

研究ノート 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

著者	山田 剛, 松倉 公憲
著者別名	YAMADA Takeshi, MATSUKURA Yukinori
雑誌名	筑波大学陸域環境研究センター報告
巻	2
ページ	19-23
発行年	2002-02
URL	http://doi.org/10.15068/00146925

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

A preliminary experiment on salt weathering of tuff

山田 剛*・松倉公憲**

Takeshi YAMADA and Yukinori MATSUKURA

I はじめに

塩類風化に関する研究は、野外調査と室内実験の両面から多くの研究が積み重ねられており、それらの研究から、塩類風化が岩石劣化の重要なプロセスのひとつであることが判ってきた（例えばEvans, 1970; Goudie, 1985; Goudie and Vile, 1997）。しかし、塩の種類が多様性とそれぞれの塩の破壊力に差異があることなどから、塩類風化のメカニズムに関しては不明な点が多い。そこでこの研究は、塩類風化の基本的なメカニズムを明らかにする目的で始められた。前報（山田・松倉, 2000）では凝灰岩（大谷石）を用いて、各種の塩の飽和溶液に浸して乾燥するサイクルを10回繰り返すという、最も単純な条件を与えた室内実験を行い、その結果を報告した。今回は、柱状の試料に試料下部から飽和溶液を与える実験を行ったので、その結果を報告する。

II 実験

1. 実験に使用した岩石と塩溶液

実験には、前報と同じように凝灰岩（大谷石）を用いた。この岩石は、乾燥単位体積重量が 1.5 gf/cm^3 、間隙率が 22.4% 、一軸圧縮強度が 161

kgf/cm^2 という物性をもっている。

また、今回の実験で使用した塩の溶液は Na_2SO_4 、 MgSO_4 、 CaSO_4 の3種類である。それらはすべて 20°C における飽和溶液とした。すなわち、蒸留水 100 cm^3 に Na_2SO_4 は 16.0g 、 MgSO_4 は 25.5g 、 CaSO_4 は 0.21g 溶解させたものである。これらの溶解度は化学便覧3版の数値を参考にした。また、比較のために蒸留水による実験もあわせて行った。

2. 実験手順

実験は以下のような手順で行われた。

- (1)縦横 $5 \times 5 \text{ cm}$ 、高さ 15 cm に整形した凝灰岩の試料を4つ作成した。
- (2)密閉したタッパウエア容器 ($11 \times 13 \times 5 \text{ cm}^3$)にそれぞれの溶液を 250 cm^3 注ぎ込む。容器の蓋の部分に $5 \times 5 \text{ cm}$ の穴を開け、そこに凝灰岩の試料をはめ込んで立てた。試料の下部 3 cm は常に溶液に浸るようにし（すなわち蒸発で減少した分の溶液をつぎ足しながら）、 20°C の室内で10日間置いておいた。
- (3)その後、 50°C のオーブンに約1ヶ月間入れて（シリカゲルで除湿しながら；ただし湿度は不明）、試料の破壊や塩の析出の様子を観察しながら、4-5日おきに写真撮影を行った。また、溶液の高さを保持するために1日ごとに溶液減少分を補充した。補充した

