

石材を利用した風化プロセスによる 地形変化速度の推定

—— オーストラリア・ノビーズ岬における砂岩材の穿孔風化を対象として ——

藁 谷 哲 也

1. はじめに

地形物質の風化速度は、地形変化を予測する上で重要なパラメータといえる。この風化速度を求めるためには、風化継続時間と風化量を得なければならない。しかし地形では、その形成年代、あるいは地形物質の露出年代が既知でないと風化継続時間は求められず、風化速度を推定することはできない。地形物質の露出年代決定については、近年 TCN 法（宇宙線生成核種年代測定法）による研究が行われている（例えば、松四, 2017¹⁾）。この方法は、風化継続時間を直接計測するという画期的な方法（松倉, 2017²⁾）であるが、対象とする地形物質における石英含有量や大掛りな分析装置の利用などに制約がある。一方、地形とは異なるが、建設年代が既知の石造物では風化継続時間の見積りが容易である（例えば、Waragai, 2016³⁾、藁谷, 2017⁴⁾）。但し、この場合の風化継続時間は、石造物の建設年代に左右され、最長でもミレニアムスケールにとどまる。

地形物質の風化量の見積りについては、従来、地形や石造物表面に形成されたタフォニやハニカム構造様の窪み深さが利用されてきた（例えば、Matsukura and Matsuoka, 1991⁵⁾；高橋ほか, 1993⁶⁾）。このような洞穴状微地形の形成位置は限定されるが、風化プロセスと風化前の岩石や石材の形態を詳細につかむことができれば、風化による地形変化速度（風化と侵食とを合わせた速度）の推定に有効な方法であると考えられる。

オーストラリア大陸は、特徴的な風化、侵食地形が各地に残っていることで知られる。ウルル、デビルズマールズ（藁谷, 2019a⁷⁾）、岩塊斜面（藁谷, 2019b⁸⁾）などはその一例である。これらは一般に、オーストラリアにおける地形変化の速度が他の大陸より遅いことを示唆するものと考えられている。また、大陸東岸の墓石を利用した岩石の風化速度は、最大でも0.025mm/年と非常に小さい（表1）。地形変化や風化速度の遅速は、風化環境、岩型、風化・侵食プロセスに関わるものの、オーストラリアではその事例に乏しいのが実情である。そこで本研究では、イギリス人によるオーストラリアへの入植初期に、ニューカッスル（Newcastle）に建設されたノビーズ岬（Nobbys Head）を構成する砂岩材の窪みの発達速度を見積ることとした。この砂岩材の表面には、タフォニヤやハニカム構造様の窪みが多数発達し、その発達速度はその場で生じる風化プロセスに依存していると考えられるためである。これは、オーストラリアにおける風化プロセスによる地形変化速度の事例として報告するものである。

2. ノビーズ岬の概要と調査地点

2-1 ノビーズ岬の建設略史

研究対象としたノビーズ岬は、シドニーの北約120kmに位置し、ハンター川（Hunter）の河口部につくられた長さ約1.4kmの細長い人工の岬である（図1）。岬は19世紀初頭に、ニューカッスルの沖にあった小島・ノビーズ島（Nobbys Island）と本土とをマクウォーリー棧橋（Macquarie pier）で繋ぎ、さらにその先に南防波堤（Southern breakwater）を建設することで作られた。19世紀初頭、ノビーズ島は囚人の流刑地として利用され、石炭の採掘もおこなわれた。棧橋は1818～1846年にかけて建設されたが、当初は失敗もあったようである（Suters Architects Snell, 1997⁹⁾）。棧橋建設に用いられた砂岩（ペルム紀）は、岬の付け根に位置するシグナルヒル（Signal Hill, Fort Scratchley）から採石されたという。その後1858年には、棧橋で繋がれたノビーズ島に灯台が建設された。ノビーズ島からは防波堤を延長するための石材が採られ、その採石量は防波堤建設に使われた石材の2/3におよぶという。このため、当時の島の

