波食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—

青 木 久*

A Study on Coastal Cliff Recession Processes with Special Reference to the Development of Shore Platforms: Approach Using a Masonry Seawall Composed of Sandstone Blocks

Hisashi AOKI*

[Received 30 September, 2016; Accepted 15 April, 2017]

Abstract

To investigate cliff recession processes and rates for the purpose of studying the development of horizontal shore platforms, data taken from a masonry seawall at Ashikajima located on the Choshi Peninsula coast is used. The seawall is composed of artificially cut blocks of Cretaceous sandstone, which is the same rock type as that forming shore platforms in the area. The seawall with a horizontal length of 100 m was built 90 years ago to protect reclaimed land on pre-existing shore platforms. Two sites are selected for this study: Site A without a shore platform in front of the seawall and Site B with a platform. The surfaces of sandstone blocks in the supratidal zone are depressed at both sites; Site B has a more noticeable depression. The depression depth (i.e. erosion depth) after the period of 90 years is considerably larger (more than double) at Site B than at Site A, in spite of Site A suffering direct attacks from waves, irrespective of tidal stages, while Site B experiences low-energy waves only during high tides due to the presence of the horizontal platform. Granular disintegration occurs markedly on the sandstone surface at Site B, but little occurs at Site A. This strongly suggests that salt weathering is prevalent at Site B, reducing the strength of rocks. The moisture content in sandstone blocks at Site B is lower than that at Site A, which implies that Site B is more susceptible to weathering than Site A which is always exposed to waves and tides. It would be reasonable to consider that the seawall at Site A is analogous to a cliff at the initial stage of platform development, while the seawall at Site B is similar to a cliff at its middle stage. Horizontal shore platforms start to develop due to wave action alone, but as they grow wider the importance of salt weathering increases and the combined effects of waves and weathering become crucial to platform development.

Key words : shore platform, wave erosion, weathering, sandstone, masonry seawall, Ashikajima

キーワード : 波食棚, 波の侵食, 風化, 砂岩, 石垣, 海鹿島

* 東京学芸大学教育学部地理学分野

* Department of Geography, Tokyo Gakugei University, Tokyo, 184-8501, Japan

I. はじめに

岩石海岸には、しばしば垂直あるいはそれに近い急傾斜の海食崖（以下、海崖とよぶ）が発達している。海崖の陸側への後退は、波による構成岩石の除去、すなわち波の侵食によってもたらされ、波食棚と呼ばれる特徴的な地形を形成させる。波食棚（horizontal shore platform）とは、海崖基部から海側に向かって平坦面をもち、その海側末端が急崖となっている地形である（例えば、Sunamura, 1992, 2015; Stephenson, 2001; Kennedy, 2015）。

波食棚の形成に関しては、古くから多くの研究がなされ、波の直接的な岩石の破壊（以下、波による直接的な侵食とよぶ）による作用で形成されると考えられてきた（例えば、Bartrum, 1924; Edwards, 1941; Sunamura, 1975, 1991; Trenhaile, 1999, 2000, 2005; Tsujimoto, 1987; Trenhaile and Kanyaya, 2007; Cruslock *et al.*, 2010; Naylor and Stephenson, 2010）。しかし、2000年代に入り、波食棚上に観察される微地形や岩石表面の性状から、主要な形成要因は風化作用であると結論づける研究例が多数報告されるようになってきた（例えば、Stephenson and Kirk, 1998, 2000; Stephenson, 2000; Trenhaile, 2001, 2004; Kanyaya and Trenhaile, 2005; Porter *et al.*, 2010）。このように波食棚の形成に関しては“波による直接的な侵食が主要因である”という「波食説」と、“風化による岩石の強度低下に関係する侵食が主要因である”という「風化説」の2つによって対立した議論がなされている。最近、Sunamura *et al.* (2014) によって、波による侵食と風化作用の両効果を考慮した波食棚の発達モデルが提案されている。しかしながら、波食棚研究において、波食棚がどのようなプロセスにより生成され、その後、発達していくのかという課題は、いまだに解明されておらず、統一的な見解が得られていないというのが現状である。

千葉県銚子半島海鹿島海岸（図 1a, b）には、白亜系銚子層群の砂岩が広く分布し、汀線付近には波食棚や砂浜が発達している（図 1c）。波食棚

や砂浜の背後にはいけす（現在は使用されていない）がある。これを波浪から守るために、銚子層群の砂岩を整形した岩塊（以下、砂岩塊とよぶ）を積み上げた全長約 100 m、高さ約 2.5 m の石垣が昭和初期に築造されている（図 1c）。砂岩塊の多くはその表面にくぼみが生じており、くぼみの性状は石垣の前面に波食棚がある場所とない場所とにより大きく異なることが見いだされた。石垣を人工の海崖と考えると、両地点のくぼみの差異は、初期地形の条件をコントロールした海崖の後退に関する野外実験（砂村, 1992）の結果であるとみなせる。そこで本研究では、波食棚の形成をもたらし海崖の後退プロセスを明らかにすることを目的として、石垣を構成する砂岩塊表面の観察と観測により、石垣の前面に波食棚がない地点における事象からは波食棚生成初期のプロセスを、波食棚のある地点からは波食棚発達中のプロセスを、それぞれ探究する。さらに、両地点の結果を比較検討し、波食棚の生成と発達プロセスに関する考察を行う。

