

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 6 月 11 日現在

機関番号：13301

研究種目：基盤研究(B)

研究期間：2012～2014

課題番号：24403012

研究課題名(和文)白亜紀OAE2における海底溶存酸素のグローバル・シーソー振動の解明

研究課題名(英文)Global seesaw oscillation of bottom water redox condition through Cretaceous OAE2

研究代表者

長谷川 卓(Hasegawa, Takashi)

金沢大学・自然システム学系・教授

研究者番号：50272943

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 13,600,000円

研究成果の概要(和文)：白亜紀海洋無酸素事変2(OAE2)は当時の広い海底に有機炭素を大量埋没させた現象である。我々はニュージーランド(NZ)とカナダ太平洋岸(CPC)の中高緯度域の調査を行い、炭素同位体比や微化石層序によりOAE2層準を特定した。NZでは同層準に赤色泥岩が発達し、酸化的環境を示した。CPCではOAE2層準の下位が無酸素環境を示し、OAE2層準に向かい海底溶存酸素の増加が示された。プロト大西洋等と太平洋中高緯度域は海底の酸素状態変動において同期ではなく逆位相変動を示し、OAE2現象の複雑さが明らかになった。CPCではOAE2時に陸域が季節的乾燥化した証拠が得られOAE2に伴う陸域気候変動の証拠を得た。

研究成果の概要(英文)：Cretaceous OAE2 is an oceanic event that induced deposition of large amount of organic carbon on the extended sea bottom. We surveyed New Zealand (NZ) and Canadian Pacific Coast (CPC) and designated OAE2 horizon with carbon isotope and microbiostratigraphy. In NZ, red mudstone bed indicate oxygenation of bottom environment during OAE2 interval. In CPC, anoxia below the OAE2 horizon and gradual recovery of oxygen environment toward OAE2 were observed. Oscillation of bottom water redox condition with inverted phase in middle-high latitude Pacific against proto-Atlantic regions are documented showing complicated nature of OAE2 as a global event. We also obtained an evidence of increasing seasonal aridity toward OAE2 time in CPC. Evidence of such climatic response on land across OAE2 was rarely presented through this interval and will be further studied.

研究分野：地質学，古環境学

キーワード：白亜紀 OAE セノマニアン チューロニアン 無酸素

1. 研究開始当初の背景

(1) 白亜紀(145.5-65.5Ma)は顕生累代において最も温暖な時期の一つである。中期白亜紀には、広域に渡る海底に有機炭素が埋積した海洋無酸素事変(OAE)が複数回繰り返された。白亜紀のセノマニアン/チューロニアン境界(C/T境界)の海洋無酸素事変2(OAE2:白亜紀OAEの中でも最も強い酸欠状態を、最も広域に引き起こした現象)については、近年ヨーロッパ、プロト大西洋(現在とは大きく異なる水循環を持っており、低緯度に東西のゲートウェイを伴う北大西洋と、開き始めの南大西洋)などの研究が進展し、有機物の大量埋没に伴う大気CO₂濃度の低下がOAE2期の一時的寒冷化を導いたこと、それはLIPs(巨大火成岩区)の形成に連動していたことなどの議論が注目されていた。議論は炭素同位体比層序を軸として層序学的に詳細に進められていた。

(2) 本研究代表者の長谷川を中心として、日本の北海道蝦夷層群(苫前町達布地区)の炭素同位体比の詳細な研究により、上述の先行研究をはるかにしのぐ解像度で炭素同位体比層序が構築された。日本ではOAE2の相当層位範囲では、前後の時代よりも底質の底生生物活動は盛んになっており、OAE2期間中にむしろより酸化的になっていることが解ってきた。

2. 研究の目的

本研究ではニュージーランド(NZ)とカナダ太平洋岸で93.9MaのOAE2の層準に絞って調査・試料採集を行い、欧州の研究先進地を凌ぐ時間解像度で、地質・化学パラメータの変化を追跡する。作業仮説は「OAE2に先行して太平洋高緯度域で寒冷中層水が形成され、Oxiaが中緯度まで達した。この現象が大気CO₂増加をもたらシテチス域などでOAE2を誘導した」である。テチス域で顕在化したAnoxiaはシーソーの一端にすぎず、もう一端である太平洋中高緯度域では逆現象が生じていたらしい。太平洋地域のOAE2層準を欧州や日本と詳細対比し、諸現象の前後関係を明確にすることでその原因に迫る。

