常磐堆積盆外側陸棚におけるメタン起源の炭酸塩コンクリーションと 化学合成群集:茨城県北部中新統高久層群九面層の例

上田庸平*・ジェンキンズ, ロバート G**・安藤寿男 ***・横山芳春 ****

*茨城大学大学院理工学研究科·**東京大学大学院理学系研究科·***茨城大学理学部地球生命環境科学科·****早稲 田大学大学院理工学研究科

Methane-induced calcareous concretions and chemosynthetic community on an outer shelf of the Joban forearc basin: an example from the Miocene Kokozura Formation, Takaku Group, north of Ibaraki Prefecture, central Japan

Yohei Ueda*, Robert G. Jenkins**, Hisao Ando*** and Yoshiharu Yokoyama****

*Graduate School of Science and Technology, Ibaraki University, Mito 310-8512, Japan; **Department of Earth and Planetary Science, Graduate School of Science, The University of Tokyo, Tokyo 113-0033, Japan; ***Department of Environmental Sciences, Faculty of Science, Ibaraki University, Mito 310-8512, Japan; and ****Graduate School of Science and Technology, Waseda University, Shinjuku 169-0051, Japan

Abstract. Various-sized and -shaped calcareous concretions occur abundantly in the Lower Miocene Kokozura Formation of the Takaku Group which crops out on the Izura coast and its nearby north, Kita-Ibaraki City, north of Ibaraki Prefecture. The Kokozura Formation is mainly composed of intensely bioturbated, very fine-grained muddy sandstone, which may have been deposited on the outer shelf of the Joban forearc basin. The calcareous concretions are divided into the following six types on the basis of their shapes, sizes and modes of occurrence: Type I (large-sized concretions with undulatory surface, 1 to 6 m in diameter), Type II (smaller, less than a few decimeters in diameter, and irregular-shaped concretions closely associated with Type I), Type III (pipe-shaped hollow concretions, a few decimeters in diameter and less than 2 m in length), Type IV (sheet to lenticular concretions, 10 to 20 cm in thickness and a few meters in lateral length), Type V (burrow-fill sand concretions concentrated and connected to each other in very fine-grained sandstone) which grades upward into Type VI (concreted sandstone bed, 2 to 3 m in thickness, including abundant burrows). In the lower part of the outcrop, the Types I and II are dominant and commonly associated with Type III, whereas the uppermost part consists of Types V and VI which developed into a huge concreted bed, 2 to 3 m thick, over 50 m wide and 100 m long. ¹³C-depleted carbon isotopic compositions (-20.9 to -29.2 % vs PDB) of Types I and II suggests that these concretions were formed under the influence of methane seepage. Molluscan assemblages dominated by Lucinoma acutilineatum are associated with the Type I, II, and III concretions. Most of *L. acutileatum* shells keep their life position. The mode of fossil occurrence indicates that L. acutileatum formed a chemosynthetic community and used methane seepage through chemosynthetic bacteria for their energy source.

Key words: calcareous concretion, methane cold-seep water, chemosynthetic community, Miocene, Kokozura Formation, Takaku Group, Kita-Ibaraki area

はじめに

日本周辺をはじめとする世界各地の海溝域周辺ではメ タン湧水域が多数存在することが知られている.このよう な湧水域周辺ではメタンや硫化水素に依存した化学合成 群集やメタン湧水に起因した自生炭酸塩岩が形成される ことが多い (Van Dover, 2000; Masuzawa *et al.*, 1992).そ して,メタンに起因して形成された炭酸塩岩は,その炭素 同位体比が著しく低くなることが知られている (Aharon, 2000). メタン湧水に伴う炭酸塩岩の形態は多様で,例え ば,沖縄県石垣島沖の黒島海丘では貝殻密集状,生痕状, パイプ状などの各種の形態を持つ炭酸塩岩がメタン湧水 周辺から採集されている(Takeuchi *et al.*, 2001). 黒海で も数タイプの形態の炭酸塩岩が採集され,それらの形態と 生成深度や酸化還元状態との関係が議論されている(Luth *et al.*, 1999).

茨城県北部の北茨城市五浦海岸周辺には,下部中新統上 部の高久層群九面層が,下位の下部中新統湯長谷層群亀尾



図1. 茨城県北部北茨城市五浦海岸の地質概略図 (A) および炭酸塩コンクリーション密集層の露頭 (B). □は茨城県天心記念美術館北側の 海岸における九面層-亀尾層の不整合露頭の位置.また、白抜き矢印は図2B,Cの写真撮影方向を示す.

層と上位の中部中新統多賀層群大津層との不整合関係で 挟まれて、南北東西いずれも1km以内の狭い範囲に分布 している(図1).九面層は主に塊状の泥質極細粒砂岩か らなり、海生軟体動物化石を散在的にもしくは一部密集し て産する(須貝ほか、1957;柳沢、1996).そして、茨城 大学五浦美術文化研究所六角堂の周囲の海岸と岩礁に分 布する九面層は、様々な形態・サイズの炭酸塩コンクリー ションを含むことが知られている(例えば、野田、1994, p.151, pl. 63).

著者らは、北茨城地域の堆積地質学研究(安藤,2002; 上田ほか,2003)の過程で、これらの炭酸塩コンクリー ションが、常磐地域の他の地層に含まれるコンクリーショ ンと比べて、形状が極めて変化に富みサイズが大きいこと から、これらが近年注目されているメタン冷湧水起源のコ ンクリーション(例えば、Peckmann et al.,2001など)で ある可能性を考えた.五浦海岸では波食台の岩礁と海食 崖に地層の新鮮な層理面や断面が広く露出するため、個々 のコンクリーション全体の形態および層準間におけるコ ンクリーションの形態の差異などを容易に把握すること ができる.この好条件を活かし、形態によるタイプ分け、 産状の観察、産出層準の特定、炭素・酸素安定同位体比 測定を行なった結果、これらのコンクリーションの形成が メタン冷湧水に起因していたことが示唆された.加えて, 共産する軟体動物化石群集の産状,多様性を観察し,それ らがメタン湧水に依存した化学合成群集であったかどう かの判定を行った.以上の結果をもとに,本調査地域にお ける炭酸塩コンクリーションおよび化学合成群集の形成 史について議論する.

