大分県東部・四浦半島に分布する後期ジュラ紀の礁性石灰岩の堆積環境と厚歯二枚貝の産状

Depositional environment of a Late Jurassic reefal limestone and mode of occurrence of rudist individuals from Youra Peninsula, eastern Oita Prefecture (Kyushu Island, southwest Japan)

Abstract

柿崎喜宏^{*†} 古山精史朗^{*‡}
狩野彰宏^{*}

Yoshihiro Kakizaki^{*†},
Seishiro Furuyama^{*‡} and Akihiro Kano^{*}

2014年7月24日受付.

2014年12月21日受理.

^{*} 九州大学比較社会文化研究院(現 地球社会統合科学府)地球変動講座

Division of Earth Sciences, Graduate School of Social and Cultural Studies (Present: Graduate School of Integrated Science for Global Society), Kyushu University, Nishi ward, Fukuoka 819-0395, Japan

[†] 現所属: 明治大学研究知財戦略機構ガスハイドレート研究所

Present address: Gas Hydrate Research Laboratory, Organization for the Strategic Coordination, Meiji University, Kanda-Surugadai, Chiyoda ward, Tokyo 101-8301, Japan

[‡] 現所属: 産業技術総合研究所地質情報研究部門海洋地質研究グループ

Present address: Institute of Geology and Geoinformation, Geological Survey of Japan, National Institute of Advanced Industrial Science and Technology, Tsukuba 305-8567, Japan

Corresponding Author: Y. Kakizaki,
tz14012@meiji.ac.jp

Lithofacies and biofacies of a rudist-bearing reefal limestone from the uppermost Jurassic Tsui Formation on the Youra Peninsula, eastern Oita Prefecture, southwest Japan, were quantitatively examined. The 35-m-thick limestone section displays a vertical transition from a reefal fauna in the lower-middle part (dominated by hermatypic corals and stromatoporoids) to the upper part (characterized by abundant rudists, corals, and chaetetes). Lithological features and faunal compositions indicate an oligotrophic shallow-water depositional environment in a calm setting on a small carbonate mound. In the upper part of the section, requieniidine rudists (*Epidiceras speciosum*) occur densely in layers 0.5–1.5 m thick, forming biostromes with corals. Reconstructed ecological features of Late Jurassic *Epidiceras* are similar to those of Triassic megalotonditid and Cretaceous requieniid rudists, but differ greatly from those of primitive uncoiled hippuritid rudists (*Valletia* cf. *auris*) reported from another Torinosu-type limestone in the Shirokawa area, Shikoku Island, southwest Japan (Upper Jurassic–lowermost Cretaceous). These results suggest that rudists had already ecologically diverged in the late Late Jurassic, during an early stage of their evolutionary history.

Keywords: rudist, *Epidiceras*, Torinosu-type limestone, reefal fauna, quantitative composition, Late Jurassic, Oita Prefecture, southwest Japan

はじめに

厚歯二枚貝(ヒップリテス目 Order Hippuritida Newell, 1965)は後期ジュラ紀(オックスフォードアン期)に出現し、白亜紀を通じて繁栄した中生代後半を代表する海生二枚貝であり(e.g. Skelton, 2003). テチス海, カリブ海, 古太平洋などの低緯度の浅海域に広く生息し, 大規模なバイオストロームを形成した(e.g. Kauffman and Johnson, 1988; Ross and Skelton, 1993; Gili et al., 1995; Höfling and Scott, 2002).

日本国内の白亜系では, 浅海成石灰岩や石灰岩オリストリス(Yabe and Nagao, 1926; Nagao, 1933; 大久保・松島, 1959; Shikama and Tanabe, 1970; Sano, 1991, 1995; 佐野, 1995, 2000; Iba and Sano, 2007; Sano and Masse,

2013), 砂岩や礫岩, 石灰質砂岩など(Yehara, 1920; Yabe and Nagao, 1926; Saito, 1964; Tanaka, 1989; Tanaka et al., 1996; Ichise, 2008; Sano et al., 2012)から厚歯二枚貝が報告されている. また, 上部ジュラ系~最下部白亜系の礁性石灰岩(鳥巢式石灰岩)からも厚歯二枚貝の産出が知られている(三本ほか, 1990; 佐野ほか, 2007, 2008; Sano and Skelton, 2010; 柿崎ほか, 2011). 特に, 鳥巢式石灰岩の厚歯二枚貝が世界的にも報告事例が少ない黎明期の厚歯二枚貝であることは注目すべきである.

厚歯二枚貝の進化史を考察するうえで, 後期ジュラ紀の厚歯二枚貝の生息環境や古生態は重要な情報である. それらを復元するためには, 厚歯二枚貝の産状と周辺の岩相を詳細に記載する必要がある. しかし, 国内の厚歯二枚貝研究例の多くは形態に基づく古生物学的報告に留まり, その産状や生

Fig. 1. (A) Location of the Youra Peninsula on Kyushu Island, Oita Prefecture, southwest Japan. (B) Geological map of the Youra Peninsula, showing the location of the study section (modified after Nishi, 1994).

息環境に注目した研究は Sano (1991, 1995) など数例にすぎない。世界的にみても、後期ジュラ紀の厚歯二枚貝については、従来の研究は記載や分類を主目的としていたため、生息環境や古生態に関する考察はほとんど行われていなかった。

そこで、私たちは大分県東部の佐伯市・四浦半島に分布する上部ジュラ系津井層の鳥巢式石灰岩において、詳細な岩相の記載と保存良好な厚歯二枚貝を含む大型化石群集の産状の観察に取り組んだ。本層の鳥巢式石灰岩から産出する厚歯二枚貝は佐野ほか (2008) によってはじめて報告された。最大径 16 cm に達する殻の大きさと、両殻に posterior myophore の突起 (後方の閉殻筋がつく突起) が認められることから、これら厚歯二枚貝はエピディセラス科の *Epidiceras speciosum* に比定されている (佐野ほか, 2008)。これは世界的にも貴重な上部ジュラ系の厚歯二枚貝の産出事例であり、その産状は進化の黎明期にあった厚歯二枚貝の古生態を考えるうえで重要な情報となる。本論文では、厚歯二枚貝を産する津井層石灰岩の岩相・大型化石相について定量的な解析を行い、石灰岩の岩相や化石相とともに、厚歯二枚貝を含む大型化石の産状を明らかにする。その結果をもとに、厚歯二枚貝を含む生物群集の生息環境を復元し、その進化史における意義を提示する。

地質学的背景

1. 津井層

研究対象である津井層 (橋本, 1962, 1977) は佐伯市浅海井の西方から四浦半島東端の納ヶ内海岸まで、東西 8 km にわたって帯状に分布する (Figs. 1A–1B)。層厚は 250–300 m (最大 500 m) で、周囲の地層とは断層によって区切られる (Nishi, 1994)。本層の岩相は厚層理砂岩、泥岩、礫岩、凝灰岩を伴う砂岩泥岩互層を主体とし、層厚 20–50 m 程度のレンズ状石灰岩を伴う (Nishi, 1994)。本層の年代は

泥岩中の放散虫群集をもとに、上部ジュラ系とされている (Nishi, 1994)。

津井層の石灰岩は主に古生物学的な研究対象になってきた。山際・平群 (1987) は *Aplosmilia*, *Acanthogyra*, *Enallheria*, *Isastrea*, *Latomeandra*, *Stylina*, *Thamnasteria* などの上部ジュラ系の代表的な造礁サンゴを報告している。また他にも、層孔虫 (*Parastromatopora memoria-naumanni*) やケーテーテス (*Chaetetopsis crinita*)、ウニの骨針 (*Balanocidaris japonica*)、底生有孔虫 (*Charentia cuvieri* や *Textularia* など) の報告があり、その構成は鳥巢動物群に典型的なものである (Tamura, 1961; Mori, 1963; 佐藤, 1999, Kobayashi and Wernli, 2013)。

2. 納ヶ内セクション

本研究では津井層分布域の最東端にあたる蒲戸崎付近の海岸 (納ヶ内海岸) で調査を行った (Fig. 1B)。ここでは、南北 40 m × 東西 30 m の範囲に数個の石灰岩体が露出する (Fig. 2A)。佐野ほか (2008) はこれらの石灰岩の一部が異地性のブロックであり、元来の層位関係を保持していない可能性を指摘した。しかし私たちの野外調査では、これらの石灰岩体が周囲の泥岩優勢の砂岩泥岩互層とともに北北東–南南西方向のほぼ同様の走向を持ち、層理面が高角度で逆転し、ジオバタル構造から推定される層位的上位方向もすべて南東方向であることが確認された (Fig. 2A)。一方、石灰岩が二次的に大きく移動している証拠は確認できなかった。そこで本研究では私たちの観察結果にもとづき、これらの石灰岩体が本来の層位関係を保持しており、層厚約 35 m (層厚 7.5 m の露欠を含む) の一連の層序であると判断する (Fig. 2B)。本研究ではこれらの石灰岩体を一括して納ヶ内セクションと呼ぶ。本セクションは山際・平群 (1987) の loc. 5、佐藤 (1999) の Tu202 に対応し、佐野ほか (2008) では「蒲戸崎東方海岸地域に露出する鳥巢式石灰岩」として紹介されている。納ヶ内セクションからは前述の上部ジュラ系の代表的

Fig. 2. Geology and stratigraphy of the Nogauchi section. (A) Sketch map of the Nogauchi section, showing the positions of samples and sketches of outcrops. Samples and sketch numbers are the same in Figs 2B, 5A, 7, and 8. (B) Columnar section of the sampling horizons shown in Figs 3, 4, and 6. Numbers beside the columnar section indicate the sample number.