表1 オーストラリアにおける石造物の風化速度¹⁰⁾

石材	Structure	場所	建築年代, 年	風化速度, mm/yr	年平均気温, °C †	年降水量, mm †	気象観測地	出典
大理石	墓石	シドニー	19-20世紀	0.0017	18.2	930	Sydney	Dragovich, 1986
大理石	墓石	ウーロンゴン	19-20世紀	0.0025	18.2	1275	Wollongong	Dragovich, 1986
大理石	墓石	東オーストラリア	1875以降	0.0009-0.0060	13-25	531-2224		Neil, 1989
大理石	墓石	シドニー	1886-1966	0.0055-0.0119	18.2	930	Sydney	Dragovich, 1987
砂岩	墓石	ニューサウスウェールズ州	1850-1973	0.005-0.025	18.2	821.3	Maitland visitor centre	Wells <i>et al.</i> , 2008
砂岩	石積防波堤	ニューカッスル	1818-1883	0.12-0.58	18.3	1095.5	Newcastle Nobbys Signal Station	本研究

†：斜体は、研究対象に近い気象観測所または他の既往研究による年平均気温、年降水量を示す。観測所の気候値はオーストラリア気象庁のウェブサイト (http://www.bom.gov.au/climate/averages/tables/ca_nsw_names.shtml#name_k) から取得した。