地質概要:五浦海岸の高久層群九面層

調査対象とした五浦海岸は、茨城県北茨城市北部の大 津町東部にあり、花園・花貫県立自然公園の一部となって いる.高久層群九面層の模式地は福島県いわき市南端部 の勿来町九面付近 (Yabe, 1948) であるが、五浦海岸にも 分布しており (須貝ほか、1957)、確認できる限りで層厚 約40 mが露出する (図1A).常磐地域の第三系は一般に 南北走向で東緩傾斜を示すが、五浦海岸周辺では東西性 の一般走向を持ち、南緩傾斜南上位である.九面層は下 部中新統上部の湯長谷層群亀尾層を傾斜不整合で覆うが、 不整合面に起伏があるため、地質図上では九面層の分布域 中に亀尾層の小分布が見られる.また、2本の断層によっ て、下位の亀尾層が地塁状に高まりをなすブロックもあ る. 亀尾層と九面層との不整合は茨城県天心記念五浦美術



図2.五浦海岸九面層の地質柱状図(A)と露頭全景写真(B,C)およびスケッチ(D).上の写真(B)は海食崖から岩礁を望む.中央の写真(C)は岩礁側から見た海食崖下部.スケッチ(D)はCからトレースした.露頭全景写真(B,C)の撮影方向は図1中の白抜き矢印で示した.

館北側の海食崖でよく観察できる(図1Aの口地点).一 方,九面層分布域の南縁では九面層は上位の中部中新統の 多賀層群大津層に傾斜不整合で覆われる.ただし,六角堂 の南側の入り江南岸では,部分的ながら九面層と大津層の 間に楔状に挟まれている多賀層群平潟層が観察される(柳 沢,1996).なお,九面層分布域の西側では大津層が不整 合で亀尾層を覆う.九面層は,産出する珪藻化石群集が珪 藻化石帯 NPD3A に属することから,中期中新世(16.2-16.4 Ma)の堆積物と考えられている(柳沢,1996).

今回報告する九面層の露頭は、茨城大学五浦美術文化 研究所六角堂からその北側の小さな湾にかけてである(図 1B).ここでは、地層は北北東走向で東方に約15°傾斜し ており、海食崖から海岸の岩礁にかけて九面層の上部に 相当する層厚約20m前後が露出し、特にその上半部の10 m弱を観察することができる.九面層の岩相は主に激し い生物擾乱を受けた塊状の泥質極細粒砂岩よりなり、調 査露頭では下部に一枚、生物擾乱によって上下の境界が 不明瞭になった層厚約30cmのシルト岩層を確認した. *Mizuhopecten kimurai*, *Cyclocardia siogamaensis*, *Lucinoma acutilineatum*, *Clementia* sp. などの海生二枚貝化石が多数散 在する.貝殻破片も多く産出し、一部では密集して葉理 をなす.軽石の細礫が散在し、小規模なレンズ状(層厚数 cm,幅10cm程度)を示すことがある.炭質物片が多く含 まれ,特にフナクイムシに著しく穿孔された炭化木片(長 径50cm以下)も散在する.そして,多様なサイズ,形態 を示す炭酸塩コンクリーションが多く含まれる.海生軟体 動物化石がこれらコンクリーション内に含まれて産する ことも多い.これらの岩相や化石相,常磐地域の他層準に おける類似岩相での堆積環境復元(上田ほか,2003;上田・ 安藤,2003)を考慮すると,九面層は内側陸棚の砂質堆積 物と考えられる.

六角堂の北側約100mの海食崖沿いには炭酸塩コンク リーションおよび海生軟体動物化石が散在する泥質極細 粒砂岩層が見られる.その上位には細粒~中粒砂岩で構成 された層厚2~3mの炭酸塩コンクリーションが累重して おり(図2),六角堂対岸の岩礁に幅50m弱,長さ100m 弱にわたって波食台として露出する(図1Bの灰色部分).

炭酸塩コンクリーションの形態分類

五浦海岸に認められる炭酸塩コンクリーションについて、その岩相や形態および産状の特徴から次の I ~ VIの6 タイプに分類できる(図3).

タイプ		模式図	形態と産状	形成過程		
I	大型塊状不定形型		長径1~6m程度の塊状不定形で表面は 不規則な凹凸が著しい. 合弁,離弁,破片の二枚貝が散在も しくは一部やや密集.	メタン湧水の上昇とそれに伴う メタン酸化により,周囲の堆積物 が炭酸塩で膠結されて形成.堆積 物中の貝類も取り込まれる.		
п	小型不定形型	0 }	形態はタイプ I と類似して塊状不定 形だが長径は数10cm程度. タイプ I の周辺に散在するが, やや 密集することもある. 一部は単独で母岩中に点在. 貝化石は周囲に散在.	タイプ I と同様に湧水の上昇に よって周囲の堆積物が膠結され て形成するが、湧水の供給量や や滞留時間が少なく、タイプ I ほど大きくならない.		
Ш	パイプ型		直径20~30cm程度のパイプ状(最長 で2mを確認)を呈し,中央の空洞は 母岩の基質で充填. 露頭下部に散在. 貝殻片を含むことがある.	メタン湧水が巣穴痕などを選択的 に通過し空洞を形成。 湧水の継続的な通過によって空洞 が保持され、その周囲が膠結。		
IV	薄層型		層厚10~20cm, 水平方向へ数m連続す るレンズ~シート状細粒砂層が膠結. 露頭中部に数層準認められる. 貝化石は産しない.	上昇してきたメタン湧水が、シ ート状細粒砂層にトラップ滞留 されて炭酸塩が沈殿して形成.		
v	密集生痕膠結型	W BK	複雑な編み目状に密集した垂直性の 管状生痕化石を充填する形態を呈し, 厚さ数10cm~1m強の層状に発達. 生痕は上位の粗粒な中粒砂岩由来の 堆積物で充填され母岩より粗粒. 上方にタイプVIに漸移. 貝化石はまったく産しない.	密集した巣穴を充填埋積した母 岩より粗い細~中粒砂に浸透し たメタン湧水もしくは軽い炭素 同位体比を持つ無機炭素が溶存 した間隙水が海水と混合してし て形成.		
VI	密集生痕膠結	1444 fer	密集した垂直性のタイプVと同様の 管状生痕化石を含む 層厚2~3mの細 粒~中粒砂層が全体として層状に膠 結された形態を呈する. 貝化石はまったく産しない.	細粒~中粒砂層に浸透したメタ ン湧水もしくは軽い炭素同位体 比を持つ無機炭素が溶存した間 隙水が海水と混合して形成.		