3. 研究の方法

仮説を検証するためには、炭素同位体比を用いた詳細な国際対比、海底の溶存酸素含有量に関する指標、そして水温に関する情報が最も本質的となる。太平洋高緯度に寒冷な深層水ソースがあったか否かについての議論は、OAE2だけではなく、全球的に温室地球環境にあって寒冷化が進んだカンパニアン-マーストリヒシアン階(C/M)境界付近でも進めることが可能である。試料の保存状態が良くないことなどに由来してOAE2を議論する材料が少ない場合はその層準にも着目して研究を進めることとする。

まず初年度は先行研究で採取したNZの試料を用いてn-alkaneの炭素同位体比分析、

粘土鉱物分析、微量元素分析の手法確立を行い、現地の気候を考慮して年度末にNZ現地で試料採集を行う(図1中のSawpit Gullyセクション)。南島北部Sawpit Gullyセクションの砂質泥岩約60mの層位範囲を対象とし、最重要範囲の15mは10cm毎、残りは50cm毎に採集する。またカナダ・バンクーバー島近傍のHornby島(C/M境界)とQueen Charlotte(QC)諸島Skidegateで調査・試料採取する。また採集した試料の予察的分析を行う(図2)。

次年度には前年度の予察的成果を受けてカナダHornby島とQC諸島で2回目の現地調査・試料採集を行うと同時に炭素同位体比層序など基本的情報の確保と整理を行う。保存のよい試料が得られた場合は、酸素同位体比古水温計の応用を試みる。試料中の抽出性有機物中に含まれるバイオマーカー類に関する考察も行う。

最終年度には採集試料の本格分析、外国協力者の日本への短期招聘、国際学会での発表、総括的論文の執筆を行う。個別の成果については、各担当者が主導して論文を公表する。

4. 研究成果

(1) ニュージーランド地域のC/T境界

まず、NZ地域の研究では、3セクションの調査・検討を行い、そのうちの1セクションで詳細な炭素同位体比層序検討の結果と共同研究者の渦鞭毛藻化石層序の結果を統合し、これまで認定されていなかったC/T境界を初めて認定した。そして炭素同位体比層序と大型化石層序を併用することによって3セクションすべてでC/T境界を認識するに至った(Hasegawa et al., 2013)。

確認されたC/T境界付近では、3セクションとも底生の大型化石を一切産出しないZone Barren of Macrofossils(ZBM)が存在した。また、やや水深が深いと推定されるMangaotaneの2つのセクションでは、暗灰色泥岩がC/T境界付近の数mないし十数mに渡って赤灰色に変わっていた(図3)。これは堆積場が酸化になったことを示唆する証拠であり非常に重要である。ところが海底が富酸素化したならば底生生物の生存に適し

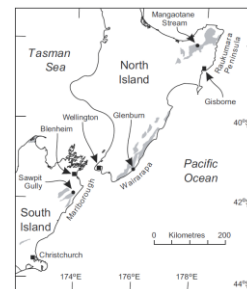


図1. ニュージーランドの調査地・Mangaotane川の2セクションおよびSawpit Gullyの1セクションの位置

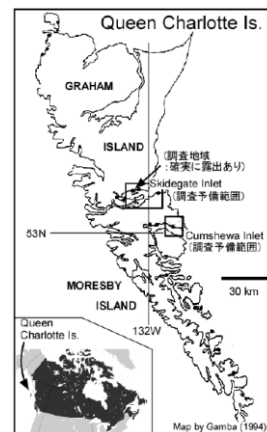


図2. カナダ・クイーンシャーロット諸島の調査地の位置



図3. Mangaotane2 セクションの C/T 境界付近に発達する赤色層

た環境になり、生物多様性が上昇するはずであるが、前述のとおり、この層準は ZBM に含まれている。現在のところ、この謎の解明には至っていないが、「酸素はあるものの、生物の生育に適さない」環境として、寒冷水塊がこの海域を覆っていたことを想定している。温室地球期の当地の底生生物は寒冷環境に適応しておらず、当該の海底には進出できなかった可能性がある。

(2) カナダ・クイーンシャーロット諸島(現地名: Haida Gwaii) の C/T 境界

カナダ北西部に位置するカナダ・クイーンシャーロット諸島(以下 QC 諸島)では、Graham 島南部と、Lina 島の 2 セクションにて調査を行い、試料採集ができた。

