論説

神奈川県相模原市に露出する下部更新統中津層群上部から産出した冷湧水性 化学合成化石群集

瀬戸大暉*・間嶋隆一**・彌勒祥一***・中村栄子****

*横浜国立大学環境情報学府・**横浜国立大学環境情報研究院・***豊田通商株式会社・****横浜国立大学

Chemosynthetic, cold-seep-dependent fossil assemblages from the upper part of the Nakatsu Group (Lower Pleistocene), Sagamihara City, Kanagawa Prefecture, central Japan

Hiroki Seto*, Ryuichi Majima**, Shoichi Miroku*** and Eiko Nakamura****

*Graduate School of Environment and Information Sciences, Yokohama National University, 79-7 Tokiwadai, Hodogaya-ku, Yokohama 240-8501, Japan (seto-hiroki-tj@ynu.jp); **Faculty of Environment and Information Sciences, Yokohama National University, 79-7 Tokiwadai, Hodogaya-ku, Yokohama 240-8501, Japan (majima-ryuichi-ym@ynu.ac.jp); ***Toyota Tsusho Corporation, 2-3-13 Konan, Minato-ku, Tokyo 108-8208, Japan (shoichi_miroku@toyota-tsusho.com); ****Yokohama National University, 79-2 Tokiwadai, Hodogaya-ku, Yokohama 240-8501, Japan (eiko@ynu.ac.jp).

Abstract. Chemosynthetic, cold-seep-dependent fossil assemblages occur at five fossil localities in the riverside cliffs along the Sagami River, Sagamihara City, central Japan, where the upper part (2.5 - 2.0 Ma) of the marine Nakatsu Group is exposed. The upper Nakatsu Group is marked by coarsening-upward and subsequent fining-upward sequences as follows (in ascending order): mudstone (Lithofacies A), mudstone and sandy mudstone (B), sandy mudstone (C), alternations of sandy mudstone and muddy sandstone (D), sandy mudstone (E), and mudstone (F). The fossil assemblages are dominated by the bivalve molluscs *Lucinoma* and/or *Conchocele* that show high rates (79.2 % – 100 %) of valve articulation, occur in clusters, and are frequently preserved in life positions. The fossils are commonly associated with authigenic carbonate concretions consisting of high-magnesian calcite and/or dolomite that are greatly depleted in ¹³C (δ ¹³C = -33.31 ‰ to -22.60 ‰ VPDB), suggesting the influence of anaerobic oxidation of methane. These observations indicate that the fossil assemblages are chemosynthetic and cold-seep-dependent. The bathymetric ranges of extant molluscan species and the water temperature inferred from the stable oxygen isotope ratios of the authigenic carbonates suggest that lithofacies E was deposited in water depths of 150 – 240 m.

Key words: Authigenic carbonate, cold-seep-dependent fossil assemblage, *Conchocele, Lucinoma*, Nakatsu Group, Pleistocene.

はじめに

神奈川県の丹沢山地東縁には,後期鮮新世から前期更 新世にかけて堆積した海成堆積物の中津層群が露出する (図1: 鈴木, 1932; Ito, 1985; 植木ほか, 2013 など). 中津 層群は,多摩丘陵,三浦半島,房総半島に露出する上総 層群と地下で連続し(小沢ほか, 1999; 鈴木, 2002 など), 当時南関東に分布した広大な堆積盆の西縁の堆積物であ る.これらの地層は,北米プレートにフィリピン海プ レートが沈み込む際に形成された前弧海盆堆積物で(高 橋, 2008),中津層群堆積時に,フィリピン海プレートと 北米プレートの境界は丹沢山地北縁から南縁にジャンプ したと言われている(Taira *et al.*, 1998; 青池, 1999).中 津層群は,当時のプレート境界近傍に堆積していること から,その堆積環境の変遷は当時の南関東地域の古環境 を考察する上で重要である.著者らは,こうした問題意 識の中で中津層群の層序と貝化石の研究を行ってきた.

中津層群上部からは、ツキガイ類やハナシガイ類の化 石が自生的に産出することが報告され(鈴木,1932;馬 場,1992;金井,2001)、現生のこれらの二枚貝類が体内に 化学合成細菌を共生していることと(Taylor and Glover, 2010)、一部の化石産地で自生炭酸塩が産出することか ら、メタン湧水に依存した化学合成化石群集である可能 性が示唆されていた(金井,2001).著者らは、従来報告 されていた化石産地を確認すると同時に、ツキガイ類や ハナシガイ類が産出する新たな化石産地を発見した.



図1. 中津層群の露出範囲(1),調査範囲(2),および各化石産地(3-5).2の地形図は国土地理院発行1万分の1「愛川」を,3,4,5の地 形図は相模原市発行2,500分の1「望地」と「田名塩田」を使用した.

Fig. 1. Maps showing exposures of the Nakatsu Group (1), the locations of the study sites (2), and fossil localities (3–5). The base map used in (2) is the 1:10,000 "Aikawa" topographic map, published by the Geospatial Information Authority of Japan. The maps used in (3–5) are the 1:2500 "Môchi" and "Tanashioda" topographic maps, published by Sagamihara City.

本研究の目的は,(1) ツキガイ類やハナシガイ類を主 とする化石産地間の層位関係を明確にし,化石群集の産 出層準を確定すること,(2) 各化石産地の貝化石と自生 炭酸塩の産状を詳細に記載し,貝化石の産状と自生炭酸 塩の安定同位体比から,これらの化石群集がメタン湧水 に依存した冷湧水性化学合成化石群集であることを示す こと,(3) 貝化石と自生炭酸塩の安定同位体比から堆積 深度を推定することである.

地質概説と化石産地

中津層群の層序は、これまで鈴木(1932)、中世古・澤 井(1949)、小島(1955)、Ito(1985)によって研究され てきた. Ito(1985)に従うと、中津層群は下位から、小 沢層、神沢層、清水層、大塚層、塩田層に区分され、鈴 木・中山(2007)と田村ほか(2010)の広域テフラの対 比、植木ほか(2013)の古地磁気層序、馬場(1992)の 貝化石の研究などから、上部鮮新統から下部更新統の海 成堆積物とされている.本研究で確認されたツキガイ類 やハナシガイ類を主とする化石群集は、何れも相模川左 岸に露出する中津層群上部の大塚層あるいは塩田層から 産出した.調査範囲の岩相図と柱状図を図2に示す.

今回の調査で確認できたツキガイ類やハナシガイ類を 主とする化石群集の産地を北から南へ, 産地1から産地 5とする.以下,化石産地(Fossil locality)の英語略称 はLoc.と表記する. これらの化石産地の位置を図1.3-1.5 (Locs. 1-5) に示した. これらのうち, 産地1は鈴木 (1932)が、産地4は馬場(1992)が、また産地5は鈴木 (1932) と馬場 (1992) が既に報告している.金井 (2001) は、調査地域最上位の層準である産地5から約500m北 東で,調査地域最上位層から約100m上位の層準と推定 される八瀬川の河床からツキガイ類からなる化石群集を 報告した (図1.2のFossil locality of Kanai (2001)). 金井 (2001)が報告した化石群集は治水工事の際に露出した 凝灰質シルト岩から産出し、コンクリーションを伴い還 元環境を示唆する底生有孔虫群集と共産する. 露頭は治 水工事により被覆され現在観察はできない状態になって いる. 産地2と3は今回新たに発見した化石産地である.

研究手法

岩相と凝灰岩層の定義

泥質岩の岩相は、含泥率70%以上を泥岩,70%未満か ら45%以上を砂質泥岩,45%未満を泥質砂岩と定義し (図2.2の柱状図5,図2.3の柱状図19など),この区分で 識別した岩相を、含泥率を測定していない岩相の識別基 準とした.砂岩は、露頭で粒度を識別した.また、凝灰 岩層はHeiken and Wohletz (1985)の区分に従って分類 した(表1).

