

令和 6 年 6 月 6 日現在

機関番号：82706
研究種目：基盤研究(A)（一般）
研究期間：2021～2023
課題番号：21H04527
研究課題名（和文）電気化学で拓く地球，そして宇宙における生命の起源

研究課題名（英文）Geoelectricity-driven origin of life

研究代表者

北台 紀夫（Kitadai, Norio）

国立研究開発法人海洋研究開発機構・超先鋭研究開発部門（超先鋭研究開発プログラム）・副主任研究員

研究者番号：80625723

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 33,100,000円

研究成果の概要（和文）：本研究では、主に室内実験と熱力学計算から、深海熱水噴出孔環境に生じる発電現象が生命の化学進化に果たした役割を調査した。一酸化炭素やアンモニアなどの単純な無機物から、生命構成分子の重要な原料となる尿素が高収率に得られることを示した他、同様の反応条件下でアミノ酸の重合化が進むことを実証した。また、アンモニアが海水に拡散・散逸することなく、熱水噴出孔に選択的に濃集するメカニズムを見出した。加えて、高温高圧条件で使用できる電気化学セルを開発し、熱水噴出孔内部で水素や硫化水素から電子が生じるプロセスの再現も行った。これらの取り組みから得られた成果は、計14報の査読付き論文として、専門誌に掲載した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

近年の宇宙探査技術の進歩に伴い、地球生命の起源、そして宇宙における生命の存在に対する関心は大きく高まっている。深海熱水系は地球惑星科学・生物学等の複数の分野から生命発生をもたらした可能性が指摘されてきたものの、これを裏付ける化学的根拠は不足していた。主因の一つには、熱水噴出孔環境では熱水反応しか起こらないという認識が専門家の間にも広がっていた点が挙げられる。我々は、深海熱水系の調査から熱水発電という現象を見出し、この現象が生命発生に重要な様々な化学反応を駆動できることを実証してきた。この成果は深海熱水系における生命発生過程の理解を深め、今後の宇宙生命探査にも重要な指針を提供しうると考えられる。

研究成果の概要（英文）：Our recent electrochemical survey of deep-sea hydrothermal systems observed a sustained flow of electrons from the inside to the outside of vents (that is, the hydrothermal electricity generation). Hydrothermal systems have been suggested to be common in the Universe, or at least in our solar system. The electrochemical environments they provide may have driven the generation of a variety of biologically important molecules through abiotic CO₂ fixation, leading to the emergence of a prebiotic precursor of metabolism. In this study, we examined this possibility by laboratory simulations and thermodynamic calculations, and explored environmental conditions suitable for a series of chemical processes from simple inorganic molecules to building blocks of life. The obtained results were reported in 14 peer-reviewed papers by the end of this project. Some additional reports have also been prepared for publication.

研究分野：生命の起源および進化学

キーワード：アストロバイオロジー

様式 C - 19、F - 19 - 1 (共通)

1. 研究開始当初の背景

地球生命はどこで・どのように誕生したのか？宇宙において生命はどれほど特殊な存在なのか？これらの問いを解くカギとなる環境として、深海熱水系は天文学・地質学・生物学など様々な分野から注目されている。太陽系内探査では、土星や木星の衛星・形成初期の火星に活発な熱水活動が見出され、地球外生命の存在可能性が現実味を持って議論されるようになった。系外観測では、地球に類似した水惑星が多数発見され、また惑星や衛星に熱エネルギーを付与し長期間維持するメカニズムが提案されていることから、宇宙における熱水系の普遍性が示唆されている。一方、系統的・比較生理学的研究から、地球の全生物共通祖先はこのような環境でCO₂を炭素源とし、還元型アセチル CoA 経路や逆クエン酸回路の一部を経て生体分子を合成する独立栄養生物であったと推定されている。では、これら CO₂ 固定代謝の根源となった前生物プロセス(プロトメタボリズム)は、初期地球の深海熱水系でどのように生じたのか？それを再現するため、これまで CO₂ や有機物を熱水や岩石と共に煮る・流す・混ぜる等の実験が数多く行われてきた。しかしどの手段を使っても、プロトメタボリズムに関する反応はほとんど進行せず、有効な方法は不明であった。

近年、我々は沖縄トラフ深海熱水領域の電気化学調査を行い、噴出孔を中心とした岩体を流れる電流の存在を世界で初めて発見した。電子は熱水中の還元性成分の酸化(例えば $H_2 \rightarrow 2H^+ + 2e^-$)により生じ、熱水と海水との間の電位差に沿って、導電性を持つ噴出孔鉱物(硫化金属など)を通じて移動する。噴出孔近傍で起こる発電現象(熱水発電)は、深海熱水系に普遍的に見られる特徴から発するものであり、熱水発電は海洋底で幅広く、時代を通して、さらには熱水系を持つ水惑星において発生していると考えられる。

