

石造物による岩石の風化速度の見積もり

—千葉県南房総市の石垣の例—

高屋 康彦 (大東文化大学経営学部)

Estimating Rock Weathering Rates by Stone Buildings: The Case of Stone Wall at Minamiboso, Chiba, Central, Japan

Yasuhiko TAKAYA

要 旨

岩石の風化速度を見積もるため、千葉県南房総市にある設置時期を推定できる4段に積まれた石垣を対象に、サイズの揃った下から3段目までの各々の砂岩礫について窪み深さを計測した。窪み深さの値は、下から2段目において最も大きかった。石垣の推定設置年から、風化の開始時期を昭和38年、継続時間を54年として、窪み深さの成長速度を算出すると、最深部で1.02-1.30 mm/yr、平均で0.65-0.83 mm/yrという値が得られた。既存のタフォニの成長速度の報告値と比較すると、最深部の値は海水飛沫帯での値に近く、平均の値は沿岸部の値に近かった。本研究で対象とした石垣は海岸線から約60 m離れており、海水からの塩分供給と表層での塩類析出による風化作用を念頭に置いた場合、その環境条件に優位性は認められない。過去の事例と比べて風化が進んでいることから、塩類風化だけでなく、スレーキングなどの他の風化が作用していることが示唆される。

1 はじめに

一般に、岩石の風化速度を正確に見積もることは難しい。その理由の1つは、岩石の風化が進行する速度が、非常に遅いことにある。もう1つの理由は、風化が開始された時期を特定しにくいことにある。すなわち、現場で対象を観察している時に、一体どのくらい時間が経過しているのかわからないのである。前者の速度の遅さの問題を回避するため、軟岩や煉瓦等の比較的強度の小さい材料で、現在進行中の現象を観測した事例がある(高屋・小口, 2011; 高屋ほか, 2011; 高屋, 2017)。これらは、岩石の性質および環境などの条件が整った場合のみの数少ないケースである。次に、後者の開始時期および経過時間が不明瞭である問題を回避する方法として、建設・設置年代を推定・特定できる野外に置かれた石造物を利用した研究がある。もっとも初期には、埋葬年が刻印されている墓石が利用された(例えば、Rahn, 1971)。これらのケースでは劣化の程度を定量的

に評価することができない問題点があった。離水年代が判明している海岸段丘を使用した研究として、Matsukura and Matsuoka (1991, 1996) は、段丘崖に形成されているタフォニの深さの成長速度を見積もっている。同様に、設置年代が判明している海岸にある橋の橋脚を利用したケースがある(高橋ほか、1993; Takahashi et al., 1994; 青木・松倉、2005; 高橋・松倉、2006)。このケースでは対象となる橋脚を構成する石垣に波が直接作用するため、風化だけでなく、相当程度の波による侵食作用を受けている。このような複雑化した現象を整理・区分して評価・議論する試みがなされている(Matsukura, 2000)。さらに、石灰岩上に定置された大きな岩が雨除けの傘の役割を果たし、溶食が進まずに台座として残った部分を利用することで、露出している石灰岩から成る面の低下速度を見積もった研究群もある(松倉ほか、2005; 青木ほか、2006, 2007, 2008; 青木・松倉、2009; 早川ほか、2009; 若狭ほか、2009)。

千葉県南房総市白浜の旅館「紋屋」には、敷地の南側(海岸側)の国道に面した石垣がある。その岩石の風化が進んでおり、一部が窪んでいる様子が見受けられる。この岩石は、周囲の岩石海岸に見られるものと同じ赤褐色および灰緑色を呈した砂岩である。赤褐色を呈した砂岩は、旅館の門扉に近い東側に見受けられ、あまり窪みは発達していない。それに対して、西側に多い灰緑色の砂岩の方では、モルタルの目地の部分より窪んでいる傾向が認められる。そこで本研究では、この灰緑色砂岩を対象とし、石垣の一部の区間で窪み深さを計測した。その結果得られた分布の特徴や成長速度について報告する。