化石産地の記載手法

各化石産地の化石と自生炭酸塩の産状を示すため露頭 スケッチを作成した(図3-5). 露頭規模が他の化石産地 と比較して大きい産地5の下部(図5.1)は、1辺約1.5 m のグリッドを露頭上に設定し、対岸からレーザー測量器 (PENTAX製トータルステーションV-460)を使用して、 各グリッドの空間的位置を決定し、露頭面にほぼ平行な N46°W、30°SWの仮想面に、露頭を投影して作成した. スケッチの地層が湾曲して見えるのは、仮想面が地層の 層理面(N18°W、10°NE)と直交しておらず、露頭の凹

Table 1. Descriptions of laterally traceable tuff beds (Tn1–Tn20; Fig. 2) in the upper part of Nakatsu Group. The tuff beds are classified according to Heiken and Wohletz (1985).

Key tuff bed	Thickness (cm)	Tuff bed classification		
Tn20	29–40	Pumiceous lapilli tuff Coarse ash tuff Fine ash tuff		
Tn19	7–10	Coarse ash tuff		
Tn18	10–15	Pumiceous lapilli tuff		
Tn17	14	Fine ash tuff		
Tn16	5–7	Coarse ash tuff		
Tn15	18	Coarse ash tuff		
Tn14	18–21	Pumiceous lapilli tuff		
Tn13	33–37	Coarse ash tuff Pumiceous lapilli tuff		
Tn12	3–6	Scoriaceous lapilli tuff		
Tn11	7–11	Scoriaceous lapilli tuff Coarse ash tuff or Coarse ash tuff		
Tn10	6–10	Scoriaceous lapilli tuff		
Tn9	1-6	Pumiceous lapilli tuff		
Tn8	10–13	Pumiceous lapilli tuff		
Tn7	5	Pumiceous lapilli tuff		
Tn6	18	Coarse ash tuff		
Tn5	3	Fine ash tuff		
Tn4	3	Fine ash tuff		
Tn3	2–4	Pumiceous lapilli tuff		
Tn2	22	Pumiceous lapilli tuff		
Tnl	7–10	Pumiceous lapilli tuff		

凸がスケッチに反映されたためである.

各化石産地の化学合成二枚貝化石(ツキガイ類,ハナ シガイ類,キヌタレガイ類)の占有率と二枚貝化石の合 弁率を記録した(表2).化石はスケッチ範囲から採集し た.一部範囲外から採集した個体もあるが,スケッチの 位置を示した露頭の写真の範囲から外れて採集した個体 はない.占有率は,同定できた貝化石全体に対する化学 合成二枚貝化石の個体数の割合で示し,合弁率は,化学 合成二枚貝化石以外の種も含めた割合で示した.産出個 体数の表記,および占有率と合弁率の計算に際しては離 弁殻2片を1個体とした.

自生炭酸塩の同定(表3)

自生炭酸塩の同定は、粉末XRD解析によって行った. 試料は切断後に研磨した面からマイクロドリルによって 実体顕微鏡下で採取した.この際、有孔虫などの生物源 炭酸塩をなるべく避けるように注意した.各試料には、 次項で述べる自生炭酸塩重量比を見積もるために、KCl を重量比で20%添加した.これらをメノウ乳鉢で均質な 粉末とし、測定試料とした.

XRD測定は、横浜国立大学のRIGAKU社製自動X線 回折装置RINT2500を使用し、Si低反射板上で行った. 測定条件はCuK α 線、管電圧40 kV,管電流200 mA,ス キャン範囲20°~60°、スキャンステップ0.02°、スキャ ンスピード1°/minである.得られたピークの鉱物同定は、 RIGAKU社の総合粉末X線解析ソフトPDXL付属のデー タベースPDF-2に基づいて行った.

自生炭酸塩の重量比(表3)

XRD測定した試料の各炭酸塩鉱物種の重量比を見積 もるため、検量線を作成した.検量線作成には、福島県 産カルサイト結晶, 岐阜県産アラゴナイト結晶, インド 産ドロマイト結晶を用いた.マイクロドリルで各結晶か ら粉末を採取し、カルサイト粉末にはSi,他の二つの結 晶の粉末にはZnOを加えた.添加物を加えた試料中の各 炭酸塩鉱物種の重量比が5%,10%,20%,30%,40%, 50%, 60%, 70%, 80%, 90%の割合になるように混 合し、10種類の測定試料を作成した.これらに重量比 20%のKClを添加し、メノウ乳鉢で均質にして、XRD測 定を行った、測定は、小分けにした各試料をSi低反射板 に詰め替えて5回行った.測定条件はCuKa線,管電圧 50 kV, 管電流300 mA, スキャン範囲20°~52°, スキャ ンステップ0.01°~0.02°, スキャンスピード3°~5°/min である.得られた各ピークの鉱物同定及び回折強度の算 出は, PDXLで行った.

カルサイトとドロマイトの検量線は以下のように作成 した.各測定試料の104面の回折強度とKCIの220面の回 折強度との比(以下,回折強度比)を求め,その5回の 回折強度比の平均値と重量比の回帰直線を作成し,検量

表1. 側方に追跡可能な凝灰岩層の記載. Tn1からTn20は図2の柱 状図に示す. 凝灰岩層の分類はHeiken and Wohletz (1985) に 従った.



線とした (図6).

アラゴナイトの検量線の作成の際に、カルサイトのピー クが検出されたので、以下の方法により補正を行った。検 出されたカルサイトの量を上記のカルサイトの検量線か ら求めた結果、重量比5%と見積もることができた。この 値から既に求められた10種類の測定試料の全岩に対する アラゴナイトの重量比を再計算した結果、4.75%、9.5%、 19%、28.5%、38%、47.5%、57%、66.5%、76%、85.5% となった。これらの値に基づきアラゴナイトの検量線を 作成した。アラゴナイトの検量線は、回折強度比に111 面,021面および012面の回折強度の和とKCIの220面の 回折強度比を求め、5回の測定の回折強度比の平均値と 重量比の回帰直線を作成し、検量線とした(図6).

各検量線は、カルサイトy=0.038x、ドロマイトy= 0.031x、アラゴナイトy=0.019xとなり、いずれもR²の 値が0.98以上と良好な直線関係が得られた. 図6に5回 の測定の標準偏差を縦線で示した. これらの検量線を用 いて自生炭酸塩の各鉱物の重量比を求めた. 検量線の傾 きの95%の信頼限界は、カルサイトが±0.0041、ドロ マイトが±0.0028、アラゴナイトが±0.0011である. な



図2. 調査範囲の岩相図(1, 4, 5)と柱状図(2, 3). 岩相図の赤線1-20は柱状図1-20を作成したルートを示す. 岩相図(1, 4)の位置は図1.2に示す.

Fig. 2. Lithofacies maps (1, 4, 5) and geological columns (2, 3) of the upper part of Nakatsu Group. Red lines numbered 1–20 in the lithofacies maps indicate the locations at which geological columns 1–20 were constructed. The locations of lithofacies maps (1, 4) are shown in Fig. 1.2.

お,検量線の作成に使用した試料の測定結果は,日本古 生物学会ホームページ内の「化石」電子版, Supplement material において公開する予定である.

自生炭酸塩のMg含有量の推定(表3)

カルサイトとドロマイトのMg含有量(MgCO₃ mol%) をLumsden (1979)のXRDデータのd値に基づく手法 から定量した.定量を正確に行うため,各試料のXRD測 定値は,添加したKClの200面のd値をPDF-2のKClの 200面のd値で規格して補正した.

カルサイトは、 $MgCO_3 mol\% 4 mol\%$ 未満のものを低Mg カルサイト、4 mol%以上のものを高Mg カルサイトと 分類されている(Dickson, 1990).本研究で測定された 試料中の $MgCO_3$ 含有量は、4.7 mol%から18.6 mol%であ り、全て高Mg カルサイトに分類された.また、カルシ ウムに富むドロマイトをプロトドロマイトとし、 $MgCO_3$ と $CaCO_3$ のmol%が等しい化学量論的なドロマイトと区 別することがある (Naehr *et al.*, 2007 など). しかし, プ ロトドロマイトの定義は研究者間で異なるため (Han *et al.*, 2004; Naehr *et al.*, 2007 など),本研究では特に区別 せず全てドロマイトとよぶ.

