不明瞭なため、岩石表面に析出した塩を含めて測定した。実験前の断面積と比較してその変化量(%)を計算した。

(5)実験は40日間にわたり行われた。

(6)実験終了後、塩が析出している岩石の一部を取り、そのままの状態での岩石の間隙径分布を調べた。

III. 実験結果

1. 塩の析出と岩石の断面積変化

実験後の岩石の風化による変化(破壊)の様子と塩の析出の様子を第2図に示した。岩石の断面積変化量(岩石の外側に析出した塩を含めた断面積変化量)の結果を第3図に示した。これらの結果を、岩石の種類ごとに以下に述べる。

黒雲母流紋岩

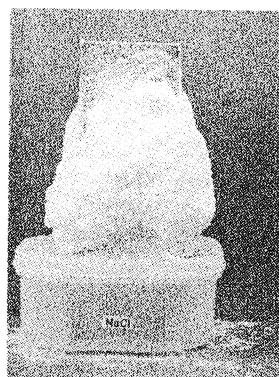
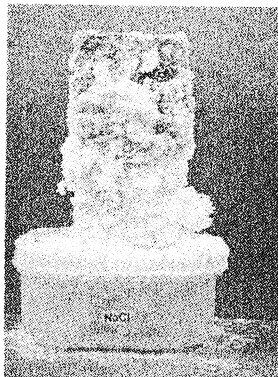
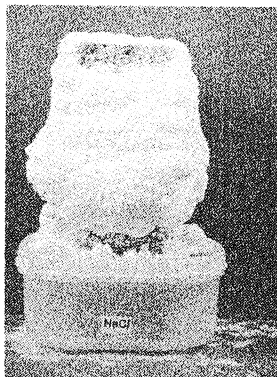
塩化ナトリウムのケースでは、岩石の高さ6 cmから14 cmの範囲のところに厚さが数 cm ほどの真白色な塩が析出しており、ビヤ樽状にふくれている。このため見かけ上の断面積変化量が大きく、その値は140%となった。硫酸カルシウムのケースでは高さ5 cm付近に厚さ1 mm以下の薄い白色の塩結晶が析出した。また、硫酸ナトリウムのケースでは高さ5 cmから7 cmまでの範囲で塩化ナトリウムのケースと同様に、厚さ数 cmの白い塩結晶が析出した。硫酸マグネシウムのケースでは高さ5 cmから6 cmまでの範囲に厚さ1 mm程度の薄い白色の塩が析出した。このように、塩化ナトリウム以外の塩の場合は、岩石表面に塩の析出はみられるものの、断面積は40日間にわたり、ほとんど変化していない(第3図)。

凝灰岩

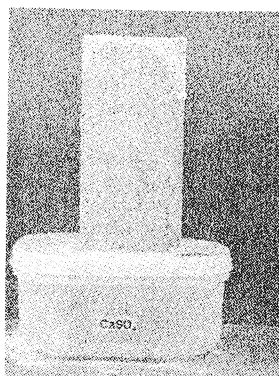
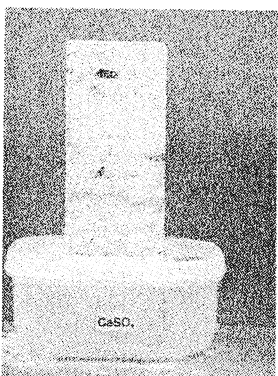
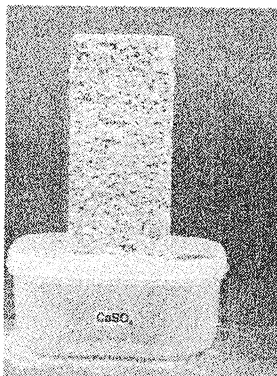
硫酸ナトリウムと塩化ナトリウムのケースが40日実験後の断面積変化量が約120%と大きかった。塩化ナトリウムでは高さ5 cmから9 cmの範囲に白色の塩結晶が析出した。9 cm以上の高さでは岩石表面に緑色、茶色を帯びた塩結晶が析出した。この高さの範囲で岩石がかなり膨張しているのがわかる(断面積変化量、すなわち膨張量は121%)。また、硫酸ナトリウムでは高さ5.6 cmの範囲で白色の塩結晶が析出し、岩石がわずかに膨らんでいる。それ以上の高さでは岩石の表面に薄く塩が析出した。高い位置ほど岩石の幅は拡大し、岩石の断面は高さ6 cm付近でくびれを持つ形状をしている。また、高さ10 cm付近において局所的に塩が塊状に析出しているのが観察される。トータルとしての岩石の断面積変化量は123%であった。

