

塩化ナトリウムによる大谷石の塩類風化実験

The Effects of Environmental Conditions on Salt Weathering : A Laboratory Experiment

木村 知子*・松倉 公憲**

Tomoko KIMURA* and Yukinori MATSUKURA**

はじめに

塩類風化は地球上のあらゆる気候環境下で生じうるが、特に乾燥地域や海岸地域等ではしばしば観察され、このような地域での地形形成において大きな役割を果たしている。さらに近年では建築物や石造文化財などが塩類風化によって破壊されつつあるという報告もあり(たとえば、Kuchitsu *et al.*, 1999)、塩類風化のメカニズムの追究は地形学的興味だけでなく、これらの保存・修復という観点からも重要である。近年、野外調査あるいは室内実験によって、多くの塩類風化による知見が積み重ねられてきた(たとえば Matsukura and Matsuoka 1996; McBride and Picard 2000)。

塩類風化(salt weathering)が岩石を破壊する主なメカニズム(破壊に寄与する応力)としては以下のようなものが考えられている(たとえば Goudie and Viles, 1997, pp. 123-160):(1)塩類の熱膨張によって生じる応力,(2)塩の水和作用によって生じる応力,(3)溶液が蒸発する際、塩の結晶が成長することによって生じる応力。しかし塩類風化そのもののメカニズムやそれによって生ずるといわれている地形に関してはいまだに不明な点が多い。

本研究では、大谷石と塩化ナトリウムを用いた室内風化実験を行った。研究の主目的は、風化環境条件を種々に変化させた塩類風化を行い、風化環境条件がどのような風化形態の差異を生じさせるのかを明らかにすることである。

実験方法

実験では、塩類風化において溶液飽和度(塩濃度)と風の有無が、風化形態や侵食量にもたらす影響を明らかにする。具体的には、塩溶液の中に岩石柱を立て、その岩石柱が塩溶液を吸い上げて外気に露出したり風に曝されたりすることで乾燥し塩を析出させるという実験を行った。

1. 実験に使用した岩石

実験では、間隙率が大きく強度の比較的小さな(すなわち、比較的塩類風化しやすい)凝灰岩である大谷石を縦横5×5cm、高さ15cmに整形して使用した。大谷石は栃木県宇都宮市大谷町で採掘される凝灰岩で、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。また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。この岩石の

* 筑波大学自然学類(現:増進会出版社)

** 筑波大学地球科学系

物性は、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 である(山田・松倉, 2001)。

2. 実験条件

(1) 塩溶液

濃度の異なる 2 種類の NaCl 溶液を用意した。一つは蒸留水 100 cm^3 に NaCl を 35.8 g 溶解させた飽和度 100% のものであり、もう一つは蒸留水 100 cm^3 に NaCl を 14.3 g 溶解させた飽和度 40% のものである。以下、特に断りがない限り、「100%」とは飽和度が 100% の NaCl 溶液を指し、「40%」とは飽和度が 40% のものを指す。また、塩類風化以外の風化作用が生じる可能性を考慮し、条件によっては蒸留水による実験もあわせて行った。

(2) 風の有無と塩の除去

サンプルによっては岩石表面に風を当てて実験を行った。具体的には、岩石の前に扇風機を設置し、扇風機の正面にロート状の厚紙を設置することにより、風がサンプル岩石の中心部に集中するようにした。この場合の風速はおよそ $4.5 \sim 5.0 \text{ m/s}$ であった。

表面に析出した塩を除去するために、1 日 1 回サンプルの表面を洗った。ここでいう「洗う」とは、霧吹きを用いて岩石の表面全体に蒸留水を噴霧し、塩を流す(溶解させる)ことを指す。表面を洗うことによって、岩石表面を蒸留水が流下し、その表面流によって塩の結晶が溶かされると同時に、風化物質が除去される。結果として、サンプルの下部から次第に表面が削られていく。

3. 各サンプルの識別コード

上記の 2 で述べた条件を組み合わせて 7 つの実験条件を設定し、実験を行った。与えた条件毎に、

風をあてる(F)か風をあてない(N)か、溶液飽和度が 100% (100)か 40% (40)か、あるいは蒸留水(J)か、岩石試料に穴が開いているかどうか(H)によってそれぞれの岩石に識別コード

