

光明寺墓石外柵に使用された花崗岩の風化について

Salt fretting in the granite tombstones in Koumyoji Temple of Tokyo

松倉公憲*・高屋康彦**・小口千明*

Yukinori MATSUKURA, Yasuhiko TAKAYA and Chiaki, T. OGUCHI

I はじめに

花崗岩は堆積岩類に比較して風化速度が遅いと考えられており、そのデータもそれほど多くはない。たとえば、エジンバラにある墓石に使用された花崗岩の風化速度は 9 mm/1000年 (Geikie, 1880)、ニューヨークのクレオパトラニードルで 7.6 mm/1000年 (Winkler, 1965)、香川県五色台の石塔で 2.5 mm/700年 (飯島, 1974)、ナミブ砂漠の花崗岩トアに形成されたタフォニの内壁からの剥落量をもとに計算された風化速度の最小値が 30 mm/1000年 (Selby, 1970) などという値が報告されている (松倉, 1994)。ナミブ砂漠のデータは他のものに比較して一桁ほど大きいですが、それ以外のデータは、温帯や亜寒帯での風化環境下での花崗岩の風化速度が数mm/1000年程度であることを示している。したがって、日本のような環境下では1-2年で花崗岩が肉眼で認識できる程度にまで風化 (劣化) することは考えにくい。しかし、東京都大田区にある光明寺の墓地においては、鏡面研磨をも施された花崗岩からなる墓石外柵表面が、最近1-2年の間にさめ肌状 (ザラザラの状態) になるようなきわめて速い風化現象が観察された。そこで本稿は、この墓石に使用された花崗岩の風化の実態を報告するとともに

に、その風化の原因について若干の考察を試みる

II 墓地と墓石：風化現象発現の経緯

光明寺 (東京都大田区鶴の木 1-23-10) の墓地は、平成8年以来、環状8号線改修工事にもなう墓石移動工事を行っている。御影石 (花崗岩の石材名) を調達した石材業者および寺の住職からの聞き取りを含めてまとめると、きわめて速い風化現象発現の経緯は以下ようになる (中央技術コンサルタンツ・東急建設・宇部三菱セメント, 2001)。

(1)平成8年に、墓地の沈下対策として、関東ロームからなる墓地および周辺の表層土に、セメント系固化材 (UKC-H) を1 m³ 当たり126 kg混入して地盤改良を行った。

(2)平成11年3月から劣化の進行した墓石を、新しい御影石 (花崗岩) および大谷石 (凝灰岩) に順次切り替えてきた。御影石には茨城県真壁産の通称「小目」と呼ばれる細粒花崗岩が採用された。

(3)外柵と石塔との間に詰める土 (間詰め土) (図1) には、上述の関東ロームとセメント系固化材を混ぜた地盤改良土を使用した。

(4)平成12年12月5日、外柵の清掃時に、御影石および大谷石の表面が石材設置直後と異なっていること

* 地球科学系

** 筑波大学大学院地球科学研究科

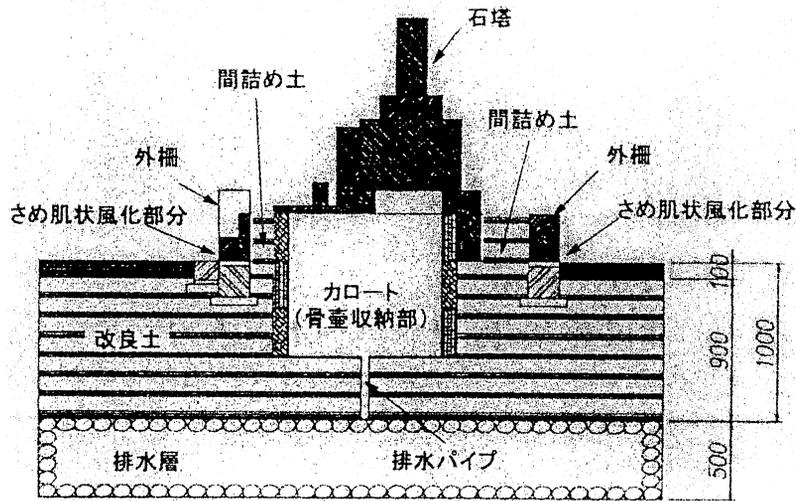


図1. 墓地の現況断面図（（株）中央技術コンサルタンツ・東急建設（株）・宇部三菱セメント（株）（2001）の資料をもとに作成）

が観察された。すなわち、御影石の表面は光沢が失われてさめ肌状となり、大谷石の表面には白色粉末結晶の析出がみられた。この粉末の生成はとくに石材の稜の部分で激しく、指でこすると劣化し粉末化した石材まで剥がれ落ちた。