図3.五浦海岸から産出する炭酸塩コンクリーションの形態分類.

タイプI(大型塊状不定形型)

長径1~6mの塊状不定形な炭酸塩コンクリーション (図4-1)で,泥質極細粒砂岩中に散在する.表面は凹凸 が激しく,形状の規則性を見出すのは難しい.コンクリー ション中には長さ数 cm から1mになる炭化木片がまれに 含まれ,それらにはフナクイムシの密集穿孔痕が認められ る.炭化木片は風化すると炭質部が取り去られ,穿孔痕を 充填膠結した炭酸塩質細粒砂岩部のみが残されていること が多い.また,合弁もしくは離弁の二枚貝化石を多く含み, 特に Lucinoma acutilineatum を合弁で産することが多い.

タイプⅡ(小型塊状不定形型)

直径数 10 cm 程度の塊状不定形なコンクリーション(図 4-2)で,泥質極細粒砂岩中に散在する.タイプ I とは サイズが小さいことで区別される.多くはタイプIの周辺 に散在もしくはいくらか密集する(図4-3)が,母岩中に 単独で存在することもある.また,二枚貝化石などを散在 的に含有することがある.

タイプⅢ(パイプ型)

直径 20~30cm 程度のパイプ状のコンクリーション(図 4-4,5)で,泥質極細粒砂岩中に散在する.周囲の母岩 と同じ泥質極細粒砂岩で構成され,貝殻破片や微小なパミ スを含有することがある.中央に直径5cm以内の空洞状 の母岩部が垂直方向に連続するが,途中で細くなったり, もしくは収束したりすることが多い.タイプIIIは両端が ともに露頭で露出することが稀なため,パイプの全長を把 握することは困難であるが,最長で2mに達するのを確認



図4. 炭酸塩コンクリーションの産状1 (露頭下部). 1:タイプIの炭酸塩コンクリーション. 2:タイ

1:タイプIの炭酸塩コンクリーション.2:タイプII.ここではタイプI(左上)の下位にやや密集している.上部 中央右寄りに軟体動物化石のパッチ状密集部が見られる.3:タイプIとその周囲のタイプIIの密集.露頭下部の代表 的産状.4:タイプII.円筒パイプ状を示し中央に空洞があるのが分かる.5:タイプII.中央右寄りに斜め上方へと 伸びた2本のタイプⅢが認められる.

した.縦横切断面を観察したところ,中央の空洞部に沿っ て管状生痕化石によく見られる内壁の裏打ちに類似した 累帯構造が見られた.

タイプⅣ(薄層型)

泥質極細粒砂岩中に分布する, 層厚約 数~20 cm で水

平方向に数 m 程度の広がりを持つレンズ状~シート状の コンクリーションである(図5-1,2).周囲よりやや粒 度が粗い細粒砂岩で構成されることで特徴付けられる.ま た,砂岩のチャネル状堆積構造を反映した下に凸の形態を 示す場合もある.



図5. 炭酸塩コンクリーションの産状2 (露頭中〜上部). 1:タイプN. 2枚あって上位のものは中央から右上にレンズ状断続的に伸びている.下位のものは中 央部で小規模なチャネル状の形態をなしている.右端はタイプI. 写真幅約4m. 2. 露頭中部の代表 的産状. 左側のように泥質極細粒砂岩層が卓越するが,部分的に中央右側のようにタイプI~Nが発達 する.3:タイプV. 泥質極細粒砂岩基質に網目状にコンクリーションが発達している.4:タイプV ~VI.下半部は直径5cmを越える垂直性管状生痕化石に沿ってタイプVをなし、上半部でタイプVIに変 化している.5:タイプVからVIへの漸移.6:タイプVI. 露頭上部では層状にタイプVIが発達し、上 面が岩礁面をなして広がり,向こう側は海中に没している.層厚約2m.

タイプⅤ(密集生痕膠結型)

本タイプは, 泥質極細粒砂岩中に密集する垂直性の管状 生痕(*Thalassinoides* isp., *Ophiomorpha* isp., *Cylindrichnus*? isp.)を充填した細粒~中粒砂岩が膠結されたコンクリー ションである(図5-3,4,5). 管状生痕の大半は直径が 3 cm 以下で長さは数 cm から数 10 cm に達し,分岐が頻 繁で複雑な網目状をなす部分が卓越し,それらが厚さ数 10 cm から1 m の範囲に層状に広く発達する. この層状に



図6.五浦海岸の九面層の層理面に垂直な断面における貝化石産状のスケッチ.場所は図2D参照.