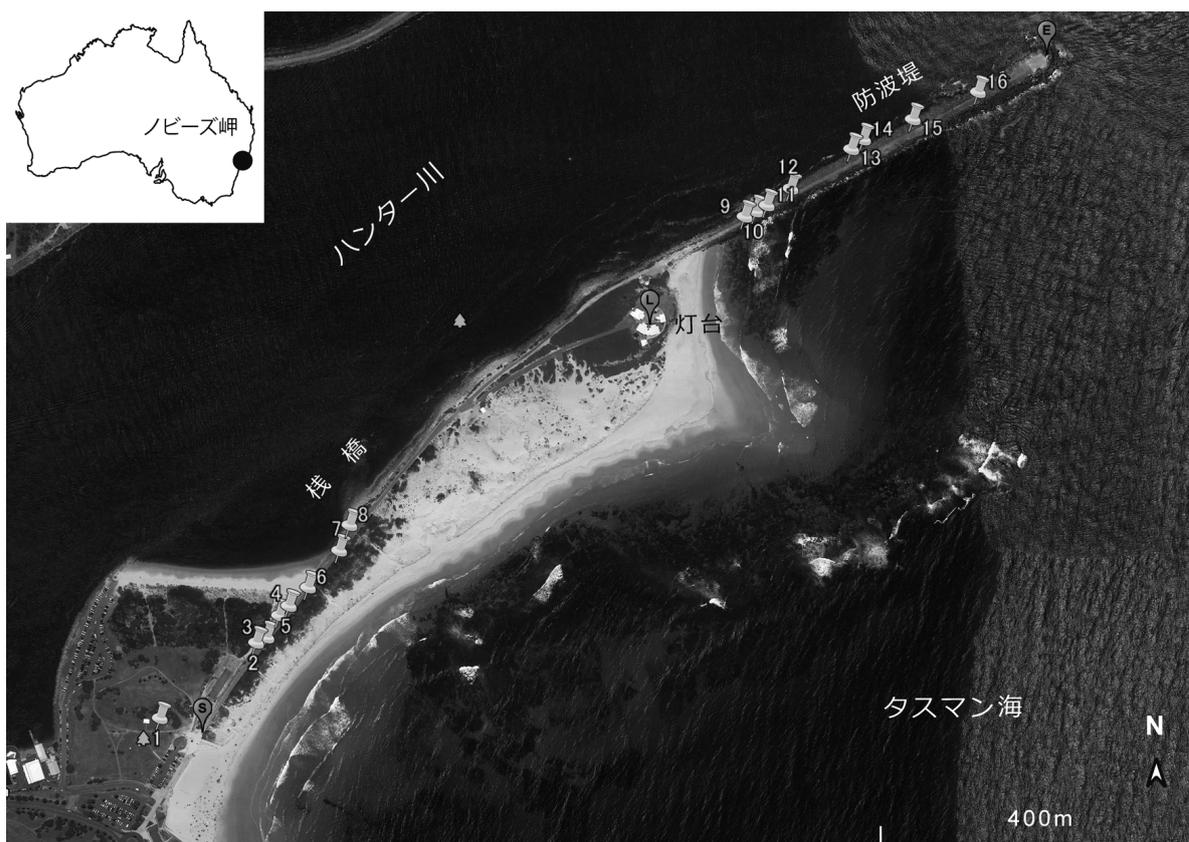


図1 研究対象地域

●は、ニューカッスル・ノビーズ岬の位置を示す。衛星写真には Google Earth を利用し、図中の S はマクウォーリー桟橋の起点、E は南防波堤の終点、L は灯台の位置をそれぞれ示す。また、ピンは計測した砂岩材の位置である。

きさは現在のそれ（標高29m, 長さ170m, 幅80m）より大きいと考えられる。1869～1883年にかけては、この防波堤建設用に鉄道が敷設され、岬の西約8 kmに位置するワラタ（Waratah）採石地からも大きな石材が運ばれた。その後、岬ではコンクリートブロックを利用したメンテナンスが1972年に行われた。

2-2 調査地点の概要

ノビーズ岬の気候環境は、気象観測地点（Newcastle Nobbys Signal Station, 南緯32.92°, 東経151.80°, 標高33m）における1981～2010年の平均値によると、年平均最高気温21.9°C, 年平均最低気温14.7°Cで、年降水量1095.5mmである。また、最大瞬間風速は1985年5月20日に約44m/secを記録している。一方、卓越風向は1957年1月1日から2020年10月10日までのデータによるとNW12.9%, WNW10.7%, S10.5%となり北西からの風が卓越する¹¹⁾。

ハンター川右岸にあたる岬の西側は、栈橋始点付近に砂浜海岸を伴う幅約180mの公園（Horseshoe beach reserve）がつくられているが、ほとんどはハンター川に接している（図1）。一方、岬の東側は、尖角州を伴う最大幅約140mの砂浜海岸（Nobbys beach）が張り出している。栈橋（長さ約660m, 高さ6m）は、おもにその西側面が砂岩材で構成されている。一方、栈橋の東側は砂によって被覆され、所々に背の低い植生が見られる。このため、栈橋の側面を観察することはできないが、栈橋の周囲にはタフォニもしくはハニカム構造様の窪みがあいた長さ約3m程度の砂岩材が点在している（図2）。これら窪みの内部には、砂岩からなる剥離物質や細粒な砂が入っているものも確認できる。一方、防波堤（高さ約6m, 約560m）はその東側が最大長さ約4mのコンクリートブロックで覆われているが、おもに西側は長さ2m程度の砂岩材が積み上げられている。これら砂岩材にも、タフォニもしくはハニカム構造様の窪みを認めることができる。

岬の建設に関わる砂岩材のうち、海水準近くに設置された砂岩材は、常に波浪作用を受けている。しかし、栈橋や防波堤の堤面近くの砂岩材は離水し、波浪の影響はほとんど受けない。また、これら砂岩材の窪みに穿孔貝の生息もほとんど見られない。このため、砂岩材に形成されている窪みは、おもに海水飛

