

## 高知県四万十市の上部白亜系佐田石灰岩の岩相と化石群集

延原尊美\*・恩田大学\*\*・菊池直樹\*\*\*・近藤康生\*\*\*・松原 啓\*\*\*・天野和孝\*\*\*\*

ジェンキンズ ロバート\*\*\*\*\*・疋田吉識\*\*\*\*\*・間嶋隆一\*\*\*\*\*

\* 静岡大学教育学部地学教室・\*\* 横浜国立大学大学院環境情報学府・\*\*\* 高知大学理学部自然環境科学科・\*\*\*\* 上越教育大学地学教室・\*\*\*\*\* 横浜国立大学教育人間科学部・\*\*\*\*\* 中川町自然誌博物館

## Lithofacies and fossil assemblages of the Upper Cretaceous Sada Limestone, Shimanto City, Kochi Prefecture, Shikoku, Japan

Takami Nobuhara\*, Daigaku Onda\*\*, Naoki Kikuchi\*\*\*, Yasuo Kondo\*\*\*, Kei Matsubara\*\*\*, Kazutaka Amano\*\*\*\*, Robert G. Jenkins\*\*\*\*\*, Yoshinori Hikida\*\*\*\*\* and Ryuichi Majima\*\*\*\*\*

\*Geological Institute, Faculty of Education, Shizuoka University, Oya 836, Suruga-ku, Shizuoka 422-8529, Japan (etnobuh@ipc.shizuoka.ac.jp); \*\* Department of Environment and Natural Sciences, Graduation School of Environment and Information Sciences, Yokohama National University, Hodogaya-ku, Tokiwadai 79-2, Yokohama 240-8501, Japan; \*\*\*Department of Natural Environmental Science, Faculty of Science, Kochi University, Kochi 780-8520, Japan; \*\*\*\*Department of Geoscience, Joetsu University of Education, 1 Yamayashiki, Joetsu City, Niigata Prefecture 943-8512, Japan; \*\*\*\*\* Faculty of Education and Human Sciences, Yokohama National University, Hodogaya-ku, Tokiwadai 79-2, Yokohama 240-8501, Japan; \*\*\*\*\* Nakagawa Museum of Natural History, Hokkaido 068-0835, Japan

**Abstract.** The Sada Limestone in the Upper Cretaceous Nakamura Formation, Shimanto Belt, Shikoku, Japan is known to yield abundant “*Thyasira*” and “*Serpula*” fossils. However, the whole assemblage has never been studied to an appropriate depth. We present a preliminary report on the mode of occurrence, lithology, and faunal composition of the Sada Limestone followed by discussion on its origin. The limestone crops out at more than 10 localities in an elliptical area (250 m in NE-SW, 400m in NW-SE direction) surrounded by Upper Cretaceous siltstone. The boundary between the limestone and the siltstone is gradational, which suggests that the limestone was autochthonous. The Sada Limestone consists of three lithofacies: 1) banded limestone (detrital micrite with parallel calcite-sheets, showing inverted stromatactoid structure); 2) “*Thyasira*”-“*Serpula*” limestone (detrital micrite containing abundant autochthonous “*Thyasira*” and “*Serpula*”); and 3) sparsely-fossiliferous massive limestone, composed mainly of recrystallized sparite. The three lithofacies alternate with each other with intervals of several meters. The “*Thyasira*”-“*Serpula*” assemblage is associated with other chemosynthetic bivalves, such as *Myrtea?* sp. and *Solemya* sp. “*Thyasira*” shells are large (8 cm of maximum shell length) and conjoined. The shells are densely packed in the limestone, whereas in the surrounding siltstone molluscan fossils are rare. The taxonomic composition, mode of occurrence, and lithological characteristics such as inverted stromatactoid structure suggest that the Sada Limestone is seep-related and the fauna represents a chemosynthetic ecosystem similar to many other thyasirid-rich carbonates worldwide. However, to verify the hypothesis requires further biogeochemical approaches such as stable isotope and biomarker analyses.

**Key words:** Cretaceous, chemosynthesis, Shimanto-Belt, Sada Limestone

### はじめに

高知県四万十市(旧中村市)佐田<sup>さだ</sup>には、四万十帯北帯の泥質岩中に巨大な石灰岩体(以下、佐田石灰岩と呼ぶ)が存在する。佐田石灰岩は、甲藤ほか(1960)の20万分の1「高知県地質鉱産図」では、ほぼ東西方向に伸張する長径約600 m、短径約200 mの楕円状岩体として、寺岡・栗本(1989)の20万分の1地質図「宇和島」では、北西

一南東方向に伸張した同規模の楕円状岩体として表現されている。しかしながら、この巨大な石灰岩体の正確な規模、産状、岩相、さらにはその成因に関してはほとんど研究がなされていない。

佐田石灰岩産の化石については、古くは井上(1902)によって管状多毛類 *Serpula*、二枚貝類 *Lucina*, *Cyrena*、巻貝類 *Melania*、底生有孔虫 *Nodosaria* の産出が報告され、小林(1950)は、その化石相がいわゆる鳥巢式石灰岩とは

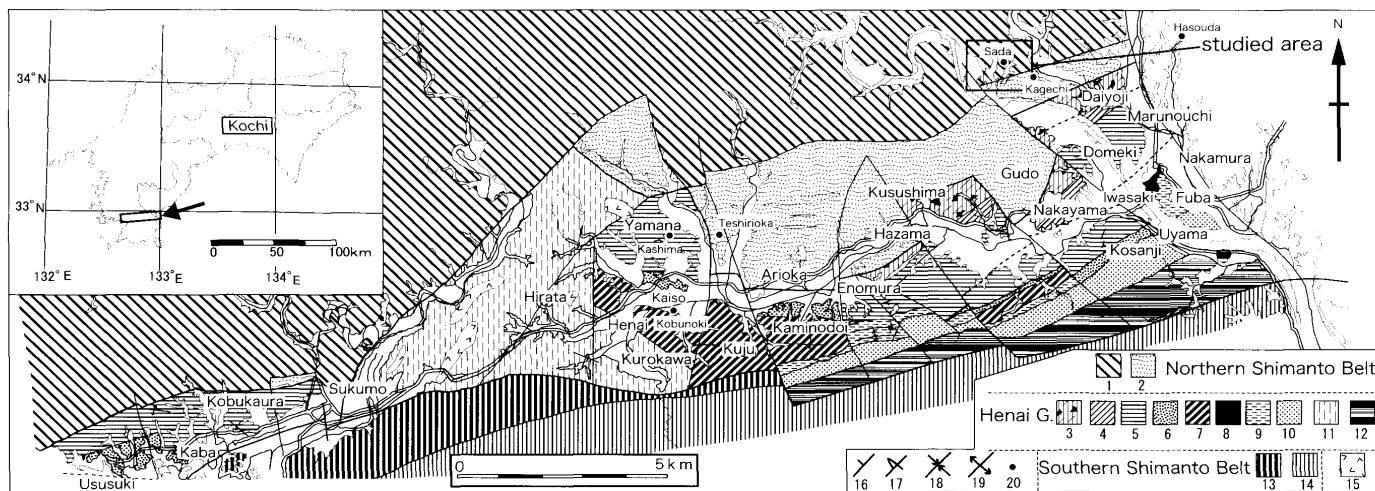


図1. 中筋低地帯の地質図(鹿納ほか, 2003)および調査範囲。1. 中村層, 2. 具同ユニット, 3-10. 百笑層(3. 楠島泥岩部層, 4. 大用寺泥岩部層, 5. 丸の内泥岩部層, 6. 樺混在岩部層, 7. 黒川泥岩部層, 8. 岩崎泥岩部層, 9. 不破頁岩部層, 10. 右山砂岩部層), 11. 平田層, 12. 田ノ口層, 13. 龍ヶ迫層, 14. 弘見コンプレックス, 15. 新生代の貫入岩体, 16. 正常層の走向・傾斜, 17. 逆転層の走向・傾斜, 18. 向斜, 19. 背斜, 20. 大型化石産地。

Fig. 1. Geological map of the Nakasuji lowland belt (Kano *et al.*, 2003) and the studied area. 1. Nakamura Formation, 2. Gudo Unit, 3-10. Domeki Formation (3. Kusushima Mudstone Member, 4. Daiyoji Mudstone Member, 5. Marunouchi Mudstone Member, 6. Kaba Mixed Rock Member, 7. Kurokawa Mudstone Member, 8. Iwasaki Mudstone Member, 9. Fuba Member, 10. Uyama Sandstone Member), 11. Hirata Formation, 12. Tanokuchi Formation, 13. Tatsugasako Formation, 14. Hiromi Complex, 15. Neogene intrusive rocks, 16. Dip and strike of the normal strata, 17. Dip and strike of the overturned strata, 18. Syncline, 19. Anticline, 20. Megafossil localities.

異なると指摘した。その後、甲藤(1952)および甲藤ほか(1961)によって、*Ostrea* sp., *Lunatia* n. sp., *Aphrodina* sp., *Periplomya* sp., *Schafhaeutlia* sp. が、甲藤・田代(1979)および田代(1980)によって、*Aphrodina* cf. *izumensis* Ichikawa and Maeda, *Periplomya nagaoui* Ichikawa and Maeda が報告された。また Katto and Hattori (1964) は、二枚貝マルスダレガイ科の新種 *Aphrodina* (*Aphrodina*) *hataii* を記載・図示した。本種は、のちに田代(1992)によって *Thyasira* 属にその属位が変更されたが、属位を決定する上で重要な歯部等の殻内面の形質は示されていない。また、田代(1991)によれば、佐田石灰岩中には *Thyasira* sp., 管状多毛類 *Serpula* sp. が密集するとの簡単な記述があるが、産出岩相や化石産状についても報告されていない。

著者らは、1) 四万十市佐田地区に露出する石灰岩露頭を踏査し、石灰岩体の規模や周囲の泥岩との関係をとらえると同時に、2) 佐田石灰岩の代表的岩相構成およびその岩石学的特徴を明らかにした。そして3) 佐田石灰岩より産出する代表的な二枚貝化石の分類について、新知見を得たので報告する。その結果、佐田石灰岩の成因がメタン湧水に関与する可能性があるため、今後、検証すべき課題とともにその研究意義を指摘する。