両セクションは砂質泥岩が主体であり、下部を中心にして数 10 cm の厚さを持つテンペスタイトが複数枚確認され、堆積場が暴風時波浪限界よりも浅くなった期間が存在したことが示される。セクション下部は、数 mm の砂の葉理が全く生物擾乱を受けることなく連続し、非常に強く成層している。

採集した泥岩を用いて炭素同位体比層序を構築し、既存の大型化石情報(Haggart 私信, 2013)を総括して C/T 境界を特定した。浮遊性有孔虫の抽出も試みたが、確認できなかった。大型化石も非常に稀である。この結果、強い成層をしている層準はセノマニアン階であることが明らかになった。岩相は上方に向かってラミナの発達程度(成層の程度)が減じており、C/T 境界に向かって、むしろ海底の溶存酸素量は無酸素状態から生物擾乱を誘導する程度に増加している。

本地域では浮遊性有孔虫、石灰質底生有孔虫を全く産しなかったため、酸素同位体比法などの応用はできない。そのため方針を転換し、抽出性有機物を用いた環境解析を行うこととした。n-alkane の CPI 値や、多環芳香族炭化水素(PAH)であるフェナントレン類を用いた熱熟成指標である MPI-1 に基づいてビトリナイト反射率換算値を算出したところ、1.2%程度であり、バイオマーカーの評価は困難であることが判った。ただし熱熟成で失われにくい燃焼起源有機物質である縮合 PAHs が複数含まれていたため、それを用い

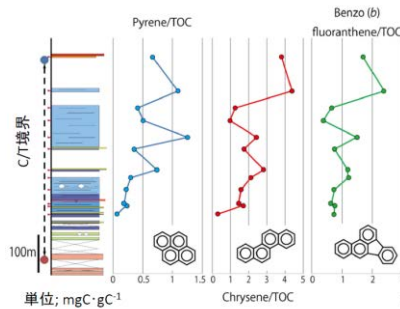


図4. カナダQC諸島のリナ島セクションにおけるC/T境界付近のPAHs含有量の変化

てQC諸島の後背陸地環境の議論を行った。

PAH 類は、C/T 境界が存在すると考えられるリナ島セクション上部で高い値を示した(図4. 公表を控えているため、解析データの一部のみを示した)。ビトリナイト反射率換算値は上位に向かって緩やかに減少していく一般的傾向を示したため、ここで見られる PAHs 濃集量の増加は熱熟成の進行に伴うものではなく、C/T 境界付近で森林火災が増加したことを示すものである。すなわち通年多雨の Cfa ないし Cfb のような気候から、乾季のある Cs のような気候へとシフトした可能性がある。

Ward et al. (1997)によれば、当時の QC 諸島は現在のサンフランシスコ程度の緯度にあった。当時の QC 諸島の後背陸地は中緯度高圧帯外縁部付近にあった可能性が高い。OAE2 の大量有機物埋没-CO₂濃度減少に伴うグローバルな大気循環の変化に反応して気候が変化し、夏にのみ中緯度高圧帯の影響を受けて乾燥化する気候(Cs)に変化したと考ええると、本研究で得たデータを説明できる。今後、GCM等のモデル研究者と議論を重ね、C/T 境界の気候変動について考察を進めたい。ここではそのための「作業仮説」を提示できたことが成果といえる。

(3) ホーンビー島のカンパニアン/マーストリヒシアン(C/M)境界

QC 諸島では石灰質化石を産しないことや熱熟成度が高く、バイオマーカーを用いた議論ができないことから、海底古水温に関する当初目指した議論ができない事が判った。そこで、時代は異なるが、温室地球時代の寒冷化が記録されている C/M 境界付近の地層を追跡し、太平洋の中・深層水として寒冷水塊が発達していなかったかどうかの議論を進めることとした。

同地は、非常に保存のよい化石を産することで知られ、霰石が残るアンモナイト化石片を産する(図5)ことから、酸素同位体比法などの古水温推定方法が使える可能性がある。

2013-15年の3年間に渡って同地を調査し、詳細なルートマップを作成した。同地の露頭は海食台にあり、干満の差が7mにも及ぶことから、干潮時には沖合に1km以上の広大な露頭が露出する。小断層などに留意しながら

ら泥岩試料を100個以上採集し、炭素同位体比層序を構築した。その結果を既存の大型化石層序および古地磁気層序(Ward et al., 2012)に統合した。Chron 32nと考えられていた層位範囲に大きな負の炭素同位体比エクスカージョンが確認され、C/M境界の位置をほぼ特定した。