をつけた。その結果、各サンプルは条件ごとに、第 1 表に示されるような識別コードで表わされた。以下、各サンプルはこの識別コードを用いて呼ぶことにする。

4. 実験手順

実験は以下のような手順で行った。

(1) 密閉した高さ 5 cm のタッパーウェアのふた中央部に穴をあけて各サンプルを差し込み、隙間をシリコンで埋めた。

(2) タッパーウェアのふたの一部にあけた穴から溶液を注ぎ、溶液高がタッパの底から 4 cm になるようにした。

(3) 温度 20°C の室内で、風を当てるものは扇風機の前に、当てないものは同室内の別の場所にそれぞれ置いた。

(4) 溶液は岩石中に吸水されるので、容器中の溶液は徐々に減少する。そこで、約 24 時間ごとに溶液の高さが実験開始前と同じく底から 4 cm となるようにタッパのふたの一部に開けた直径 6 mm の穴から溶液を補充し、その補充量(岩石を通じて溶液が蒸発した量)を記録した。なお、穴は補充時以外にはテープでふさいである。

(5) その後、岩石の 4 側面(表面、右側面、背面、左側面)に対し、それぞれ霧吹きで 50 回づつ蒸留水を噴霧して岩石表面を洗った。

(6) 以上(4)と(5)を 1 サイクルとし、全部で 33 サイクルの実験を行った。

第 1 表 各サンプルの識別コードと与えた条件

条件		識別コード
溶液飽和度 (%)	風の有無	
100	Fan	F100
	Non-fan	F100 (H)
40	Fan	F40
	Non-fan	F40 (H)
蒸留水	Fan	FJ

さらに、不定期に岩石表面の含水比と縦断形状をそれぞれ測定した。縦断形の計測には直径が0.8 mmの針を櫛形に並べたポイントゲージ型凹凸計を用いた。また岩石表面の含水比は、JT社製のJE100赤外線吸光度計によって測定した。計測値としては吸光度が得られるが、吸光度の含水比への換算においては、山田(2000)の以下のような換算式を用いた。