II. 海鹿島海岸の概要と調査地点

海鹿島海岸は、銚子半島犬吠埼の北側に位置する海岸である（図 1b）。この地域の地質はおもに白亜系銚子層群の砂岩で構成されるが、泥岩が挟在し砂岩泥岩互層となっているところもある。汀線付近から浅海底にかけて波食棚や岩礁がみられ、ポケットビーチが発達している。

犬吠埼から小名浜付近の海域において年間を通じてもっともエネルギーの大きな波は夏季から秋季にかけて襲来する台風時の波である。この海域の最大有義波の波高は約 7.5 ～ 7.7 m、周期は約 10.4 ～ 10.5 sec である（Sunamura *et al.*, 2014）。銚子漁港検潮所によると、朔望平均潮位差は 1.4 m である。関東大地震（1923 年）による銚子半島における隆起量は約 0.1 m である（辻本, 1985）。

海鹿島海岸の気候環境は、海鹿島にもっとも近い銚子地方気象台の月別平年値（1980～2010 年；気象庁）によると、気温は 1 月に最低で 6.4℃、8 月に最高で 25.2℃であり、年平均気温は

図 1 研究対象地域. (a) 千葉県銚子半島の位置, (b) 海鹿島海岸の位置, (c) 調査対象地点と計測対象とした石垣.

Fig. 1 Study area and sites. (a) Location of Choshi Peninsula. (b) Location of Ashikajima coast. (c) Location of seawall studied on the Ashikajima coast.

15.4℃である。風速は 5.0～6.4 m/sec で、卓越風向は北北東ないし南南西である。相対湿度は夏季に高く冬季に低い値をとるが、1 月から 3 月にかけては 60% 台の低い値を示す。年降水量は 1659.8 mm であり、降水量は 9 月と 10 月に多く、12 月から 2 月に少ない。

海鹿島海岸の汀線付近には、全長約 100 m、高さ約 2.5 m、幅 1 m の北西-南東方向、北北東-南南西方向にのびる石垣が存在する。石垣の陸側には、かつてはいけすとして利用された人工プールがあり、その周辺は埋立てられて平坦地となっている。人工プールは現在、砂の堆積によりほとんどが埋没している。石垣は平均的な幅が約 40

cm、高さが 30 cm、奥行きは推定 30～40 cm の直方体に整形された砂岩塊を積み上げたものであり、隣接する砂岩塊はモルタルで固定されている。これらの砂岩塊は、海鹿島海岸に発達する波食棚や背後の海崖を構成する砂岩と同種のものである。そこで、調査地点付近に散在していた新鮮な砂岩塊を実験室に持ち帰り、その物理的性質（間隙率、最大含水比、かさ密度）と力学的性質（一軸圧縮強度、引張強度）を調べた。それらの結果を表 1 に示す。

本研究では、石垣の前面に波食棚が存在しない場所として図 1c の地点 A を、波食棚が存在する場所として地点 B を調査地点として選定した（図

表 1 石垣を構成する砂岩の物理的・力学的性質。

Table 1 Physical and mechanical properties of sandstone composing the seawall.

Porosity		5.8%
Bulk density		2.4 g/cm ³
Maximum water content		4.4%
Compressive strength	dry*	81.2 MPa
	wet**	10.2 MPa
Tensile strength	dry	5.89 MPa

* dry: oven-dried.

** wet: fully saturated.

2)。その理由は、両地点は近接し、石垣側面がほぼ同一の東方向に向いているため、石垣に向かう沖波のエネルギーや、石垣が受ける潮汐、日射量、風の影響の場所的差異がほとんどない、ということである。このことと石垣がすべて同種の砂岩で構成されることをあわせ考えると、両地点における石垣のくぼみの性状は波食棚の有無の影響を反映したものになると考えられる。

まず調査対象となる石垣の形状について測量結果を述べる。石垣の側面の平均勾配は約 65～70°前後である。地点 A と B の石垣の比高は異なり、それぞれ 2.3 m, 1.7 m である。砂岩塊は 7 層、5 層にそれぞれ積まれている。石垣を構成する砂岩層を区別するため、波食棚がない地点 A の石垣側面の最下層から順に第 1, 第 2, …, 第 7 層と呼ぶことにする (図 2b)。地点 A の最下層は第 1 層、最上層が第 7 層となるが、地点 B では最下層の高さは地点 A の第 4 層とほぼ一致し、地点 B の最上層は地点 A よりも一段高い第 8 層となる (図 2c)。

