

## 島根県石見豊ヶ浦の波食棚に作用する塩類風化 および波浪侵食の特徴

仲 優太郎<sup>1</sup>・小暮哲也<sup>2</sup>

### Characteristics of Salt Weathering and Wave Erosion at the Wave-Cut Bench in Iwami-Tatamigaura, Shimane, Japan

Yutaro NAKA<sup>1</sup> and Tetsuya KOGURE<sup>2</sup>

#### Abstract

Characteristics of salt weathering and wave erosion and their effects on the wave-cut bench in Iwami-tatamigaura are discussed through geomorphological investigations. The wave-cut bench is part of the Middle Miocene Tougane Formation and is made up of fine- to medium-grained sandstone. The sandstone layer includes nodules which are described as an oblate ellipsoid with height, major axis and minor axis of around 30, 50 and 40 cm, respectively. The nodules are thought to be the sandstone concreted by the precipitation of calcium component from fossils of marine organisms. The concretions are now exposed on the surface of the wave-cut bench. Tafoni, which are formed by salt weathering of rock, develop on the surface of the concretions. The size of concretions and the depths of tafoni were measured to evaluate the effects of salt weathering and wave erosion on concretions around the wave-cut bench.

The measurements revealed that the effects of salt weathering and wave erosion on the wave-cut bench vary regionally although the appearance of the entire wave-cut bench is homogeneous. The aspect ratio, which is defined as the ratio between the minor axis of the concretions and the major axis, reflects the effect of wave erosion on the topography of concretions. Mean ratio is the smallest (0.79) in a part of the bench where waves with the largest energy approach, and is the largest (0.90) in the least-affected part. Direction of the major axis of the concretions corresponds well to that of the direction of wave propagation from the sea. Salt weathering occurs everywhere around the bench if the surface of the concretions dries. However, the surface with tafoni is easily removed or exfoliated by waves in a region where the effect of wave erosion is large. Therefore, the largest mean depth of tafoni (*ca.* 2.0 cm) is found in areas where wave energy is low, and the smallest tafoni (*ca.* 1.5 cm) are found in areas with the

---

2017年2月2日受付, 2017年5月7日受理

<sup>1</sup> 島根大学大学院総合理工学研究科地球資源環境学領域 (現復建調査設計株式会社)

<sup>1</sup> Department of Geoscience, Interdisciplinary Graduate School of Science and Engineering, Shimane University, 1060, Nishikawatsu-cho, Matsue, Shimane 690-8504, Japan (Currently, Fukken Co., Ltd.)

<sup>2</sup> 島根大学大学院総合理工学研究科地球資源環境学領域

<sup>2</sup> Department of Geoscience, Interdisciplinary Graduate School of Science and Engineering, Shimane University, 1060, Nishikawatsu-cho, Matsue, Shimane 690-8504, Japan

highest wave energy. This suggests that both wave erosion and salt weathering control the topography of the concretions. The effect of salt weathering is dominant if the effect of wave erosion is small. The processes may affect not only the concretion topography but also in the general development of the wave-cut bench.

**Keywords:** *concretion, wave-cut bench, tafoni, salt weathering, wave erosion*

## 1. はじめに

1872年3月14日に島根県西部で発生した浜田地震の規模はマグニチュード $7.1 \pm 0.2$ 、震源は浜田北約28 kmの海底とされる(宇佐美, 1996, pp. 165-171)。地震発生から約40年後、この浜田地震により浜田市北部に位置する石見畳ヶ浦の波食棚が隆起したとする報告書が作成された(今村, 1913)。聞き込み調査を基にしたこの報告書では畳ヶ浦周辺が0.9~1.2 m程度隆起したとされる。藤森ほか(1990)は、浜田地震が畳ヶ浦を隆起させ、浜田周辺の海岸部に隆起・沈降が交互に現れる複雑な地殻変動を引き起こしたと報告した。その後、浜田地震による隆起を誤りとする説(渡辺, 2008)や傾動性を有した部分的な隆起・沈降が生じたとする説(平坂ほか, 2004)が発表された。浜田地震は有史以来山陰地方にきわめて大きな被害をもたらした地震の一つである。したがって、浜田地震による地表面変動の特徴を明らかにすることは、将来同様の規模の地震が発生した際の被害予測など、学術面だけでなく防災面においても意義がある。しかし、既存研究では測量データ等に基づいた定量的な議論が行われておらず、地震により石見畳ヶ浦の波食棚に変化が生じたかさえ不明である。

一般に、波食棚の形成要因として(a)波の大きさ、(b)潮汐、(c)陸上及び浅海底の地形、(d)構成岩石の抵抗力、(e)風化作用、(f)侵食力を制御する堆積物の量・粒径、(g)海水による化学的作用、(h)生物の作用、(i)陸と海の相対運動などが挙げられる(砂村, 1975)。近年の研究では、波食棚の形成要因は主として波浪による侵食作用(たとえばSunamura, 2002; Trenhaile, 2002)と、風化作用(たとえばStephenson and Kirk, 2000; Kennedy and Beban, 2005)とに二分されている。石見畳ヶ浦の波食棚にはノジュールが露出し、その表面にはタフォニが発達する。また、波浪により破壊されたとみられる波食棚の痕跡も見られる。これらは、石見畳ヶ浦の波食棚に対する波浪侵食や風化の影響を示唆する。

浜田地震による石見畳ヶ浦の隆起の有無を検討するための第一歩として、本論文では波浪侵食と風化が現在の石見畳ヶ浦の波食棚に与える影響を議論する。波食棚上において、波浪侵食や風化により形成される微地形の特徴を把握すれば、隆起の有無を議論する際の有力な手掛かりになると考えられる。したがって、ここでは石見畳ヶ浦におけるノジュール及びタフォニの大きさや分布を把握し、波食棚における波浪侵食と風化の特徴について報告する。

## 2. 調査地域

島根県浜田市北東部に位置する石見畳ヶ浦 (Fig. 1) は中部中新統唐鐘累層中の畳ヶ浦砂岩部層に相当する (大久保, 1982; 中条ほか, 1993). 唐鐘累層は始新統~漸新統の国府火山岩類 (今岡ほか, 1990) を不整合に覆い, 鮮新統~更新統の都野津層, 更新統の国分層に不整合に覆われる. 唐鐘累層は下位より唐鐘川泥岩部層, 姉ヶ浜砂岩部層, 金周布礫岩砂岩部層, 畳ヶ浦砂岩部層に区分されており, 全体的に北東-南西方向の走向で, 北西に5~15°傾斜する同斜構造を示す (中条ほか, 1993). 畳ヶ浦砂岩部層は模式地である石見畳ヶ浦とその北東に位置する金周布・赤鼻にかけて分布する. 層厚は上限については不明だが露出する限り約40mである. 畳ヶ浦砂岩部層は金周布礫岩砂岩部層に整合に重なる. 本部層の下位はほぼ塊状の細粒~中粒の砂岩からなり, ごく少量の細礫~中礫

