

機関番号：13801

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2011～2013

課題番号：23540548

研究課題名(和文)メタン湧水場の地下断面を復元する～化学合成群集が指標する湧水のさまざまな活動様式

研究課題名(英文)Reconstruction of sub-bottom section of geologic methane-seep site - variety of seep activity indicated by fossil chemosynthetic communities

研究代表者

延原 尊美 (Nobuhara, Takami)

静岡大学・教育学部・教授

研究者番号：30262843

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,800,000円、(間接経費) 1,140,000円

研究成果の概要(和文)：北海道の始新統幌内層および中新統望来層を対象に、シロウリガイ類化石を産出するメタン湧水性石灰岩体の規模、形状、岩石学的な特徴、内部組織、化石産状について調査し、当時の深海のメタン湧水場における地下断面を復元した。その結果、幌内層の湧水は高間隙水圧による破碎流動を伴い垂直な脈に集中するのに対し、望来層の湧水は破碎流動を伴わない拡散的な滲み出しであることが明らかとなった。またシロウリガイ類が湧水活動のさまざまな様式に対して広範な適応性を有していることも示された。この湧水利用についての適応性はシロウリガイ類の高い移動能力と関係しており、新生代以降に爆発的な繁栄を遂げた重要な背景と考えられる。

研究成果の概要(英文)：This study made clear sub-bottom cross-sections of the geological past methane-seep sites in the Eocene Poronai Formation and the Miocene Morai Formation, both of which are bathyal siltstones yielding abundant vesicomyid fossils in Hokkaido, north Japan. Detail observations of their mode of fossil occurrences and seep-carbonate blocks (scale, shape, petrology, and internal textures) indicate that the two seep-sites are contrast in style of seepage activity. The Poronai seep is channelized focused-flow characterized by its fractured lithology due to fluid overpressure, whereas the Morai seep is diffusive and static through interspaces of clotted-mud, without such fracturing texture. These results show that chemosynthetic vesicomyid clams have utilized both types of seepage. This is related with their high mobility in semi-infaunal life position, which can provide a key to solve the question: why they have made success and flourish in the post-Cretaceous age.

研究分野：数物系化学

科研費の分科・細目：地球惑星科学・層位・古生物学

キーワード：化学合成生態系 メタン湧水 深海生態系 古生態学

1. 研究開始当初の背景

海底の湧水活動から放出されるメタンは強力な温室効果ガスであり、気候変動の要因として注目されている。しかしながら、湧水が海底に放出される直前の素過程（湧水活動に伴う堆積物の組織の変化や初期統成作用による湧水活動の変化）は未詳である。潜水艇を用いた深海調査では、音波探査などの物理的手法やプッシュコア等を用いた地球化学的分析により、地下構造や湧水活動に伴う元素の挙動が復元されているが、地下断面の組織をマイクロメートルからメートルオーダーで連続的に観察することは困難である。

一方、日本列島にはメタン湧水性化石群集が白亜紀以降の地層の多数の産地から報告されており、様々な規模・形状の湧水性石灰岩体が認められている。湧水性石灰岩体は、湧水活動時（あるいは埋積後の早い段階）に固結形成されることから、湧水場の地下断面の様子を保存しており、湧水活動に伴う堆積物組織の時間的・空間的な変化を観察できる。

研究代表者らは平成 18~21 年度の科学研究費基盤研究(B)において、山塊を形成するような、直径 20 m 以上におよぶ大規模石灰岩体について、その内部構造を記載した。その結果、間隙水圧の上昇に伴う破碎・流動が繰り返されていたこと、地下断面の様態と表層の生物群集の間に対応関係があることが認められた。しかしながら、直径数 m にも及ばない小規模石灰岩や、レンズ状を呈する中規模石灰岩については、その内部構造はほとんど研究されていない。中・小規模の石灰岩体についても、湧水の経路や性質、化石群集の特徴を明らかにし、大規模石灰岩でのこれまでの成果と比較することで、湧水挙動の要因や生物群集との対応について考察を深めることができる。