## 地質概説

高知県西部の四万十市中村から宿毛市付近にかけての帯は、東西に伸びる低地帯となっており、古くから「中

筋地溝帯」と呼称されてきた(鈴木, 1938; 小林, 1950)。白亜紀～第三紀の付加体である四万十帯は、四国地域では白亜系の北帯と古第三系の南帯に区分されるが、この低地帯は北帯と南帯との境界部に相当しており「中筋構造帯」とも呼ばれてきた(甲藤, 1977)。近年、この一帯の地質構造について再検討した鹿納ほか(2003)は、この低地帯が基盤構造に支配された構造地形ではあり得ないことを指摘し、「中筋低地帯」という表現を用いている。佐田石灰岩は、この中筋低地帯の北側境界部に位置しており、四万十帯北帯の南縁部を構成する中村層に含まれる(図1)。以下、中筋低地帯付近の地質概説を鹿納ほか(2003)に従って述べる。

中筋低地帯付近には、東北東-西南西の一般走向をもつ、タービダイト相・メランジェ相・斜面海盆相からなる地質体が帯状に分布する。低地帯北側には、四万十帯北帯の白亜系大正層群中村層(タービダイト相)および具同ユニット(メランジェ相)が、低地帯内部には、最上部白亜系～始新統戸内層群(斜面海盆相)が、低地帯南側には、四万十帯南帯の古第三系幡多層群龍ヶ迫層(タービダイト相)および弘見複合層(メランジェ相とタービダイト相の混在)が、それぞれ分布する。佐田石灰岩が属する中村層は、一般に北側上位の泥岩優勢のタービダイト(鹿納ほか, 2003)、あるいは黒色頁岩(田代, 1980)からなる。

佐田石灰岩の地質年代について、直接的な証拠はこれまでほとんど提示されていない。甲藤(1952)は、佐田石灰岩から産出する化石として、三疊紀の二枚貝 *Schafhaeutlia* をリストに記したが、記載・図示がなされて

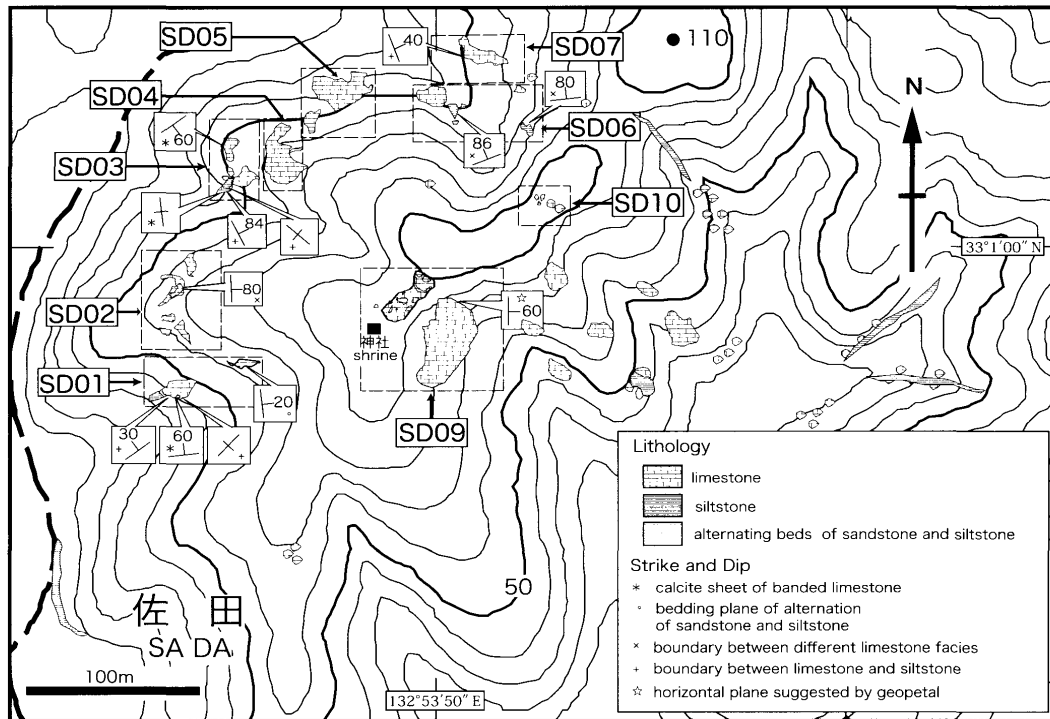


図2. 露頭分布図. SD01～SD10は産地番号を指す. 等高線は国土地理院発行1:25,000地形図「蕨岡」に基づく.

Fig. 2. Locality map. Numbers prefixed by "SD" show locality numbers. Contour lines are traced from the topographic map of "Warabioka", scale 1:25,000, published by Geographical Survey of Japan.

おらず、今回の調査では発見できなかった。一方、佐田石灰岩周辺の碎屑岩の年代については、平ほか（1980）が、佐田石灰岩体周辺の頁岩からカンパニアン期～マストリヒシアン期を示す放散虫化石を得たと報告している。ただし、放散虫化石のリストは示されていない。また、小柳津・君波（2000）は、佐田地区の東に隣接する地域の地質を調査し、放散虫化石年代を報告した。佐田石灰岩周辺の中村層は、彼らの定義した<sup>わらひおが</sup>蕨岡層の Wa-2 部層にあたり、*Dictyomitra formosa*, *Dictyomitra koslovae* が産出することから、その年代はサントニアン期～前期カンパニアン期とされている。後述するように、今回調査した佐田石灰岩は周囲のシルト岩と漸移的な境界部で接しており、自生的な岩体と考えられるので、これらの放散虫年代をもとにすれば、その形成年代は白亜紀後期と推定できる。

なお、中村層に相当する Wa-2 部層の堆積環境に関して、小柳津ほか（2002）は、巨礫を含む礫岩や粗粒な炭質物を大量に含む砂岩を伴うこと、石灰質ノジュールが普遍的に認められることなど、周囲の付加体の岩相とは異なる点を指摘し、本層が前弧海盆堆積物もしくは陸棚斜面堆積物である可能性を示した。

## 佐田石灰岩の規模・岩相・化石群集

### 分布・規模

佐田石灰岩周辺の露頭分布を図2に示す。石灰岩は、

谷壁および尾根筋の10地点以上において断続的に露出する。それらの露頭の分布する範囲は、高度にして約30m以上、水平方向には北西—南東方向に約250m、北東—南西方向に約400mに及ぶ。これらの石灰岩露頭の間にはシルト岩や砂岩泥岩細互層も露出しており、石灰岩体とシルト岩とが接している様子が認められる。このことから、佐田石灰岩は単一の巨大な石灰岩体ではなく、シルト岩等の碎屑岩を挟在する複数の石灰岩体の集合体と考えられる。

石灰岩中のジオペタル（合弁二枚貝や棲管中に認められる半充填構造）、縞状に発達する方解石のシート状細脈、石灰岩と泥岩との境界面、砂岩シルト岩細互層について、それぞれの走向・傾斜を図2に示す。走向・傾斜は測定対象とした構造にかかわらず露頭ごとにほぼ同じであるが、露頭間では大きく異なる。Loc. SD01, SD06においては、ほぼ東西走向、北へ急傾斜をなす。これらの走向・傾斜は、甲藤ほか（1960）、寺岡・栗本（1989）、鹿野ほか（2003）によって示された四万十帯北帯南縁部の一般的な地質構造と調和的である。一方、loc. SD03の北部においては、北東—南西方向の走向で、南に約40°の傾斜、loc. SD03の南部では、南北方向の走向でほぼ垂直な傾斜をもつ。これらの異なる走向・傾斜を示す露頭は、互いに近接している。このことから、調査域一帯の中村層は、断層によってブロック化し傾動したと考えられる。

## 岩相・化石群集

佐田石灰岩の代表的な露頭および岩相を図 3, 4 に示す。石灰岩と塊状シルト岩とは、不規則な境界面をもって接する (図 3f)。また、境界付近には石灰質シルト岩が部分的に認められ、そこでは石灰岩とシルト岩との境界は不明瞭で、両者の岩相変化は漸移的となる。このような石灰岩に隣接する石灰質シルト岩は、しばしば石灰質ノジュールを多産する。このことから、石灰岩体は異地性岩体ではなく、シルトの堆積する海底斜面でほぼ原地的に形成されたと考えられる。

佐田石灰岩は、1) 灰白色部と灰黒色部とが縞模様をなす縞状石灰岩、2) 大型の二枚貝化石やチューブ状化石が密集する“*Thyasira*”-“*Serpula*”石灰岩、3) 塊状貧化石石灰岩の三つの岩相を示し、その周囲に4) 石灰質ノジュールを多産する石灰質シルト岩を伴う。各岩相の詳細については後述する。これらは、一つの露頭内で層厚 1 m 弱~5 m ほどの間隔で互いに層相変化する (図 4a)。露頭ごとに優勢な岩相は異なり、loc. SD01 や loc. SD07 では縞状石灰岩が、loc. SD02 では“*Thyasira*”-“*Serpula*”石灰岩が、loc. SD05 では塊状貧化石石灰岩が目立つ。比較的小規模な露頭が断続的に分布することや、露頭ごとに走向・傾斜が異なることから、露頭間の層相の対比は困難である。また、ジオペタル構造を認定できた地点数も現段階では少なく、岩相変化の累重パターンについても明らかではない。そこで、今回はそれぞれの岩相と化石群集の概略を報告するにとどめる。

### 1. 縞状石灰岩

泥質ミクライトと方解石結晶からなるシート状細脈 (以下、方解石シートと略記する) が、互いに厚さ 1 cm 弱~数 cm おきに平行に発達し、縞模様を呈する石灰岩である (図 3a, 3b, 4a)。露頭においては、泥質ミクライトは灰白色、方解石シートは灰黒色を呈する。シートの走向・傾斜は、石灰岩中に認められるジオペタルや、隣接する泥質岩の示す走向・傾斜とほぼ調和的である (図 2, 図 4)。縞状石灰岩の層厚は、地点により様々であり、loc. SD03 においては 50 cm 程度であるが、loc. SD01 においては層厚 2 m 以上に達し、水平方向にも 5 m 以上追跡できる。

縞状構造には、平行ラミナ状に整然と発達するもの (図 3a, 4a) もあれば、泥質ミクライトの基質に方解石のシートが様々な厚さで不規則に入るもの (図 3b) もある。縞状石灰岩の前者のタイプには大型化石がほとんど認められないが、後者の層厚 10 cm 以上になる泥質ミクライトには、合弁の二枚貝化石がまれに含まれる。また、後者の場合、方解石のシートは、側方に厚さを変化させ、不規則に曲がり、上下のシートと連なってしばしば網目状になる (図 3b)。

研磨断面では、泥質ミクライトは、黒色部と淡い褐色部とからなり不均質である (図 5a-c)。それらは数 cm ~ 約 10 cm おきに互層するが、流動構造を示しながら礫状に破碎され、混ざりあうことも多い (図 5a, c)。また、

