

日本海側信越地域の中新統に見られる3タイプの冷湧水炭酸塩 Three types of cold-seep carbonates from Miocene sediments in the Shin'etsu basin of the Japan Sea region

宮嶋 佑典^{1*}; 渡邊 裕美子¹; ジェンキンズ ロバート²; 長谷川 卓²
MIYAJIMA, Yusuke^{1*}; WATANABE, Yumiko¹; JENKINS, Robert²; HASEGAWA, Takashi²

¹ 京都大学理学研究科, ² 金沢大学理工研究域

¹ Graduate School of Science, Kyoto University, ² College of Science and Engineering, Kanazawa University

前期～中期中新世の日本海拡大に伴い、急速な沈降によって堆積盆が形成された。これらの堆積盆に堆積し現在の日本海側陸域に露出している新生代の海成層からは、シロウリガイ類化石を伴う炭酸塩岩が産出し、日本海の形成以降各地で冷湧水が起っていたことが示唆されている。それらの一部はメタン湧水炭酸塩とされているもの（石村ほか、2005；Amano et al., 2010）、当地域のシロウリガイ類化石を伴う炭酸塩岩の多くは地球化学的に研究されていない。太平洋側の沈み込み帯とは異なるテクトニクス背景の下での、日本海における冷湧水システムの理解のためには、当地域における冷湧水の地球化学的・物理的な特徴や進化を明らかにすることが必要である。

本研究では、信越堆積盆の3カ所に露出する新第三系より産する、シロウリガイ類化石を含む炭酸塩コンクリーションの組織や炭素・酸素安定同位体比、バイオマーカー組成を調査した。その結果、それらは当堆積盆における以下の3つの異なるタイプの冷湧水を示唆することが明らかになった。

Loc. 1（松本市反町）では、保福寺川に露出する中部中新統別所層の暗灰色シルト岩中に、中～大礫サイズの小コンクリーションが合弁のシロウリガイ類化石 *Adulomya* sp. A と共に散在する。コンクリーションは主にミクライト質な低 Mg カルサイトからなる。ミクライトの低い炭素同位体比（ -34.6‰ ～ -23.6‰ ）とそこから抽出されたバイオマーカー pentamethylcosane (PMI) の存在から、これらのコンクリーションは嫌氣的メタン酸化起源の炭酸塩であり、拡散的なメタン湧水を示唆する。

Loc. 2（上越市中ノ俣）では、上部中新統能生谷層の細粒砂岩シルト岩互層が露出する中ノ俣川で、離弁で断片化したシロウリガイ類化石 *Adulomya* sp. C とシンカイヒバリガイ類化石 *Bathymodiolus akanudaensis* を含む巨礫サイズのコンクリーションが演者により発見された。コンクリーションは珪藻化石群集から能生谷層由来であり、針状のアラゴナイト結晶で縁取られた多数の脈状の空隙をもつミクライト質アラゴナイトからなる。それらの低い炭素同位体比（ -41.1‰ ～ -23.8‰ ）およびミクライト中の PMI と crocetane の存在から、コンクリーションは嫌氣的メタン酸化起源の炭酸塩であり、活発で速いメタン湧水により形成されたと考えられる。

Loc. 2 に近接した Loc. 3 では、上部中新統能生谷層の含油砂岩直下の暗灰色シルト岩中に、中礫サイズの小コンクリーションおよびパイプ状コンクリーションが合弁または離弁のシロウリガイ類化石 *Calyptogena pacifica* と共に含まれる。コンクリーションはミクライトと空隙を縁取る刃状または繊維状カルサイトからなる。それらの炭素同位体比は -24.8‰ ～ -13.2‰ であり、ミクライト中には PMI や crocetane のように嫌氣的メタン酸化古細菌に典型的なバイオマーカーが含まれていない。これらのコンクリーションは硫酸還元または石油起源の炭酸塩と考えられ、湧水場外の硫化水素に富む環境または石油湧出場を示唆するのかもしれない。これに関してはバイオマーカーの炭素同位体分析による検討が必要である。

