

## 科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成25年3月31日現在

機関番号：17102

研究種目：新学術領域研究（研究領域提案型）

研究期間：2008～2012

課題番号：20109004

研究課題名（和文） 大河の時間変動と熱水生態系の進化

研究課題名（英文） Evolution of TAIGA considered from geochronology and molecular genetics

研究代表者

石橋 純一郎（ISHIBASHI JUNICHIRO）

九州大学・大学院理学研究院・准教授

研究者番号：20212920

研究成果の概要（和文）：

「海底下の大河」の活動の時間変動を評価することを目的として、地球化学的解析と生物学的解析から年代情報を得る手法を確立した。地球化学的解析としては、熱水性鉱床から得られる熱水性鉱石に対して異なる原理に基づく複数の年代決定法を適用した。生物学的解析としては、様々な熱水域固有生物種に対して遺伝的情報ならびに生態群集遷移を解析して年代情報を得た。同一の海底熱水域からの試料採取を共同して行い、両者から得られる年代情報をすりあわせることで、熱水域生態系の発達と熱水活動の消長の関連を議論した。

研究成果の概要（英文）：

We conducted an interdisciplinarily study among geochemistry and biology, aiming to develop methods to obtain reliable age information which are useful for understanding evolution of activities of “subseafloor fluid flow system (Taiga) “. As geochemical dating techniques, a cross check between the ESR dating and U/Th series disequilibrium dating were conducted, which showed a good agreement. As biological methods, analysis of genetic deviations among local populations and divergence of speciation in faunal groups were examined. Comparison of age information obtained by two different methods provided important constraint for discussion on history and evolution of hydrothermal activities.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2008年度	38,600,000	11,580,000	50,180,000
2009年度	37,300,000	11,190,000	48,490,000
2010年度	17,800,000	5,340,000	23,140,000
2011年度	17,400,000	5,220,000	22,620,000
2012年度	12,100,000	3,630,000	15,730,000
総計	123,200,000	36,960,000	160,160,000

研究分野：地球化学

科研費の分科・細目：地球惑星科学・地球宇宙化学

キーワード：海洋化学、熱水鉱床、年代決定法、分子系統学、熱水域固有生物種

## 1. 研究開始当初の背景

「海底下の大河」の活動は安定して継続するものばかりではなく、時間変動に伴って性質が異なる多様な様相を示すことが、研究の

機会が増えるに従って明らかになりつつあった。しかし、過去の現象や活動の継続期間について年代情報を得る手段が乏しく、そのような議論が難しかった。

熱水鉱床から得られる熱水性鉱石を対象とする年代測定については、放射非平衡法を利用したいくつかの研究例があった。しかし、得られた年代情報が鉱物学的な解析と関連づけられていないために得られた年代情報の解釈ができない、といった問題があった。

熱水域固有生物種を対象とした遺伝学的解析については、主に生物地理学的な観点から研究が始められていた。しかし分子進化の相対的な前後関係についての情報しか得ることができない、といった問題があった。

本研究は、これらの二つの手法の改良を進め、さらに複数の手法を組み合わせて適用することによって、より精度の高い年代情報を得ることができるだろう、という着想のもとで提案されたものである。

## 2. 研究の目的

「海底下の大河」の活動について数年から数千万年にわたるタイムスケールでの時間変動を評価することを研究の目的とした。具体的な研究手法としては、「大河」の活動記録として海底面上に形成される熱水性鉱床と熱水域の生物群集に着目し、地球化学的な解析と生物学的な解析によって年代情報を取得する手法をそれぞれ確立することを目的とした。さらに対象調査海域を南部マリアナトラフと沖縄トラフに設定し、同一の熱水域から採取された試料に対して両者の解析を行うことで、「大河」の活動の時間変動に伴う熱水特性の変遷史と熱水域固有生物種の進化史の関連を議論することを目指した。

## 3. 研究の方法

### (1) 地球化学的解析法

種々の地球化学的年代測定法を熱水性鉱物試料に適用するために、試料処理法と分析法の開発および基礎検討を行った。

ESR法（電子スピン共鳴法）については、照射蓄積線量の測定精度、信号の安定性、などを検討し、この手法を用いた年代測定が実用的に可能であることを示した（Okumura et al., 2010）。さらに、 $\alpha$ 線吸収効率の検討（Toyoda et al., 2012）や海底面での年間放射線量の実測など、年代測定の確度を高めるための種々の検討を進めた。