自生炭酸塩の炭素と酸素の安定同位体比(表3)

XRD測定した自生炭酸塩試料を回収し、それらの試料 の炭素と酸素の安定同位体比を静岡大学のFinniganMAT 社製MAT250 質量分析計で測定した.測定した試料は、 Cb5、Cb9、Cb10、Cb11である(表3).これらの試料に は、ドロマイトを含むものがあったため、測定は100°C の濃リン酸反応槽へのドロマイト試料の投下による連続 測定法(坪井ほか、2011)に従って行った.静岡大学の MAT250 質量分析計は、60°Cで濃リン酸と反応させた国 際標準試料NBS-20(カルサイト)との比較からVPDB に規格化されてデータが出力されるため、約100°Cで濃 リン酸と反応させた測定値は、以下に述べるカルサイト とドロマイトの濃リン酸との反応温度による酸素安定同 位体分別係数を求める各式によって補正した.測定値は, δ 値として千分率(‰)で表記した.外部精度(External precision; Moriya *et al.*, 2012)は、測定日から6か月以 内に測定されたNBS-20のリン酸から反応させた計3回 分の測定値における炭素と酸素の安定同位体比の標準偏 差から求め、求めた測定誤差は炭素が±0.01‰、酸素が ±0.06‰であった.また、内部精度(Internal precision; Moriya *et al.*, 2012)は、静岡大学での測定日の最初と最 後に測定した標定用ガス(マシンスタンダード:和田ほ か, 1982; 坪井ほか, 2011)の計17回分の測定値における 炭素と酸素の安定同位体比の標準偏差から求め,求めた 測定誤差は炭素が±0.06‰,酸素が±0.05‰であった.

カルサイトの濃リン酸との反応時の温度による同位体 分別係数については,長井・和田 (1993) による静岡大学 で測定された 25°C (1000 $h\alpha_{CO2(acid)-calcite}$: 10.20),60°C (8.87) および 100°C (7.86)の各温度の酸素安定同位体 分別係数を用いて求めた以下の式から算出した.なお, α は CO₂ と炭酸塩鉱物種の分別係数,Tは絶対温度 (Kelvin) を示す.



図3. 産地1から3の露頭写真とスケッチ. 凡例は図4に示す.

Fig. 3. Outcrop photographs and interpretative drawings of locs. 1-3 in the upper part of Nakatsu Group. The legend is provided in Fig. 4.

 $1000 \ln \alpha_{\text{CO2(acid)-calcite}} = 5.76 \times 10^5 (1/T^2) + 3.71$

ドロマイトについては Rosenbaum and Sheppard (1986) の以下の式を用いて濃リン酸との反応温度の酸素安定同 位体分別係数を算出した.

 $1000 ln \alpha_{CO2(acid)-dolomite} = 6.65 \times 10^{5} (1/T^{2}) + 4.23$

各試料の反応温度からカルサイトあるいはドロマイト の同位体分別係数を求め,MAT250の出力値を補正した. カルサイトとドロマイトが複合した Cb9 と Cb10の酸素安 定同位体比の補正は,濃リン酸との反応温度におけるカ ルサイトとドロマイトの同位体分別係数(カルサイトは αcal,ドロマイトはαdol)を算出し,これらの補正値を カルサイト及びドロマイトの相対重量比(W_{cal}%,W_{dol}%) でマスバランス分配し,その和を試料全体の補正値とした.計算式を以下に示す.

 $(8.87 - \alpha cal) \times W_{cal} \% + (8.87 - \alpha dol) \times W_{dol} \%$ =補正値(‰)

 $W_{cal}\% + W_{dol}\% = 100\%$

化石産出層準の岩相と年代

岩相

ッキガイ類とハナシガイ類を主とする化石群集は、相 模川左岸に露出する中津層群上部の泥岩層と砂質泥岩層 から産出した(図2).地層の走向はN8°~18°W,傾斜



図4. 産地4と産地5の中部と上部の露頭写真とスケッチ.

Fig. 4. Outcrop photographs and interpretative drawings of loc. 4 and loc. 5 (middle and upper horizons) in the upper part of Nakatsu Group.

は6°~17°NEであった(図1). 記載の便宜のため調査範 囲の地層をAからFに岩相で区分する(図2).

調査範囲の地層は、泥岩層(岩相A)から砂質泥岩層と 泥質砂岩層の互層(岩相D)へと上方粗粒化し,その上 位は泥岩層(岩相F)へと上方細粒化する一回の堆積サイ クルからなる (図2). すなわち, 最下部は塊状無層理の 層厚28m以上の泥岩層(岩相A:下限は調査範囲外)か らなり、その上位には層厚2.9m~3.5mの砂質泥岩層と 層厚0.5m~2.9mの泥岩層(岩相B)が重なり、さらに その上位には層厚19.7m~21.5mの砂質泥岩層が重なる (岩相C). 岩相Cの上位には, 層厚3m~4.5mの砂質泥 岩層と層厚1.5m~2mの泥質砂岩層の互層(岩相D)が 重なる. 岩相Dの上位には層厚12.6mの砂質泥岩層(岩 相E)が重なり、その上位には層厚1m以上の泥岩層(岩 相F:上限は新規堆積物に覆われ不明)が重なる. 岩相 AからDの上方粗粒化は、鈴木(1932)と小島(1955) の、また岩相DからFの上方細粒化は、鈴木(1932)の 岩相記載で既に指摘されている.

これらの地層は軽石やスコリアを密集あるいは散在的 に含み、全体として凝灰質で、軽石質凝灰角礫岩層を39 層、粗粒凝灰岩層を26層、細粒凝灰岩層13層、スコリ ア質凝灰角礫岩層を5層挟在する(図2). これらのうち, 側方に良く連続する凝灰岩層をTn1からTn20と命名し, その岩相を表1にまとめた. 一部の凝灰岩層には平行葉 理や逆級化構造が見られたことから,火山噴出物が再堆 積を被った凝灰質砂岩層や凝灰質礫岩層である可能性が あるが,ここではこれらを特に区別せず,すべて凝灰岩 層として扱う.

調査範囲の地層は、これまでに複数の研究者によって 研究され、鈴木(1932)は、六倉層と塩田層に、小島 (1955)は、六ツ倉凝灰質シルト岩亜層と塩田火砕質砂泥 互層に、またIto(1985)は、大塚層と塩田層に区分して いる.これらの地層の定義と境界は研究者間で異なるこ とと、本研究での調査範囲が限られていることから、区 分した岩相AからF(図2)について、地層名の認定は行 わなかった.

堆積年代

調査範囲の地層は、以下に示す根拠により2.5 Maから2.0 Maの間に堆積した地層と判断される。田村ほか (2010)は、千葉県銚子の犬吠層群名洗層中のNa-G凝灰 岩層(田村ほか,2007)を調査範囲最下位の地層から約



図5. 産地5(下部)の露頭写真とスケッチ. Fig. 5. Outcrop photograph and interpretative drawing of loc. 5 (lower horizon) in the upper part of Nakatsu Group.

表2. 各化石産地の軟体動物化石. 離弁殻は2片で1個体とし,化学合成二枚貝化石(Acharax, Lucinoma, Conchocele)の占有率は,属まで 同定できた貝化石の全産出個体数に対する割合で計算した.現生種の生息深度の引用は本文中に示す.

Table 2. Molluscan fossils from the upper Nakatsu Group. Two disarticulated bivalve shells are counted as one individual. Occupancy ratios of chemosynthetic species (*Acharax, Lucinoma, Conchocele*) are calculated as the ratio of individuals of chemosynthetic species to all individuals of molluscan fossils identifiable at the generic level. References of water depth of extant species habitats are shown in text.