信越堆積盆新第三系に見られる以上の3タイプの炭酸塩コンクリーションは、当地域における冷湧水の速度や強さ、起源の違いを表していると考えられる。そのような環境の違いは冷湧水に伴う生物相の違いにも表れている。中期～後期中新世の間、日本海地域は引張応力場にあったことをふまえると（Sato, 1994；Takano, 2002）、中期～後期中新世の引張応力場の日本海地域において、地球化学的・物理的に異なる冷湧水が空間的・時間的に近接して起っていたことが本研究から示唆される。

キーワード: 日本海, 信越堆積盆, 中新世, 冷湧水

Keywords: Japan Sea, Shin'etsu basin, Miocene, cold seep

四万十帯漸新統 - 中新統のメタン湧水：深海泥底環境におけるメタン湧水の形成過程 Oligocene-Miocene cold-seep from Shimanto accretionary complex: Focused on formation process of the cold-seep

木村 健太^{1*}; ジェンキンス ロバート¹; 長谷川 卓¹; 白井 孝明²
KIMURA, Kenta^{1*}; JENKINS, Robert¹; HASEGAWA, Takashi¹; SHIRAI, Takaaki²

¹ 金沢大学理工研究域自然システム学系, ² 室戸ジオパーク推進協議会

¹School of Natural System, College of Science and Engineering, Kanazawa University, ²Muroto Geopark Promotion Committee

日本からは数多くのメタン湧水性の化学合成化石群集の報告がなされているが (Majima et al., 2005), 湧水堆積物や化学合成化石群集の形成過程を含めた海底下断面の復元を行った研究例は少ない (Shibasaki and Majima, 1997; Tate and Majima, 1998; 延原ほか, 2008; Utsunomiya et al., 2015). 特に化学合成群集の主要構成分類群であるシロウリガイ類が出現した新生代以降の深海泥底環境におけるメタン湧水の海底下断面の研究例はほとんどない. 本研究では, 付加体堆積物である高知県四万十体南部の日沖コンプレクス中から報告された漸新統~中新統 (平ほか, 1980) のシロウリガイ類群集 (Matsumoto and Hirata, 1972) を産する岩体と岩体中の大型化石群集を対象に, その形成過程の復元を試みた.

岩体下部は泥岩と炭酸塩岩が混在し, 炭酸塩岩はマイクロスパークライトから成る. 中部から上部には泥岩がほぼなく, ほとんどが炭酸塩岩である. 上部はミクライト, 放射状カルサイト, マイクロスパークライト, スパークライトが入り乱れた構造 (ここではカオティック構造と呼ぶ) が見られる. 各炭酸塩鉱物組織の晶出順序はミクライト, 放射状カルサイト, マイクロスパーク, スパークライトの順であった. 炭酸塩鉱物の炭素同位体比は $-38.5 \sim -10.6 \text{ ‰}$ (vs. VPDB) であった. 大型化石は上部から産出し, ほとんどがシロウリガイ類, キヌタレガイ類, ハナシガイ類, ツキガイ類といった化学合成細菌を共生させた二枚貝類に分類された. 岩体に貝化石が密集していること, 現生・地質時代のメタン湧水堆積物で頻繁に見られるカオティック構造があること, 炭酸塩鉱物の低い炭素同位体比, 化学合成二枚貝類が豊富に産出すること岩体はメタン湧水性炭酸塩岩であることが明らかである. さらに, 観測事実から岩体の形成過程を以下の通りに復元した. ①メタン湧水活動がはじまり, それに伴う炭酸イオン・硫化水素が発生しはじめた. 海底面には硫化水素を利用するシロウリガイ類をはじめとした化学合成群集の形成がはじまった. ②メタンの湧出量増加に伴って炭酸イオンの供給量が増加し, 海底面直下 $\sim 2 \text{ m}$ ではミクライトが晶出した. ミクライトは未固結状態の時に湧水やガスによって変形・破壊を受け, カオティック構造が形成された. 次いで放射状カルサイトがミクライトを縁取るように晶出し固結した. ③メタン湧水の湧出が弱まり炭酸イオン供給量が低下, 岩体全体にマイクロスパークが沈殿した. ④残された間隙にスパークが晶出した.