III 現地における風化状態の観察と

含水比の計測

現地調査は2001年5月15日に行った。墓石を構成する石材は、一般に、中央の石塔とその下部のカロート（骨壺収納部）、および周囲の外柵とに使用されている（図1）。光明寺の場合、石塔と外柵に使用された石材は前述のように約1年前から順次新しいものに変えたものであり、その大半には小目（細粒花崗岩）が、ごくまれに大谷石（凝灰岩）と白河石（熔結凝灰岩）が使用されていた。カロートには大谷石が使用されている。

石塔や外柵の上部は光沢があり、触感もつるつるであり、建立した1年前から全く変化していないようである。一方、外柵下部の根石の表面を触るとざら

ざらの状態であり、明らかに風化していることがわかる。調査時には間詰め土はすでに除去されていたが、石材業者によれば、間詰め土に接していた外柵の外側下部が常にしっとり濡れており風化も顕著であったという（図2 参照）。参考までに、赤外線水分計を用いる方法（Matsukura and Takahashi, 1999）により、外柵外側の含水比を計測してみた。この外柵は南西を向いており、下部から30 cmの高さまでさめ肌状になっていた。高さ34 cmの所までは最近まで裏側に間詰め土があった。計測の結果を表1に示した。下部から30 cmの高さまでの風化部分（すなわち間詰め土のあった部分）では、含水比は0.046-0.071%であり、それより上部の風化していない部分の0.04%以下と比較して高くなっている。

IV 実験室における風化状態の観察および

若干の分析

(1) 風化状態の観察

石材業者より、1年ほど前から墓石に使用された花

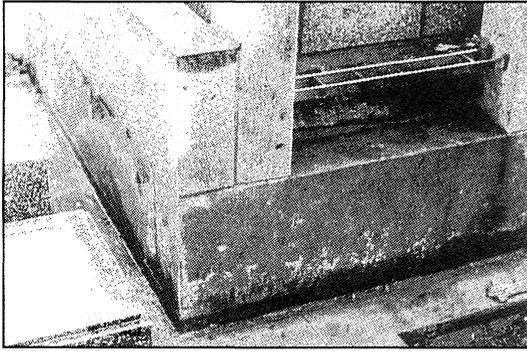


図2. 外柵外側の状況(ただし白河石)：下段のみに白色粉末鉱物の白華が見られる(株)中央技術コンサルタンツ・東急建設(株)・宇部三菱セメント(株)(2001)による)

花崗岩の中から、未風化部分、やや風化した部分、かなり風化した部分の3種類の試料の提供を受け、実験室でさらに詳細に風化状態を調査した。これら3種の花崗岩試料を並べてみると、未風化試料、やや風化した試料、かなり風化した試料という順に全体的に白っぽくなっていた。

デジタルマイクロスコープ(キーエンス社製 VH-8000)を用いた観察によると、石英と長石にはほとんど変化が見られないのに対し、黒雲母だけが選択的に剥落していることがわかる(図3)。いくつかの黒雲母では劈開面が壊されつつある過程のものがあるが、多くは黒雲母の鉱物(結晶)粒子1個が完全に抜け落ちて破壊形態をとる。この場合、抜け落ちた黒雲母に隣接していた石英や長石がピット(えぐられて形成された穴)の周囲ないし底に露出するが、その部分が褐色に変色している場合や、白色～半透明の微細な粒状物質がこのような脱落痕に点在することもある。すなわち、花崗岩中の有色鉱物である黒雲母が徐々に少なくなることにより岩石表面が白色化し、風化した岩石を触った時のざらざらという触感は黒雲母粒子が脱落して形成されたピットが、たくさん分布していることによるのであろう。