ときに泥質ミクライトの角礫~円礫が密集する層も挟在する (図 5b)。

一方、方解石シートは、研磨断面では白色~灰白色を呈し、ブロック状あるいは繊維状の結晶で構成される。繊維状の結晶は、再結晶を受けて部分的にしか残っていないが、シートの縁を取り巻くように等層厚状に積み重なりながら、シート内部に向けて成長する (図 5c)。このことから、方解石シートは、シート状の空洞を方解石の結晶が充填して形成されたと考えられる。

シート状の空洞を画する上側の境界面は平坦で、下側の境界面は不規則に波打つ外観を呈することがある。例えば、loc. SD03 の上部露頭においては、“*Thyasira*”合弁殻内の半充填構造 (ジオペタル) から、この岩体が逆転していないことが確認できる (図 4b)、その約 1 m 下位に発達する縞状構造には、上面が平坦で下面が波打つ方解石シートが認められる (図 4c)。このような形状の炭酸塩シートは、転石や露頭表面においてもしばしば観察される (図 3b)。このように、上側境界面がなめらかで、下側境界面が凸または不規則な形状をもつ空洞構造は、逆ストロマタクティス様構造 (inverted stromatactoid cavity) と呼ばれる (Peckmann *et al.*, 2002)。

図 3b に示したような、不規則に曲がり、また枝分かれして層理面に垂直な方向に伸びるシートは、荷重による脱水構造にも似る。しかしながら、逆ストロマタクティス様構造を示すことや、研磨断面において観察されるシート内部に泥質ミクライトが礫状に取り込まれていること (図 5a, c) は、脱水作用による延性的な変形だけでは説明できない。

鏡下では、シート状空洞の形成・充填の履歴が観察できる。図 6a においては、空洞の境界面が基質中の二枚貝殻を切断・溶食している (黒矢印)。このことから、空洞の形成には基質である泥質ミクライトの溶食が伴われたことがわかる。空洞は透明方解石のみで充填されることもあるが、下半部を泥によって充填されている場合もある (図 6a, b)。図 6b では、空洞下面の凹部が泥で埋積されており、とくに、白矢印で示した部分はやや粗粒な碎屑粒子が凹部を埋積して平坦面を形成している様子が認められる。一方、空洞の上面からは、繊維状の炭酸塩結晶が扇状に成長している様子が観察できる (図 6b の黒矢印)。

### 2. “*Thyasira*”-“*Serpula*”石灰岩

二枚貝“*Thyasira*”および管状化石“*Serpula*”が基質支持で密集する黒色泥質石灰岩である。“*Thyasira*”、“*Serpula*”の両者は相伴って産出するが、loc. SD02 においては、ほとんど管状化石“*Serpula*”のみが密集するのに対し (図 3c)、loc. SD04 では“*Thyasira*”が多く産する。化石群集の群集組成および分類学的知見については、次章で扱うこととし、ここでは産状と岩相について述べる。

“*Thyasira*”は、破片も混在するが一般に合弁個体が多い (図 4b)。とくに、locs. SD03, SD09 では、ジオペタル (合弁二枚貝の殻中の半充填構造) をもとに当時の海底面

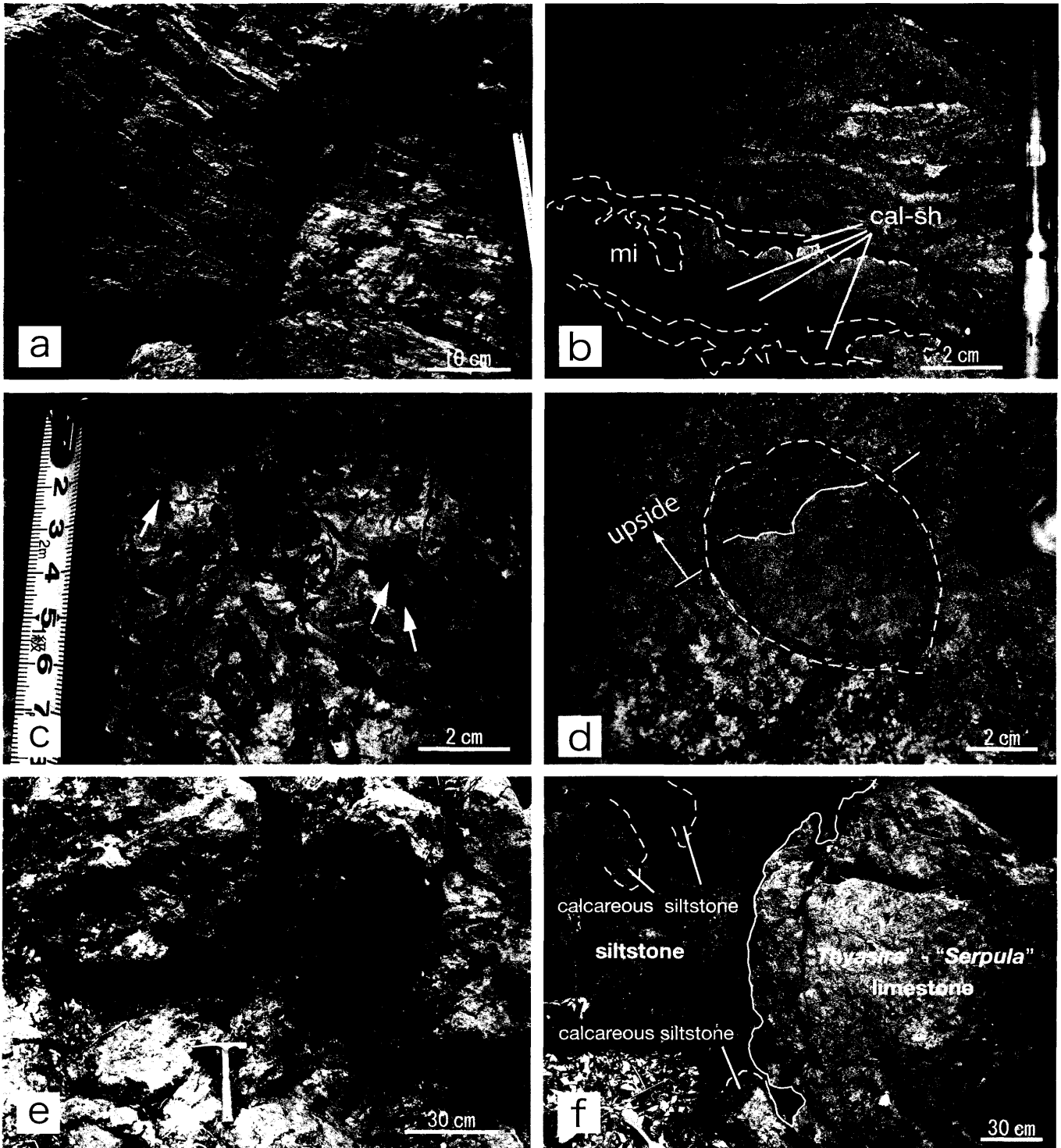


図3. 佐田石灰岩の岩相. a. 縞状石灰岩 (loc. SD01); b. 縞状石灰岩 (loc. SD04, 転石) 方解石シートは、逆ストロマタクティス様構造を示す(破線部). cal-sh (方解石シート), mi (ミクライト); c. “*Thyasira*”-“*Serpula*”石灰岩 (loc. SD02). 管状“*Serpula*”がコロニー状に密集する. 伸長方向の断面には管内に隔壁が認められる (矢印); d. “*Thyasira*”-“*Serpula*”石灰岩 (loc. SD09). 生息姿勢を保っている“*Thyasira*”の合弁個体 (白実線はジオペタル); e. 塊状貧化石石灰岩 (loc. SD05); f. “*Thyasira*”-“*Serpula*”石灰岩とシルト岩との不規則な境界面 (loc. SD03). シルト岩の一部は石灰質となり、境界の一部は不明瞭.

Fig. 3. Lithological features of the Sada Limestone. a. Banded limestone (loc. SD01); b. Banded limestone (loc. SD04, floatstone). Dashed lines show inverted stromatolite structure of calcite sheets (cal-sh). mi (micrite); c. “*Thyasira*”-“*Serpula*” limestone (loc. SD02). A colony-like concentration of “*Serpula*” tubes with recognizable septa (arrows); d. “*Thyasira*”-“*Serpula*” limestone (loc. SD09). A “*Thyasira*” conjoined valve in life position (encircled by dashed lines), showing geopetal (white solid line); e. Massive sparsely-fossiliferous limestone (loc. SD05); f. Irregular boundary between “*Thyasira*”-“*Serpula*” limestone and siltstone (loc. SD03). Dashed lines show calcareous siltstone, Note the gradational boundary between the calcareous siltstone and clue surrounding siltstone.

