

令和 5 年 6 月 20 日現在

機関番号：13301

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2019～2021

課題番号：19H02011

研究課題名(和文) C4植物の誕生・進化とその要因：白亜紀中期の炭素循環攪乱と南極付近の環境

研究課題名(英文) Appearance and evolution of C4 plants: Environmental perturbation around Antarctica during mid-Cretaceous

研究代表者

長谷川 卓 (Hasegawa, Takashi)

金沢大学・地球社会基盤学系・教授

研究者番号：50272943

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 13,300,000円

研究成果の概要(和文)：本研究は当初、植物バイオマーカーの個別分子の炭素同位体比調査によりC4植物が白亜紀の南半球高緯度に誕生していたことの立証を主軸とする古環境解読を目指した。しかしC4植物の明らかな証拠は得られなかった。一方、研究過程でハプト藻類に由来するバイオマーカーで水温指標性のある2及び3不飽和アルケノン(alkenones)を、白亜紀の堆積物からは世界で初めて同時検出した。それらが「白亜紀中期の炭素循環攪乱と南極付近の環境」解読に極めて有用であることが判明したため、研究対象を変更しアルビアン～チューロニアン最初期のアルケノンを精査した。海洋無酸素事変2では南極大陸縁辺でCO<sub>2</sub>分圧低下と同時に急激な寒冷化が生じたことが判明した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

世界で初めて白亜紀の3不飽和アルケノンを発見した。2不飽和と3不飽和アルケノンが同時検出されれば古水温指標となるため極めて重要である。2不飽和アルケノンは含有量が多く、かつその起源がハプト藻類と明確だが、その炭素同位体比(d13C)測定に成功した。これも白亜系では初である。酸性化により炭酸塩が失われる場合が多い深海の海洋無酸素事変2記録ではd13C層序指標の確認が困難だが、本研究で初めてアルケノンd13C層序を用いてこれを克服した。温暖化が極度に進んだ白亜紀においてパルス的CO<sub>2</sub>増加が強い負の炭素循環フィードバックを誘導し、その結果世界中の表層海水温が低下したことを実データで示すことができた。

研究成果の概要(英文)：Initial purpose of this study was to elucidate paleoenvironments of southern high latitude based on compound-specific carbon isotope analysis on plant biomarkers expecting discovery of C4 plant evidence. Unfortunately, we couldn't find any of its carbon-isotopic evidence. On the other hand, we recognized significant biomarkers (alkenones) from haptophytes. It was first discovery of paired occurrence of di- and tri-unsaturated alkenones from Cretaceous sediments. As we realized that they could be a proxy for paleothermometry, we switched target compounds to alkenones and studied an Albian through lowest Turonian sequence. As a result, conjoined rapid drop of pCO<sub>2</sub> and SST was decoded from the early stage of Oceanic Anoxic Event 2. The cooling is interpreted to be comparable to Plenus Cold Event (PCE) known from the Northern Hemisphere. Our results indicate PCE was a global event associated with global pCO<sub>2</sub> drop derived from major sequestration of organic carbon over extended sea floor.

研究分野：古環境学

キーワード：白亜紀 炭素同位体比 バイオマーカー アルケノン 海洋無酸素事変 二酸化炭素分圧

### 1. 研究開始当初の背景

C4植物はC3植物のカルビン・ベンソン回路に加えてCO<sub>2</sub>濃縮回路を持つが、その濃縮回路の遺伝子が被子植物進化の早い段階(単子葉類と双子葉類の共通祖先の段階:前期白亜紀)に成立しており、7~5Maに乾燥気候の卓越などを背景に、多様化後の分類群の一部において別個に、その遺伝子発現のスイッチが入ったのだという説がある。遺伝子発現の有無を背景とした特殊な「収斂」とも言うことができ、古生物学的に重要な事例と言える。白亜紀の地球上のどこかでCO<sub>2</sub>濃縮回路を発現する植物が生息を続けており、遺伝子を維持してきたはずであるが、その地質学的証拠は非常に限られている(Kuyper et al., 1999)。一方申請者らは2017年9-11月にIODP(国際深海科学掘削計画)第369次航海(EXP. 369)で白亜紀当時には南緯60°付近に位置していたオーストラリア南西沖の掘削を行い、一部試料の予察分析を行ったところ、一部の試料から-17‰台の有機炭素炭素同位体比(以下炭素同位体比を $\delta^{13}\text{C}$  特有機炭素同位体比を $\delta^{13}\text{C}_{\text{org}}$ と略記する)を確認していた。当時のC3植物のそれ(<-22‰)と比較して優位に高く、C4植物の含有が疑われた。