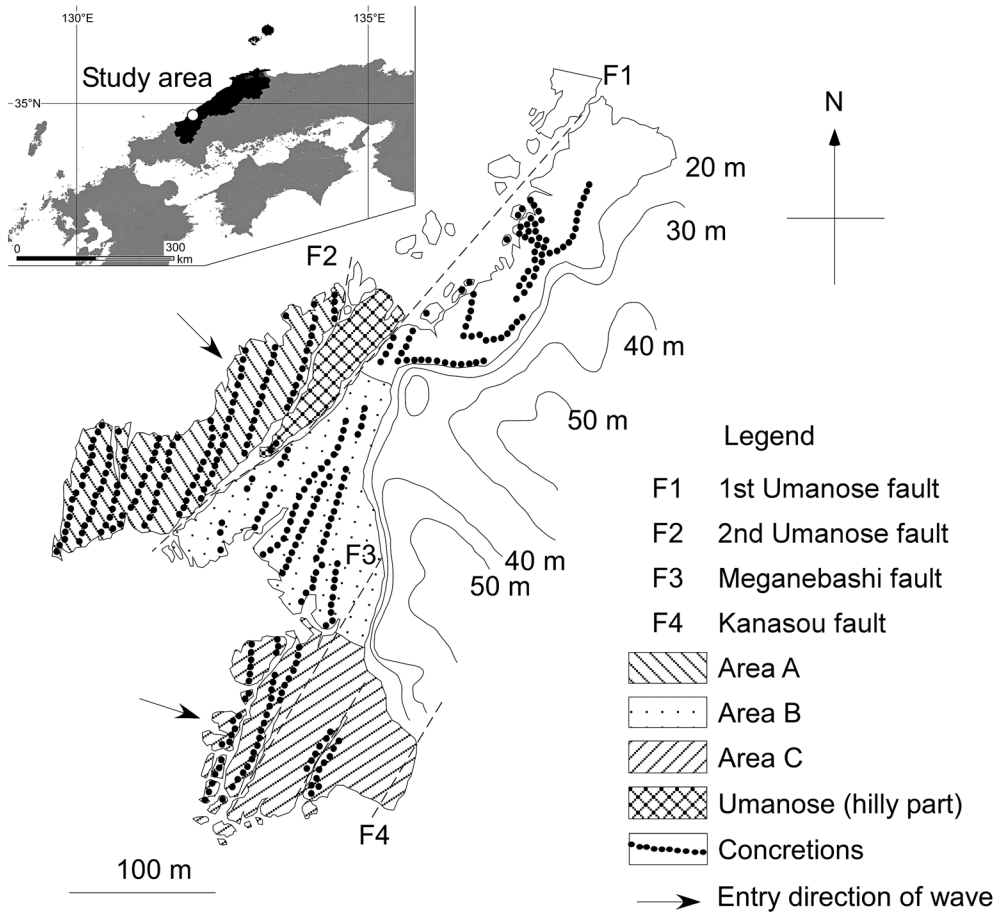


Fig. 1. Map of Iwami-tatamigaura (after Okubo, 1982). Wave-cut bench was classified as Area A, B and C, which are shown as shaded area. "Umanose" is a more elevated area (approximately 5 m above the wave-cut bench).

が散在する。本部層上部は細粒砂岩を主体として上方に泥質砂岩が卓越する（中条ほか，1993）。

調査対象の波食棚の面積は約 49,000 m<sup>2</sup> であり，一部が西に突き出す形状である。波食棚にはいくつかの断層が発達し，断層と同時期に形成された複数の節理が発達する（瀬戸ほか，1999）。断層の幅は最大で 2 ～ 3 m である。断層は西から順に第 2 馬の背断層，第 1 馬の背断層，めがね橋断層，金周布断層と呼ばれる（Fig. 1）。波食棚はほぼ平坦であるが，第 2 馬の背断層と第 1 馬の背断層が交差するあたりで比高が小さい。そのため，北西から侵入して波食棚を遡上する波はこれらの断層に流入してプールを形成する。

波食棚表面には直径数 10 cm の石灰質ノジュールが見られる（Fig. 2）。石灰質ノジュールは同一層準に産出することから，地層断面では列状に分布する。瀬戸ほか（1999）によると，ノジュールの形成過程は以下の通りである：波浪の影響によりノジュールの核となる貝殻が集積し，集積した貝殻は化石となり周辺に炭酸カルシウムが沈殿してノジュール化する。以下，本文中では「ノジュール」と表記するが，英語による図の説明文中では成因を表す **concretion** と表記する。ノジュールと同様に波食棚上で見られる球状の微地形としてのきのこ岩が一般的に知られている（たとえば Sunamura, 1992; Trenhaile et al., 1998; 青木ほか，2004）。きのこ岩の頭部もまた，砂の層が脱水固結して砂岩に変わる過程で，局部的に石灰成分が濃集して形成された（町田ほか，1981）とされる。青木ほか（2004）では，シュミットハンマー打撃試験を行いきのこ岩の方が波食棚構成岩石より固いことを示した。このことから，きのこ岩頭部は波食棚表面よりも硬い砂岩で構成され，それらが風化・侵食作用から免れた地形である，とした。石見曇ヶ浦は国の天然記念物に指定されており，現地での測量以外の調査は不可能なため，波食棚やノジュールの硬さを直接評価できない。しかし，きのこ岩の成因との共通性を考慮すると，石灰成分の濃集によりノジュールの方が波食棚構成岩石より硬く，風化や侵食に対する抵抗性が高いと考えられる。

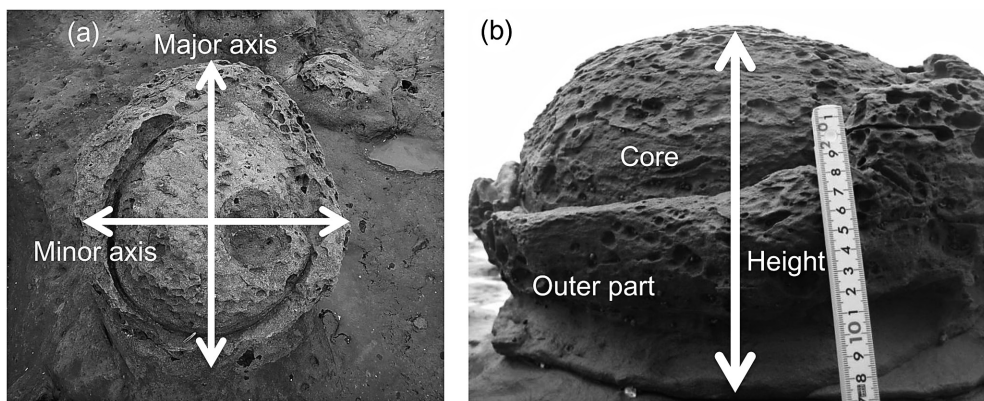


Fig. 2. An example of concretions exposed on the surface of the wave-cut bench: (a) a plan view and (b) a sectional view.