2 調査地域

調査対象の石垣は、千葉県南房総市白浜に位置する旅館「紋屋」の敷地内にあり、南側を走る国道410号に面している(図1)。全体の長さは約100mでL字型になっており、高さはほぼ均一で1.2mである。東側には側道に面した18mほどの区間があり、この面は南西を向いている。国道とのT字の交差点付近、石垣の手前には、青みがかかった岩石の露頭が存在する(図2a)。この石は石垣に使われているものと同種である。国道に面した南向きの区間は、大小2つに分かれている。交差点に続く部分は長さ80mの最も長い区間である。さらに東側に、門扉を挟んで5mほどの短い区間がある(図2c)。調査対象としたのは、南向きの長い区間の一部である。なお、石垣手前の基部には岩石の破片や粒状に分解されたものが溜まっており、これは岩石が雨風に曝されて風化し、自然に崩落したものと考えられる。旅館の建設年および石垣の設置年について館主の高尾憲資氏に尋ねたところ、現存する旅館は昭和37年に別館として建設され、この地での創業当時、石垣は存在していなかったとのことである。その後設置されたことになるが、先代の館主の時代の出来事なので、詳細は不明ということであった。しかしながら、後日、石垣が写っている写真が発見され、事態が急転した。昭和38年に宿泊したお客さんから当時の古いパンフレットの提供があり、そこに写真が掲載されていたのである。すなわち、昭和37年から38年の間に石垣が設置されたことが判明したことになる。本研究では、風化速度の計算の際、その開始時期を昭和38年として見積もる

石造物による岩石の風化速度の見積もり



図1 調査対象とした石垣の位置



図2 石垣の写真：(a) 全景、(b) 西側、(c) 東側、(d) 窪み計測の様子

こととする。

石垣周囲の地質は、鮮新世の千倉層群白浜層であり、川上(2006)によると砂勝ち砂岩泥岩互層とされる。砂岩は凝灰質で主として赤褐色を呈し、ほかに灰緑色のものもある。泥岩は主として数cmの層厚からなり、暗灰色である。同じ白浜層の砂岩でも、色見の違うものが存在することは、旅館の南側に広がる岩石海岸海岸の露頭においても確認できる。これらは白浜層の典型的な露頭である(小竹, 1988; 伊藤ほか, 2005)。紋屋旅館の石垣に使われている岩石には白浜層の凝灰質砂岩の赤褐色のものと灰緑色のものがあり、赤褐色のものよりは灰緑色の方が窪んでいることがわかる。井上ほか(2002)は、白浜層の砂岩(および礫岩)は、風化面において赤褐色を呈する点で極めて特異だと述べている。綱川・小林(1984)は、野島崎に分布する白浜層から採取した火山岩礫のK-Ar年代を測定し、2.6-3.4Maという値を報告した。なお、紋屋旅館においては門扉にも地元の岩石が使用されている。鋸南町の鋸山等で産出される石材として知られる砂質凝灰岩の「房州石」である(図2c)。また、気象データの参考値として、最も近くにある気象庁のAMeDAS観測地点である館山(北北西に約9.5km)においては、年間降水量の1969年から2017年までの平均値は1800mmであった。この降水量は、ほぼ日本の平均値に相当する。年間の平均気温は平均で15.8°C、年間の日照時間は平均で2022時間であった。

3 調査方法

石垣に使用されている礫の窪み深さを計測した。対象とした区間は、南側の道路に面した東西約80mにわたる長い区間の西側の部分で、L字型の角から消火栓までの約19mである(図2b)。石垣が設置されている場所の標高は約5mであり、南方の海岸線までの距離は約60mである。計測には折れ尺を用い、隣り合う石と石の隙間を埋めるモルタルの目地に基準線となる直線を渡し、そこからの深さを計測した(図2d)。その際、目地が崩れ落ちていて直線を渡せないときには、周囲の目地の高さを基準とした。一般に、石垣の石は目地に比べて外側に張り出して積まれるケースが多い。本研究の計測は目地の高さを基準としており、この見積もりでは速度値をやや小さめに見積もっていることをここに確認しておく。対象とする石垣の石積みは谷積ないし矢羽積であると思われる。上の石を下の石の谷に落として隣に立てかけ、それを反復させてある(大久保・大久保, 1958)。この石垣は、4つの段から構成されている。最上段は同じ高さに切り揃えられており、石のサイズは統一されていない。一部抜け落ちてしまっている箇所もあった。今回、計測の対象としたのは、下から数えて3段目までである。各段のおおよその高さ(石の中心部を計測)は、下から1段目で20cm、2段目で50cm、3段目では80cmとなっている。計測数は、3段目では58、2段目では60、1段目においては54である。南向きの石垣の東側に多い赤褐色の石はほとんど窪んでいないため、計測対象から除外した。計測日は2017年5月15日であり、上述のとおり開始時期を昭和38年とすると、風化継続時間は54年となる。

