

科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和 5 年 6 月 16 日現在

機関番号：13901

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2020～2022

課題番号：20K04143

研究課題名(和文) 史上最大の大量絶滅事件と海洋無酸素事変を境に変化した海水化学組成の実態解明

研究課題名(英文) Variations of seawater chemistry across the most severe oceanic anoxia and mass extinction event

研究代表者

高橋 聡 (Takahashi, Satoshi)

名古屋大学・環境学研究科・准教授

研究者番号：60615251

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,300,000円

研究成果の概要(和文)：本研究は、約2.5億年前に起きた大量絶滅事件を境に海洋環境と海水の化学組成がどのように変化したかをテーマに実施された。この時代の記録を見出すために当時の遠洋性深海岩の地層と海山石灰岩層を取りそろえ、研磨断面の観察、無機・有機の手法を駆使した化学分析を行った。主な成果として、大量絶滅期の低緯度・中緯度の順に無酸素海洋が発達したこと、無酸素海洋発達後に広範囲な海域で微量元素組成が極端に減少していたことが解明されたことが挙げられる。この時期に反応鉄と有機リンの深海底における減少が示されたため、栄養元素の挙動が変化し海洋の無酸素化の促進と表層光合成生物の群集組成の変化にも寄与していた可能性がある。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究が取り組んだ古太平洋の遠洋域の海洋溶存酸素環境史と海水組成比の変動データは、日本・ニュージーランドの地質からのみ得られる希少なものである。したがって、本研究の成果は当時のグローバルな環境変化を捉える上でこの分野の研究に学術的に大きな貢献をしている。

2.5億年前の火山活動を通して放出された炭素ガスは現代の産業活動により放出されているものの年間値の数千から万倍に相当すると見積もられている。本研究の社会的意義としては、現代の人類が直面している炭素ガスによる温暖化などが極端に進行した場合に海洋環境がどのように変化するか一例を示したことが意義深い。

研究成果の概要(英文)：This research focused on how the marine environment and seawater chemistry changed across the mass extinction event that occurred ca. 250 million years ago. In order to uncover records of this time period, pelagic deep-sea sedimentary rocks and pelagic seamount limestone were collected, and observations of polished sections and various chemical analyses utilizing inorganic and organic methods were conducted. The main findings include the development of oxygen-depleted oceans in the low- to mid-latitudes during the mass extinction period and the subsequent extreme depletion of trace element compositions in extensive marine areas. It was also revealed that the decrease in reactive iron and organic phosphorus in the deep-sea floor during this period could have contributed to the promotion of ocean deoxygenation and changes in the composition of surface photosynthetic organisms.

研究分野：地質学、古生物学

キーワード：古生代中生代 大量絶滅 古太平洋遠洋 海洋無酸素 海洋生物必須元素

1. 研究開始当初の背景

過去6億年間に地球上の動物種の8割以上が消滅する大量絶滅事変が5回起きている。その中で、約2.5億年前に起きた古生代ペルム紀と中生代三畳紀の境界期で発生した大量絶滅事件は、消滅した化石種数と環境変動規模の観点で史上最大のものであり、その実態解明の研究は注目を集めている。この大量絶滅と同時期に海洋の酸素が著しく減少していたという証拠が各地から報告されてきた(総説の例:高橋 2013)。その主要因は、シベリアで起きた大規模火山活動に起因した気候変動と大陸風化の促進で、風化物質の過剰流入による海の肥沃化と高一次生産により、海の酸素が消費されたとする考えが有力視されている(Algeo et al., 2011)。

海洋無酸素の地質学的証拠は、主に大陸に近い浅海域の地層から多く報告されてきた。一方で海洋無酸素が大陸から数千キロメートル離れた遠洋域の深海底でも起きていることが申請者らの研究で明らかになってきた。その証拠は、日本やニュージーランドなどの環太平洋域の付加体地質に残る遠洋性深海堆積岩や海山炭酸塩岩の地層に見出すことが出来る。本研究はこれらの遠洋域の堆積岩の地質試料を対象に地球環境史の解釈を試みる。