### 2. 研究の目的

本研究は「オーストラリア南西~南極大陸にかけてがC4植物誕生の場である」と仮説を立て、その検証過程でC4植物の誕生した地質年代を限定し; 進化を誘導した環境要因は何かを解明し; 生態内での占有率の経時変遷とその環境要因を理解することを目標とした。

研究計画調書に明記した通り、研究当初より-17‰台の $\delta^{13}\text{C}_{\text{org}}$ 値がC4植物以外に由来する可能性も捨てきれなかった。もしそうなら従来知られていた白亜紀の一般的C3植物以外の炭素固定生物が海底への有機物の主要供給者だったことになり大きな発見になるだろうと考えた。その場合でもC4植物バイオマーカーについて洞察を深めていく研究提案と同じ過程でその主体を明らかにし、その生物活動がどんな環境要因に支配されたのかを探っていくことを目標として設定した。

### 3. 研究の方法

本研究で用いるIODP EXP. 369の試料はオーストラリアが南極から分離し始めた時代のもので、南極圏付近に位置する(図1)。有機物の保存状態は未熟成で、植物バイオマーカー(有機分子化石)やその $\delta^{13}\text{C}_{\text{org}}$ 分析には最高の状態が維持されている。94Maより古い試料は過去の掘削でも得られていない処女試料となる。これらコア試料には白亜紀の炭素循環攪乱期の記録(OAE2やMCE, OAE1dなど)が連続して保持されており、高感度で環境変動を捉えることが期待された。

試料はイベント層準においては数cm毎、それ以外の層準においては約1.5m事に採取し、必要に応じて追加試料を確保した。全ての試料は有機物分析に先行して有機物含有量(TOC)、全岩の $\delta^{13}\text{C}_{\text{org}}$ 分析、全岩の炭酸塩炭素および酸素の同位体比(それぞれ $\delta^{13}\text{C}_{\text{carb}}$ ,  $\delta^{18}\text{O}$ )、炭酸塩含有量(%CaCO<sub>3</sub>)の測定を行った。

約10gの試料は乾燥、粉末化後有機溶媒(ジクロロメタン)を用いて72時間還流抽出し、その後シリカゲルクロマトグラフィー法により第一画分(脂肪族炭化水素)、第二画分(芳香族炭化水素)、第三画分(ケトン類)、第四画分(極性分子類)に分画し、第一~第三画分に関してガスクロマトグラフ(GC)およびガスクロマトグラフ質量分析装置(GC/MS)で分析を行った。高等植物に由来すると考えられる長鎖ノルマルアルカン類を分離するため、尿素アダクト法(Hasegawa et al., 2006)を用いた。分離したノルマルアルカン類はガスクロマトグラフ-燃焼-同位体比質量分析装置(GC-C-IRMS)にてそれらの炭素同位体比( $\delta^{13}\text{C}_{\text{nalk}}$ )を測定した。また本研究では以下に述べるようにハプト藻類由来バイオマーカーであるアルケノン類の含有を確認したが、それらについてもGC-C-IRMSにて炭素同位体比を測定した。