(2) さめ肌状部分からの剥落物質の鉱物同定

風化している石のさめ肌状表面から剥ぎ取った物

表1. 現場における含水比の計測結果

地面からの高さ(cm)	吸光度	含水比(%)
60	0.0514	0.040
50	0.0499	0.040
40	0.0438	0.035
30	0.0568	0.046
25	0.0588	0.046
15	0.0577	0.046
7	0.0725	0.058
4	0.0880	0.071

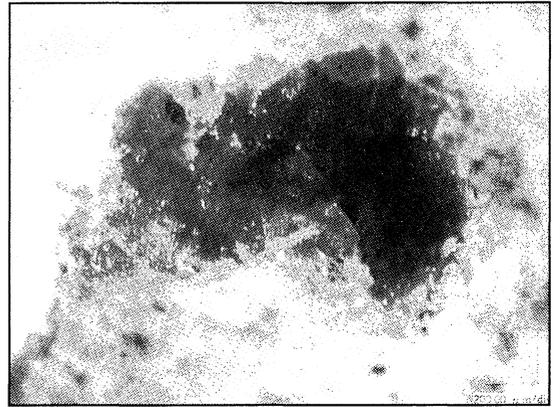


図3. 風化花崗岩試料のデジタルマイクロスコープ写真；黒雲母が抜けた穴とその縁に付着している生成物

質を構成している鉱物を、X線粉末回折分析(XRD)により同定した。使用した装置はリガク(株)製、X線回折装置RAD-Xシステムで、Cuの管球を用い、管電圧が40 mV、管電流が25 mAの条件で回折した。その結果、石英、斜長石、アルカリ長石、黒雲母、沸石が同定された。これらのうち、石英、斜長石、アルカリ長石、黒雲母は花崗岩を構成する鉱物であり、沸石も真壁産の花崗岩には含有されていることがあるといわれている(八田珠郎、私信)。

(3) 水質分析

墓地内の間詰め土に使われた土壌試料数種(固化材を混合した改良土など)2.00 gと蒸留水(40.0 ml)とを混合した懸濁液を作成し、混合数分後の溶

表2. 土壤懸濁水およびカロート内より採取した水の陽イオン濃度とpH

試料番号	試料名	懸濁水の陽イオン濃度(mmol/l)							pH
		Si	Al	Ca	Fe	Mg	K	Na	
懸濁水1	土(セロファン)	0.047	0.041	0.999	0.000	0.003	0.058	0.146	9.96
懸濁水2	通路	0.043	0.059	1.192	0.000	0.003	0.039	0.217	10.20
懸濁水3	唐櫃	0.052	0.066	0.679	0.000	0.002	0.028	0.239	10.28
懸濁水4	唐櫃と外柵の間	0.075	0.053	0.274	0.001	0.001	0.031	0.115	10.32
水1	唐櫃内の水	0.147	0.001	1.187	0.000	0.095	0.135	1.959	6.95

* 懸濁水は、土壤試料2.00g/蒸留水40.0mlの割合で混合して作成

* pHは混合直後、陽イオン濃度は混合してから24時間後の濃度を測定した

液のpHを東亜電波工業社製ポータブルpH計(HM-10P)により測定した。その後、24時間後に採水し、0.45 μm のフィルターで濾過した後、誘導結合プラズマ(ICP)発光分析により陽イオン濃度を測定した。また、カロート内より採取した水についても同様の測定を行った。ICP分析には、筑波大学分析センターの日本ジャーレル・アッシュ製マルチ/シーケンシャル高周波プラズマ発光分析装置(ICAP-757V)を用いた。

pHおよび陽イオン濃度の計測結果を表2に示した。pHについては、カロート内にたまっていた水がほぼ中性を示すのに対し、懸濁液はすべてpH 9.3-10.3のアルカリ性を示している。また陽イオン濃度の計測結果では、カロート内の水のAlとFeの濃度は若干小さいが、それ以外のイオン濃度はいずれも高い。特に、Na, K, Mg, Siの濃度が他の懸濁液と比較して高い。一方、間詰め土の懸濁液はカロート内の水と類似の陽イオン濃度であったが、Ca濃度については最小でも0.6 mmol/l以上、最大では1.0 mmol/l以上にもなり、極めて高いことが明らかになった。