な造礁サンゴが産出し(山際・平群, 1987; 佐藤, 1999), 近傍の泥質岩からは上部ジュラ系を指標する放散虫化石が産出している(Nishi, 1994). このことから, 本研究セクション

の石灰岩体と周囲の泥質岩との間に大きな年代差はないものと判断される。

研究手法

石灰岩の岩相と化石相に関する定量的データを得るため、露頭面と岩石薄片を以下の方法で解析した。また、2つの定量的データを考慮し、石灰岩の岩相区分をおこなった。なお、岩相名は Embry and Klovan (1972) が再定義した Dunham (1962) のものに従う。

1. 大型化石の定量解析(露頭スケッチの定量化)

本研究では Fenerci-Masse et al. (2004) の“Skeletal contribution”の計測方法、ならびに Ohga et al. (2013) の方形区法(Quadrat Method)を参考に、以下の手順で大型化石の定量的解析を行った。

まず、50 cm×50 cm の方形枠を大型化石の露出状況が良好で、かつ層理面に対して垂直に露出している露頭表面に配置し、方形区内の写真を撮影する。この際、方形枠の上辺と下辺が層理面になるべく水平になるように配置する。また、方形区内にはその層準の大型化石相を反映するようになるべく多種の大型化石が含まれるように方形枠を配置し、恣意的に特定の大型化石のみが含まれないように配慮した。ただし、特定の大型化石が優占的に産出する層準ではこの限りではない。この条件に当てはまる限り、なるべく一定の層序間隔で写真撮影を行った。

撮影した写真からは、方形区内にある化石の輪郭をスケッチに書き起こす(Fig. 3A は地点 YR-Q11 でのスケッチ)。この際、スケッチに反映させるのは肉眼で観察できるスケールのものとし、細かな化石の輪郭や化石内部の堆積物充填はおおむね直径 1 cm 以上のものをスケッチに記載した。次に、スケッチをスキャナーでパソコンに取り込み、Photoshop elements 8 (Adobe Systems 社製)を用いてデジタル画像化する。デジタル画像化した露頭スケッチの大型化石および基質部の領域のピクセル数を計測し、大型化石と基質部分の露出面積の定量化を行った。この際、化石内部の堆積物充填は基質の一部として集計した。本研究では、6 種類的大型化石(軟体動物、サンゴ、被覆微生物、層孔虫、ケーターテス、同定不能およびその他の大型化石)と基質部分の露出面積を枠内の面積(0.25 m²: ただし露頭欠如部分は除く)に対する百分率で示す(Fig. 3B は YR-Q11 の定量化の結果)。この方法で納ヶ内セクションの 13 層準において大型化石が定量化された。

2. 薄片の定量解析(薄片の定量データ)

本研究では、カルサイト脈や続成変質部を避けたいうで、なるべく一定の層序間隔で納ヶ内セクションの 36 地点から石灰岩試料を採取した。そのうち、再結晶の程度が強い 15 試料を除く 21 試料において、ポイントカウント法(grain-bulk method; Dunham, 1962)を用いて、薄片スケールでの岩相構成要素の定量化を行った。本研究では一層準からおよそ 2 cm×3 cm (6 cm²)の薄片を数枚作成した。そのなかでもなるべく多種の石灰岩粒子や化石が含まれる薄片を一枚選定し、薄片一枚につき 1 mm 間隔で 378–606 ポイント(平均 521 ポイント)で定量解析を行った。定量解析では 7 つの構成要素(ミクライト、スプライト、生物骨格、コートイ

Fig. 3. (A) Example of a rock surface sketched for quantifying macrofossil compositions (coral–rudist rudstone horizon at 31 m; sketch no. YR-Q11). (B) Quantified surface coverage of macrofossils on the rock surface sketch in (A) (as a percentage of the entire rock surface area).

ド[ミクライト被膜を持つ粒子]、ペロイド、イントラクラス、珪碎屑物)が認識された。さらに生物骨格については、7 つのグループ(サンゴ、層孔虫、軟体動物、ケーターテス、被覆微生物、棘皮動物、その他および同定不可)に区分された。

石灰岩の層序と岩相

試料の観察および定量解析の結果、納ヶ内セクションに露出する石灰岩は以下の 3 つの岩相に区分される。

1. サンゴ–ケーターテス–層孔虫バウンドストーン

この岩相は本セクション最下部から 26 m 層準までの間に発達し、上位のワッケストーン/パッケストーン相とは 23–26 m 層準区間で指交関係にある(Fig. 2B)。また、優先する大型化石種は層準により異なる。

下部(0–6 m 層準)では、*Isastrea* (Fig. 4A) や *Stylina* などの造礁サンゴが直径 50–100 cm の小規模なドーム型の骨格を発達させる(Fig. 4B)。これらのサンゴ骨格はきわめて緻密であり(Fig. 4A)、周辺の堆積物をせき止めている(Fig. 4B)。薄片では *Isastrea* と *Stylina* が混在する様子を確認できなかったことから、彼らは個別に群体を形成していたと考

えられる。露頭で認定された大型化石のほぼ全てはサンゴであり、露頭面積の15–78%を占める(Fig. 5A)。これらサンゴ群体の骨格の間隙や周囲は粗粒な生碎屑物によって充填される。10 m 層準に露出する石灰岩はサンゴとともに層孔虫化石を含む。16–23 m 層準では、枝状～不定形のケーテテス(*Chaetetopsis crinita*)と枝状の層孔虫(*Parastro-matopora memoria-naumannii*)が混在してフレームワークを形成する(Fig. 4C)。これらはバックストーンの組織を示し、大型化石は露頭面積の24–79%を占めていた(Fig. 5A)。枝状の大型化石は上方への成長方向を保存し、粗粒な堆積物をせき止めている。20.5 m 層準では、塊状サンゴとその表面を厚く覆う被覆微生物(主に *Bacinella*)からなるフレームワークが露頭面の79%を占めていた(YR-Q05; Fig. 5A)。一方、ワッケストーン/パックスストーン相と指交関係にある25 m 層準のパウンドストーンでは、サンゴ群体が塊状の骨格を形成する(YR-Q08; Fig. 5A)。

露頭スケッチの定量解析を行った8層準(YR-Q01–08; Fig. 5A)では、平均すると露頭面積の53%が大型化石により占められていた(Fig. 5B)。大型化石の中では、サンゴ化石が最も多く(31.9%)、次にケーテテス(8.8%)、層孔虫(6.2%)が続く(Fig. 5B)。本岩相からは厚歯二枚貝がごくまれに産出する。特に中部層準(21–25 m 層準)から厚歯二枚貝が産出するが、個体数は少なく、大型化石の定量データには反映されなかった。

2. 生碎屑性ワッケストーン/パックスストーン

この岩相は納ヶ内セクションの23 m 層準から最上部(35 m 層準)にかけて分布する。下位ではサンゴ–ケーテテス–層孔虫パウンドストーン相と指交し、中央付近では一部サンゴ–厚歯二枚貝ラドストーン相と互層する(Fig. 2B)。この岩相では、基質部分をミクライトが占めるワッケストーンが多く、粒子が多く含まれるパックスストーンは一部の層準に限られる。特に、本セクションの最上部層準(32–35 m 層準)では、基質のミクライトが占める割合が多い。この層準の本岩相は佐野ほか(2008)の「粗粒砂サイズの bioclast 密集層」と「石灰泥質な岩相」に対応する。

