

花崗岩石材の水分移動特性に及ぼす 表面仕上げの影響

高屋 康彦 (大東文化大学経営学部)

Influence of Surface Finish on the Characteristics of Water Movement in Granite Building Stone

Yasuhiko TAKAYA

要 旨

花崗岩石材の水分移動過程に及ぼす表面仕上げの影響を調べるために、三種類の表面処理を施した直方体試料を用いて室内実験を行った。“サンダー”は切削した状態のもの、“本磨き”は研磨したもの、“ビシャン”は突起の付いたハンマーで叩いて凹凸をつけたものである。試料を水中に浸漬する実験Ⅰでは、岩石中に取り込まれた水の重量が開始後に急増し、その後変化の割合は小さくなった。その値はビシャンで最も大きく、次いでサンダー、本磨きの順となり、本磨きとサンダーの差は小さかった。試料を水中から出して水分を蒸発させる実験Ⅱでは、岩石内の水の重量は時間とともに減少し、その減少の割合は時間とともに小さくなった。実験開始直後を除き、残留水の重さはビシャンで最も小さく、サンダーと本磨きではほぼ同じであった。試料の下部を水に浸けて上部から水分を蒸発させる実験Ⅲでは、水の総重量が時間とともに減少し、その速度はビシャンで最も大きく、他二試料との差は時間とともに大きくなった。蒸発した水の量はビシャンで最も多く、次いでサンダー、最も少ないのが本磨きであった。これらの実験結果から、表面の仕上げによって水の挙動が大きく異なることがわかった。花崗岩石材である庵治石の水分移動には、試料下部からの水の吸い上げと上部での蒸発が密接に関わっており、両者は環境等の諸条件によってどちらも律速段階になる可能性がある。

1 はじめに

花崗岩は、マグマが地下深部で冷却固結した深成岩の一種である。国内では“御影石”という石材名で広く認知されており、その由来は六甲山地南麓に位置する兵庫県神戸市東灘区の“御影”という地名にある。この六甲花崗岩の利用は古く中世に遡り、江戸時代には石の切り出しが最盛期を迎える。花崗岩の石材としての用途は、墓石はもちろん石垣や建物の土台・基礎や壁材、美術工芸品など多岐にわたる。表面に加工が施された墓石などの製品が、野外に置かれて雨風に曝される

表1 叩き仕上げの種類と特徴

仕上げの種類	硬岩	軟岩	特徴
叩き			
こぶ出し	○	○	玄能という工具で叩き落し、こぶ状の粗い凹凸を形成する
のみ切り	○	—	のみを使って粗面化する
ビシャン	○	○	ビシャンという工具で叩いて平滑化する
小叩き	○	○	小叩き用のみで細かな平行線の刻み目をつける
突っつき	—	○	突っつきという工具で一様に突いて凹凸をつくる
削り	—	○	両刃などを用いてほぼ平らに削り取る
玄能こづき	—	○	玄能という工具で叩いて一様に粗い凹凸をつける
割り肌	○	○	原石を割ったまま肌とする

ケースも少なくない。その場合、仕上げ面の耐久性の問題として、風化・劣化がどう進むのかが重要な関心事となる。松倉ほか(2001)は、墓石(石塔)を囲う外柵に用いられた花崗岩が、人為的にセメントを混入させた土から水を吸い上げ、表面で水分が蒸発した際の塩類風化を報告している。このとき磨き仕上げが施された表面において、鮫肌状に形成された凹凸が肉眼で確認されている。花崗岩石材の表面処理の方法には、製品の種類や用途に応じて複数の方法があり(高村、1990; 武井・中山、1992)、例えば砥石で研磨する“磨き”は墓石(石塔)に対して施されることが多い。“叩き”は、専用の工具を用いて凹凸をつける手法であり、その主要な例は灯籠である。武井・中山(1992)がまとめた叩き仕上げの種類を表1に示す。その他の仕上げとしては、高温で焼く“バーナー”や高圧で砂を吹き付ける“サンドブラスト”などがある。本研究では、花崗岩石材の水分移動過程に及ぼす表面仕上げの影響を検証するための基礎実験を行った。実験に用いた試料は、サンダー、本磨き、ビシャンの三種の表面仕上げを施したものである。設定した吸水・乾燥に関する条件は数通りあり、試料を完全に水に沈めて吸水させる実験、吸水した試料を空調の効いた室内に静置して水分を蒸発させる実験、試料の下部のみを浸水させて上部から水分を蒸発させる実験を実施した。それらの結果と得られた知見を報告する。