$$w = 24.6 X$$

ここで、 w は含水比、 X は吸光度を表わす。含水比は6.5 cmから13.5 cmの高さまで1 cmごとに岩石中央部で測定した。

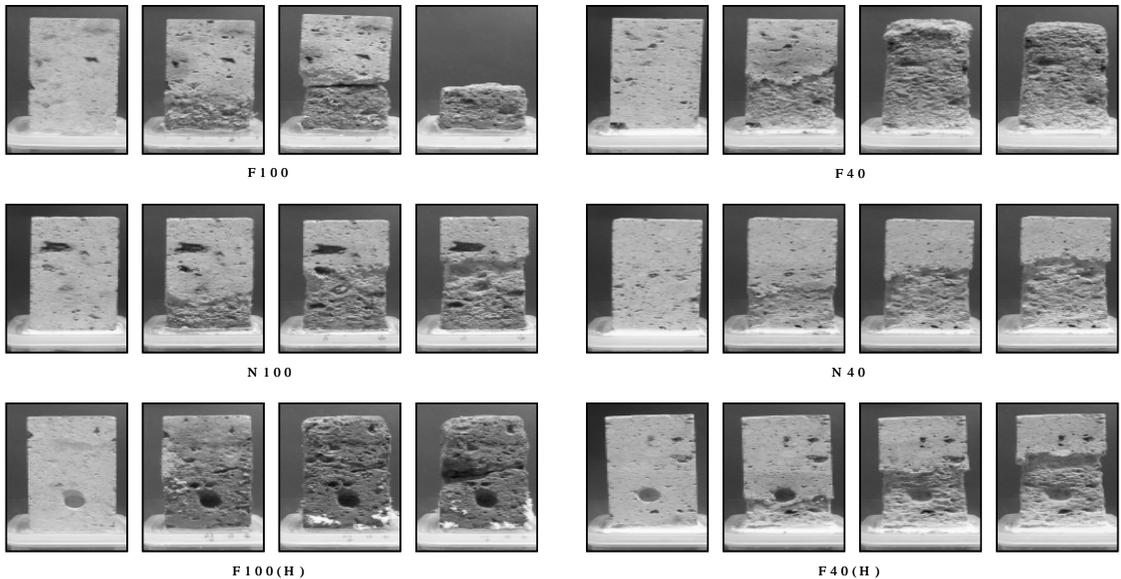
実験結果

1. 表面流による塩の溶解と表面の変化

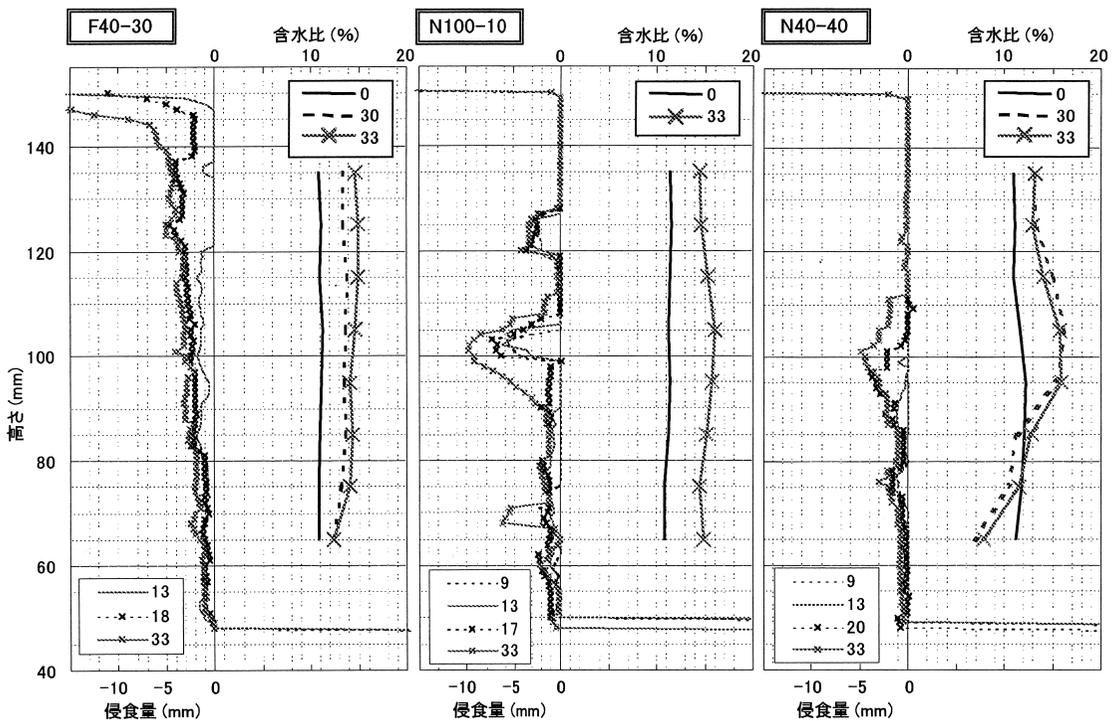
実験の経過に伴う表面の変化を第1図に示す。F40とF100(H)のみ、サンプル頂部まで風化が及んでいた。これら二つのサンプルと同条件であるF40(H)およびF100は風化が頂部まで及ばな

かった。また、F40およびF100(H)以外の100%のサンプル(F100, N100)においては、実験終了時には風化している部分の最も高いところで浅いひび割れが観察された。

いくつかのサンプルで計測した断面形と含水比の結果を第2図に示す(F40ではサンプルの左端から30 mmのところの断面をとり、図ではそれをF40-30と表してある。同様に第2図には、N100-10とN40-40のサンプルの結果を示しているが、それらはおのの左端から10 mm, 40 mmの測線の断面である)。侵食が及んだ範囲において、侵食深は実験終了時でおよそ1~2 mm程度、深いところでは5 mm程度に及ぶところもあった。ただし、稜部分(試料のエッジに相当)で風化の影響が2面あるいは3面から及ぶようなところでは、10 mm以上の侵食深を持つところもある。表面の侵食量は、サンプルの下方(高さ80 mmまで)では比較的少なく、高さが上がるほど増大してより深く侵食される傾向がある。また、F40とF100(H)は、およそ10日経過した頃から急激に侵食量が減少し、20日ほど経過した頃にはほぼ表面の風化は生じなくなった。