				Locali	ty				Water depth of
Molluscan species	1	2 Lower	2 Upper	3	4	5 Lower	5 Middle	5 Upper	extant species habitats
Gastropods									
Ginebis argenteonitens (Lischke)	-	-	-	-	-	4	-	-	50–522 m
Ginebis sp.	-	-	-	-	-	4	-	-	
Fusitriton cf. oregonensis (Redfield)	-	-	-	-	-	2	-	-	
Neptunea kuroshio Oyama	-	-	-	-	-	1	-	-	50–750 m
Siphonalia sp.	1	-	-	-	-	-	-	-	
Fulgoraria sp.	-	-	-	-	-	1	-	-	
Elaeocyma sp.	1	-	-	-	-	-	-	-	
Bivalves									
Acharax johnsoni (Dall)	-	-	-	-	-	1	-	-	100–5000 m
Acharax sp.	-	-	-	-	-	1	-	-	
Neilonella coix Habe	-	-	-	-	-	1	-	-	50–2000 m
Neilonella sp.	1	-	-	-	-	-	-	-	
Nuclana sp.	-	1	-	-	-	-	-	-	
Lucinoma spectabile (Yokoyama)	-	1	-	-	-	4	-	-	50–700 m
Lucinoma yoshidai Habe	-	-	-	-	-	3	-	-	50–750 m
Lucinoma sp.	3	4	6	7	15	44	6.5	10	
Conchocele sp.	9	1	-	-	1	2	2	3	
Macoma sp.	-	-	-	-	-	1	-	-	
Unidentified molluses	3	6	9.5	30.5	8	39	15.5	5.5	
Articulated bivalves	15	12	14	31	24	85	19	15	
Disarticulated bivalves	1	1	1.5	6.5	0	11	5	3.5	
Articulation frequency (%)	93.8	92.3	90.3	82.7	100	88.5	79.2	81.1	
Occupancy ratio of chemosynthetic species (%)	80.0	85.7	100	100	100	79.7	100	100	

75m下位に層位すると推定されるMk19含ザクロ石テフ ラ層(図1のMk19 tuff:野田ほか,1999)と対比し,Na-G 凝灰岩層の年代を,その下位に層位するIn3凝灰岩層 (2.65 Ma)と上位に層位するIn11凝灰岩層(2.3~2.2 Ma) の堆積年代から約2.5 Maと推定した.従って,調査範囲 の地層は2.5 Maより若い時代と判断される.

鈴木・中山(2007)は、千葉県銚子の犬吠層群春日層 中のKg1c凝灰岩層(酒井,1990)を調査範囲最上位の地 層から約117m上位に層位すると推定されるYsg5細粒凝 灰岩層(図1のYsg5 tuff:下釜・鈴木,2006)と対比し、 Kg1c凝灰岩層の年代を、その直下に層位する1.97 Maの 石灰質ナンノ化石基準面13(佐藤ほか,1999)と直上に 層位するオルドバイ正磁極亜帯の下限(酒井,1990)の 年代から約2.0 Maと推定した。従って、調査範囲の地層 は2.0 Maより古い時代と判断される。

化学合成化石群集とその産状

以下に各化石産地を層準ごとに下位から順に記載する. 化石産地の露頭写真とスケッチを図3,4,5に,産出した 貝化石を図7に示す.なお図3,4,5のスケッチの凡例は 図4に示した.同定した化石の種名は,奥谷ほか(2017) に従った.5つの化石産地の層準を図2の柱状図の左側に 青い縦棒で示し,露頭で化学合成二枚貝化石の産出する 範囲として定義した.また,各スケッチ範囲の層準を柱 状図の左側に黒い縦棒で示した.産地1から産地4は上 方粗粒化相中の泥岩層(岩相A:産地1)と砂質泥岩層 (岩相B:産地2下部,岩相C:産地2上部,3,4),産地 5は上方細粒化相中の砂質泥岩層(岩相E)からなる.各 化石産地の産出種,各種の産出個体数,現生種の生息深 度,合弁率,化学合成二枚貝化石の占有率を表2に示す. 自生炭酸塩の解析結果は表3に示す.

産地1(岩相Aの泥岩層)

産地1の露頭写真とスケッチを図3.1a-bに示す. 産地1 からLucinoma sp. (図7.1) と Conchocele sp. (図7.2) が 産出し, Siphonalia sp., Elaeocyma sp., Neilonella sp. が 共産した. 化学合成二枚貝化石の占有率は80.0%で,合 弁率は93.8%であった. 自生炭酸塩は大きさ約3 cm以下 で不定形を呈し, 散在的に発達する(図3.1b). 採取した 自生炭酸塩 (Cb1) は高Mgカルサイトからなり,全岩に 対する重量比は10.5 wt%であった.

Locality	Sample number	Carbonate species	Carbonate in sample (wt%)	MgCO ₃ (mol%)	δ ¹³ C (‰ vs VPDB)	δ ¹⁸ O (‰ vs VPDB)	Reaction temperature (°C)
5 Middle	Cb12	High Mg Calcite Dolomite	1.7 4.7	4.7 33.4	-	-	-
5 Lower	Cb11	High Mg Calcite	7.9	11.0	-33.31	2.36	104
	Cb10	High Mg Calcite Dolomite	6.4 0.6	12.4 49.6	-31.20	2.38	104
	Cb9	High Mg Calcite Dolomite	8.1 1.6	13.4 50.6	-30.66	2.15	103
	Cb8	High Mg Calcite	6.9	15.9			
	Cb7	High Mg Calcite Dolomite	6.1 5.4	14.0 42.4	-		-
	Cb6	High Mg Calcite Dolomite	4.2 12.3	18.6 40.8			-
	Cb5	Dolomite	31.8	46.2	-22.60	2.57	103
4	Cb4	Dolomite	21.9	47.4	-	-	-
3	Cb3	High Mg Calcite Dolomite	4.5 12.9	8.5 45.0	-	-	-
2 Lower	Cb2	High Mg Calcite Dolomite	5.9 10.6	10.4 32.9	-	_	-
1	Cb1	High Mg Calcite	10.5	12.6	-	-	-

表3. 各化石産地の自生炭酸塩の解析結果.

Table 3. List of authigenic carbonates from the upper part of Nakatsu Group, showing analysis results of samples.



図6. 全岩に対するカルサイト, ドロマイトおよびアラゴナイトの 検量線. 各シンボルの縦バーは標準偏差を示す.

Fig. 6. Calibration lines for determining the weight percent of calcite, dolomite, and aragonite versus bulk rock. The vertical bars indicate one standard deviation.

産地1は、鈴木(1932)の Thyasira nipponica 第三帯 と一致し、化学合成二枚貝化石以外に Leda (Thestyleda) ramsayi of Yokoyama, Limopsis tokaiensis Yokoyama, お よび Venericardia (Cyclocardia) ferruginea (Clessin) が報 告されている.

産地2(岩相B,C:砂質泥岩層)

産地2は高さ24m,層厚にして17.3mからなる一連の 崖の下部と上部からなり,化学合成二枚貝化石は2層準 に分かれて産出することから(図2.2の柱状図7),下部 を産地2下部,上部を産地2上部とよぶ.産地2下部の露 頭写真とスケッチを図3.2a-bに,上部を図3.3a-bにそれ ぞれ示す.

産地2下部からLucinoma spectabile (Yokoyama) (図7.3) と Conchocele sp. (図7.4)が産出し,Nuclana sp.が共産 した.産地2上部からはLucinoma sp. (図7.5)が産出し た.化学合成二枚貝化石の占有率は産地2下部が85.7%, 産地2上部が100%で,合弁率は下部が92.3%,上部が 90.3%であった.産地2は粗粒火山灰層や凝灰角礫岩層 が不規則なレンズ状に挟在し,地層が激しい生物擾乱を 被っていることを示唆している (図3.2b, 3.3b).自生炭酸 塩は,産地2下部の露頭中央部に不定形で幅50 cm程度, 高さ100 cm程度で発達し,その周囲にも散在的に分布す るが (図3.2b),産地2上部では確認できなかった.また, 自生炭酸塩は,産地2の下部と上部の間の層準にも散在 的に発達する (図2.2の柱状図7).採取した自生炭酸塩 (Cb2)は高Mgカルサイトとドロマイトが複合し,全岩 に対する重量比はそれぞれ5.9 wt%と10.6 wt%であった.

産地3,4(岩相C:砂質泥岩層)

産地3と4の露頭写真とスケッチを図3.4a-bと図4.1abにそれぞれ示す.産地3と4は産地2上部と,ほぼ同一 の層準と推定される(図2.2, 2.3の柱状図7, 8, 9).