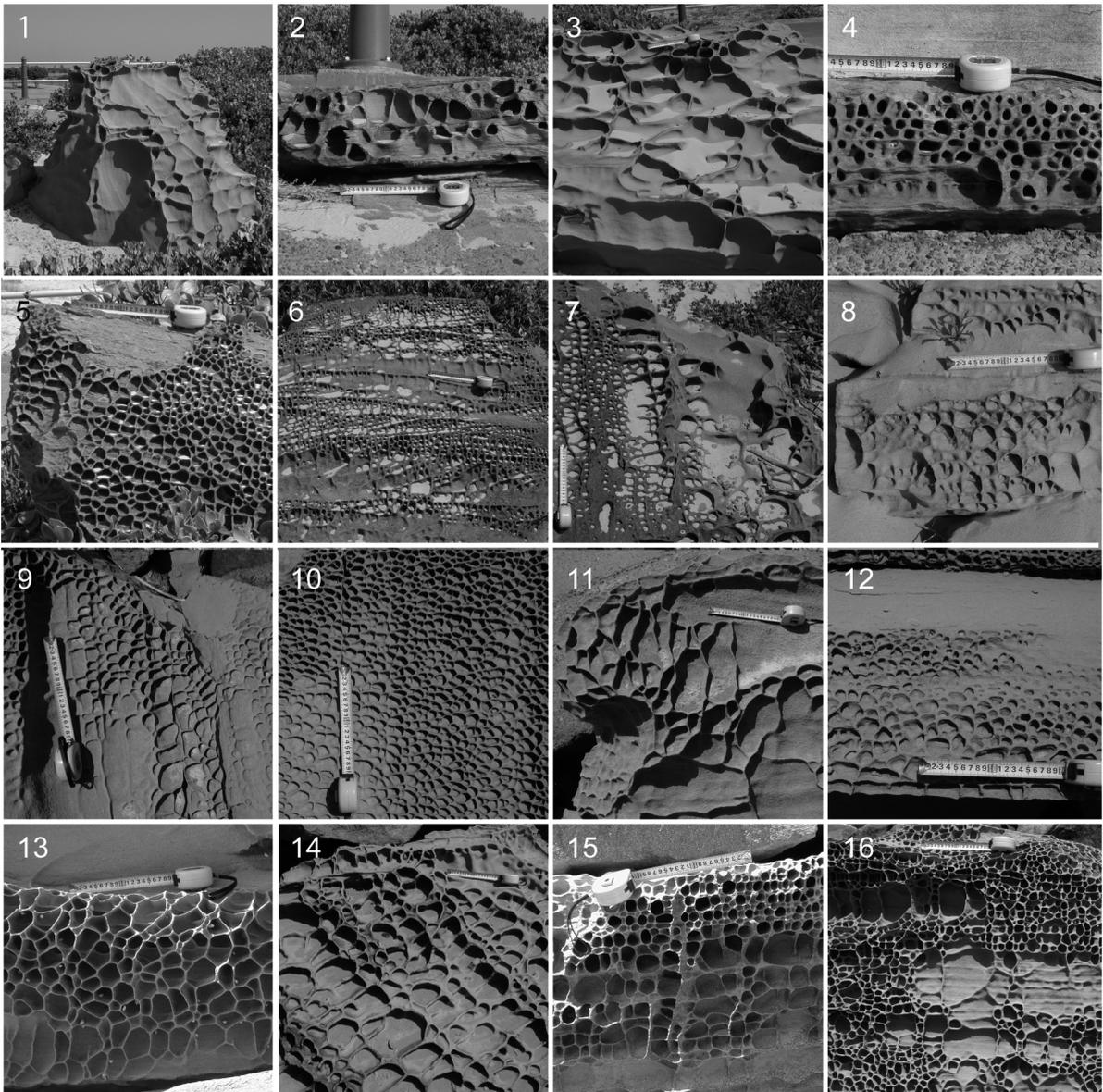


図2 研究対象とした砂岩材とそこに発達する洞穴状微地形

沫の影響を受けて形成，発達している。すなわち，これら窪みの形成には，海水飛沫に起因する塩類風化がおもに関わっていると推測される。窪みを伴うこのような風化は，穿孔風化（cavernous weathering¹²⁾）と呼ばれる。

3. 砂岩ブロックの強度と窪み深さの計測方法

栈橋や防波堤およびそれらの周囲の砂岩材は，岬の建設に伴って設置されたものと考えられる。それら砂岩材の用途は，栈橋本体を構成するものもあれば，

栈橋や防波堤を保護する目的で設置されたものもある。しかし、砂岩材の表面には、穿孔風化による窪みが多数発達し、それらの形態的特徴には共通性が認められる。

そこで本研究では、海面から1 m以上高く、離水している立方体状の砂岩材16個（長さ50~310cm）を対象に強度と窪み深さを計測した（図2，表2）。強度の計測には、シュミットハンマ（プロセク製）を利用し、1砂岩材ずつ計測して反発値を求めた。計測数は砂岩材1つあたり、10~35か所である。一方、窪みの計測にはノギスを用い、窪み周囲の砂岩材表面を基準として窪み深さ（mm）を計測した。計測数は、1つの砂岩材で15~81箇所である。

