

天然記念物石見畳ヶ浦の波食棚構成砂岩および石灰質ノジュールの物理・力学的性質

小暮哲也*・仲 優太郎**・佐々木宏太***・遠藤俊祐****

要 旨

物理・力学的性質を評価するため、文化庁から許可を得て天然記念物である島根県石見畳ヶ浦の波食棚構成砂岩（中部中新統唐鐘累層）および石灰質ノジュールを採取した。砂岩およびノジュールの密度はそれぞれ2.16~2.21Mg/m³、2.50~2.58Mg/m³であり、間隙率は砂岩で10.6~14.9%、ノジュールでは2.40~4.82%であった。また、P波速度は砂岩で2.30~2.99km/s、ノジュールでは3.69~4.63km/sであった。一軸圧縮試験および圧裂引張試験の結果、圧縮強度は砂岩で18.1~26.7MPa、ノジュールで56.9~128MPaであり、引張強度は砂岩で1.52~6.04MPa、ノジュールで4.03~10.9MPaであった。間隙率と引張強度の比として表される易風化指数は、砂岩で $2.1\sim 7.6 \times 10^{-2} \text{MPa}^{-1}$ 、ノジュールで $2.4\sim 6.7 \times 10^{-3} \text{MPa}^{-1}$ であった。ノジュールの鏡下観察からは炭酸塩によるマトリックスの充填が確認されたが、強度が低い砂岩には見られなかった。以上の結果より、ノジュールは炭酸塩の膠着作用により砂岩に比べ緻密かつ強固であり、風化しにくいことがわかった。

Key words : 石見畳ヶ浦 Iwami-tatamigaura, 波食棚 wave-cut bench, 石灰質ノジュール calcareous concretion, 物理・力学的性質 physical and mechanical properties

1. はじめに

島根県浜田市北部に位置し1932年に国の天然記念物に指定された石見畳ヶ浦は、千畳敷と呼ばれる広大な波食棚で知られる景勝地である。この波食棚については、浜田市沖を震源とするとされる1872年浜田地震による隆起の有無が議論されてきた^{1)~4)}。近年、石見畳ヶ浦周辺の植生分布や潮位観察から浜田地震による隆起を誤りとする説⁴⁾や、浜田地震以前に描かれた石見畳ヶ浦の絵図と現在の畳ヶ浦の様子を比較し、石見畳ヶ浦は傾動性を有した部分的な隆起・沈降が生じたとする説³⁾などがあり、浜田地震による波食棚全体の海面上への隆起の可能性は否定されつつある。これまでは、江戸時代の絵図に描かれた石見畳ヶ浦の地形と

現在観察されるものとを比較し、両者の形状の違いを基に波食棚の隆起の有無が議論されてきた。しかし、波食棚は潮間帯に位置するため潮位変化により海水に覆われる面積が変化する。したがって、絵図が描かれた時間帯や季節を特定できない限り、現在の地形との比較により隆起の有無を判断できない。

石見畳ヶ浦の波食棚にはノジュールが列状に露出し、その表面には塩類風化により形成されるタフォニが発達する。近年、このタフォニを利用して、石見畳ヶ浦の波食棚形成に対する波浪侵食と塩類風化の影響が議論された⁵⁾。その結果、塩類風化は波食棚のあらゆる場所で生じるが、波浪侵食の影響が大きい場所では、波により岩石表面が削剥されるため、塩類風化の痕跡が残りにくいことがわかった。したがって、一様に見える石見畳ヶ浦の波食棚において、微地形の支配的な形成プロセスが局所的に異なることが示された。

タフォニを発達させる塩類風化は、岩石表面が乾燥と湿潤を繰り返す環境で促進される。したがって、波食棚上のタフォニの形成期間は波食棚の離水後の経過時間にほぼ等しい⁶⁾。そのため、石見畳ヶ浦の波食棚上のタフォニ深さを測定すれば、波食棚の離水時期を推定できる可能性があり、浜田地震による波食棚の隆起の有無を議論できると考えられる。そこで、タフォニの深さから波食棚の離水時期を推定するために必要なタフォニの物理・力学的性質を評価するため、文化庁の許可を得て現地の岩石を採取した。

* 島根大学学術研究院環境システム科学系 Institute of Environmental Systems Science, Shimane University (会員)

E-mail : kogure@riko.shimane-u.ac.jp

** 島根大学大学院総合理工学研究科（現所属：復建調査設計(株)）Interdisciplinary Graduate School of Science and Engineering, Shimane University (Currently, Fukken Co., Ltd.)