2 実験試料

実験に使用した岩石は、香川県高松市庵治町・牟礼町に産する庵治花崗岩である。石材として広く知られている名は庵治石であり、墓石・彫刻・建築材料等に利用されている。庵治石はきめ細かい細粒花崗岩であり、本実験には平均粒径約0.5 mmのものを用いた。地質の概要として、この花崗岩は白亜紀後期0.8-0.9億年前に貫入したマグマが地下で固結したもので、新期領家帯に属する(石原、1991)。構成鉱物とモード組成は、斜長石37.6%、アルカリ長石26.4%、石英29.4%、黒雲母6.5%、ホルンブレンド0.1%、その他0.2%である(杵掛ほか、1979)。Takaya et al. (2014)が報告した化学組成として、主要10元素(SiO₂, TiO₂, Al₂O₃, FeO+Fe₂O₃, MnO, MgO, CaO, Na₂O, K₂O, P₂O₅)についての分析結果を表2に示す。それぞれ典型的な組成を示していた。実験には、高屋ほ

表2 庵治花崗岩の化学組成 (Takaya et al., 2014) と基礎物性

	Aji-granite
SiO ₂ (wt%)	72.14
TiO ₂	0.31
Al ₂ O ₃	14.55
FeO+Fe ₂ O ₃	2.62
MnO	0.05
MgO	0.84
CaO	2.85
Na ₂ O	3.83
K ₂ O	2.45
P ₂ O ₅	0.07
Total	99.71
bulk density (g/cm ³)	2.63
true density (g/cm ³)	2.65
porosity (%)	0.81

か (2013) の風化実験と同様、翼石材からご提供いただいた細粒のものを採用した。この岩石の物性値として、かさ密度、真密度および間隙率を求めた (表2)。かさ密度は重量と寸法から算出し、真密度はピクノメーター法で測定した。間隙率は 0.81% であり、緻密な材料であることが確認できた。なお、この庵治石の風化については、Takaya (2014) では溶解特性を、Takaya et al. (2014) では変質特性を論じており、詳細はそれらを参照されたい。

三種類の工程で表面処理を施しつつ、一般的な墓石の石塔と同じ縦長の直方体として 5.0 cm×5.0 cm×7.0 cm になるよう試料を整形した。各工程の名称は (1) サンダー、(2) 本磨き、(3) ビシヤンの三種である。各試料の写真を図1に、重量と自然含水比を表3に示す。“サンダー”とは、ディスクグラインダーとも呼ばれる回転式の小型電動工具の名称で