この岩相は一般に淘汰が悪く、粗粒な生物骨格片(径数 cm のケーテテス、サンゴ、厚歯二枚貝殻、被覆微生物[おもに *Lithocodium* や *Bacnella* の被膜の破片]; Fig. 4D)、コートイド、ペロイドなどの石灰岩粒子を多く含む(Fig. 6A)。露頭スケッチの定量解析を行った3層準(YR-Q09, 10, 13)では、大型化石が占める割合は9–17%であった(平均12.3%; Figs. 5A, 5B)。そのうち、ケーテテス(平均6.4%)、軟体動物(平均3.0%)が占める割合が多く、サンゴはやや少ない(平均1.8%; Fig. 5B)。本岩相の露頭で確認できる大型の軟体動物化石のほとんどは厚歯二枚貝だった。それ以外では直径5 cm 程度の巻貝がまれに産出する。本岩相からは厚歯二枚貝がある程度産出するが(平均3.0%)、その産状は散在的で密集することはない。

3. サンゴ–厚歯二枚貝ラドストーン

本岩相は厚歯二枚貝とサンゴが多産するパイオストロームであり(Figs. 6B, 6C)、納ヶ内セクション上部の3層準

(28–28.5 m 層準, 29.5–30 m 層準, 30.5–32 m 層準)で発達する(Fig. 2B)。本岩相は佐野ほか(2008)が記述した「石灰泥質な岩相」のうち、「厚歯二枚貝の個体が層状に密集する部分」に対応する。

ラドストーン相の底部は生碎屑性ワッケストーンから漸移するが、頂部は明瞭な層理面をもってワッケストーンと接している(Fig. 6C)。サンゴや厚歯二枚貝の周囲はミクライトに富むワッケストーン様の組織が占めることが多いが、化石片が密集する部分ではグレインストーン様の組織が占めることもある(Fig. 6D)。本岩相では厚歯二枚貝の殻どうしが固着する様子は確認できず、厚歯二枚貝の殻が堆積物をせき止めている構造は確認されない(Fig. 3)。

2層準における露頭スケッチの定量解析の結果では、大型化石は露頭表面の15–20% (平均17.5%)を占め、平均すると、サンゴ化石が最も多く(9.4%)、軟体動物(6.8%; Fig. 5B)が続く。サンゴは枝状の形態のものが多く、*Aplosmilium somaensis* が確認された。佐野ほか(2008)は「厚歯二枚貝密集部(本岩相)の上位からサンゴ化石が多産する」と報告したが、本研究ではむしろ本岩相のほうにサンゴ化石の産出を多数確認した(Fig. 5A)。本岩相の露頭で確認できる大型の軟体動物化石のほとんどは厚歯二枚貝の化石だった。それ以外では直径7 cm 程度の巻貝が数個体産出する。厚歯二枚貝は離弁状態のものが多く、殻はあまり破断を受けていない。また、31 m 層準(YR-Q11)では少なくともおよそ2割の厚歯二枚貝が合弁であることが確認された(Fig. 3B)。

4. 石灰岩粒子の組成変化(ポイントカウントによる定量データ)

Fig. 7に薄片のポイントカウンティングの結果を示す。

納ヶ内セクションの石灰岩はミクライト質なものが多く、その比率はほぼ全層準で15%以上であり、最大40%に達する(Fig. 7)。一方、スパライトもほとんどの層準に含まれるが、10%以上の比率になることはまれである(Fig. 7)。

生物骨格は石灰岩構成粒子の中でもっとも含有量が多く、すべての層準で20%以上含まれる。コートイドは最下部(2–4 m 層準)、中部(20–23 m 層準)と最上部(31–34 m 層準)に多く、20%以上を占める。ペロイドは最下部層準(2–4 m 層準)のパウンドストーン相と、最上部層準(32–34 m 層準)のワッケストーン/パックスストーン相で多く、34 m 層準で最大値(12.7%)に達する(Fig. 7)。イントラクラストの比率は5%以下であるが、中部と最上部に多い(Fig. 7)。珪碎屑物はすべての層準に含まれる(Fig. 7)。その比率は下部層準では1–3%程度の値を推移し、中部層準(20–28 m 層準)のワッケストーン/パックスストーン相で増加し、28 m 層準で最大値(6.9%)をとる。珪碎屑物の含有量はその上位のラドストーン相で急激に減少し、2%以下になる。

生物骨格構成種の比率はいくつかの層序的傾向を示す。サンゴはほぼすべての層準で確認されたが、本研究セクション下部のパウンドストーン相で多く、最大50%以上を占める(Fig. 8)。層孔虫もほぼすべての層準で確認されるが、最下部(3–5 m 層準)と中部(20–26 m 層準)のパウンドストーン

Fig. 4. Occurrence of a reefal fauna in the Nogauchi section. Arrows point to the top of the stratigraphic section. (A) Hermatypic coral (*Isastrea* sp.) in the lower section (4 m horizon, sample no. 06). (B) Dome-shaped skeleton (within the dashed outline) formed mainly by *Isastrea* sp. in coral baffestone in the lower section (4 m horizon). The scale is 20 cm long. (C) Thin section of baffestone in the middle section (16 m horizon, sample no. 130521-02) containing a chaetetid (*Chaetetopsis crinita*; Cha) and a branching stromatoporoid (*Parastromatopora memoria-naumanni*; Par). (D) *Bacinella irregularis* (Bac) and *Lithocodium aggregatum* (Lit) encrusting a molluscan shell fragment in bioclastic wacke/packstone in the upper section (32.5 m horizon, sample no. 24).

相で多く、25%以上に達する (Fig. 8)。薄片で確認された軟体動物化石のほとんどは厚歯二枚貝の殻だった。このことは厚歯二枚貝特有の方解石稜柱層や、殻の厚さや大きさ、形状から推定される (Fig. 6D)。ごくまれに、Fig. 6Aに見られるような微小な巻貝も確認された。これら軟体動物化石は23 m 層準以下で少なく、23 m 層準以上で多いという明瞭な傾向を示す。同様に、ケーテーテス類も17 m 層準より上

位でしか産出しない (Fig. 8)。これらに対し、被覆微生物と棘皮動物はほぼ全ての層準に産出し、明瞭な層序的傾向を示さない (Fig. 8)。なお、被覆微生物の大半は *Bacinella* と *Lithocodium* であった。多くの場合、*Bacinella* と *Lithocodium* からなる被膜がサンゴや層孔虫の骨格の表面を被覆し、あるいは化石片をトラップしていた (Fig. 4D)。

Fig. 5. Results of the quantitative analysis of macrofossils in the Nogauchi section. (A) Surface coverage of macrofossils at 13 horizons, determined by the quadrat method (as a percentage of the entire rock surface area). (B) Average surface coverage of macrofossils in each of the three limestone facies.

考 察

1. 岩相と生物相から推定される堆積環境

全体的にスパライトに対してミクライトが卓越すること、静穏環境の指標であるコートイドやペロイド (Reolid et al., 2007) が多産すること (Figs. 6A, 7) から、納ヶ内セクションの石灰岩は比較的穏やかな環境で堆積したものと考えられる。このことは本研究セクションの下部層準からの *Isastrea* や *Stylina* の産出とその群体の形状からも支持される。フランス東部・ジュラ山脈に露出する上部ジュラ系の炭酸塩プラットフォームを研究した Lathuilière et al. (2005) は、*Stylina* 属はラグーンを中心に、*Isastrea* 属はプラットフォームの縁辺部からラグーンにかけての静穏環境で生息し

ていたと復元した。これらのサンゴは小規模なドーム状～塊状の群体を形成しており (Lathuilière et al., 2005)、本研究セクションの下部で認められるサンゴ群体の特徴とも一致する (Figs. 3A, 4A)。

ただし、納ヶ内セクションの石灰岩の全層厚は 40 m にも満たず、石灰岩体の側方への連続性が確認されないことから (Fig. 2)、大規模炭酸塩プラットフォームの陸側に発達するラグーンのような環境は想定できない。また、石灰岩内部の走向・傾斜と石灰岩近傍の砂岩泥岩互層の走向・傾斜がほぼ一致すること (Fig. 2A)、石灰岩体が変形・破碎を受けた構造がないことから、この石灰岩体が炭酸塩プラットフォーム由来のオリストリスであるとは考えられない。一方、本研究セクションでは鳥巢動物群の典型的な造礁生物 (Tamura,

Fig. 6. Microfacies and mode of occurrence of rudist individuals in the Nogauchi section. Arrows point to the top of the stratigraphic section. (A) Photomicrograph of poorly sorted bioclastic wackestone in the middle part of the section (27 m horizon, sample no. 18) containing skeletal grains, small gastropods (gs), micritic ooids (cortoids), and siliciclasts. (B) Shell bed (coral-rudist rudstone) of autochthonous-parautochthonous rudist individuals in the outcrop (31 m horizon; see also the sketch in Fig. 3A). The hammer is 28 cm long. (C) Boundary (dashed line) between the coral-rudist rudstone and the overlying bioclastic wacke/packstone (32 m horizon). (D) Thin section of grainstone part of the coral-rudist rudstone, filled mainly with poorly sorted fragments of rudist shells (rs); from the upper section (30 m horizon, sample no. 22). (E) Antero-posterior section of *Epidiceras speciosum* showing posterior myophoral ledges (pm) in each valve (28.5 m horizon). The posterior myophores (pm) of both valves and the outer layer (ol) are identified in the sketch.

