

令和 4 年 6 月 24 日現在

機関番号：12604

研究種目：挑戦的研究（萌芽）

研究期間：2017～2021

課題番号：17K18524

研究課題名（和文）波食棚の生成・発達プロセス解明への野外実験的アプローチ

研究課題名（英文）A field experimental approach to reveal the formative process of horizontal shore platforms

研究代表者

青木 久（Aoki, Hisashi）

東京学芸大学・教育学部・准教授

研究者番号：30423742

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 4,500,000円

研究成果の概要（和文）：本研究では、波食棚の生成・発達プロセスとその形成高度を明らかにすることを目的とした野外調査を行った。主に次の結果が得られた。（1）波食棚の生成初期には、風化の影響が小さいため、崖の後退は起こりにくい。波食棚の幅が広がるにつれて、風化作用が活発になること、（2）岩石強度が低い波食棚ほど、その高度は低く、また、ほぼ同一の岩石強度をもつ波食棚では、その前面の水深が大きいほど暴浪時の波高が大きく、高度が低くなるという結果から、波食棚の形成高度は波の攻撃力と岩石強度で説明ができることがわかった。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究では、海岸とみなした石垣の調査に基づき「波食棚は、波食作用が大きな役割を果たして生成すること、そして波食棚の幅が広がると、風化による崖表面の強度低下がより顕著となり、発達していくこと」を示唆する実証的結果が得られた。この成果は、従来の考えとは異なり、波食棚の生成・発達には波食作用が不可欠な要素で、波食棚が発達するにつれて風化の影響が強くなるプロセスを提唱するものである。さらに野外波食棚の形成高度に関し、野外データの収集により、既存の実験式の検証から新たな経験式を提示した。これらの知見は、海岸景勝地にみられる地形発達プロセスの理解をより深め、ジオツーリズムの振興にも貢献できる。

研究成果の概要（英文）：The purpose of this study is to investigate formative processes of horizontal shore platforms and to examine controlling factors concerning the formative height of shore platforms. The following results are obtained. (1) Horizontal shore platforms grow wider as the importance of salt weathering increases and the combined effects of waves and weathering become crucial to platform development. (2) On coast composed of various kinds of rocks with different strengths, the elevation of shore platforms becomes lower with decreasing rock strength. On the coast composed of homogeneous rock with almost same strength, the platform elevation tends to decrease as the water depth at the seaward edge of platforms (front depth) increases. It is found that the elevation of platforms can be explained by the wave-rock parameter represented by the assailing force of waves and the resisting force of rocks.

研究分野：海岸地形学

キーワード：波食棚 形成プロセス 形成高度 岩石の抵抗力 岩石の風化 波の攻撃力 石垣 野外実験

## 1. 研究開始当初の背景

岩石海岸には、海食崖が発達する。海食崖の陸側への後退は、波食棚と呼ばれる特徴的な地形を形成させる。波食棚の形成に関しては、古くから数多くの研究がなされ、波による直接的な侵食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、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わ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、統一的な見解が得られていないという現状がある。

波食棚の形成高度に影響を与える要因についても古くから多くの議論がある。従来から、形成高度には波の攻撃力、構成岩石の強度、潮位差、地殻変動などが複合的に関与することが指摘されているものの、それらの関係を定量的に調べられた野外研究はほとんどない。室内実験によって波の攻撃力が強いほど、あるいは岩石強度が小さくなるほど、波食棚は低くなることが明らかにされている(例えば、Sunamura, 1991, 2002)が、野外波食棚の高度も、実験室と同様に波の攻撃力や岩石の抵抗力によって規定されるという実証はなされていない。

## 2. 研究の目的

以上のような背景から、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、また野外波食棚がどのような高度に形成されるのかという2つの未解決問題を解くため、それぞれに次のような目的を設定し、アプローチした。