2. 研究の目的

本研究の目的は、日本とニュージーランドの地質に残る遠洋域の堆積記録からペルム紀末の大量絶滅期とその回復期である前期三畳紀の遠洋域環境における海洋酸素濃度の変化、海水化学組成の間接記録、海底における元素収支、生物の応答記録を解釈することである。

3. 研究の方法

上述の目的達成のために、次の方法による研究を実施した。

3-1. 堆積岩試料の準備

日本とニュージーランドの付加体地質中に残る遠洋性深海地層(チャート、粘土岩)と遠洋性炭酸塩岩層(石灰岩)から当時の試料を連続的に採取する。

3-2. 岩石試料断面の観察

採取した岩石の切断研磨面および薄片を作成する。作成したものの顕微鏡観察から化石殻の有無を判別し、当時の生態系の情報を得る。また鏡面研磨した岩石薄片の観察から黄鉄鉱の記載を行い、堆積当時の溶存酸素環境と硫化水素の発生状況を復元する。

3-3. 岩石試料の無機元素化学分析

岩石試料を粉末化する。粉末を利用して、鉄化学種分析、リン化学種分析、主要・微量元素組成(特に酸化還元鋭敏元素)分析を行い、海水環境中の酸化還元状態、生物必須元素の挙動について明らかにする。

3-4. 岩石試料の有機地球化学分析

岩石試料を有機物の汚染が最小限になるように粉末化する。試料中の非可溶性有機物をクロム酸処理することで、当時の光合成生物の記録を葉緑体の有機分子化石を検出することを試みる。

4. 研究成果

3年間の研究活動により次のような成果が得られた。

4-1. 研究環境の整備

ペルム紀-三畳紀時の遠洋環境を記録した堆積岩の試料を、新たに採取したものと代表者が保管しているものを合わせて統合的にリスト化、ラベリングし、各種の分析作業に効率的に活用するための条件を整えた。代表者の所属機関の異動に伴い、これらの試料を搭載したコンテナ類を保管管理するための収蔵庫を名古屋大学に建造した。

4-2. 野外調査活動

期間中に複数箇所の地域を訪れ、地質調査と試料採取を行った。主な場所は、岩手県と京都府に位置するペルム紀-三畳紀境界(安家森セクション、兎原セクション)、京都と愛知県に位置する前期三畳紀-中期三畳紀の地層(桃太郎神社セクション、宝積寺セクション、足谷セクション等)である。野外では詳細な地質構造と層序の観察を実施し、無酸素海洋を記録する黒色粘土岩層の分布について新発見が得られた(Muto et al., 2020等)。

4-3. 室内分析作業

野外調査で得た岩石試料をもとに、切断研磨面と薄片を作成した。それらの検鏡の結果、珪質微化石(放射虫)や有機質微化石(記載・分類検討中)を見出すことができ、当時の遠洋域生物の基礎情報を得ることができた。また、主に前期三畳紀にみられた黒色粘土岩層およびチャート層の研磨断面を反射顕微鏡下で観察し黄鉄鉱を分類した。これらの分析の結果、粒径の細かいフランクボイド黄鉄鉱の多産する地層層準を複数見出すことができ、当時の海洋の水柱に硫化水素が発生した記録として解釈できた。

化学分析作業では、作業環境を整えて鉄化学種の抽出分析を導入した。粉末試料の希塩酸処理と分光光度計分析により、各試料中の二価鉄と三価鉄の濃度を測定した。このデータを基に、

各時代の堆積岩試料について黄鉄鉱の酸化による鉄元素の濃度を定量評価することに成功した。リンの化学種分析を英国リーズ大学・和蘭国ユトレヒト大学 Martin Schobben 研究員（当時）の協力の下データを取りそろえた。その結果、ペルム紀末に有機質リンの挙動が大きく変化し、堆積場から海水に放出された可能性があること、類似した挙動とその影響が三疊紀の前期には徐々に小さくなっていくことが明らかになった。堆積岩粉末を酸分解したものを ICP-MS、ICP-AES で分析し、元素組成を解析した。その結果、バナジウム、ウラン、モリブデン (V, U, Mo) などの酸化還元鋭敏元素の濃度が各堆積場における通常の状態を大きく上回る濃度で濃集する層準を複数のペルム紀末の地層セクションに見出した。これらは無酸素-硫化水素環境の発達を指示する。また、前期三疊紀の試料からは Mo のみが濃集する層準も見出され、先に示した黄鉄鉱の産状と合わせて考察することで、堆積場より上部の水柱海水環境が無酸素化したことを記録すると示すことが出来た。