畳ヶ浦のノジュールの多くは、内側部分とそれを覆う外側部分からなる (Fig. 2)。ここでは内側部分を核、外側部分を殻とする。殻は凹凸が激しく、ほぼ全てのノジュールで殻の上部が剥がれている。上述の通り、ノジュールが波食棚上に分布する原因は、ノジュールと波食棚との強度差による差別侵食であると考えられるが、ノジュールの殻の部分も波浪により削剥された可能性がある。

ノジュールの表面及び波食棚にはタフォニが形成されている。タフォニは、(1) 岩石表面に塩溶液が付着し、表層に浸透する、(2) 岩石表面から水分が蒸発し、水に溶けていた塩類が結晶化する、(3) 岩石内部に圧力が生じ、岩石表面が引張破壊する、その結果として形成されると考えられる (たとえば、松倉, 2008, pp. 19-23)。したがって、石見畳ヶ浦のノジュール表面においても、海水の付着によりタフォニが形成したと考えられる。

Fig. 3a は、国土交通省港湾局によって観測された 2012 年度の浜田港沖における 2 時間ごとの全波向を示す。N40° W ~ N30° E の方向から来た波浪が全体の約 60% を占める。また Fig. 3a から波高 2 m 以上の波浪を抽出し、Fig. 3b に示した。波高 2 m 以上の波浪は、碎波後に波食棚上を遡上する。波高 2 m 以上の波浪のうち、約 80% の波浪は N40° W ~ N20° E の方向から到達する。

### 3. 現地調査

波食棚における局所的な波浪侵食と塩類風化の影響について調べるために、畳ヶ浦を 1) 馬の背を除く第 1 馬の背断層より西側の部分 (Area A)、2) 中央部分の第 1 馬の背断層とめがね橋断層の間の部分 (Area B)、3) めがね橋断層より南側の部分 (Area C) の 3 つに

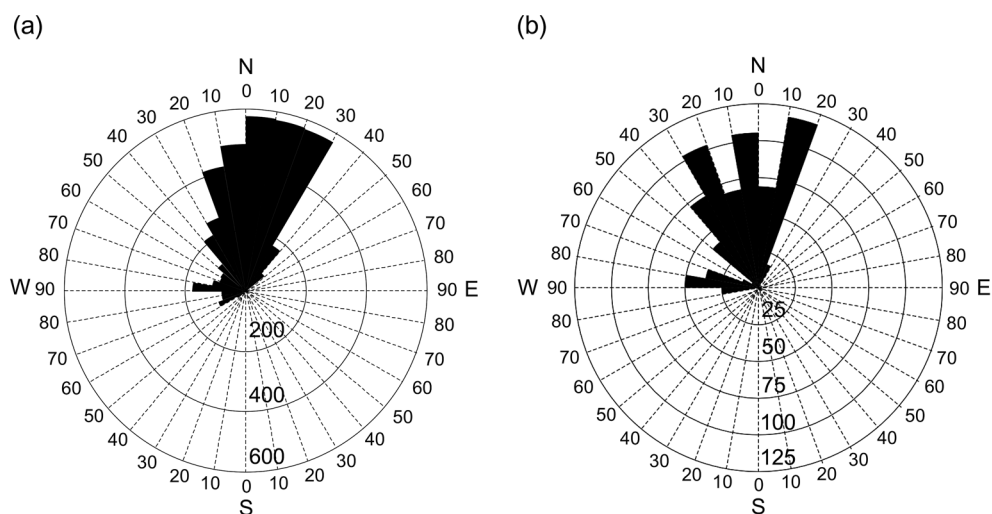


Fig. 3. Wave direction off the coast of Hamada city for every 2 hours in 2012 measured by Japan Meteorological Agency: (a) for every wave and (b) for waves with heights of more than 2 m.



分けた (Fig. 1). 以下に, 調査項目を記す.

波浪侵食の影響を調べるために, ノジュールの長径・短径の長さ, 頂部から波食棚までの高さ, および長径の向きを計測した (Fig. 2). 長径・短径の長さの計測では, 核および殻を含むノジュール全体の長さを計測した. 計測対象のノジュールは, 東西方向に設定した4本の測線 (A-A', B-B', C-C', D-D') とノジュール列との交点から 10 m 以内にあるノジュールである (Fig. 4). 計測したノジュールの個数は各ノジュール列につき, 10 個である.

塩類風化の影響を調べるためノジュール表面のタフォニの窪み深さを計測した. 対象としたノジュール列は, ノジュールの数が比較的多い Area A の N6, N4, Area B の N5, Area C の N4 の計4列である (Fig. 4). それぞれを L1, L2, L3, L4 とする. タフォニの窪み深さは, 核と殻の表面で大きく異なる. そこで本研究では, 核と殻の表面に発達する