2. 研究の目的

本研究では、中・小規模の湧水性石灰岩を主な対象として、以下の 2 点を目的とした。

(1) 石灰岩体の内部構造（岩相や岩石組織の変化、安定同位体比などの地球化学的な特徴）を周囲の地質構造・堆積構造とともに明らかにし、それぞれの石灰岩の形成過程や湧水の活動様式を考察する。

(2) 石灰岩体の内外に伴われる化石群集の種構成や産状を調査し、中・小規模の石灰岩をもたらしした湧水場の性質と化学合成群集の群集構造との対応関係を明らかにする。群集を構成する二枚貝類の行動様式についても調査・検討し、他の岩体のデータもあわせることで、化学合成群集の地下構造に対する指標性を提示する。

3. 研究の方法

中・小規模の石灰岩体の内部構造について

は、北海道の始新統幌内層および中新統望来層を調査対象とした。双方とも陸棚斜面に堆積した半深海成の泥岩からなり、シロウリガイ類化石を多産する点で共通する。また、大規模石灰岩体としては平成 18~21 年度に調査を行った長野県の中新統別所層および高知県の白亜系中村層を対象に、本研究で明らかにされた中・小規模石灰岩体の岩相や岩石組織と比較を行った。なお、パイプおよびチューブ密集型の石灰岩体についても、茨城県の中新統九面層および沖縄本島の鮮新統新里層を対象に予察的な比較を行った。

(1) 幌内層および望来層の石灰質岩体については、露頭面の詳細な観察に基づき、石灰質岩体内外の岩相分布を、化石産状とあわせて詳細なスケッチに記録した。また石灰質岩体については、網羅的に岩石試料を露頭表面から採取した。なお、望来層については海崖面上部に石灰質岩が露出するため、懸垂下降を行い露頭面の直接観察を行った。

(2) 採集した岩石試料については、研磨断面および岩石薄片を作成し、肉眼から偏光顕微鏡までマルチスケールでの観察を行った。一部の試料については、炭素・酸素安定同位体比測定用とした。なお、間隙水の化学的性質や挙動を復元するにあたっては、海洋調査による基礎研究の側面からも検討を進めた。

(3) 化石産状に関しては、露頭面における合弁率、埋没姿勢の計測、保存状況の観察を行った。特に、望来層については 30cm 立方のブロック標本も採集し、室内でシロウリガイ類殻の密集する海底面の俯瞰をスケッチから復元し、さらにブロックを切断して密集層間の岩石組織の観察も行った。なお、化石産状の解釈にあたっては、埋積時におけるシロウリガイ類の行動や脱出能力に関する情報が必要なため、海洋研究開発機構に保存されている初島沖の現生シロウリガイ類コロニーの画像解析やシロウリガイ類の生貝の人工埋積実験を共同研究として行い、参考データとした。

4. 研究成果

(1) 始新統幌内層の湧水性石灰岩は、一つの岩体が直径 1m ほどで不規則な形状を呈し、それらが塊状泥岩中に層理面に対して垂直に 5 m 以上にわたって断続的に累重する。露頭観察と研磨断面試料の検討の結果、岩体内部のほとんどは、高間隙水圧によって半固結状態にあった泥質堆積物が流動・破碎をうけた岩石組織を示し、多数の炭酸塩脈が発達することが判明した。一方、岩体縁辺部においては、黒色炭酸縁脈と泥質部とが指交する組織が認められ、間隙水に富む部分が周囲の泥質堆積物に侵入していったことがわかった。また、シロウリガイ類等の化学合成二枚貝は高い合弁率を示すこと、それらの石灰岩体を中

心に幅数 m 以内に限定して産出することが確認され、原地性と判断された。これらのことから、化学合成群集を支えた幌内層の湧水は、幅数 m の局所的な範囲であるにも係らず、長期にわたって高間隙水圧による流動経路が継続していたことが明らかになった。