ある。本実験では #46 番の円盤状の砥石を取り付け、切削時にできたキズを消して仕上げた。磨きとは、切削面を粗い砥石から徐々にきめ細かい砥石に替えながら研磨して光沢を出す仕上げを指す。本研究で採用したものは最も光沢のある“本磨き”であり、高屋ほか (2013) のバフもしくはファイナルに相当する。本磨き試料の各面の研磨手順を表4にまとめた。現在、石材の研磨は自動研磨機による機械加工となっている。研磨機に取り付ける研磨盤の砥石の粒度を #1000 のように数字で示している。バフとは一般に布や皮など柔らかい素材の円盤のことであり、研磨剤を練り込んだ樹脂製のバフによる仕上げが一般的となっている。ある程度高温でないとツヤが出にくいいため、圧力を加えて回転させながら研磨を行い、約 75 ~ 90°C の上限温度で仕上げられる。ファイナルという名称は、三和研磨工業 (株) 製研磨盤の製品名、サンワファイナルに由来する。“ビシヤン”とは突起の付いたハンマー工具のことであり、あるいはこれを用いて表面を叩いて凹凸をつける仕上げを指す。以前はすべて手作業であったが、今回は空圧 (圧縮された空気が元に戻ろうとする力を利用する) 駆動方式のチップパーと呼ばれる工具にノミ状のアタッチメントを取り付けて約 1 時間かけて仕上げた。最も光沢が少ないのがサンダーであり、鏡面光沢のある磨きとは肉眼で容易に区別することができる。ビシヤンはわずかな凹凸があり、乾燥時には全体的に白みがかっている。サンダーと本磨きについては、試料の表面粗さを測定した。用いた計器は、TIME 社製表面粗さ計 3100 である。一試料につき 10 カ所測定し、サンダーにおける平均値は 3.02 (μm) でその時のカットオフ値は 2.5 (mm) であった。本磨きでの平均値は 0.21 (μm) でその際のカットオフ値は 0.8 (mm) であった。さらに本磨きのみ、グロスチェッカ (HORIBA 社製 IG-320) を用い、表面の光沢度を測定した。一試料につき 6 カ所で計測し、その平均値は 87.7 であった。なお、表面粗さについては、JIS B0601 (2013) に規定されている。光沢度は JIS Z 8741 (1997) に定められており、屈折率 1.567 のガラス表面で 60° の入射角とした場合の反射率 10% を光沢度 (Gs60) 100 としている。測定面



図1 実験に用いた試料の写真：(a) サンダー，(b) 磨き (c) ビシャン

表3 各試料の乾燥・自然重量

	サンダー	本磨き	ビシャン
乾燥重量(g)	509.86	514.05	494.68
自然重量(g)	509.96	514.14	494.78
自然含水比(%)	0.0192	0.0183	0.0204

表4 本磨き試料の研磨工程および使用した研磨盤の種類

加工面	研磨の仕方	研磨盤の種類または砥石の粒度	手順
上下	自動研磨機	粗, #200, #400, #800, #1000, グロス*(#2000相当), ハイグロス*(#4000相当), ファイナル*	(1)最初に面積の大きい上下面を研磨してカット
左右(1)	手動研磨機	粗, #200, #400, #800, #2000, バフ	(2)1組の左右両面を研磨してさらにカット
左右(2)	手磨き	粗, #200, #400, #800, #1500, #3000, バフ	(3)残った左右両面をベビーサンダーに研磨盤をつけて磨く

*三和研磨工業の製品名；()内の番手は仕上がり面に基づく表記

積は 12×6 mm の楕円であり、入射角および受光角は 60 度である。

3 実験方法

実験は条件の違う I・II・III の三種類を設定・実施した。実験 I では、岩石を水に浸漬し、吸水状況を把握するために重量を測定した。測定時には、濡れたキムタオルで水滴が垂れない程度に表面を拭き、重量を測定した。試料が水を吸わなくなった時点で終了となる（開始から 359 時間、約 15 日後まで実施）。実験が行われた環境は、エアコン制御で気温が 25.0°C に保たれた室内であり、換気扇を作動させておいた。実験 II では、水から引き揚げた試料を、実験 I と同じ 25.0°C の室内に置き、数日おきに重量を測定した。試料は 5.0 cm 角の正方形面が上下面となるように、併せて各試料の間隔が 20 cm となるように水平な台の上に静置した。実験中は試料の上下を裏返さなかった。水が蒸発しなくなるまで実験を続け、終了時の継続時間は 507 時間、約 21 日後までであった。実験 III では、試料の下部を 25 (ml) の水が入ったタッパー容器に浸け、この容器の蓋より上部はむき出しになった状態で室内に静置した。試料および容器の様子を図 2 に示す。容器の蓋と試料の隙間はシールテープで塞ぎ、空気が出入りできないようにした。上から 4.3 cm の部分がむき出しになっており、実験開始時に水に浸かっているのは下から約 1.5 cm までの部分である。実験はエアコンを効かせていない室内（東松山キャンパス第二研究棟の研究室）で、開始から 2587 時間後（約 108 日後）まで行い、数日おきに容器を含めた総重量を測定した。