炭酸塩岩からなるペルム紀-三疊紀境界層（宮崎県上村セクション）の岩石試料を粉末に加工した。これらのサンプルを基に、研究協力者（東京大学 狩野彰宏教授、リーズ大学 Tianchen He 研究員）の協力を得て、炭素同位体比と元素組成の分析を行った。測定の結果、当初の計画で注目していたリン (P) などの栄養元素の濃度は大量絶滅イベント境界を挟んで著しくは変動しないことが明らかになった。その一方で、三疊紀最前期のサンプルからはヨウ素 (I) 濃度が著しく低いものがみられ、遠洋浅海域の無酸素化の傾向をとらえた可能性が考えられる。

各地のペルム紀-三疊紀境界から取りそろえた岩石試料を基に有機地球化学分析を繰り返し、葉緑体（クロロフィル-a, バクテリオクロロフィル）の有機分子化石を抽出できる最適条件を検討した。様々な条件下で分析作業を実施した結果、緑色硫黄細菌の有機分子化石が増加する傾向が示されてきた南中国メイシヤンセクションの地層層準からバクテリオクロロフィル有機分子化石が顕著に増加する傾向を捉えることに成功した。同様の分析作業を遠洋域深海性のチャートや粘土岩層に応用して分析作業を継続中であり、光合成生物の群集組成比の大きなシフトを見出しつつある。

4-4. 成果の総括

これまでに明らかにした地質記録により、ペルム紀-三疊紀の大量絶滅とその後の三疊紀前期の回復期において、海洋環境がどのように変化してきたのかが明らかになった。

史上最大の大量絶滅が起きたペルム紀末-最前期三疊紀の時代において、およそ 10 万年の時間スケールで低緯度遠洋域から中緯度南半球に無酸素な海洋環境が見られるようになり、黄鉄鉱や各種元素組成の変化から指示される無酸素-硫化水素環境が海洋に発達した。その後、最前期三疊紀では、本研究が検討した地層セクションすべてでウラン (U) など他の無酸素環境指標と同調せずにモリブデン (Mo) の減少が起きていることが明らかになり、広範囲で海洋の微量元素が減少したことが明示された。さらに、大量絶滅期から 100 万年以上経過した前期三疊紀の後半部においては、遠洋域においては Mo と黄鉄鉱の増加のみで示される海洋の貧酸素-無酸素化が何度も繰り返して起きていることが判明した。これは、Mo の海水濃度の回復と海洋無酸素の発達形式の変化（例えば、ウラン (U) 等が海底で濃集しない、海洋水柱上部でのみ強く起こる海洋無酸素化）が示される。