1961)が多産し、四国の鳥巢式石灰岩とほぼ同様の岩相が発達する(e.g. Kano et al., 2006). このことから、本研究セクションの堆積場は鳥巢式石灰岩に特有の小規模な炭酸塩マウンド(e.g. Kano, 1988; Kano and Jiju, 1995)の上に存在した極浅海域であったと考えるのが最も妥当である。実際、鳥巢式石灰岩の一部にはワッケストーンなどのミクライト主体の岩相が発達する(Shiraishi and Kano, 2004; Ohga et al., 2013). このことは鳥巢式石灰岩のような小規模な炭酸塩マウンドでも、水エネルギーの低い静穏な堆積環境が成立しえたことを示している。納ヶ内セクションの堆積場はそのような堆積環境に対比される。

また、四国地域からは高エネルギー環境を指標するウーイドが卓越する鳥巢式石灰岩も知られている(Kano, 1988; Kano and Jiju, 1995). 本研究セクションからはコートイドが産出するものの(Figs. 6A, 7), 被膜を厚く発達させた典型的なウーイドは確認できなかった。このことは、同じ鳥巢式石灰岩でも水エネルギー環境が大きく異なっていたことを示している。このことは鳥巢式石灰岩の堆積環境の多様性を反映しているのかもしれない。

また、層厚 50–100 m の規模で発達する四国の鳥巢式石灰岩(e.g. Kano, 1988; Kano and Jiju, 1995)に比べ、納ヶ内セクションの層厚は 35 m と著しく薄い。このことは、本研究セクションが属していた岩体は鳥巢式石灰岩の中でもさらに小規模なものだったことを示唆する。また、イントラクラストの産出(Fig. 7)や、最大で 8 割程度の厚歯二枚貝が離弁である可能性があること(Fig. 3B)は、堆積場にはある程度の波浪の影響があったことを示している。

納ヶ内セクションでは、下部～中部層準(0–26 m 層準)のバウンドストーン主体の岩相から中部～上部層準(23–35 m 層準)のワッケストーン/パックスストーン主体の岩相へと、明瞭な岩相変化を示す。Wilson and Jordan(1983)はメキシコ湾岸の第四系の縁取り型陸棚において、ワッケストーンやパックスストーンからなるラグーン堆積物の中に、Patch reefに相当するバウンドストーンが点在する例を示した。本研究セクションの岩相変化は、小規模な炭酸塩マウンドの上の極浅海域において、Patch reefのような小規模なサンゴの礁からその周辺の平坦な極浅海域の海底へと堆積環境がわずかに変化したことを示唆しているのかもしれない。本研究セクションにおいて、厚歯二枚貝は中部層準のバウンドストーンから産出しはじめ、ワッケストーン/パックスストーンからはさらに多く産出するようになる(Figs. 2B, 5)。そして、サンゴ・厚歯二枚貝のラドストーンはワッケストーン/パックスストーンに挟まれるようにして発達する(Fig. 2B)。このことから、厚歯二枚貝はサンゴの Patch reef 内部よりも極浅海域の平坦な海底面のほうにより多く生息していたと考えられる。

納ヶ内セクションのほとんどの層準で見られるサンゴと層孔虫の共存関係(Fig. 8)は中栄養環境から貧栄養環境を示唆する(Leinfelder et al., 2005)。それは、光栄養の *Stylina* 属や *Isastrea* 属などの造礁サンゴ、中生代型層孔虫、加えて *Bacinella*–*Lithocodium* 群集が、貧栄養環境で透明度が

高い浅海環境を好むためである(e.g. Leinfelder et al., 1993; Dupraz and Strasser, 1999, 2002)。また、棘皮動物化石が多産することも貧栄養環境の指標とされる(Dupraz and Strasser, 2002)。すなわち、本研究セクションの、特にサンゴと層孔虫が卓越する 22 m 層準以下の堆積環境は貧栄養環境にあったと考えられる。一方、それより上位では相対的に従属栄養型生物(ケーテータスや厚歯二枚貝)の割合が増加しており(Figs. 5A, 8)、堆積場の栄養塩濃度がやや増加したことを示しているのかもしれない。

後期ジュラ紀のサンゴや層孔虫は珪碎屑物の流入にも耐性を持っていたことが知られている(e.g. Dupraz and Strasser, 1999; Leinfelder et al., 2005)。特にサンゴは、珪碎屑物流入の影響下にあっても強固な骨格を形成していたことが知られている(e.g. 白石・吉富, 2004)。納ヶ内セクションの下部～中部層準(0–24 m 層準)では、珪碎屑物が 0.5%～3.0%含まれるが、サンゴや層孔虫が豊富に含まれ、非常に緻密な骨格を構築していたことが確認された。この程度の珪碎屑物の流入ではこれらサンゴや層孔虫の生育の阻害要因にはならなかったのだろう。

2. 国内の上部ジュラ系–下部白亜系石灰岩の造礁生物の産状との比較

四国の鳥巢式石灰岩では、サンゴの群体の発達は小規模である場合が多く、特定の層準でサンゴが排他的に産出することはない。例えば、Kano(1988)は高知県佐川町の一ツ渕採石場に露出する鳥巢式石灰岩において、露頭表面の観察に基づいて大型化石の定量的な層序分布を示した。その結果、サンゴ骨格は多い場合でも 30%にも満たず、サンゴに富む層準でも層孔虫が多数混在していることが判明した(Kano, 1988)。さらに Ohga et al.(2013)は、隣接して分布する鳥巢式石灰岩の岩体において、方形区法に基づいて大型化石の定量化を行った。その結果、サンゴが占める割合はどの層準でも 10%にも満たないことが判明した(Ohga et al., 2013)。納ヶ内セクションの下部～中部層準の一部(0–4 m 層準, 25 m 層準)では、サンゴが排他的に緻密な骨格をもった群体を形成し、露出面積は 1 層準あたり最大 85%にも達する(Figs. 5A, 8)。このような産状は鳥巢式石灰岩の中ではむしろ例外的である。

山口県下関市の上部ジュラ系豊西層群の浅海性石灰岩では造礁サンゴが強固な骨格を形成している(白石・吉富, 2004)。この石灰岩体の下部層準では *Stylina* や *Thamnastrea* が塊状の群体を形成しており、これは納ヶ内セクションの *Stylina* の産状と類似する。さらに、この豊西層群の石灰岩体からは層孔虫とケーテータスの産出は確認されていない(白石・吉富, 2004)。本研究セクションにおいても、サンゴが優占的に産出した下部層準(0–4 m 層準)では層孔虫・ケーテータスのフレームワークを確認できなかった(Fig. 5)。一方、中部層準の一部では層孔虫・ケーテータス主体のフレームワークが発達する(e.g. 17 m 層準, 21 m 層準)。前述のように、従属栄養生物であるケーテータスの出現は堆積場の栄養塩濃度の増加を示している可能性が高い。本研究セクションにおいて、下部層準(0–11 m 層準)と中部層準

Fig. 7. Compositions of limestone obtained by point counting of thin sections. Percentages (of entire thin section area) are shown by bars of different lengths. The column with sample numbers on the left side is a simplified version of the lithographic log shown in Fig. 2B.

Fig. 8. Composition of skeletal constituents obtained by point counting of thin sections. Percentages (of entire thin section area) are shown by bars of different lengths. The column with sample numbers on the left side is a simplified version of the lithographic log shown in Fig. 2B.