4. 結果と考察

4-1 砂岩材の強度

シュミットハンマによる砂岩材の反発値（ R ）を計測した結果、平均値は42~60をとることがわかった（表2）。この平均値は、1つの砂岩材から得られた反発値の中から最低値を除外して求めた平均反発値である。また、計測したすべての反発値をボックスプロットで表す（図3）。

図3によれば、反発値の外れ値がボックスの下部にプロットされる砂岩材もあり、一定値に収束しているとみることはできない。この要因として、採石地の違いが推測される。すなわち、栈橋には岬基部のシグナルヒル、防波堤にはノビーズ島とワラタ採石地から採石された砂岩材がそれぞれ使われた。しかし、特に防波堤の砂岩材について、個々の石材がどの採石地から採られたものかを特定することは困難である。そこで、栈橋部分に位置する砂岩材（1~8；グループA）と防波堤部分のそれ（9~16；グループB）の2つのグループに大別して基礎統計を得た。その結果、グループAは平均50.4、標準偏差5.16、分散26.6、グループBは平均49.9、標準偏差6.99、分散48.8であった。グループBの分散は、異なる採石地の石材が用いられたため小さくはないが、両グループの R は四分位範囲がおおむね40-60の間に収まっている。そこで両グループの平均値について、有意水準5%で t 検定した。この結果、 $t(283) = 0.70$, $p =$

表2 調査結果

調査地点	南緯, °	東経, °	砂岩材のサイズ, cm			シュミットハンマ反発値			窪み				
			長さ	幅	厚さ	平均	標準偏差	測定数	平均深, mm	標準偏差	最大深, mm	測定数	発達速度, mm/yr
1	32.9233	151.7917	150	120	110	50.6	8.09	28	69.9	29.79	134	18	0.58
2	32.9224	151.7930	66	74	26	51.2	3.55	11	39.7	16.45	80	15	0.33
3	32.9224	151.7932	200	100	130	52.7	3.74	28	68.8	22.01	105	27	0.57
4	32.9221	151.7933	89	20	16	49.1	4.12	10	32.4	6.28	48	18	0.27
5	32.9220	151.7935	110	75	60	51.7	3.28	28	13.8	3.36	20	25	0.12
6	32.9218	151.7937	310	110	120	50.5	6.40	15	25.2	5.08	34	24	0.21
7	32.9214	151.7942	125	110	120	48.5	3.06	14	63.3	16.25	95	15	0.53
8	32.9211	151.7943	50	22	23	52.2	3.06	10	22.6	6.66	37	15	0.19
9	32.9176	151.7996	158	170	112	46.5	3.83	15	21.4	3.41	28	24	0.18
10	32.9175	151.7998	200	191	150	55.1	5.52	30	33.6	14.61	74	81	0.28
11	32.9175	151.7999	210	163	80	48.7	4.64	15	40.5	13.94	74	41	0.34
12	32.9173	151.8002	199	128	30	60.0	3.46	14	20.3	3.43	27	36	0.17
13	32.9168	151.8011	242	170	68	54.4	2.50	14	44.9	6.36	61	29	0.37
14	32.9167	151.8012	240	135	73	49.6	2.17	15	65.6	18.52	117	36	0.55
15	32.9165	151.8019	195	201	80	42.0	4.98	27	54.0	12.97	89	33	0.45
16	32.9162	151.8023	151	134	98	49.9	6.06	25	37.1	12.36	88	62	0.31