次に、各地点における石垣の位置および前面の地形について説明する。図 3 には、石垣の側面と直交方向に測線を設けてレーザー距離計を用いて縦断面を作成した結果を示す。地点 A の石垣前面の基盤岩石は、泥岩を主とする砂岩泥岩互層からなっており、沖に向かって緩傾斜が続く浅海底となっている (図 3a)。石垣の基部は平均海面 (MSL) 下 -0.3 m の高さにあり、干潮時には露出するが、満潮時には海面下に没する。平均満潮

位 (MHWL) の海拔高度は 0.7 m である。この位置は石積みの第 3 層と第 4 層との境界付近にあたる。一般に、平均満潮位より上部は海水飛沫帯と定義されるので、地点 A の石垣は、潮間帯から海水飛沫帯にわたって位置していることになる。地点 B の石垣前面には、幅 (石垣基部から海側末端までの水平距離) 約 9.1 m の砂岩からなる波食棚が発達しており、その前面水深は平均海面下 -0.6 m である (図 3b)。波食棚の表面には 50 cm～1 m 間隔の節理が観察され、海側にはランパート状の高まりがみられるところもある (図 2a)。波食棚表面の海側末端と石垣基部での高度はそれぞれ平均海面上 0.90 m と 0.85 m である。したがって、波食棚上に建てられている地点 B の石垣の基部は平均満潮位より高く、海水飛沫帯に位置している。

調査石垣への海水の着水状況について、静穏時波浪が作用する場合の観察結果を述べる。波は基本的に東方から入射する。地点 A の石垣の第 1～3 層は満潮時になると冠水する。第 4 層以高は波が直撃し、最上層まで遡上することもしばしばある。したがって満潮時には石垣を構成する砂岩塊のほとんどが、遡上波や海水飛沫により濡れることになる。地点 B の石垣の基部は、満潮位より約 20 cm 程度高い位置にある波食棚が前面に存在するため、満潮時になっても海面下に没することはない。しかし、実際には波食棚前面の急崖で碎波した流れが最下層 (第 4 層) に到達したり、碎波によって生じた海水飛沫やしぶきが石垣全面に付着したりするのがみられる。波食棚は陸側にわずかに傾斜しているため (図 3b)、潮位が低下しても石垣前面の波食棚上には水たまりができていくことが多い。暴風時の波高の大きい波浪が襲来する場合には、暴浪は汀線から数 100 m 沖で碎け、碎波後の波が両地点に到達する。地点 B においては波がボアとなって波食棚上を走り、石垣の下半部を直撃する。

III. 石垣を構成する砂岩塊の侵食量の計測方法

地点 A と B の石垣側面の陸側への後退量を把握するため、構成する砂岩塊のくぼみ深さ、すな

図 2 (a) 調査対象地点の石垣と発達する波食棚。点線で囲まれた領域は、地点 A と地点 B の計測対象とした砂岩塊の範囲を示す。各地点の位置は図 1c に示す。(b) 地点 A における石垣の様子。MHWL と MSL は、それぞれ平均満潮位と平均海面の高さを示す。石垣側面の最下層から順に番号を付した (1 は第 1 層, 4 は第 4 層)。(c) 地点 B の石垣の様子。

Fig. 2 (a) Sea-facing seawall and shore platform at the study site, viewed from the south. Two framed areas enclosed by a dotted line show sandstone blocks measured at sites A and B. Position of each site is shown in Fig. 1c. (b) Erosional features of seawall at Site A. MHWL and MSL denote “mean high water level” and “mean sea level,” respectively. Numbers indicate the number of layers of the seawall above the foundation: 1 is the first layer and 4 is the 4th layer. (c) The seawall at site B.

わち侵食深 (D) の計測を 2016 年 3 月に実施した。各層の高度 (h) は積み石の上端と下端の高度の平均で表す。くぼみの計測は各地点のすべての砂岩塊で行った。侵食深を把握するためには、

図 3 調査地点の縦断形。(a)と(b)は地点 A と B の縦断形をそれぞれ示す。測線の位置は図 1c に示す。

Fig. 3 Profile at study sites. (a) and (b) show sites A and B, respectively. Position of profile is shown in Fig. 1c.