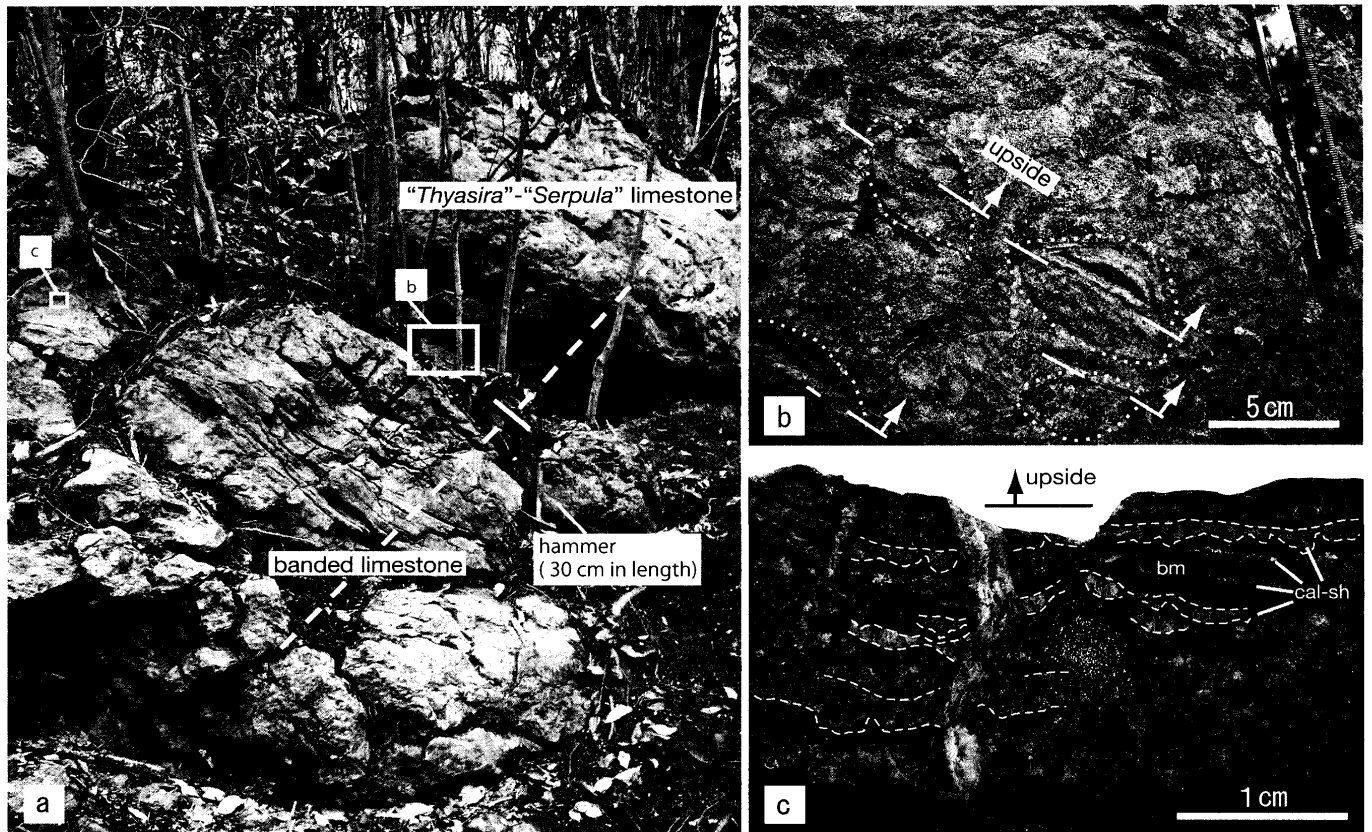


図 4. loc. SD03 における石灰岩体. a. 縞状石灰岩から“*Thyasira*”-“*Serpula*”石灰岩にかけての岩相変化; b. “*Thyasira*”-“*Serpula*”石灰岩. 合弁の“*Thyasira*” (点線) が密集する. 白矢印はジオペタル; c. 縞状石灰岩. bm (黒色泥質ミクライト), cal-sh (方解石シート). 方解石シートは逆ストロマタクティス様構造を示す (白波線部). 黒矢印は b で示したジオペタルの示す上位方向.

Fig. 4. A limestone block at loc. SD03. a. Lithological succession composed of banded limestone and “*Thyasira*”-“*Serpula*” limestone, in ascending order; b. “*Thyasira*”-“*Serpula*” limestone. Conjoined valves of “*Thyasira*” (encircled by dotted lines) are concentrated. Arrows show geopetal infilling of conjoined valves; c. Polished slab of banded limestone. bm (black detrital micrite), cal-sh (calcite sheet). Dashed lines show inverted stromatolite structure of calcite sheets. An arrow shows upside indicated by geopetal in Fig. 4b.

とその上下方向が推定できるが、生息姿勢を保った (殻頂を上にして埋没した) 個体が多く認められる (図 3d). また、管状化石 “*Serpula*” は一般に保存良好で、ほぼ同じ方向に伸張するチューブが密生する産状を示す (図 3c). これらのことから、この化石群集はほぼ原地性と考えられる.

基質の黒色石灰岩は、泥質ミクライトから構成される. 研磨断面では、黒色部と褐色部とからなり、一部でモザイク状に混じり合う. また、泥質ミクライトが礫状に集合している部分では、その間隙は白色スプライトで充填される (図 5d). スプライトは、管状化石や二枚貝の合弁個体の内部も充填しており、時にジオペタルをなす (図 5d). 鏡下の観察では、泥質ミクライト中に球状のペロイドがしばしば認められる (図 6d). このことから、このミクライトは、泥質堆積物が圧密作用を受けてペロイドが扁平になる前に、海底表層近くで固結して形成されたと考えられる.

### 3. 塊状質化石石灰岩

露頭においては、黒色～灰色で結晶質、塊状を呈する (図 3e). 泥質石灰岩を角礫状にとりこむこともある. 合弁の二枚貝が基質中に散在するが、その産出量は少ない. loc.

SD03 においては、層厚は 2 m 弱である. 鏡下の観察では、碎屑粒子は少なく、再結晶したスプライト同士が接している (図 6e, f). 炭酸塩岩が一様に再結晶して形成された岩相と考えられる.

### 4. ノジュールを多産する石灰質シルト岩

灰白色の石灰化したシルト岩が、上記の石灰岩相に近接して露出する. シルト岩中にはこぶし大の塊状ノジュールが多くふくまれ、そのノジュール中には黄白色の球顆が認められるがほとんどのものは溶脱している. 鏡下の観察では、シルト基質に大量の細粒砂が混入していることが認められる.

## 産出化石の分類

佐田石灰岩の化石群集は、大型の “*Thyasira*” 属二枚貝と管状化石 “*Serpula*” によって優占される. 本章では、それらの分類学的知見、随伴種について紹介する. 図 7 に主要な貝化石を示す.

佐田石灰岩から多産する大型二枚貝のほとんどは、

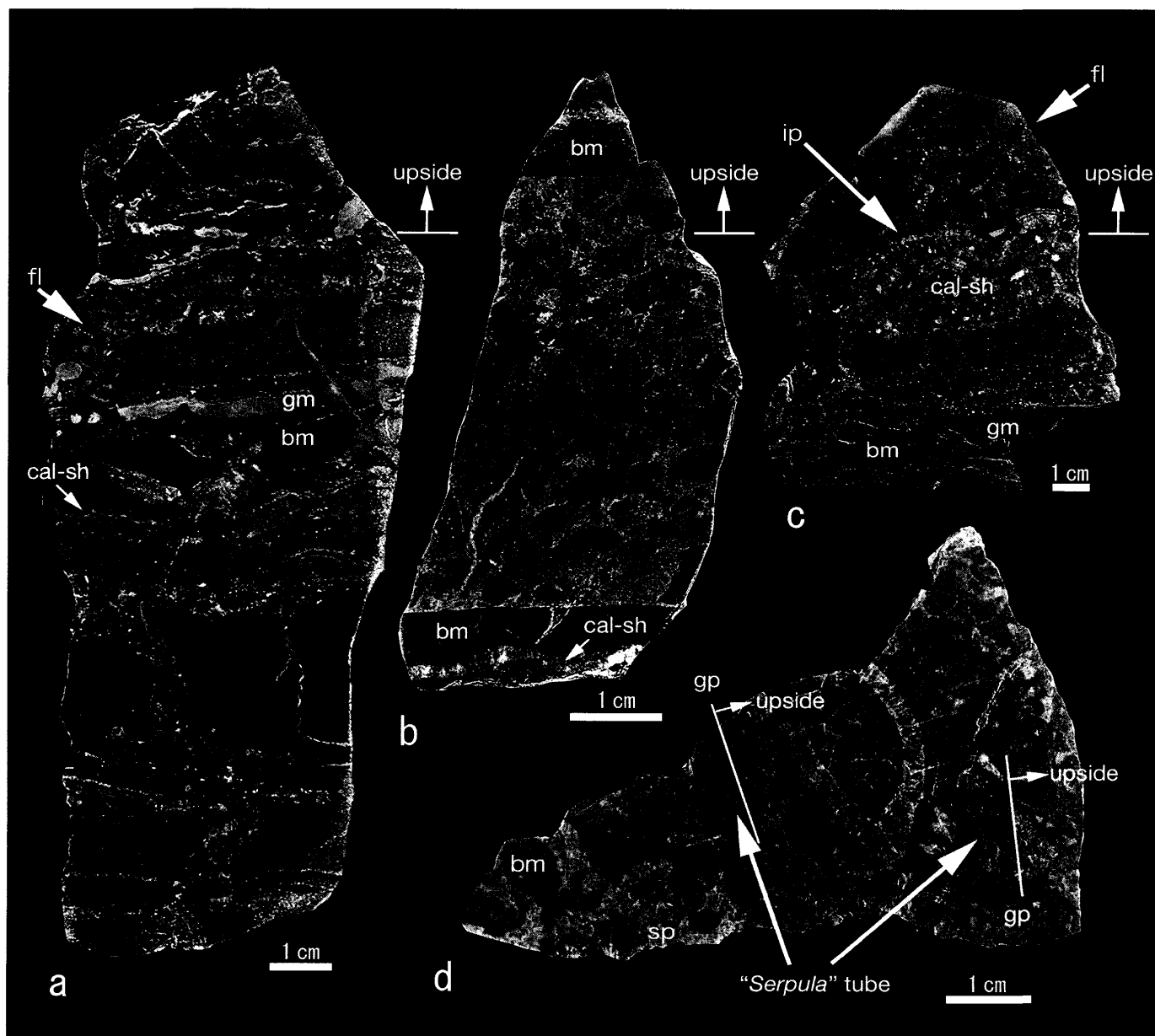


図5. 佐田石灰岩の研磨断面。a-c. 縞状石灰岩 (loc. SD01). 縞状構造に垂直な断面; d. “*Thyasira*”-“*Serpula*”石灰岩 (loc. SD09). bm (黒色泥質ミクライト), gm (褐色泥質ミクライト), cal-sh (方解石シート), sp (スパライト), fl (流動構造), ip (等層厚状セメント), gp (ジオペタル: 矢印は上方を指す)。

Fig. 5. Polished slab of the Sada Limestone. a-c. Banded limestone (loc. SD01). vertical section; d. “*Thyasira*”-“*Serpula*” limestone (loc. SD09). bm (black detrital micrite), gm (grey detrital micrite), cal-sh (calcite sheet), sp (sparite), fl (flow structure), ip (isopatcheous cement), gp (geopetal: white arrow shows upside).