一つ目は、波食棚の生成・発達プロセスを明らかにすることを目的として、海岸に築造されている、砂岩を整形した岩塊を積み上げた石垣を人工の海食崖とみなし、石垣表面の観察と計測を行うことである。二つ目は、波食棚の形成高度の規定要因を定量的に明らかにすることを目的として、均質な岩石からなる波食棚を対象にデータを収集し、野外波食棚の形成高度の定式化を行うこと、さらに、互層や礫岩で構成された不均質な地質構造や岩石をもつ波食棚を対象として、形成高度の規定要因を探ることである。

## 3. 研究の方法

研究目的を達成するため、海岸部に石垣や波食棚の存在する異なる調査地域において、5つのサブテーマを設定し、現地調査が実施された。

### (1) 波食棚の生成・発達プロセス

千葉県海鹿島海岸には、砂岩を整形した岩塊(以下、砂岩塊)を最大7段に積み上げた全長約100 m、高さ約2.5 mの石垣が存在する。現地観察によると、石垣の砂岩塊表面には侵食作用による窪みが生じている。石垣の沿岸方向には波食棚がある場所とない場所、すなわち波食棚の発達していた所に石垣が設置されていた地点とそうでない地点とがあり、窪みの侵食量がこれらの地点で大きく異なる。石垣を人工の海食崖と考えると、両地点の侵食量の違いは、地形場の条件をコントロールした海食崖後退に関する野外実験の結果とみなすことができる。石垣の前面に波食棚がない崖(Site A)からは波食棚生成時のプロセスを、波食棚のある崖(Site B)からは波食棚発達中のプロセスをそれぞれ探求できると考えると、波食棚の生成・発達プロセスの考察が可能になる。そこで本調査では、両地点における砂岩塊表面の侵食量、強度、含水比を計測し、それらの計測結果から、波食棚の生成・発達プロセスを考察した。

### (2) 波食棚の生成に与える風化の影響

宮崎県青島の弥生橋は、砂岩塊を最大13段に積み上げた石垣からなる橋脚4基で支えられている。潮間帯上部と海水飛沫帯に位置する橋脚の砂岩塊表面は侵食されている。橋脚側面はほぼ東西南北を向いており、方位や高さごとに侵食量が異なる。同一の橋脚において、南面の侵食量が最も大きく、北面の侵食量が最も小さい。また、日射量については、南面が最も多く、北面が最も少ない。侵食量と日射量には相関があり、侵食には塩類風化が介在していると報告されているが、これまで石垣を人工の海食崖とみなしたマクロな観点からの検討はなされていない。本調査では、竣工から70年経過した石垣の侵食量(すなわち崖の後退量)と表面強度の把握を行い、

波食棚の生成に与える風化の影響に関する考察を試みた。

### (3) 均質な岩石から成る波食棚の形成高度

静岡県伊豆半島南東部の海岸には種々の火山岩類で構成される波食棚が、神奈川県江の島には凝灰質砂岩で構成される波食棚が発達する。この2地域に発達する均質な岩石から成る波食棚について、地形測量ならびに構成岩石の強度計測を行い、それらのデータを用いて野外波食棚の形成高度に関する定量的考察を試みた。

### (4) 不均質な地質構造(互層)から成る波食棚の形成高度

三浦半島荒崎海岸には、凝灰岩と泥岩の互層で構成される波食棚が発達し、凝灰岩が凸部、泥岩が凹部となる洗濯板状起伏がみられる。そこで、互層からなる波食棚の形成高度の規定要因を探求することを目的とした調査を実施した。まず波食棚上に測線を設け、地形測量を行い、地形断面図を作成した。次に、凝灰岩と泥岩に対して強度計測と弾性波速度測定を行い、岩盤強度を推定した。そして、地形断面をいくつかの区間に分け、各区間における波食棚の平均高度、凝灰岩の層厚、凝灰岩層の割合を算出し、それらの関係を考察した。