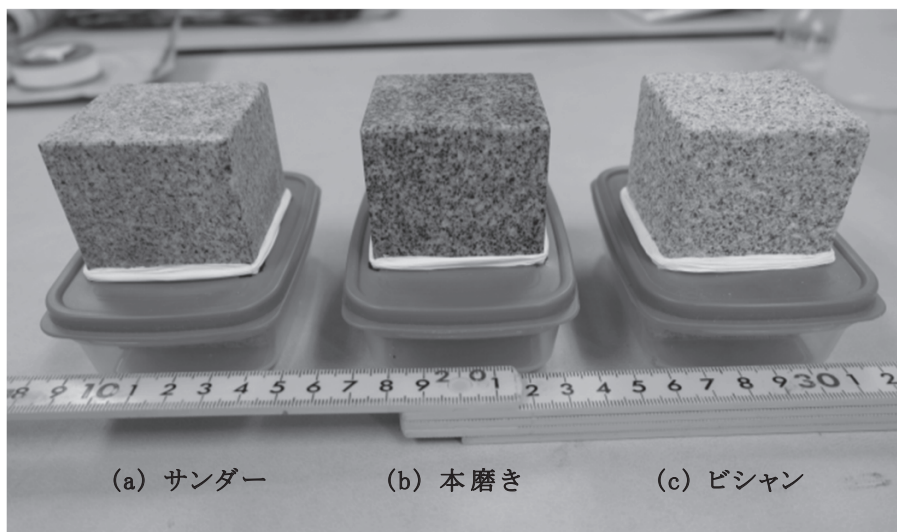


図2 実験Ⅲの容器と試料の写真

4 結果

実験Ⅰにおける各試料内に吸収された水の重さの時間変化を図3に示す。水の重量は実験開始後に急増し、その後変化の割合は小さくなった。100時間を越えたあたりから、次第に一定の値に近づいていった。水の重量は、ビシヤンで最も大きく、次いでサンダー、本磨きの順となっていた。全般的な傾向として、ビシヤンとサンダーの差に比べて本磨きとサンダーの差の方が小さかった。

実験Ⅱにおける各試料に残された水の重量の時間変化を図4に示す。水の重量は時間とともに減少し、その割合は経過時間が短いほど大きく、その後減少する傾向があった。実験開始時点では、実験Ⅰで水を最も吸ったビシヤン、次いでサンダー、本磨きの順であった。20分経過後にはビシヤンの残留水の重量は他の試料と同程度の値になり、30分経過後にはサンダーと本磨きを下回って最も小さくなった。サンダーとビシヤンの値は実験を通してほぼ同じであり、同様の变化傾向を示した。

実験Ⅲにおける各試料の水の総重量の時間変化を図5に示す。容器内に残る水と試料が吸っている水の総重量は、蒸発に伴って時間とともに減少した。水の総重量の値は、本磨きで最も大きく、次いでサンダー、ビシヤンの順に大きかった。与えた水の量から計測した総重量を引いて蒸発量を