発達するコンクリーションの上部は次に述べるタイプⅥ に漸移する.タイプⅢとは違い,生痕化石の周囲にはコン クリーションはほとんど発達しない.また,軟体動物化石 も認められない.

タイプⅥ(密集生痕膠結層状型)

タイプVと同様,垂直性の管状生痕化石密集部が発達 し,管状生痕の部分だけではなくその周囲の細粒~中粒 砂岩も全体として層状に石灰化している(図5-4,5,6). 厚さ1~3m程度で100m弱×50m弱の範囲に平板状の岩 礁として見られる.タイプVIの上限とその上位の母岩との 境界は露出がないため直接観察できないが,上面は不規則 で著しい凹凸の起伏をなしている.タイプVと同様に軟体 動物化石を見いだすことができなかった.

炭酸塩コンクリーションの分布

五浦海岸における九面層の層厚約10m弱の調査露頭で は、その下部、中部、上部で炭酸塩コンクリーションの各 タイプの分布様式が以下のように変化する(図2).

下部(タイプⅠ,Ⅱ多産層)

調査露頭下部の層厚約2~3mは、タイプIとその周 囲に密集するタイプIIが多く含まれ、局所的にタイプIIが まとまって産する.六角堂北側の海食崖の下部によく露出 するが下限は確認できない.六角堂北東側の岩礁との間の 潮間帯にも波食で取り残された直径2mを越える大型の タイプIが点在するのが確認でき、密集部とそうでない部 分がモザイク状に分布している.

中部(泥質極細粒砂岩卓越層)

中部の層厚約4mは、泥質極細粒砂岩が卓越し炭酸塩 コンクリーションは少ない.下部との境界は漸移的であ る.一部にタイプI~IVが散在する(図5-2).六角堂北 側の海食崖の中部から六角堂北東側の岩礁の下部に露出 する.

上部(タイプV, VI卓越層)

露頭上部の層厚約2~3mはタイプV,VIの炭酸塩コ ンクリーションが多産し、下位よりタイプV(層厚10 cm ~1m強)からタイプVI(層厚1~2m)へと漸移する. 六角堂北東側に走向方向(北東)に延びる岩礁をなして おり、波食によって上面がよく露出している.炭酸塩コ ンクリーションが少ない中部との境界は漸移的であるが 比較的明瞭である.地層が海側に傾斜するため上部境界は 海に没して直接観察できないが、岩礁上面として不規則で 著しい凹凸の起伏をなしている.六角堂北側の海食崖上 部にも上部層下部の一部が露出しタイプVが見られるが、 六角堂北東側岩礁のように厚くは発達しておらず、産状も 異なっている.断定はできないが、岩礁のコンクリーショ ンは独立した岩体をなしているように思う.

軟体動物化石群集とその産状

五浦海岸の九面層の調査露頭においては、露頭下部・中 部の泥質極細粒砂岩やタイプ I もしくはタイプ IIの炭酸塩 コンクリーションの内部、あるいはその周囲から海生軟体 動物化石を産出する.散在的に産することが多いが、一 部は密集したレンズやパッチ状の産状を示す.二枚貝化 石のうち、合弁個体は散在的な産状や不定形の密集パッチ をなすが、離弁個体や貝殻破片は層厚 10cm 程度以下で幅

表1. 五浦海岸の九面層産軟体動物化石.	図6	(縦約5×横約10m)	から産出したものについて、	総個体数,	離弁個体,	合弁個体,	合弁生息
姿勢保持個体に分けて計数した.							

種 名	総個体数	頻度	離弁個体	頻度	合弁個体	頻度	姿勢保持個体	頻度
Yoldia landabilis	5	5.2	1	2.6	4	9.1	0	0.0
Mizuhopecten kobiyami	3	3.1	3	7.7	0	0.0	0	0.0
Cyclocardia siogamaensis, C. sp	. 17	17.5	15	38.5	2	4.5	2	8.7
Lucinoma acutilineatum	44	45.4	16	41.0	28	63.6	19	82.6
<i>Clementia</i> sp.	10	10.3	3	7.7	7	15.9	1	4.3
<i>Macoma</i> sp.	4	4.1	1	2.6	3	6.8	1	4.3
Dentalium tokunagai	13	13.4						
Musashia densicostata	1	1.0						
総数	97	100%	39	100%	44	100%	23	100%

数10cm以下の小規模なレンズ状もしくはパッチ状の密集 部を形成することが多い(図6).後者の種組成について は破片が多いため種組成の判定は難しいが,後述する合弁 個体密集部の露頭面(図6)との違いは大きくないものの, 幾分 Lucinoma 以外の,特に Mizuhopecten や Cyclocardia が 多いように見える.離弁個体や貝殻破片が密集するレン ズやパッチは初生的にはストームなどの営力で運搬集積 したものであろうが,堆積後の生物擾乱によって堆積構造 は不明瞭になっている.また,大型の管状生痕を充填し た貝殻破片密集パッチも見られ,生痕の空洞にトラップさ れたものであろう.なお,露頭上部は軟体動物化石をまっ たく産しない.

化石とコンクリーションとの関係を調べるために, 露頭 下部の層理面に垂直な露頭面(縦5m横10m:図2Dの 枠内)のスケッチ(図6)をとり, 産状の観察, 産出個体 数の調査(表1)を行った.また, 合弁の二枚貝化石につ いては生息姿勢を保持しているかを調べた.

その結果, Lucinoma acutilineatum を優占種とし, Yoldia laudabilis, Mizuhopecten kobiyami, Cyclocardia siogamaensis, Clementia sp., Macoma sp. などを伴う軟体動物化石群集を 見出した. L. acutilineatum は離弁を含めた全個体数の半数 近くを占め, 合弁二枚貝中では6割, 生息姿勢を示す合弁 二枚貝では8割を超える. 炭酸塩コンクリーション中やそ の周囲からは特にL. acutilineatum が多く産出する. コンク リーションや密集部より数10cm~1 m以上離れた泥質極 細粒砂岩からは合弁の二枚貝化石は希になる.