### (5) 不均質な岩石(礫岩)から成る波食棚の形成高度

静岡県下田市須崎半島の恵比須島には火山角礫岩で構成される波食棚が発達する。本調査では、角礫岩波食棚の形成高度の規定要因を探求することを目的とし、恵比須島に発達する火山角礫岩の波食棚と隣接する凝灰質砂岩からなる波食棚を対象に、地形測量ならびに岩石強度計測を行った。まず火山角礫岩と砂岩からなる波食棚の縦断面形から形成高度を把握した。次に角礫岩の角礫含有率を算出し、砂岩波食棚との比較によって、角礫岩波食棚の形成高度を規定する要因について考察した。

## 4. 研究成果

上述した5つのサブテーマに関わる現地調査を実施し、それぞれに対応した以下のような研究成果が得られた。

### (1) 波食棚の生成・発達プロセス

崖の後退量は、Site AよりもSite Bの方が大きかった。岩石強度は、Site AよりもSite Bの方が小さかった。干潮時における最小含水比はSite AよりもSite Bの方が小さかった。崖の後退量、岩石の強度低下との関係を、干潮時の最小含水比に着目し、風化作用の観点から分析すると、干潮時に乾燥しやすいSite Bは、Site Aに比べ、風化しやすい環境で、岩石強度の低下が起こりやすく、侵食を受けやすい崖であると解釈できた。本調査結果は、海食崖の後退しやすさには、風化作用の強さが関係し、波食棚の生成初期は、風化の影響が小さいため、崖の後退は起こりにくい。波食棚の幅が広くなるにつれ、風化作用が活発となり、崖後退の速度が増大することを示唆する。

### (2) 波食棚の生成に与える風化の影響

崖(橋脚側面)全体が波食ノッチ状の断面を示すこと、崖の後退速度は、従来報告されている波食棚海岸での崖の後退速度と整合することから、橋脚では波食棚の生成(初期形成)が起こっていると解釈できた。ノッチ底面を形成初期の波食棚表面とみなし、豊富な日射を受ける南面とほとんど日射を受けない北面を対象に、砂岩塊表面で強度計測を行ったところ、南面は、北面よりも低強度の砂岩塊が数多く存在し、低い位置に波食棚が形成され、その水平幅が大きかったことなどから、風化を強く受ける南面では、潮間帯以高で激しい強度低下が起き、結果として潮間帯に広い波食棚が生成され、風化を受けにくい北面では、南面よりも高い位置に狭い波食棚が生成されることがわかった。以上のことから、波食棚の生成速度や生成位置には風化環境が強く影響していることが示唆される。

### (3) 均質な岩石から成る波食棚の形成高度

襲来する沖波のエネルギーが一定で、強度の異なる種々の岩石から成る伊豆半島南東部の海岸における調査から、岩石強度が低い波食棚ほど、形成高度は低くなることがわかった。また襲来する沖波のエネルギーが一定で、ほぼ均質で単一の岩石からなる江の島海岸における調査結果は、前面の水深が大きい波食棚ほど、形成高度が低くなる傾向を示した。両海岸には、暴浪時には碎波後の波が作用するので、前面水深が大きいほど、波の波高が大きくなるという仮定をもとに分析した結果、波食棚の形成高度( $z$ )は、前面水深( $h$ )と  $gH^*/S_c$  を用いて次式で表現された。

$$z/h = -0.73 [6.4 + \ln(gH^*/S_c)]$$

ここに  $H^*$  は各地点に襲来する崖前面での波の波高、 $S_c$  は崖基部を構成する岩石の一軸圧縮強度、 $g$  は海水の密度、 $g$  は重力加速度である。

#### (4) 不均質な地質構造(互層)から成る波食棚の形成高度

未風化の岩石強度は凝灰岩よりも泥岩の方が大きいですが、風化節理の影響を考慮した岩盤強度は、風化節理を有する泥岩の方が小さくなり、この岩盤強度の大小が、地表面の侵食されやすさ、すなわち地形の凹凸と対応した。これは泥岩が乾湿風化によって強度低下し、波によって侵食されることを意味している。波食棚の平均高度と凝灰岩層の割合との関係を見ると、凝灰岩層の割合が高いほど、波食棚が高くなる傾向がみられた。これは岩盤強度の大きい凝灰岩層の割合が高い波食棚ほど侵食されにくいことを示している。このことから、泥岩と凝灰岩の互層からなる波食棚の形成高度は、互層の構成割合と風化した表面強度によって説明できる。