### 4. 研究成果

有機物含有量が0.5%を超える試料からはバックグラウンド以上のノルマルアルカンを検出した。特に海洋無酸素事変2(OAE2)に相当する層準からは高濃度で得ることができた。図2にそれらの相対存在量(左)と $\delta^{13}\text{C}$ 値分布を示す。ノルマルアルカンの相対存在量の分布に奇数炭素有意性が見られず一峰性でかつ炭素数25のものが最大となるパターンはTOCが0.5%を下回る試料で典型的に見られ、その特徴はバックグラウンドに由来するものと考えられる。一方、奇数優位性が見られる試料では炭素数41のものが突出する特異な特徴が見られた。 $\delta^{13}\text{C}_{\text{nalk}}$ の層序変動を見ると、バックグラウンドが主体をなす試料ではその値は-29から-32‰の範囲で安定しているが、TOCが高いOAE2に関連する層準では最大で-27‰に達した。しかしこの数値



図1. IODP(国際深海科学掘削計画) Exp. 369(第69次航海) Site U1516の位置(Hasegawa and Goto, in review)。

は C4 植物ではなく、典型的な C3 植物に由来するものであった。これらの結果から、少なくとも最重要のイベント層準であり、分析可能な量のノルマルアルカンを検出出来た OAE2 層準においては C4 植物は存在しなかった可能性が高いといえる。一方で炭素数 41 以上の超長鎖ノルマルアルカンが、OAE2 層準において高濃度で確認された。これらの  $\delta^{13}C_{nalk}$  値は -35‰ と顕著に低い。一方で同時に分析された炭素数 41 のノルマルアルカンであるヘンテトラコンタンは、その水素同位体比が陸上高等植物由来のノナイコサンと比較しても 23~105‰ も高い値を取っており、陸上植物由来とは考えにくく、海洋藻類由来バイオマーカーである可能性が高い。

この特異なヘンテトラコンタンの濃集に関して、類似した長鎖を持つアルケノン類（複数の不飽和を持つ直鎖型アルキルケトン）に由来する可能性が推定されたため、GC、GC/MS のプログラムを変更して探索を行った。その結果、同じ層準から高濃度の炭素数 40 の 2 不飽和アルケノン（Tetraconta-16*E*,23*E*-dien-2-one；以下 C<sub>40:2</sub>Et と略記）を検出した（図 3）。これがヘンテトラコンタンの起源のように思われたが、その炭素・水素同位体比はヘンテトラコンタンとは大きく異なること、また分子の続成プロセスを考えても合理的でない。従ってヘンテトラコンタンの起源については現時点で明らかにすることはできていない。

一方でアルケノン類を確認できたことは極めて大きな成果となった。その理由は主に 2 つある。

一つは、アルケノン類がハプト藻類イソリシス目に排他的に由来することが明確なバイオマーカーであり、「化石」としての価値が高いことにある。この C<sub>40:2</sub>Et の炭素同位体比 ( $\delta^{13}C_{C_{40:2}}$ ) を測定すれば、特定のハプト藻の  $\delta^{13}C$  値を測定したことになる。

研究に用いた U1516 のコアはリソクライン付近の水深に堆積したと考えられ、OAE2 時の CCD（炭酸塩補償深度）の一時的上昇 (Jones et al., 2022) により、炭素攪乱現象の中核層準では炭酸塩が保存されていないため、国際層序対比の基準となる  $\delta^{13}C$  層序が構築できていない (Petruzzo et al., 2021)。このような場合は全岩の  $\delta^{13}C_{org}$  の変動を用いて  $\delta^{13}C$  層序を構築するのが一般的だが（例えば Erbacher et al., 2005）、上述の通り OAE2 層準以外では TOC も低く分析困難であること、ノルマルアルカンの個別分子  $\delta^{13}C$  値変動を用いるとしても、TOC の低い層準に含まれているノルマルアルカンはバックグラウンド由来のものであり  $\delta^{13}C$  層序構築には不向きであった。以上のことから U1516 では  $\delta^{13}C$  層序が明らかにできなかったが、C<sub>40:2</sub>Et を用いる事で解決することができた。