第1図 実験の経過に伴う表面の変化
左から順に実験前、10サイクル後、20サイクル後、30サイクル後の様子



第2図 サンプル表面の断面形と含水比
各凡例の数字は測定時のサイクル数：左側が断面形，右側が含水比。

含水比は岩石のごく表面の値を計測したものであるため、塩が析出しているところでは極端にその値が低い、全体的には徐々に上昇していく傾向がみられる。また含水比が上昇するにつれて断面形の変化量、すなわち風化侵食量が少なくなる傾向が見られた。このような現象は、F100 (H) および F40 の全体、および各サンプルの下部において顕著に見られた。

2. 溶液補充量

各サイクルでサンプルに供給した溶液の補充量を第3図に示す。補充量はそのまま、1サイクル中に1時間あたりに岩石を通じて蒸発した溶液の量として計算されたものである。風を当てたもののほうが当てなかったものに比べ若干蒸発量が多くなる傾向が見られる。また、F100 と F40、N100 と N40 をそれぞれ比較してみると、風のあるなしの条件が

同じであれば、飽和度の低いほうが高い方に比べて蒸発量が多くなるという傾向が見られた。

3. 塩の供給量

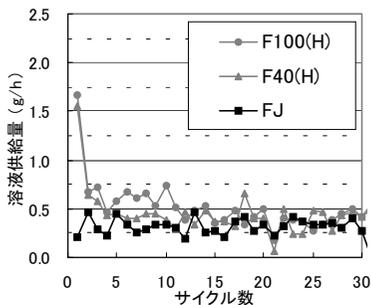
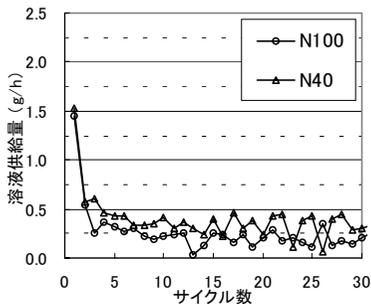
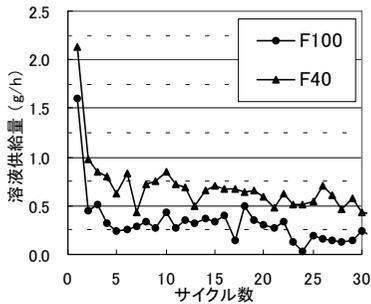
溶液の蒸発量（供給量）に塩の濃度を乗ずれば、1時間あたりの塩の供給量となる。このようにして求めた各サンプルに対する塩の積算供給量を第4図に示す。F40 は 40% でありながら塩の供給量が特に多く、F100 とほぼ同程度の値を示している。F40 と穴の有無以外は同条件である F40 (H) と比べても、その値は 2 倍近くになっている。また、F100 (H) も 100% の中では特に供給量が多く、これも穴の有無以外は同条件である F100 の 2 倍近い値を示す。

考察

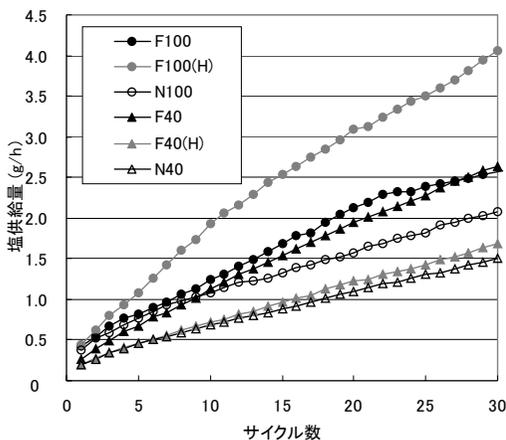
1. 塩が析出する部位と含水比・侵食量との関係

今回の実験では、表面に析出した塩を 1 サイクルごとに洗っているため、表面付近での結晶はある程度の大きさまでしか成長できない。結晶が大きくなれないため、剥落は岩石の表面から少しずつ起こる。いずれのサンプルについても、タッパのふた直上部ではあまり風化が進まず、それより上部において風化量(剥落)が多かった。特に F40 と F100(H) に関しては、溶液が岩石頂部にまで及びしかも表面全体に風化が及んでいたものの、風化がそのまま進行せず、ある程度の時間が経過すると岩石全体の風化が生じなくなる傾向が見られた。この時、風化が生じない部分(各サンプルのタッパふた直上部および F40, F100(H) 全体)では岩石表面が常に湿ったように濃緑色を示し、含水比も次第に高くなっていく。このように含水比がある程度高まり、岩石表面付近の間隙がほぼ溶液で満たされたような状況になると塩は岩石内部では析出できず、岩石の外へ向かって析出していくことが考えられる。塩溶液を用いたサンプルのすべてにおいて実験開始直後の溶液補充量が極端に多く、逆に蒸留水では実験開始直後もそれ以降も補充量に差が見られない。このことは塩が溶けていることによって溶液の毛管上昇力が高まり、はじめは一気に溶液を吸い上げるものの岩石表面からの蒸発が間に合わず、いくらかは岩石内部に貯留されるために岩石内部が溶液によって飽和していくことを示しているものと思われる。