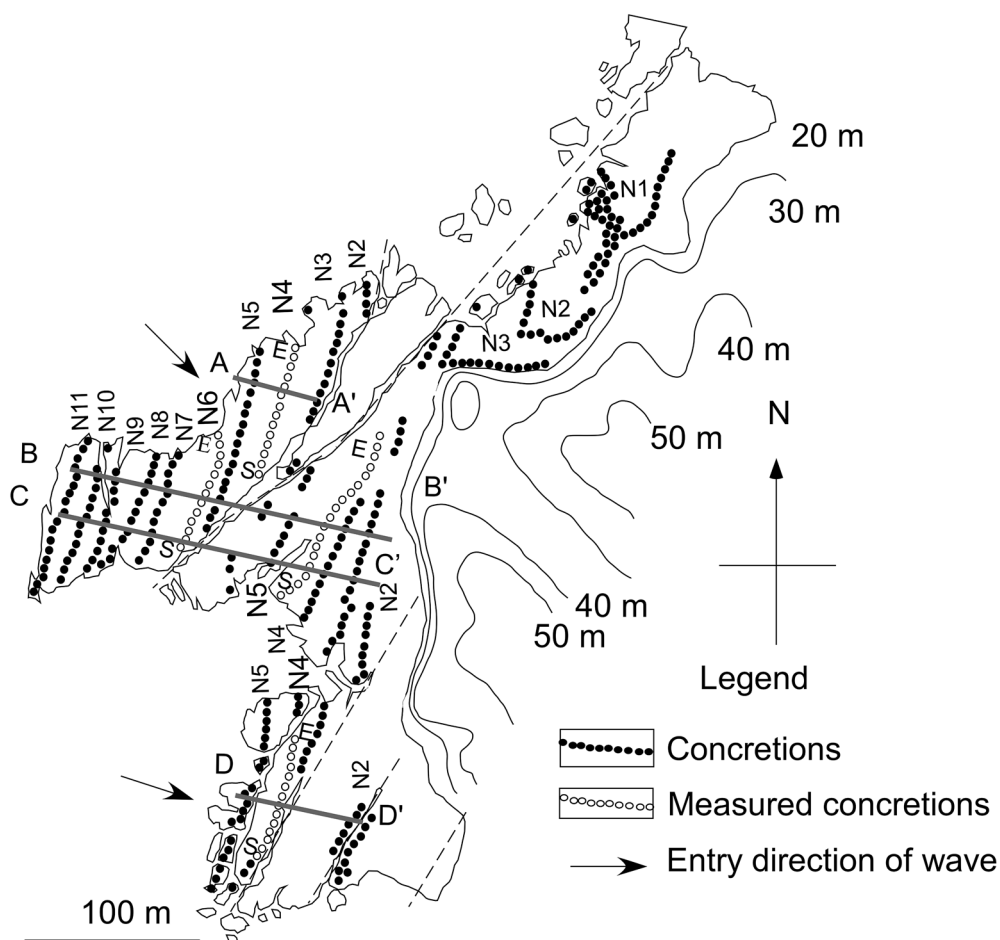


Fig. 4. Locations of measurement lines A-A', B-B', C-C' and D-D', and lines of concretions in which the depths of tafoni were measured.

タフォニの窪み深さを区別して計測した。一つのノジュールにつき核と殻それぞれ 20 個ずつのタフォニを計測した。タフォニの両端に棒を渡して基準面を作り、基準面に対してノギスを直交させて、最深部の深さを 0.1 cm 単位で読み取り、窪み深さとした。

浜田港沖では  $N40^{\circ} W \sim N20^{\circ} E$  方向から多くの波浪が来るが、海岸付近では波浪が回折するためこのデータは畳ヶ浦周辺の状態とは異なる。そこで波食棚における実際の波の被り方を 2014 年 10 月 1 日に観察した。Area A および Area C において、波食棚に対する波浪の局所的な遡上の違いを確認した。

#### 4. 波食棚における局所的な波浪侵食

Fig. 5 に、Area A および Area C の遡上波の様子を示す。Fig. 5a は 2014 年 10 月 1 日午前 10 時に撮影された Area A における遡上波、Fig. 5b は同日午後 0 時 Area A および Area C における遡上波である。波食棚を遡上する波浪の様子は場所により異なる。Area A では浜田港沖で観測された波向と同様に北西方向から波浪が到達する。碎波後の波浪は波食棚表面を遡上し、第 1 馬の背断層に流入する。第 1 馬の背断層を超えた波浪の一部は Area B の波食棚表面を部分的に覆う。Area C に到達する波浪は浜田港沖で観測された波向と異なり、回折して海岸線に直交する  $N80^{\circ} \sim 90^{\circ} W$  方向から到達する。以上のように Area A および B と Area C とでは波向が異なる波浪が到達する。また、Area C の沿岸で確認できる波高は Area A で確認できる波高より小さい (Fig. 5b)。これは波浪が回折して Area C に到達するまでに波浪のエネルギーが減衰するためと考えられる。

ノジュールの長径と短径の長さの計測結果を Fig. 6 に示す。Fig. 6 の横軸は長径 ( $LD$ )、縦軸は短径 ( $SD$ ) の長さを表す。 $LD$  と  $SD$  の関係は次の通りである：測線 A-A')  $SD = 0.90 LD$ ；測線 B-B')  $SD = 0.79 LD$ ；測線 C-C')  $SD = 0.84 LD$ ；測線 D-D')  $SD = 0.90 LD$ 。これらの回帰直線の傾きを  $n$  とすると  $n = SD/LD$  であり、 $n = 1$  ではノジュールの平面形が真円であり、 $n$  が小さい程楕円の度合いが大きいことを示す。 $n$  は測線 B-B' で最も低い値 (0.79) を示し (Fig. 6b)、測線 D-D' のノジュールで最も高い値 (0.90) を示した (Fig.

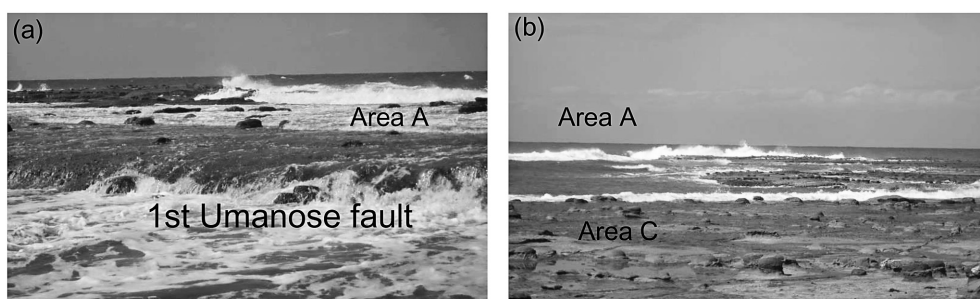


Fig. 5. Waves observed in Iwami-tatamigaura: (a) waves running through Area A and running into the first Umanose fault and (b) larger waves in Area A and smaller waves in Area C.