2. 研究の目的

本研究では、熱水発電がプロトメタボリズムの発生に寄与した可能性を室内実験と熱力学計算から検証した。単純な無機分子から生体分子へ至る一連の化学プロセスを実証し、進行に適した環境条件の推定を行った。

3. 研究の方法

室内実験は主に海洋研究開発機構の深海総合研究棟で行った。実験サンプルは多くの場合、空气中の酸素によって酸化されやすい特徴があったため、真空グローブボックスの特注品をサンプラテックから購入し、この中でサンプルの準備や保存を行った。グローブボックス内の酸素濃度はCoy製のガスアナライザー(CAM-12)により常時モニターし、嫌気状態が保たれていることを確認した。実験で得られた水溶液サンプルは、本プロジェクトの科研費で購入した高速液体クロマトグラフ質量分析計(LCMS-2050, 島津製作所製)や分光蛍光検出器(RF-20AXF, 島津製作所製)の他、海洋研究開発機構所有の核磁気共鳴装置(NMR)やガスクロマトグラフ質量分析計(GCMS)、イオンクロマトグラフィー(IC)などを用いて定量・定性分析した。固体サンプルの分析にはX線回折装置(XRD)や走査型電子顕微鏡(SEM)、エネルギー分散型X線分析装置(EDX)などを用いた。また、高エネルギー加速器研究機構のビームラインbL-12Cを利用した固体サンプル中の金属イオンの価数分析も行った。

4. 研究成果

まず、ターゲットの一つとして尿素の合成に取り組んだ。尿素は核酸塩基の原料となることから、プロトメタボリズムの重要な中間体と考えられている。実験では、一酸化炭素とアンモニア水溶液を含む反応系にポリサルフィドを加えることで、複数の反応が連鎖的に進行し、収率100%に近い尿素合成が50程度のマイルドな条件下で達成できることを示した。本成果はPeerJ Organic Chemistry誌に査読付き論文として報告した。また、本成果は工学的にも役立つ可能性が期待されたことから、特許として出願した(特願2022-013115)。

もう一つのターゲットとして、ペプチド合成にも取り組んだ。上述の一酸化炭素とポリサルフィドとの反応では、中間体として硫化カルボニルが生成する。硫化カルボニルはアミノ酸のペプチド化を促進することが知られているが、本研究では、硫化カルボニルの生成、及びペプチド化促進が一連のプロセスとして同水溶液条件下で進行すること、そして、温度やpHを調整することで、この連鎖反応が非常に低濃度のアミノ酸の重合を可能とすることを見出した。本成果はGeochimica et Cosmochimica Acta誌に査読付き論文として報告した。

さらに、アンモニアを選択的に濃集するメカニズムの実証にも成功した。アンモニアは生体分子（例えばアミノ酸）の合成に必須な窒素源の一つである。先行研究から、アンモニアは海底熱水噴出孔環境で起こる様々な熱水・電気化学反応によって生じていた可能性が示されてきたものの、生じたアンモニアが海水へと散逸することなく噴出孔近傍にどのように留まり、有機化学反応に関与してきたかは不明であった。本研究では、硫化鉄（マッキナワイト）を電気還元することで、相間の鉄原子がゼロ価へと変化し（ $\text{Fe}^{2+} + 2\text{e}^- \rightarrow \text{Fe}^0$ ）、アンモニアを選択的に結合する配位サイトが生じることを発見した。1mM アンモニアを含む模擬原始海水（1 M NaCl, CO_2 バブリングにより pH は弱酸性～中性）中での実験では、アンモニアの固液分配係数はマッキナワイトの電気還元により最大 55 倍に増大し、90%以上のアンモニアがマッキナワイトに濃集することが示された。本成果は Proceedings of the National Academy of Sciences 誌に査読付き論文として報告した。