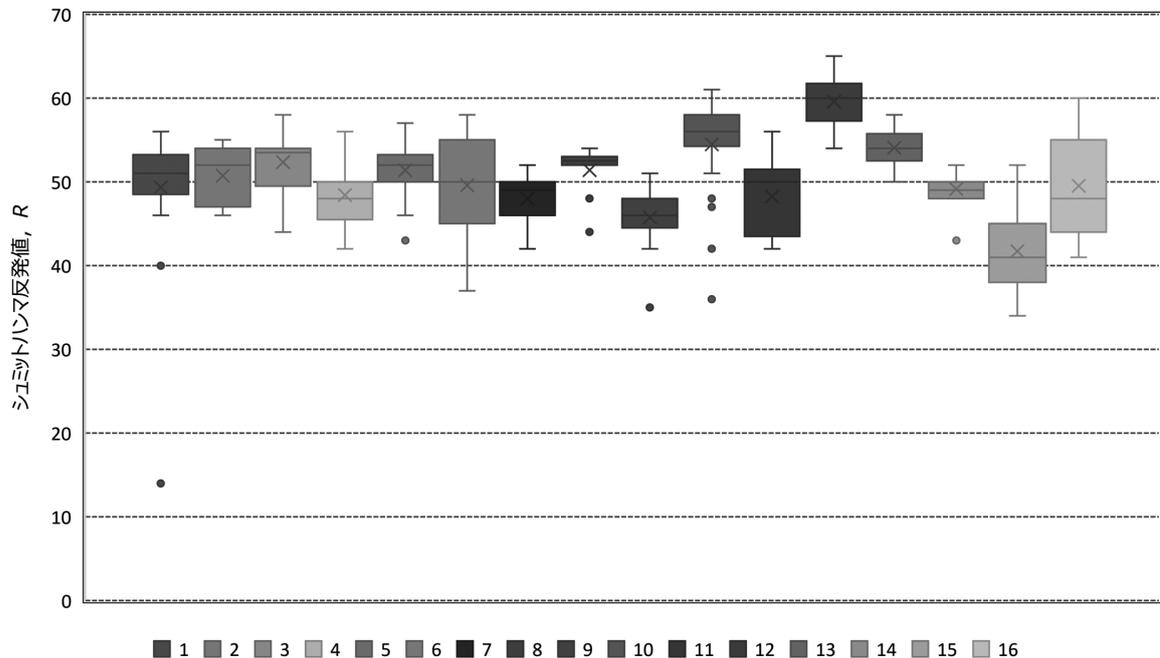


図3 砂岩材に対するシュミットハンマ反発値のボックスプロット

図中の箱の上端，下端，中央線はそれぞれ第3・第1四分位数と中央値，×は平均値，ひげの上端，下端はそれぞれ外れ値を除く最大値と最小値を示す。凡例は砂岩材の番号。

0.49であり、採石地によるシュミットハンマ反発値の差は統計的に有意ではないことが示された。これらのことから、計測した砂岩材の力学的性質は大きく異ならないとみなすことができる。

4-2 砂岩材の窪み深さ

窪み深さの計測結果は、その深さが平均で14~70mm、最大134mmであることを示す(表2)。砂岩材の強度と同様に、窪み深さをボックスプロットで示したものが図4である。図4が示すように、窪み深さにはばらつきの大きいことがわかる。

先述したように、岬の建設は1818年から棧橋が、その後1860年頃から防波堤が建設された。そのため、両者の建設時期には40年程度の差がある。そこで棧橋部分の砂岩材(1~8;グループA)と防波堤部分のそれ(9~16;グループB)の2つのグループに分けて基礎統計を得た。その結果、グループAは平均41.6mm、標準偏差26.7mm、分散715.0、グループBは平均39.1mm、標準偏差18.0mm、分散322.6であった。分散はグループAに大きいものの、平均値に大きい開きは認められないようである。そこで次に、建設時期による窪み深さの平均値に違いがあるかを有意水準5%で t 検定した。この結果、 $t(223)=1.08$ 、 $p=0.28$ であり、建設時期による平均値の差は統計的に有意ではないことが示された。

4-3 塩類風化による窪みの発達速度

風化による窪みの発達速度を計算するには、石材の設置期間(風化継続時間)の情報が必要である。岬の建設時期は棧橋と防波堤とで異なるが、砂岩材の窪み深さに統計的な有意差はなかった。そこで、防波堤建設用の鉄道敷設が完了した1883年を基準とすれば、計測時(2003年)までの風化継続時間は120年となる。すなわち、窪みの発達速度は表2に示すように0.12~0.58mm/年である。表1に示したようにこの速度は、岩型による差などを除けば、これまでオーストラリアで求められてきた墓石の風化速度に比較して極めて速いといえることができる。