現時点で酸素同位体比等の古水温指標の層序変動を明らかにするには至っていないが、世界的に寒冷化が進行したと考えられている層準が特定できたことから、今後の研究で当時の海底水温の変動などが明らかになると考えている。

この一連の研究については、海外の研究協力者であるカナダ地質調査所の Jim Haggart 博士と論文を執筆中であり、博士を2015年1, 2月に金沢大学に招聘して議論を進めた。

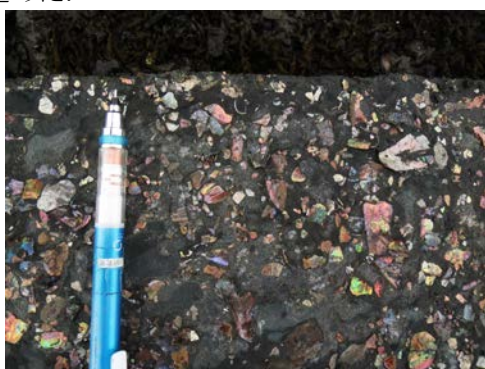


図5. Hornby 島のカンパニアン階から得られた化石片を含む砂質泥岩。化石が良好に保存されている様子が確認できる。

(4) 総括

本研究では、QC諸島やNZでC/T境界の下位から同境界に向かって溶存酸素量が増加していく傾向が確認されたが(Hasegawa et al., 2013), 日本の北海道(Nemoto and Hasegawa, 2011)とも共通しており、太平洋域の中・高緯度では、OAE2層準では貧酸素化ではなく、むしろ富酸素化していたことが太平洋縁辺の大きく隔離した3地域で具体的なデータとして示すことができた。「プロト大西洋・テチス海域の海底無酸素化」と「太平洋中・高緯度海域の海底溶存酸素量増加」が対になって連動している状況が明瞭になった。後者は前者の有機物埋没に伴う大気CO₂濃度の低下に対する反応としての寒冷化—寒冷中層水の発達に結びつくのかもしれない。寒冷中層水を示唆するNZの赤色層は炭素同位体比エクスカージョン(CIE)の開始とほぼ同時に表れ始め、CIE後半で最も顕著な赤色を呈する。従って、作業仮説として立てた「寒冷中層水がOAE2の誘発要因」とは考えにくい(上述のように原因ではなく結果である)。このようなグローバルな一連の気候改変の中で、QC諸島の後背陸地で季節的乾燥を伴う気候が発達したのかもしれない。

本研究によって、C/T境界のOAE2が広大な太平洋地域を含む汎地球的なイベントで

あることが改めて確認されたと同時に、OAE2が過去に考えられていたような世界が一様に海洋貧酸素化するような現象ではなく、非常に複雑であり、地球全体が系統的に連鎖的に変化した現象であることが見えてきた。また、その理解のために太平洋地域が重要であることが改めて確認された。

(引用文献)

- Hasegawa, T., Crampton, J., Schiøler, P., Field, B., Fukushi, and K. Kakizaki, Y., Carbon isotope stratigraphy and depositional oxia through Cenomanian/Turonian boundary sequences (Upper Cretaceous) in New Zealand. *Cretaceous Research* (2013), vol. 40, 61-80.
- Nemoto, T. and Hasegawa, T., Submillennial resolution carbon isotope stratigraphy across the Oceanic Anoxic Event 2 horizon in the Tappu section, Hokkaido, Japan. *Palaeogeography Palaeoclimatology Palaeoecology* (2011), vol. 309, 271-280.
- Ward, P. D., Hurtado, J. M., Kirschvink, J. L. and Verosub, K. L., Measurement of the Cretaceous paleolatitude of Vancouver Island: Consistent with the Baja-British Columbia hypothesis, *Science* (1997), vol. 277, 1642-1645.
- Ward, P. D., Haggert, J. W., Mitchell, R., Kirschvink, J. L. and Tobin, T., Integration of macrofossil biostratigraphy and magnetostratigraphy for the Pacific Coast Upper Cretaceous (Campanian-Maastrichtian) of North America and implications for correlation with the Western Interior and Tethys. *GSA Bulletin* (2012), vol 124, 957-974.