石垣建設当時 (侵食前) の砂岩塊表面の状態を把握する必要がある。しかし、建設当時の写真などの情報を入手することができなかったため、以下のような工夫を行った。石垣の陸側に向けた側面には、砂岩塊 3 層分の表面がモルタルに覆われ、建設当時の表面の状態がそのまま保存されたとみなせる面があった。この面の傾斜角は 73° であった。そこで、本研究では建設当時の海側と陸側の石垣側面は対称形で、その傾斜は 73° であったと仮定した。また各地点の最下層には砂岩塊の整形当時の破断面が残存する比較的新鮮な表面をもつものが多いことから、その砂岩塊の基底を起点として 73° の傾斜をもつ斜面を復元し、その面を建設当時の砂岩塊表面の仮想面とみなした。それを基準面として、砂岩塊の最深部までの水平距離を 0.5 cm 単位で読みとった。くぼみが生じていない砂岩塊については、侵食深を 0 と判断した。それらの結果を表 2 にまとめた。

現地調査の際には、釣り人などが石垣の上を歩いているなどの行為がしばしば観察されたことから、最上位層のくぼみ深さには人為的な影響が入り込む可能性のあること、および、最上位層の砂岩塊は欠損している箇所が多く、そのデータを除外するとデータ数が少なくなることなどを考慮し、最上位層の砂岩塊は調査対象から除外した。した

表 2 野外調査結果。

Table 2 Results of field measurements.

	Layer*	Altitude h (m)	Mean erosion depth** D (cm)	Mean erosion rate (mm/yr)	Number of blocks
Site A	1	-0.2	0	0	9
	2	0.2	0.82	0.09	10
	3	0.65	0.86	0.10	10
	4	1	7.5	0.83	10
	5	1.35	6.3	0.70	11
	6	1.65	7.3	0.81	10
Site B	4	1	8.7	1.0	12
	5	1.4	17.7	2.0	13
	6	1.75	19.1	2.1	13
	7	2.05	18.6	2.1	14

* The number of the layers from the base of the masonry seawall at site A.

** Erosion depth for 90 years.

がって、地点 A の第 1～6 層、地点 B の第 4～7 層の砂岩塊を本研究の対象とした。

IV. 調査結果と考察

1) 砂岩塊表面の状況と侵食深

地点 A と B の砂岩塊表面に関する観察結果を述べる。地点 A の石垣において、第 1～3 層に位置する砂岩塊は、表面の中央部が突出している整形時の状態が残存したものが数多く存在し、ほとんどくぼみがみられなかった。第 4 層以上の砂岩塊の表面には、層理面に沿った縞状の凸凹や、すり鉢状の浅いくぼみが観察された。地点 A の砂岩塊表面を触ってみるとつるつるしており、表面形態はきわめて滑らかであった。とくに第 1～2 層の砂岩塊には海藻などが付着していることが多く、指で触ると湿っており、湿潤状態にあることがわかった。地点 B では、砂岩塊のほとんどにくぼみが生じていた。その多くは表面にタフォニ様のくぼみが形成されており、砂岩塊によっては、蜂ノ巣構造を示すものがみられた。くぼんだ表面には地点 A と異なり、塩類風化によって剥離・生成したと思われる砂粒子が付着しているのが観察された。この砂粒子を指でこすって舐めてみると、塩辛かった。これは、砂岩塊表面に着水した海水が乾燥し結晶化した塩が含まれているためであると考えられる。

各地点の砂岩塊の侵食深の高度変化について検討する。図 4 は、海拔高度 (h) を縦軸に、砂岩塊の各層の侵食深 (D) の平均値を横軸にとり、地点ごとにわけてプロットした結果である。地点 A をみると、侵食深は高度によって異なり、高度が高くなるほど、大きくなる傾向がみられる。潮間帯内に位置する第 1 層から第 3 層までの侵食深は 1 cm 未満でほとんど侵食されていない。平均満潮位以上の第 4 層以上で侵食深は急激に増大し、第 4～6 層では 6.3～7.5 cm の値をとり、ほぼ一定値をとっている。これらの層が大きく後退している地点 A の鉛直断面形状をみると、ほとんど侵食されていない第 1～3 層を海側末端の急崖とした波食棚の生成状態を読みとることができる。波食棚の生成高度は第 3 層と第 4 層の

図 4 砂岩塊表面の侵食深と侵食速度の高度変化。

Fig. 4 Vertical variation in erosion depth (D) and rate of sandstone blocks for each layer.

境界付近にあると考えると、その高度は平均海面上約 0.8 m となり、地点 B の波食棚の高度 (0.85～0.90 m) (図中の破線) とほぼ一致する。地点 B の砂岩塊の侵食深は最下位の第 4 層で 8.7 cm、第 5～7 層で 17.7～19.1 cm となっている (表 2)。侵食深の高度分布 (図 4) から、波食棚直上の第 4 層の値を除くとほぼ同様な侵食程度を示していることがわかる。