* 筑波大学大学院生命環境科学研究科

** 地球科学系

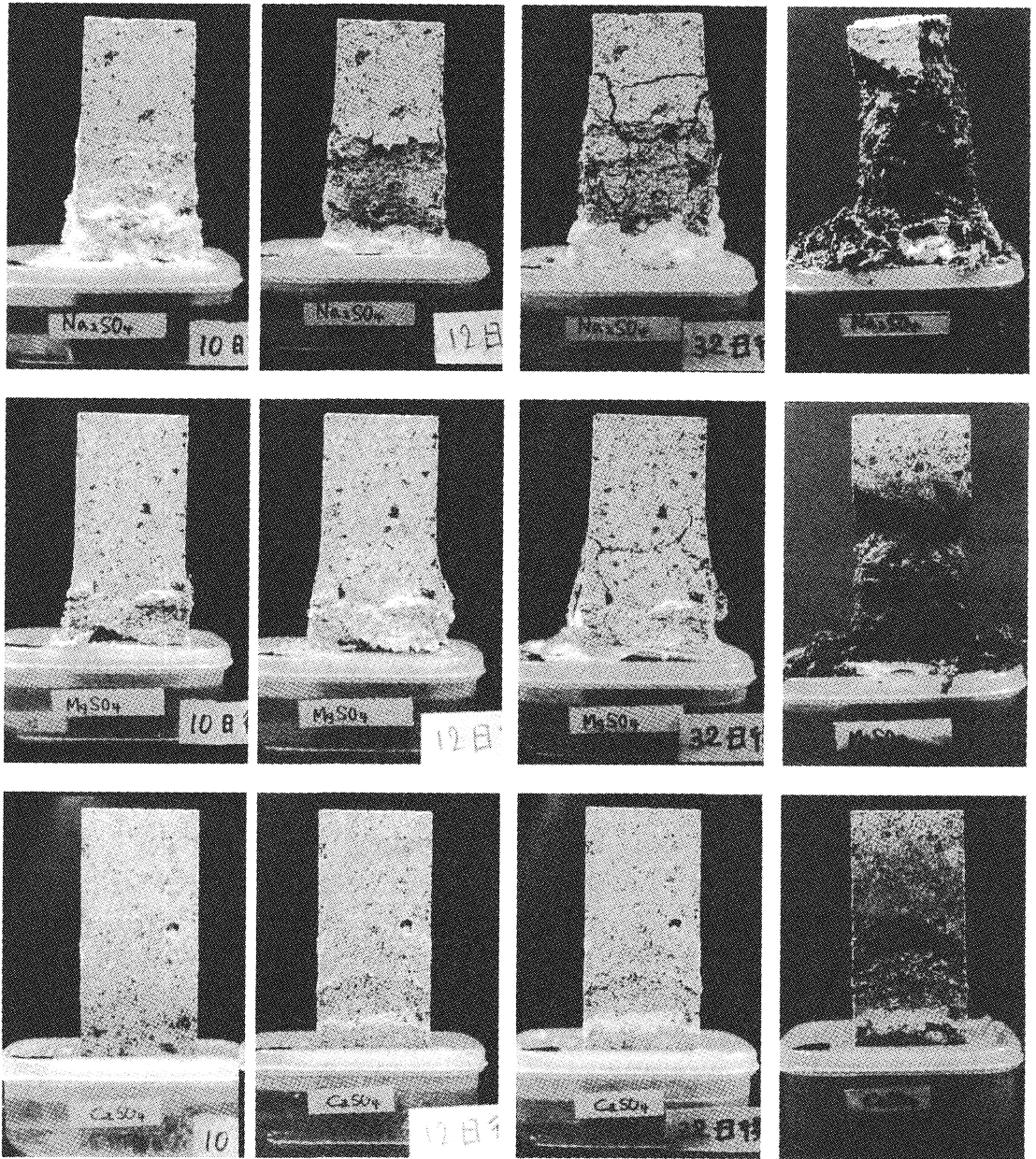


図1 塩の析出と岩石の破壊の様子

上の段から、それぞれ溶液に Na_2SO_4 、 MgSO_4 、 CaSO_4 を用いた実験。左の1列目は20℃で10日間放置した後、2列目は、50℃のキャビネットに置いて12日目、3列目はその32日目、4列目は50℃、98%RHにして岩石から塩を除去した後の様子。

溶液量は岩石を通して結晶化した分および蒸発量ということになる。実験中に岩石試料表面から剥落した塩を採取し、X線回折(XRD)分析に供した。

(4)岩石試料中に析出した塩を溶解させるため、50℃で98%RH(相対湿度)に設定した恒温恒湿器に5日間入れた。この手順では溶液の補充は行っていない。

3. 実験結果：破壊の様子

実験結果は図1にまとめて示した。図の上段は溶液として Na_2SO_4 を用いたケースであり、中段は MgSO_4 、下段は CaSO_4 のケースを示している。