下部更新統上総層群野島層に挟在する今泉砂礫岩部層から産出するシロウリガイ類化石 Vesicomylid fossils from the Lower Pleistocene Imaizumi Sandstone and Conglomerate Member

市村 俊樹^{1*}; 間嶋 隆一¹
ICHIMURA, Toshiki^{1*}; MAJIMA, Ryuichi¹

¹ 横浜国立大学
¹Yokohama National University

三浦半島北部には下部更新統野島層今泉砂礫岩部層が露出し(江藤, 1986), シロウリガイ類化石が産出することが知られている(Shikama and Masujima, 1969; 宇都宮ほか, 2014; 神保ほか, 2015). 今泉砂礫岩部層から, 宇都宮ほか(2014)は重力流堆積物にシロウリガイ類化石が産出することを報告し, 産出する貝化石の貝殻の配列とインプリケーションの傾向から, 北方向への古流向を推定し, 神保ほか(2015)はチャネル充填堆積物と解釈される層厚9mに達する礫質砂岩単層の底部付近からシロウリガイ類化石の破片を報告した. 本研究では宇都宮ほか(2014)(loc. 2)と神保ほか(2015)(loc. 1)の産地を含めた計4ヶ所の産地のシロウリガイ類化石の産状を記載し, 今泉砂礫岩部層で産出する全てのシロウリガイ類化石は堆積物重力流により生息場から運搬されて堆積したことを示す.

今泉砂礫岩部層は, 下部は砂岩層と泥質砂岩層の互層からなり, 上部にいくと次第に砂岩層が卓越し(locs. 2-4), 最上部は海底扇状地上に形成されたチャネル充填堆積物からなる(loc. 1). 全体として上方粗粒化する傾向を示すことから, 今泉砂礫岩部層は海底扇状地堆積物であると解釈できる.

Loc. 1はチャネル充填堆積物基底の礫質砂岩層の底部付近にシロウリガイ類化石の破片が浅海の軟体動物化石と共産することから(神保ほか, 2015), シロウリガイ類化石は浅海で発生した堆積物重力流に取り込まれて運搬されたと解釈できる. Locs. 2-4は海底扇状地のmid-fanと解釈される砂岩層と泥質砂岩層の互層部からシロウリガイ類化石が産出する. これらの産地では礫質砂岩から細粒砂岩へ級化する単層(loc. 2; 宇都宮ほか, 2014), または粗粒砂岩から中粒砂岩へと級化する単層(loc. 3), および粗粒砂岩から中粒砂岩へと級化する3枚の砂岩層(loc. 4)からシロウリガイ類化石が産出し, その多くは破片化しており, すべてが離弁殻であった. また, 殻の多くは層理面に対して平行に配列し, 殻の凸面の向きが下向きと上向きのものはほぼ同数であった. 冷湧水場を示唆する自生炭酸塩はいずれの産地でも見られなかった. これらの産状から, 産出するシロウリガイ類化石は生息場から運搬されて堆積したと考えられる.

上記に示したシロウリガイ類化石の産状から, 今泉砂礫岩部層から産出するシロウリガイ類化石は, 生息していた冷湧水場から堆積物重力流により運搬されたもので, 今泉砂礫岩部層堆積当時, 少なくとも現在の同部層露出域において湧水環境は存在しなかったと推定される.

キーワード: 上総層群, 更新世, シロウリガイ類, 三浦半島
Keywords: Kazusa Group, Pleistocene, Vesicomylid, Miura Peninsula

三浦半島北部に露出する鮮新統三浦層群池子層鷹取山火砕岩部層から産出する化学合成化石群集の産状 The mode of occurrence of a fossil chemosynthetic assemblage from the Pliocene Takatoriyama Pyroclastics Member