産地3からLucinoma sp. (図7.6) が産出し, 産地4か らLucinoma sp. (図7.7) と Conchocele sp. (図7.8) が産 出した. なお, 産地3の露頭の標本は全て殻が溶解し, さ らに殻の印象部も風化により保存の悪い標本が多かった. そのため, 未同定標本数が他の産地に比較して多くなっ た. 化学合成二枚貝化石の占有率は,両産地共100%で, 合弁率はそれぞれ82.7%と100%であった. 自生炭酸塩 は,産地3で10cm程度と数cm程度の大きさものがス ケッチの範囲内で一つずつ,産地4で15cm程度と数cm 程度の大きさのものがスケッチ範囲内で数個局所的に発 達し,塊状不定形を呈する(図3.4b,4.1b). 産地3から 採取した自生炭酸塩(Cb3)は高Mgカルサイトとドロマ イトが複合し,全岩に対する重量比はそれぞれ4.5wt%と 12.9wt%であった.産地4から採取した自生炭酸塩(Cb4) はドロマイトからなり,全岩に対する重量比は21.9wt% であった.

産地4は馬場(1992)のLoc. 17に一致すると思われ,化学合成二枚貝化石以外にFulgoraria elegantula (Shikama), Nuculana yokoyamai Kuroda, Yoldia naganumana (Yokoyama), Limopsis tokaiensis Yokoyama が報告されている.

産地5(岩相E:砂質泥岩層)

産地5は、高さ14m、層厚にして12.8mからなる一連 の崖から化学合成二枚貝化石が断続的に3層準に分かれ て産出することから(図2.3の柱状図20),それぞれを下 位から産地5下部、産地5中部、産地5上部とよぶ.産 地5下部の露頭写真とスケッチを図5.1a-bに、中部を図 4.2a-bに、上部を図4.3a-bに示す.産地5下部は、最も 大きな露頭からなるので、産地5の中部と上部とは区別 して記載する.なお、産地5は鈴木(1932)のThyasira nipponica第四帯、馬場(1992)のLoc.18に一致し、彼ら は化学合成二枚貝化石以外にLeda(Thestyleda) ramsayi of Yokoyama, Yoldia naganumana (Yokoyama), Diplodonta (Felaniella) usta (Gould), Macoma tokyoensis Makiyama, Bembix convexiusculum Yokoyama, Dentalium spp.をこの 産地から報告している.

1. 産地5下部

産地5下部からLucinoma spectabile (Yokoyama) (図 7.9), L. yoshidai Habe (図7.10), Acharax johnsoni (Dall) (図7.11), Lucinoma sp., および Conchocele sp. が産出し, 全化石産地のツキガイ類で最大サイズとなるL. spectabile (殻長7.8 cm)が確認された. 化学合成二枚貝化石以外に, Ginebis argenteonitens (Lischke) (図7.12), Ginebis sp., Fusitriton cf. oregonensis (Redfield) (図7.13), Neptunea kuroshio Oyama (図7.14), Fulgoraria sp., Neilonella coix Habe (図7.15), Macoma sp. (図7.16–7.17) が共産した. 化学合成二枚貝化石の占有率は79.7%, 合弁率は88.5% であった.

自生炭酸塩はスケッチ範囲全体(図5.1b)に渡って,特 に層理方向に散在的,あるいは塊状に発達し,スケッチ 範囲下部から上部にかけて発達の程度が強くなるように 見える.スケッチ範囲最下部からTn18凝灰岩層にかけて は、自生炭酸塩が径5 cm 程度の大きさの塊状不定形で散 在的に発達し、一部で層理方向に密集する.スケッチ範 囲外から採取したこの層準の自生炭酸塩(図5.1aのCb5) はドロマイトからなり、全岩に対する重量比は31.8wt% で、炭素安定同位体比は-22.60‰、酸素安定同位体比は 2.57‰であった.

スケッチ範囲中部の層準のTn19凝灰岩層と37 cm下 位の軽石質凝灰角礫岩層の間の層準には層理に沿って径 20 cm 程度の大きさの塊状不定形の自生炭酸塩がパッチ 状に密集して発達する.この層準から採取した自生炭酸 塩(Cb6, Cb7)は高Mgカルサイトとドロマイトが複合 し,全岩に対する重量比はそれぞれ4.2 wt%と12.3 wt% (Cb6), 6.1 wt%と5.4 wt% (Cb7)であった.

Tn19凝灰岩層とTn20凝灰岩層の間の層準にも,自生 炭酸塩がパッチ状に密集した状態で不定形に産出し,一 部は塊状をなし,層理にそって最大で80 cmの規模で発 達していた.この層準から採取した自生炭酸塩は高Mg カルサイトのもの(Cb8)と高Mgカルサイトとドロマイ トが複合したもの(Cb9)からなり,全岩に対する重量 比はそれぞれ6.9 wt%(Cb8),8.1 wt%と1.6 wt%(Cb9) であった.Cb9の炭素安定同位体比は-30.66 ‰,酸素安 定同位体比は2.15 ‰ であった.

スケッチ範囲上部のTn20凝灰岩層からその上位90 cm の軽石質凝灰角礫岩層の間の層準には、散在的あるいは 層理面方向に伸長した塊状の自生炭酸塩が最大のもの で層理面方向に200 cm程度、それに垂直な方向に25 cm 程度の規模で発達している.この自生炭酸塩中から上記 の最大個体を含むツキガイ類が合弁で散在的に産出し た.この層準から採取した自生炭酸塩は高Mgカルサイ トとドロマイトが複合したもの(Cb10)と高Mgカルサ イトからなり(Cb11)、全岩に対する重量比はそれぞれ 6.4wt%と0.6wt%(Cb10)、7.9wt%(Cb11)であった. Cb10とCb11の炭素安定同位体比は、それぞれ-31.20‰ と-33.31‰、酸素安定同位体比は、それぞれ2.38‰と 2.36‰であった.

自生炭酸塩が層理に平行に粗粒な凝灰岩層に沿って発 達する傾向は、炭酸塩を沈殿させた間隙水が透水性の良 い粗粒層を通り、炭酸塩の沈殿に一定の影響を与えてい たことを示唆する.

2. 産地5中部,上部(岩相E:砂質泥岩層)

産地5中部と産地5上部から Conchocele sp. (図7.18) とLucinoma sp. (図7.19–7.20) が産出し,全化石産地の ハナシガイ類で最大サイズとなる Conchocele sp. (殻長 9.6 cm) が産地5中部から産出した.化学合成二枚貝化石 の占有率は,両産地共100%で,合弁率はそれぞれ79.2% と81.1%であった.

産地5中部のスケッチ範囲上部から自生炭酸塩が3箇所 で産出し,その大きさは幅10 cmから1 cm,高さ4 cmか



図7. 化石産地から採集された貝化石. 標本は筑波の国立科学博物館に所蔵される.

^{Fig. 7. Molluscan fossils collected from the upper part of Nakatsu Group. 1: Lucinoma sp., NMNS PM 27974. 2: Conchocele sp., NMNS PM 27975. 3: Lucinoma spectabile (Yokoyama), NMNS PM 27976. 4: Conchocele sp., NMNS PM 27977. 5: Lucinoma sp., NMNS PM 27978. 6: Lucinoma sp., NMNS PM 27979. 7: Lucinoma sp., NMNS PM 27980. 8: Conchocele sp., NMNS PM 27981. 9: Lucinoma spectabile (Yokoyama), NMNS PM 27982. 10: Lucinoma yoshidai Habe, NMNS PM 27983. 11: Acharax johnsoni (Dall), NMNS PM 27984. 12: Ginebis argenteonitens (Lischke), NMNS PM 27985. 13: Fusitriton cf. oregonensis (Redfield), NMNS PM 27986. 14: Neptunea kuroshio Oyama, NMNS PM 27987. 15: Neilonella coix Habe, NMNS PM 27988. 16: Macoma sp., NMNS PM 27989. 17: close-up of the cardinal teeth of Macoma sp., NMNS PM 27989.18: Conchocele sp., NMNS PM 27990. 19: Lucinoma sp., NMNS PM 27991. 20: close-up of the anterior adductor muscle scar of Lucinoma sp., NMNS PM 27991. NMNS PM = National Museum of Nature and Science, Paleontology, Mollusca.}

ら1 cmで,一部は層理面方向に伸長していた(図4.2b). 産地5上部では自生炭酸塩は確認できなかった.産地5中 部から採取した自生炭酸塩(Cb12)は高Mgカルサイト とドロマイトが複合し,全岩に対する重量比はそれぞれ 1.7 wt%と4.7 wt%であった.