硫酸マグネシウムのケースの実験後の断面積変化量も116%と比較的大きかった。岩石表面全体に塩結晶が析出した。白い塩が多いが、所々に緑色または茶色の塩も見られた。硫酸カルシウムのケースでは、高さ5 cmから6

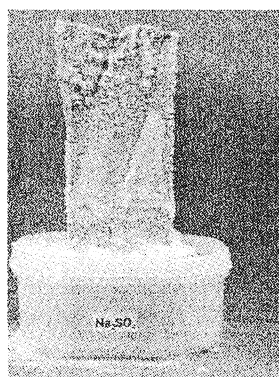
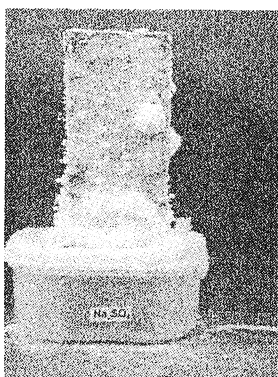
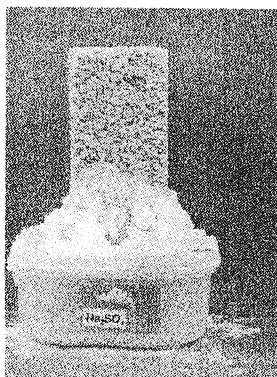
NaCl



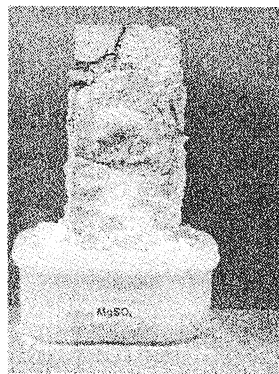
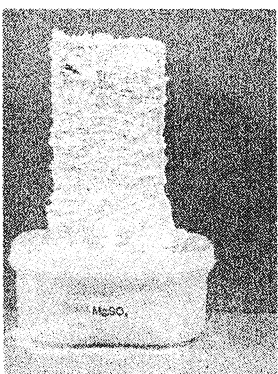
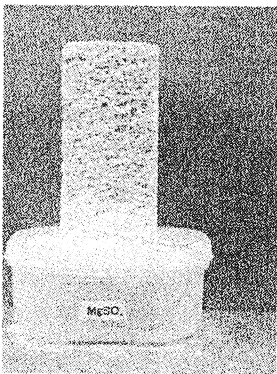
CaSO₄