*** 島根大学総合理工学部（現所属：(株)昭和測量設計事務所）Interdisciplinary Faculty of Science and Engineering, Shimane University (Currently, Showa Sokuryo Sekkei Co., Ltd.)

**** 島根大学学術研究院環境システム科学系 Institute of Environmental Systems Science, Shimane University

天然記念物に指定された史跡・名勝等から岩石を採取し、その物理・力学的性質を明らかにした報告は、我々が知る限り存在しない。本稿では、そうしたきわめて貴重な岩石試料を用いた室内試験の結果を報告し、物理・力学的性質の特徴について述べる。

2. 調査地域および調査対象

2.1 地質および地形の概要

島根県浜田市北東部に位置する石見畳ヶ浦(図-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^{7,8)}。唐鐘累層は始新統～漸新統の国府火山岩類⁹⁾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⁸⁾。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⁸⁾。

波食棚表面には直径数10cmの石灰質ノジュールが見られる(図-1)。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。こうしたノジュール列は11層準に確認されており、下位よりN1, N2, … N11と呼ばれる⁷⁾。近年、ノジュールの列順が再検討され、以前の列順⁷⁾が一部修正された¹⁰⁾。本研究では、修正された列順にならう。石見畳ヶ浦におけるノジュールの形成過程については諸説あり、「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¹¹⁾」、あるいは、「畳ヶ浦砂岩部層に海進海退サイクルが見られることから、海水準の変動が石灰質ノジュール列の形成に大きく関わっていたと考える方が合理的である¹⁰⁾」、とする考えもある。ノジュールの形成速度はこれまで100万年スケール¹²⁾とも考えられていたが、近年の研究により数週間～数か月で形成されることが示された¹³⁾。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およびAbstract中では成因を表すconcretionと表記する。

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¹¹⁾。断層破碎帯の幅は最大で2～3m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(図