U/Th放射非平衡法については、微量のU, Th核種を含む試料からの精度良い分析を行うために、既報を改良した化学処理法やマルチコレクター型ICP-MSを持ちいて行う同位体希釈分析法の開発を行った（Takamasa et al., 2013）。

K-Ar法については微小な鉱物から年代値を得るためのレーザー照射と組み合わせるシステムを構築した。

### (2) 生物学的解析法

熱水域固有生物種を対象とした分子系統解析を進めるに先だって、分子進化を調べる遺伝子マーカーを新たに開発した。特に、巻貝類を対象とした研究では、トリプトファン運搬RNA遺伝子の転移と複数のノンコーディング領域の生成が起きた事を明らかにし（図1）、従来の手法より約3倍の効率で情報を得る系を開発した（Hidaka et al., in press）。

また、群集遷移の時間スケールを決める重要な要素である幼生生態の解明を重点的に解明するために、熱水噴出域の近傍にプランクトンサンプラーの設置による浮遊幼生の大量採集を行って研究を効率的に進めた。また幼生の分散経路に関する議論を進めるために、幼生の耐圧能力を測定する実験系を確立した（Seo et al., in press）。

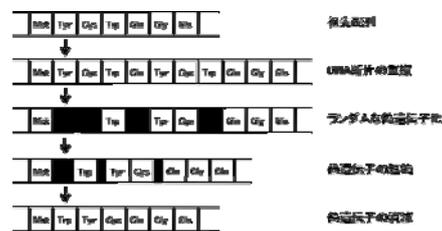


図1 アルビンガイ属とヨモツヘグイナ属で発見されたミトコンドリアゲノムの変化。現在、4番目の段階にある。

### (3) 熱水域からの共同試料採取

2011年度にはマリアナトラフ海域で、2012年度には沖縄トラフ海域で、潜航調査航海を実施して、それぞれの海域の複数の熱水活動域から系統的な試料採取を実施した。

## 4. 研究成果

### (1) 地球化学的解析法

熱水活動域から採取された熱水性沈殿物の塊をブロックに分割し、ブロック中に含まれる硫酸塩鉱物に対してESR法を、硫化鉱物に対してU/Th放射非平衡法を適用することで、年代決定のクロスチェックを行った（Takamasa et al., 2013）。この試料の鉱物組織観察からは、硫化鉱物と硫酸塩鉱物が交替しながら繰り返して成長していることが示されており、年代値に差が出ないことが期待されたが、実際に得られた年代値も比較的良好な一致を示した（図2）。熱水性鉱石試料を対象とした年代決定法のクロスチェックはこれまでに研究例がなく、本研究により初めて信頼性の高い年代値が得られることを示すことができた。

また塊の内側のブロックと外側のブロックの年代値を比較することで、熱水性沈殿塊の成長速度として1年間に0.1mm程度という値を得ることができた。さらに、このような連続的に成長している熱水性沈殿塊に放射

非平衡法による年代測定を適用する際には、半減期の短い核種の組み合わせでは、実際の年代より若い年代値が出てしまうことも示すことができた。

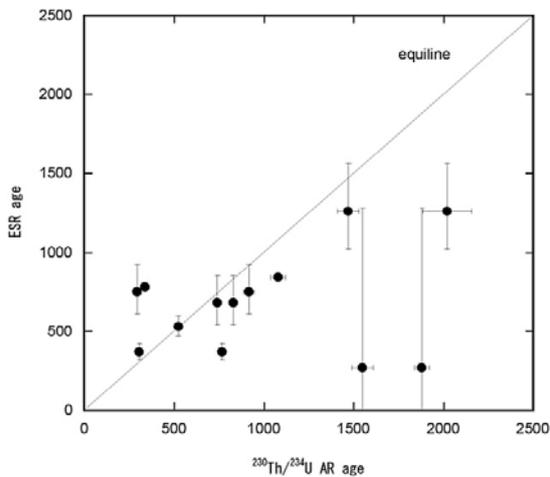


図2 同一試料に対してESR法とU/Th放射非平衡法を適用した結果 (Takamasa et al., 2013より)

## (2) 生物学的解析法

マリアナトラフのアルビンガイ集団を対象とした分子系統解析から、遺伝的特性と地理分布を異にする2つのグループから成る事が示され、両者の分岐は約90万年前で、20万年ごろに急速に個体数が増加したことが推定され、熱水活動の消長との関連性が示唆された (Hidaka et al., in prep.).