2) 石垣側面の後退速度に与える波食棚の影響

地点 A と B で共通した結果は、平均満潮位より上方に位置する第 4 層以上高の砂岩塊で大きな侵食が生じたことである。ここで、第 4 層以上高の砂岩塊の侵食深の平均値を石垣の後退量とみなし、地点ごとに求めると、地点 A と地点 B ではそれぞれ 7.0 cm と 16 cm となった。したがって、波食棚のない地点 B の石垣のほうが、地点 A よりも 2 倍以上も大きい侵食が生じていることになる。銚子市役所水産課によれば、大正時代には石垣の陸側にある人工プールについての記録がなく、昭和 9 年 (1934 年) に観光協会がプール浚渫のための助成を行っているという。このことから石垣の建設時期は昭和初期と考えられる。仮にそれを昭和元年 (1926 年) とすると、計測を実

施した 2016 年は石垣の建設から 90 年経過したことになる。したがって、図 4 は 90 年を要して変化した石垣側面の後退量を示していることになる。地点 A と B における 90 年間の石垣の平均後退速度を求めると、それぞれ 0.8 mm/yr (= 7.0 cm/90 yr), 1.8 mm/yr (= 16 cm/90 yr) となる。

次に、波による直接的な侵食作用という観点から、石垣の後退速度の差異に与える地形場、すなわち波食棚の影響について考えてみる。ここでは、調査地点の沖に襲来する波浪のエネルギーレベルは同一であり、建設直後の石垣を構成する砂岩塊の岩石強度には大きな違いがないことにする。波による直接的な侵食、すなわち波による砂岩塊の破壊は、砂岩塊に加わる波の攻撃力が砂岩塊の強度よりも大きい場合に生じる。したがって、石垣前面の地形が異なると、石垣に与える波の攻撃力が異なり、そして波の攻撃力が砂岩塊の強度に対して相対的に大きいほど、石垣の後退速度が大きくなることは容易に推察される。波食棚のない地点 A の石垣には、波が直撃するが、波食棚のある地点 B の石垣には、満潮時に波食棚前面で碎波して形成されたボア状で波高の小さい水塊が作用するのみであり、地点 B の石垣に与える波の攻撃力は地点 A よりもきわめて小さいと考えられる。すなわち、石垣前面に波食棚が存在すると、沖波のエネルギーは同一であっても、波食棚がない場合と比較して石垣に与える波の攻撃力は小さくなる。また石垣が受ける波の作用の継続時間も、波食棚の有無によって異なり、波食棚のない地点 A のほうが、波食棚のある地点 B に比べて長くなる。しかし、本研究では、波の攻撃力が小さく継続時間の短い地点 B のほうが、地点 A よりも後退速度が大きくなるという結果となった。このことは、石垣築造直後に同一の強度をもっていただけと考えられる砂岩塊に作用する波の攻撃力とその継続時間を用いて、2 地点の後退速度の違いを合理的に説明できないことを示している。

3) 石垣表面の風化プロセスに与える波食棚の影響

海水飛沫帯の岩石には塩類風化作用が起こり、岩石表面には粒状の風化物質が生成されやすい

(例えば, Aoki and Matsukura, 2007)。海水飛沫帯に位置する地点 B の砂岩塊の表面には、塩類風化によって生成される粒状剥離した砂粒子や、塩類風化で形成されるタフォニ様のくぼみや蜂の巣構造などの微地形 (例えば, Matsukura and Matsuoka, 1991, 1996; Sunamura and Aoki, 2011) が数多く観察され、一方、地点 A では剥離した砂粒子がほとんど観察されなかった。このことから、地点 B は地点 A に比べて塩類風化が惹起しやすい環境であることが予想される。塩類風化は、海水に含まれた塩類の砂岩塊表面への供給と砂岩塊表面の乾燥化によって発生する。先述したように、両地点とも満潮時に海水が石垣全面に着水することが観察されたことから、満潮時においては両地点の砂岩塊すべてに塩類の供給がなされると判断できる。

そこで、地点 A と B の石垣表面の乾燥しやすさに違いがあるのかどうかを把握するため、赤外線水分計 (KJT-130, ケット科学研究所製) を用いて、もっとも海面が低下する干潮時に、両地点の砂岩塊表層の含水比 (w) を計測した。計測は 2015 年 3 月 10 日 12 時 30 分～13 時の時間帯に実施した。この日の銚子漁港における干潮時間は午後 12 時 37 分、天候は曇りであった。

図 5 は含水比 (w) と海拔高度 (h) との関係を示したグラフである。含水比のデータは、同一高度の平均値を求め、地点 A と B をわけてプロットした。この図から以下のことが読みとれる。地点 A の含水比は 3.1～5.6% の範囲をとり、高さ方向にみると、上方の砂岩層ほど低くなる傾向がある。満潮時に完全に海水に浸かる潮間帯の第 1～3 層の含水比が大きい。第 1 層と第 2 層の砂岩塊表面には海藻が付着していたのが観察されたが、最大含水比 (4.4%) よりも大きい値をとっているのは、海藻の付着による影響であると考えられる。一方、地点 B の含水比は約 2.2% の低い値を示し、地点 A の第 4～6 層の含水比と比べても、かなり低い値をとり、表面が乾燥していることがわかる。地点 B のほうが地点 A よりも含水比が低いという計測結果は、地点 B で塩類風化がより起こりやすいことを示しており、風化生

図 5 砂岩塊表面における含水比の高度分布。

Fig. 5 Vertical distribution of gravimetric water content (w) of sandstone surface with altitude (h) for each site.