アルケノンがもたらした 2 つ目の成果は、3 不飽和アルケノンを確認したことである。2 不飽和と 3 不飽和のアルケノンが同時に検出できる場合、その比率がハプト藻類生育当時の水温を反映することが知られている (Brassel et al., 1986)。C<sub>40:2</sub>Et の検出に関連して前後の GC/MS ピークについて鑑定を進めたところ、白亜紀では検出例のない Tetraconta-9*E*,16*E*,23*E*-triene-3-one（以下 C<sub>40:3</sub>Et）を検出した（図 3）。Prah et al. (2000) の UK<sub>37</sub> に倣い、UK<sub>40</sub> という指標を導入し、これを用いて相対的な表層水温の相対的変動を議論することが可能になった。具体的な水温換算に関しては今後の課題である。OAE 2 相当層準の下半部でアルケノン類を検出できたので、UK<sub>40</sub> の変動を  $\delta^{13}C_{C_{40:2}}$  と共に示す。

図 4 を見ると、OAE2 を誘導したとされる LIP 活動の直後に急激な水温上昇があることが UK<sub>40</sub> によって示されており、ピークに達した後急激な寒冷化が生じ、OAE 2 前よりも寒冷な状

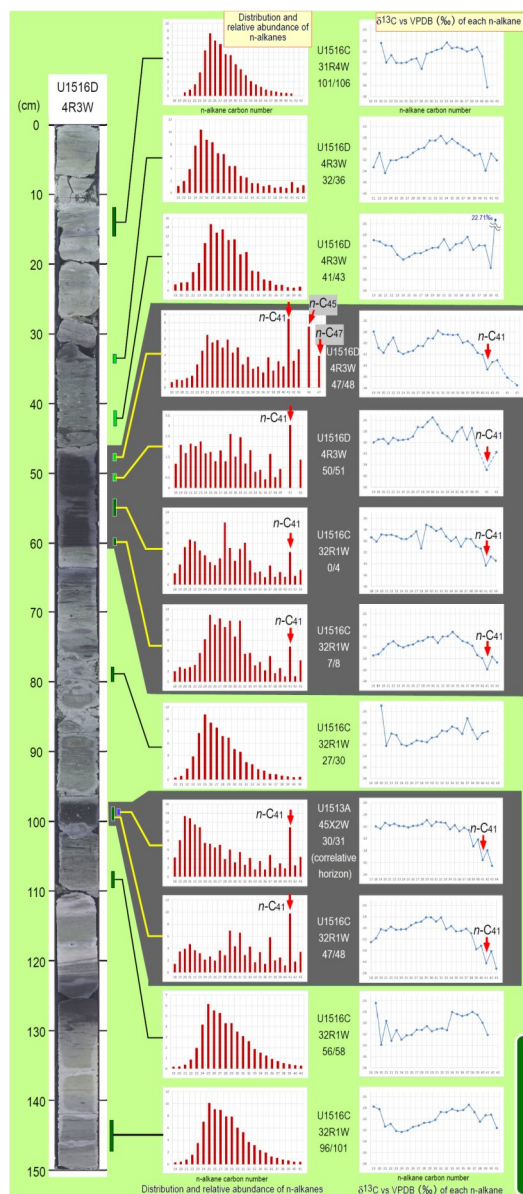


図 2. Site U1516 の OAE2 層準を挟むノルマルアルカンの含有量相対分布 (左) と炭素同位体比 (右)。

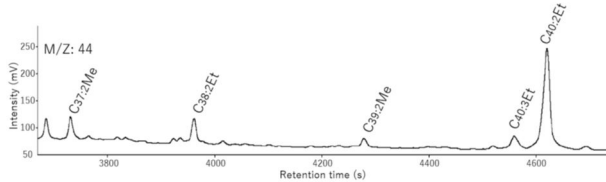


図 3. U1516C-32R-1W-75/75 において検出したアルケノン類の GC-C-IRMS における m/z:44 のクロマトグラム (Hasegawa and Goto, in review)。

態に陥る。これは北半球で知られている Plenus Cold Event に相当すると考えられる。このとき  $\delta^{13}\text{C}_{\text{C}_{40:2}}$  は世界の他地域の炭酸塩から知られている 2.5‰ よりも大規模な ~4‰ もの正方向へのエクスカージョンを記録している。海洋プランクトンの炭素同位体比が海洋の炭酸塩炭素の同位体比に対してより大きなエクスカージョンを記録したことが、南半球高緯度 (~60°S) でも確認されたのである。