V 考察：風化の原因と風化速度

まず最初に、今回対象にした花崗岩の風化プロセスについて検討する。さめ肌状に風化した部分は、間詰め土に接した外柵岩石の外側下部に限定されており、その部分はいつも濡れていたことが観察されていた。この状態は、間詰め土を除去したあとの5月

の調査時においてもこの部分の含水比が高い、という測定結果(表1)からも支持される。これに対し、石塔や間詰め土の上面より上の外柵上部は全く風化していない。これらのことより、間詰め土に接している外柵岩石の表面に浸みだした水分が風化に深く関与したことは明らかである。一般に、花崗岩は他の岩型に比べて透水しにくい、間詰め土が保水性の高い関東ロームを多く含むために、絶えず水分供給がなされている状況であったと推察される。すなわち、間詰め土から供給された水分が岩石中を浸透し、反対側(外柵外側)の表面に浸み出していたものと考えられる。

これらの知見より、墓石の外柵外側下部の風化には水(水分)が強く関与したことが推察され、このような風化プロセスとして、化学的風化および凍結破碎風化や塩類風化などの物理的風化が考えられる。まず、化学的風化について検討してみる。一般的に化学的風化は、岩石に接触する水が低pH(酸性)であるほど進行が速い。ところが、水質分析の結果(表2)はカロート内の水および間詰め土の懸濁液のpHはいずれも中性からアルカリ性を示していた。岩石に接する水のpHが高ければ、いわゆるアルカリ・シリカ反応により石英が溶解する可能性もある。しかし、マイクロスコープによる観察では石英は全く変質しておらず、石英の粒界にも全く変化は認められなかった(図3)ので、このプロセスも考えにくい。したがって、この風化現象は化学的風化によるものではないと推測される。

次に物理的風化の可能性を検討する。まず、凍結破砕風化については、墓石が東京にあり、それほど寒冷にはならないという立地環境と、黒雲母だけが選択的に風化しているという事実から、この可能性は低いと考えられる。塩類風化については、(1)大谷石や白河石の表面に形成された白色粉末物質は thenardite (Na_2SO_4) や calcite (CaCO_3) であった (宇部三菱セメント研究所, 2001) こと、(2)大谷石の風化物質が粉末状であったこと、などを考慮すると、少なくともこれらの岩石ではこのプロセスの可能性が最も高い。したがって、花崗岩についても、黒雲母の剥落によるピットには塩に関する直接的証拠は見い出されなかったものの、他の2つの岩型同様、塩類風化プロセスにより風化が進行した可能性が高い。すなわち、花崗岩における塩類風化プロセスは以下のように推定される。墓所内には間詰め土としてセメントを混ぜた関東ロームが使用された。雨水がこの間詰め土を通過する間に Ca^{2+} などの陽イオンを多量に溶かし込む。これは、間詰め土やその周辺の土の懸濁液がいずれも高濃度の Ca^{2+} を含んでいることから裏付けられる。このような水が間詰め土と接する外柵の花崗岩内に浸入し、外側に向かって徐々に浸透する。水は岩石内の鉱物粒子の粒界を通り、きわめてゆっくり岩石表面に滲み出ると考えられる。このことは、間詰め土と接している外柵岩石の外側下部において含水比が高いという測定結果から支持される (表1)。滲み出た水は外気で乾燥し何らかの塩が形成される。前記のように、大谷石や白河石では thenardite と calcite が同定されているが、花崗岩の場合では塩の特定はできなかったものの、何らかの塩が黒雲母とその周囲の鉱物との粒界で結晶化する際、その結晶圧で黒雲母を剥がしたのであろう。

間詰め土と接していない部分が全く風化していないこと、これまで間詰め土へセメントを混入したことはなく今回ほど速い劣化現象は初めて経験したという石材業者の談話などを総合して考えると、鏡面研磨面が1-2年でさめ肌状となるような風化は、風化速度としてはかなり大きいのではないだろうか。従来の報告では、湿潤温帯・冷涼帯地域における風化