沖縄トラフの5ヶ所の熱水域の生物相の調査および生物採集からは、熱水域生物群集の多様性が、南部の熱水域でより高いことが示された。ただし、中部沖縄トラフの熱水域で遺伝的多様性を主要な動物種に対して網羅的に調べた結果では、種によって多様性にかなり大きな違いがあることも見出された。また、ハイカブリナ属巻貝類の分子系統および貝殻形態の解析から沖縄トラフ周辺の熱水域およびメタン湧水域に未記載種と考えられる4つの系統群が分布している事を明らかにし、その多様化過程と年代を推定した (Ogura et al., submitted).

幼生の生態の解析においては、生物学的に重要な新知見をいくつか得ることができた。南太平洋の熱水域の固有種であるヨモツヘグイニナの生活史特性を飼育実験等により解析し、これまでに知られていない幼生タイプを発見してワレン幼生として記載した (Raynold et al., 2010)。これは巻貝類で約1世紀ぶりの報告で、投稿雑誌の表紙を飾るなど多くの研究者の興味を集めた。熱水域固有の蔓脚類と近縁であるが固有でない種の幼生期の長さ水温の関係を比較する事

により、前者の幼生が熱水域に到達する可能性を高める適応に関する仮説を裏付ける結果を得た (Yorisue et al. 2013)。またプランクトンサンプラーによって得られた試料から、DNA バーコード解析によりアルビンガイの着底直前個体を特定することに成功し、高い幼生分散能力を裏付ける証拠を得た。

## (3) 熱水活動の時間変動に伴う変遷史と熱水域固有生物種の進化史の関連

マリアナトラフ海域では、南部マリアナトラフの3つの熱水域の熱水性鉱石の年代決定により、拡大軸から遠い熱水域ほど古い年代を示す傾向が得られた。この結果は、拡大軸上の熱水域は断層活動に伴い他の場所に移動しやすいのに対しオフリッジの熱水域は同一地点で継続する傾向が強い、という地質学的な予想と一致するものである。

しかし、熱水域間の距離が短いこともあり、3つの熱水域の間での生物種の進化段階を見いだすことはできなかった。今後、中部マリアナトラフの熱水域から鉱石試料を採取して解析することができれば、生物学的解析から示されたマリアナトラフ域全体に対する生物種の進化史を裏付けることができると考えられる。

沖縄トラフ海域では、地質学的観察から発達初期段階にあると予想される与論海穴熱水域で若い年代を示す兆候が、発達末期にあると予想される伊是名海穴 Hakurei 熱水域で古い年代を示す兆候が、地球化学的解析・生物学的解析の両者で一致して見られた。また、中部沖縄トラフの熱水域より南部沖縄トラフの熱水域のほうが生物学的な多様性が高く、古くからの熱水系の発達を示す傾向は地球化学的解析による年代値でも支持されている。

現段階では解析に供した試料数がまだ少ないが、データの蓄積を進めていくことで得られる年代情報の定量的な議論の信頼性を高めることにより、熱水域の発達史について強い制約条件を与えることができることを本研究によって示すことができた。

## 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 37 件)

注記なきものはすべて査読有りの論文

(1) Seo, M.H., S. Koyama, T. Toyofuku, S. Kojima, H. Watanabe (2013) Determination of extremely high pressure tolerance of brine shrimp larvae by using a new pressure chamber system. *Zoological Science*, 30: in press.

(2) Aoki, K., B. Windley, K. Sato, Y.

Sawaki, T. Kawai, T. Shibuya, H. Kumagai, K. Suzuki, S. Maruyama (2013) Phengite K-Ar dating of metapelites from the Barrovian metamorphic belt at Loch Leven, Scotland. 地質学雑誌, 印刷中.