以上のことは Plenus Cold Event は汎世界的なイベントであったこと、そしてこの寒冷化に連動する形で南半球高緯度域でも  $p\text{CO}_2$  の低下があり、この  $p\text{CO}_2$  低下イベントも汎世界的イベントであったことを意味する。

以上のように、本研究では C4 植物由来の分子を検出することはできなかったが、期せずして古海洋学的に非常に価値が高いアルケノン類を白亜系から検出することに成功した。さらに 3 不飽和アルケノンは世界で初めて白亜系から確認されたものである。それらを用いて南半球高緯度域さらには炭素循環攪乱現象として注目度の高い OAE 2 期の地球全体の環境変動について貢献度の高い議論を展開することができた。その成果の一部は現在 *Organic Geochemistry* 誌に投稿し査読中である。

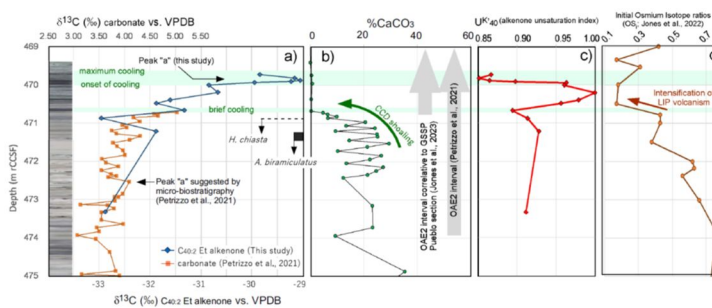


図4 . Site U1516 の OAE2 層準を挟む  $\text{C}_{40:2}\text{Et}$  (青)炭酸塩 (橙色: Petrizzo et al., 2021) (a), 炭酸塩含有量 (b), UK'40 (c) および Initial Os 同位体比 (Jones et al., 2022) (d). 図は Hasegawa and Goto (in review) による。

#### 引用文献

- Brassel, S. C., Eglinton, G., Marlowe, I. T., Pflaumann, U. and Sarnthein, M., 1986. Molecular stratigraphy: a new tool for climatic assessment. *Nature* 320, 129-133.
- Erbacher, J., Friedrich, O., Wilson, P. A., Birch, H., Mutterlose, J., 2005. Stable organic carbon isotope stratigraphy across Oceanic Anoxic Event 2 of Demerara Rise, western tropical Atlantic. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems* 6, Q06010.
- Hasegawa, T., Yamamoto, S., Pratt, L.M., 2006. Data Report: Stable Carbon isotope fluctuation of long-chain n-alkanes from Leg 208 Hole 1263A across the Paleocene/Eocene boundary. In Kroon, D., Zachos, J.C. and Richter, C. (Eds.), *Proc. ODP, Sci. Res. 208*, College Station, TX, pp. 1-11.
- Jones, M.M., Sageman, B.B., Selby, D., Jacobson, A.D., Batenburg, S.J., Riquier, L., MacLeod, K.G., Huber, B.T., Bogus, K.A., Tejada, M.L.G., Kuroda, J., Hobbs, R.W., 2023. Abrupt episode of mid-Cretaceous ocean acidification triggered by massive volcanism. *Nat. Geosci.* 16, 169-174.
- Kuyppers, M.M.M., Pancost, R.D., Sinninghe Damsté, J.S., 1999. A large and abrupt fall in Atmospheric  $\text{CO}_2$  concentration during Cretaceous times. *Nature* 399, 342-345.
- Petrizzo, M.R., Watkins, D.K., MacLeod, K.G., Hasegawa, T., Huber, B.T., Batenburg, S.J., Kato, T., 2021. Exploring the paleoceanographic changes registered by planktonic foraminifera across the Cenomanian-Turonian boundary interval and Oceanic Anoxic Event 2 at southern high latitudes in the Mentelle Basin (SE Indian Ocean). *Glob. Planet. Chang.* 103595.
- Prahl, F.G., Herbert, T., Brassell, S.C., Ohkouchi, N., Pagani, M., Repeta, D., Rosell-Mele, A., Sikes, E., 2000. Status of alkenone paleothermometer calibration: Report from Working Group 3. *Geochem. Geophys. Geosystem.* 7, 2000GC000058.