速度は 0.003-0.009 mm/y 程度であり、これと比較して、1 mm 程度の大きさの黒雲母が1-2年で剥離するという今回のケースの風化速度はきわめて大きい。ナミブ砂漠の例では、塩類風化によるタフォニを用いて得られた風化速度の算定から 0.03 mm/y 以上という値が得られており、塩類風化速度が比較的大きいことを示している。このように、風化速度の観点からも今回の風化が塩類風化である可能性が支持される。

VI おわりに：まとめと風化 (劣化) 対策

岩石の風化は一般的に化学的風化と物理的風化に分類されているが、自然界ではこれらのプロセスは複合して起こっているため、これらの関与割合を分離して抽出することは難しい。今回のケースでは、セメントを混ぜた土を通過した水は強アルカリ性を示すため、アルカリ・シリカ反応の可能性も全くないとは言えない。しかし、黒雲母の選択的な風化を招いた原因は、セメントを混ぜた保水性の高い関東ロームを間詰め土として使用したことにより、岩石表面で塩が結晶化したことにあると考えるほうが可能性は高いであろう。このような塩類風化による岩石の劣化を防止する方法として、以下の2点が考えられる。

- (1)水の遮断：たとえば、間詰め土と石材の間に不透水性の物質を挟み込み、水を移動させないようにする。
- (2)アルカリ塩の供給を絶つ：間詰め土にセメントを混合しないようにする。

当該墓地の対策工事として、間詰め土を取り除き砂礫を入れる予定であると聞いた。塩類風化の原因さえ取り除けば、風化の進行は止まるはずである。

なお、本稿は塩類風化の可能性を指摘したにすぎない。今後に残された検討課題として、選択的な風化が黒雲母のみに生じた原因の解明と花崗岩を使用した外柵で形成されているはずの塩類鉱物の特定が挙げられる。

謝辞

本研究は真壁町の石材業者鬼沢商店の鬼沢克典・代表取締役、東京の川真田石材の河真田憲嗣・代表取締役から情報・試料の提供を受けて行われたものである。記して感謝申し上げる。

注1)

この方法は、近赤外線を物質に照射しその吸収量が物質表面の水分量に比例することを利用して含水比を推定するものである。岩石表面の含水比を、非破壊で短時間（数秒から数十秒）で計測できるという特性を持っている。ただし、計測値として吸光度の値が得られるのみであり、それを含水比に換算するためにキャリブレーションが必要となる。ここでは外柵に使用された岩石と同じ花崗岩（飽和含水比が 0.21 %）を使用してキャリブレーションを行ったが、その結果、以下のような式が得られた： $w = 0.8044 X$ 、ここで w は含水比、 X は吸光度）。

文献

飯島 東（1974）：瀬戸内地区の風化浸食について：特に地史的観点からその概略：本四連絡架橋に伴う周辺地域の自然環境保全のための調査報告書。国立公園協会，地形地質。80-85。

- 宇部三菱セメント研究所（2001）：光明寺墓石解析結果について。13p.
- 中央技術コンサルタンツ・東急建設・宇部三菱セメント（2001）：光明寺墓石外柵御影石の外面の劣化について（中間報告）。4p.
- 松倉公憲（1994）：風化過程におけるロックコントロール：従来の研究の動向と今後の課題。地形，15, 203-222.
- Geikie, A. (1880): Rock-weathering as illustrated in Edinburgh church yards. *Proc. Royal Soc. Edinburgh*, 10, 518-532.
- Matsukura, Y. and Takahashi, K. (1999): A new technique for rapid and non-destructive measurement of rock-surface moisture content: preliminary application to weathering studies of sandstone blocks. *Engineering Geology*, 55, 113-120.
- Selby, M. J. (1977): On the origin of sheeting and laminae in granite rocks: evidence from Antarctica, the Namib Desert and central Sahara. *Madoque*, 10, 171-179.
- Winkler, E. M. (1965): Weathering rates as exemplified by Cleopatra's Needle in New York City. *Jour. Geol. Educ.*, 13, 50-52.