溶液の上昇高については、実験条件がまったく同じものでも上昇高に大きく差が見られる(たとえば、F100 と F100(H),あるいは F40 と F40(H))。したがって、溶液の浸透率や上がり方は外部条件よりもむしろ、間隙形分布や透水性などの岩石の個体差がもたらす物性の差異によって支配されている可能性が高い。



第 3 図 時間あたり溶液補充量



第 4 図 各サンプルにおける塩の積算供給量

2. 溶液飽和度の違いが塩類風化にもたらす影響

溶液の飽和度が 100%のものに関しては岩石の中部にひび割れが生じた。40%のサンプルではいずれもひび割れが生じていないことから、溶液の飽和度が高いほど、1回の析出における結晶化の圧力は高くなることが考えられる。すなわち、溶液が上昇していきながら溶液直上に結晶化圧によるストレスを蓄積していき、ある程度の高さで溶液が停滞した時点（あるいは岩石の弱い部分において結晶化が生じた時点）で、岩石にひび割れや破壊を生じさせた可能性がある。

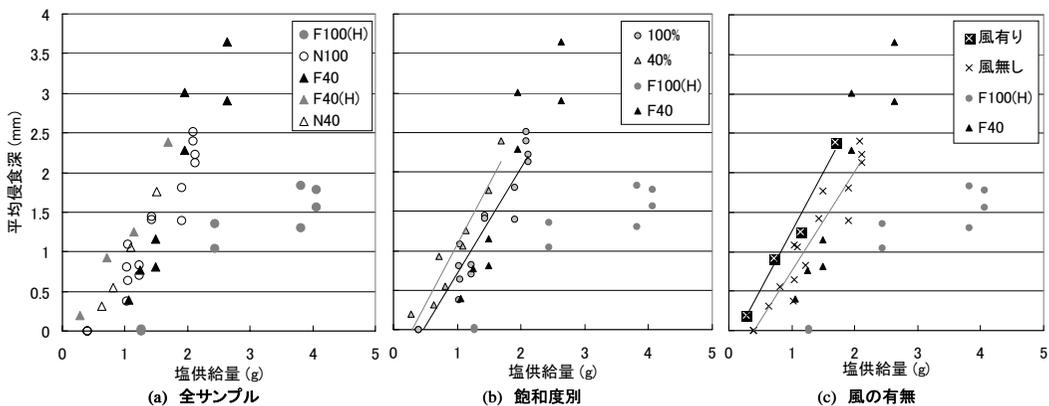
各サンプルにおいて侵食が及んでいる範囲の侵食量の平均値を求め、この平均侵食量と塩の積算供給量との関係を示したグラフを第 5a 図に示す。このグラフにおいて F40 および F100 (H) は他のサンプルに比べて大きくプロットがずれているが、これはこれら岩石の個体差により溶液の上がり方が他とは異なることに起因すると考えられる。F100 (H) に関しては溶液が一気に上昇してしまい、表面が一気に飽和状態に近づいたために十分な風化・侵食が生じず、塩の供給量の割に侵食深が十分ではなくなっている。F40 に関してもある程度早い時期に表面が飽和し、他の 40%のものに比べると塩の供給量に比べて侵食量がやや低くなったものと考えられる。また、溶液が完全に上まで上昇したことで、岩石の頂部ではエッジ効果

(Takahashi *et al.*, 1994) によって稜部分がより多く侵食されるため、最終的な侵食深は全サンプル中で最大となっている。以上二つのサンプルは特に個体差による作用が大きいと考えられる。また、これら以外のサンプルについては、岩石物性の点ではそれほど差がないものとして考える。