成物や塩類風化で形成される微地形が地点 B で観察された結果と合致する。干潮時に両地点の含水比に違いをもたらす要因として、地点 A の石垣は波食棚がないため、遡上波や海水のしぶきなどの着水時間が長くなり、潮位低下による乾燥の開始が遅くなること、そして地点 B の石垣では波食棚があるために、潮位低下に伴う乾燥の開始が早くなるという波食棚の存在の影響が大きいといえる。

Matsukura and Takahashi (1999) は、青島と九州本島をつなぐ橋の橋脚を構成する砂岩塊を対象に、ポータブル赤外線水分計を用いて、満潮時から干潮時に向かう潮位低下に伴う砂岩塊表面の含水比の経時変化を計測した。その結果、含水比が 4% 以上の高い値で変動を繰り返している砂岩塊では風化が起こらず侵食されないが、2% 以下の含水比まで乾燥する砂岩塊では風化の介在した侵食が起こりやすいことを明らかにした。干潮時において、後退速度の大きい地点 B の石垣側面の含水比が、後退速度の小さい地点 A よりも低い値を示した本研究の結果は、Matsukura and Takahashi (1999) の傾向と調和的である。

以上のような観察・測定結果をもとに、石垣表面での風化プロセスについて考察する。まず波食

棚の存在する石垣では、波食棚は満潮時に海面に没しないが、波食棚前面における砕波によって石垣全面には海水が供給される。潮位が低下すると、波食棚は広義の防波堤となり、石垣への海水供給を絶つので、石垣を構成する砂岩塊表面は強い日射や風などにより、すぐに乾燥が開始される。そして再び満潮時になると海水が供給されるようになる。このような満潮時における短時間の海水供給と、長時間の砂岩塊表面の乾燥作用の繰り返しによって塩類風化が惹起され、石垣を構成する砂岩塊表層では、粒状剥離が生じやすい。一方、波食棚のない石垣は、潮位が平均海面下 -0.3 m 以下にならないと完全に露出しないため、長時間の冠水と石垣斜面に遡上する波の作用によって、砂岩塊表面の乾燥が妨げられる。その結果、塩類風化が起こりにくく、砂岩塊表面の剥離が生じにくい。

4) 波食棚の生成・発達プロセス

本研究の結果をもとに、波食棚の生成・発達プロセスについて考えてみる。I 章で述べたように、波食棚が海崖の後退によって生成される地形であることは、研究者の間では共通した認識である。現在未解決問題となっている波食棚の形成プロセスは、言い換えれば、波食棚の生成・発達をもたらす海崖後退の主要なプロセスは何か、ということである。本研究では、地点 A を波食棚の生成初期のステージ、地点 B を波食棚の発達過程のステージとみなしている。波食棚の生成初期には、海崖に対する波の攻撃力が大きい、海崖表面への海水の付着時間が長く、塩類風化の発生が抑制されるため、波による侵食量が少なく、海崖の後退速度は小さい。海崖が後退して波食棚の水平幅が広がると、海崖表面への波の直撃時間が減少し、乾燥しやすくなる。海崖表層部では塩類風化による粒状の風化物質が激しく生成され、ボア状の小波高の水塊によって容易に除去（侵食）されるため、崖の後退速度が大きい。このことは波食棚が生成し、発達するにつれ、波の侵食作用に対する塩類風化の影響が時間とともに大きくなり、海崖の後退速度、すなわち波食棚の発達速度が増大することを示唆している。

最後に、「波食説」と「風化説」とが対立した理由について言及する。本研究の結果に基づけば、海崖の後退には波の侵食作用は不可欠な要素であり、波食棚は波の侵食作用が大きな役割を果たすプロセスにより生成され、発達するにつれて塩類風化の介在する波の侵食作用によるプロセスにシフトしていくと解釈するのが合理的であろう。このことは、波食棚の生成・発達プロセスが、時空間的に変化することを示唆している。したがって、従来の研究の多くが、すでに形成されている波食棚の観察や計測結果に基づく推察であり、形成完了後の波食棚を対象としてきたことが「波食説」対「風化説」という対立した図式をもたらした原因の一つであろう。また、波食棚の地形変化速度は $10^0 \sim 10^1$ mm/yr のオーダー（例えば、Sunamura, 1994; Stephenson and Kirk, 2000; Sunamura *et al.*, 2014）と小さいため、現在観察される波食棚には海と陸の相対的な変動の影響が複雑に絡み合う長いタイムスケールの地形変化が積分された形で残されている可能性が高い。例えば、波食棚が生成されたのちに、相対的に海面が変化し、波食棚表面の高さが変わると、波食棚や海崖に作用する波や海水飛沫などの風化・侵食環境が変化する。このような地域では、現在の波食棚上に起こっている地形プロセス（すなわち波食棚上に作用する波の攻撃力の大きさと風化の強度）は生成時のものとは異なる可能性が大きい。海と陸の相対的な変動の影響が、対立した議論をより助長させた可能性もあるであろう。