Katto and Hattori (1964) によってマルスダレガイ科の新種として記載された *Aphrodina hataii* に相当する。本種は、後に田代 (1992) によってハナシガイ科の一属 *Thyasira* に属位を変更されたが、その根拠となる殻内面の形質等については示されていない。剖出作業の結果、歯部および前筋痕の形質が確認されたので、以下に述べる。

歯部形質は、咬合のややずれた合弁個体の左殻側で認められた (図7-6a)。厚い蝶板の中央、殻頂下に歯は存在せず、ハナシガイ科の形質に一致する。また、前閉殻筋痕

が確認されたのは、合弁の内形雌型標本の左殻側である (図7-4)。前閉殻筋痕は、ほとんどくぼまず外套線から離れない。そして、殻の前腹縁に沿って、後側に向かって膨れながら伸張し、「なす形」を呈する。腹縁に沿って伸張する前閉殻筋痕は、ハナシガイ科に特徴的な形質である。とくに、殻の前腹縁に沿って「なす形」に大きく膨れる形状は、現生のオウナガイ属 *Conchocele* のそれに一致する。これらのことから、少なくとも本種はハナシガイ科 *Thyasiridae* に属することは確実である。

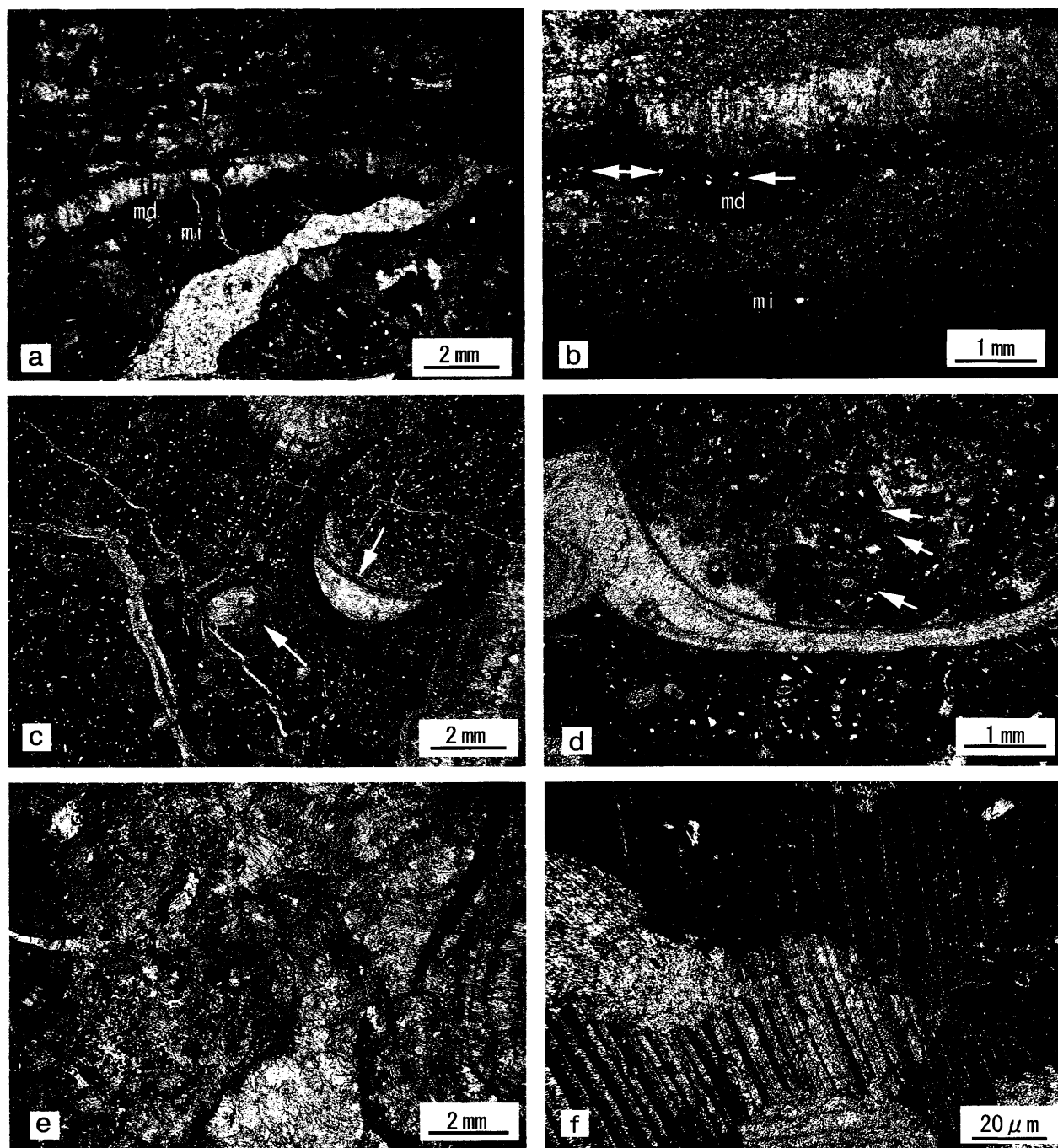


図 6. 佐田石灰岩の顕微鏡写真. a, b. 縞状石灰岩. fb (繊維状セメント), md (シート状空洞の下半部を充填する泥質堆積物), mi (泥質ミクライト); a. シート状空洞の下側境界は, 小さな貝殻を切断している (黒矢印). loc. SD07, 開放ニコル; b. 碎屑粒子がシート状空洞の凹部を充填し平坦面を形成する (白矢印). シート状空洞の上側の壁面から半ドーム状に成長する繊維状セメント (黒矢印). loc. SD01, 直交ニコル; c. “*Thyasira*”-“*Serpula*”石灰岩. 管状“*Serpula*”中に隔壁構造が認められる (白矢印). loc. SD03, 開放ニコル; d. “*Thyasira*”-“*Serpula*”石灰岩. 堆積物の圧密でつぶれていないペロイド (白矢印) を多く含む. loc. SD04, 開放ニコル; e, f. 塊状貧化石石灰岩, loc. SD03, e. 開放ニコル, f. 直交ニコル.

Fig. 6. Microphotographs of the Sada Limestone. a, b. banded limestone. fb (fibrous cement), md (mud infilling the lower half of sheet cavities), mi (detrital micrite); a. Lower boundary of a sheet cavity cutting a small shell (arrow). loc. SD07, one nicol; b. Upper flat surface of sediments infilling depressions in a sheet cavity (open arrows). Botryoidal calcite growth on the upside wall of a sheet cavity (solid arrows). loc. SD01, crossed nicols; c. “*Thyasira*”-“*Serpula*” limestone. Open arrows indicate septa recognizable in “*Serpula*” tubes. loc. SD03, open nicol; d. “*Thyasira*”-“*Serpula*” limestone, containing abundant non-compacted peloids (white arrows). loc. SD04, open nicol; e, f. Sparsely-fossiliferous massive limestone, loc. SD03, e. Open nicol, f. Crossed nicol.



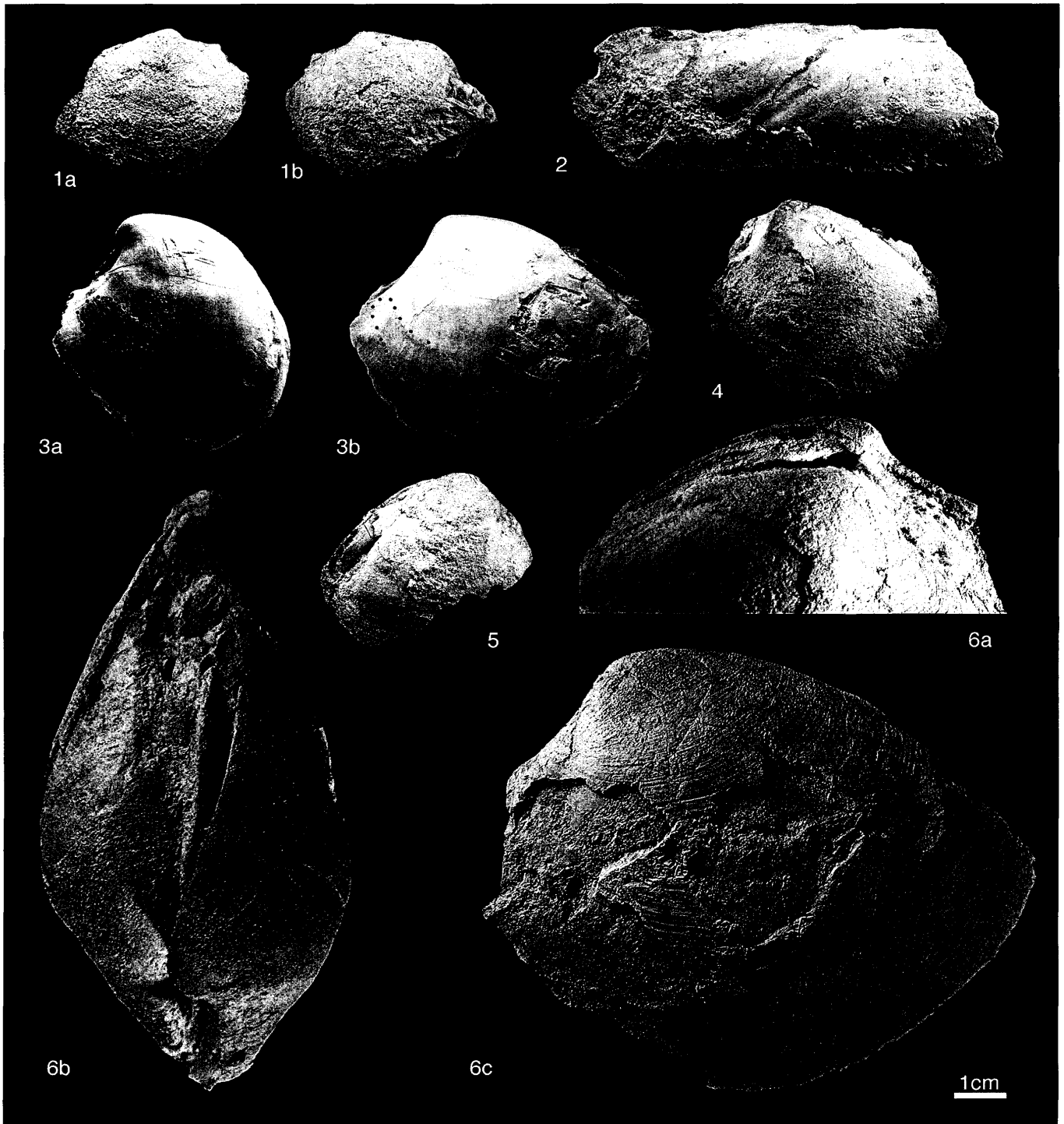


図7. 佐田石灰岩産二枚貝化石.

Fig. 7. Fossil bivalves from the Sada Limestone. 1a, b. *Myrtea?* sp., loc. SD04, UMUT CM29565, (a) right lateral view, (b) left lateral view; 2. *Solemya* sp., loc. SD06 (floatstone), right lateral view, missing anterior part, UMUT CM29566; 3, 4, 6. "*Thyasira*" *hataii* (Katto and Hattori). (3a, b) floatstone, inner mould, anterior adductor muscle scar encircled by dots, KSG6001, (a) seen from the diagonal between anterior and left lateral view, (b) left lateral view. (4) loc. SD04, left lateral view of inner mold, UMUT CM29567, (6a-c). loc. SD04, UMUT CM29569, (a) hinge of left valve, (b) dorsal view, (c) left lateral view; 5. "*Thyasira*" sp. 1. loc. SD04, right lateral view of inner mold, missing anterior part, UMUT CM29568. UMUT. University Museum, University of Tokyo. KSG. Department of Geology, Faculty of Science, Kochi University.