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計16件（うち査読付論文 12件／うち国際共著 9件／うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 Petrizzo, M.R., Amaglio, G., Watkins, D.K., MacLeod, K.G., Huber, B.T., Hasegawa, T., Wolfgring, E.	4. 巻 37
2. 論文標題 Biotic and Paleooceanographic Changes Across the Late Cretaceous Oceanic Anoxic Event 2 in the Southern High Latitudes (IODP Sites U1513 and U1516, SE Indian Ocean).	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Paleoceanography and Paleoclimatology	6. 最初と最後の頁 e2022PA004474
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1029/2022PA004474	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 Hironao Matsumoto, Rodolfo Coccioni, Fabrizio Frontalini, Kotaro Shirai, Luigi Jovane, Ricardo Trindade, Jairo F Savian, Junichiro Kuroda	4. 巻 13
2. 論文標題 Mid-Cretaceous marine Os isotope evidence for heterogeneous cause of oceanic anoxic events.	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Nature communications	6. 最初と最後の頁 239
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1038/s41467-021-27817-0	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 該当する
1. 著者名 Petrizzo M.R., Watkins D.K., MacLeod K.G., Hasegawa T., Huber B.T., Batenburg S.J., Kato T.	4. 巻 206
2. 論文標題 Exploring the paleoceanographic changes registered by planktonic foraminifera across the Cenomanian-Turonian boundary interval and Oceanic Anoxic Event 2 at southern high latitudes in the Mentelle Basin (SE Indian Ocean)	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Global and Planetary Change	6. 最初と最後の頁 103595
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1016/j.gloplacha.2021.103595	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する
1. 著者名 Lee, E. Y.* et al. (19名及びIODP Expedition 369 Science Party. Hasegawa, T.は後者に含まれる)	4. 巻 82
2. 論文標題 Early Cretaceous subsidence of the Naturaliste Plateau defined by a new record of volcanoclastic-rich sequence at IODP Site U1513	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Gondwana Research	6. 最初と最後の頁 1-11
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1016/j.gr.2019.12.007	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 Toyama, K., Paytan, A., Sawada, K. and Hasegawa, T.*	4. 巻 535
2. 論文標題 Sulfur isotope ratios in co-occurring barite and carbonate from Eocene sediments: A comparison study	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Chemical Geology	6. 最初と最後の頁 119454
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.chemgeo.2019.119454	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 Miyajima Y., Watanabe, Y., Goto, A. S., Jenkins, R. G., Sakai, S., Matsumoto, R. and Hasegawa, T.	4. 巻 189
2. 論文標題 Archaeal lipid biomarker as a tool to constrain the origin of methane at ancient methane seeps: Insight into subsurface fluid flow in the geological past.	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Journal of Asian Earth Sciences	6. 最初と最後の頁 104134
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.jseaes.2019.104134	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 MacLeod, K. G.* et al. (Hasegawa, T. 31人中17番)	4. 巻 83
2. 論文標題 Late Cretaceous stratigraphy and paleoceanographic evolution in the Great Australian Bight Basin based on results from IODP Site U1512.	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Gondwana Research	6. 最初と最後の頁 85-95
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.gr.2020.01.009	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 Chen, H., Xu, Z., Bayon, G., Batenburg, S.J., Petrizzo, M.R., Hasegawa, T., Li, T.	4. 巻 209
2. 論文標題 Enhanced hydrological cycle during Oceanic Anoxic Event 2 at southern high latitudes: New insights from IODP Site U1516	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Global and Planetary Change	6. 最初と最後の頁 103735