各化石産地の自生炭酸塩基質

各化石産地の自生炭酸塩8試料(Cb1-4, 6-8, 12)の 薄片観察を行った.8試料ともにミクライト基質からな り,自形の炭酸塩結晶は確認されなかった.また,薄片 観察を行ったすべての試料で,パイライトがミクライト 基質中や有孔虫など微化石の殻の内部に確認された.化 石殻内部に発達するものは1µm以下の大きさのパイライ ト結晶が集合した直径20µm以下の球形状のフランボイ ダルパイライトであった.フランボイダルパイライトは, メタン湧水由来の自生炭酸塩中から頻繁に報告されてい る (Judd and Hovland, 2007 など).

自生炭酸塩の炭素と酸素の安定同位体比

自生炭酸塩の炭素と酸素の安定同位体比の測定値を以 下に議論する.

炭素安定同位体比

炭素安定同位体比は、Cb5が-22.60‰,Cb9が -30.66‰,Cb10が-31.20‰,Cb11が-33.31‰であっ た(表3).日本の化学合成化石群集と共産する自生炭酸 塩の炭素安定同位体比は-60‰から-20‰の値を示し (Majima *et al.*,2005),産地5下部の自生炭酸塩の炭素安 定同位体比は、この範囲に含まれる.

冷湧水場の自生炭酸塩の炭素安定同位体比は、間隙水 の溶存無機炭素の炭素安定同位体比を反映する.溶存 無機炭素の炭素安定同位体比は, 有機物の微生物分解 (-110‰~-50‰: Whiticar, 1999) や熱分解 (-50‰ ~-20‰:Whiticar, 1999) 起源のメタンの酸化由来, 有 機物分解由来(平均-25%: Hoefs, 2004), 海水由来(約 0%: Hoefs, 2004), メタン発酵やCO2還元の際の残留由 来 (5‰~24‰: Campbell, 2006) の炭酸化学種の混合に よって規制される. 測定した4試料のうち, -30%以下の 3試料の炭素安定同位体比は上記の各起源の炭素安定同 位体比から有機物の微生物分解や熱分解起源のメタンの 酸化の影響がないと説明が困難である.一方,-22.60% の炭素安定同位体比を示す試料は、有機物分解由来の溶 存無機炭素だけでも説明できるが、間隙水に一定程度の 海水起源の溶存無機炭素(約0%)などの混合を考えれ ば、メタン酸化の影響下で沈殿したとしても矛盾はない.

酸素安定同位体比

酸素安定同位体比は、Cb5が2.57‰、Cb9が2.15‰、

Cb10 が2.38‰, Cb11 が2.36‰であった(表3). 産地5 下部堆積時の水温を,間隙水の酸素安定同位体比を0‰ (SMOW)と仮定し,高MgカルサイトだけからなるCb11 とドロマイトだけからなるCb5の酸素安定同位体比から 計算した.計算には以下の式を用いた.なお,αは各炭 酸塩鉱物種と間隙水の酸素安定同位体分別係数,Tは絶 対温度(Kelvin),Mは高Mgカルサイト中のMgCO₃の mol%を示す.

高Mgカルサイト (Friedman and O'Neil, 1977)

 $1000 \ln \alpha_{\text{calcite-water}} (\delta^{18}\text{O vs SMOW}) = 2.78 \times 10^6 / T^2 - 2.89 + 0.06 M$

ドロマイト (Vasconcelos et al., 2005)

 $1000 ln \alpha_{dolomite-water} (\delta^{18}O \text{ vs SMOW}) = 2.73 \times 10^6 / T^2 + 0.26$

また,標準試料間の酸素安定同位体比の変換式は以下を 用いた (川幡, 2008).

 δ^{18} O vs PDB = (δ^{18} O vs SMOW - 30.86)/1.03086

計算の結果,堆積時の水温は,高MgカルサイトだけからなるCb11が8.8°C,ドロマイトだけからなるCb5が15.8°Cとなった.

堆積深度

貝化石からの推定

産地5下部の貝化石から堆積深度を推定した.産出した 二枚貝化石は、砂質泥岩中に散在的に産出し(図5.1b), 高い合弁率(88.5%)を示し(表2),合弁殻の接合面と層 理面のなす角度は60.4°~85.4°(測定個体数60)で,生 息時の姿勢に近い状態で保存されたと考えられ、殻の磨 耗などの証拠もないことから、これらの貝化石は死後移 動をほとんど被っていないと判断した.同定できた貝化 石は Ginebis argenteonitens, Neptunea kuroshio, Acharax johnsoni, Neilonella coix, Lucinoma spectabile, L. yoshidai である.

堆積深度は産出した貝化石のうち,現生種に同定され た種の生息深度の重複範囲から推定した.現生種の生 息深度は波部・伊藤 (1965),黒田ほか (1971),波部 (1977),肥後・後藤 (1993),橋本ほか (1995), Higo *et al.* (1999), Hasegawa (2001),奥谷ほか (2000) およ び奥谷ほか (2017)の深度データを使用した.各種の生 息深度は,これらの文献中で最も浅い深度と最も深い深 度の間とした (表2).

産出した現生種は、100m以深に生息する Acharax johnsoniが深度の上限で、522m以浅に生息する Ginebis argenteonitensが深度の下限となり、この深度範囲で、産 出した全種の生息深度が重複したことから、産地5下部 の地層は水深100mから522mの間の深度で堆積したと 推定できる.一方,Utsunomiya et al. (2015)は、三浦 半島北部の鮮新統から更新統より産出するツキガイ類あ るいはハナシガイ類が卓越する化学合成化石群集は水深 300mよりも浅い堆積深度を示す地層から産出し、オトヒ メハマグリ類が卓越する化学合成化石群集は水深400m より深い堆積深度を示す地層から産出することを示した. 次章で議論するように、産地5下部は、ツキガイ類とハ ナシガイ類が卓越する化学合成二枚貝化石の産出と自生 炭酸塩の炭素安定同位体比から化学合成化石群集と認定 できる.以上から産地5下部の地層は、産出する貝化石 から300mより浅く、100mよりも深い深度で堆積したと 考えられる.

自生炭酸塩の酸素安定同位体比からの推定

Cb5とCb11の酸素安定同位体比から計算された水温 は、それぞれ15.8°Cと8.8°Cであった.この水温を取り うる水深の範囲を、中津層群の現在の位置から最も近接 の海域である相模湾の現在の深度別水温分布から、当時 の気候や海流が現在とほぼ同じと仮定して推定を試みた. 相模湾の水温データは、日本海洋データセンター(2018) の北緯35度00分から北緯35度20分と、東経139度00分 から東経139度40分の点を結んだ範囲631地点の水深0m から350mの2000年から2013年に測定された全水温を 検討した.この範囲は相模湾の沿岸から湾中央部までの 海域を網羅的に含んでいる.また、日本海洋データセン ター(2018)の水温データには、年によって未測定の月



図8. 現在の相模湾の0mから350mの水温. 炭酸塩試料Cb11と Cb5の酸素安定同位体比から計算された水温は, それぞれ8.8°C と15.8°Cである.

があるが,月別のデータ数が最小でも1739件あることか ら季節による偏りはないと判断した.図8に深度0mか ら350mの間の全水温データを示した.

図8から酸素安定同位体比から推定された水温8.8°C は、大きな外れ値を除くと水深230mから240mよりも 深い水深の水温であることが分かり、また、水温15.8°C は水深150mから160mよりも浅い水深の水温であるこ とが分かった.

堆積深度の考察

産地5下部の地層は、貝化石から300mよりも浅く、 100mよりも深い水深で堆積したと推定された.一方、自 生炭酸塩の酸素安定同位体比から、現在の相模湾の海況 に基づいて推定すると、水深230mから240mよりも深 く、水深150mから160mよりも浅い深度と推定された (図8).