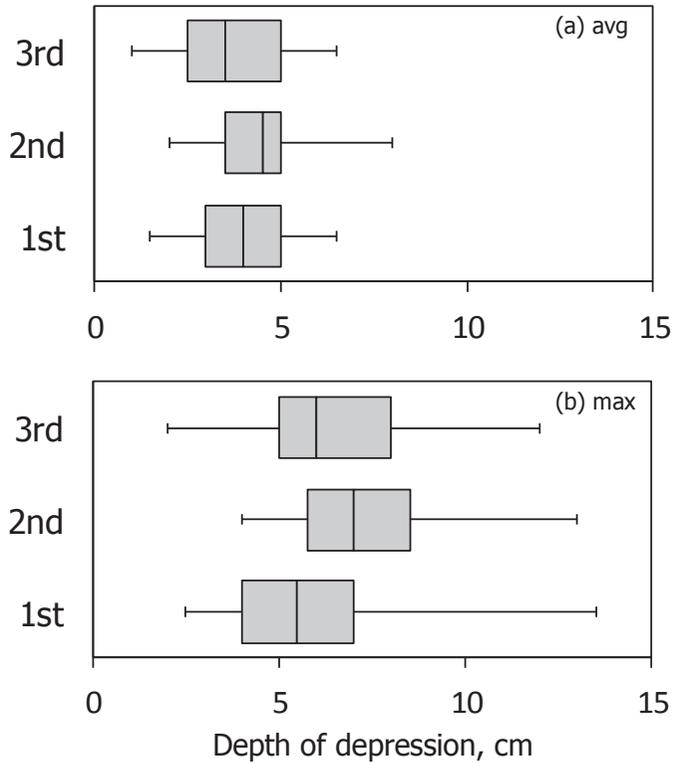


図3 計測した窪み深さの箱ひげ図：(a) 平均、(b) 最大値

4 結果

窪み深さの計測結果を下から1段目、2段目および3段目と順に並べ、箱ひげ図にしたものを図3に示す。箱ひげ図の箱の部分には、四分位数の情報、すなわちデータを小さい順に並べて積算した時の25%、50%、75%に該当する値が示されている。箱の真ん中のラインの示す50%の値は中央値に相当し、箱の外に伸びるひげの部分は最大・最小値を表している。窪みの計測値として、1つの石の平均的な深さを計測した平均値の結果を図3a、最も深いところを測った結果を図3bに記す。平均値および最深値に共通する傾向として、下から1段目と3段目での値に比べて2段目で窪みが深かった。1段目と3段目の間では大きな差は認められなかった。平均値における下から1段目、2段目および3段目の中央値は、それぞれ3.5、4.5、4 cmであった(図3a)。最深値における下から1、2および3段目の中央値は、それぞれ5.5、7、6 cmだった(図3b)。最大値と最小値の差、すなわち計測値の幅は、平均の深さでは5-6 cm(図3a)、最深部の値では10-11 cm(図3b)となっていた。

5 考 察

窪み深さの計測結果をもとに、風化の開始時期を昭和38年、風化継続時間を54年として、窪み深さの成長速度の計算を試みる。その結果は、最深部の値で1.02-1.30 mm/yr、平均の値で0.65-0.83 mm/yrとなった。Sunamura and Aoki (2011)は、既存研究で計測された岩石表面に大小の窪みを持つ穴状の微地形であるタフォニの成長速度を環境ごとに整理し、最も海岸線に近い海水飛沫帯(supratidal zone)での報告値は5.4および8.2 mm/yr、沿岸部(coastal region)では0.06から0.9 mm/yr、内陸部の砂漠地帯(inland desert area)では0.003および0.007 mm/yrと、3つに区分した。海水飛沫が供給される海岸や水分が蒸発して乾燥しやすい砂漠でよくみられるのは、タフォニの形成には岩石に付着・浸透している水溶液から水分のみ蒸発し、残りの成分が結晶化して岩石を壊す塩類風化作用が寄与しているためと考えられている。3つの区分は、それぞれの環境において、速度値のオーダーが1桁ずつ異なるのが最大の特徴である。本研究で対象とした石垣から得られた値は、最深部では海水飛沫帯の値に相当し、平均の値では沿岸部の値のうち最も大きな部類に近かった。この石垣は海岸線から約60 m離れている。目の前の海岸は外洋に面しているとはいえ、他の海岸に比べてとりわけ優位性があるとは言い難い。ここで石垣が建設された当時の石の張り出しを考慮に入れておらず、くぼみの深さを少な目に見積もっていることを踏まえて総合的に判断をすると、本研究の石垣は通常よりも風化が進んでいる事例であると考えられる。他の風化が作用している可能性が示唆される。