その他のサンプルの傾向としては、40%のものより 100%のものの方がより多くの塩が供給されているが、最終的な平均侵食深に大きな差は見られなかった(第 5b 図)。また、溶液飽和度が 100%のものより 40%のものの方がプロットは左寄りになっている。このことは、40%のほうの方が風化において塩の挙動がより効率的であったということの意味している。

3. 表面に風が吹くことによる溶液蒸発量への影響

第 5c 図において、風を当てたサンプルのほうが風化量が多いことがわかる。これは、風による溶液蒸発量の増加が効いているためと考えられる (Rodriguez-Navarro *et al.*, 1999)。第 3 図でも、F100 と N100, F40 と N40 など風以外の条件が同じサンプル同士で比べた場合、風が当たるサンプルのほうが、ある程度溶液蒸発量は多くなっている。溶液岩石表面に風が当たることで岩石表面下での溶液蒸発が促進され、風が当たらない時よりも、より深いところで塩が析出する可能性がある。



第 5 図 平均侵食量と塩の積算供給量の関係

まとめ

本実験を通じて得られた、塩類風化を支配する要素について、以下にまとめる。

(1) 岩石の表面を洗うことによって生じる表面流によって、析出した塩と岩石から引き剥がされた岩屑を取り除くと、岩石は表面が少しずつ深くなる方向へ侵食される。それに対し、塩を除去する要素がまったくない状態では、塩が岩石を保持しつつ内部および外部で析出するため、岩石は膨張する。

(2) 含水比が高くなっていくにつれて岩石内部が溶液で満たされてしまうために内部での塩の析出が生じず、むしろ表面での塩の析出が卓越する。そのため岩石は破壊されず、塩類風化は次第に生じなくなっていく。

(3) 飽和度が高いほうが一度の塩結晶化における圧力は高くなるが、供給された塩が風化に用いられる割合は低くなる。すなわち、飽和度が低くなると完全飽和状態よりも同一量の塩での風化効率が良くなる。

(4) 風以外の条件がすべて同じであれば、岩石表面が風に曝されている方が溶液蒸発量は増加し、より風化が促進される。

(5) 外部から与えた条件がまったく同じであっても、特に溶液の上昇率について大きく個体差が出ることもあり、それには何らかの岩石物性の差異が影響していると考えられる。

今回の実験から塩類風化に影響を与える幾つかの外部要因について、その傾向を知ることができた。しかし、今回の結果のみではそれらの要素が具体的にどう絡み合って塩類風化に影響を与えているかについては解明できなかった。今後はこれらの個々の要素に着目した研究を行い、それらの定量的評価を行う必要がある。

謝辞

中央大学文学部の高橋健一教授から、含水比計測のためのJT社製JE100赤外線吸光度計をお借りした。ここに記して謝意を表します。

文献

- 山田 剛 (2000): 塩類風化に関する実験的研究。筑波大学自然学類卒業論文。
- 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。筑波大学陸域環境研究センター報告, 2, 19-23.
- Goudie, A. S. and Viles, H. A. (1997): *Salt Weathering Hazards*, John Wiley and Sons, Chichester, 241p.
- Kuchitsu, N., Ishizaki, T. and Nishiura, T. (1999): Salt weathering of the brick monuments in Ayutthaya, Thailand. *Engineering Geology*, **55**, 91-99.
- Matsukura, Y. and Matsuoka, N. (1996): The effect of rock properties on rates of tafoni growth in coastal environments. *Zeitschrift fur Geomorphologie*, N. F., Suppl., **106**, 57-72.
- McBride, E. F. and Picard, M. D. (2000): Origin and development of tafoni in tunnel spring tuff, Crystal Peak, Utah, USA. *Earth Surface Processes and Landforms*, **25**, 869-879.
- Rodriguez-Navarro, C., Doehne, E. and Sebastian, E. (1999): Origins of honeycomb weathering: The role of salts and wind. *Geological Society of America Bulletin*, **111**, 1250-1255.
- Takahashi, K., Suzuki, T. and Matsukura, Y. (1994): Erosion rates of sandstone used for a masonry bridge pier in the coastal spray zone. In Robinson, D. A. and Williams, R. B. G. eds. *Rock Weathering and Landform Evolution*. John Wiley & Sons, Chichester, 89-98.

(2003年6月13日受付, 2003年7月24日受理)