炭素・酸素安定同位体比

メタン冷湧水起源のコンクリーションは、間隙水中に 生息する硫酸還元菌・嫌気性メタン酸化古細菌コンソー シアの働きによってもたらされた炭酸イオンが、間隙水 中のカルシウムイオンと結合して炭酸カルシウムが沈殿 することで形成されると考えられている (Masuzawa *et al.*, 1992; Michaelis *et al.*, 2002; Orphan *et al.*, 2004など). Paull *et al.* (1985) によれば、有機物起源のメタンのδ¹³C は自然界に存在する物質の中で著しく低く、メタン生成 菌により生成された場合は -50~-80 ‰,熱分解により生 成された場合は 0~-40 ‰の値を示す. 炭酸塩岩中の炭素 安定同位体比の値は、これらのメタンが酸化されて生成 された DIC(溶存無機炭素)と、もともと海水中に存在 する DIC との混合によって決まる.一方,酸素安定同位 体比は主として海水中の酸素安定同位体比と温度によっ て値が決まる. 湧水域においては間隙水の酸素同位体比 が不明であるので、本報告では相対的な値のみを議論し、 温度への換算は行わない.

炭酸塩コンクリーションについての測定試料は図1,2 で示す露頭下部から3試料,中部最下部から1試料,上部 から6試料の計10試料を採集した.また,露頭下部から 採集した自生的産状を示す*L. acutilineatum*の貝殻につい て3試料を測定した.なお,試料にした二枚貝殻体は走査 型電子顕微鏡による殻体断面の殻構造観察からアラゴナ イトの交差板構造が確認できるので,微細構造上続成変質 をほとんど被っていないものとみなせる.なお,測定は東 京大学大学院理学系研究科地球惑星科学専攻の MAT252 型質量分析計を利用した.

各試料の測定結果を表2と図7に示す. 層準ごとに 各試料の測定結果をまとめると, 露頭下部と中部最下 部の炭酸塩コンクリーション試料(L1~L4) は δ^{13} C = -20.9~-29.2‰, δ^{18} O = 1.9~-0.2‰, 上部の炭 酸塩コンクリーション試料(U1~U6) は, δ^{13} C = -8.9~-15.0‰, δ^{18} O = -0.2~-3.2‰であった. また 露頭下部の貝殻試料は δ^{13} C=1.3~-0.5‰, δ^{18} O = 1.6 ~1.2‰であった. 以上のように, 炭素同位体比につ いては露頭下部と中部の試料は約-21~-30‰と上部 に比べて低く, 貝殻試料は約0‰であった.

炭酸塩コンクリーションの各タイプの形成過程

タイプI, Ⅱ

Paull *et al.* (1985) は、炭素同位体比と起源物質との関係を次のようにまとめている. すなわち、(1)海洋の溶存

表 2	2.	炭素	•	酸素安定同位	立体比を測定した各試料の鉱物組成とコンクリーショ:	
2	タイ	プお	よ	び同位体比.	同位体比はPDB標準試料に対する千分率偏差によって	ζ
Ī	長し	た.				

サンプル名	鉱物組成	コンクリーション タイプ	δ ¹³ C (‰)	δ ¹⁸ O (‰)
貝殻	アラゴナイト	ツキガイモドキ貝殻	-0.5	1.2
貝殻	アラゴナイト	ツキガイモドキ貝殻	1.3	1.5
貝殻	アラゴナイト	ツキガイモドキ貝殻	0.0	1.6
L1	カルサイト	Ι	-29.2	1.0
L2	カルサイト	III	-27.9	1.9
L3	カルサイト+ ドロマイト	Ι	-20.9	-0.2
L4	カルサイト	Ι	-29.0	1.1
U1	カルサイト	VI	-11.1	-2.0
U2	カルサイト	VI	-8.9	-2.4
U3	カルサイト	VI	-12.5	-3.2
U4	カルサイト	VI	-15.0	-0.2
U5	カルサイト	VI	-13.7	-2.1
U6	カルサイト	VI	-12.5	-0.8



図7.五浦海岸の九面層から採取した炭酸塩コンクリーションおよびLucinoma acutilineatum 殻試料から得られた炭素・酸素同位体比.

無機炭素(約0%),(2)海洋の有機炭素(-20%から-25‰),(3)陸上植物の炭素(-10‰から-30‰),(4)有機 物の熱分解起源メタンの炭素(0%から-40%),(5)メタ ン生成菌起源のメタンの炭素(-50%から-80%)であ る. Paull et al. (1985) の基準に従えば、タイプ I の炭酸 塩コンクリーションの炭素安定同位体比は-20.9~-29.2‰ で、炭素の起源として(1)と(2)だけでは説明が困難で ある.本研究では炭化植物片試料を測定対象とはしてい ないので(3)は考慮の対象外となる.したがって、タイ プIの炭酸塩コンクリーションの形成には、熱分解起源の メタンか、メタン生成菌起源のメタンが関与していると 考えられる.しかしながら、タイプIの炭酸塩コンクリー ションの炭素安定同位体比は、メタン生成菌起源と考え られる他地域の地層のコンクリーションにおける炭素安 定同位体比(例えば, 舘・間嶋, 1998)と比較すると, 約 10~30‰程度重い.なお、今のところタイプⅠの形成に関

与したメタンの起源が、有機物の熱分解であるかメタン生 成菌であるかを決める証拠はない.ただし、タイプIの酸 素安定同位体比がLucinomaの殻体の値とほぼ同一である ことから、それらのコンクリーションはLucinomaが生息 していた周囲の堆積物とほぼ同じ間隙水組成・温度の条件 下、すなわち海底面直下付近で形成されたとみなされる. 一方、タイプIIはタイプIの周囲に伴うことが多く、単 独で産することが少ないため、成因はタイプIIに密接に関 連したものと予想される.おそらく、メタンを含む間隙水 が当時の海底面直下付近に存在し、間隙水中のメタン供給 量が多かった部分やメタンが滞留し易かった部分では大 型のタイプIが形成され、比較的メタン供給量が少ない部 分もしくは滞留しにくい部分で小型のタイプIIが形成さ れたと考えられる.