一方、殻の外形については、殻前部が突出し、殻後部には直線的な褶が殻頂から後腹隅にかけて認められる。殻の外表面には全体に細かな成長線のみが認められる。これらの形質は、ハナシガイ科の中でも *Thyasira* 属の特徴に一致する。しかし、本種は、これまでに記載された *Thyasira* 属の現生種や他の絶滅種に比べて極めて大型(殻長約 8 cm に達する)である。その殻サイズ、および上述した前閉殻筋痕の特徴は、*Conchocele* 属にむしろ一致する。ところが、*Conchocele* 属は殻前縁部が切断状である (Coan *et al.*, 2000) 点で、本種とは異なる。これらのことから、本種の属位については暫定的に“*Thyasira*”とした。

“*Thyasira*” *hataii* に随伴する二枚貝化石としては、中型で後背部の褶が 2 本認められる“*Thyasira*” sp. 1 (図 7, 5), キヌタレガイ科の *Solemya* sp. (図 7-2), ツキガイ科の *Myrtea?* sp. (図 7-1) が得られた。

管状化石は、直径約 0.5 ~ 1 cm, 長さは 10 cm 以上にもなり、ゆるやかにくねりながらもほぼ直線状に伸張する。伸張方向に切った断面においては、管内部に、下方に凸の形状をした隔壁が数 cm おきに形成されている様子が認められる (図 3c, 6c)。互いのチューブは、癒着したりからみあったりすることなく、ほぼ平行にコロニー状に密生する。その産状は、熱水噴出口や冷湧水口のチューブワームの群落に酷似する。しかしながら、上記のような管内の隔壁構造は、現生のチューブワームでは認められていない。佐田石灰岩のこの管状化石は、井上 (1902) 以来、環形動物門カンザシゴカイ科に属する *Serpula* として報告されてきた。管状多毛類 *serpuloids* は、現生・化石を問わず化学合成群集に伴って報告されている (例えば、Juniper and Sibuet, 1987; Ohta and Laubier, 1987; Godert and Squires, 1990; Beaushamp and Savard, 1992; Kauffman *et al.*, 1996; Bianchi and Morri, 2000 など)。しかしながら、佐田石灰岩の管状化石は、管が互いに独立して平行に伸張しており、その化石産状は、地物に付着し曲がりくねる一般的なカンザシゴカイ類の産状とは異なる。以上のことから、本論では便宜的に管状化石“*Serpula*”と記述した。

## 化学合成化石群集の認定に向けて

### 化石群集の分類構成と産状

佐田石灰岩の化石群集は、殻長 8 cm にもなる大型の二枚貝“*Thyasira*”および管状化石“*Serpula*”がコロニー状に密集すること、キヌタレガイ科の *Solemya* sp. やツキガイ科の *Myrtea?* sp. を随伴することで特徴づけられる。ハナシガイ科、ツキガイ科、キヌタレガイ科は、いずれも代表的な化学合成二枚貝である (Fisher, 1990)。一方、石灰岩体周囲の泥岩は、対照的に貝化石をほとんど産出しない。石灰岩体内の化石群集は、周囲の泥岩の生物相と比較して圧倒的に大きな生物量を有している。このような大型化石群集の産状および分類構成は、本群集が化学合成バ

クテリアとの共生にその有機物生産の基盤をおいていたことを示唆する。

ハナシガイ科二枚貝を主体としツキガイ科やキヌタレガイ科を随伴するという群集構成は、現生および化石のメタン湧水性群集において認められている。現生群集の例としては、北海の水深 150 m の *Thyasira* spp. 群集 (Dando *et al.*, 1991), オホーツク海の水深 300~804 m の *Conchocele bisecta* 群集 (Kuzunetsov *et al.*, 1989; Kamenev *et al.*, 2001; Sahling *et al.*, 2003), パプアニューギニア島シッサノ沖の水深 1000 m 付近の *Conchocele novaeguineensis* 群集 (Okutani, 2002), メキシコ湾の水深 513~754 m の *Thyasira oleophila* 群集 (Callender & Powell, 1992, 1997, 2000), ローレンス海底扇状地の水深 3800~3900 m の *Thyasira insignis* 群集 (Mayer *et al.*, 1988), 日本海溝の水深 7326~7434 m の *Maorithyas hadalis* 群集、および水深 5343~6390 m の *Parathyasira kaireiae* 群集 (Fujikura *et al.*, 1999, Okutani *et al.*, 1999, 藤倉 ほか, 2000; Fujikura *et al.*, 2002) が挙げられる。

また化石群集については、*Thyasira* もしくは *Conchocele* が優占種あるいは多産種として密集し石灰岩体を形成する例として、北米西岸の始新統 Humptulips 層 (Goedert and Squires, 1990) および最上部始新統—漸新統 Lincoln Creek 層 (Peckmann *et al.*, 2002), 北海道の始新統大曲層 (Majima *et al.*, 2005) および幌内層 (Kanno, 1967; Amano and Jenkins, 2007), 山形県の上部中新統本郷層 (長澤・小山田, 1996), 長野県の下部鮮新統<sup>おおまがり</sup>狭久保層 (天野・唐沢, 1993; 長森, 1998), 房総半島の下部更新統柿ノ木台層 (柴崎・間嶋, 1997), 稚内沖の完新統 (間嶋 ほか, 2000) が挙げられる。本邦では、これらのうち狭久保層、柿木台層、稚内沖産の石灰岩体が炭素同位体比のデータの裏づけを得て、冷湧水性の化学合成化石群集として認定されている (Majima *et al.*, 2005)。

ただし、Majima *et al.* (2005) が指摘するように、ツキガイ科、ハナシガイ科、キヌタレガイ科は、メタン湧水がなくとも、貧酸素水塊や有機物負荷量の高い影響で生ずる還元的な海底環境にも生息しうる化学合成二枚貝である。そのため、佐田石灰岩産の“*Thyasira*”-“*Serpula*”群集がメタン湧水に依拠していたかどうかについて、別の観点から検討する。

### 岩石学的特徴と堆積構造

佐田石灰岩の岩石学的特徴や堆積構造は、これまで報告されてきた冷湧水性石灰岩体のものと共通している。“*Thyasira*”-“*Serpula*”群集を産する泥質ミクライトは、間隙率が高い部分と低い部分とがモザイク状に混合していること、一部が角礫化していること、そして堆積物の圧密による変形を受けていないペロイドを多数含んでいることで特徴づけられる。これらの特徴は、世界各地で記載されている冷湧水性石灰岩体の拡散的湧水モード (diffusive phase; Campbell *et al.*, 2002) のものと一致する。

また、佐田石灰岩を構成する縞状石灰岩中に認められる逆ストロマタクティス様構造は、冷湧水性石灰岩で特徴的に認められている構造である (Peckmann *et al.*, 2002; Peckmann and Thiel, 2004). ストロマタクティスとは、泥質石灰岩のマウンドにしばしば認められるシート状の空洞構造で、下面が平坦で、上面が不規則あるいは上に凸状のものをいう (Dupont, 1881). 逆ストロマタクティス様構造は、これと上下が反対で、上面が平坦、下面が不規則あるいは下に凸なものをいう (Peckmann *et al.*, 2002).

ストロマタクティスの成因については、生物起源 (バクテリアマットによる microbairite や生物攪拌)、石灰泥の脱水、海底面に発達した局所的なセメント下に生じた空隙など、様々な見解が示されている (Bathurst, 1982; Monty, 1995). 一方、逆ストロマタクティス様構造については、湧水性炭酸塩岩が海底表層下において形成される初期に生じた空隙・空隙に由来すると解釈されている (Peckmann *et al.*, 2002).

Peckmann *et al.* (2002) は、北米西岸の始新統-漸新統 Lincoln Creek 層中の冷湧水性石灰岩体中の逆ストロマタクティス様構造の形成過程を以下のように説明した。メタン湧水場の表層堆積物中では、硫酸還元バクテリアとメタン酸化アーケアとの共同体 (consortium) による嫌氣的メタン酸化 (AOM: Anaerobic Oxidation of Methane) が行われ、これによってアルカリ度が上昇し炭酸塩が析出する。この場合、炭酸塩岩はメタンの供給源の方向、つまり堆積物の深部に向かって順次成長する (Greinert *et al.*, 2002). 石灰化が断続的に下方に向けて進行する場合、石灰化により形成された泥質ミクライトの下側境界、は下位の未固結部との間に明瞭な境界面を形成する。一方、上面側の固結度はまちまちで未固結部との間の境界は不規則かつあいまいとなる。この断続的に発達したシート状の泥質ミクライトに挟まれた未固結部が、メタンガスの放出等によって選択的に溶脱・侵食されると、空隙上面が平らな逆ストロマタクティス様の空洞が形成される。この空隙が、繊維状あるいはブロック状の透明方解石で充填されると逆ストロマタクティス様構造をもつ透明方解石のシートの完成となる。

佐田石灰岩の特徴は、そのような方解石シートが平行ラミナ状に発達することである。現世あるいは地質時代の冷湧水性石灰岩に認められるラミナ状の縞状構造は、これまで主にバクテリアマットによるものとして報告されてきた (Teichert *et al.*, 2005; Conti and Fontana, 2005). しかし、佐田石灰岩の縞状構造は、鏡下の観察から空洞形成とその充填によるものであることがわかる。そのような空洞が水平方向に連続性よく、層厚 1 m 以上にわたって発達する様子は、ゼブラ石灰岩 (Monty, 1995) に酷似する。ゼブラ石灰岩は、主に古生代の泥質炭酸塩マウンドから数多く報告されているが (Krause *et al.*, 2004), メタン湧水性石灰岩からも報告されている (例えば、モロッ

コのシルル系 El Borj Body: Barbieri *et al.*, 2004).

ゼブラ石灰岩の成因については、ゲル状炭酸塩のシキソトロピックな崩壊 (Heckel, 1972)、皮革状固結部に挟まれ未固結泥が洗い出されたもの (Bathurst, 1980)、バクテリアマット由来 (Pratt, 1982) など、諸説あるが見解の一致をみていない (Flügel, 2004). Krause (2001) は、北米ネバダ州に分布するオルドビス系 Meiklejohn Peak 泥質石灰岩マウンドに認められるゼブラ構造およびストロマタクティス様構造を調査し、それらがガスハイドレート形成・溶融にともなう堆積同時性クリオターベーションに由来すると論じた。クリオターベーションとは、凍結・融解に伴って細粒物質を含む表層堆積物が周囲の未凍結部分を含めて上下や横方向に変位し、複雑に変形する作用のことをいう。Krause (2001) によれば、ゼブラ様縞状構造は含水細粒堆積物の凍結実験 (Taber, 1929) で形成される segregation ice sheet に似ており、またメタンハイドレートを含む海洋底のコア試料にも類似の構造が見つかる (Malone, 1990; Beauchamp, 2004).