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.gloplacha.2022.103735	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 梶田 展人, 中村 英人	4. 巻 54
2. 論文標題 アルケノン生産種の多様性 陸水域における温度プロキシとしての発展について	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 地球化学	6. 最初と最後の頁 79-96
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.14934/chiikyukagaku.54.79	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Hirotō Kajita, Hideto Nakamura, Naohiko Ohkouchi, Naomi Harada, Miyako Sato, Shun Tokioka, Hodaka Kawahata	4. 巻 142
2. 論文標題 Genomic and geochemical identification of the long-chain alkenone producers in the estuarine Lake Takahoko, Japan: Implications for temperature reconstructions	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Organic Geochemistry	6. 最初と最後の頁 103980
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.orggeochem.2020.103980	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 MacLeod, K. G.* et al. (Hasegawa, T. 31人中17番)	4. 巻 83
2. 論文標題 Late Cretaceous stratigraphy and paleoceanographic evolution in the Great Australian Bight Basin based on results from IODP Site U1512.	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Gondwana Research	6. 最初と最後の頁 80-95
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.gr.2020.01.009.	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 Hideto Nakamura	4. 巻 35
2. 論文標題 Plant-derived triterpenoid biomarkers and their applications in paleoenvironmental reconstructions: chemotaxonomy, geological alteration, and vegetation reconstruction	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Researches in Organic Geochemistry	6. 最初と最後の頁 11-35
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.20612/rog.35.2_11	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Lee, E. Y.* et al. (19名及びIODP Expedition 369 Science Party. Hasegawa, T.は後者に含まれる)	4. 巻 82
2. 論文標題 Early Cretaceous subsidence of the Naturaliste Plateau defined by a new record of volcanoclastic-rich sequence at IODP Site U1513.	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Gondwana Research	6. 最初と最後の頁 1-11
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.gr.2019.12.007	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 Toyama, K., Paytan, A., Sawada, K. and Hasegawa, T.*	4. 巻 535
2. 論文標題 Sulfur isotope ratios in co-occurring barite and carbonate from Eocene sediments: A comparison study	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Chemical Geology	6. 最初と最後の頁 119454
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.chemgeo.2019.119454Get	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 4.Miyajima Y., Watanabe, Y., Goto, A. S., Jenkins, R. G., Sakai, S., Matsumoto, R. and Hasegawa, T.	4. 巻 189
2. 論文標題 4.Miyajima Y., Watanabe, Y., Goto, A. S., Jenkins, R. G., Sakai, S., Matsumoto, R. and Hasegawa, T., Archaeal lipid biomarker as a tool to constrain the origin of methane at ancient methane seeps: Insight into subsurface fluid flow in the geological past.	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Journal of Asian Earth Sciences	6. 最初と最後の頁 104134
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.jseaes.2019.104134	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Hobbs, R.W., Huber, B.T., Bogus, K.A., and the Expedition 369 Scientists	4. 巻 369
2. 論文標題 Australia Cretaceous Climate and Tectonics	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Proceedings of the International Ocean Discovery Program	6. 最初と最後の頁 e-publication
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.14379/iodp.proc.369.2019	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -



〔学会発表〕 計14件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 7件）

1. 発表者名 長谷川卓・小宮啓路
2. 発表標題 Mid-Cretaceous Event in southern high latitude, IODP Site U1516.
3. 学会等名 日本地球惑星科学連合2023年会（国際学会）
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 高橋月香・長谷川卓
2. 発表標題 白亜紀セノマニアン期後期の古水温指標としての長鎖アルケノンの層序変動とその意義
3. 学会等名 日本地球惑星科学連合2023年会（国際学会）
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 長谷川卓・後藤晶子・高木優祐・加藤禎理・森川昇汰
2. 発表標題 白亜紀の高緯度古インド洋古海洋学におけるC40 アルケノンの重要性：特に海洋無酸素事変2に注目して
3. 学会等名 地球環境史学会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Hasegawa, T., Goto, S. A.,
2. 発表標題 Mid-Cretaceous climatic perturbation in the southern high latitude ocean: drastic warming and cooling across the OAEs and the mid-Cenomanian event
3. 学会等名 Cretaceous Symposium 2022, Warsaw, (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 中村 英人
2. 発表標題 古環境指標として利用されるハプト藻・真正眼点藻バイオマーカー
3. 学会等名 日本プランクトン学会2021年秋期シンポジウム「プランクトンと古環境・古生態復元」
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Hasegawa, T. and Goto, S. A.
2. 発表標題 Carbon and hydrogen isotopes of C40 alkenones and C41 n-alkane from OAE2 interval of IODP Site U1516 in Southern high latitude
3. 学会等名 Annual Meeting of Japan Geoscience Union, 2020 (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Hasegawa, T. Kato, T., Toyama, K. and Goto, S. A. and IODP Exp. 369 Scientists,
2. 発表標題 Cretaceous paleoceanographic events recorded in sedimentary sequences from IODP Exp. 369 in Southern high latitude: Oxygen and carbon isotope stratigraphy and implication from biomarkers
3. 学会等名 Annual Meeting of Japan Geoscience Union, 2020 (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Toyama, K., Paytan, A., Sawada, K. Hasegawa, T.
2. 発表標題 Sulfur isotope ratios in co-occurring barite and carbonate from Eocene sediments: A comparison study
3. 学会等名 Annual Meeting of Japan Geoscience Union, 2020 (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Hasegawa, T., Goto, A. S., Kato, T.
2. 発表標題 Biomarkers across the Cretaceous OAE2 interval from IODP site U1516: anomalous distribution of long-chain n-alkanes
3. 学会等名 Fall meeting of American Geophysical Union (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 長谷川卓・外山浩太郎・A. Paytan・沢田健・後藤(桜井)晶子・長谷部桂一朗・中瀬千遥
2. 発表標題 始新世の海水に含まれる硫酸イオンの硫黄同位体比経時変動: CASと遠洋性重晶石
3. 学会等名 地球環境史学会2019年会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 長谷川卓・加藤禎理・後藤晶子
2. 発表標題 3. 長谷川卓*・加藤禎理・後藤晶子, 南半球高緯度インド洋の白亜紀OAE 2 堆積物の有機地球化学的特徴
3. 学会等名 日本有機地球化学会金沢シンポジウム
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 高木優佑・竹田ゆきな・定見謙吾・後藤晶子・長谷川卓
2. 発表標題 IODP Site U1512A (グレートオーストラリア湾) から得られた上部白亜系の炭素同位体比層序およびバイオマーカー組成
3. 学会等名 日本有機地球化学会金沢シンポジウム
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 森川昇汰・後藤（桜井）晶子・長谷川卓
2. 発表標題 南インド洋メンテレ海盆から得られた下部白亜系バイオマーカーの特徴とその意義
3. 学会等名 日本有機地球化学会金沢シンポジウム
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 梶田 展人, 中村 英人, 川幡 穂高
2. 発表標題 Isochrydaceae科ハプト藻が合成するアルケノン -国内湖沼における研究例-
3. 学会等名 日本地球化学会年会
4. 発表年 2019年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

#### 6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究分担者	中村 英人 (Nakamura Hideto) (00785123)	北海道大学・大学院理学研究科・助教  (10101)	
研究分担者	黒田 潤一郎 (Kuroda Junichiro) (10435836)	東京大学・大気海洋研究所・准教授  (12601)	
研究分担者	守屋 和佳 (Moriya Kazuyoshi) (60447662)	早稲田大学・教育・総合科学学術院・教授  (32689)	

#### 7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関			
イタリア	ミラノ大学			
米国	スミソニアン博物館	カリフォルニア大学サンタクルズ	ミズーリ大学	
米国	ルイジアナ大学ラファイエット校	オクラホマ州立大学		
英国	オクスフォード大学	ダーラム大学	エクセター大学	
中国	中国科学院海洋研究所	南京大学	中国地質大学	
オーストラリア	ウロンゴン大学			
イタリア	ミラノ大学			