(14–26 m 層準)で造礁生物の構成要素が大きく異なるのは、堆積場の栄養塩濃度の変化と関係している可能性がある。

納ヶ内セクションから産出した *Stylina* 属や *Isastrea* 属は Eguchi (1951) や Mori (1963) によって日本各地の鳥巢式石灰岩(福島県の相馬中村層群, 高知県の鳥巢層群, 熊本県の坂本層など)からも報告されている。ほかの地域の石灰岩体では *Stylina* 属と *Isastrea* 属の群体は塊状, 枝状, 円柱状など多様な形状に発達する (Eguchi, 1951)。一般に, サンゴの群体の形状は生息環境の水深・波浪エネルギーに大きく左右されることが知られているが (e.g. 中森・井龍, 1990; Lathuilière et al., 2005), 本研究セクションの *Stylina* 属と *Isastrea* 属の群体の形状はドーム状ないし塊状であり, 形態の多様性に乏しい。一方, 上部層準のラドストーン相からは枝状の *Aplosmilium somaensis* が産出する。ジュラ紀の炭酸塩プラットフォームでは, 枝状のサンゴ骨格はラグーン内部から炭酸塩プラットフォームの縁辺部にひろく産出するため (Lathuilière et al., 2005), 枝状のサンゴ骨格から堆積場を限定することはできない。本研究では, 納ヶ内セクションの堆積場の水深・波浪エネルギーにそれほど大きな変化は見いだせなかった。

3. 厚歯二枚貝の産状とその意義

世界的に見ても, 後期ジュラ紀の厚歯二枚貝の産状の報告事例は数少ない。オーストリアの上部ジュラ系チトニアン階からは, *Heterodicerias* (エピディセラス科) がフロートストーン/ラドストーンの中に密集している産状が報告されている (Sanders et al., 2007)。この産出事例では *Heterodicerias* の殻表面 (= 外層) のカルサイト層が摩耗されていることから, 突発的な高エネルギーのイベントで *Heterodicerias* がリワークを受けたと解釈された (Sanders et al., 2007)。納ヶ内セクションでも, サンゴ-厚歯二枚貝ラドストーンの中に *Epidiceras* が密集して産出するが, そのカルサイト層は比較的良好な状態で保存されている場合が多い (Fig. 6E)。また前述のように, 合併の *Epidiceras* も複数確認できることから, 本岩相の *Epidiceras* の殻はそれほどリワークを受けておらず, 生息場付近で埋没したと考えられる。このことは *Epidiceras* の産状が現地性~準現地性であることを示唆している。

厚歯二枚貝の重要な生態的特徴として, 大規模な厚歯二枚貝層 (rudist formation) やバイオストロームを構築する能力が挙げられるが (e.g. Kauffman and Sohl, 1979; Ross and Skelton, 1993), これは厚歯二枚貝の祖先とされるメガロドン目 (Starobogatov, 1992) にも共通する。メガロドンもフロートストーンやラドストーンなどミクライト質な岩相から多産することから, ラグーンでバイオストロームを形成していたと考えられる (e.g. Bosellini et al., 1980; 田村, 1983; Chablais et al., 2009, 2010)。静穏な極浅海の海底でバイオストロームを形成していたという点で, メガロドンの産状は納ヶ内セクションの厚歯二枚貝の産状と共通している。

同様に, エピディセラス科と同じ左殻固着で巻貝型の形態を持つレクイエニア科 (Skelton, 2013a) も, 外洋と隔離さ

れたラグーンでバイオストロームを形成する例が数多く知られている (e.g. Wilson, 1975)。Perkins (1974) は, テキサスの白亜系アルビアン階の Glen Rose 石灰岩において, *Toucasia* (レクイエニア科) が礁より内側の閉鎖的な浅海域で, 泥質な基質に支持されるかたちでバイオストロームを形成していたことを示した。同じく Scott (1990) は, テキサスの白亜系アルビアン階の El Abra プラットフォームにおいて, レクイエニア科が back reef に広く生息し, 低エネルギー環境のラグーンでバイオストロームを形成していたことを報告した。また, Sano (1995) は北海道中部の下部蝦夷層群 (下部白亜系アプチアン~アルビアン階) に含まれる石灰岩オリストリスから *Toucasia* のバイオストロームを報告した。Sano (1995) や佐野 (2000) はこの石灰岩オリストリスの母体として前弧域で形成された縁取り型陸棚を想定し, ラグーンで *Toucasia* がバイオストロームを形成していたと推測した。

一般に, これら白亜系のレクイエニア科のバイオストロームはそれほど厚く発達しない。フランス南西部の下部白亜系パレミアン階では, 層厚数十 cm から 1 m 程度のレクイエニア科のバイオストロームが報告されている (Fenerci-Masse et al., 2004, 2005; Masse and Fenerci-Masse, 2006)。同様のレクイエニア科によるバイオストロームは, アメリカ・テキサス州中央部の下部白亜系アルビアン階からも報告されている (Mukherjee et al., 2012)。このことから, 納ヶ内セクションのサンゴ-厚歯二枚貝バイオストロームの層厚は, 白亜系のレクイエニア科のバイオストロームの層厚とほぼ同様であるといえる。

このように納ヶ内セクションのサンゴ-厚歯二枚貝ラドストーンでの *Epidiceras* の産状は, 三畳紀のメガロドンや白亜紀のレクイエニア科の産状と共通点が多い。静穏な極浅海域で層状のバイオストロームを形成する古生態はメガロドンと巻貝型の形態を持つ厚歯二枚貝に共通したものだったのかもしれない。

4. 鳥巢式石灰岩から産出する厚歯二枚貝の重要性

厚歯二枚貝は後期ジュラ紀のオックスフォーディアン期に出現したとされている (Skelton, 2003)。最初期の厚歯二枚貝には右殻固着型 (ヒププリテス亜目) のディセラス科と左殻固着型 (レクイエニア亜目) のエピディセラス科の 2 科があり, 両者はほぼ同時に出現した (Skelton, 2003, 2013a, b)。その後, ヒププリテス亜目の形態はジュラ紀末期 (チトニアン期) 以降に多様化し, 前期白亜紀 (オテリビアン期) 以降には世界各地で厚歯二枚貝層を形成するようになる (Kauffman and Johnson, 1988; Höfling and Scott, 2002; Skelton, 2003)。一方, レクイエニア亜目の形態は白亜紀を通じてヒププリテス亜目ほど多様化しなかった。すなわち, 後期ジュラ紀に出現したヒププリテス亜目とレクイエニア亜目の 2 大系統は, その後の進化史が大きく異なる。

後期ジュラ紀から前期白亜紀にかけての鳥巢式石灰岩からは, 上記の黎明期の 2 大系統が産出している。本研究では, レクイエニア亜目の *Epidiceras* が静穏な極浅海域で, 枝状のサンゴとともにバイオストロームを形成していたことが報

告された。その一方で、高知県香美市の鳥巣式石灰岩由来と思われる転石からは、ウーイドとともに *Epidiceras* が多産する例が報告されている(佐野ほか, 2008)。この産出事例は *Epidiceras* が波浪の影響を受ける高エネルギーの浅海域にも生息していた可能性を示唆しているが、転石であることから周辺の岩相を確認することはできず、本研究で示した *Epidiceras* の産状と比較するのは難しい。

愛媛県西予市の鳥巣式石灰岩からは、ヒップリテス亜目 (*'Valletia' cf. auris*) が、波浪の影響を受ける、比較的高エネルギーの浅海環境において、被覆微生物の *Bacinella* とともに現地性のフレームワークを形成していたことが報告されている(柿崎ほか, 2011)。この産状は納ヶ内セクションで確認された *Epidiceras* の産状と大きく異なっている。すなわち、西予市のヒップリテス亜目の産状はメガロドンや巻貝型厚歯二枚貝とは別の、新たな生態をもった厚歯二枚貝が出現したことを示唆している。

鳥巣式石灰岩の堆積は後期ジュラ紀(チトニアン期)から前期白亜紀(ベリアシアン期)のおよそ 1000 万年間に集中していたことが知られている(Kakizaki et al., 2012)。ほぼ同時期には厚歯二枚貝の新しい系統(レクイエニア科やモノプレウラ科)が出現しており(Skelton, 2003)、鳥巣式石灰岩に見られる厚歯二枚貝の産状の多様性は、厚歯二枚貝の進化の黎明期における生態的多様化の進行を反映している可能性がある。また、鳥巣式石灰岩はボルネオ島のパウ石灰岩(e.g. Kakizaki et al., 2013)と並び、後期ジュラ紀の古太平洋海域の厚歯二枚貝の化石記録を保持する数少ないフィールドである。黎明期の厚歯二枚貝の地理的分布を、鳥巣式石灰岩やパウ石灰岩を含めた古太平洋海域のデータに基づき、詳しく検証する必要がある。今後も、鳥巣式石灰岩から産出する厚歯二枚貝について、特にその産出状況や岩相・生物相との関係、生息年代についてのデータを積み重ねる必要があるだろう。