佐田石灰岩のゼブラ状構造が、上で述べたいずれの成因によるものなのかについては、未だ明らかではない。ただし、縞状空洞に逆ストロマタクティス様構造が認められることや、しばしば脆性破壊をうけた基質ミクライトがともなわれることから、このゼブラ状構造の形成は、バクテリアマットによる連続的な膠着ではなく、むしろ堆積物表層下における初期続成作用が関連していることが示唆される。

#### 今後の課題と研究意義

以上のように、今回報告した佐田石灰岩の岩相および化石群集は、メタン湧水性石灰岩としてこれまで認定されてきた石灰岩のそれらと共通の特徴を有しているといえる。しかしながら、佐田石灰岩の化石群集がメタン湧水に起因するものであるかどうかについては、炭酸塩岩の炭素・酸素安定同位体比やバイオマーカーなど多面的な検討を今後行う必要がある。

佐田石灰岩が堆積した白亜紀は、化学合成群集を構成する主要な大型無脊椎動物が腕足類から二枚貝類へと転換し (Campbell and Bottjer, 1995)、ツキガイ科やハナシガイ科など、現在につながる化学合成二枚貝が放散した時代である (MacAlester, 1966; Little and Vrijenhoek, 2003; 延原, 2003). 佐田石灰岩で見られるようなきわめて大型のハナシガイ科二枚貝を主体とする化石群集は、本邦の白亜系のメタン湧水性石灰岩からは未だ報告されていない。一方、大型のハナシガイ類であるオウナガイ属 *Conchocele* は、新生代以降、日本各地のメタン湧水性石灰岩や還元的な泥底環境から数多く報告されている (Majima *et al.*, 2005). 佐田石灰岩の成因や堆積場を明らかにすることは、ハナシガイ科二枚貝の化学合成生態系への適応や大型化の過程を追跡する上で重要である。また、本邦白亜系の冷湧水性化石群集のほとんどの産地が、北海道に偏在してい

ることを考えると、佐田石灰岩中の化学合成化石群集は古生物地理学的にも重要な意味をもつといえる。

## まとめ

- (1) 高知県四万十市（旧中村市）の上部白亜系佐田石灰岩は、北西—南東方向に約 250 m、北東—南西方向に約 400 m の範囲に分布する、複数の石灰岩体の集合体である。石灰岩体と周囲のシルト岩は不規則な境界で接しており、しばしば漸移的であることから、佐田石灰岩は、周囲のシルト岩が堆積した海底で原地的に形成されたと考えられる。
- (2) 佐田石灰岩の岩相は、1) 泥質ミクライトと方解石シートとが厚さ 1 cm 弱～数 cm おきに平行に発達する縞状石灰岩、2) 泥質ミクライト中に大型化石が自生的に密集する“*Thyasira*”-“*Serpula*”石灰岩、3) 塊状貧化石石灰岩の 3 つから構成され、しばしばその周囲に石灰質シルト岩を伴う。
- (3) 縞状石灰岩の方解石シートは、シート状空洞が自形炭酸塩鉱物によって充填されたものに由来する。このシート状空洞は、しばしば上面が平らで、下面が不規則な形状をしており、いわゆる逆ストロマタクティス様構造が認められる。この構造は、冷湧水性石灰岩体に特徴的に認められている（Peckmann *et al.*, 2002; Peckmann and Thiel, 2004）。
- (4) 佐田石灰岩より多産する大型二枚貝は、Katto and Hattori (1964) によってマルスダレガイ科の新種 *Aphrodina hattai* として記載されたものであるが、歯部形質および前閉殻筋痕を確認した結果、本種はハナシガイ科に属することが明らかとなった。殻の前縁部が突出する点は、ハナシガイ科の *Thyasira* 属の特徴に合致するが、殻サイズが大型であることや筋肉痕の特徴については、*Cocnchocele* 属に合致する。このことから、本種の属位については、“*Thyasira*”とした。佐田石灰岩の貝化石群集は、“*Thyasira*” *hattai* によって優占され、“*Thyasira*” sp. 1, ツキガイ科 *Myrtea*? sp., キヌタレガイ科 *Solemya* sp. を伴う。
- (5) 佐田石灰岩は、ハナシガイ科、ツキガイ科、キヌタレガイ科など化学合成二枚貝からなる群集を自生的に産出すること、その生物量が周囲のシルト岩に対して巨大であること、また、冷湧水性石灰岩に特徴的に認められる逆ストロマタクティス様構造を示すことなどから、メタン湧水によって形成された可能性がある。しかしながら、炭素・酸素安定同位体比、バイオマーカー等によるさらなる検証が必要である。

## 謝辞

佐田地区住民の方々には、地区集会を通して調査許可をいただき便宜を図って頂きました。株式会社明治コンサ

ルタントの谷口正人氏・赤松 太氏には、地形測量に関してお世話になりました。粗稿英文に関しては、Andrezej Kaim 博士（Polish Academy of Science, Institute of Paleobiology）および Maurice E. Jenkins 氏に校閲頂きました。また、二名の査読者の方には、重要なコメントをいただき、本論の本質的な改訂に役立ちました。なお、本研究をすすめるにあたり、日本学術振興会平成 18 年度科学研究費補助金基盤（B）（課題番号 18340165：白亜紀以降に起きた化学合成群集の進化の解明—メタン湧水場の地下構造に照らして）を使用しました。記して感謝します。

## 文献

- Amano, K. and Jenkins, R. G., 2007. Eocene drill holes in cold-seep bivalves of Hokkaido, northern Japan. *Marine Ecology*, **28**, 108-114.
- 天野和孝・唐沢 茂, 1993. 長野県北部に分布する鮮新統荻久保層の貝化石群と古環境. 地学雑誌, **102**, 572-582.
- Barbieri, R., Ori, G. G. and Cavalazzi, B., 2004. A Silurian cold-seep ecosystem from the Middle Atlas, Morocco. *Palaios*, **19**, 527-542.
- Bathurst, R. G. C., 1980. Stromatactis-origin related to submarine-cemented crusts in Paleozoic mud mounds. *Geology*, **8**, 131-134.
- Bathurst, R. G. C., 1982. Genesis of stromatactis cavities between submarine crusts in Paleozoic carbonate mud buildups. *Journal of the Geological Society of London*, **139**, 165-181.
- Beauchamp, B., 2004. Natural gas hydrates: myths, facts and issues. *Comptes Rendus Geoscience*, **336**, 751-765.
- Beauchamp, B. and Savard, M., 1992. Cretaceous chemosynthetic carbonate mounds in the Canadian Arctic. *Palaios*, **7**, 434-450.
- Bianchi, C. N. and Morri, C., 2000. Serpuloidea (Annelida: Polychaeta) from Milos, an island in the Aegean Sea with submarine hydrothermalism. *Journal of the Marine Biological Association of the UK*, **80**, 259-269.
- Callender, W. R. and Powell, E. N., 1992. Taphonomic signature of petroleum seep assemblages on the Louisiana upper continental slope: Recognition of autochthonous shell beds in the fossil record. *Palaios*, **7**, 388-408.
- Callender, W. R. and Powell, E. N., 1997. Autochthonous death assemblages from chemoautotrophic communities at petroleum seeps: palaeoproduction, energy flow and implications for the fossil record. *Historical Biology*, **12**, 165-198.
- Callender, W. R. and Powell, E. N., 2000. Long-term history of chemoautotrophic clam-dominated faunas of petroleum seeps in the Northwestern Gulf of Mexico. *Facies*, **43**, 177-204.
- Campbell, K. A. and Bottjer, D. J., 1995. Brachiopods and chemosymbiotic bivalves in Phanerozoic hydrothermal vent and cold seep environments. *Geology*, **23**, 321-324.
- Campbell, K. A., Farner, J. D. and Marais, D. D., 2002. Ancient hydrocarbon seeps from the Mesozoic convergent margin of California: carbonate geochemistry, fluids and paleoenvironments. *Geofluids*, **2**, 63-94.
- Coan, E. V., Scott, P. V. and Bernard, F. R., 2000. *Bivalve Seashells of Western North America*. Santa Barbara Museum of Natural History Monographs, (2), viii + 764 p.
- Conti, S. and Fontana, D., 2005. Anatomy of seep-carbonates: Ancient examples from the Miocene of the northern Apennines (Italy). *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, **227**, 156-175.
- Dando, P. R., Austen, M. C., Burke, R. A., Kendall, M. A., Kennicutt II, M. C., Judd, A. C., Moore, D. C., O'Hara, S. C. M., Schmaljohann, R. and Southward, A. J., 1991. Ecology of