Na₂SO₄



MgSO₄

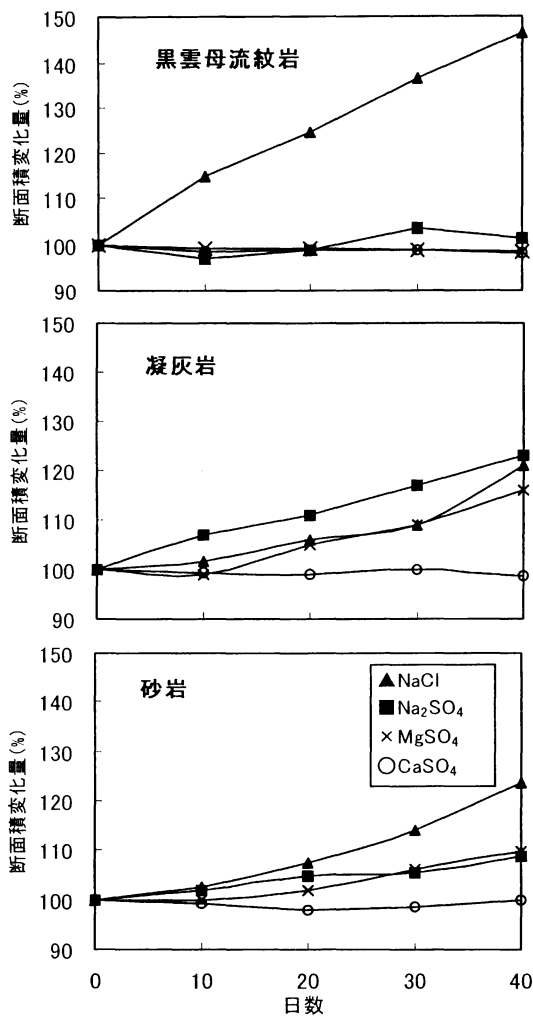


黒雲母流紋岩

凝灰岩

砂岩

第2図 実験後の岩石



第3図 岩石の断面積変化

cm のところに粉末状の塩結晶が薄く覆っている程度であり、断面積の値にほとんど変化はなかった。

砂岩

塩化ナトリウムを用いたケースが実験後に最も顕著に塩が析出した。岩石の底面からの高さ 12 cm ぐらいまで岩石表面が厚い白色の塩に覆われているのが観察された。それ以上の高さでは細かな塩が岩石表面に析出していた。断面積変化量は 125% と大きい。

断面積の変化量は硫酸マグネシウムと硫酸ナトリウムのケースでは 110% とほぼ同じ値を示した。硫酸マグネシウムでは岩石表面全体に塩はほとんど析出していなかった。しかし、岩石試料の上面から縦方向に深さ 3 cm ほどの亀裂が何本も見られた。また側面では厚さ数 mm の板状の剥離層が形成されている。高さ 12 cm 付近では水平方向の亀裂も入っており、その高さ付近で岩石が最も膨張していた。一つの側面では、高さ 9 cm のところに直径 2-3 cm の局所的な膨らみがみられた。

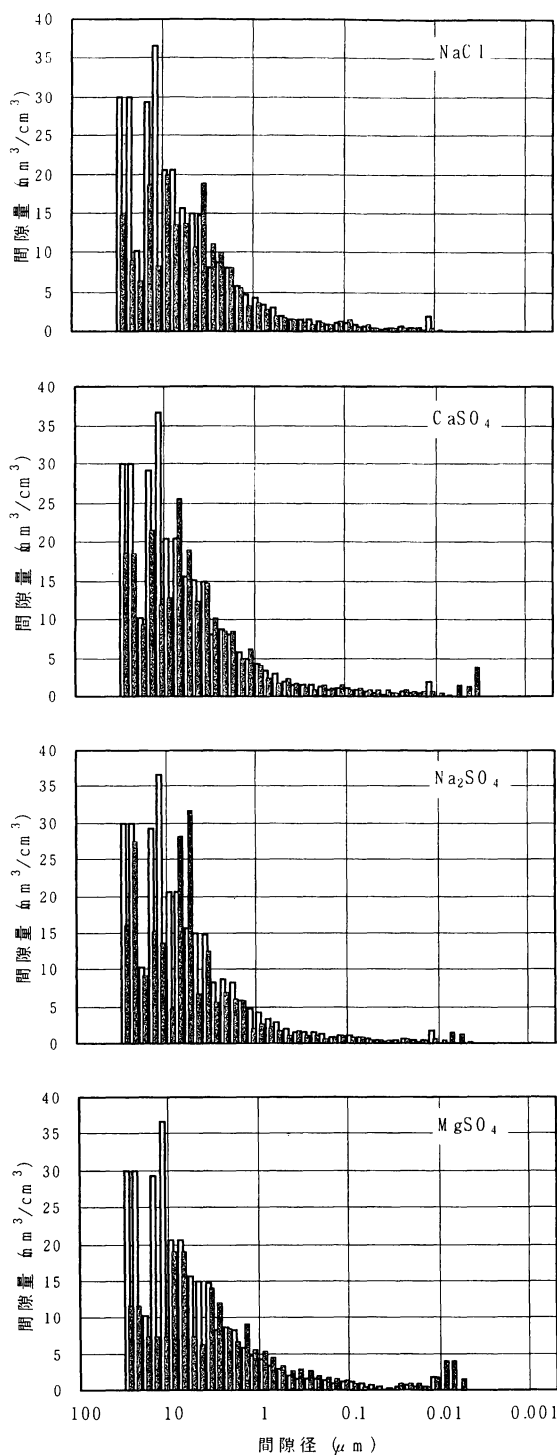
一方、硫酸ナトリウムのケースでは、高さ 6 cm あたりに白い結晶が帯状に析出した。高さ 11 cm 以上では、砂岩の層理に沿って球状の白色結晶と粒状に剥離した岩石試料とが見られた。特に岩石左上部でくさび状に見える部分は、層理に沿って岩石がスライド破壊を起こしかけているようにみえる。