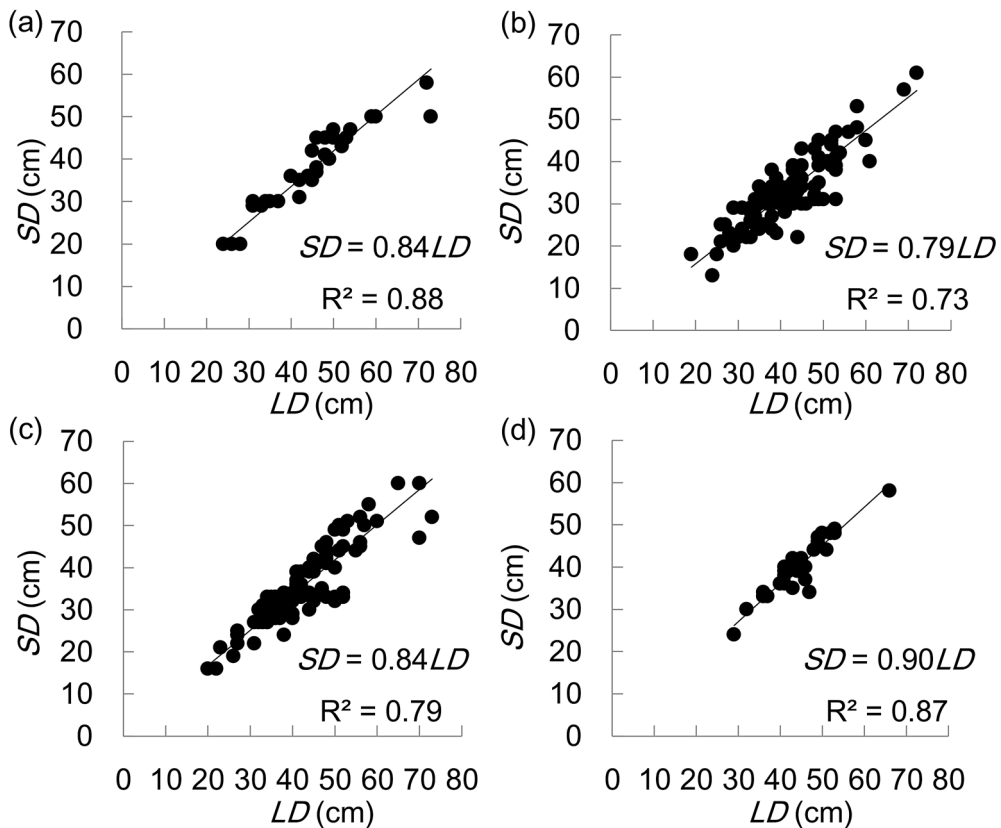


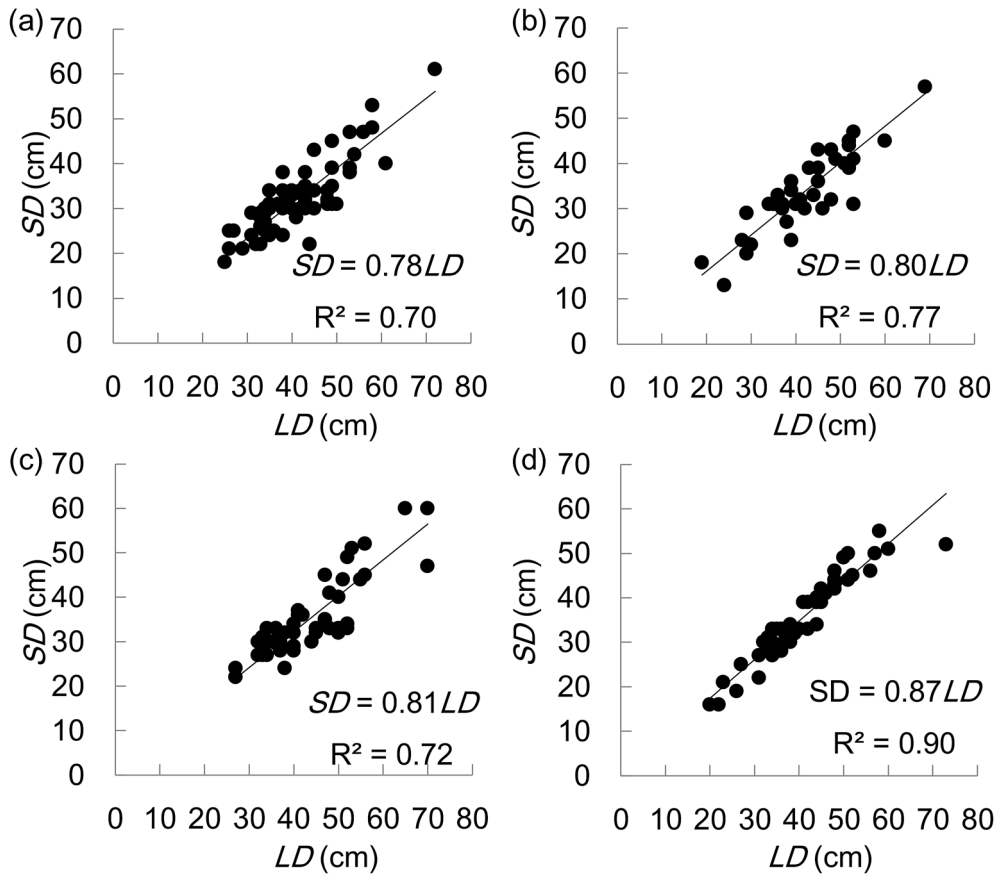
Fig. 6. Relationship of lengths between the major ( $LD$ ) and minor ( $SD$ ) axis of concretions in (a) A-A', (b) B-B', (c) C-C' and (d) D-D'.

6d). したがって測線 B-B' 周辺のノジュールの平面形は他の測線付近にあるノジュールと比べ、楕円の度合いが高い。

先述した通り、第1馬の背断層の西側である Area A では波浪が波食棚表面を覆いやすい (Fig. 5a). そこで測線 B-B', C-C' について、測線を第1馬の背断層の西側 (W, Area A) と東側 (E, Area B) とに分け、その結果を Fig. 7 に示す.  $n$  の値は、測線 B-B' (W) で 0.78, 測線 B-B' (E) で 0.80 であり、測線 C-C' (W) で 0.81, 測線 C-C' (E) で 0.87 と西側 (海側) の方がより小さい. したがって、Area A のノジュールの形状はより楕円形に近く、Area B ではより真円に近い.

ノジュールの長径の向きを計測結果を Fig. 8 に示す. 測線 A-A', 測線 B-B', 測線 C-C' (Fig. 8a, b, c) における長径の向きは  $N0^\circ \sim 30^\circ W$  の間に集中するが、同様に波食棚を覆う波高 2 m 以上の波向も  $N40^\circ W \sim N20^\circ E$  の間に集中する. 測線 D-D' (Fig. 8d) では長径の向きが海岸線に直行する方向 ( $N80^\circ \sim 90^\circ W$ ) に集中するが、これは Area C における波浪の侵入方向と一致する. こうした波向とノジュールの長径の向き的一致は、波浪によるノジュールの侵食、とりわけ摩耗作用の影響を表すと考えられる. 砕波後の波は波食棚を