結 論

- 1) 上部ジュラ系津井層の納ヶ内セクションに露出する鳥巣式石灰岩からはサンゴ、層孔虫、ケーテテス、厚歯二枚貝などの造礁生物が多産する。特に、上部層準では 3 層準において、層厚 0.5–1.5 m の範囲に現地性～準現地性の厚歯二枚貝(*Epidiceras speciosum*)が密集して産出する。
- 2) 納ヶ内セクションでは、石灰岩の基質の大部分をミクライトが占めていた。また、生物骨格やコートイド、ペロイドが多産し、造礁サンゴ(*Isastrea* や *Stylina* など)が小規模なドーム状～枝状の群体を形成する。また、本研究セクションでは鳥巣式石灰岩と同様の岩相が発達する。このことは、石灰岩の堆積環境が鳥巣式石灰岩特有の小規模な炭酸塩マウンド上に存在した静穏な極浅海域であったことを示唆する。
- 3) 納ヶ内セクション下部～中部層準のパウンドストーン主体の岩相から 23 m 層準以上のワッケストーン/バックストーン主体の岩相への変化は、堆積場が patch reef のよ

うな小規模なサンゴの礁から周辺の平坦な海底へと変化したことを示唆している。厚歯二枚貝は静穏な極浅海域の平坦な海底でバイオストロームを形成していたと考えられる。

- 4) 納ヶ内セクションから産出する大型化石の多くは光栄養生物であることから、石灰岩の堆積環境は透明度が高い貧栄養環境であったと考えられる。ただし、厚歯二枚貝やケーテテスが增多する上部層準では堆積場の栄養塩濃度がやや上昇した可能性がある。
- 5) 納ヶ内セクションの下部層準では、鳥巣式石灰岩としては例外的に、サンゴが優占的に産出する。本研究セクションから産出したサンゴ群体の骨格の形状はドーム状、塊状、枝状に限られ、堆積場の水深・波浪エネルギーに大きな変化は確認されなかった。
- 6) 納ヶ内セクションのサンゴ-厚歯二枚貝バイオストロームの産状や発達様式は三畳紀のメガロドン、おなじ巻貝型厚歯二枚貝である白亜紀のレクイエニア科のバイオストロームと共通点が多い。静穏な極浅海域でバイオストロームを形成する古生態はメガロドンと巻貝型厚歯二枚貝に共通していたのかもしれない。
- 7) 納ヶ内セクションの *Epidiceras* (レクイエニア亜目) の産状は、愛媛県西予市の鳥巣式石灰岩から報告されていた '*Valletia' cf. auris* (ヒップリテス亜目) のものと大きく異なっている。西予市の厚歯二枚貝の産状はメガロドンや巻貝型厚歯二枚貝とは異なる生態をもった厚歯二枚貝が新たに出現したことを示唆しており、鳥巣式石灰岩に観察される厚歯二枚貝の産状の多様性は、進化の黎明期である後期ジュラ紀における厚歯二枚貝の生態的多様性の進行を反映している可能性がある。

謝 辞

本論文の査読者である白石史人博士(広島大学)と佐野晋一博士(福井県立恐竜博物館)、担当編集委員の中澤努博士(産業技術総合研究所)には、本稿を改善するうえで大変有意義なコメントをいただいた。明治大学の柳本裕特任教授、石油資源開発株式会社の八木正彦博士と島津崇氏には露頭までおいでいただき、本研究内容についてさまざまなコメントをいただいた。本研究を行うにあたり、日本科学協会笹川科学研究助成(海洋・船舶科学研究、代表者: 柿崎喜宏、研究番号 21-742M, 平成 21 年度)および日本学術振興会科学研究費補助金(若手研究 B, 代表者: 柿崎喜宏、課題番号 25800288, 2013-2016)を用いた。ここに記して感謝する。

文 献

- Bosellini, A., Lobitzer, H., Brandner, R., Resch, W. and Castellarin, A., 1980, The Complex Basins of the Calcareous Alps and Palaeomargins. *Abhand. Geol. Bund. Wien*, **34**, 287–325.
- Chablais, J., Martini, R., Samankassou, E., Onoue, T., and Sano, H., 2009, Microfacies and depositional setting of the Upper Triassic mid-oceanic atoll-type carbonates of the Sambosan Accretionary Complex (southern Kyushu, Japan). *Facies*, **56**, 249–278.