(3) Hidaka, H., H. Watanabe, Y. Kano, S. Kojima (2013) Mitochondrial genome rearrangement in a hydrothermal vent-endemic lineage of provannid gastropods provides a new DNA marker for phylogeographic studies. Journal of the Marine Biological Association of the United Kingdom, 93: 1053-1058. (DOI: 10.1017/S0025315412001506)

(4) Takamasa, A., S. Nakai, F. Sato, S. Toyoda, D. Banerjee, J. Ishibashi (2013) U-Th radioactive disequilibrium and ESR dating of a barite-containing sulfide crust from South Mariana Trough. Quaternary Geochronology, 15: 38-46. (DOI: 10.1016/j.quageo.2012.12.002)

(5) Yorisue, T. R. Kado, H. Watanabe, J. T. Høeg, K. Inoue, S. Kojima, B. K. K. Chan (2013) Influence of water temperature on the larval development of *Neoverruca* sp. and *Ashinkailepas seepiophila* - implications for larval dispersal and settlement in the vent and seep environments. Deep-Sea Research I, 71: 33-37. (DOI:10.1016/j.dsr.2012.10.007)

(6) 石橋純一郎 (2012) 海底熱水循環系における元素の移動と濃集. 化学と工業, 65: 758-760. [査読無]

(7) Toyoda, S., F. Sato, H. Nishido, M. Kayama, J. Ishibashi (2012) The alpha effectiveness of the dating ESR signal in barite. Radiation Measurements, 47: 900-902. (DOI:10.1016/j.radmeas.2012.04.016)

(8) Takahashi, Y., Y. Sasaki, Y. Chikaraishi, M. Tsuchiya, H. Watanabe, T. Asahida, T. Maruyama, K. Fujikura (2012) Does the symbiotic scale-worm feed on the host mussel in deep-sea vent fields? Researches in Organic Geochemistry. 28: 23-26.

(9) Yorisue, T., K. Inoue, H. Miyake, S. Kojima (2012) Trophic structure of hydrothermal vent communities at the Myojin Knoll and the Nikko Seamount in the northwestern Pacific Implications for photosynthesis-derived food supply. Plankton and Benthos Research, 7: 35-40.

(10) Kojima, S., S. Murakami, S. Nemoto, H. Watanabe, H. Miyake, S. Tsuchida (2012) Genetic diversity and population structure of a vestimentiferan annelid

*Lamellibrachia satsuma* in Japanese and northern Mariana waters. Plankton and Benthos Research, 7: 146-150.

(11) Beaulieu, S. E., S. Mills, L. Mullineaux, F. Pradillon, H. Watanabe, S. Kojima (2011) International study of larval dispersal and population connectivity at hydrothermal vents in the southern Marianas Trough. InterRidge News, 20: 50-54. [査読無]

(12) Sato, F., S. Toyoda, D. Banerjee, J. I. Ishibashi (2011) Thermal stability of ESR signals in hydrothermal barites. Radiation measurements, 46: 866-870. (DOI: 10.1016/j.radmeas.2011.05.007)

(13) Toyoda, S., F. Sato, D. Banerjee, J. Ishibashi (2011) Characteristics of the Radiation Induced ESR Signals in Barite. Advances in ESR applications, 27: 4-6.

(14) 佐藤佳子・熊谷英憲・兵藤博信 (2011) マルチクロノロジー時代の Ar-Ar 年代測定法の評価法について. フィッショントラックニュースレター, 24, 1-8.

[学会発表] (計 138 件)

- (1) Toyoda, S. et al.: ESR dating of barite: practical applications to submarine hydrothermal sulfide depositions in Okinawa and in South Mariana, in comparison with U-Th ages. BIODOSE2013, Leiden (Netherlands), 2013/3/24-28.
- (2) Watanabe, H. et al.: Biodiversity of deep-sea hydrothermal vent fauna and its relationships to environmental factors in Okinawa Trough. Deep-Sea Biology Symposium, Wellington (New Zealand), 2012/12/4.
- (3) Yahagi, T., S. Kojima et al.: Distribution and population genetic structure of vent shrimps in the Okinawa Trough. Deep-Sea Biology Symposium, Wellington (New Zealand), 2012/12/3.
- (4) Miyoshi, Y., J. Ishibashi et al.: Structure of a seafloor hydrothermal system in volcanic sediment: distribution of hydrothermal clay minerals, at the Iheya North Knoll, Okinawa Trough. 2012 AGU (American Geophysical Union) Fall Meeting, San Francisco (USA), 2012/12/3-7.
- (5) Ishibashi, J. et al.: Hydrothermal fluid-mineral interactions within volcanic sediment layer revealed by shallow drilling in active seafloor hydrothermal fields in the mid-Okinawa. 2012 AGU (American Geophysical Union)