試料の炭素安定同位体比から,各試料は嫌気的メタン 酸化の影響を受けて沈殿したと判断され,湧水場の嫌気 的メタン酸化は海底面直下で起きていると考えられてい ることから (Pierre *et al.*, 2017など),沈殿時の間隙水水 温は海底面上と同様であると考えられる. Cb5とCb11の 層準の異なりは1.7mしかなく,いずれも砂質泥岩であ ることから,この区間での大きな堆積深度の変動は考え にくい.

Cb5とCb11で推定された水温の差は7.0°Cで、現在の 相模湾では、水深150mから160mと230mから240mの 水深区間の同一深度の水温変動は5.6°C程度である(図 8). 以上から, 産地5下部の地層は, 水深150mから240m の間の水深で堆積し、堆積時の海況は、現在の相模湾よ りもやや大きな水温変動があったと解釈した.一方,自 生炭酸塩の酸素安定同位体比は沈殿時の間隙水の水温だ けでなく、海水とは異なる酸素安定同位体比を持った湧 水の混合、嫌気的メタン酸化の影響によるpHの変動な どによっても変化することが知られている(Han et al., 2004など). また, ドロマイトの平衡式について, 高Mg カルサイトのようにMg含有量の補正が確立していない など,平衡式自体にも問題があるかもしれない.これら の要因による酸素安定同位体比への影響も考察する必要 があるが、本論の主題から逸脱すると思われるので、議 論は今後の課題としたい.

ッキガイ類あるいはハナシガイ類が卓越する群集は, 宮 崎県の上部鮮新統宮崎層群高鍋層(Majima *et al.*, 2003), 房総半島中部の中部更新統上総層群柿ノ木台層(柴崎・ 間嶋, 1997), 三浦半島北部の下部更新統上総層群小柴 層と大船層(間嶋ほか, 1996; 舘・間嶋, 1998; Kitazaki and Majima, 2003; Nozaki *et al.*, 2014)から報告されて いる.これらの群集は, 高鍋層で50m~150m(Majima *et al.*, 2003), 柿ノ木台層では100m~150m(柴崎・間 嶋, 1997), 小柴層と大船層では100m~300m(舘・間

Fig. 8. Water temperatures in water depths of 0–350 m observed in Sagami Bay. The water temperatures estimated from the stable oxygen isotope ratios of authigenic carbonates Cb11 and Cb5 are calculated to be 8.8°C and 15.8°C, respectively.

嶋, 1998; Kitazaki and Majima, 2003)の深度に生息していたとされている。以上から、中津層群の産地5下部の推定された堆積深度(150mから240m)は、上総層群や宮崎層群の群集の生息深度と調和的である。

冷湧水性化学合成化石群集の認定

冷湧水性化学合成化石群集の認定には,以下の基準の 組み合わせが有効とされている(Majima *et al.*, 2005 な ど). 1)化学合成細菌を共生する大型無脊椎動物化石の 排他的な産出. 2)著しく¹³Cに枯渇した自生炭酸塩の 共産. 3)化学合成に関連する化石群集の三次元的分布. 4)ポックマークやダイアピル状の堆積構造の存在. 5)断層,スランプ,土石流のような堆積構造との共産や テクトニクスに起因する湧水の導管の存在.

今回報告した各化石産地から産出する貝化石は、その 多くが合弁状態で生息姿勢を保持し、化学合成二枚貝が 79.7%から100%の占有率を示した.また,多くの産地 で、湧水場で普通に見られる高Mgカルサイトとドロマ イトの自生炭酸塩と共産し、産地5下部では¹³Cに枯渇し た自生炭酸塩 (δ^{13} C=-33.31‰~-22.60‰ vs VPDB) と共産する. さらに、 湧水性の 自生炭酸塩としばしば共 産するパイライト(Judd and Hovland, 2007 など)が普 遍的に観察された.産地5は、下部から上部へと約14m に渡って一連の露頭中に化学合成二枚貝の排他的産出層 が断続的に重なる (産地5の下部,中部,上部). 同様な 層理面に鉛直方向の配列は産地2下部から上部の化石の 産状にも認められる.これらは、上記の認定基準1)、2)、 3)を満たし、中津層群上部から産出したツキガイ類とハ ナシガイ類を主とする化石群集はメタン冷湧水に依存し た化学合成化石群集と認定される.

謝辞

本研究を進めるにあたり,様々なご支援をいただいた 以下の方々に厚く御礼申し上げます.辻 健太氏,南條 雄大氏,宇都宮正志博士,楠 稚枝博士,野崎 篤博士, 芳賀拓真博士,河潟俊吾教授,和田秀樹名誉教授,菊池知 彦教授,下出信次准教授,ジェンキンズ・ロバート准教 授,天野和孝教授,佐藤慎一教授,守屋和佳准教授,石 川正弘教授,和仁良二准教授,山本伸次准教授,諸隈暁 俊氏,古澤明輝氏,泉水友裕氏,市村俊樹氏,菅野 健 氏,田辺和泰氏,森山達哉氏,市川智大氏,清水秀倫氏, 中谷是崇氏,吉岡七海氏.研究経費の一部は,横浜国立 大学環境情報研究院共同研究推進プログラムを使用した.

文献

青池 寛, 1999. 伊豆衝突帯の構造発達. 神奈川県立博物館調査 研究報告(自然科学), (9), 113–151.

- 馬場勝良,1992.神奈川県北部中津層群の貝化石群.瑞浪市化石 博物館研究報告,(19),529-541.
- Campbell, K. A., 2006. Hydrocarbon seep and hydrothermal vent paleoenvironments and paleontology: Past developments and future research directions. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 232, 362–407.
- Dickson, T., 1990. 6. Carbonate mineralogy and chemistry. In Tucker, M. P. and Wright, V. P., eds., Carbonate Sedimentology, 284–313. Blackwell Scientific Publications, Oxford London.
- Friedman, I. and O'Neil, R. J., 1977. Compilation of stable isotope fractionation factor of geochemical interest. *In Fleischer, M., ed., Data of Geochemistry sixth edition,* 1–117. USGS professional paper 440–KK, Washington.
- 波部忠重, 1977. 日本産軟体動物分類学 二枚貝綱/掘足綱. 372p., 図鑑の北隆館,東京.
- 波部忠重・伊藤 潔, 1965. 原色世界貝類図鑑(I) 北太平洋編. 176p., 保育社, 大阪.
- Han, X., Suess, E., Shahling, H. and Wallmann, K., 2004. Fluid venting activity on the Costa Rica margin: new results from authigenic carbonates. *International Journal of Earth Sciences* (*Geologische Rundschau*), 93, 591–611.
- Hasegawa, K., 2001. Deep-Sea gastropods of Tosa Bay, Japan, collected by the R/V Kotaka-Maru and Tansei-Maru during the years 1997–2000. *National Science Museum Monographs*, 20, 121–165.
- 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湧水帯生物群集の観察.JAMSTEC 深海研究,(11),211-217.
- Heiken, G. and Wohletz, K., 1985. *Volcanic Ash*. 246p., University of California Press, Berkeley and Los Angeles, California.
- 肥後俊一・後藤芳央, 1993. 日本及び周辺地域産軟体動物総目録. 693p., エル貝類出版局, 八尾.
- Higo, S., Callomon, P. and Goto, Y., 1999. Catalogue and Bibliography of the Marine Shell-bearing Mollusca of Japan. 749p., Elle Scientific Publications, Yao.
- Hoefs, J., 2004. Stable Isotope Geochemistry, Fifth Revised and Updated Edition. 244p., Springer-Verlag, Berlin.
- Ito, M., 1985. The Nakatsu Group: A Plio-Pleistocene transgressive nearshore to slope sequence embracing multiple slump scars in southeastern margin of the Kanto mountains, central Honshu, Japan. Journal of the Geological Society of Japan, 91, 213–232.
- Judd, A. and Hovland, M., 2007. Seabed Fluid Flow. 475p., Cambridge University Press, New York.
- 金井憲一,2001. 中津層群塩田層から産出した二枚貝化石 Lucinoma spectabilis と有孔虫化石. 相模原市立博物館研究報告,(11), 105–125.
- 川幡穂高, 2008. 海洋地球環境学. 269p., 東京大学出版会, 東京.
- 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.
- 小島伸夫, 1955. 中津累層に含まれる貝化石群について. 地質学 雑誌, 61, 449-456.
- 黒田徳米・波部忠重・大山 桂, 1971. 相模湾産貝類. 741p., 丸 善株式会社, 東京.
- Lumsden, D. N., 1979. Discrepancy between thin-section and X-ray estimates of dolomite in limestone. *Journal of Sedimentary Petrology*, 49, 429–436.
- 間嶋隆一・舘由紀子・柴崎琢自, 1996. 横浜市の上総層群から発 見された現地性化学合成貝化石群集. 化石, (61), 47-54.
- Majima, R., Ikeda, K., Wada, H. and Kato, K., 2003. An outershelf cold-seep assemblage in forearc basin fill, Pliocene Takanabe Formation, Kyusyu Island, Japan. *Paleontological Research*, 7, 297–311.
- Majima, R., Nobuhara, T. and Kitazaki, T., 2005. Review of