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12件)

- ① Li, G., Ando, H., Hasegawa, H., Yamamoto, M., Hasegawa, T., Ohta, T., Hasebe, N. & Ichinnorov, N., Confirmation of a Middle Jurassic age for the Eedemt Formation in Dundgobi Province, southeast Mongolia: constraints from the discovery of new spinicaudatans (clam shrimps). *Alcheringa* (2014), vol. 38, DOI:10.1080/03115518.2014.870834. (査読有)
- ② Kakizaki, Y., Weissert, H. J., Hasegawa, T., Ishikawa, T., Matsuoka,

- J. and Kano, A., Strontium and carbon isotope stratigraphy of the Late Jurassic shallow marine limestone in western Palaeo-Pacific, northwest Borneo. *Journal of Asian Earth Sciences* (2013), vol. 73, 57-67. (査読有)
doi:10.1016/j.jseaes.2013.04.020
- ③ Hasegawa, T., Crampton, J., Schioler, P., Field, B., Fukushi, K. and Kakizaki, Y., Carbon isotope stratigraphy and depositional oxia through Cenomanian/Turonian boundary sequences (Upper Cretaceous) in New Zealand. *Cretaceous Research* (2013), vol. 40, 61-80. (査読有)
doi:10.1016/j.cretres.2012.05.008
- ④ Fukushi, K., Aoyama, K., Yang, C., Kitadai, N. and Nakashima, S., Surface complexation modeling for sulfate adsorption on ferrihydrite consistent with in-situ infrared spectroscopic observations. *Applied Geochemistry* (2013), vol. 36, 92-103. doi:10.1016/j.apgeochem.2013.06.013 (査読有)
- ⑤ Moiroud, M., Pucéat, E., Donnadiou, Y., Bayon, G., Moriya, K., Deconinck, J.-F., and Boyet, M., Evolution of the neodymium isotopic signature of neritic seawater on a northwestern Pacific margin: new constrains on possible end-members for the composition of deep-water masses in the Late Cretaceous ocean: *Chemical Geology* (2013), v. 356, 160-170. doi:10.1016/j.chemgeo.2013.08.008 (査読有)
- ⑥ Kakizaki, Y., Ishikawa, T., Nagaishi, K., Tanimizu, M., Hasegawa, T. and Kano, A. Strontium isotopic ages of the Torinosu-type limestones (latest Jurassic to earliest Cretaceous, Japan): implication for biocalcification event in northwestern Palaeo-Pacific. *Journal of Asian Earth Sciences* (2012), vol. 46, 140-149. doi:10.1016/j.jseaes.2011.11.018 (査読有)
- ⑦ Moriya, K., Goto, A. and Hasegawa, T., Stable carbon and oxygen isotope analyses of carbonate using a continuous flow isotope ratio mass spectrometry. *Science Report of Kanazawa University* (2012), vol. 56, 45-58. http://dSPACE.lib.kanazawa-u.ac.jp/dspace/bitstream/2297/35196/1/scirep56_moriya-45-58.pdf (査読有)
- ⑧ 後藤(桜井)晶子, 沖野 遼, 長谷川 卓. ガスベンチ/安定同位体比質量分析計を用いた連続フローシステムによる炭酸塩の炭素, 酸素安定同位体比測定一条件設定に向けての検討一. 福井県立恐竜博物館紀要(2012), vol. 11, 49-55. <http://www.dinosaur.pref.fukui.jp/archive/memoir/memoir011-049.pdf> (査読有)
- [学会発表] (計 12 件)
- ① Hasegawa, T., Another world of OAE2: development of oxidic water around Pacific margin. 2nd IGCP608 Symposium "Cretaceous Ecosystems and Their Responses to Paleoenvironmental Changes in Asia and Western Pacific", Sept. 4, 2014 (Tokyo).
- ② Kobiyama, Y., Yonezawa, S., Suzuki, S. and Hasegawa, T., Bottom water paleothermometry: screening late Cretaceous calcareous nodules for application of oxygen isotope method. 2nd IGCP608 Symposium "Cretaceous Ecosystems and Their Responses to Paleoenvironmental Changes in Asia and Western Pacific", Sept. 4, 2014 (Tokyo).
- ③ 長谷川卓・守屋和佳・ジム ハガート, 白亜紀温室地球の初期寒冷化のカギ: 北太平洋縁辺域のシャンパーニュ階一マーストリヒト階泥質堆積物, 日本地球惑星科学連合 2014 年大会, 2014 年 5 月 2 日, パシフィコ横浜 (横浜市).
- ④ 長谷川卓・媚山陽介・米澤駿介・鈴木崇明・ジェンキンズロバート・森尚仁, 石灰質ノジュールを用いた海底古水温推定, 日本地球惑星科学連合 2014 年大会, 2014 年 4 月 28 日, パシフィコ横浜 (横浜市).
- ⑤ 守屋和佳, Moiroud Mathieu, Puceat Emmanuelle, Donnadiou Yannick, Bayon Germain, Deconinck Jean-Francois, Boyet Maud, ネオジム同位体シグナルからみた後期白亜紀北西太平洋における中/深層水形成, 日本地球惑星科学連合 2014 年大会, 2014 年 5 月 2 日, パシフィコ横浜 (横浜市).
- ⑥ Hasegawa, T., Moriya, K. and Haggart, J. W., Campanian-Maastrichtian clay-rich sequences along the North Pacific margin: key sequences for early cooling history of Cretaceous greenhouse Earth, 125th Annual Meeting of Geological Society of America, October 28, 2013, (Denver, USA).
- ⑦ Moriya, K., Kuwae M., Yamamoto M., Kunihiro T., Onishi H., Hamaoka H., Saito M., Sagawa T., Fujii N., Yoshie N., Omori K. and Takeoka H.,