- Chablais, J., Onoue, T. and Martini, R., 2010. Upper Triassic reef-limestone blocks of southwestern Japan: New data from a Panthalassan seamount. *Palaeogeogr., Palaeoclimatol., Palaeoecol.*, **293**, 206–222.
- Dunham, R. J., 1962, Classification of carbonate rocks according to depositional texture. *Mem. Amer. Assoc. Petrol. Geol.*, **1**, 108–121.
- Dupraz, C. and Strasser, A., 1999, Microbialites and Micro-en crusters in Shallow Coral Bioherms (Middle to Late Oxfordian, Swiss Jura Mountains). *Facies*, **40**, 101–130.
- Dupraz, C. and Strasser, A., 2002, Nutritional Modes in Coral–Microbialite Reefs (Jurassic, Oxfordian, Switzerland): Evolution of Trophic Structure as a Response to Environmental Change. *Palaios*, **17**, 449–471.
- Eguchi, M., 1951, Mesozoic Hexacrales from Japan. *Sci. Rep. Tohoku Univ., 2nd Ser.*, **24**, 1–96. Pls. 1–28.
- Embry, A. F. and Klovan, J. E., 1972, Absolute water depth limits of late Devonian paleoecological zones. *Geol. Rundsch.*, **61**, 672–686.
- Fenerci-Masse, M., Masse, J. P. and Chazottes, V., 2004, Quantitative analysis of rudist assemblages: a key for palaeocommunity reconstructions. The Late Barremian record from SE France. *Palaeogeogr., Palaeoclimatol., Palaeoecol.*, **206**, 133–147.
- Fenerci-Masse, M., Masse, J. P. and Pernarcic, E., 2005, Quantitative stratigraphy of rudist limestones and its bearing on spatial organisation of rudist communities: the Late Barremian, Urgonian, sequences of Provence (S. E. France). *Palaeogeogr., Palaeoclimatol., Palaeoecol.*, **215**, 265–284.
- Gili, E., Masse, J. P. and Skelton, P. W., 1995, Rudists as gregarious sediment-dwellers, not reef-builders, on Cretaceous carbonate platforms. *Palaeogeogr., Palaeoclimatol., Palaeoecol.*, **118**, 245–267.
- 橋本 勇 (Hashimoto, I.), 1962, 大分県佐伯市付近の時代未詳層群の層序と構造 (1). 九州大教養部地研報 (*Rep. Earth Sci. General Edu. Kyushu Univ.*), **9**, 1–12, pls. 1–2.
- 橋本 勇 (Hashimoto, I.), 1977, 九州東部秩父累帯の津井・尺間山・床木 3 層について. 九州大理研報 (地質) (*Sci. Rep. Dep. Geol. Sci. Kyushu Univ.*), **12**, 157–163.
- Höfling, R. and Scott, R. W., 2002, Early and Mid-Cretaceous buildups. In Kiessling, W., Flügel, E., and Golonka, J. eds., *Phanerozoic Reef Patterns*. SEPM Spec. Pub. no.72), 521–548.
- Iba, Y. and Sano, S. 2007, Mid-Cretaceous step-wise demise of the carbonate platform biota in the Northwest Pacific and establishment of the North Pacific biotic province. *Palaeogeogr., Palaeoclimatol., Palaeoecol.*, **245**, 462–482.
- Ichise, M. 2008, Stratigraphy of Lower Cretaceous System in the Jikkoku Pass Area, Western Kanto Mountains, Japan. *Earth Evolution Sci., Univ. Tsukuba*, **2**, 39–65.
- Kakizaki, Y., Ishikawa, T., Nagaishi, K., Tanimizu, M., Hasegawa, T., and Kano, A., 2012, Strontium isotopic ages of the Torinosu-type limestones (latest Jurassic to earliest Cretaceous, Japan): implication for biocalcification event in northwestern Palaeo-Pacific. *Jour. Asian Earth Sci.*, **46**, 140–149.
- Kakizaki, Y., Weissert, H., Hasegawa, T., Ishikawa, T., Matsuo, J. and Kano, A., 2013, Strontium and carbon isotope stratigraphy of the Late Jurassic shallow marine limestone in western Palaeo-Pacific, northwest Borneo. *Jour. Asian Earth Sci.*, **73**, 57–67.
- 柿崎喜宏・佐野晋一・狩野彰宏 (Kakizaki, Y., Sano, S. and Kano A.), 2011, 愛媛県城川地域中津川の鳥巢式石灰岩に見出された現地性厚歯二枚貝と被覆微生物の産状. 福井恐竜博紀要 (*Mem. Fukui Dinosaur Mus.*), **10**, 113–120.
- Kano, A., 1988, Facies and depositional conditions of a carbonate mound (Tithonian-Berriasian, SW-Japan). *Facies*, **18**, 27–48.
- Kano, A. and Jiju, K., 1995, The Upper Jurassic–Lower Cretaceous carbonate-terrigenous succession and the development of a carbonate mound in western Shikoku, Japan. *Sediment. Geol.*, **99**, 165–178.
- Kano, A., Kakizaki, Y., Shiraishi, F., Kawai, T. and Matsuoka, J., 2006, Uppermost Jurassic limestone mounds and the recent tufa deposits in southern Shikoku Province. *ISC 2006 Excursion guidebook B08*, 13p.
- Kauffman, E. G. and Johnson, C. C., 1988, The morphological and ecological evolution of middle and upper Cretaceous reef-building rudists. *Palaios*, **3**, 194–216.
- Kauffman, E. G. and Sohl, N. F., 1979, Rudists. In Fairbridge, R.W. and Jablonski, D., eds., *The Encyclopedia of Paleontology. Encyclopedia of Earth Sciences*, **7**, 723–737.
- Kobayashi, F. and Wernli, R., 2013, Latest Jurassic to earlier Early Cretaceous foraminifers from the Torinosu-type limestone blocks in Southwest Japan: Constraints on chronological calibration of the Torinosu-type limestones. *Jour. Geol. Soc. Japan*, **119**, 25–38.
- Lathuilière, B., Gaillard, C., Habrant, N., Bodeur, Y., Boullier, A., Enay, R., Hanzo, M., Marchand, D., Thierry, J. and Werner, W., 2005, Coral zonation of an Oxfordian reef tract in the northern French Jura. *Facies*, **50**, 545–559.
- Leinfelder, R. R., Nose, M., Schmid, D. U. and Werner, W., 1993, Microbial crusts of the Late Jurassic: composition, palaeoecological significance and importance in reef construction. *Facies*, **29**, 195–230.
- Leinfelder, R. R., Schlagintweit, F., Werner, W., Ebli, O., Nose, M., Schmid, D. U. and Hughes, G. W., 2005, Significance of stromatoporoids in Jurassic reefs and carbonate platforms – concepts and implications. *Facies*, **51**, 287–325.
- Masse, J. P. and Fenerci-Masse, M., 2006, Carbonate production by rudist bivalves. The record of Late Barremian requieniid communities from Provence (SE France). *Palaeogeogr., Palaeoclimatol., Palaeoecol.*, **234**, 239–257.
- 三本健二・森野善広・野瀬一雄 (Mimoto, K., Morino, Y., and Nose, K.), 1990, 鳥ノ巣石灰岩からの厚歯二枚貝 *diceratid* の発見. 地学研究 (*Chigaku Kenkyu*), **39**, 107–110.
- Mori, K., 1963, Geology and paleontology of the Jurassic So-manakamura Group, Fukushima Prefecture, Japan. *Sci. Rep. Tohoku Univ., 2nd Ser.*, **35**, 33–65.
- Mukherjee, D., Khan, S. D. and Sullivan, S., 2012, Upper Albian rudist buildups of the Edwards Formation in central Texas: A GPR-assisted reservoir analog study. *Sediment. Geol.*, **247–248**, 71–81.
- Nagao, T., 1933, A new variety of *Toucasia carinata* (Math.) from the Lower Cretaceous of Japan. *Jour. Fac. Sci., Hokkaido Imp. Univ., Ser. 4*, **2**, 163–167, pls. 21–22.
- 中森 亨・井龍康文 (Nakamori, T. and Iryu, Y.), 1990, サンゴ礁の地形区分と造礁生物の礁内分布. サンゴ礁地域研究グループ編, 日本のサンゴ礁地域 1: 熱い自然–サンゴ礁の環境史–(*Coral Reef Area of Japan 1: Hot Nature–Environmental History of Coral Reef*), 古今書院 (Kokon Shoin), 39–56.
- Newell, N. D., 1965, Classification of the Bivalvia. *American Museum Novitates*, no.2206, 1–25.
- Nishi, T., 1994, Geology and tectonics of the Sambozan Terrane in eastern Kyushu, Southwest Japan: Stratigraphy, sedimentological features and depositional setting of the Shakumasan Group. *Jour. Geol. Soc. Japan*, **100**, 199–215.
- Ohga, H., Kołodziej, B., Nose, M., Schmid, D. U., Takayanagi, H. and Iryu, Y., 2013, Sedimentary facies and biofacies of the Torinosu Limestone in the Torinosu area, Kochi Prefecture, Japan. *Island Arc*, **22**, 150–169.
- 大久保雅弘・松島信幸 (Okubo, M. and Matsushima, N.), 1959, 赤石山地の厚歯二枚貝 (1 新種). 地球科学 (*Earth Sci. (Chikyū Kagaku)*), **42**, 1–4.
- Perkins, B. F., 1974, Paleocology of a rudist reef complex in the Comanche Cretaceous Glen Rose Limestone of central