菅野 健^{1*}; 間嶋 隆一¹
KANNO, Ken^{1*}; MAJIMA, Ryuichi¹

¹ 横浜国立大学
¹Yokohama National University

三浦半島北部に位置する鷹取山の北西約350mの沢から、シロウリガイ類、ツキガイ類およびオウナガイ類が豊富に産出する露頭を発見した。露頭は高さ約5.5m、幅約9.5mからなり、鮮新統三浦層群池子層鷹取山火砕岩部層の凝灰質中粒砂岩層、粗粒砂岩層および礫岩層から主になり、凝灰質泥質砂岩層および粗粒火山灰層を一部に挟在する。露頭には層理に沿って自生炭酸塩が強弱を繰り返しながら発達する。

二枚貝化石は7層準に散在あるいは密集して産出する。化石密集部には以下の2つの産状が認められた。(1) 離弁個体が卓越し、少量の破片を伴うもの。(2) 合弁個体と離弁個体がほぼ同数産出するもの。貝化石の配列傾向を調べるため、露頭面において殻の接合面の方向を測定した。合弁個体の接合面方向にはばらつきがあるが、層理面に対してほぼ平行に配列した個体および垂直に近い配列をした個体が卓越する傾向が認められた。離弁個体はconvex-upとconvex-downのいずれについても接合面が層理面に対してほぼ平行に配列する個体が卓越する。

層理面に対して平行に配列した離弁個体と合弁個体は洗い出しを被ったと推定される。鷹取山火砕岩部層の堆積深度は500-1000mとされていることから(江藤ほか, 1987)、貝化石を洗い出した流れは底層流か堆積物重力流であると考えられる。また、層理面に対して垂直に近い姿勢をとる合弁個体は、粗粒な底質から想定される高エネルギーな堆積環境において自生状態を保持して保存された可能性がある。Utsunomiya et al. (2015)は池子層に整合に重なる(宇都宮ほか, 2012)、上総層群浦郷層から、*Calyptogena (Archivesica) Kawamurai* (Kuroda)を主とする現地性の冷湧水性化学合成群集の産出を報告した。浦郷層の群集は、無構造および斜交葉理の発達した砂岩層から、 $\delta^{13}\text{C}$ が著しく低い自生炭酸塩を伴って産出し、二枚貝は離弁個体が卓越し、一部の合弁個体の殻の接合面は層理面にほぼ垂直に産出する。Utsunomiya et al. (2015)は、層理面に垂直に産出する合弁二枚貝が生息姿勢を保持して化石化したと考えた。本報告における貝化石の産状は、浦郷層の産状に類似する。

キーワード: 化学合成化石群集, 三浦層群, 鮮新世, 池子層, 鷹取山火砕岩部層

Keywords: fossil chemosynthetic assemblage, Miura Group, Pliocene, Ikego Formation, Takatoriyama Pyroclastics Member

白亜紀後期冷湧水環境における棘皮動物の適応 Comparison of fossil echinoderms from Upper Cretaceous cold seep environments between Japan and central United States

加藤 萌^{1*}; 大路 樹生²
KATO, Moe^{1*}; OJI, Tatsuo²

¹ 名古屋大学大学院環境学研究科, ² 名古屋大学博物館

¹Graduate School of Environmental Studies, Nagoya University, ²Nagoya University Museum

棘皮動物は海洋無脊椎動物の中でも主要なグループであり、特に深海域では生物量でみてもかなりの割合を占めている。しかし熱水噴出孔やメタン湧水域といった化学合成生態系が発達するような場所では、棘皮動物がその生態系の一部として報告されることはほとんど無かった (Grassle 1985; Laubier 1989; Desbruyères et al. 2006)。しかし近年では、熱水噴出口およびメタン湧水の周囲から固有種と考えられるクモヒトデやナマコなどの生息が確認されており (Pawson and Vance, 2004; Stöhr and Segonzac, 2005)、化学合成生態系に含まれる棘皮動物の存在が少しずつ知られるようになって来ている。しかしその詳しい生態や、どのようにして棘皮動物が熱水噴出孔やメタン湧水環境に進出していったかはわかっていない。そこで本研究では、棘皮動物のメタン湧水環境へ進出過程を、また当時の棘皮動物がどのような生態をしていたのかを、古生物学的研究から明らかにすることを目的としている。