硫酸カルシウムの断面積変化量は、40 日間ほとんど変化しなかった。岩石試料上面のエッジ付近に白色粉末の塩が薄く析出している。

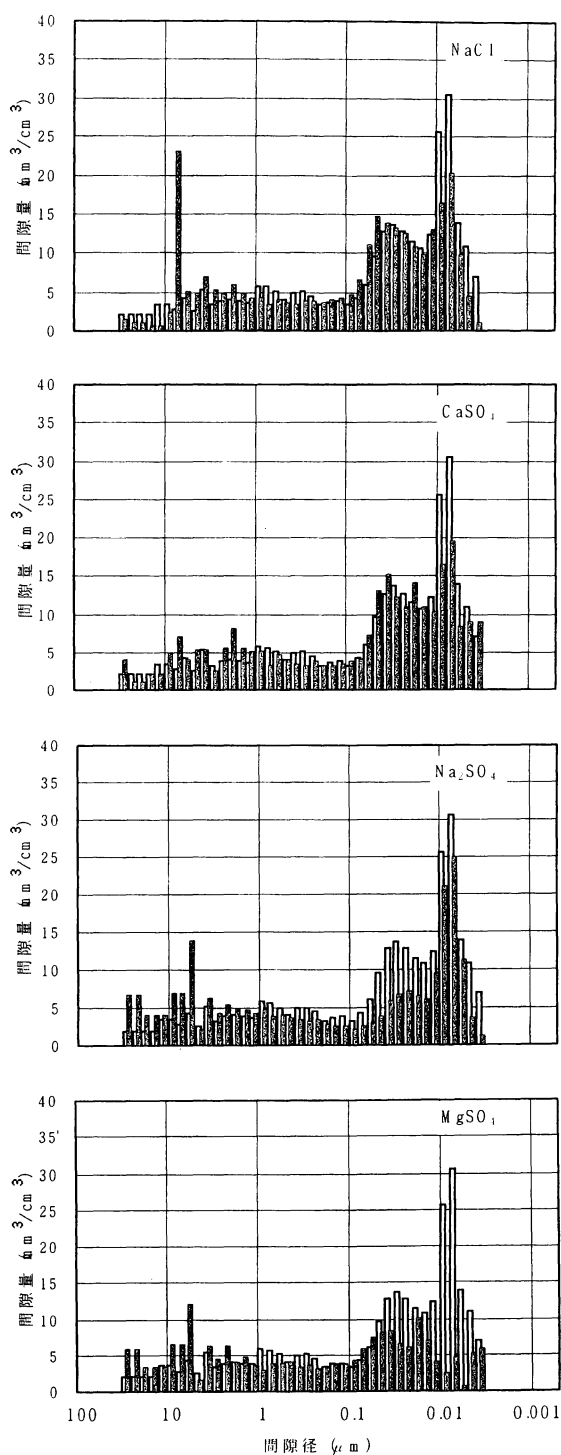
2. 間隙径分布の変化

第 4~6 図にはそれぞれ黒雲母流紋岩、凝灰岩、砂岩の実験 40 日後の塩が析出した状態で計測した間隙径分布の結果を示した。測定条件は、実験前の間隙径分布測定と同じである。図では、実験前の分布と並べて表現することにより、実験前後の間隙径分布の差異が比較しやすいようにした。