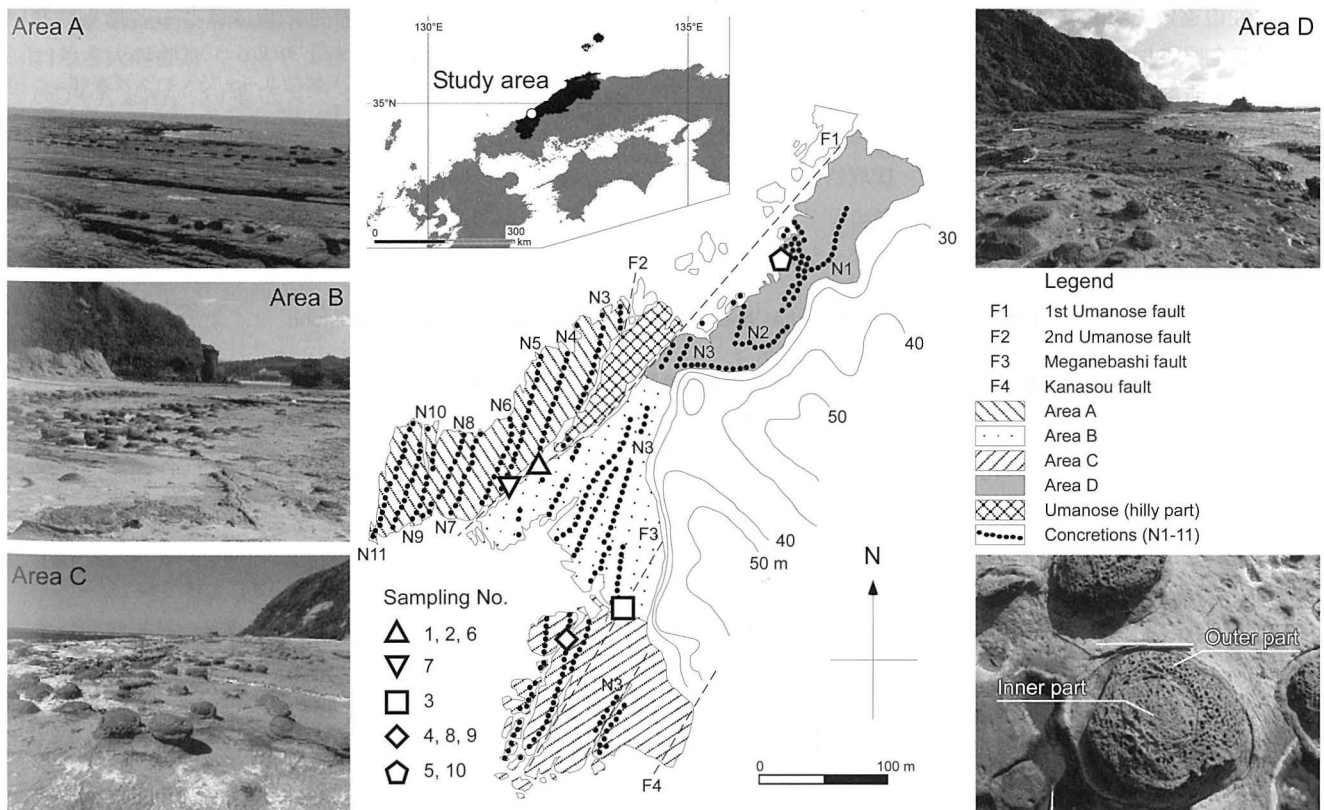


Fig. 1 Map of Iwami-tatamigaura and views of the wave-cut bench and calcareous concretions.

The map was modified after Okubo⁷⁾ and the concretions were numbered based on Takahashi et al.¹⁰⁾.

図-1 石見畳ヶ浦の地形図と波食棚および石灰質ノジュールの様子

地形図は大久保⁷⁾に加筆・修正して作成、ノジュールの列順は高橋ほか¹⁰⁾に基づく。

-1).

2.2 砂岩およびノジュール

仲・小暮⁵⁾では、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、豊ヶ浦を(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つに分けた (図-1). 本研究では、ノジュールが露出する波食棚全域を研究対象とするために、仲・小暮⁵⁾が未調査な場所、すなわち、Area Bの北東に隣接する場所をさらにArea Dとした (図-1). 上述した通り、豊ヶ浦砂岩部層は海側に傾斜しているため、波食棚の海側ほど上位の新しい層準が露出する。化石群集を用いた堆積相区分¹⁰⁾によれば、Area A~Dの中で最も古い層準はN1を含み、その堆積環境は内湾的の下部外浜~内湾的内側陸棚である。このN1はArea Dのみに現れる (図-1). また、N2およびN3を含む層準の堆積環境は開放的内側陸棚とされる。この堆積相区分による層準の分類はN1~N3に限られ、N4以降の層準の堆積環境は不明である。現地の観察からは、Area A~Cのノジュールは互いに似た岩相を呈すが、Area DのとりわけN1を含む層準のノジュールはArea A~Cのノジュールに比べより黒みがかり、また、多孔質である等、他とは異なる岩相を呈す。したがって、堆積環境の違いが岩石物性の違いをもたらす可能性を考慮し、全てのAreaから岩石を採取した。

石見豊ヶ浦は天然記念物であるため、文化庁の許可を得て浜田市教育委員会立会のもと、2015年9月3日に波食棚構成岩石およびノジュールを採取した。採取物は波浪侵食などにより波食棚から既に分離した岩石およびノジュールに限られる。波食棚から分離した岩石およびノジュールの

多くは波浪により波食棚上を移動後、波食棚を分断し海水で満たされた断層内に沈むと予想される。本研究では、波食棚に発達するいくつかの断層や亀裂内から長さ・直径30~40cm程度の砂岩塊およびノジュールを5個ずつ採取し、それぞれNo. 1~5, No. 6~10とした (図-1). 豊ヶ浦周辺の大部分の波浪が北から到達する⁵⁾ことを考慮し、分離した岩石は原位置より南側に移動すると仮定した。したがって、採取地点と波向に着目し、採取した砂岩およびノジュールの原位置を推定した。Area Bからはノジュールを採取できなかった。採取した砂岩およびノジュールの大きさや原位置等を表-1に示す。採取場所を考慮すると、No. 5および10はN1を含む最も古い層準の岩石およびノジュールであると考えられる。それら以外の砂岩およびノジュールの層準は特定できない。

3. 砂岩およびノジュールの物理・力学的性質

3.1 砂岩およびノジュールの鏡下観察

物理・力学的試験の前に砂岩およびノジュールの薄片を作製し鏡下観察したところ、砂岩およびノジュールの鉱物種類、鉱物の大きさ、岩相は、Area A~CとArea Dとで異なることがわかった。No. 1および6 (Area A)とNo. 5および10 (Area D)の薄片写真を図-2に示す。Area A~Cの砂岩中に確認できる鉱物は、一般的な砂岩と同様に石英、長石、岩片であり、有色鉱物はほとんど見られない (図-2a)。石英の割合は長石より多い。鉱物の大きさは0.5mm以下であり、マトリックスが多い。Area A~Cのノジュール中に確認された主な鉱物は石英、長石、岩片であり、砂岩とほぼ同様であるが、ノジュールには有色鉱物である緑泥石が含まれることがある。砂岩と同様に鉱物の大きさは0.5mm以下であるが、マトリックスは炭酸塩で充填

Table 1 Physical properties and uniaxial compressive strength of sandstone and concretions.