#### (5) 不均質な岩石(礫岩)から成る波食棚の形成高度

恵比須島に発達する波食棚は、火山角礫岩の波食棚のほうが砂岩の波食棚よりも高い位置に形成され、角礫含有率が高い波食棚ほど形成位置が高くなる傾向をもつことがわかった。このことから、火山角礫岩の波食棚の形成高度は、基質と角礫の強度および角礫含有率に規定され、強度の大きい角礫と小さい基質の含有する比率の差異が、波の攻撃力に対する抵抗力の違いをもたらしていると解釈できる。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計6件（うち査読付論文 2件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 5件）

1. 著者名 森山裕太・青木 久	4. 巻 76
2. 論文標題 火山角礫岩で構成される波食棚の形成高度 伊豆半島恵比須島の事例	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 学芸地理	6. 最初と最後の頁 19-27
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

1. 著者名 青木 久	4. 巻 66
2. 論文標題 過去の大規模自然災害に着目した教材開発の試み	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 新地理	6. 最初と最後の頁 73-82
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 青木 久・水戸部恭平・遠西篤治	4. 巻 73
2. 論文標題 砕波後の波が作用する波食棚の形成高度 - 静岡県下田海岸と神奈川県江の島海岸の事例 -	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 東京学芸大学紀要 人文社会科学系	6. 最初と最後の頁 17-24
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

1. 著者名 孫 小淳・青木 久	4. 巻 77
2. 論文標題 海岸線の屈曲度と岩石強度との関係 房総半島と三浦半島の事例	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 学芸地理	6. 最初と最後の頁 139-150
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

〔学会発表〕 計11件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 0件）

1. 発表者名 原田悠紀・青木 久
2. 発表標題 岩石海岸に発達する海食崖を動的に理解するための学習 海岸域に建設された石垣の活用例
3. 学会等名 2019年度日本地理教育学会第69回大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 原田悠紀・青木 久
2. 発表標題 波食棚の形成をもたらす海食崖の後退に与える風化作用の影響 - 砂岩塊からなる石垣を用いた一考察 -
3. 学会等名 日本地理学会 2019年春季学術大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 原田悠紀・青木 久
2. 発表標題 海岸域に形成される微地形タフォニとハニカム構造の形成条件に関する一考察
3. 学会等名 2018年度日本地理教育学会第68回大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 青木 久・高田結人・川島 愛
2. 発表標題 三浦半島荒崎海岸における波食棚の形成高度に関する一考察
3. 学会等名 日本地理学会 2017年秋季学術大会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 原田悠紀・青木 久
2. 発表標題 海岸域に形成されるタフォニとハニカム構造の形成条件 砂岩塊で構成される石垣を利用して
3. 学会等名 日本地理学会 2018年春季学術大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 高瀬南歩・青木 久
2. 発表標題 千葉県屏風ヶ浦における崖錐の高さと形成時間との関係 崖錐の地形発達に関する一考察
3. 学会等名 日本地理学会 2018年春季学術大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 青木 久
2. 発表標題 景観写真と図で読み解く海岸の地形
3. 学会等名 日本地理学会 2018年春季学術大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Y.S. Hayakawa and H. Aoki
2. 発表標題 Spatiotemporal evaluation of weathering-induced depressions in sandstone blocks by terrestrial laser scanning
3. 学会等名 Japan Geoscience Union Meeting 2021
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 青木 久
2. 発表標題 過去の大規模自然災害に着目した教材開発の試み
3. 学会等名 2018年日本地理学会春季学術大会 第33回地理教育公開講座
4. 発表年 2018年

〔図書〕 計1件

1. 著者名 加賀美雅弘・荒井正剛編（第3章 分担執筆）	4. 発行年 2018年
2. 出版社 古今書院	5. 総ページ数 106
3. 書名 景観写真で読み解く地理	

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------