(2) 中新統望来層の湧水性石灰質岩は、シルト岩の硬軟互層中に、最大直径 10 m ほどのレンズ状を呈して挟在する。露頭観察および研磨断面試料の検討の結果、石灰質岩のほとんど全ては、塊状泥質堆積物がそのまま石灰化したドロマイトからなること、直径数 mm ~ 1cm 程度の粒状泥塊の間隙がしばしば黒色炭酸塩で置換されていることが判明した。なお、幌内層で見られたような流動・破碎組織は石灰質岩体および周囲の泥岩ともにほとんど発達しないことも確認された。

石灰質岩体の直下から産する直径数 cm のノジュールは -50% 程度の軽い炭素同位体比を示し湧水の影響があったことが確認されている。一方、岩体主部は +1 ~ +20% 程度の値を示し、地下深部でのドロマイト化の影響が考えられる。シロウリガイ類の化石がレンズ状石灰質岩の中位に密集していることを考え合わせると、この石灰化はシロウリガイ類生息時の堆積物直下で進行したのではなく、コロニー埋没後に地下深部で起きたドロマイト化によるものであると考えられる。

シロウリガイ類化石の密集層は、層厚 10 ~ 50 cm 程度で、石灰質岩だけでなく側方の泥岩中にも層理面にそって 20 m 以上にわたって断続的に連続する。産状観察の結果、合弁率が高いことや、殻が開いた状態で分離しないまま殻内面を上にして積み重なっている状況から、原地性のコロニーであることが確認された。化石密集層のブロックを切断研磨した結果、密集層を覆う泥岩部基質はスランプ褶曲状の変形を示し、泥質岩片の偽礫が混在することがわかった。これらのことから、シロウリガイ類のコロニーは粘性度の高い泥質な重力流によって急速埋積されたことが明らかとなった。

以上のことから、望来層の湧水活動は広範囲に拡散する非破碎的な滲みだしであったこと、湧水場は幾度となく泥質な重力流堆積物によって埋積をうけたこと、それにも係らず層厚にして 20 m 以上にわたって湧水は復活・継続していたことを示すことができた。

なお、海底表層付近では拡散的な性質をもつ湧水であることが判明したものの、地下深部からの経路についてはさらなる検討が必要である。露頭面には無数の高角度正断層や堆積同時性の円弧滑り断層、網目状の破碎帯が認められるが、それらの破碎帯中には石灰質コンクリーションが形成されていることがある。これらのコンクリーション中に吸着されているガスの同位体比分析等を通して湧水経路をさらに特定していくことが今後

の課題である。

(3) 以上の成果を、他の石灰岩体と予察的に比較した結果、泥質堆積物中のメタン湧水の挙動は以下の 2 つのタイプに分類できる。

高間隙水圧による破碎・流動を伴う局所・集中的なタイプ(大・小規模の不規則塊状石灰岩: 北海道の中新統幌内層, 長野県の中新統別所層), 破碎・流動を伴わない拡散的な滲み出しタイプ(レンズ状石灰岩体: 北海道の中新統望来層)。同じ化学合成二枚貝でも、固着生活者であるシンカイヒバリガイは前者のタイプの一部に分布がほぼ限定されるが、半内生生活者であるシロウリガイ類は、このいずれの湧水タイプにも適応・繁栄していることが示された。

湧水性石灰岩体の岩石組織に関する研究は国内外でこれまでも数多く行われてきたが、岩体内での岩石組織の分布を化石産状とあわせてくまなくマッピングした例は少ない。本研究の成果の意義はそのようなマッピングを通して初めて、湧水場における地下のバリエーションの実体を明らかにし、生物群集との対応性を示した点にある。

(4) 湧水様式に対するシロウリガイ類の広範な適応性については、海洋研究開発機構との共同研究を通して、シロウリガイ類の行動とくに移動能力という観点からもあわせて検証を試みた。初島沖シロウリガイ類コロニーの長期観測画像の解析や、ROV かいこう II を使用したシロウリガイ類の人工埋没実験により、急速埋積からの脱出や別の湧水スポットへの移動に関して高い能力を持つことが確認でき、学会発表を行った。