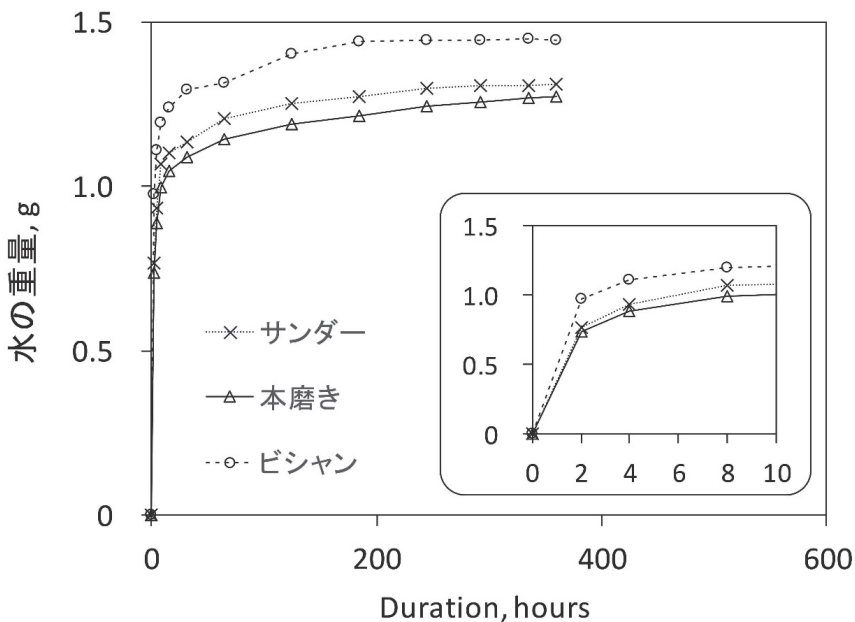


図3 実験Ⅰにおける水の重量の時間変化

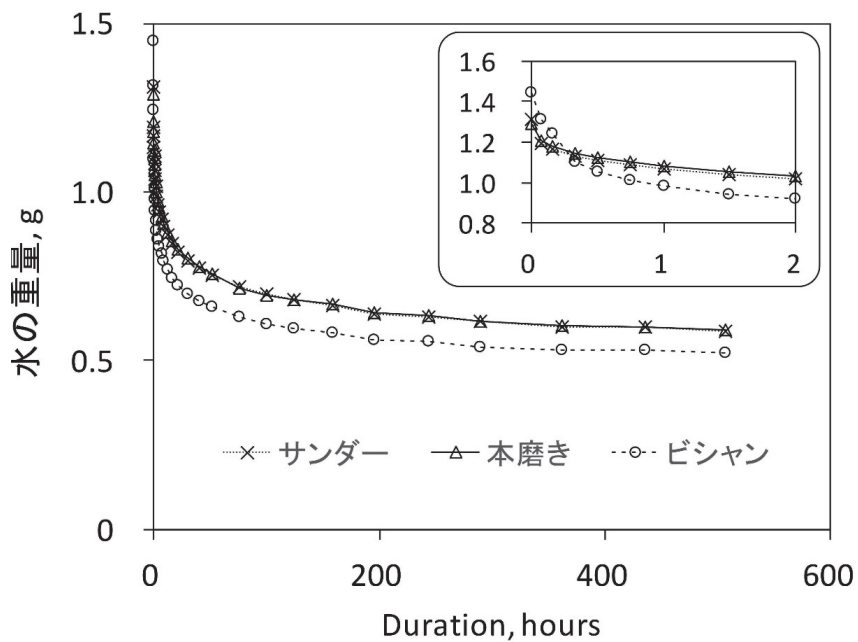


図4 実験Ⅱにおける水の重量の時間変化

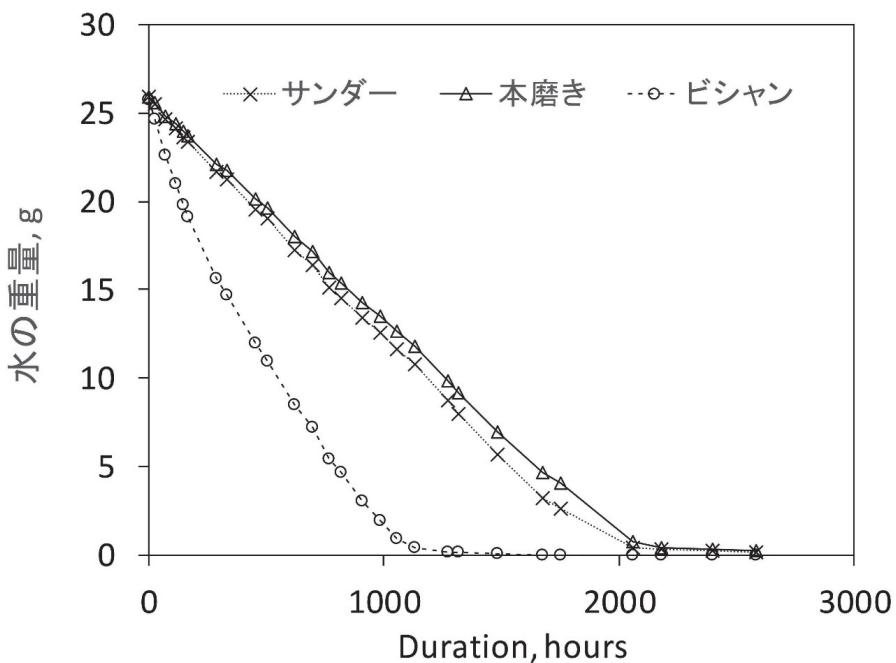


図5 実験Ⅲにおける水の重量の時間変化

算出すると、ビシャン試料からは300時間後には約10(g)、700時間後には約19(g)弱であった。それだけの水が岩石内を下から上に移動していったことになる。1270時間後には、残りの水の総重量が0.2(g)以下となり、ほぼすべてが蒸発していた。サンダー試料から蒸発した水の量は300時間後には約4.5(g)、700時間後には約9.5(g)であり、本磨き試料から蒸発した水の量は300時間後には約4(g)、700時間後には約9(g)弱であった。サンダーと本磨きからの蒸発量は、ビシャンのその半分以下であったことになる。サンダーでは2398時間後、本磨きでは2587時間後に、残りの水の量が0.2(g)以下となり、ほぼすべてが蒸発していた。時間の経過に伴う減少の速度(割合)は、水がなくなる(約2000時間後)までは、サンダーと本磨きともにほぼ一定であった。サンダーと本磨きの差は、ビシャンと他二試料の差に比べて非常に小さかった。ビシャンでは他の試料に比べて減少の速度が大きく、その差は水がなくなる(約1000時間後)までは時間とともに大きくなる傾向にあった。

5 考 察

5-1 水分移動の方向とドライビングフォース