黒雲母流紋岩 (第 4 図) では、すべての塩で、実験前と比較して、塩を含んだ状態の間隙径分布では、間隙径 10 μm 以上の間隙容量が大きく減少している。一方、凝灰岩 (第 5 図) では、すべての塩溶液のケースで、実験前の間隙径分布にくらべて、0.01 μm 以下の間隙容量が大きく減少した。特に硫酸ナトリウムと硫酸マグネシウムのケースでは、 $10^{15} \mu\text{m}$ から $10^{23} \mu\text{m}$ までの広い範囲で間隙容量の減少がみられた。また、砂岩 (第 6 図) では、実験前の間隙径分布にくらべて、塩を含んだ状態の間隙径分布では、10 μm から 1 μm の間隙容量が大きく減少した。硫酸ナトリウムのケースでは、10 μm から 1 μm の間隙径にかけての間隙容量が大きく減少したほかに、10 μm 付近と 0.01 μm 付近の間隙容量が増加した。



第4図 実験後、黒雲母流紋岩に塩が析出した状態での間隙径分布（白抜き
のグラフは実験前の黒雲母流紋岩の間隙径分布）



第5図 実験後、凝灰岩に塩が析出した状態での間隙径分布（白抜き
のグラフは実験前の凝灰岩の間隙径分布）

IV. 考察

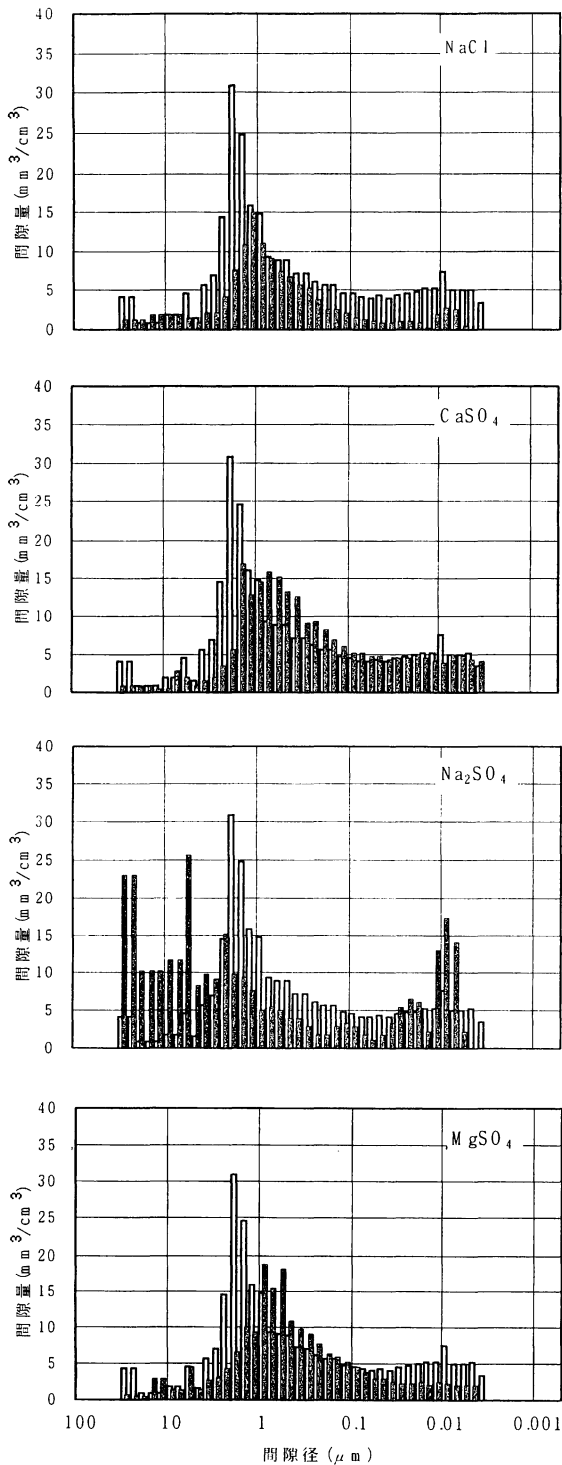
1. 断面積変化量からみた岩石の塩類風化速度

実験の10日ごとに岩石試料の正面から写真撮影し、それをもとに岩石の断面積の変化量を求めた(第2図, 第3図)。実験後に断面積が大きく増加したのは、凝灰岩の硫酸ナトリウム、塩化ナトリウム、硫酸マグネシウムのケース、砂岩の硫酸ナトリウム、硫酸マグネシウムのケースなどであった。この中でも特に砂岩と黒雲母流紋岩の塩化ナトリウムのケースでは、かなりの厚さにかさぶた状に岩石表面を覆っている。それらの析出した塩を剥ぎ取ったあとの岩石試料の断面積を計測すると、実験前とほとんど同じであった。析出した塩が真白で岩石の破片を含んでおらず、これらの塩は岩石の外側に成長してはいるが岩石破壊にはほとんど寄与していない。すなわち、この二つのケースは、第3図で断面積変化量が145%、125%と大きい値を示しているが、これは塩の岩石外側への成長の結果であり、岩石そのものの膨張ではない。

今回の実験における実質の岩石の断面積変化量(膨張量)をみると、凝灰岩の場合には大きいほうから硫酸ナトリウム、塩化ナトリウム、硫酸マグネシウムのケースとなっており、それぞれの値は122.9、121.0、116.1%を示している。一方、砂岩の場合に大きく変化した硫酸マグネシウム、硫酸ナトリウムのケースはそれぞれ109.8、108.7%を示している。