Seasonal Distributions of Archaeal Membrane Lipids and TEX86 Thermometry in the Modern Shallow Coastal Ocean, Goldschmidt conference 2013 (Goldschmidt 2013), Firenze Fiera Congress and Exhibition Centre, (Florence, Italy).

- ⑧ Moriya K., Kuwae M, Yamamoto M, Kunihiro T, Onishi H, Hamaoka H, Saito M, Sagawa T, Fujii N, Yoshie N, Omori K and Takeoka H, Archaeal membrane lipid abundance and TEX86 thermometry in the seasonal anoxic coastal basin, 11th International Conference on Paleoceanography, 2013, Sitges, Spain
- ⑨ Batenburg, S., Friedrich, O., Moriya, K., Voigt, S., Hasegawa, T., IODP Expedition 342 Scientists, Orbitally calibrated carbon-isotope stratigraphy of the Maastrichtian of U1403, IODP Expedition 342, Newfoundland, 11th International Conference on Paleoceanography, 2013, Sitges, Spain.
- ⑩ 長谷川卓・沖野遼・守屋和佳, 始新世の海洋変革: 硫酸態硫黄の同位体比から何が解る?, 日本地質学会第120年学術大会, 2013年9月16日, 東北大学(仙台市).
- ⑪ Moriya, K., Hasegawa, T. and Haggart, J., Mid- to Late Cretaceous clay-rich sequences along the North Pacific margin. Workshop "Exploring the Cretaceous Greenhouse through Scientific Drilling", University College London, April 15th-17th, 2013.
- ⑫ 長谷川卓, 柿崎喜宏, 安藤寿男, 長谷川精, 太田亨, 山本正伸, 長谷部徳子, Gang Li, Niiden Ichinnorov, モンゴルの中部白亜系湖成層の有機物組成の変動と炭素同位体比層序: OAE1a-1b期における陸域気候変動復元に向けて, 日本地球惑星連合2012年大会, 5月24日, 千葉市.

[図書] (計1件)

- ① Moriya, K., in press, Isotope Signature of Ammonoid Shells, in Klug, C., Korn, D., De Baets, K., Kruta, I., and Mapes, R. H., eds., Ammonoid Paleobiology: From anatomy to ecology, Springer. (査読有)

[その他]

ホームページ等

http://earth.s.kanazawa-u.ac.jp/Paleo_Lab/index.html

6. 研究組織

(1) 研究代表者

長谷川 卓 (HASEGAWA, Takashi)
金沢大学自然システム学系教授
研究者番号: 50272943

- (2) 研究分担者 (2年目より連携研究者)
福士 圭介 (FUKUSHI, Keisuke)
金沢大学環日本海域環境研究センター准教授
研究者番号: 90444207
(2年目より連携研究者)

森下 知晃 (MORISHITA, Tomoaki)
金沢大学自然システム学系教授
研究者番号: 80334746
(2年目より連携研究者)

- (3) 連携研究者
守屋 和佳 (MORIYA, Kazuyoshi)
金沢大学自然システム学系博士研究員
研究者番号: 60447662

- (4) 研究協力者
後藤 (桜井) 晶子
金沢大学自然システム学系博士研究員

柿崎喜弘
金沢大学自然システム学系博士研究員
(現・明治大学博士研究員)

- (5) 海外研究協力者
James W. Haggart
カナダ国地質調査所主任研究員

James Crampton
ニュージーランド地質核科学研究所主任研究員