タイプⅢ

タイプIIIの炭素同位体比は-27.9%とタイプIと同程度 の低い値を示しており、タイプIIIもタイプIと同様にメ タン起源の炭素が関与して形成されたと考えられる.タ イプIIIは地層面に垂直なもしくはいくらか斜交したパイ プ形をなし、中央が空洞状で内壁を裏打ちしたパイプ状 生痕に似た構造が認められることから底生生物が関与し たことが示唆される.本タイプは、タイプV、VIで見られ るような生痕充填堆積物への選択的な炭酸塩の沈殿は認 められず、空洞を中心として周囲の母岩中へ炭酸塩が沈殿 したチムニー状構造を示す.また、本タイプはタイプV、 VIとは層準も岩相も異なり、泥質極細粒砂岩からなる比較 的均質な岩相の露頭下部に観察される.以上のことから、 生痕が形成された後に、その空洞を含メタン間隙水が選択 的に通過することにより、空洞が保持され、かつ空洞の外 側に炭酸塩が沈殿したと考えられる.

タイプⅣ

タイプIVはコンクリーションが全体として希な露頭中

部の泥質細粒砂岩中に散在的に挟在し、その周囲にはタイ プIIがやや多く散在している.周囲より粒度のやや粗い シート状、レンズ状の細粒砂岩層中にメタンを含む間隙水 がトラップ・滞留されて、薄層型のコンクリーションが形 成されたものと考えられる.

タイプV, VI

タイプVからタイプVIの発達する砂岩は、甲殻類など の底生生物による比較的大型の垂直性〜網目状の管状生 痕が密集する泥質極細粒砂底に,大量の細粒~中粒砂が海 底面下の複雑な生痕を充填しながら堆積して形成された. 層厚2~3mに達しているが、堆積ユニットの境界や堆積 構造は堆積後の生物擾乱によって保存されていない. おそ らく、大規模なストームや津波、もしくは乱泥流起源のイ ベント性砂岩層と思われる.この層厚2~3mの間にある 棲管が一度の堆積イベントで全て充填されたとは考えに くいことから、この砂層は複数回の堆積イベントにより形 成された可能性が大きい. この堆積物は、周囲に比べ間隙 率が高いためにメタン湧水が浸透しやすく,結果として砂 層や砂で充填された生痕が選択的に炭酸塩で膠結されて 巨大なコンクリーションとなったのではないかと考えら れる. また, タイプV, VIの境界は連続的であることから, 両タイプは一連の成因で形成されたものと予想される.

しかしながら、タイプVIの炭素安定同位体比の値は、露頭 下部から産するタイプIやIIとは異なって、-9.0~-15.0% と比較的高く、炭素の起源がメタンであるという考えを必 ずしも支持しない、タイプV、VIは波食台の岩礁において 他のタイプよりはるかに広範囲に、かつ連続的に発達する が、周囲からは独立した岩体をなしている.これほど大 規模な炭酸塩コンクリーションが局所的に産することを、 広域的に均一に起こる続成過程による炭酸塩沈殿の結果 で説明するのは難しい.したがって、比較的高い炭素安定 同位体比の原因として、メタン湧水と海水との混合を考 えた.すなわち、タイプVIはタイプIより粗粒な細粒~ 中粒砂岩で構成されており、堆積直後は間隙率が大きいた めに湧水と海水が混合しやすい条件にあった.そのため、 炭素安定同位体比は海水中のそれに近づくことで値が高 くなったのであろう.

化学合成群集の認定

調査地域の露頭下部~中部から多産する Lucinoma acutilineatum は、合弁でかつ殻頂を上にした生息姿 勢を保つ個体が多く、自生的な産状を示す.また、本 種は共産する他の軟体動物化石に比較して著しく優 占して産出し、特にタイプI、IIのメタン湧水に起因 して形成されたと考えられる炭酸塩コンクリーション 中およびその周囲に密集して産し、炭酸塩コンクリー ション密集部から離れると産出頻度は急に減少する. L. acutilineatum を含むツキガイ科二枚貝は、鰓に化学合成 細菌を共生する化学合成二枚貝の代表的分類群の一つで あり(Cavanaugh, 1985),シルル紀以降の化学合成群集 の一員として知られている(Callender and Powell, 1999). 日本では白亜紀以降の地層から産出する化学合成群集に おいて認められており(Hikida et al., 2003; 間嶋, 1999; Majima et al., 2003など),特に関東周辺からは三浦半島南 部の上部鮮新統大船層-下部更新統小柴層,および房総半 島中部の中部更新統柿ノ木台層などから化石化学合成群 集の主要構成種として報告されている(舘・間嶋, 1998; 柴崎・間嶋, 1997; Kitazaki and Majima, 2003). また,駿 河湾金洲ノ瀬からは,ツキガイモドキ類とオウナガイ類 が優占する現生の化学合成群集が得られている(橋本ほか, 1995).

これらのことや上述の化石の産状から、本調査地域において産出した L. acutilineatum 群集は、メタン湧水に依存した化石化学合成群集であったと言える.