したがって、塩の種類に関係なく砂岩よりも凝灰岩の断面積が大きく増加したことがわかる。黒雲母流紋岩では、硫酸ナトリウムが若干の変動を示すが塩の種類に関係なく、岩石の断面積に大きな変化はみられなかった。この断面積変化量(膨張量)が大きい岩石が風化しやすいものと考え、実験に使用した岩石の比較でいえば、凝灰岩が最も塩類風化しやすく、砂岩、黒雲母流紋岩の順に風化しにくくなると考えられる。

2. 岩石物性と塩類風化量

実験に使用した岩石の塩類風化のしやすさと、それぞれの岩石物性の大小関係を比較した。一般に引張り強度が大きいほど風化しにくく(たとえば、Matsukura and Matsuoka, 1996)、空隙率が高いほど風化しやすいと考えられる。しかし、今回の実験では塩類風化量は凝灰岩、砂岩、黒雲母流紋岩の順に大きいのに対して、かさ密度と



第6図 実験後、砂岩に塩が析出した状態での間隙径分布(白抜き
のグラフは実験前の砂岩の間隙径分布)

第3表 塩類風化速度と岩石物性の対応関係

塩類風化速度	凝灰岩>砂岩>黒雲母流紋岩
強度、かさ密度	砂岩>凝灰岩>黒雲母流紋岩
間隙率	黒雲母流紋岩>凝灰岩>砂岩
V_1	黒雲母流紋岩>凝灰岩≒砂岩
V_2	砂岩>黒雲母流紋岩≒凝灰岩
V_3	凝灰岩≒砂岩>黒雲母流紋岩
V_4	凝灰岩>砂岩>黒雲母流紋岩

引張強度は砂岩、凝灰岩、黒雲母流紋岩の順に大きく、間隙率は黒雲母流紋岩、凝灰岩、砂岩の順に高かった（第3表）。したがって、風化しやすさは、かさ密度、引張強度、間隙率等との対応関係は不明確である。

次に岩石の間隙径分布（第1表）と岩石の断面積変化量を比較してみた。間隙径分布の計測結果から、 V_1 は黒雲母流紋岩の値が最も大きく、凝灰岩、砂岩の順に小さくなる。 V_2 は砂岩の値が最も大きく、黒雲母流紋岩、凝灰岩の順に小さくなる。 V_3 と V_4 は凝灰岩の値が最も大きく、砂岩、黒雲母流紋岩の順に小さくなる。特に V_4 の値は凝灰岩が $149 \text{ mm}^3/\text{cm}^3$ 、砂岩が $51 \text{ mm}^3/\text{cm}^3$ 、黒雲母流紋岩が $4 \text{ mm}^3/\text{cm}^3$ とそれぞれの岩石の間隙量に大きな差がある。この V_3 、 V_4 あるいは V_3+V_4 の大小と風化しやすさの順序がよい対応を示している。すなわち、微細な間隙が多い岩石ほど塩類風化しやすいという関係が認められる。このことは、Matsukura and Matsuoka (1996)が提示した「微細な間隙容量の大きい岩石ほどタフォニの形成速度（NaClによる塩類風化速度）が大きい」という考えを支持している。