加えて、熱水発電の実証実験についても進展があった。深海熱水噴出孔の内側で水素や硫化水素が酸化し自由電子が生じる現象は、熱水発電の起点となるプロセスであるものの、結果として得られる電位や電流が、熱水の温度や pH、硫化金属の組成などにどのように影響されるかは不明な点が多かった。このため、200 程度までの温度範囲で電位・電流をリアルタイムモニターできる高温電気化学セルの開発を行った。開発したセルの性能は、マンガン酸化物の高温下での電析実験によって評価され、2 報の査読付き論文としてまとめられている（Ceramics International 誌及び ACS Applied Energy Materials 誌）。このセルを用い、噴出孔環境に普遍的に存在する硫化鉄から生じる電位・電流の分析を行ったところ、電位は硫化鉄の還元型（Pyrrhotite）と酸化型（Pyrite）との間の平衡によって制御されることが見出された。また、電位を酸化方向に掃引した際に生じる電流は、高温ほど大きいことが分かった。この電流は主に Pyrrhotite の Pyrite への酸化反応により生じるが、Pyrite は水素によって次第に還元され、Pyrrhotite に戻る。すなわち、水素を含む熱水中において、硫化鉄は Pyrrhotite と Pyrite との間でその結晶構造を柔軟に変化させ、電位・電流を制御することが明らかとなった。本現象により得られる電位は、太古の水素を豊富に含むアルカリ熱水噴出孔環境においては、様々な有機化学反応を駆動するのに十分であると予想された。本成果は査読付き論文として国際誌への掲載を目指し、原稿にまとめているところである。

以上紹介した成果以外にも、共同研究者との取り組みから関連分野にインパクトのある成果が複数得られ、計 14 報の査読付き論文として国際誌及び国内誌に掲載された。これらは深海熱水系での生命発生プロセスの理解に大きく寄与している。また、現在進行中、又は将来計画されている地球外生命探査に対しても、化学的指針を導く基盤として寄与すると期待される。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計14件（うち査読付論文 13件／うち国際共著 2件／うちオープンアクセス 8件）

1. 著者名 Norio Kitadai, Satoshi Okada, Akiko Makabe, Eiji Tasumi, Masayuki Miyazaki	4. 巻 4
2. 論文標題 Polysulfide-assisted urea synthesis from carbon monoxide and ammonia in water	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 PeerJ Organic Chemistry	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.7717/peerj-ochem.6	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 -
1. 著者名 Yamei Li, Norio Kitadai, Yasuhito Sekine, Hiroyuki Kurokawa, Yuko Nakano, Kristin Johnson-Finn	4. 巻 13
2. 論文標題 Geoelectrochemistry-driven alteration of amino acids to derivative organics in carbonaceous chondrite parent bodies	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Nature Communications	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1038/s41467-022-32596-3	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 北台紀夫	4. 巻 50
2. 論文標題 生命起源のケミストリーは地球のハビタビリティの存続に寄与できるか？	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Viva Origino	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.50968/vivaorigino.50_4	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 -
1. 著者名 Wataru Takahagi, Norio Kitadai, Satoshi Okada, Hongyao Zhou, Ken Takai, Teppei Yamada	4. 巻 52
2. 論文標題 Quantification of Polysulfide Species in Aqueous Sulfur Thermocell	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Chemistry Letters	6. 最初と最後の頁 197-201
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1246/cl.220486	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 山口晃, 新井勝樹, An Niza El Aisnada, Lee Ji-Eun, 北台紀夫, 中村龍平, 宮内雅浩	4. 巻 62
2. 論文標題 重回帰分析による金属硫化物系CO2 還元電極触媒の設計指針の提示	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 まてりあ	6. 最初と最後の頁 40-47
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.2320/materia.62.40	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 Norio Kitadai, Shigeru Shimamura, Wataru Takahagi, Masayuki Miyazaki, Eiji Tasumi, Satoshi Okada	4. 巻 349
2. 論文標題 Elemental sulfur, hydrogen sulfide, and carbon monoxide-driven dimerization of glycine at sub-milimolar concentrations: Implications for the origin of life	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Geochimica et Cosmochimica Acta	6. 最初と最後の頁 55-63
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.gca.2023.03.033	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 -

1. 著者名 Norio Kitadai, Kumiko Nishiuchi, Yuko Nakano	4. 巻 55
2. 論文標題 A comprehensive predictive model for selenate adsorption on oxide minerals	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Geochemical Journal	6. 最初と最後の頁 193-207
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.2343/geochemj.2.0628	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 -