fossil chemosynthetic assemblages in Japan. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology,* 227, 86–123.

- Moriya, K., Goto, A. S. and Hasegawa, T., 2012. Stable carbon and oxygen isotope analyses of carbonate using a continuous flow isotope ratio mass spectrometry. *The Science Reports of the Kanazawa University*, (56), 45–58.
- Naehr, H. T., Eichhubl, P., Orphan, J. V., Hovland, M., Paull, K. C., Ussler, W., III, Lorenson, D. T. and Greene, G. H., 2007. Authigenic carbonate formation at hydrocarbon seeps in continental margin sediments: A comparative study. *Deep-Sea Reseach part II Topical Studies in Oceanography*, **54**, 1268–1291.
- 長井洋一・和田秀樹, 1993. 微量ドロマイト試料同位体測定法の 開発と応用. 静岡大学地球科学研究報告, (19), 25-34.
- 中世古幸次郎・澤井 清, 1949. 中津層の化石有孔虫群について: 日本新生代微化石層序学的研究其の1. 地質学雑誌, 55, 205-210.
- 日本海洋データセンター, 2018. JODC オンラインデータ提供シス テム (J-DOSS). 海上保安庁海洋情報部, http://www.jodc.go.jp/ jodcweb/index j.html (Accessed 11 Feb., 2018).
- 野田啓司・小澤大成・奥村 清, 1999. 神奈川県の上部鮮新統中 津層群からの含ザクロ石テフラ層 Mk19の発見とその意義.第四 紀研究, 38, 65-73.
- Nozaki, A., Majima, R., Kameo, K., Sakai, S., Kouda, A., Kawagata, S., Wada, H. and Kitazato, H., 2014. Geology and age model of the lower Pleistocene Nojima, Ofuna, and Koshiba Formations of the middle Kazusa Group, a forearc basin-fill sequence on the Miura Peninsula, the Pacific side of central Japan. *Island Arc*, 23, 157–179.
- 奥谷香司(編), 2000. 日本近海産貝類図鑑. 1173p., 東海大学出版会, 東京.
- 奥谷喬司(編),2017. 日本近海産貝類図鑑 第二版.1382p., 東 海大学出版部,神奈川.
- 小沢 清・江藤哲人・大山正雄・長瀬和雄・松沢親悟, 1999. 温 泉掘削井による神奈川県中央部の地下地質. 神奈川県温泉地学研 究所報告, 30, 41–52.
- Pierre, C., Demange, J., Blanc-Valleron, M. and Dupré, S., 2017. Authigenic carbonate mounds from active methane seeps on the southern Aquitatine Shelf (Bay of Biscay, France): Evidence for anaerobic oxidation of biogenic methane and submarine groundwater discharge during formation. *Continental Shelf Research*, 133, 13–25.
- Rosenbaum, J. and Sheppard, S. M. F., 1986. An isotopic study of siderites, dolomites and ankerites at high temperatures. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 50, 1147–1150.
- 酒井豊三郎, 1990. 千葉県銚子地域の上部新生界―岩相・古地磁 気・放散虫化石層序―. 宇都宮大学教養部研究報告, (23), 1–34.
- 佐藤時幸・亀尾浩司・三田勲, 1999. 石灰質ナンノ化石による後期新 生代地質年代の決定精度とテフラ層序.地球科学, 53, 265–274.
- 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.
- 下釜耕太・鈴木毅彦,2006. 関東平野南西縁中津層群最上部に検 出された鮮新世テフラHSCとその意義.月刊地球,28,56-60. 鈴木宏芳,2002. 関東平野の地下地質構造.防災科学技術研究所

研究報告, (63), 1-19.

- 鈴木好一,1932.神奈川県厚木町北方の鮮新統.地質学雑誌,39, 49-70.
- 鈴木毅彦・中山俊雄,2007. 東北日本弧,仙岩地熱地域を給源とす る2.0 Maに噴出した大規模火砕流に伴う広域テフラ.火山,52, 23-38.
- Taira, A., Saito, S., Aoike, K., Morita, S., Tokuyama, H., Suyehiro, K., Takahashi, N., Shinohara, M., Kiyokawa, S., Naka, J. and Klaus, A., 1998. Nature and growth rate of the Northern Izu-Bonin (Ogasawara) arc crust and their implications for continental crust formation. *Island Arc*, 7, 395–407.
- 高橋雅紀, 2008. 3. 3 南関東. 日本地質学会, 日本地方地質誌3 関東地方, 166-193. 朝倉書店, 東京.
- 田村糸子・山崎晴雄・水野清秀,2007.千葉県銚子地域犬吠層 群下部のテフラ層序と年代――東海層群の指標テフラ層との対 比――.日本第四紀学会講演要旨集,37,66-67.
- 田村糸子・高木秀雄・山崎晴雄,2010. 南関東に分布する2.5 Maの 広域テフラ:丹沢 - ざくろ石軽石層. 地質学雑誌,116,360-373.
- 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.
- Taylor, J. D. and Glover, E. D., 2010. 5. Chemosymbiotic Bivalves. In Kiel, S., ed., The Vent and Seep Biota. Aspects from Microbes and Ecosystems, 107–135. Springer Dordrecht, Heidelberg London New York.
- 坪井辰哉・柏木麻美・宇都宮正志・和田秀樹・Satish-Kumar, M.・ 新妻信明, 2011. 静岡大学 MAT-250 質量分析計によるドロマイ ト試料の測定法. 静岡大学地球科学研究報告, (38), 33-46.
- 植木岳雪・原 英俊・尾崎正紀,2013. 八王子地域の地質.地域地 質研究報告(5万分の1地質図幅),137p.,産業技術総合研究所.
- Utsunomiya, M., Majima, R., Taguchi, K. and Wada, H., 2015. An *in situ* vesicomyid-dominated cold-seep assemblage from the lowermost Pleistocene Urago Formation, Kazusa Group, forearc basin fill on the northern Miura Peninsula, Pacific side of central Japan. *Paleontological Research*, **19**, 1–20.
- Vasconcelos, C., McKenzie, A. J., Warthmann, R. and Bernasconi, M. S., 2005. Calibration of the δ^{18} O paleothermometer for dolomite precipitated in microbial cultures and natural environments. *Geology*, **33**, 317–320.
- 和田秀樹・新妻信明・斎藤常正,1982. 超微量試料による炭素・ 酸素同位体比の測定について.静岡大学地球科学研究報告,(7), 35-50.
- Whiticar, J. M., 1999. Carbon and Hydrogen isotope systematics of bacterial formation and oxidation of methane. *Chemical Geology*, 161, 291–314.
- 瀬戸大暉は野外調査,試料採取,自生炭酸塩の解析およびデータ解 釈を担当した.間嶋隆一は野外調査およびデータ解釈を担当した. 彌勒祥一は自生炭酸塩の定量化実験および解析を担当した. 中村栄子は地球化学的データの解析および解釈を担当した.

(2018年5月23日受付, 2019年2月17日受理)