表-1 砂岩およびノジュールの物理的性質および一軸圧縮強度

No.	Block No.	Area	ρ_d Mg/m ³	G_s	n %	V_p km/s	S_c MPa
<i>Sandstone (Wave-cut bench)</i>							
S_c -1	1	A	2.21	2.65	1.24×10^1	2.24	-
S_c -2	2	A	-	-	-	-	1.81×10^1
S_c -3	3	B	2.20	2.65	1.37×10^1	2.99	2.67×10^1
S_c -4	4	C	2.22	2.66	1.49×10^1	2.30	1.47×10^1
S_c -5	5	D	2.16	2.64	1.06×10^1	2.53	1.93×10^1
<i>Concretion</i>							
S_c -6	6	A	2.57	2.56	3.21×10^0	4.63	-
S_c -7	7	A	2.57	2.58	2.77×10^0	4.58	1.00×10^2
S_c -8	8	C	2.50	2.49	4.82×10^0	4.05	1.17×10^2
S_c -9	9	C	2.58	2.62	2.40×10^0	4.57	1.28×10^2
S_c -10	10	D	2.50	2.66	3.98×10^0	3.69	5.69×10^1

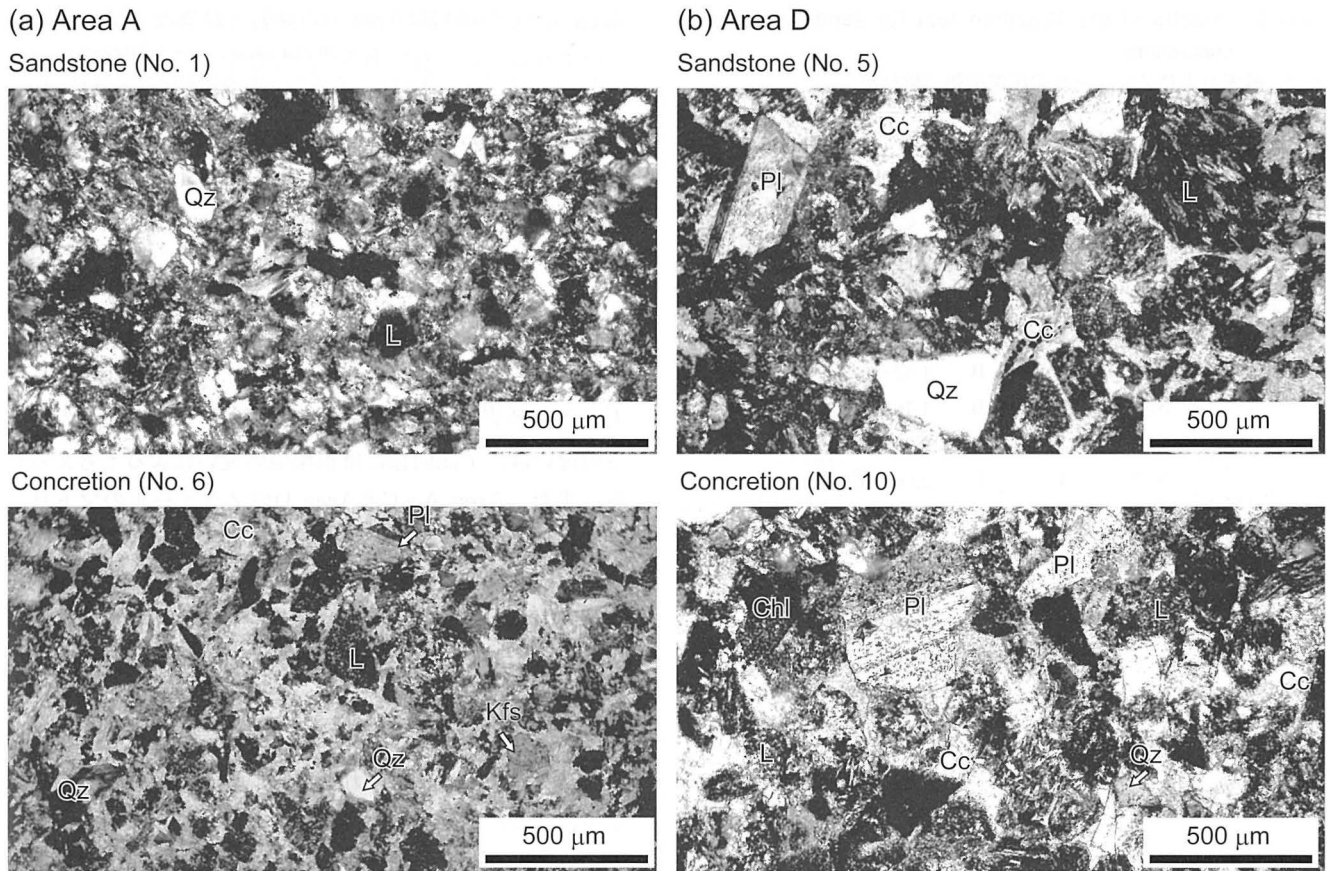


Fig. 2 Pictures of thin sections for sandstone and concretions under crossed-polarized light.

(a) Sandstone (No. 1) and concretion (No. 6) collected from Area A. (b) Sandstone (No. 5) and concretion (No. 10) collected from Area D. Cc: calcite (carbonate), Chl: chlorite, L: rock fragment, Kfs: potassium feldspar, Pl: plagioclase, Qz: quartz.

図-2 砂岩およびノジュールの薄片写真(クロスニコル)

(a) Area Aから採取された砂岩(No. 1)とノジュール(No. 6). (b) Area Dから採取された砂岩(No. 5)とノジュール(No. 10). Cc: 方解石(炭酸塩), Chl: 緑泥石, L: 岩片, Kfs: カリ長石, Pl: 斜長石, Qz: 石英.

されている。

Area A~Cの砂岩と同様にArea Dの砂岩には石英、長石および岩片が含まれ、有色鉱物の量は少ない(図-2b)。Area A~Cの砂岩に比べ長石および岩片の含有量が多く、鉱物が大きい。Area Dの砂岩ではマトリックスを炭酸塩が埋めている。Area Dのノジュールには石英、長石、岩片、緑泥石が見られた。鉱物の大きさはArea A~Cより大きい。Area Dの砂岩と同様にマトリックスを炭酸塩が埋めている。