- a North Sea pockmark with an active methane seep. *Marine Ecology Progress Series*, **70**, 49-63.
- Dupont, E., 1881. Sur l'origine des calcaires Dévoniens en Belgique. *Bulletin de l'Académie Royal des Sciences Belgique, ser. 3*, **2**, 264-280.
- Fisher, C. R., 1990. Chemoautotrophic and methanotrophic symbioses in marine invertebrates. *Reviews In Aquatic Sciences*, **2**, 399-436.
- Flügel, E., 2004. *Microfacies of Carbonate Rocks. Analysis, Interpretation and Application*. 976p., Springer-Verlag, Berlin.
- Fujikura, K., Fujiwara, Y., Kojima, S. and Okutani, T., 2002. Micro-scale distribution of mollusks occurring in deep-sea chemosynthesis-based communities in the Japan Trench. *Venus (Journal of the Malacological Society of Japan)*, **60**, 225-236.
- 藤倉克則・Hunt, J.・小島茂明・藤原義弘・玉木賢策・牧陽之助・Lindsay, D.・能木裕一・小山純弘・佐々木智之・菅寿美・小寺透・奥谷喬司, 2000. 無人探査機「かいこう」によって日本海溝の超深海帯から見つかったハナシガイ類の集団. *JAMSTEC 深海研究*, (16), 41-47.
- Fujikura, K., Kojima, S., Tamaki, K., Maki, Y., Hunt, J. and Okutani, T., 1999. The deepest chemosynthesis-based community yet discovered from the hadal zone, 7426 m depth in the Japan Trench. *Marine Ecology Progress Series*, **190**, 17-26.
- Goedert, J. L. and Squires, R. L., 1990. Eocene deep-sea communities in localized limestones formed by subduction-related methane seeps, southwestern Washington. *Geology*, **18**, 1182-1185.
- Greinert, J., Bohrmann, G. and Elvert, M., 2002. Stromatolitic fabric of authigenic carbonate crusts: result of anaerobic methane oxidation at cold seeps in 4,850 m water depth. *International Journal of Earth Sciences*, **91**, 698-711.
- Heckel, P. H., 1972. Possible organic origin for stromatolites in calcareous mounds in the Tully limestone, Devonian of New York. *Journal of Sedimentary Petrology*, **42**, 7-18.
- 井上禎之助, 1902. 20 万分の1 地質図幅「宇和島」および同説明書. 85p., 地質調査所.
- Juniper, S. K. and Sibuet, M., 1987. Cold seep benthic communities in Japan subduction zones: Spatial organization, trophic strategies and evidence for temporal evolution. *Marine Ecology Progress Series*, **40**, 115-126.
- Kamenev, G. M., Nadochy, V. A. and Kuznetsov, A. P., 2001. *Conchocele bisecta* (Conrad, 1849) (Bivalvia: Thyasiridae) from cold-water methane-rich areas of the Sea of Okhotsk. *The Veliger*, **44**, 84-94.
- Kanno, S., 1967. Molluscan fauna from the Miocene formations in the Itsukaichi Basin, Tokyo Prefecture. *Professor Hidekata Shibata Memorial Volume*, 396-406.
- 鹿野晴尚・山本浩二・岡村 眞, 2003. 高知県西部中村市から宿毛市にかけて分布する最上部白亜系一始新統百笑層の層序と堆積場. 高知大学学術研究報告 (自然科学編), **52**, 1-24.
- 甲藤次郎, 1952. 四国外帯の時代未詳層群に関する研究 第1報 四国西南部の中筋地溝帯における新観察, 第2報 高知県高岡郡内における新観察. 高知大学研究報告, 自然科学, (2), 37-46.
- 甲藤次郎, 1977. 四万十帯あらかると～化石の墓場“古城山”と中筋構造帯～. 地質ニュース, (279), 30-39.
- Katto, J. and Hattori, M., 1964. Some Veneridae from the Shimantogawa Group in the Outer Zone of Shikoku, Japan. *Research Reports of the Kochi University, Natural Science I*, **13**, 7-10.
- 甲藤次郎・小島丈児・沢村竹雄・須鎗和巳, 1960. 20 万分の1 高知県地質産図. 高知県.
- 甲藤次郎・小島丈児・沢村竹雄・須鎗和巳, 1961. 20 万分の1 高知県地質産図説明書. 高知県.
- 甲藤次郎・田代正之, 1979. 四万十帯の軟体動物ファウナの再検討. 第3報. 高知県四万十帯(白亜系)の有岡層・中村層・須崎層の二枚貝化石. 高知大学学術研究報告, 自然科学, **28**, 49-58.
- Kauffman, E. G., Arthur, M. A., Howe, B. and Scholle, P. A., 1996. Widespread venting of methane-rich fluids in Late Cretaceous (Campanian) submarine springs (Tepee Buttes), Western Interior seaway, USA. *Geology*, **24**, 799-802.
- 小林貞一, 1950. 日本地方地質誌「四国地方」. 243 p., 朝倉書店, 東京.
- Krause, F. F., 2001. Genesis and geometry of the Meiklejohn Peak lime mud-mound, Bare Mountain Quadrangle, Nevada, USA: Ordovician limestone with submarine frost heave structures – a possible response to gas clathrate hydrate evolution. *Sedimentary Geology*, **145**, 189-213.
- Krause, F. F., Scotese, C. R., Nieto, C., Sayegh, S. G., Hopkins, J. C. and Meyer, R. O., 2004. Paleozoic stromatolites and zebra carbonate mud-mounds: Global abundance and paleogeographic distribution. *Geology*, **32**, 181-184.
- Kuznetsov, A. P., Rass, T. S. and Galkin, V., 1989. Benthic community of Paramushir gas hydrate source. *Zoologicheskii Zhurnal*, **58**, 5-14. (In Russian with English Abstract)
- Little, C. T. S. and Vrijenhoek, R. C., 2003. Are hydrothermal vent animals living fossils? *Trends in Ecology and Evolution*, **18**, 582-588.
- MacAlester, A. L., 1966. Evolutionary and systematic implications of a transitional Ordovician lucinoid bivalve. *Malacologia*, **3**, 433-439.
- 間嶋隆一・加藤和浩・和田秀樹・宮内敏哉, 2000. 稚内沖の化学合成群集. 月刊海洋, 号外 (20), 146-154.
- Majima, R., Nobuhara, T. and Kitazaki, T., 2005. Review of fossil chemosynthetic assemblages in Japan. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, **227**, 86-123.
- Malone, R. D., 1990. *Gas hydrates*. DOE/METC-90/0270 (DE90015321), United States Department of Energy, Morgantown Energy Technology Center, Morgantown, WV, 52p.
- Mayer, L. A., Shore, A. N., Clarke, J. H. and Piper, D. J. W., 1988. Dense biological communities at 3850 m on the Laurentian Fan and their relationship to the deposits of the 1929 Grand Banks earthquake. *Deep-Sea Research I*, **35**, 1235-1246.
- Monty, C. L. V., 1995. The rise and nature of carbonate mud mounds: an introductory actualistic approach. In Monty, C. L. V., Bosence, D. W. J., Bridges, P. H. and Pratt, B. R., eds., *Carbonate Mud Mounds: Their Origin and Evolution*. Special Publication of the International Association of Sedimentologists, (23), 11-48.
- 長森英明, 1998. 長野県北信地域に分布する鮮新統の軟体動物化石群集と古環境. 地球科学, **52**, 5-25.
- 長澤一雄・小山田正幸, 1996. 山形県大江町の上部中新統本郷層産のオウナガイ化石とその変異. 山形県立博物館研究報告, (18), 21-32.
- 延原尊美, 2003. 日本列島の新生代化学合成化石群集の研究意義 —沖合・深海動物相の進化の観点から—. 月刊地球, **35**, 355-359.
- Ohta, S. and Laubier, L., 1987. Deep biological communities in the subduction zone of Japan from bottom photographs taken during “Nautile” dives in the Kaiko project. *Earth and Planetary Science Letters*, **83**, 329-342.
- Okutani, T., 2002. A new thyasirid *Conchocele novaeguineensis* n. sp. from a thanatocoenosis associated with a possible cold seep activity off New Guinea. *Venus*, **61**, 141-145.
- Okutani, T., Fujikura, K., and Kojima, S., 1999. Two new hadal bivalves of the family Thyasiridae from the plate convergent area of the Japan Trench. *Venus (Japanese Journal of Malacology)*, **58**, 49-54.
- 小柳津 篤・君波和雄, 2000. 四国西部四万十帯における白亜紀後期から古第三紀初期にかけての後背地の変遷とその意義. 地質学雑誌, **110**, 403-416.
- 小柳津 篤・三浦健一郎・田中利治・林 久晃・君波和雄, 2002. 四国西部の四万十帯層群の地質と放散虫年代. 地質学雑誌, **108**, 701-720.
- Peckmann, J., Goedert, J. L., Thiel, V., Michaelis, W. and Reitner, J., 2002. A comprehensive approach to the study of methane-

- seep deposits from the Lincoln Creek Formation, western Washington State, USA. *Sedimentology*, **49**, 855-873.
- Peckmann, J. and Thiele, V., 2004. Carbon cycling at ancient methane-seeps. *Chemical Geology*, **205**, 443-467.
- Peckmann, J., Walliser, O. H., Riegel, W. and Reitner, J., 1999. Signatures of hydrocarbon venting in a Middle Devonian carbonate mound (Holland Mound) at the Hamar Laghdad (AntiAtlas, Morocco). *Facies*, **40**, 281-296.
- Pratt, B. R., 1982. Stromatolitic framework of carbonate mud-mounds. *Journal of Sedimentary Petrology*, **52**, 1203-1227.
- Sahling, H., Galkin, S. V., Salyuk, A., Greinert, J., Foerstel, H., Pipenburg, D. and Suess, E., 2003. Depth-related structure and ecological significance of cold-seep communities- a case study from the Sea of Okhotsk. *Deep-Sea Research I*, **50**, 1391-1409.
- 柴崎琢自・間嶋隆一, 1997. 中部更新統上総層群柿ノ木台層外側陸棚相の化学合成化石群集. 地質学雑誌, **103**, 1065-1080.
- 鈴木達夫, 1938. 7万5千分の1宿毛図幅地質図および同地質説明書. 31+7 p., 地質調査所.
- Southward, E. C., 1986. Gill symbionts in thyasirids and other bivalve mollusks. *Journal of the Marine Biological Association of the United Kingdom, N. S.*, **66**, 899-914.
- Taber, S., 1929. Frost heaving. *Journal of Geology*, **37**, 429-461.
- 平 朝彦・田代正之・岡村 眞・甲藤次郎, 1980. 高知県四万十帯の地質とその起源. 平 朝彦・田代正之編, 四万十帯の地質学と古生物学—甲藤次郎教授還暦記念論文集—, 319-389. 林野弘済会高知支部, 高知.
- 田代正之, 1980. 高知県の四万十帯の二枚貝化石とその生層位—特に白亜系・古第三系を中心に—. 平 朝彦・田代正之編, 四万十帯の地質学と古生物学—甲藤次郎教授還暦記念論文集—, 249-264. 林野弘済会高知支部, 高知.
- 田代正之, 1991. 2. 8. (2) 1. 四国西部の四万十帯北帯. 須鎗和巳・岩崎正夫・鈴木堯司(編)日本の地質8 四国地方, 100-104. 共立出版株式会社, 東京.
- 田代正之, 1992. 「化石図鑑」日本の中生代白亜紀二枚貝. 307p., 自費出版(城野印刷), 熊本県.
- Teichert, B. M. A., Bohrmann, G. and Suess, E., 2005. Chemoherms on Hydrate Ridge - Unique microbially-mediated carbonate build-ups growing into water column. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, **227**, 67-85.
- 寺岡易司・栗本史雄(編), 1989. 1:200,000地質図「宇和島」. 地質調査所.
- Tsunogai, U., Yoshida, N. and Gamo, T., 2002. Carbon isotopic evidence of methane oxidation through sulfate reduction in sediment beneath cold seep vents on the seafloor at Nankai Trough. *Marine Geology*, **187**, 145-160.