シロウリガイ類が何故に新生代に入ってから爆発的に進化したのかという問題は、化学合成生態系の進化における第 1 級の未解決課題であるが、その鍵は上記のようなシロウリガイの広範な湧水利用能力にあることが見えてきた。今後、シロウリガイ類の行動様式とあわせて、本研究で認定されたような湧水挙動を化石記録にたどることができれば、従来にない観点から深海生物の進化を語る事ができる。

(5) 茨城県の新統九面層や沖縄県の鮮新統新里層で見られる棲管を鋳型にしたチューブ状コンクリーションは、生物活動自体が湧水経路をリレーしてゆくといった第 3 の湧水タイプと考えられる。今回の予察的な調査では、周囲の堆積物の粒度が上記の 2 つのタイプよりも粗いことで特徴づけられることがわかった。しかしながら、破碎・流動組織の有無やシロウリガイ類の産出等については、露頭面における岩相マッピングを行ってさらに検討する必要がある。

5. 主な発表論文等
〔雑誌論文〕(計 3 件)

Ijiri, A., Ohtomo, Y., Morono, Y., Ikehara, M., and Inagaki, F., 2013. Increase in acetate concentrations during sediment sample onboard storage: a caution for pore-water geochemical analyses. *Geochemical Journal*, 47, 567-571. 査読有.

DOI:10.2343/geochemj.2.0272

Ishimura, T., Tsunogai, U., Hasegawa, S., Nakagawa, F., Oi, T., Kitazato, H., Suga, H., Toyofuku, T., 2012, Variation in stable carbon and oxygen isotopes of individual benthic foraminifera: tracers for quantifying the magnitude of isotopic disequilibrium.

Biogeosciences, 9, 4353-4367. 査読有.

DOI:10.5194/bg-9-4353-2012

Ijiri, A., Harada, N., Hirota, A., Tsunogai, U., Ogawa, N.O., Itaki, T., Khim, B-K., Uchida, M., 2012.

Biogeochemical processes involving acetate in sub-seafloor sediments from the Bering Sea shelf break. *Organic Geochemistry*, 48, 47-55. 査読有.

DOI:10.1016/j.orggeochem.2012.04.00

〔学会発表〕(計15件)

延原尊美・白鳥百合子・高田 光, メタン湧水性石灰質岩の比較解剖 - 始新統幌内層と中新統望来層の場合 - . 日本古生物学会 163 回例会 (九州大学), 2014.6.28(予定).

石村豊穂・角皆 潤・長谷川四郎・中川書子・大井剛志・北里 洋・菅 寿美・豊福高志, 底生有孔虫の炭素酸素安定同位体組成・"vital effect" の全体像を捉える～環境指標としての高精度化とその有効活用をめざして～. 日本地球化学会年会, 2013.9.11-13. 筑波大学.

Ijiri, A., Inagaki, F., Kubo, Y., Expedition CK09-01 and 906 Scientists. Biogeochemistry of the deep mud-volcano biosphere in the Nankai accretionary wedge. *Goldschmidt 2013*, 2013.8.26. Florence, Italy.

井尻 暁, 今野祐多, 川口慎介, 稲垣史生, 高井 研. 沖縄トラフ伊平屋熱水域の炭素循環. 日本地球惑星科学連合 2013 年大会, 2013. 5. 22. 幕張メッセ国際会議場, 千葉県.

延原尊美・早瀬磨菜・鈴木貴大・清家弘治・小栗一将, 相模湾初島沖のシロウリガイ類遺骸殻に残された捕食痕. 日本地球惑星科学連合 2013 年大会, 2013. 5. 22. 幕張メッセ国際会議場, 千葉県.