- Fall Meeting, San Francisco (USA), 2012/12/3-7.
- (6) Uchida, A., S. Toyoda, J. Ishibashi: Radon loss from barite in submarine hydrothermal sulfide deposits. 2012 AGU (American Geophysical Union) Fall Meeting, San Francisco (USA), 2012/12/3-7.
- (7) Toyoda, S. et al.: ESR dating of submarine hydrothermal activities using barite in sulfide deposition. 2012 AGU (American Geophysical Union) Fall Meeting, San Francisco (USA), 2012/12/3-7.
- (8) Takamasa, A., S. Nakai et al.: U-Th and ESR dating of drilled cores from a giant hydrothermal mounds in South Mariana. 2012 AGU (American Geophysical Union) Fall Meeting, San Francisco (USA), 2012/12/3-7.
- (9) Seo, M.H., S. Kojima et al.: Biodiversity and biogeography of hydrothermal vent species in the western Pacific: a biological perspective of TAIGA project. 2012 AGU (American Geophysical Union) Fall Meeting, San Francisco, (USA), 2012/12/3-7.
- (10) Fujiwara, T., S. Toyoda et al.: ESR dating of barite in sea-floor hydrothermal sulfide deposits taken from Okinawa Trough. 3rd Asia Pacific Conference on Luminescence and Electron Spin Resonance Dating including non-dating applications, Okayama (Japan), 2012/11/18-22.
- (11) Y. Isono, S. Toyoda et al.: The alpha effectiveness for formation of  $\text{SO}_3^-$  in barite: an application to ESR dating. 3rd Asia Pacific Conference on Luminescence and Electron Spin Resonance Dating including non-dating applications, Okayama (Japan), 2012/11/18-22.
- (12) Miyoshi, Y., J. Ishibashi et al.: Formation process of clay minerals correlated with vertical structure of a seafloor hydrothermal system. The 2nd Asian Clay Conference, Seoul (South Korea), 2012/09/07.
- (13) Ishibashi J. et al.: Occurrence of sulfides accompanied by abundant clay minerals revealed by shallow drilling in an active seafloor hydrothermal field in the Okinawa Trough, back-arc basin. 34th International Geological Congress, Brisbane (Australia), 2012/08/06.
- (14) Yorisue, T., S. Kojima et al.: Larval development and morphology of deep-sea vent/seep barnacles: implications for dispersal and settlement. 10th International Larval Biology Symposium, California (USA), 2012/7/31.
- (15) Seo, M.H., S. Kojima et al.: Larval dispersal and pressure response of vent decapods in the Okinawa Trough, Japan. 10th International Larval Biology Symposium, California (USA), 2012/7/31.
- (16) Kojima, S.: Phylogeography of vent fauna in the western Pacific. Mariana Vent Larvae (MarVeL) Workshop: International study of connectivity between hydrothermal vents, Okinawa (Japan), 2012/5/10.
- (17) Ishibashi, J.-I. et al.: Diversity of vent fluid chemistry among hydrothermal activities at on- and off-axial sites of backarc spreading in southern Mariana. Mariana Vent Larvae (MarVeL) Workshop: International study of connectivity between hydrothermal vents, Okinawa (Japan), 2012/5/10.
- (18) Seo, M.H., S. Kojima et al.: Dispersal and Pressure Response of Vent Decapods in the Okinawa Trough, Japan. Mariana Vent Larvae (MarVeL) Workshop: International study of connectivity between hydrothermal vents, Okinawa (Japan), 2012/5/10.
- (19) Yahagi, T., H. Watanabe, S. Kojima: Biogeography and population genetic structure of vent shrimps in the northwestern Pacific. Mariana Vent Larvae (MarVeL) Workshop: International study of connectivity between hydrothermal vents, Okinawa (Japan), 2012/5/10.
- (20) Watanabe, H. et al.: Population connectivity among hydrothermal vent fields in the northwestern Pacific. World Conference on Marine Biodiversity, Aberdeen (UK), 2011/9/28.
- (21) Seo, M.H., S. Kojima et al.: Genetic diversity and connectivity of the hydrothermal vent galatheid crab *Shinkaia crosnieri* in the Okinawa Trough, Japan. World Conference on Marine Biodiversity, Aberdeen (UK), 2011/9/28.
- (22) Toyoda, S. et al.: Dating of Submarine Hydrothermal Deposits by ESR and U-Series Methods. Goldschmidt Conference 2011, Prague (Czech), 2011/8/14-19.
- (23) Toyoda, S. et al.: The alpha efficiency of ESR signals in barite.