一方、計算された窪みの発達速度には、およそ5倍の開きが生じている。先

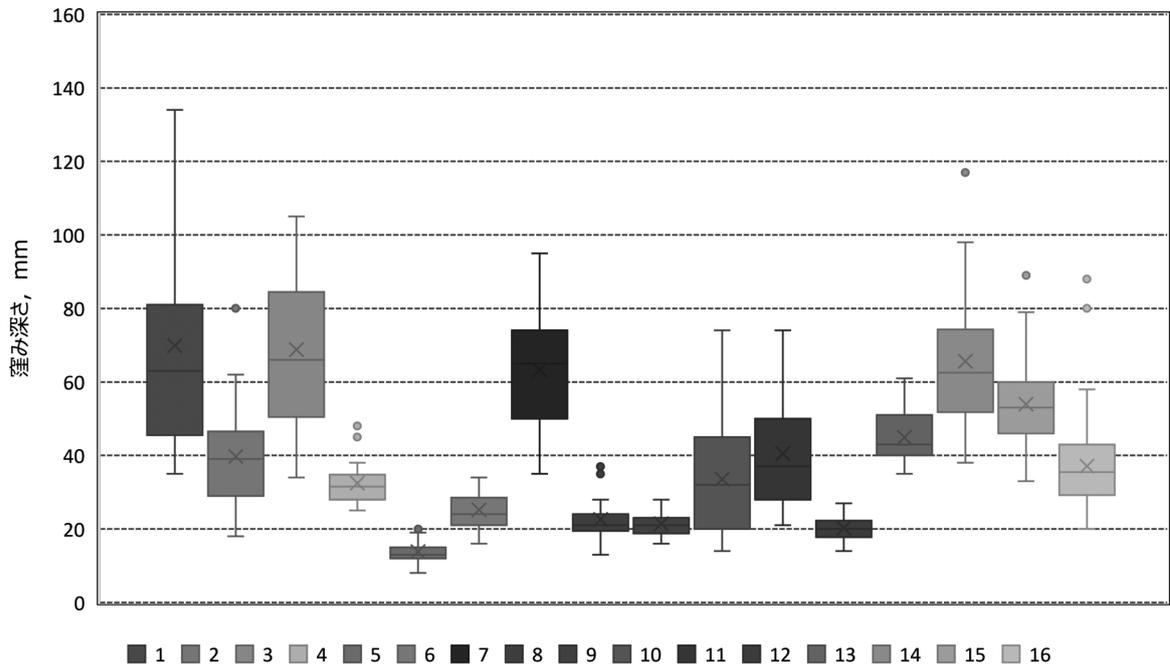


図4 砂岩材における窪み深さのボックスプロット

図中の箱の上端，下端，中央線はそれぞれ第3・第1四分位数と中央値，×は平均値，ひげの上端，下端はそれぞれ外れ値を除く最大値と最小値を示す。凡例は砂岩材の番号。

述したように、計測した砂岩材の強度が大きく異なること、研究対象地の狭小性に基づく気候環境の差が小さいことを踏まえると、この窪みの発達速度の差は、ミクロな形成条件の違いに由来するかもしれない。例えば青木(2017)¹³⁾は、海に面した砂岩からなる石垣の乾燥・湿潤時間の差が、その表面に形成されたハニカム構造様の窪みの発達程度に影響を与えていると推察している。これは塩類の結晶成長が十分に進むだけの乾燥時間と海水による湿潤化が交互に繰り返される結果、石材の表面で粒状破壊が促進され窪みが発達するという考えである。本研究で対象とした石材はいずれも離水しているため、海水による塩類や水分の供給条件の違いは排除できる。しかし、一部の砂岩材の窪みには砂が侵入しているものもあることから、ミクロな環境条件の違いが発達速度の幅を大きくさせているかもしれない。