コンクリーション群と化学合成群集の形成史

露頭下部:メタン湧水による炭酸塩コンクリーションと化 学合成群集の形成(図8)

泥質な極細粒砂が継続的に堆積する砂質内側陸棚の,底 生生物活動が活発で底質が擾乱され管状生痕が頻繁に作 られる海底面において,海底下深部で生成されたメタンが 海底面表層付近までメタン湧水として供給された.これに 対応して,おそらく硫酸還元菌・嫌気性メタン酸化古細菌 コンソーシアなどが嫌気的にメタンを酸化し,硫化水素と 炭酸イオンを生成した.生成された硫化水素を利用して L. acutilineatum に共生するイオウ酸化細菌が化学合成を行い 化学合成群集が成立した.一方,炭酸イオンは海水中のカ ルシウムイオンと結合して炭酸塩膠結作用が生じ,タイ プI,Ⅱの炭酸塩コンクリーションがパッチ状に形成され た.また,湧水の経路として管状生痕が利用され,タイプ Ⅲに代表されるパイプ状炭酸塩コンクリーションが形成 された.

中部:メタン湧水活動の低下

堆積物中への湧水の供給量が減少し炭酸塩膠結作用も 弱まったために,結果としてコンクリーションの少ない 泥質極細粒砂岩が形成された.局所的に湧水が上昇・ト ラップ・滞留する場では、タイプⅠ,Ⅱが形成され、L. acutilineatum もそれに依存して局所的に密集して生息する ようになった.稀に、タービダイトもしくはストームに よって運搬されたシート状細粒砂層に湧水が到達すると、 そこで湧水がトラップされ、タイプⅣの平板状コンクリー ションが形成された.

上部:メタン湧水(もしくは間隙水)と海水との混合によ る巨大炭酸塩コンクリーションの形成

底生生物活動が極めて活発になったか、もしくは堆積速



図8.五浦海岸の九面層における炭酸塩コンクリーションと化学合成群集の形成過程.

度の減少によるコンデンセーションが生じたために生痕 が非常に密集するような泥質極細粒砂底に、イベント性の 細粒~中粒砂層が海底下の密集生痕を充填しながら厚く 堆積した.この砂層を比較的高い炭素同位体比を持つ炭酸 塩が膠結している.また、上部層からは化学合成群集を構 成するLucinomaなどの大型化石が産出しない.これらの 条件を満たす炭酸塩沈殿プロセスとして、次の3通りの解 釈が考えられる.

1)メタン湧水活動が活発化し、細粒~中粒砂で充填さ れた生痕および砂層を、メタン湧水が表層付近の海水と混 合しつつ選択的に通過した。その際に炭酸塩が沈殿して タイプV, VIの巨大な炭酸塩コンクリーションが形成さ れた。2)生痕の密集した砂層は海水由来の間隙水を多く 含んでいた。この砂層に下位(もしくは側方の同時異相) の泥質層より軽い炭素同位体比をもつメタン湧水が移入・ 混合し、炭酸塩が沈殿してタイプV, VIの巨大な炭酸塩コ ンクリーションが形成された。3)生痕の密集した砂層が 不透水層で被覆された。当時まだ未固結だった中部層の間 隙水は海水主体で、これに地下の還元環境下で形成された 軽い炭素同位体比を持つ無機炭素が溶存していた。この間 隙水が間隙率の高い砂層部に移動して炭酸塩コンクリー ションが形成された。

いずれにしても、メタン湧水もしくは軽い炭素同位体比 を持つ無機炭素を含む間隙水と海水との混合を考慮する 必要がある.本研究結果からは、上記3解釈のどれか1つ を採用することは難しく、今後の詳細な岩石学的・地球化 学的研究が望まれる.

まとめ

1. 茨城県北部の北茨城市五浦海岸に分布する高久層群九 面層に含まれる炭酸塩コンクリーションの形態と産状か ら、炭酸塩コンクリーションを6つのタイプに識別した: I (大型塊状不定形型), II (小型塊状不定形型), II (パ イプ型), IV (薄層型), V (密集生痕膠結型), VI (密集 生痕膠結層状型).

2. 炭酸塩コンクリーションのタイプは、厚さ10mの露 頭の下部・中部・上部で分布様式が変化する.下部では、 塊状泥質極細粒砂岩中にタイプⅠ、Ⅱがモザイク状に密集 しⅢを伴う.中部では炭酸塩コンクリーションは少なく、 タイプⅠ、Ⅱ、Ⅳが散在する.上部はタイプV、Ⅵが密集 した、細~中粒砂岩の層厚2-3m、幅50m×長さ100m弱 の巨大な炭酸塩コンクリーションをなしている.

3. 露頭下部のタイプ I と皿の炭酸塩コンクリーション は、炭素安定同位体比が-20~-30%の範囲にあって、海 水中の炭素同位体比に比べ著しく低く、メタン湧水起源の 炭素が関与したことが確実である.タイプ VIは、産状から メタン湧水が関与した炭酸塩コンクリーションと思われ る.しかし、その炭素安定同位体比は-9~-15%と比較 的高く、この原因としてメタン湧水と海水との混合が同位 体比に影響した可能性が考えられる.

4. 露 頭 下 部 か ら 中 部 に 産 出 す る *Lucinoma acutilineatum*は, 自生的に密集し, メタン湧水起源 の炭酸塩コンクリーションを伴うことから化学合成群 集を形成していた.

謝辞

本研究を行うにあたり,茨城大学理学部地球生命環 境科学科の天野一男教授,岡田 誠助教授には有用な 討論をして頂いた.産業技術総合研究所地質標本館の 柳沢幸夫氏には,本地域における層序に関し,多くの 有用な意見を頂いた.また,横浜国立大学の間嶋隆一 教授と静岡大学の延原尊美助教授には非常に親切か つ丁寧な査読をしていただいた.本研究の一部には, 学術振興会科学研究費補助金(基盤(C),課題番号, 17540441,代表者:安藤寿男)および東京大学21世 紀COEプログラム「多圏地球システムの進化と変動 の予測可能性」研究補助金を使用させて頂いた.以上 の皆様と関係各位に深く感謝申し上げます.