3.2 圧縮強度および引張強度

一軸圧縮試験(JIS M 0302)および圧裂引張試験(JIS M 0303)により、採取した砂岩およびノジュールの圧縮強度 S_c および引張強度 S_t を測定した。使用した力学試験機は、鳥根大学所有株式会社マルイ製ハイアクティス1000(MIE-732-1-01)である。試験機の負荷速度は $0.3\text{N}/\text{mm}^2/\text{s}$ である。 S_c および S_t 測定には、それぞれ直径5.00cm、高さ10.00cmおよび直径5.00cm、高さ5.00cmの円柱供試体を用いた。供試体の個数は S_c 測定用に10本、 S_t 測定用に24本である。それぞれの試験前に供試体を 110°C で24時間以上炉

乾燥させ、室温まで冷却後に試験した。

一軸圧縮試験の結果を表-1に、圧裂引張試験の結果を表-2に示す。砂岩の S_c は $1.81 \times 10^1 \sim 2.67 \times 10^1 \text{MPa}$ であり、ノジュールの S_c は $5.69 \times 10^1 \sim 1.28 \times 10^2 \text{MPa}$ であった。また、砂岩の S_t は $1.52 \sim 6.04 \text{MPa}$ であり、ノジュールの S_t は $4.03 \sim 1.09 \times 10^1 \text{MPa}$ であった。したがって、 S_c および S_t ともにノジュールの方が波食棚を構成する砂岩より大きい。

3.3 諸物性

一軸圧縮試験用の供試体について、乾燥密度 ρ_d 、真比重 G_s 、空隙率 n 、弾性波速度 V_p を測定した。 G_s および n の測定は「土粒子の密度試験(JIS A 1202)」に基づいた。 V_p 測定に使用した超音波速度測定装置は、鳥根大学所有(株)マルイ製ウルトラソニースコープ(MIE-005-1-50)である。

測定した物性値を表-1に示す。砂岩の ρ_d は $2.16 \sim 2.21 \text{Mg}/\text{m}^3$ であり、ノジュールの ρ_d は $2.50 \sim 2.58 \text{Mg}/\text{m}^3$ であった。 G_s は砂岩で $2.64 \sim 2.66$ であり、ノジュールでは $2.49 \sim 2.66$ であった。 n は砂岩で $1.06 \times 10^1 \sim 1.49 \times 10^1\%$ であり、ノジュールでは $2.40 \sim 4.82\%$ であった。また、砂岩の V_p は $2.30 \sim 2.99 \text{km}/\text{s}$ であり、ノジュールでは $3.69 \sim 4.63 \text{km}/\text{s}$ であった。

Table 2 Results of the Brazilian test for sandstone and concretions.