メタン湧水跡を示す炭酸塩岩露頭からの棘皮動物化石の産出は、現在数か所報告されている (Gaillard et al., 2011; Landman et al., 2012)。このうち、アメリカ・サウスダコタ州と日本・北海道の2地点においてフィールド調査を行い、採取した化石を用いた。本発表ではその2地点を比較し、メタン湧水域に生息していたと考えられる棘皮動物の地域差と、そのような差が生まれた原因を議論する。

サウスダコタの上部白亜系の露頭からは、少なくとも4綱5種の棘皮動物化石が得られた。棘皮動物のうちで最も多く産出するのはウミユリ、次いでウニである。特にウミユリに関しては、他で見られない特異な形態を持つことから、メタン湧水という特殊な環境に適応進化した可能性が考えられる。一方北海道の同じく上部白亜系では、メタン湧水に関わる炭酸塩岩は転石としてのみ見つかり、チューブワームの密集する転石にウミユリの茎の化石が共産する。北海道のウミユリは周囲の堆積物から産出する通常のゴカクウミユリとほぼ変わらない形態をしており、形態観察だけではメタン湧水との関わりを推察することは困難である。

そこで、棘皮動物の骨格の炭素安定同位体比 ($\delta^{13}\text{C}$) を計測し、周囲の堆積物、炭酸塩、化石と比較することで、棘皮動物の殻形成にメタン湧水のメタンはどの程度関わっていたのかを考察した。その結果、サウスダコタ・北海道共に、ウミユリに関しては基質であるメタン湧水の炭酸塩と同程度かそれ以下の値を示した。 $\delta^{13}\text{C}$ 値から、サウスダコタ・北海道共に、ウミユリはメタン湧水とある程度の関わりをもって生活していたことが示唆される。以上より、少なくともウミユリに関しては、メタン湧水に関連した生活をしていたものの、形態変化を伴うものと伴わないものがあったことが考えられる。これらのウミユリが化学合成生態系の中でどのような振舞いをしていたのか、 $\delta^{13}\text{C}$ 値以外の手法で探っていく必要がある。

キーワード: 化学合成生態系, 冷湧水, 棘皮動物, 古生態, 炭素安定同位体比

Keywords: chemosynthesis community, cold seep, echinoderms, paleoecology, stable carbon isotope

シチヨウシンカイヒバリガイ共生系は実験室でも化学合成できた！ Confirmation of chemosynthetic activities of *Bathymodiolus septemdierum* through laboratory culture

長井 裕季子^{1*}; 豊福 高志¹; 野牧 秀隆¹; 力石 嘉人¹; 和辻 智郎¹; 生田 哲郎¹; 高木 善弘¹;
吉田 尊雄¹; 滋野 修一¹; 井上 広滋²; 小西 正朗¹
NAGAI, Yukiko^{1*}; TOYOFUKU, Takashi¹; NOMAKI, Hidetaka¹; CHIKARAISHI, Yoshito¹; WATSUJI, Tomoo¹;
IKUTA, Tetsuro¹; TAKAKI, Yoshihiro¹; YOSHIDA, Takao¹; SHIGENO, Shuichi¹; INOUE, Koji²;
KONISHI, Masaaki¹

¹ 海洋研究開発機構, ² 東京大学, ³ 北見工業大学

¹Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology (JAMSTEC), ²University of Tokyo, ³KITAMI Institute of Technology

熱水噴出域では、海底面に染み込んだ海水が熱源であるマグマによって加熱され上昇する。熱水には火山ガスの形で放出されるマグマ由来の二酸化炭素、メタン、二酸化硫黄、硫化水素(H₂S)などが溶解して噴出される。日本列島周辺にも多くの熱水噴出域が発見されており、これに伴う深海化学合成生態系の成立や、その構成生物の生理・生態に関する研究を推進する上で、絶好のフィールドを提供している。深海化学合成生態系には化学合成独立栄養細菌と共生関係を持つ動物が生息していることが知られている。本研究で用いたシチヨウシンカイヒバリガイはエラ上皮細胞内に硫黄酸化細菌を共生させており、共生細菌は熱水に含まれるH₂Sを利用しエネルギーを作り出し、二酸化炭素から有機物を合成していると考えられている。しかし、このような共生関係の構築、維持機構は実験室での再構成が困難であるため、十分解明されていない。これらの共生メカニズムを詳細に解明するためには、共生関係を維持したまま飼育し、環境パラメーターに対する宿主や共生細菌の応答を詳細に観察することが極めて重要である。そこで本研究ではH₂Sを添加維持できる水槽(小西&和辻, 特許 2011-219498)を用いてシチヨウシンカイヒバリガイを飼育し、同位体実験により、共生細菌を介した無機炭素の取り込み量を指標として、飼育環境の適性を検証した。