- Texas. *Geoscience and Man*, **13**, 131–173.
- Reolid, M., Gaillard, C. and Lathuilière, B., 2007, Microfacies, microtaphonomic traits and foraminiferal assemblages from Upper Jurassic oolitic-coral limestones: stratigraphic fluctuations in a shallowing-upward sequence (French Jura, Middle Oxfordian). *Facies*, **53**, 553–574.
- Ross, D. J. and Skelton, P. W., 1993, Rudist formations of the Cretaceous: a palaeoecological, sedimentological and stratigraphical review. In Wright, V. P. ed., *Sedimentology Review/1*, Blackwell Scientific Publications, 73–91.
- Saito, Y., 1964, A rudistid from the Cretaceous deposits of Ryo-seki Kochi Prefecture, Japan. *Trans. Proc. Palaeontol. Soc. Japan*, **N. S.**, **56**, 317–321.
- Sanders, D., Lukesch, M., Rasser, M. and Skelton, P., 2007, Shell beds of diceratid rudists ahead of a low-energy gravelly beach (Tithonian, northern Calcareous Alps, Austria): Palaeoecology and taphonomy. *Austrian Jour. Earth Sci.*, **100**, 186–199.
- Sano, S., 1991, Discovery of a coral-rudist buildup in the Miyako Group, Northeast Japan. *Trans. Proc. Palaeontol. Soc. Japan*, **N. S.**, **162**, 794–800.
- Sano, S., 1995, Lithofacies and biofacies of Early Cretaceous rudist-bearing carbonate sediments in northeastern Japan. *Sediment. Geol.*, **99**, 179–189.
- 佐野晋一 (Sano, S.), 1995, 北海道中央部下部蝦夷層群の“Orbitolina 石灰岩”の堆積モデル. 月刊地球 (*Chikyu Monthly*), **17**, 602–607.
- 佐野晋一 (Sano, S.), 2000, 見えない“礁”を推定する—北海道中央部下部白亜系石灰岩を例として—. 月刊地球号外 (*Chikyu Monthly Extra ed.*), **29**, 45–59.
- Sano, S. and Masse, J. P., 2013, First record of a primitive radiolitid rudist from Japan. *Paleontol. Res.*, **17**, 317–324.
- 佐野晋一・森野善広・Skelton, P. W.・三本健二・野瀬一雄・廣田隆吉 (Sano, S., Morino, Y., Skelton, P. W., Mimoto, K., Nose, K. and Hirota, R.), 2008, 鳥巢式石灰岩に産する後期ジュラ紀～白亜紀初期の厚歯二枚貝について (概報). 福井恐竜博紀要 (*Mem. Fukui Dinosaur Mus.*), **7**, 67–81.
- Sano, S. and Skelton, P. W., 2010, *Epidiceras* (Bivalvia, Hippuritoidae) from the Tithonian-Berriasian Torinosu-type Limestones of the Sakawa Area, Southwest Japan. *Turk. Jour. Earth Sci.*, **19**, 733–743.
- 佐野晋一・ピーター W. スケルトン・武井雅彦・松岡 篤 (Sano, S., Skelton, P. W., Takei, M. and Matsuoka, A.), 2007, 愛媛県城川地域の上部ジュラ系今井谷層群下相層中の鳥巢式石灰岩塊より厚歯二枚貝の発見. 地質雑 (*Jour. Geol. Soc. Japan*), **113**, 500–503.
- Sano, S., Skelton, P. W., Watari, M., Iba, Y., Kondo, Y. and Sato, Y., 2012, First record of an early Barremian Caprinid Rudist from Japan: implications for the palaeobiogeography of the caprinidae (Bivalvia). *Palaeontology*, **55**, 843–851.
- 佐藤裕一郎 (Sato, Y.), 1999, 大分県に分布するジュラ紀鳥巢式石灰岩中の化石. 大分地質学会誌特別号 (*Spec. Issue, Geol. Soc. Oita*), no.5, 15–33.
- Scott, R. W., 1990, Models and stratigraphy of Mid-Cretaceous reef communities, Gulf of Mexico. In Lidz, B. H., ed., *Concepts in Sedimentology and Paleontology*. SEPM Spec. Pub., **2**, 1–102.
- Shikama, T. and Tanabe, K., 1970, Late Cretaceous Rudistes from Uwajima, Ehime Prefecture, Shikoku, Japan. *Sci. Rep. Yokohama Natl. Univ., Sec. II*, **17**, 49–58.
- 白石史人・吉富健一 (Shiraishi, F. and Yoshidomi, K.), 2004, 山口県西部に分布する上部ジュラ系～下部白亜系礫性石灰岩の堆積環境. 地質雑 (*Jour. Geol. Soc. Japan*), **111**, 21–28.
- Shiraishi, F. and Kano, A., 2004, Composition and spatial distribution of microencrusters and micro crusts in upper Jurassic-lowermost Cretaceous reef limestone (Torinosu limestone, southwest Japan). *Facies*, **50**, 217–227.
- Skelton, P. W., 2003, Rudist evolution and extinction—a North African perspective. In Gili, E., Negra, H. and Skelton, P. W. eds., *North African Cretaceous carbonate platform systems*. NATO Science Series, IV. Earth and Environmental Sciences, **28**, 215–227.
- Skelton, P. W., 2013a, Rudist classification for the revised Bivalvia volumes of the Treatise on Invertebrate Paleontology. *Carib. Jour. Earth Sci.*, **45**, 9–33.
- Skelton, P. W., 2013b, Rudist classification: nomenclatural correction of ‘Suborder Radiolitidina Skelton, 2013’ to ‘Suborder Hippuritidina Newell, 1965’. *Carib. Jour. Earth Sci.*, **45**, 34.
- Starobogatov, Y. I., 1992, Morphological basis for phylogeny and classification of Bivalvia. *Ruthenica*, **2**, 1–25.
- Tamura, M., 1961, The Torinosu Series and fossils therein. *Japan Jour. Geol. Geogr.*, **32**, 219–252.
- 田村 実 (Tamura, M.), 1983, 日本のメガロドンとメガロドン石灰岩の堆積環境. 熊本地学会誌 (*Jour. Geol. Soc. Kumamoto*), **73**, 2–10.
- Tanaka, H., 1989, Mesozoic formations and their molluscan faunas in the Haidateyama area, Oita Prefecture, Southwest Japan. *Jour. Hiroshima Univ., Ser. C*, **9**, 1–45.
- Tanaka, H., Miyamoto, T., Tashiro, M. and Takahashi, T., 1996, Bivalve fauna from the Pre-Sotoizumi Group developed to the North of Mt. Haidate, Oita Prefecture, Kyushu. *Mem. Fac. Edu., Kumamoto Univ. Nat. Sci.*, **45**, 11–52.
- Wilson, J. L., 1975, The Rise of Rudists; Middle Cretaceous Facies in Mexico and the Middle East. In Wilson, J. L. ed., *Carbonate Facies in Geologic History*. Springer Verlag, 319–347.
- Wilson, J. L. and Jordan, C., 1983, Middle shelf environment. In Scholle, P. A., Bebout, D. G. and Moore, C. H., eds., *Carbonate Depositional Environments*. Mem. AAPG, **33**, 298–343.
- Yabe, H. and Nagao, S., 1926, *Praeaprotina*, nov. gen. from the Lower Cretaceous of Japan. *Sci. Rep. Tohoku Imp. Univ., 2nd Ser.*, **9**, 21–24, pl. VII (I).
- 山際延夫・平郡秀一郎 (Yamagiwa, N. and Heguri, S.), 1987, 大分県津久見地域四浦半島に分布する津井層産の珊瑚化石について. 大阪教育大紀要 第3部門 (*Mem. Osaka Kyoiku Univ., Ser. 3rd*), **36**, 27–37.
- Yehara, S., 1920, A Pachyodont Lamellibranch from the Cretaceous Deposits of Miyako in Rikuchu. *Jour. Geol. Soc. Tokyo*, **27**, 39–44, Pls. 1–2.

(著者プロフィール)

柿崎喜宏 明治大学ガスハイドレート研究所研究推進員. 04年 新潟大学卒, 09年 広島大学博士課程後期修了(理学博士). 金沢大学博士研究員(09年～), 九州大学学術研究員(12年～)を経て, 14年4月から現職. 研究内容: 炭酸塩岩の堆積学と化学層序. 本研究では, 岩相と化石の記載・原稿執筆・編集委員会との対応を担当. E-mail: tz14012@meiji.ac.jp. URL: <http://researchmap.jp/kaki/>.

古山精史朗 産業技術総合研究所地質情報部門海洋地質研究グループ特別研究員. 14年 九州大学比較社会文化学府博士課程後期修了(理学博士). 14年4月から現職. 研究内容: 炭酸塩岩の同位体層序, 海洋音響層序. 本研究では, 野外調査・岩相と化石の記載を担当. E-mail: holo-cene2007.furuyama@aist.go.jp

狩野彰宏 九州大学大学院比較社会文化研究院教授. 90年 ストックホルム大学地質学地球化学教室博士課程修了. 広島大学助手・准教授(90年～)を経て, 08年4月から現職. 研究内容: 炭酸塩岩を用いた地球史と古気候に関する研究. 本研究では, 野外調査と原稿執筆(一部)を担当. E-mail: kano@scs.kyushu-u.ac.jp. URL: <http://www.scs.kyushu-u.ac.jp/earth/kano/>.

(要 旨)

柿崎喜宏・古山精史朗・狩野彰宏, 2015, 大分県東部・四浦半島に分布する後期ジュラ紀の礁性石灰岩の堆積環境と厚歯二枚貝の産状. 地質雑, **121**, 19–34. (Kakizaki, Y., Furuyama, S. and Kano, A., 2015, Depositional environment of a Late Jurassic reefal limestone and mode of occurrence of rudist individuals from Youra Peninsula, eastern Oita Prefecture (Kyushu Island, southwest Japan). *Jour. Geol. Soc. Japan*, **121**, 19–34.)

大分県に分布する津井層(上部ジュラ系)中の礁性石灰岩の岩相と化石相を定量的に検討した。層厚 35 m のセクションの中で、生物相は下部のサンゴ層孔虫主体の群集からレクイエニア亜目の厚歯二枚貝(*Epidiceras*)とケーターテスを含む群集へと変化する。石灰岩の岩相、サンゴ群体の骨格の形状、造礁生物の構成要素から、堆積環境は炭酸塩マウンド上に存在した貧栄養の静穏な極浅海域であったと考えられる。*Epidiceras* はサンゴとともにセクション上部で厚さ 0.5–1.5 m のバイオストロームを作る。津井層の *Epidiceras* のバイオストロームの産状は三畳紀のメガロドン目のもの、白亜紀のレクイエニア亜目のものと類似する。一方、愛媛県の鳥巢式石灰岩から報告された初期のヒップリテス亜目の産状とは大きく異なる。このことは、厚歯二枚貝の生態が出現してから比較的早い時期にすでに多様化していたことを指示する。

科学論文では、学説の検証可能性を保証することが重要です。そのため、地質学雑誌掲載論文には、重要な証拠となった試料がどこで得られたかを示しているものがあります。言うまでもないことですが、見学や採取を行う場合、各自の責任において地権者や関係官庁への連絡と許可の取得の必要があることにご注意下さい。詳しくは、次のページをご覧ください。

<http://www.geosociety.jp/publication/content0073.html>

一般社団法人日本地質学会