1. 著者名 Sebastian A. Sanden, Robert K. Szilagyi, Yamei Li, Norio Kitadai, Samuel M. Webb, Takaaki Yano, Ryuhei Nakamura, Masahiko Hara, Shawn E. McGlynn	4. 巻 50
2. 論文標題 Electrochemically induced metal- vs. ligand-based redox changes in mackinawite: identification of a Fe3+- and polysulfide-containing intermediate	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Dalton Transactions	6. 最初と最後の頁 11763-11774
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1039/d1dt01684a	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 Akira Yamaguchi, Katsuki Arai, An Niza El Aisnada, Ji-Eun Lee, Norio Kitadai, Ryuhei Nakamura, Masahiro Miyauchi	4. 巻 126
2. 論文標題 Multi-Regression Analysis of CO2 Electroreduction Activities on Metal Sulfides	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 The Journal of Physical Chemistry C	6. 最初と最後の頁 2772-2779
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1021/acs.jpcc.1c8993	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 Xiaofeng Zang, Yuichiro Ueno, Norio Kitadai	4. 巻 22
2. 論文標題 Photochemical synthesis of ammonia and amino acids from nitrous oxide	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Astrobiology	6. 最初と最後の頁 387-398
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1089/ast.2021.0064	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 Wataru Takahagi, Satoshi Okada, Yohei Matsui, Shigeaki Ono, Ken Takai, Yoshio Takahashi, Norio Kitadai	4. 巻 120
2. 論文標題 Extreme accumulation of ammonia on electroreduced mackinawite: An abiotic ammonia storage mechanism in early ocean hydrothermal systems	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Proceedings of the National Academy of Sciences	6. 最初と最後の頁 e2303302120
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1073/pnas.2303302120	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 Yamei Li, Hiroyuki Kurokawa, Yasuhito Sekine, Yoko Kebukawa, Yuko Nakano, Norio Kitadai, Naizhong Zhang, Xiaofeng Zang, Yuichiro Ueno, Gen Fujimori, Ryuhei Nakamura, Kosuke Fujishima, Junko Isa	4. 巻 9
2. 論文標題 Aqueous breakdown of aspartate and glutamate to n-w-amino acids on the parent bodies of carbonaceous chondrites and asteroid Ryugu	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Science Advances	6. 最初と最後の頁 eadh7845
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1126/sciadv.adh7845	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 -

1. 著者名 Otsubo Yoshiaki, Kanan Otani, Ailong Li, Kiyohiro Adachi, Shuang Kong, Norio Kitadai, Daisuke Hashizume, Ryuhei Nakamura, Takeshi Fujita, Masahiro Miyauchi, Akira Yamaguchi	4. 巻 50
2. 論文標題 Hydrothermal electrochemical flow reactor to independently control temperature, pressure, and potential for manganese oxide electrodeposition	5. 発行年 2024年
3. 雑誌名 Ceramics International	6. 最初と最後の頁 5992-6000
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.ceramint.2023.11.265	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 -

1. 著者名 Akira Yamaguchi, Ryota Kubo, An Niza El Aisnada, Kiyohiro Adachi, Ji-Eun Lee, Norio Kitadai, Daisuke Hashizume, Ryuhei Nakamura, Masahiro Miyauchi	4. 巻 7
2. 論文標題 Temperature and pressure dependence of hydrothermal electrodeposition of molybdenum sulfide	5. 発行年 2024年
3. 雑誌名 ACS Applied Energy Materials	6. 最初と最後の頁 2593-2599
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1021/acsaem.3c02565	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 -

〔学会発表〕 計17件 (うち招待講演 1件 / うち国際学会 2件)