表-2 砂岩およびノジュールの圧裂引張試験結果

No.	Block No.	Area	S_t
			MPa
<i>Sandstone (Wave-cut bench)</i>			
S_t -1	1	A	2.71×10^0
S_t -2	1	A	2.14×10^0
S_t -3	1	A	2.29×10^0
S_t -4	3	B	1.52×10^0
S_t -5	3	B	1.76×10^0
S_t -6	3	B	2.90×10^0
S_t -7	4	C	2.00×10^0
S_t -8	4	C	1.90×10^0
S_t -9	5	D	5.03×10^0
S_t -10	5	D	6.04×10^0
S_t -11	5	D	3.97×10^0
<i>Concretion</i>			
S_t -12	6	A	5.71×10^0
S_t -13	6	A	1.09×10^1
S_t -14	6	A	1.04×10^1
S_t -15	6	A	4.12×10^0
S_t -16	6	A	4.03×10^0
S_t -17	7	A	1.00×10^1
S_t -18	8	C	6.87×10^0
S_t -19	8	C	7.78×10^0
S_t -20	9	C	1.02×10^1
S_t -21	10	D	4.56×10^0
S_t -22	10	D	4.37×10^0
S_t -23	10	D	7.69×10^0
S_t -24	10	D	7.30×10^0

したがって、ノジュールは砂岩に比べ緻密である。

3.4 強度および諸物性の特徴

砂岩の物理・力学的性質はArea A~CとArea Dとで異なる。強度の差異は、試料数が少ないため S_c では不明瞭なもの、 S_t の大きさはArea D (S_t -9~11)の砂岩の方がArea A~C (S_t -1~8)のものより大きい(表-2)。鏡下観察より、この違いはマトリックスを埋める炭酸塩量の違いが原因と考えられる。Area A~CとArea Dの砂岩を比較すると、Area Dの鉱物の方が大きく、Area Dの砂岩には有色鉱物である緑泥石が見られる。また、Area Dの砂岩のマトリックスは炭酸塩で埋められている。海水中に溶解したカルシウムは堆積岩が形成される過程で間隙に入り込み、化学的続成作用である再結晶時の膠着作用によって鉱物を固定する¹⁴⁾ため、Area A~CとArea Dの砂岩中の炭酸塩量の違いの原因は、堆積当時の海水に含まれた溶存カルシウム量の違いであると考えられる。上述の通り、試験に用いたArea Dの砂岩はN1を含む層準の岩石であり、

Area A~Cの砂岩はArea Dの砂岩とは異なる環境で堆積したより新しい岩石である¹⁰⁾。したがって、堆積環境の違いが鉱物粒径および炭酸塩量の違いをもたらした可能性がある。Area Dの砂岩ではより大部分のマトリックスが炭酸塩に埋められたためArea A~Cの砂岩に比べて n が小さく、膠着効果の高さが S_t の大きさにつながったと考えられる。

Area A~CとArea Dにおけるノジュールの物理・力学的性質には明確な差がない。Area A~CとArea Dのノジュール中に見られる鉱物種類の違いは見られず、鉱物の大きさは砂岩と同様にArea Dの方が大きい。鉱物の大きさの違いは、上記同様に堆積環境の違いによると考えられる。また、Area A~CとArea Dのノジュールのマトリックスに含まれる炭酸塩量にも、鏡下観察に基づく明瞭な違いはない。鉱物の大きさの違いに関わらず、ノジュールの物理・力学的性質はArea A~CとArea Dとで変わらない。これは、炭酸塩によりマトリックスが充填され同種の鉱物同士が十分に固定されれば、岩石強度は鉱物の大きさによらずほぼ一定であることを示唆する。同時に、化石から溶出しノジュールに供給されるカルシウム量は堆積当時の海水中に含まれる量より十分に多いため、堆積環境の変化に関わらずノジュールに含まれる炭酸塩量がほぼ一定であったと考えられる。

砂岩とノジュールの物理・力学的性質は大きく異なる。どのAreaの砂岩およびノジュールについても、ノジュールの n がより小さく S_t はより大きい。その理由は、ノジュールのマトリックスを埋める炭酸塩量が砂岩より多いためと考えられる。ノジュールそのものが化石の集積体であるため、ノジュール内のマトリックスは化石から溶出したより高濃度のカルシウムを含む海水に満たされ、炭酸塩析出時の膠着効果が高まった可能性がある。