文献

- Aharon, P., 2000. Microbial processes and products fueled by hydrocarbons at submarine seeps. *In* Riding, R. E. and Awramik, S. M. *eds.*, *Microbial Sediments*, 270-281. Springer, Berlin.
- 安藤寿男,2002. 茨城県北部〜福島県南部太平洋岸地域における常 磐堆積盆の地質学的研究-文献リストと研究概観. 茨城県自然博 物館研究報告,(5),81-97.
- Callender, W. R. and Powell, E. N., 1999. Why did ancient chemosynthetic seep and vent assemblages occur in shallower water than they today? *International Journal of Earth Sciences*, 88, 377-391.
- Cavanaugh, C. M., 1985. Symbioses of chemoautotrophic bacteria and marine invertebrates from hydrothermal vents and reducing sediments. *Bulletin of Biological Society of Washington*, **6**, 373-388.
- 橋本 惇・藤倉克則・藤原義弘・谷島恵美・太田 秀・小島茂 明・葉 信明, 1995. 遠州灘金洲ノ瀬におけるオオツキガイモド キとハオリムシ類を共優占種とする冷水湧出帯生物群集の観察. JAMSTEC 深海研究, 11, 211-217.
- Hikida, Y., Suzuki, S., Togo, Y. and Ijiri, A., 2003. An exceptionally well-preserved fossil seep community from the Cretaceous Yezo Group in the Nakagawa area, Hokkaido. *Paleontological Research*, **7**, 329-342.
- Luth, C., Luth, U., Gebruk, A. and Thiel, H., 1999. Methane gas seeps along the oxic/anoxic gradient in the Black Sea: Manifestations, biogenic sediment compounds and preliminary results on benthic ecology. *Marine Ecology*, **20**, 221-249.
- Kitazaki, T. and Majima, R., 2003. A slope to outer-shelf cold-seep assemblage in the Plio-Pleistocene Kazusa Group, Pacific side of central Japan. *Paleontological Research*, 7, 279-296.
- 間嶋隆一, 1999. 日本の新生代化学合成群集の産状. 地質学論集, (58), 117-129.
- Majima, R., Ikeda, K., Wada, H. and Kato, K., 2003. An outer-

shelf cold-seep assemblage in forearc basin fill, Pliocene Takanabe Formation, Kyushu Island, Japan. *Paleontological Research*, **7**, 297-312.

- Masuzawa, T., Handa, N., Kitazato, H. and Kusakabe, M., 1992. Sulfate reduction using methane in sediments beneath a bathyal "cold seep" giant clam community off Hatsushima Island, Sagami Bay, Japan. *Earth and Planetary Science Letters*, **110**, 39-50.
- Michaelis, W., Seifert, R., Nauhaus, K., Treude, T., Thiel, V., Blumenberg, M., Knittel, K., Gieseke, A., Peterknecht, K., Pape, T., Boetius, A., Amann, R., Jorgensen, B. B., Widdel, F., Peckmann, J., Pimenov, N. V. and Gulin, M. B., 2002. Microbial reefs in the Black Sea fueled by anaerobic oxidation of methane. *Science*, 297, 1013-1015.
- 野田浩司, 1994. 日本生痕化石研究への序説. 294p., 洛思社,東京.
- Orphan, V. J., Ussler, W., Naehr, T. H., House, C. H., Hinrichs, K. U., and Paull, C. K., 2004. Geological, geochemical, and microbiological heterogeneity of the seafloor around methane vents in the Eel River Basin, offshore California. *Chemical Geology*, 205, 265-289.
- Peckmann, J., Reimer, A., Luth, U., Luth, C., Hansen, B. T., Heinicke, C., Hoefs, J. and Reitner, J., 2001. Methane-derived carbonates and authigenic pyrite from the northwestern Black Sea. *Marine Geology*, **177**, 129-150.
- Paull, C. K., Jull, A. J. T., Toolin, L. J., and Linick, T., 1985. Stable isotope evidence for chemosynthesis in an abyssal seep community. *Nature*, **317**, 709-711.
- Schoell, M., 1988. Multiple origins of methane in the earth. *Chemical Geology*, **71**, 1-10.
- 柴崎啄自・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.
- 須貝貫二・松井 寛・佐藤 茂・喜多河庸二・佐々木実・宮下美智 夫・河内英幸,1957.日本炭田地質図I,常磐炭田地質図及び説 明書.143 pp.,地質調査所.
- Takeuchi, R., Machiyama, H. and Matsumoto, R., 2001. The formation process of the cold seep carbonates at the Kuroshima Knoll. *JAMSTEC Journal of Deepsea Research*, **19**, 61-75.
- 舘由紀子・間嶋隆一,1998. 外側陸棚相の冷湧水性化学合成化石群 集-下部更新統上総層群小柴層の例-.地質学雑誌,104,24-41.
- 上田庸平・安藤寿男・篠崎将俊,2003. 茨城県北部の古第三系下部 漸新統白水層群石城層から浅貝層にかけての堆積相と古地理的意 義.茨城県自然博物館研究報告,(6),1-17.
- 上田庸平・安藤寿男. 2003. 常磐地域南部茨城県北茨城市周辺に分 布する第三系の堆積相. 地球惑星科学関連学会2003年合同大会 講演要旨, G016-004.
- Van Dover, C. L., 2000. *The Ecology of Deep-Sea Hydrothermal Vents*. 424 pp. Princeton University Press, Princeton.
- Yabe, H., 1948. Stratigraphical position of the Kokozura Sandstone. Proceedings of Japan Academy, 24, 1-3.
- 柳沢幸夫,1996. 茨城県北茨城市大津地区に分布する新第三系多賀 層群の珪藻化石層序.国立科学博物館専報,29,41-59.

(2004年6月25日受付, 2005年8月8日受理)