飼育に用いた個体は2012年4月及び2013年3月、2014年4月に実施された研究船「なつしま」による航海で無人探査機「ハイパードルフィン」により採取した。本航海では伊豆小笠原弧明神海丘水深1224-1285mからシチヨウシンカイヒバリガイを採取し、現場の水温(約4℃)に保ったまま陸上実験室に持ち帰った。実験室では、まず硫化水素を継続的に供給できる硫化水素添加水槽に個体を入れ3ヶ月及び14ヶ月間飼育した。コントロール実験として、採取直後の個体ならびにH₂Sを添加しない条件で3ヶ月飼育した個体を用いた。過去の知見から、H₂Sを添加しないで飼育した個体は3ヶ月で共生細菌がなくなることが知られている(Inoue et al., 2012)。そこで、飼育中の共生細菌と宿主の代謝能力を評価する為に無機炭素取り込み実験を行った。実験では、¹³C 標識重炭酸ナトリウムを添加した海水で満たしたガラス瓶に、シチヨウシンカイヒバリガイを1個入れた。逐次的に硫化水素を添加しながら同位体存在下で14日間飼育後、共生細菌が存在するエラ組織を用いたエラ及び、共生細菌が存在しないとされるアシ組織を用いた同位体分析、エラ組織を用いた菌叢解析並びに Fluorescence *in situ* hybridization(FISH) 法による組織切片の観察を行なった。菌叢解析は16SrRNAをPCR増幅し、クローニングした後、クローンを網羅的にシーケンス解析した。FISH法を用いた組織観察には共生細菌の16SrRNAに特異的なプローブを使用した。

採取直後の個体、硫化水素存在下で飼育した個体から同種と判断できる共生細菌のみが検出され、宿主特異的な化学合成独立栄養細菌を維持していた。一方H₂Sを添加せず飼育した個体のエラからは細菌のDNAは検出されなかった。FISH法においても共生細菌の増減があるものの、菌叢解析を支持する結果が得られた。また全ての個体のエラ組織とアシ組織について、有機物の炭素同位体比を分析したその結果、H₂Sを添加した条件で、有意に高く同位体ラベルした炭素が有機炭素として取り込まれていることが確認された。以上のことから生息現場から採取されて14ヶ月以上経っていても、硫化水素添加水槽で飼育することによって共生細菌が保持され炭素固定能が維持されることがわかった。H₂Sにより無機炭素取り込みが促進されることが示唆された。その上、シチヨウシンカイヒバリガイ共生細菌が固定した炭素を宿主へ受け渡し、宿主がそれを利用し、体を構成していることがわかった。本実験結果は硫化水素添加水槽で飼育した場合にシチヨウシンカイヒバリガイの共生細菌を機能的な状態で保持することができることができ、実験室内でもシチヨウシンカイヒバリガイを化学合成させることができることが示めされた。また、組織に取り込まれた¹³Cを化合物ごとに分析したところ、脂肪酸の中に含まれていた。この結果はシチヨウシンカイヒバリガイの共生細菌が固定した炭素を宿主へ受け渡し、宿主がそれを利用し体を構成していることを示唆している。

これらの結果から、硫化水素添加水槽で飼育することにより、実験室内でシチヨウシンカイヒバリガイ並びに共生細菌の機能を維持再現できることが実証された。

キーワード: 深海生物, 化学合成生態系

Keywords: deep-sea biology, chemosynthetic ecosystem