ここで風化が促進される要因を考えてみる。本研究の石垣で用いられていた岩石は、堆積岩の一種である凝灰質砂岩であった。堆積岩などの岩石において、スレーキングと呼ばれる風化作用が発生することがある。この現象では、乾燥・湿潤の繰り返しによって岩石が破壊され、細粒化してポロポロになっていく。この事例として、カナダ・カルガリー郊外のバッドランド(植生を欠いた地域で侵食によって形成される地形)においてフードと呼ばれるキノコ状の岩を調査した研究(Tanaka et al., 1996)や福島県郡山市の浄土松公園にあるフードと同様の形状をしたキノコ岩の形成を議論した研究(Sugiyama and Mastukura, 2002)があり、堆積岩のスレーキングが原因で形成されたことが明らかにされている。この現象が生じる上では、環境の条件として、地中にあった岩石が何らかの原因で地表に露出して水分状態が変化する必要がある。重ねて岩石の条件として、水を吸いやすい、水を吸うと膨らむ膨潤性を有することが必要であろう。そのような観点で対象の石垣をみると、計測した面は南向きで日当たりがよい環境下にある。ここで窪み深さの計測結果において、平均値および最深値に共通して、下から2段目で窪みが深い傾向があった。地面に最も近い1段目は中心高さが約20 cmであり、毛管上昇がおよぶ位置にある。そのため乾燥が進まなかった可能性がある。下から3段目の石の中心は約80 cmの高さにあり、毛管上昇はほぼ届かない。晴天が続けば乾燥が進むと考えられる。下から2段目は両者の中間にあり、水分供給と乾燥が条件によって入れ替わるため、膨張・収縮の繰り返しによる風化(スレーキング)が進む可能性がある。

本研究ではこの点を検証することができなかった。石垣の石と目地のモルタルのスレーキング特性については、今後の課題としたい。

6 まとめ

本研究では、千葉県南房総市に位置する砂岩礫からなる石垣について、各々の礫の窪み深さを計測し、風化速度の見積もりを行った。窪み深さの計測値は、最深部の値および平均の値に共通して、他の段に比べて下から2段目で大きく、下から1段目と3段目の間には大きな差は認められなかった。風化開始時期を昭和38年、風化継続時間を54年として見積もった窪み深さの年間の成長速度は、最深部の値で1.02-1.30 mm/yr、平均の値で0.65-0.83 mm/yrであった。Sunamura and Aoki (2011)が整理・区分した既存研究のタフォニの成長速度の値と比較すると、最深部の速度は海水飛沫帯 (supratidal zone) のそれに近く、平均の速度は沿岸部 (coastal region) の値に近かった。本研究で調査した石垣は海岸線から約60 m離れており、海水起源の塩類による風化という観点では、環境条件に優位性があるとは言えない。石垣設置時点での石の形状は目地に比べて出っ張っていた可能性があり、窪み深さを少なく見積もっていることを加味すると、過去の報告事例より風化が進んでいると考えられる。スレーキング等の塩類風化以外の風化が作用している可能性がある。