高田 光・延原尊美, 北海道の上部中新統望来層より産するシロウリガイ類化石群集の生息場復元. 日本地球惑星科学連合 2013 年大会, 2013. 5. 22. 幕張メッセ国際会議場, 千葉県.

延原尊美・早瀬磨菜・鈴木貴大・清家弘治・小栗一将, 初島沖のシロウリガイ類殻に残された十脚甲殻類による捕食痕. *ブルーアース 2013*, 2013.3.15. 東京海洋大学 (品川キャンパス), 東京.

延原尊美, 軟体動物化石の古生態学におけるマルチスケール・マッピング. 日本古生物学会 2012 年年会, 2012.6.30. 名古屋大学, 愛知県.

早瀬磨菜・延原尊美・鈴木貴大・岩瀬良一, 初島沖シロウリガイ類コロニーにおける動物行動学的観察. 日本地球惑星科学連合 2012 年大会, 2012.5.23. 幕張メッセ国際会議場, 千葉県.

石村豊穂, 微量炭酸塩の高精度安定同位体比分析とその応用研究. 国際サンゴ礁地球環境学ラボラトリー設立シンポジウム. 2012.4.16. 北海道大学, 北海道.

石村豊穂・鈴木 淳, 安定同位体比質量分析計 ISOPRIME を用いた高精度・高感度の炭素酸素安定同位体組成定量総合分析システムの開発. 地球化学会年会, 2011.9.16. 北海道大学, 北海道.

延原尊美・大捕由貴, 2011. メタン湧水性石灰岩の岩石組織から湧水挙動を復元する試みー長野県の中部中新統別所層を例にー. 日本地質学会第 118 年学術大会・日本鉱物科学会 2011 年年会合同学術大会, 2011.9.11. 茨城大学, 茨城県.

延原尊美, 湧水域ベントスの化石産状から動物行動学への展開ー古生物学者と生物学者の共同航海へ向けて. 日本地球惑星科学連合 2011 年大会, 2011.5.22. 幕張メッセ国際会議場, 千葉県.

ジェンキンスロバート, 野崎 篤, 宇都宮正志, 佐藤 圭, 延原尊美, 渡部裕美, 小栗一将, 清家弘治, カイム・アンドレイ, 佐藤瑞穂, 高橋正樹, 沼田章吾, 三本菅 優作, 新谷美久帆, 坂井三郎, NT10-19 Leg2 の調査概要: 海底下を包含したメタン湧水生態系の解明を目指して. 日本地球惑星科学連合 2011 年大会, 2011.5.22. 幕張メッセ国際会議場, 千葉県.

石村豊穂・角皆 潤・大井剛志・長谷川四郎・中川書子, 底生有孔虫の個体別安定同位体組成: 同位体非平衡の特徴. 日本地球惑星科学連合 2011 年大会, 2011.5.26, 幕張メッセ国際会議場, 千葉県.

〔図書〕(計0件)

〔産業財産権〕

出願状況 (計0件)

取得状況 (計0件)

〔その他〕

ホームページ等

とくになし

6. 研究組織

(1)研究代表者

延原 尊美 (NOBUHARA, Takami)
静岡大学教育学部・教授
研究者番号：30262843

(2)研究分担者

井尻 暁 (IJIRI, Akira)
独立行政法人海洋研究開発機構・高知コア
研究所・研究員
研究者番号：70374212

石村 豊穂 (ISHIMURA, Toyoho)
茨城工業高等専門学校・物質工学科・准教
授
研究者番号：80422012

(3)連携研究者

間嶋 隆一 (MAJIMA, Ryuichi)
横浜国立大学・教育人間科学部・教授
研究者番号：30202310

近藤 康生 (KONDO, Yasuo)
高知大学・理学部・教授
研究者番号：90192583

天野 和孝 (AMANO, Kazutaka)
上越教育大学・学校教育研究科・教授
研究者番号：50159456

(4) 研究協力者

ジェンキンス ロバート (JENKINS, Robert)
金沢大学・理工研究域自然システム学系・
助教
研究者番号：10451824