以上のようなノジュールと砂岩の岩石物性の差異は、岩石の風化しやすさや侵食されやすさに影響すると予想される。たとえば、岩石の風化しやすさを示す指標として、易風化指数(Weathering Susceptibility Index: WSI)がある¹⁵⁾。WSIは P/S_t で計算され、値が大きいほど岩石は風化しやすい。ここで、 P は岩石の間隙径分布から計算される塩の結晶化の圧力ポテンシャルである。 P の測定には水銀ポロシメータを必要とするが、装置を利用できないこともあるため、 P の代わりに n を用いる簡便な方法もある¹⁶⁾。砂岩塊No. 1, 3, 4, 5およびノジュールNo. 6~10からは n および S_t を得たため、これらの岩塊のWSIを算出できる。各岩塊に対し S_t が複数得られている場合には、それらの平均値を岩塊の S_t とした。算出されたWSIを表-3に示す。WSIは砂岩で $2.1 \sim 7.6 \times 10^{-2} \text{MPa}^{-1}$ であり、ノジュールでは $2.4 \sim 6.7 \times 10^{-3} \text{MPa}^{-1}$ であった。したがって、ノジュールのWSIは砂岩に比べ1オーダー小さく、風化しにくいこ

Table 3 WSI calculated from porosity and tensile strength for sandstone and concretions.

表-3 間隙率と引張強度から計算された砂岩およびノジュールのWSI

Block No.	Area	n	S_t	WSI
		%	MPa	MPa ⁻¹
<i>Sandstone (Wave-cut bench)</i>				
1	A	1.24×10 ¹	2.38×10 ⁰	5.2×10 ⁻²
2	A	-	-	-
3	B	1.37×10 ¹	2.06×10 ⁰	6.7×10 ⁻²
4	C	1.49×10 ¹	1.95×10 ⁰	7.6×10 ⁻²
5	D	1.06×10 ¹	5.01×10 ⁰	2.1×10 ⁻²
<i>Concretion</i>				
6	A	3.21×10 ⁰	7.02×10 ⁰	4.6×10 ⁻³
7	A	2.77×10 ⁰	1.00×10 ¹	2.8×10 ⁻³
8	C	4.82×10 ⁰	7.32×10 ⁰	6.6×10 ⁻³
9	C	2.40×10 ⁰	1.02×10 ¹	2.4×10 ⁻³
10	D	3.98×10 ⁰	5.98×10 ⁰	6.7×10 ⁻³

とがわかった。

4 ま と め

天然記念物である石見畳ヶ浦の波食棚から、波食棚を構成する砂岩および波食棚上に露出するノジュールを採取し、物理・力学試験を行った。得られた知見は以下の通りである：

- ①砂岩の物理・力学的性質は岩石の採取場所により異なる。すなわち、採取場所に露出する砂岩の堆積当時の環境を反映する。石見畳ヶ浦の波食棚上では、海食崖に近い場所に露出する砂岩中にマトリックスを充填する炭酸塩が多く含まれており、結果として間隙率が小さく強度が大きい。
- ②ノジュールの物理・力学的性質には採取場所ごとの明確な差がなく、マトリックスに含まれる炭酸塩量にも明瞭な違いはない。これは、化石から溶出しノジュールに供給されるカルシウム量は堆積当時の海水中に含まれる量より十分に多いため、堆積環境の変化に関わらずノジュールに含まれる炭酸塩量がほぼ一定だったと考えられる。
- ③砂岩とノジュールの物理・力学的性質は大きく異なる。どの場所の砂岩とノジュールについても、ノジュールの間隙率がより小さく強度がより大きい。その理由は、ノジュールのマトリックスを埋める炭酸塩量が砂岩より多いためと考えられる。

以上より、炭酸塩量の議論は定性的であるものの、本研究により石見畳ヶ浦の波食棚構成砂岩および石灰質ノジュールの物理・力学的性質が明らかになり、それらは鉱物同士を膠着させる炭酸塩の量に支配される可能性がある。

また、間隙率および引張強度から計算された易風化指数の値から、砂岩の方が風化しやすいことがわかった。したがって、現在の石見畳ヶ浦の波食棚は、砂岩とノジュールの物理・力学的性質を反映した差別侵食地形である。今後、本研究で得られた岩石物性を基にノジュール表面に見られるタフォニの形成速度を算出すれば、浜田地震による波食棚隆起の有無に関する定量的な議論の進展を期待できる。

謝辞 浜田市教育委員会文化振興課の川本裕司氏および藤田大輔氏には、石見畳ヶ浦における岩石の採取許可申請時および採取時に多大なご支援をいただいた。島根大学総合理工学部技術職員の中村 学氏には、力学試験機の使い方をご指導いただいた。本研究の一部は、JSPS科研費（課題番号15H05350）の助成を受けた。ここに記して謝意を表します。