実験に用いられた三種の試料は同一の花崗岩である。内部の構造は同じで、違いは表面の処理だけである。各実験における水分移動の方向を整理すると、実験Ⅰでは試料を水に浸けているため、水の移動は表層(外)から内の方向である。実験Ⅱでは水から出して表層を大気にさらして水分を蒸発させており、移動は実験Ⅰの逆、内から表層(外)の方向である。実験Ⅲでは、下部の表層(外)から内の方向へ入った水は、上の方向に移動し、内から表層(外)に方向に進んで蒸発した。水分移動のドライビングフォース(推進力)は、実験Ⅰにおいては、水の表面張力で毛管現象が生じたと考えられる。このとき中に水が入るためには空気が抜ける必要がある。実験Ⅱにおいては、大気中への蒸発で水分が失われることにある。このとき、表面張力による毛管現象で水分が少なくなった表層へ水が移動したことで、継続して蒸発が進んだと考えられる。実験Ⅲにおいては、実験Ⅰと実験Ⅱの両方の性質がみられ、下部で毛管によって吸い上げられた水は上部で少しずつ蒸発し、それに伴って下部からの移動が促されたと考えられる。

5-2 サンダーと本磨きの比較

サンダーと本磨きの違いは表面の処理にあり、三試料の中で凹凸が最も小さいのが本磨き、次に少ないのがサンダーである。各実験についてサンダーと本磨きとの比較を行うと、水を吸わせる実験Ⅰではサンダーの方が本磨きに比べて多くの水が試料中に移動し、実験開始から数十時間後まではその速度が速かった(図3)。この結果は本磨きよりサンダーの方で凹凸が大きく、試料の表面積が広いことと調和的である。それ以降は、両者の差が実験の最後まで減少していった。水中から出して水分を蒸発させる実験Ⅱでは両試料の間にほとんど差が認められなかった(図4)。実験Ⅲでは、サンダーの方が本磨きに比べて多くの水が下から吸い上げられ、上に移動して蒸発していっ