溶液として Na_2SO_4 を用いたケースでの破壊は以下のようにまとめられる。20℃で10日間放置したあと

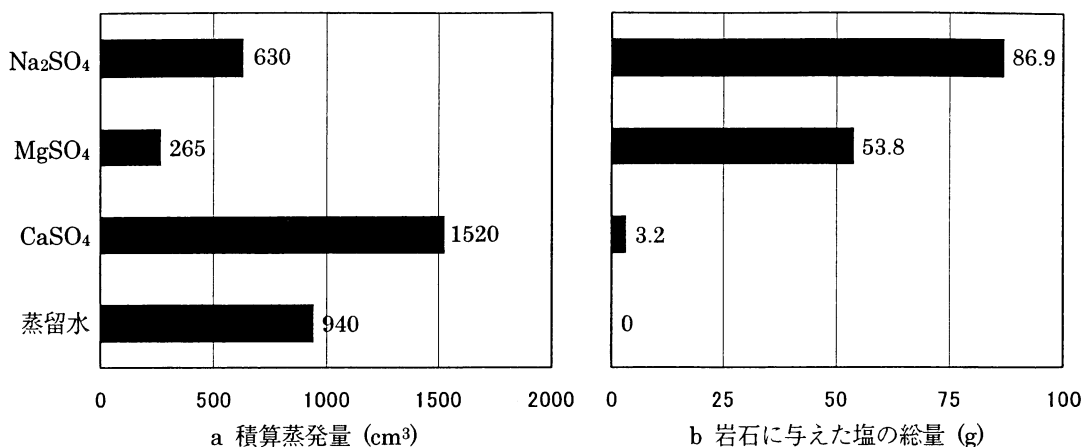


図2. 積算蒸発量と岩石に与えた塩の総量

では、岩石試料の下部表面に塩が多く析出したが、岩石に明瞭な亀裂は見られなかった。続いて50℃に12日間放置したが、20℃で塩が析出していた部分（試料の下半部）で岩石表面が薄く剥がれはじめた。32日後にはその部分が膨張し、その上部にまで数本の亀裂が入った。塩の結晶は岩石表面に浮いた感じで析出しており、息を吹きかけると飛んでしまうほどであった。塩を除去すると岩石の頭部を残して、それ以外の部分で岩石表面がポロポロ崩れてしまった。

MgSO₄では20℃で10日間放置したとき、Na₂SO₄のケースと同様に、岩石下部にかさぶた状に塩が析出したが、岩石に亀裂などはみられなかった。続いて50℃に12日間放置したとき、岩石表面に析出している塩の範囲はほとんど変わっていないが、岩石下部が膨れはじめている。32日後には岩石下部がさらに膨張し樽状になり、試料の半分くらいの高さまで亀裂が入った。塩を除去すると、その亀裂の入った高さまで岩石表面が剥落し、最終的には下半分がくびれを持った形になった。

CaSO₄のケースでは以下のようなことが観察された。20℃で10日間放置した場合は、岩石表面に塩はほとんど析出しなかった。その後50℃に12日間放置した場合は、試料のほぼ中央の高さのところと試料基部とに塩の析出が見られた。とくに中央部では塩

の析出がアーチ状のラインとして析出した。この位置がその後、わずかではあるが粒状に盛り上がっていった。50℃、98%RHに放置し塩を除去しようとしたが、完全には除去できず、試料下部の表面には塩が残存しているところもあった。ただし岩石にはまったく亀裂は見られなかった。

これらの塩を用いた実験と比較するために使用した蒸留水を用いたケースでは、岩石に亀裂や破壊は全く認められなかった。

4. 析出した塩

50℃において岩石から剥落した塩のXRD分析を行った。Na₂SO₄では thenardite (Na₂SO₄)、MgSO₄では hexahydrate (MgSO₄ · 6H₂O) と epsomite (MgSO₄ · 7H₂O) が同定された。CaSO₄の場合は剥落した塩がなかったので分析できなかった。

5. 蒸発量および岩石試料に供給された塩の総量

50℃の実験中に計測した各溶液の蒸発量の結果を図2aに示した。1ヶ月間の積算蒸発量は蒸留水で940 cm³であった。塩の溶液の中ではCaSO₄が1,520 cm³と最も多く、ついでNa₂SO₄が630 cm³、MgSO₄が最も少なく265 cm³であった。

溶液の蒸発によって塩の結晶が岩石試料中に蓄積

表1. 塩の破壊力の順位 (上にあるほど破壊力が強い)

Pedro (1957)	Kwaad (1970)	Goudie et al (1970)	Goudie (1974)	Goudie (1974)	Goudie (1986)	This Study
NaNO ₃	Na ₂ SO ₄	Na ₂ SO ₄	Na ₂ SO ₄	Na ₂ SO ₄	Na ₂ CO ₃	Na ₂ SO ₄
Na ₂ SO ₄	Na ₂ CO ₃	MgSO ₄	MgSO ₄	Na ₂ CO ₃	MgSO ₄	MgSO ₄
Mg(NO ₃) ₂	MgSO ₄	CaCl ₂	CaCl ₂	NaNO ₃	Na ₂ SO ₄	CaSO ₄
K ₂ SO ₄	NaCl	Na ₂ CO ₃	Na ₂ CO ₃	CaCl ₂	NaCl	
KNO ₃	CaSO ₄	NaCl	NaNO ₃	MgSO ₄	NaNO ₃	
Na ₂ CO ₃				NaCl	CaSO ₄	
K ₂ CO ₃						
MgSO ₄						
CaSO ₄						
Ca(NO ₃) ₂						

本実験の結果以外は, Goudie and Vile (1997)のTable 4.9. による.