1981～2010年の気象観測結果によると、観測地点（Newcastle Nobbys Signal Station）における1 mm以上の降雨日数は平均99日／年、晴天日数は平均79.2

日／年とされ、現地では平均的には数日の晴天日と降雨が繰り返されている。すなわち、石材表面の窪みの形成は、海水飛沫に含まれる塩類の結晶化と降雨による湿潤化の繰り返しがおもに関わっていると考えることができよう。

5. おわりに

本研究では、19世紀初頭、人工の岬の建設に使われた砂岩材の表面に形成されている窪みの発達速度について分析した。離水した位置にある砂岩材の窪みは、波浪の影響を受けないが、海水飛沫を原因とする塩類供給と降雨による湿潤化が繰り返されている。このため、窪み形成には塩類風化（穿孔風化）がおもに関わっていると考えることができた。この窪みの平均発達速度は、0.12～0.58mm/年と見積もられ、これまでオーストラリアで墓石を対象として報告されてきた風化速度と比較して大きい値であることがわかった。

今後、石材の汀線からの距離、平均海面からの比高、および窪み内部の微気象などの環境条件、砂岩材の物性・含水比変化などについて分析することが、より詳細な風化プロセスによる地形変化速度の解明に結びつくものと考えられる。

謝辞

シドニー近郊の墓石の風化プロセスについては、The University of SydneyのDeirdre Dragovich教授（当時）に現地でご教示いただいた。匿名の査読者のコメントは適切であり、本稿の改善に大変有効であった。以上の方々に御礼を申し上げます。

なお、研究のとりまとめに際しては、令和2年度の日本大学文理学部個人研究費、および自然科学研究所総合研究費を利用した。

注

- 1) 松四雄騎（2017）宇宙線生成核種を用いた岩盤の風化と土層の生成に関する速度論—手法の原理，適用法，研究の現状と課題—。地学雑誌，126，487-511.

- 2) 松倉公憲 (2017) 地形学から見た風化研究の問題点と今後の課題. 地学雑誌, 126, 271-296.
- 3) Waragai, T. (2016) The effect of rock strength on weathering rates of sandstone used for Angkor temples in Cambodia. *Engineering Geology*, 207, 24-35.
- 4) 藁谷哲也 (2017) 石造物を利用した岩石の風化速度に関する研究動向. 地学雑誌, 126, 455-471.
- 5) 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.
- 6) 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蝕速度：日南海岸・青島の弥生橋脚の侵蝕形状. 地形, 14, 143-164.
- 7) 藁谷哲也 (2019a) デビルズマーブルズのコアストーン. 地形, 40, 表紙1-2.
- 8) 藁谷哲也 (2019b) 西オーストラリア, バーラップ半島の岩塊斜面. 地学雑誌, 128, Cover06_01-Cover06_02.
- 9) Suters Architects Snell (1997) *Newcastle archaeological management plan*: Newcastle City Council.
- 10) Dragovich, D. (1986) Weathering rates of marble in urban environments, eastern Australia. *Zeitschrift für Geomorphologie N.F.*, 30, 203-214.
Dragovich, D. (1987) Measuring stone weathering in cities: Surface reduction on marble monuments. *Environmental Geology and Water Sciences*, 9, 139-141.
Neil, D. (1989) Weathering rates of a subaerially exposed marble in eastern Australia. *Zeitschrift für Geomorphologie N.F.*, 33, 463-473.
Wells, T., Hancock, G. and Fryer, J. (2008) Weathering rates of sandstone in a semi-arid environment (Hunter Valley, Australia). *Environmental Geology*, 54, 1047-1057.
- 11) 卓越風向は, <https://wind.willyweather.com.au/nsw/hunter/newcastle.html> をもとにした。
- 12) Siedel, H. (2014) Cavernous Weathering Features. *Encyclopedia of Planetary Landforms*, DOI 10.1007/978-1-4614-9213-9_54-1, Springer Science+Business Media New York.
- 13) 青木久 (2017) 波蝕棚の形成をもたらす海食崖の後退プロセス—砂岩塊からなる石垣を利用したアプローチ—. 地学雑誌, 126, 413-424.