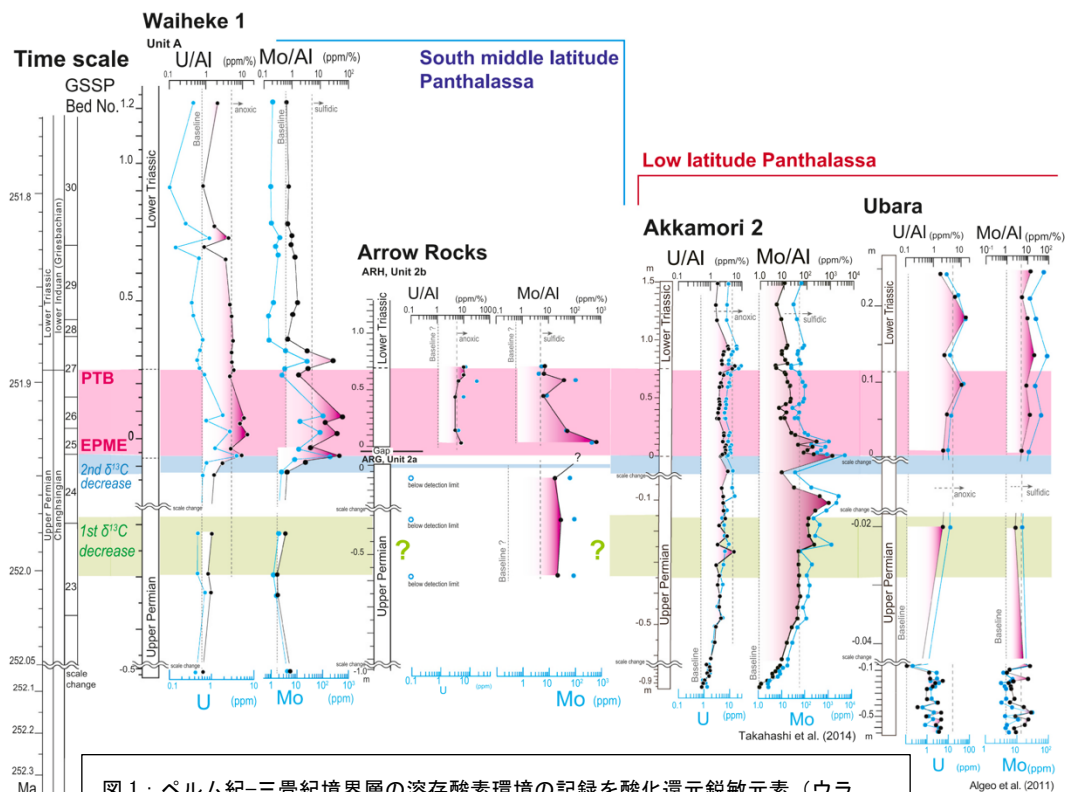


図 1: ペルム紀-三疊紀境界層の溶存酸素環境の記録を酸化還元鋭敏元素（ウラン、モリブデン）で検討した図。Takahashi et al., (2021GPC)より抜粋。