13th International Conference on Luminescence and Electron Spin Resonance Dating, Torun (Poland), 2011/7/10-14.

- (24) Sato, F., S. Toyoda et al.: The ESR measurements and dating of deep sea hydrothermal barite. 13th International Conference on Luminescence and Electron Spin Resonance Dating, Torun (Poland), 2011/7/10-14.

[図書] (計2件)

- (1) 著者 Watanabe, H., K. Fujikura, S. Kojima, J. Miyazaki and Y. Fujiwara  
出版社 Springer  
書名 “The Vent and Seep Biota, Topics in Geobiology 33” (S. Kiel 編)  
2010年 pp. 379-401

- (2) 著者 小島茂明  
出版社 シーエムシー出版  
書名 「海底鉱物資源の産業利用」  
(飯笹幸吉編)  
2013年 印刷中

[その他]

ホームページ:

<http://www-gbs.eps.s.u-tokyo.ac.jp/~taiga/>

報道関連情報:

2012年1月, NHK, サイエンス・ゼロ 「深海で“ゴールドラッシュ” 熱水が生んだ夢の金属資源 (No. 371)」にてコメント

2011年7月, NHK, NHKスペシャル「深海大探査 生命誕生の謎に迫る」にてコメント

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

石橋 純一郎 (ISHIBASHI JUNICHIRO)  
九州大学・大学院理学研究院・准教授  
研究者番号: 20212920

### (2) 研究分担者

熊谷 英憲 (KUMAGAI HIDENORI)  
独立行政法人海洋研究開発機構・地球内部ダイナミクス領域・技術研究副主幹  
研究者番号: 10344285  
小島 茂明 (KOJIMA SHIGEAKI)  
東京大学・新領域創成科学研究科・教授  
研究者番号: 20242175  
豊田 新 (TOYODA SHIN)  
岡山理科大学・理学部・教授  
研究者番号: 40207650  
中井 俊一 (NAKAI SHUNICHI)  
東京大学・地震研究所・教授  
研究者番号: 50188869

### (3) 連携研究者

板谷 徹丸 (ITAYA TETSUMARU)  
岡山理科大学・自然科学研究所・教授  
研究者番号: 60148682  
橋本 哲男 (HASHIMOTO TETSUO)  
筑波大学・生命環境科学研究系・教授  
研究者番号: 50208451  
渡部 裕美 (WATANABE HIROMI)  
海洋研究開発機構・海洋・極限環境生物圏領域・研究員  
研究者番号: 50447380  
鈴木 庸平 (SUZUKI YOHEI)  
東京大学・理学系研究科・准教授  
研究者番号: 00359168  
藤倉 克則 (FUJIKURA KATSUNORI)  
海洋研究開発機構・海洋・極限環境生物圏領域・サブリーダー  
研究者番号: 10344293

### (4) 研究協力者

佐藤 佳子 (SATO KEIKO)  
独立行政法人海洋研究開発機構・地球内部ダイナミクス領域・技術研究副主任  
研究者番号: 40359196  
賞雅 朝子 (TAKAMASA ASAKO)  
東京大学・地震研究所・特任研究員  
奥村 輔 (OKUMURA TASUKU)  
岡山理科大学・オープンリサーチセンター・研究員