3. 実験前後での間隙径分布の変化と塩類風化の程度

実験後の塩を含んだ状態で間隙径分布を測定した結果、凝灰岩は V_4 、砂岩は V_2 、黒雲母凝灰岩は V_1 の間隙量が大きく減少した。これらの間隙径は実験前にそれぞれの岩石で間隙量が最も多かった範囲と一致する。したがってこの間隙径の間隙量の減少は、間隙内で塩が結晶化し、間隙を埋めたからだと考えられる。岩石の断面積の変化と塩が結晶化した間隙径の大きさをあわせて考えると、小さな間隙径で塩が結晶化したときに岩石が大きく膨張するということがいえる。

以上のことから、径の小さな間隙を多く持つ凝灰岩は、小さな間隙で塩が結晶化することにより（その結晶圧により）岩石を風化（破壊）させていることが示唆される。逆に、間隙径の大きな間隙を多く持つ黒雲母流紋岩は、塩が結晶化しても、塩の結晶に比較して間隙が大きすぎるため岩石内部で結晶圧が発生せず、岩石を風化させられないのではないかと考えられる。すなわち、塩類風化のしやすさ（塩類風化速度）は、塩の結晶の大きさと間隙径のバランスによって決定されていることが示唆される。

V. おわりに

凝灰岩、砂岩、黒雲母流紋岩を用いて塩類風化の室内実験を行った。その結果、凝灰岩が最も塩類風化しやすく、黒雲母流紋岩は風化しにくいことがわかった。それぞれの岩石物性の比較から、風化しやすさに最も寄与するのは、微細間隙の容量であることが示唆された。ただし、この報告では両者の対応関係が示されただけであり、今後は両者の定量的関係を追究する必要がある。また実験に使用した塩溶液の風化速度に与える影響については不明な点が多い。このことも含めて今後の検討課題とする。

謝辞

岩石の間隙径分布の計測にあたっては、産業技術総合研究所深部地質環境研究センターの林 為人氏からご協力をいただいた。記して感謝申し上げる。

文献

- 山田 剛・松倉公憲 (2000): 凝灰岩の塩類風化に関する一実験. 筑波大学陸域環境研究センター報告, **1**, 27-34.
- 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. 筑波大学陸域環境研究センター報告, **2**, 19-23.
- 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.

- Chapman, R. W. (1980): Salt weathering by sodium chloride in the Saudi Arabian Desert. *American Journal of Science*, **280**, 116-129.
- Goudie, A. S. and Day, M. (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 and Sons. Chichester, 241p.
- Matsukura, Y. and Matsuoka, N (1996): The effect of rock properties on rates of tafoni growth in coastal environments. *Zeitschrift für Geomorphologie, N. F., Supplementband*, **106**, 52-57.
- Mottershead, D. N. (1989): Rates and patterns of bedrock denudation by coastal salt spray weathering: a seven-year record. *Earth Surface Processes and Landforms*, **14**, 383-398.
- Mustoe, G. E. (1982): The origin of honeycomb weathering. *Bulletin of the Geological Society of America*, **93**, 108-115.
- Prebble, M. M. (1967): Cavernous weathering in the Taylor Dry Valley, Victoria Land, Antarctica. *Nature*, **216**, 1194-1195.
- Suzuki, T. and Matsukura, Y. (1992): Pore size distribution of loess from the Loess Plateau, China. *Transactions, Japanese Geomorphological Union*, **13**, 169-183.
- Winkler, E. M. (1994): *Stone in Architecture*. Springer-Verlag, Berlin. 313p.