研究活動の過程で進展があった炭酸塩岩の元素組成の変化と深海堆積岩からのになった葉緑体化石の抽出研究の詳細は次の研究計画に引き継がれる。

4-5. 研究成果の公表

ニュージーランド北島で採取した試料をはじめとした複数域のペルム紀-三畳紀境界層の化学分析結果をまとめ、国際誌に公表した。愛知県犬山で採取した前期三畳紀の試料のコノドント化石および堆積岩の化学組成の結果を論文にまとめ、国際誌投稿が間近である。さらに、ペルム紀-三畳紀境界層の炭酸塩岩と泥質岩をもとに、葉緑体の有機分子化石を抽出した結果と実験の最適条件について、分担者朝比奈を筆頭に国際誌に公表した。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計14件（うち査読付論文 14件 / うち国際共著 4件 / うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 Kaiho Kunio, Tanaka Daisuke, Richoz Sylvain, Jones David S., Saito Ryosuke, Kameyama Daichi, Ikeda Masayuki, Takahashi Satoshi, Aftabuzzaman Md., Fujibayashi Megumu	4. 巻 579
2. 論文標題 Volcanic temperature changes modulated volatile release and climate fluctuations at the end-Triassic mass extinction	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Earth and Planetary Science Letters	6. 最初と最後の頁 117364 ~ 117364
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.epsl.2021.117364	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 He Tianchen, Newton Robert J., Wignall Paul B., Reid Stephen, Dal Corso Jacopo, Takahashi Satoshi, Wu Hepin, Todaro Simona, Di Stefano Pietro, Randazzo Vincenzo, Rigo Manuel, Dunhill Alexander M.	4. 巻 210
2. 論文標題 Shallow ocean oxygen decline during the end-Triassic mass extinction	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Global and Planetary Change	6. 最初と最後の頁 103770 ~ 103770
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.gloplacha.2022.103770	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 Takahashi Satoshi, Hori Rie S., Yamakita Satoshi, Aita Yoshiaki, Takemura Atsushi, Ikehara Minoru, Xiong Yijun, Poulton Simon W., Wignall Paul B., Itai Takaaki, Campbell Hamish J., Sporli Bernard K.	4. 巻 207
2. 論文標題 Progressive development of ocean anoxia in the end-Permian pelagic Panthalassa	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Global and Planetary Change	6. 最初と最後の頁 103650 ~ 103650
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.gloplacha.2021.103650	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 Yoshizawa Kazuko, Takahashi Satoshi, Muto Shun, Ehiro Masayuki, Tsuihiji Takanobu	4. 巻 567
2. 論文標題 Oceanic water redox conditions of the region between Tethys and Panthalassa during the late early Triassic	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology	6. 最初と最後の頁 110143 ~ 110143
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.palaeo.2020.110143	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 Asahina Kenta, Takahashi Koji U., Suzuki Yuichiro, Nakajima Takeshi, Kobayashi Miyuki	4. 巻 50
2. 論文標題 Effect of Maturation on the Dimethyl Naphthalene Indicator Used to Evaluate the Source Organic Type of Crude Oil	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Chemistry Letters	6. 最初と最後の頁 1718 ~ 1721
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1246/cl.210342	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 Hiki Kyoshiro, Asahina Kenta, Kato Kota, Yamagishi Takahiro, Omagari Ryo, Iwasaki Yuichi, Watanabe Haruna, Yamamoto Hiroshi	4. 巻 8
2. 論文標題 Acute Toxicity of a Tire Rubber-Derived Chemical, 6PPD Quinone, to Freshwater Fish and Crustacean Species	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Environmental Science & Technology Letters	6. 最初と最後の頁 779 ~ 784
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1021/acs.estlett.1c00453	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 Asahina Kenta, Nakajima Takeshi, Takahashi Koji U., Kobayashi Miyuki, Hanamura Yasuaki	4. 巻 56
2. 論文標題 Spatio-temporal changes in the depositional environment of Miocene organic rich mudstones in the Akita Basin deduced from biomarker analysis	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 GEOCHEMICAL JOURNAL	6. 最初と最後の頁 1 ~ 15
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.2343/geochemj.GJ22001	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 Del Piero Nicol, Rigaud Sylvain, Takahashi Satoshi, Poulton Simon W., Martini Rossana	4. 巻 190
2. 論文標題 Unravelling the paleoecology of flat clams: New insights from an Upper Triassic halobiid bivalve	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Global and Planetary Change	6. 最初と最後の頁 103195 ~ 103195
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.gloplacha.2020.103195	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 Muto Shun, Takahashi Satoshi, Yamakita Satoshi, Onoue Tetsuji	4. 巻 195
2. 論文標題 Scarcity of chert in upper Lower Triassic Panthalassic deep-sea successions of Japan records elevated clastic inputs rather than depressed biogenic silica burial flux following the end-Permian extinction	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Global and Planetary Change	6. 最初と最後の頁 103330 ~ 103330
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.gloplacha.2020.103330	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 Muto Shun	4. 巻 197
2. 論文標題 Recurrent deposition of organic-rich sediments in Early Triassic pelagic Panthalassa and its relationship with global oceanic anoxia: New data from Kyoto, Southwest Japan	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Global and Planetary Change	6. 最初と最後の頁 103402 ~ 103402
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.gloplacha.2020.103402	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 Yoshizawa Kazuko, Takahashi Satoshi, Muto Shun, Ehiro Masayuki, Tsuihiji Takanobu	4. 巻 567
2. 論文標題 Oceanic water redox conditions of the region between Tethys and Panthalassa during the late early Triassic	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology	6. 最初と最後の頁 110143 ~ 110143
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.palaeo.2020.110143	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 Muto Shun, Okumura Yohoko, Mizuhara Takeshi	4. 巻 25
2. 論文標題 Late Kungurian Conodonts of Pelagic Panthalassa from Seamount-Capping Limestone in Ogama, Kuzuu, Tochigi Prefecture, Japan	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Paleontological Research	6. 最初と最後の頁 105-119
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.2517/2020PR012	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 Asahina Kenta, Nakajima Takeshi, Morimoto Kazuya, Hanamura Yasuaki, Kobayashi Miyuki	4. 巻 49
2. 論文標題 The Effects of Clay Minerals on Methylated Naphthalenes as Maturity Indicators of Sedimentary Organic Matter	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Chemistry Letters	6. 最初と最後の頁 728 ~ 731
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1246/cl.200075	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 Nakano Hideyuki, Hirakawa Naoki, Matsubara Yasuhiro, Yamashita Shigeru, Okuchi Takuo, Asahina Kenta, Tanaka Ryo, Suzuki Noriyuki, Naraoka Hiroshi, Takano Yoshinori, Tachibana Shogo, Hama Tetsuya, Oba Yasuhiro, Kimura Yuki, Watanabe Naoki, Kouchi Akira	4. 巻 10
2. 論文標題 Precometary organic matter: A hidden reservoir of water inside the snow line	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Scientific Reports	6. 最初と最後の頁 7755
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1038/s41598-020-64815-6	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 -