波食棚の地形変化は、波食棚の生成・発達という水平方向への変化と、波食棚の表面低下という垂直方向の変化とに分けられる（例えば、Sunamura, 1992）。波食棚の生成に関する議論は、海崖に着目し、海崖の後退という現象に基づくことが望ましいと筆者は考える。しかし、自然の波食棚は原地形を復元できないという制約があり、実際に初生的な波食棚がどのような場所で、どのようなプロセスで生成されるのかを実証することがきわめて難しい。また、波食棚の地形変化速度が緩慢なため、生成からの地形の変遷を連続的に観察することもきわめて困難である。これらの問題

を克服するため、本研究では海と陸の相対的な変動の影響を無視できる、昭和初期に築造された経過時間の短い石垣を利用することにより、海崖の後退という観点から波食棚の生成と発達プロセスに関する考察を行った。波食棚の生成・発達には波による侵食作用は必須であり、波食棚が発達するにつれて塩類風化を生じさせる要因がメインとなるプロセスをもつことは、「波食説」対「風化説」のような波の侵食作用と風化作用とを切り離れた議論ではなく、波の侵食に対し風化作用がどのような役割を果たすのかという観点で、波食棚の形成を議論していく必要があることを意味している。

本研究では、波の侵食作用に与える風化の影響について、石垣表面の観察と1回の含水比計測の結果に基づいて考察した。今後は、(1) 潮の干満や日射量の変化に伴う石垣表面の含水比の時間的な変化の把握、(2) 異方性を含めた砂岩塊表面の風化による強度低下と侵食深との関係、(3) 侵食をもたらす波の攻撃力の把握、などの詳しい検討が必要である。波食棚の生成に塩類風化が関係するかどうかという問題については今後の検討課題としたい。

V. おわりに

本研究では、波食棚の形成をもたらす海崖の後退プロセスを明らかにするため、千葉県銚子半島海鹿島海岸の汀線付近に築造されていた砂岩塊からなる石垣を人工の海崖とみなし、波食棚がある場所とない場所という極端に地形場の異なる石垣を対象として野外調査を実施した。得られた結果は以下の通りである。

前面に波食棚がない石垣と波食棚がある石垣の後退速度を比較した結果、波食棚のない石垣よりも波食棚が存在する石垣の後退速度のほうが大きいことが明らかとなった。石垣表面の観察と含水比計測の結果に基づき、波食棚がない石垣と波食棚がある石垣の後退プロセスを比較検討した結果、波食棚のある石垣では、波食棚のない石垣よりも塩類風化作用が起りやすい環境であり、塩類風化が介在する波の侵食プロセスが卓越するこ

とがわかった。このことは、たとえ波食棚上を走るエネルギーの小さい波であっても、塩類風化が起りやすい海崖ほど、波による侵食が生じやすいことを示している。本研究の結果は、波食棚の生成時には、風化の影響は小さく、波の攻撃力が大きな役割を果たし海崖の後退が引き起こされる。そして波食棚の幅が広くなるにつれて、海崖表面の風化作用が激しくなり、海崖の後退速度が増大していくという地形プロセスの存在を示唆する。

謝 辞

本研究を進めるにあたり、石垣の建設時期に関する情報を提供していただいた銚子市役所水産課職員の皆様、および現地での測量やデータ取得にご協力いただいた東京学芸大学地理学教室の学生諸氏に対し、ここに記して厚く御礼を申し上げます。なお、本研究を行うに際し、科学研究費（基盤研究 C、課題番号：26350399）の一部を使用した。