た(図5)。その差は時間経過とともに大きくなり、100時間後には約0.25(g)、300時間後には約0.5(g)、700時間後には約0.75(g)、1100時間後には約1.0(g)となっていた。最も差が大きくなったのは1750時間後の約1.5(g)であり、その後は減少する傾向にあった。両試料の差の特徴として、実験Ⅰでは最初に差が生まれてその後徐々に減り、実験Ⅱではほとんど差がなかった。実験Ⅲでは、僅かではあるが時間とともに差が開いており、実験Ⅰの初期と似た傾向にあった。実験Ⅲで水の重量が低下するには、試料下部における水の吸引が進むことと、上部でスムーズに蒸発することの両方が必要であると考えられる。これらの差は、サンダーと本磨きの表面の違いが生んだものである。

5-3 ビシャンと他二試料の比較

ビシャンと他二試料の違いは表面の処理にあり、他二試料に比べてビシャンで凹凸が大きい(サンダーと本磨きの違いは前節で議論済み)。各実験の結果についてビシャンと他二試料との比較を行うと、水を吸引させる実験Ⅰでは、すべての測定時でビシャンの値が最も大きかった(図3)。吸った水を蒸発させる実験Ⅱでは、始めの20分間の傾向として、ビシャンにおいて他二試料より急激に蒸発が進んで値が減少した(図4)。この間に生まれた0.1(g)弱の差は、実験の最後まで無くならなかった。下から水を吸わせる実験Ⅲでは、他二試料に比べてビシャンで多くの水が上に移動し、蒸発していった(図5)。その差は時間の経過とともに大きくなり、100時間後には約3(g)、300時間後には約6(g)、700時間後には約9(g)となっていた。差が最大になったのは1050時間後で、ビシャンとサンダーとでは約10.6(g)、ビシャンと本磨きとでは約11.6(g)であった。1050時間後以降は、差は減少する傾向にあった。ビシャンで蒸発量が多いという結果は、ビシャンでは凹凸が他に比べて圧倒的に大きく、表面積が広いことに起因すると考えられる。ビシャンと他二試料との差の特徴として、実験Ⅰ・Ⅱでは最初に差が発生してその後ほぼ維持され、実験Ⅲでは時間とともに差が開いていったことが挙げられる。実験Ⅲで水の総重量が減少するには、下部で吸い上げられた水が上部から蒸発する必要がある。両者は密接に関わり合いながら全体として進んでいると考えられる。これらの差は、ビシャンと他二試料の表面の凹凸の違いによって生じたものである。

5-4 水分移動の律速要因

本節では、実験Ⅲにおける水の総重量変化を一連の反応と考え、それを律速する要因を検討する。上部での蒸発は、下部からの吸い上げを継続的に進めるために必要な現象であり、逆に下部で水が浸透しなければ上部に水が到達せず、外に出ていくことはできない。実験Ⅰ・Ⅱ・Ⅲの結果を精査したこれまでの議論から、試料下部における水の浸透と上部での蒸発のどちらも律速段階になり得ると考えられる。両者の関係がどうなっているのかについては、今回は突き止めることができなかった。まず早急な課題として、試料表面の面積や凹凸の度合いを同一の指標で適切に評価する必要がある。さらに表面の凹凸の程度と水の浸透・蒸発しやすさとの関係について議論を進めるためには、内部の空隙の構造の影響、すなわち他の岩種の試料でも同じ結果が得られるのかを検証し、