謝辞

南房総市白浜の紋屋旅館の高尾憲資館主・女将さん・従業員の皆様には、情報のご提供並びに現地調査におけるご便宜・ご支援を頂きました。ここに記して深謝致します。

参考文献

- 青木 久・松倉公憲 (2005) 海水飛沫帯における橋脚砂岩塊のくぼみ深さに関する定量的把握：日南海岸・青島弥生橋の事例。地形, 26, 13-28.
- 青木 久・前門 晃・若月 強・小暮哲也・松倉公憲 (2006) 沖縄島荒崎海岸の迷子石カサカンジャーの定置時期に関する一考察。筑波大学陸域環境研究センター報告, 7, 53-58.
- 青木 久・春田知実・松四雄騎・前門 晃・松倉公憲 (2007) 石垣島における台座岩の形成条件と形成速度。筑波大学陸域環境研究センター報告, 8, 35-40.
- 青木 久・前門 晃・松倉公憲 (2008) ハワイ・オアフ島北部海岸における台座岩。島嶼科学, 2, 47-50.
- 青木 久・松倉公憲 (2009) 完新世サンゴ礁段丘の表面高度と旧汀線高度との関係。大東文化大学紀要, 47 (自然科学), 1-7.
- 大久保森造・大久保森一 (1958) 石積の秘法とその解説—改訂増補版—。理工図書, 108p.
- 川上俊介 (2006) 館山地域の地質, 第5章 千倉層群。地域地質研究報告 (5万分の1地質図幅)。産業技術総合研究所地質, 調査総合センター, p. 15-24.
- 小竹信宏 (1997) 安房地域の地質。千葉県の自然誌, 本編2, 千葉県の大地, p. 101-127.
- 早川裕之・青木 久・藤永 豪・前門 晃・松倉公憲 (2009) 澁澤写真を用いた喜界島における台座岩の高さの推定：石灰岩地表面の溶解による低下速度の再検討。地形, 30, 227-231.
- 綱川秀夫・小林洋二 (1984) 房総半島野島崎第三紀層に含まれる礫のK-Ar年代。火山, 29, 57-58.
- 井上厚行, 小竹信宏, 坂庭康友, 今井 亮 (2002)：千葉県房総半島南端の千倉層群白浜層 (上部鮮新統) に発達するゼオライト脈。地質学雑誌, 108, 465-473.
- 伊藤 慎・岡崎浩子・小竹信宏 (2005) 第1節 地層と堆積構造。坂上澄夫編：千葉県の自然誌, 別編1, 千葉県地学写真集, p. 32-47.
- Matsukura, Y. and Matsuoka, N. (1991) Rates of tafoni weathering on uplifted shore platforms in Nojima-zaki, Boso

- Peninsula, Japan: Earth Surface Processes and Landforms, 16, 51-56.
- Matsukura, Y. and Matsuoka, N. (1996) The effect of rock properties on rates of tafoni growth in coastal environments: Zeitschrift für Geomorphologie, N. F., Suppl. Bd., 106, 57-72.
- Matsukura, Y. (2000) Formation of tafoni-like depression in the coastal spray zone: A quantitative approach to the effect of weathering. Transactions of the Japanese Geomorphological Union, 21, 31-38.
- 松倉公憲・前門 晃・廣瀬 孝・青木 久・小暮哲也 (2005) 台座岩から推定される石灰岩地表面の溶解による低下速度: 喜界島における一例. 筑波大学陸域環境研究センター報告, 6, 17-21.
- Rahn, P. H. (1971) The weathering of tombstones and its relation to the topography of New England. Journal of Geological Education, 19, 112-118.
- Sugiyama, M. and Matsukura, Y. (2002) Rock control on the formation of earth pillars in Jodo-matsu Park, Kooriyama City, Fukushima, Japan. Ann. Rep. Inst. Geosci. Univ. Tsukuba, 28, 5-10.
- Sunamura, T. and Aoki, H. (2011) Application of an S-shaped curve model to the temporal development of tafoni of salt-weathering origin. Earth Surface Processes and Landforms, 36, 1624-1631.
- Tanaka, Y., Hachinohe, S. and Matsukura, Y. (1996) The influence of slaking susceptibility of rocks on the formation of hoodoos in Drumheller Badlands, Alberta, Canada. Trans. Japan. Geomorph. Union, 17, 107-121.
- 高橋健一・松倉公憲・鈴木隆介 (1993) 海水飛沫帯における砂岩の侵食速度: 日南海岸・青島の弥生橋橋脚の侵食速度. 地形, 14, 143-164.
- 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, pp. 175-192.
- 高橋健一・松倉公憲 (2006) 日南海岸・青島の弥生橋橋脚砂岩塊の窪み深さと日射の関係. 地形, 27, 259-281.
- 高屋康彦・小口千明 (2011) 塩類風化による岩屑生産の定量評価: 史跡・吉見百穴の凝灰岩の事例. 地理学評論, 84, 369-376.
- 高屋康彦・小口千明・山崎麻衣・大西亮平 (2011) 史跡・吉見百穴の坑道壁面における凝灰質岩の塩類風化の速度とその影響要因. 地形, 32, 279-291.
- 高屋康彦 (2017) 秩父・法性寺の洞穴壁面における砂岩の風化による岩屑の生産. 経営論集, 34, 39-47.
- 若狭 幸・前門 晃・青木 久・小暮哲也・松崎浩之・松倉公憲 (2009) 喜界島の台座岩に載る巨礫の ^{14}C 年代: 巨礫の供給源に関する予察的研究. 筑波大学陸域環境研究センター報告, 10, 69-74.

(2018年9月27日受理)