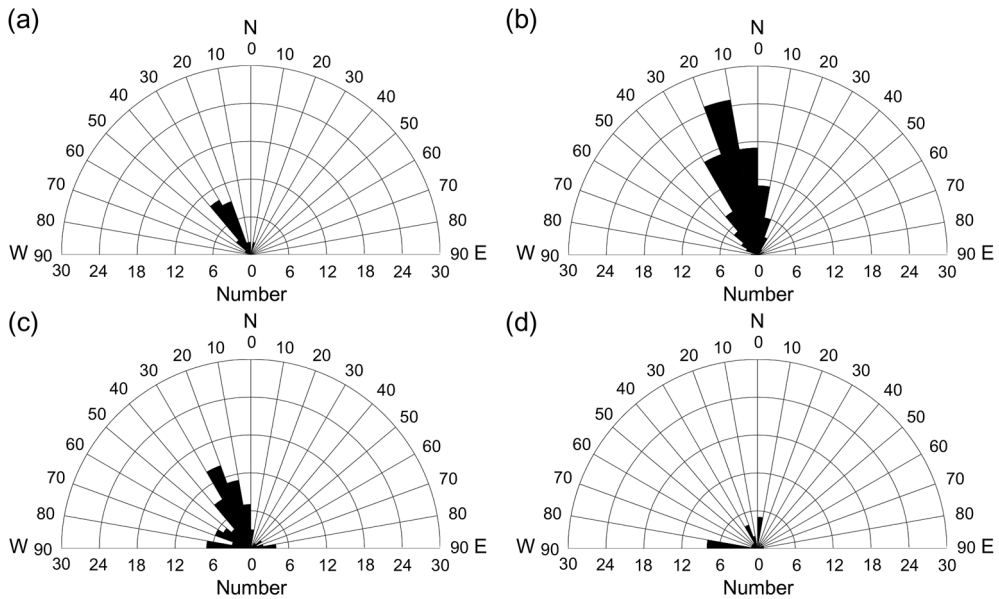




**Fig. 7.** Relationship of  $LD$  and  $SD$  in the western and eastern part of B-B' and C-C' divided by the first Umanose fault to confirm the effect of wave erosion on the aspect ratio of concretions: (a) B-B' (W), (b) B-B' (E), (c) C-C' (W) and (d) C-C' (E). "W" and "E" denote the western and eastern part, respectively.

遡上し第一馬の背断層へ流入するが、波食棚を遡上中の波に流される岩片（ノジュールや波食棚から剥離したもの）がノジュール（に加え恐らく波食棚も）の側面、すなわち波が通過する側の面を大きく摩擦し侵食するため、ノジュールの長径の向きと波向が一致すると考えられる。波に正対する面にも岩片が衝突しノジュールが破壊される可能性がある。岩片がノジュールに正面から当たる場合、ノジュール内には圧縮応力が発生する。一方、岩片がノジュールの側面に衝突しながら通過する際、ノジュール内には引張応力あるいはせん断応力が発生する。それぞれの応力に対する抵抗力には、岩石の圧縮、引張、せん断強度があるが、これらの中で最も大きいものは圧縮強度である。したがって、波の侵入に対して正対する面と平行な面とでは岩片の衝突に対する抵抗力が異なるため、より抵抗力が小さい側面の方が大きく侵食され、波向と長径の向きが一致すると考えられる。

以上のことから、波食棚上に露出するノジュールでは、側面がより大きく侵食される。



**Fig. 8.** Direction of the major axis of the concretions along the measurement lines: (a) A-A', (b) B-B', (c) C-C' and (d) D-D'. Coincidence of the directions between wave propagation and the major axis of concretions is found even in D-D' (Area C) where wave energy is smaller.

その影響は海に近く遡上波のエネルギーが最も大きいと考えられる Area A において最も顕著であり、そこではノジュールの平面形がより楕円形を示すが、エネルギーが減衰した波が到達する Area C では真円に近い平面形を示すと考えられる。これは、波食棚の発達に与える波浪侵食の影響が局所的に異なることを示す。すなわち、遡上波の流速が大きいほど波浪侵食の影響が大きい。

## 5. 波食棚における局所的な風化環境の違い

### 5.1. 同一ノジュール列内におけるタフォニの窪み深さの変化

ノジュール表面に発達するタフォニの窪み深さの計測結果を Fig. 9 に示す。縦軸は窪み深さ、横軸は Fig. 4 中の各測線における始点 (S) から終点 (E) までの距離を示す。L1 ~ L4 全ての測線はほぼ南北方向に設定されており、南側が始点である。タフォニの窪み深さは核では約 0.5 cm、殻では 1.5 cm 以上であった。通常塩類風化を受ける期間が長い程、タフォニの窪み深さは大きくなる。したがって一つのノジュールにおける核と殻の表面では、塩類風化を受けた期間に差があり、より長期間露出していた外側の殻において窪み深さが大きいと考えられる。

ノジュール列 L1 では、殻の部分が剥離していることが多く、またノジュール数そのものが少ないため計測数が少ない (Fig. 9a)。L2 および L3 では核および殻それぞれの窪み深さは、終点に向かい減少する (Fig. 9b, c)。L2 の終点付近では波向が比較的小さいと

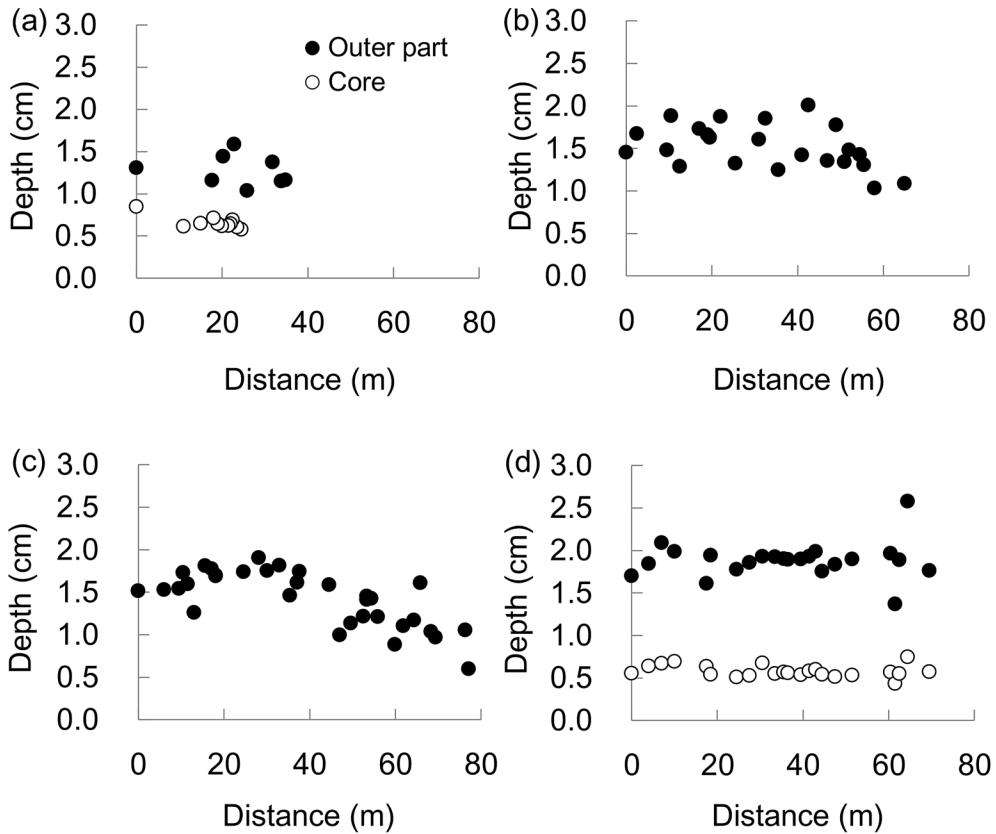


Fig. 9. Changes in the depths of tafoni on concretions along the lines in Fig. 4: (a) N6 (Area A), (b) N4 (Area A), (c) N5 (Area B) and (d) N4 (Area C). Distance in each figure starts from "S" and ends at "E" in Fig. 4.