文 献

- Aoki, H. and Matsukura, Y. (2007): A new technique for non-destructive field measurement of rock-surface strength: An application of the Equotip hardness tester to weathering studies. *Earth Surface Processes and Landforms*, **32**, 1759-1769.
- Bartrum, J.A. (1924): The shore platform of the west coast near Auckland: Its storm wave origin. *Reports of the Australian Association of Science*, **16**, 493-495.
- Cruslock, E.M., Naylor, L.A., Foote, Y.L. and Swantesson, J.O.H. (2010): Geomorphologic equifinality: A comparison between shore platforms in Hôga Kusten and Fårö, Sweden and the Vale of Glamorgan, South Wales, UK. *Geomorphology*, **114**, 78-88.
- Edwards, A.B. (1941): Storm wave platforms. *Journal of Geomorphology*, **4**, 223-236.
- Kanyaya, J.I. and Trenhaile, A.S. (2005): Tidal wetting and drying on shore platforms: An experimental assessment. *Geomorphology*, **70**, 129-146.
- Kennedy, D.M. (2015): Where is the seaward edge? A review and definition of shore platform morphology. *Earth-Science Reviews*, **147**, 99-108.
- 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., Supplementband*, **106**, 57-72.
- 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.
- Naylor, L.A. and Stephenson, W.J. (2010): On the role of discontinuities in mediating shore platform erosion. *Geomorphology*, **114**, 89-100.
- Porter, N.J., Trenhaile, A.S., Prestanski, K. and Kanyaya, J.I. (2010): Patterns of surface downwearing on shore platforms in eastern Canada. *Earth surface Processes and Landforms*, **35**, 1793-1810.
- Stephenson, W.J. (2000): Shore platforms: A neglected coastal feature?. *Progress in Physical Geography*, **24**, 311-327.
- Stephenson, W.J. (2001): Shore platform width—A fundamental problem. *Zeitschrift für Geomorphologie*, **45**, 511-527.
- Stephenson, W.J. and Kirk, R.M. (1998): Rates and patterns of erosion on inter-tidal shore platforms, Kaikoura Peninsula, South Island, New Zealand. *Earth Surface Processes and Landforms*, **23**, 1071-1085.
- Stephenson, W.J. and Kirk, R.M. (2000): Development of shore platforms on Kaikoura Peninsula, South Island, New Zealand. Part Two: The role of subaerial weathering. *Geomorphology*, **32**, 43-56.
- Sunamura, T. (1975): A laboratory study of wave-cut platform formation. *Journal of Geology*, **83**, 389-397.
- Sunamura, T. (1991): The elevation of shore platforms: A laboratory approach to the unsolved problem. *Journal of Geology*, **99**, 761-766.
- 砂村継夫 (1992): 野外実験 (field experiment) と野外観測 (field measurement): 用語法の混乱. 堆積学研究會, **37**, 97-99. [Sunamura, T. (1992): "Field experiment" and "field measurement": Some confusion in terminology. *Journal of the Sedimentological Society of Japan*, **37**, 97-99. (in Japanese with English abstract)]
- Sunamura, T. (1992): *Geomorphology of Rocky Coasts*. John Wiley & Sons.
- Sunamura, T. (1994): Rock control in coastal geomorphic process. *Transactions Japanese Geomorphological Union*, **15**, 253-272.
- Sunamura, T. (2015): Rocky coast processes: With special reference to the recession of soft rock cliffs. *Proceedings of the Japan Academy, Series B, Physical and Biological Sciences*, **91**, 481-500.
- 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.
- Sunamura, T., Tsujimoto, H. and Aoki, H. (2014): The rock coast of Japan. in *Rock Coast Geomorphology: A Global Synthesis* edited by Kennedy, D.M., Ste-

- phenson, W.J. and Naylor, L.A., Geological Society, London, 203–223.
- Trenhaile, A.S. (1999): The width of shore platforms in Britain, Canada, and Japan. *Journal of Coastal Research*, **15**, 355–364.
- Trenhaile, A.S. (2000): Modeling the development of wave-cut shore platforms. *Marine Geology*, **166**, 163–178.
- Trenhaile, A.S. (2001): Modeling the effect of weathering on the evolution and morphology of shore platforms. *Journal of Coastal Research*, **17**, 398–406.
- Trenhaile, A.S. (2004): Modeling the effect of tidal wetting and drying on shore platform development. *Journal of Coastal Research*, **20**, 1049–1060.
- Trenhaile, A.S. (2005): Modelling the effect of waves, weathering and beach development on shore platform development. *Earth surface Processes and Landforms*, **30**, 613–634.
- Trenhaile, A.S. and Kanyaya, J.I. (2007): The role of wave erosion on sloping and horizontal shore platforms in macro- and mesotidal environments. *Journal of Coastal Research*, **23**, 298–309.
- 辻本英和 (1985): 千葉県東部海岸の波食地形と構成岩石の物理・力学的性質. 地理学評論, **58**, 180–192. [Tsujimoto, H. (1985): Types of rocky coasts and the resisting force of coastal rocks in the eastern part of Chiba prefecture, Japan. *Geographical review of Japan*, **58**, 180–192. (in Japanese with English abstract)]
- Tsujimoto, H. (1987): Dynamic conditions for shore platform initiation. *Science Reports of the Institute of Geoscience, University of Tsukuba*, **A8**, 45–93.