〔学会発表〕 計6件 (うち招待講演 0件 / うち国際学会 0件)

1. 発表者名 藤井 孝志、朝比奈 健太、西岡 将輝
2. 発表標題 CO ₂ 地中固定化開発のための超臨界CO ₂ 条件下での触媒によるCO ₂ 転換挙動に関する実験的研究
3. 学会等名 日本化学会 第102春季年会(オンライン), 講演番号B304-1am-05
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 朝比奈 健太、高橋 幸士、森本 和也、中嶋 健、鈴木 祐一郎
2. 発表標題 ナフタレン組成を用いた原油の起源有機物指標の熱熟成による影響
3. 学会等名 日本化学会 第102春季年会(オンライン), 講演番号D103-2pm-07
4. 発表年 2022年

1. 発表者名	Satoshi Takahashi, Rie Hori, Satoshi Yamakita, Yoshiaki Aita, Atsushi Takemura, Minoru Ikehara, Yijin Xiong, Simon W. Poulton, Paul B. Wignall, Takaaki Itai, Hamish J. Campbell, Bernard K. Sporli
2. 発表標題	Progress of the end-Permian oceanic anoxia in the pelagic Panthalassa.
3. 学会等名	地球惑星科学連合大会(オンライン), BCG04-01, Fri. Jun 4, 2021 9:00 AM - 9:15 AM
4. 発表年	2021年

1. 発表者名	高橋 聡、山北 聡、鈴木 紀毅
2. 発表標題	最前期三畳紀の深海黒色粘土岩から産したコノドント自然集合体化石
3. 学会等名	JpGU-AGU Joint Meeting 2020. BPT05-03, オンライン口頭発表
4. 発表年	2020年

1. 発表者名	吉澤 和子、高橋 聡、武藤 俊、永広 昌之、對比地 孝亘
2. 発表標題	南部北上帯大沢層が記録する、前期三畳紀スバシアンの堆積環境
3. 学会等名	第6回地球環境史学会年会、V17、オンデマンドビデオ講演
4. 発表年	2020年

1. 発表者名	武藤 俊、奥村よほ子、水原 猛
2. 発表標題	足尾山地ジュラ紀付加体中の鍋山層石灰岩から産出した前期ペルム紀(後期Kungurian)コノドント化石
3. 学会等名	日本古生物学会第170回例会B23
4. 発表年	2021年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

高橋聡 研究活動紹介ページ
https://sites.google.com/site/satoshi_takahashi17/home

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	武藤 俊 (Muto Shun) (80849951)	国立研究開発法人産業技術総合研究所・地質調査総合センター・研究員 (82626)	
研究分担者	朝比奈 健太 (Asahina Kenta) (40728276)	国立研究開発法人産業技術総合研究所・地質調査総合センター・研究員 (82626)	

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
---------	---------