きにも碎波後の飛沫を被りやすく、L3の終点付近は第2馬の背断層と第1馬の背断層の交点に近く比高が小さいため、海水に浸かりやすい。また、L2では終点付近のノジュールほど流速が大きい遡上波を被る。したがって、L2およびL3における窪み深さの減少は、終点付近における乾燥しにくく風化しにくい環境と、波浪による削剥を受けやすい環境の両者の影響を反映していると考えられる。一方、L4における窪み深さは始点からの距離に関わらず一定である (Fig. 9d)。これは、L4は海岸線に平行なため列内のノジュールが受ける波浪のエネルギーや飛沫量が等しく、タフォニの形成条件がほぼ同一であるためと考えられる。すなわち、各ノジュールについて、波浪によるノジュール表面の削剥量と塩類風化によるタフォニの成長量とが等しい。以上のことから、波食棚表面への水分および塩分供給量には局所的な差があり、それぞれの場所における岩石の風化程度に反映されていると考えられる。

## 5.2. 窪み深さとノジュールの高さの関係

タフォニの窪み深さとノジュールの高さの関係を Fig. 10 に示す。縦軸はタフォニの窪

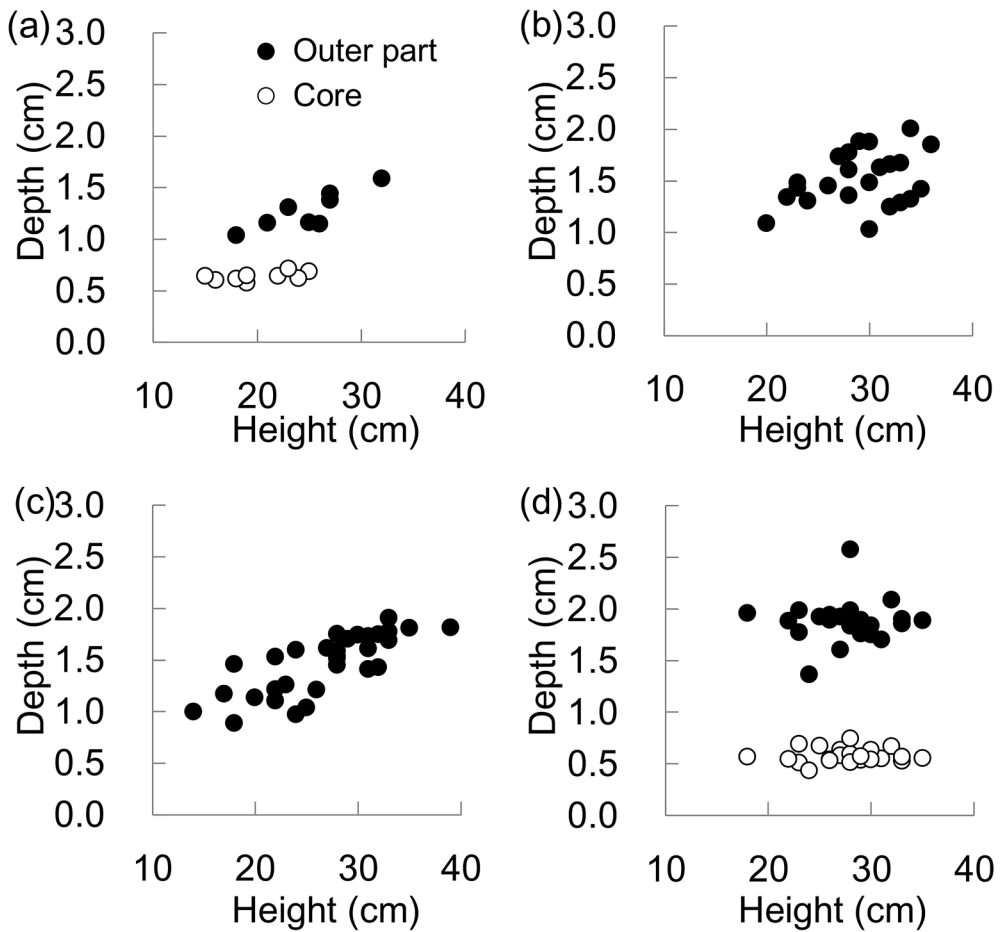


Fig. 10. Relationship between the depth of tafoni and height of concretions along the lines in Fig. 4: (a) N6 (Area A), (b) N4 (Area A), (c) N5 (Area B) and (d) N4 (Area C).

み深さ，横軸はノジュールの高さを示す。L1 ではノジュールの高さが大きくなるほど窪み深さが増大する (Fig. 10a)。この傾向は殻表面に形成されるタフォニで顕著だが，核表面においては不明瞭である。L2, L3 でも同様の傾向がみられる (Fig. 10b, c) が，L2 ではL1 よりばらつきが大きい。L4 では他のノジュール列と異なり，ノジュールの高さに関わらず殻および核表面に形成されるタフォニの窪み深さは一定である (Fig. 10d)。また窪み深さの平均値も他の列より大きい。

タフォニはノジュールの露出後に形成されるため，高さが大きいノジュールほど露出期間が長く，タフォニの窪み深さが大きくなると考えられる。また，高い部分ほど遡上波を被りにくく乾燥しやすいので，タフォニは成長しやすい。しかし，ノジュール表面が削剥される場合にはタフォニの窪み深さが小さくなる。L4 における窪み深さが他の列より大きい理由として，(1) ノジュール表面の削剥量が小さい，(2) 露出期間が長い，ことが考

えられる。このうち(1)は4章で議論した通り、L4を含むArea Cでは他の地域に比べ波浪侵食を受けにくいいため、ノジュール表面に形成されたタフォニの形状が維持されやすく、結果としてタフォニの窪み深さが他の列より大きい原因となり得る。また、(2)に対しては、どの地域についても波食棚の正確な離水時期を特定できないため露出期間の影響を正確に評価できないが、波食棚の標高や岩相は場所に関わらずほぼ等しく、また核の窪み深さは他のノジュール列と等しい(Fig. 9)ことから、少なくとも核が露出してからの経過時間には大きな差がないと思われる。タフォニの窪み深さの成長速度は、タフォニ形成初期に大きく時間が経つにつれ減少し、早い場合には形成開始から数百年でほぼ0となる(たとえば, Sunamura and Aoki, 2011)。したがって、L4のタフォニの窪み深さがノジュールの高さによらずほぼ一定であることは、現在L4に見られるタフォニの窪み深さが、畳ヶ浦のノジュールに発達し得る最大値である可能性を示唆する。波浪によりノジュール表面が削剥されると窪み深さは小さくなるが、部分的に剥離するなど削剥量が多い場合には窪み深さが0にリセットされる。Fig. 10は、L4以外の列では、こうした波浪による削剥のためタフォニの窪み深さが最大値に到達しない可能性を示唆する。