環境要因の影響に関して議論を進めたい。それらは今後明らかにしていきたい。

6 まとめ

日本の代表的な花崗岩石材の一つである庵治石を用いて、表面仕上げが水分の移動過程に及ぼす影響を調べる室内実験を行った。直方体に整形した試料に対し、施した表面処理は三種である。一つ目は砥石を取り付けた回転式の小型電動工具で切削時にできたキズを消した“サンダー”、二つ目は切削面を粗い砥石から徐々にきめ細かい砥石に替えながら研磨して光沢を出した“本磨き”、三つ目は突起の付いたハンマー工具で表面を叩いて凹凸をつけた“ビシャン”である。実験Ⅰでは岩石を水に浸漬させた。水の重量が実験開始後に急増し、その後変化の割合は小さくなった。岩石中に移動した水の重量は、ビシャンで最も大きく、次いでサンダー、本磨きの順となり、概して本磨きとサンダーの差は小さかった。実験Ⅱでは水から引き揚げた試料を静置した。外へ移動した水の重量は時間とともに減少し、その割合は経過時間が短いほど大きく、その後減少する傾向があった。開始直後の数十分を除き、水の重さはビシャンが最も小さく、サンダーと本磨きの値は実験中ほとんど同じであった。実験Ⅲでは試料下部を水に浸け、上部はむき出しにして水分を蒸発させた。水の総重量は時間とともに減少し、その値は本磨きが最も大きく、次いでサンダー、ビシャンの順であった。ビシャンからの蒸発は他の試料に比べて顕著であり、時間経過に伴う減少割合が大きく、他の試料との差は継続的に大きくなった。今回、同じ岩石であっても表面仕上げによって水の挙動に大きな影響があることが明らかになった。花崗岩石材である庵治石の水分移動過程には、試料下部からの水の吸い上げと上部での蒸発が密接に関わっており、環境等の諸条件によってどちらの現象も律速段階になる可能性がある。

謝 辞

本研究を進めるにあたり、香川県高松市の(有)翼石材の高橋晋也氏には試料をご提供頂き、表面の加工・研磨に関して多大なるご協力を頂きました。筑波大学の松倉公憲名誉教授には岩石表面の水分計測に関する知見をご教授頂き、同生命環境系の八反地 剛博士には実験室の利用についてご配慮を頂きました。ここに記して深謝致します。

参考文献

- 石原舜三 (1991) 庵治石—その利用の歴史と地質的背景：地質ニュース, **441**, 60-67.
- Matsukura, Y. (2001) Calibration of rock-surface moisture content using an infrared optical moisture meter: the relationship between absorbance intensity and moisture content of several types of rock. Ann. Rep. Inst. Geosci. Univ. Tsukuba, **27**, 7-10.
- Matsukura, Y. and Takahashi, K. (1999) A new technique for rapid and nondestructive measurement of rock-surface moisture content: preliminary application to weathering studies of sandstone blocks. Engineering Geology, **55**, 113-120.
- 松倉公憲・高屋康彦・小口千明 (2001) 光明寺墓石外柵に使用された花崗岩の風化について：筑波大学陸域環境研究センター報告, **2**, 31-36.

花崗岩石材の水分移動特性に及ぼす表面仕上げの影響

日本工業規格 JIS Z 8741 (1997) 「鏡面光沢度—測定方法」：日本規格協会, 18p.

日本工業規格 JIS B 0601 (2013) 「製品の幾何特性仕様 (GPS) —表面性状：輪郭曲線方式—用語, 定義及び表面性状パラメータ」：日本規格協会, 44p.

鷹村 権 (1990) 「建築学及び岩石学から見た石材と都市美—原色石材図鑑」：松永書店出版部, 470p.

Takaya, Y. (2014) Which constituent mineral is dominant in granite weathering? Solution-sided approach by a laboratory experiment, *Geoderma*, **230-231**, 204-211.

高屋康彦・八反地 剛・松倉公憲 (2013) 花崗岩墓石の風化に及ぼす表面研磨の影響—室内実験による予察：地形, **34**, 291-300.

Takaya, Y., Matsukura, Y. and Hatta, T. (2014) Differential roles of plagioclase and biotite in the early stage weathering of granite: a solid-sided approach combining laboratory experiment and surface analysis, *Zeitschrift für Geomorphologie*, **58-2**, 233-249.

武井吉一・中山 實 (1992) 「石と建築：材料と工法」：鹿島出版会, 161p.

(2019年9月26日受理)