されたと考えると, この蒸発量をもとに, 岩石試料に供給された塩の量を計算から求めることができる. その値を図2bに示した. Na₂SO₄ とMgSO₄は溶解度が大きいことを反映してそれぞれ86.9 g, 53.8 g と大きくなるが, CaSO₄は溶解度が小さいため, 蒸発量が大きいにもかかわらず, 供給された塩の総量は3.2 g と最も少ない.

III 考察およびまとめ

岩石の破壊の程度は, 結晶成長時には試料の膨張や亀裂の量で推定されるが, 塩を除去(潮解)させると, より破壊の程度が鮮明になる(図1の4列目の写真参照). 特にNa₂SO₄やMgSO₄の溶液に浸した岩石は2ヶ月足らずの実験後に, 試料の下部がぼろぼろに崩れ落ちるような風化が観察された. CaSO₄では試料の下部でわずかな剥離があったが, 蒸留水では全く変化がなかった. このように, 今回の実験からも塩類風化が岩石を破壊する能力の高いことが確認される.

本実験結果をもとに, 溶液の種類による岩石破壊の程度に関する, すなわち破壊力の順位付けをすると, Na₂SO₄ が最も大きく, MgSO₄, CaSO₄の順に小さくなっている. この結果を従来の研究事例と比較したのが表1である(表1の塩の破壊力とは,

塩類風化実験で風化による欠損重量をもとに評価されたものである). 従来の研究例では, 唯一Goudie (1986)においてはMgSO₄ > Na₂SO₄ > CaSO₄とNa₂SO₄よりMgSO₄の破壊力が大きいとされているが, それ以外の研究例(Pedro, 1957; Kwaad, 1970; Goudie et al., 1970; Goudie, 1994)では, すべてNa₂SO₄ > MgSO₄ > CaSO₄となっている. したがって本研究の結果も従来の研究結果を支持していることになる.

本実験で用いた塩以外の破壊力についても, 表1をみると, たとえばNaNO₃, NaClなどの破壊力の順位は研究者によって多少異なっているようである. このように塩の破壊力の順位が研究者によって異なる原因はどこにあるのだろうか. 従来, 塩類風化の破壊力は, (1)塩の結晶化圧力, (2)塩の水和による破壊力, (3)塩の熱による膨張力, などで発生すると考えられており, これらが実験の条件次第で発現するものが異なったり, あるいはそれらが複雑に重なり合って生起するため, 実験により同じ塩でも破壊力が一定ではないことによるのではないかと考えられる. ところで, 図1に示した岩石の破壊程度と図2に示した塩の総量とはよい一致を示している. すなわち供給された塩の総量が多いNa₂SO₄やMgSO₄で破壊程度が大きく, 塩の供給量が少ないCaSO₄の破壊程度は小さい, という関係が認められ

る。従って、岩石の破壊力の順位を考える場合には、上述の3種類の破壊力のほかに、塩の供給量に関する評価も考慮しなければならない可能性もある。

引用文献

- 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，no. 1, 27-34.
- Evans, I. S. (1970): Salt crystallization and rock weathering: a review. *Revue de Geomorphologie Dynamique*, **19**, 153-177.
- Goudie, A. S. (1974): Further experimental investigation of rock weathering by salt and other mechanical processes. *Zeitschrift für Geomorphologie*, N. F., Suppl., **21**, 1-12.
- Goudie, A. S. (1985): *Salt Weatering*. Research Paper, School of Geography. University of Oxford, **33**, 31p.
- 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., Cooke, R. U. and Evans, I. S. (1970): Experimental investigation of rock weathering by salts. *Area*, **4**, 42-48.
- Goudie, A. S. and Viles, H. A. (1997): *Salt Weathering Hazards*. John Wiley and Sons. Chichester, 241p.
- Kwaad, F. J. M. (1970): Experiments on the disintegration of granite by salt action. *University Amsterdam Fysisch Geografisch en Bodemkundig Laboratorium Publicatie*, **16**, 67-80.
- Pedro, G. (1957): Mechanisme de la desagregation du granite et de la lava de Volvic, sous L'influence des sels de cristallisation. *Comptes Rendu Academie des Sciences, Paris*, **245**, 333-335.