以上のことから、Area Cにおいては、ノジュールの形態に反映される塩類風化の影響が他の地域に比べ大きいことが分かった。これは、ノジュールも含めたArea Cにおける波食棚が他の地域に比べ塩類風化を受けやすい環境であることを示す。

## 6. 結 論

島根県浜田市の石見畳ヶ浦の波食棚において、ノジュールの形状やノジュール表面に形成されるタフォニの窪み深さを計測し、ノジュールの形態に及ぼす波浪侵食と塩類風化の影響について検討した。その結果、ノジュールが露出する一様な波食棚に見える石見畳ヶ浦の中で、波浪侵食と塩類風化がノジュールの形態に与える影響は局所的に異なることが分かった：

- (1) 畳ヶ浦においてエネルギーが最も高い波浪が侵入する第1馬の背断層の西側の地域(Area A)では、遡上波が波食棚を通過する際のノジュール側面の侵食量が他の地域に比べ大きい。そのため、ノジュールの長径の向きは侵入する波浪の波向と一致し、ノジュールの平面形状は楕円形の度合いが大きい。また、タフォニの窪み深さは海に近く海水を被りやすい場所ほど小さい。
- (2) 第1馬の背断層の東側とめがね橋断層北側の地域(Area B)に分布するノジュールはArea Aと同様にノジュールの長径の向きが波高2 m以上の波向と一致する。しかしノジュールの平面形状はArea Aに比べて楕円形の度合いが小さい。また、タフォニの窪み深さは、ノジュール表面が乾燥しにくく塩類風化しにくい環境である馬の背周辺のパール付近で減少する。
- (3) 北西から畳ヶ浦を取り囲むように回折した、エネルギーの低い波浪が到達する南側の



地域 (Area C) においては, ノジュールの長径の向きは遡上波の波向と一致するが, ノジュールの平面形状は真円に近い. また, タフォニの窪み深さは他の地域より大きく, 測定したノジュール間で個体差が小さい.

以上のことから, ノジュール形態に与える波浪侵食の影響はエネルギーの大きい波浪が作用する地域において大きく, 回折してエネルギーの小さい波浪が作用する地域において小さい. 塩類風化は地域を問わずノジュール表面が乾きやすい場所で発生しやすい. しかし, 波浪侵食の影響が大きい地域では, 波によりノジュール表面が削剥され, 塩類風化の痕跡が残りにくい. したがって, 塩類風化によるタフォニの発達, ノジュール表面が削剥されにくい場所で顕著である. すなわち, 波浪侵食および塩類風化の両者がノジュールの形態を支配するが, 塩類風化の影響は波浪侵食が弱い場所で現れることが確認された. これは, ノジュールの形態のみならず, 波食棚の形成プロセスにも共通するものと考えられる.

## 謝 辞

本研究の一部は, JSPS 科研費 (課題番号 15H05350) の助成を受けた. 記して謝意を表します.

## 引用文献

- 青木 久・大島智洋・若狭 幸・八反地 剛・松倉公憲 (2004) 日南海岸いるか岬の波食棚地形に関する予察的研究: 波食棚構成岩石の強度と含水比の測定: 筑波大学陸域環境研究センター報告, **5**, 63-71.
- 藤森孝俊・蒔苗耕司・山口 勝・川口 隆・太田陽子 (1990) 島根県浜田地震 (1872 年) の地形学的検討: 地学雑誌, **99**, 166-181.
- 平坂 健・化石微地形探究グループ (2004) 曇ヶ浦の微地形からよむ地殻変動: 島根県地学会誌, **19**, 21-25.
- 今村明恒 (1913) 明治五年ノ濱田地震: 震災豫防調査會報告, **77**, 43-77.
- 今岡照喜・板谷徹丸・松本俊雄・山崎博史・沢田順弘 (1990) 山陰西部国府火山岩類の K-Ar 年代: 地質学雑誌, **96**, 945-948.
- Kennedy, D. M. and Beban, J. G. (2005) Shore platform morphology on a rapidly uplifting coast, Wellington, New Zealand: *Earth Surface Processes and Landforms*, **30**, 823-832.
- 町田 貞・井口正男・貝塚爽平・佐藤 正・橋根 勇・小野有五 (1981) 地形学事典: 二宮書店, 767 p.
- 松倉公憲 (2008) 地形変化の科学: 朝倉書店, 242 p.
- 中条武司・中西健史・前島 涉 (1993) 島根県浜田北方の中期中新世唐鐘累層: 地球科学, **47**, 473-484.
- 大久保雅弘 (1982) 浜田・曇ヶ浦付近の中新統化石群集: 島根大学理学部紀要, **16**, 113-123.
- 宇佐美龍夫 (1996) 新編日本被害地震総覧: 東京大学出版会, 493 p.
- 瀬戸浩二・山内靖喜・高橋克己 (1999) 石見曇ヶ浦が語る大地の物語 - 石見ブックレット 1 - : 浜田市教育委員会, 66 p.
- 砂村継夫 (1975) 波による岩石海岸の地形変化 - 最近の研究とその問題点 - : 地理学評論, **48**, 395-411.
- Sunamura, T. (1992) *Geomorphology of Rocky Coast*: Wiley, New York, 302 p.

- Sunamura, T. (2002) A study on the elevation of shore platforms initiated by broken waves: analysis of wave-basin experiment data: Transactions, Japanese Geomorphological Union, **23**, 387-394.
- 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.
- Stephenson W. J. and Kirk R. M. (2000) Development of shore platforms on Kaikoura Peninsula, South Island, New Zealand II: the role of subaerial weathering: Geomorphology, **32**, 43-56.
- Trenhaile, A. S. (2002) Rock coasts, with particular emphasis on shore platforms: Geomorphology, **48**, 7-22.
- Trenhaile, A. S., Pepper, D. A., Trenhaile, R. W. and Dalimonte, M. (1998) Stacks and notches at Hopewell Rocks, New Brunswick, Canada: Earth Surface Processes and Landforms, **23**, 975-988.
- 渡辺 濃 (2008) 石見畳ヶ浦千畳敷 (平床) に関する“浜田地震隆起説”の誤りは何で判断されるか：島根県地学会誌, **23**, 31-38.