引用文献

- 1) 今村明恒 (1913): 明治五年ノ濱田地震, 震災豫防調査會報告, Vol.77, pp.43-77.
- 2) 藤森孝俊・苺苗耕司・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, Vol.99, pp.166-181.
- 3) 平坂 健・化石微地形探究グループ (2004): 畳ヶ浦の微地形からよむ地殻変動, 島根県地学会誌, Vol.19, pp.21-25.
- 4) 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, Vol.23, pp.31-38.
- 5) 仲 優太郎・小暮哲也 (2017): 根県石見畳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, 地形, Vol.38, pp.249-263.
- 6) 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*, Vol.16, pp.51-56, <https://doi.org/10.1002/esp.3290160106>.
- 7) 大久保雅弘 (1982): 浜田・畳ヶ浦付近の中新統化石群集, 島根大学理学部紀要, Vol.16, pp.113-123.
- 8) 中条武司・中西健史・前島 渉 (1993): 島根県浜田北方の中期中新世唐鐘累層, 地球科学, Vol.47, pp.473-484.
- 9) 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, Vol.96, pp.945-948.
- 10) 高橋健一・近藤康生・小竹信宏 (2008): 中部中新統下部唐鐘累層における海進海退サイクルの内部構造と堆積作用の変化に回答した底生動物化石群集の変遷, 地質学雑誌, Vol.114, No.9, pp.474-492.
- 11) 瀬戸浩二・山内靖喜・高橋克己 (1999): 石見畳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, 66p.
- 12) Boles, J. R., Landis, C. A. and Dale, P. (1985): The Moeraki Boulders—Anatomy of some septarian concretions, *Journal of Sedimentary Petrology*, Vol.55, pp.398-406, doi: 10.1306/212F86E3-2B24-11D7-8648000102C1865D.
- 13) Yoshida, H., Ujihara, A., Minami, M., Asahara, Y., Katsuta, N., Yamamoto, K., Sirono, S. I., Maruyama, I., Nishimoto, S. and

- Metcalf, R. (2015) : Early post-mortem formation of carbonate concretions around tusk-shells over week-month timescales, *Scientific Reports*, Vol.5, 14123, <https://doi.org/10.1038/srep14123>.
- 14) 水谷伸治郎・斎藤靖二・勘米良亀齡 (1987) : 日本の堆積岩, 岩波書店, pp.31-59.
- 15) 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.*, Vol.106, pp.57-72.
- 16) Sunamura, T., Takahashi, K. and Matsukura, Y. (2007) : A simple indicator for susceptibility of rocks to salt weathering, *Transactions, Japanese Geomorphological Union*, Vol.28, pp.257-263.

(2018年7月30日受付, 2018年10月11日受理)

Jour. Japan Soc. Eng. Geol., Vol.59, No.6 pp.446-452, 2019

Physical and Mechanical Properties of Sandstone and Calcareous Concretions at the Wave-Cut Bench in Iwami-tatamigaura, a Natural Monument in Shimane, Japan

Tetsuya KOGURE, Yutaro NAKA, Kota SASAKI and Shunsuke ENDO

Abstract

Laboratory measurements were conducted to evaluate physical and mechanical properties of sandstone and calcareous concretions which were collected from the wave-cut bench in Iwami-tatamigaura, a natural monument in Shimane, with permission of Agency of Cultural Affairs, Government of Japan. Physical properties such as density, porosity and p-wave velocity of sandstone (concretions) were 2.16~2.21Mg/m³ (2.50~2.58Mg/m³), 10.6~14.9% (2.40~4.82%) and 2.30~2.99 km/s (3.69~4.63 km/s), respectively. Mechanical properties such as uniaxial compressive strength and tensile strength by Brazilian test of sandstone (concretions) were 18.1~26.7MPa (56.9~128MPa) and 1.52~6.04MPa (4.03~10.9MPa), respectively. Weathering susceptibility index, which is defined as the ratio of porosity to tensile strength, was calculated to be 2.1~7.6×10⁻²MPa⁻¹ for sandstone and 2.4~6.7×10⁻³MPa⁻¹ for concretions. Observations of thin sections revealed that carbonate occurs as a matrix in the concretions whereas less carbonate in sandstones with smaller strength. Therefore, the concretions have lower porosity, lower susceptibility of weathering and larger strength than those of the sandstone because of bonding effect by the carbonate.

Key words : Iwami-tatamigaura, wave-cut bench, calcareous concretion, physical and mechanical properties