1. 発表者名 Norio Kitadai
2. 発表標題 Chemistry of CO world: progress report 2022
3. 学会等名 Workshop on chemical roots of metabolism (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 北台紀夫
2. 発表標題 チオエステルの起源：深海熱水噴出孔環境が果たした役割
3. 学会等名 日本地球惑星科学連合2021年大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Yamei Li, Yasuhito Sekine, Norio Kitadai
2. 発表標題 Parent body processes reproduce soluble organics in carbonaceous chondrites via geo-electrochemistry
3. 学会等名 日本地球惑星科学連合2021年大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Natsumi Noda, Yasuhito Sekine, Yoshi Takahashi, Hiroshi Sakuma, Takahiro Kawai, Mayuko Nakagawa, Norio Kitadai, Krinsin Johnson-Finn, Shawn McGlynn
2. 発表標題 初期火星における二価鉄サポナイトの有機硫黄化合物生成、炭素循環、気候に対する役割
3. 学会等名 日本地球惑星科学連合2021年大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Natsumi Noda, Yasuhito Sekine, Yoshi Takahashi, Hiroshi Sakuma, Takahiro Kawai, Mayuko Nakagawa, Norio Kitadai, Krinsin Johnson-Finn, Shawn McGlynn
2. 発表標題 The role of ferrous saponite in the formation of sulfur-bearing organic matter on early Earth and early Mars
3. 学会等名 Goldschmidt Virtual 2021
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Natsumi Noda, Yasuhito Sekine, Yoshi Takahashi, Hiroshi Sakuma, Takahiro Kawai, Mayuko Nakagawa, Norio Kitadai, Krinsin Johnson-Finn, Shawn McGlynn
2. 発表標題 二価鉄サポナイトからの水素分子生成：分子地球化学による初期火星環境への示唆
3. 学会等名 2021年度 日本地球化学会年会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Natsumi Noda, Yasuhito Sekine, Yoshi Takahashi, Hiroshi Sakuma, Takahiro Kawai, Mayuko Nakagawa, Norio Kitadai, Krinsin Johnson-Finn, Shawn McGlynn
2. 発表標題 Hydrogen generation through interactions of ferrous saponite with H ₂ S-rich fluids on early Mars: Implications for planetary climate, environmental evolution, and habitability
3. 学会等名 AGU Fall Meeting 2021
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Satoshi Okada, Wataru Takahagi, Shigeaki Ono, Norio Kitadai
2. 発表標題 Surface structure and reaction mechanisms of CO ₂ reduction on partially electroreduced nickel sulfide
3. 学会等名 日本化学会第102春季年会 (2022)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Norio Kitadai
2. 発表標題 The role of sulfur in the chemical evolution of life
3. 学会等名 Joint CO world & 12th ELSI Symposium (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 北台紀夫
2. 発表標題 電気と乾燥の作用によるシュウ酸からのグリオキシル酸とピルビン酸の生成
3. 学会等名 日本地球化学 第70回年会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 山本正浩, 松本一希, 北台紀夫
2. 発表標題 前駆代謝の起源の再現を目指したジオケミカルフローリアクターの開発
3. 学会等名 日本地球惑星科学連合 2023年大会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Akira Tanemura, Masahiro Yamamoto, Norio Kitadai
2. 発表標題 Production of sulfide metal chimney wall in the flow-reactor simulating ancient deep-sea alkaline hydrothermal system
3. 学会等名 Joint CO world & 12th ELSI Symposium
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 北台紀夫
2. 発表標題 高温電気化学セルによる深海熱水発電現象の検証実験
3. 学会等名 第48回 生命の起原及び進化学会学術講演会
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 Yamei Li, Hiroyuki Kurokawa, Yasuhito Sekine, Yoko Kebukawa, Yuko Nakano, Norio Kitadai, Naizhong Zhang, Xiaofeng Zang, Yuichiro Ueno, Gen Fujimori, Ryuhei Nakamura, Kosuke Fujishima, Junko Isa
2. 発表標題 Role of mineral catalysis on the molecular evolution on solar system bodies
3. 学会等名 日本地球惑星科学連合 2023年大会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Walaa Elmasry, Satoshi Okada, Norio Kitadai
2. 発表標題 Polysulfide synthesis through electrochemical oxidation of thioglycine
3. 学会等名 日本地球惑星科学連合 2023年大会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 高萩航, 岡田賢, 松井洋平, 小野重明, 高井研, 北台紀夫
2. 発表標題 原始熱水噴出環境におけるマッキナワイトへの地球電気化学的アンモニア濃集
3. 学会等名 日本地球惑星科学連合 2023年大会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 北台紀夫
2. 発表標題 海底下の超臨界CO2環境におけるCO2, H2, H2Sからのメタンチオール生成
3. 学会等名 日本地球化学会 第70回年会
4. 発表年 2023年

〔図書〕 計2件

1. 著者名 地学団体研究会 (編)	4. 発行年 2024年
2. 出版社 平凡社	5. 総ページ数 2046
3. 書名 最新 地学事典	

1. 著者名 生命の起原および進化学会（監修）	4. 発行年 2024年
2. 出版社 朝倉書店	5. 総ページ数 312
3. 書名 生命起源の事典	

〔出願〕 計1件

産業財産権の名称 尿素の製造方法	発明者 北台紀夫	権利者 同左
産業財産権の種類、番号 特許、特願2022-13115	出願年 2022年	国内・外国の別 国内

〔取得〕 計0件

〔その他〕

<p>Geoelectricity-driven thioester formation https://chemistrycommunity.nature.com/posts/geoelectricity-driven-thioester-formation-a-possible-prebiotic-root-of-metabolism 「深海熱水電気化学メタボリズムファーストシナリオ」Version 2021 https://www.jamstec.go.jp/sugar/j/research/20210707/ 太古の深海熱水噴出孔環境におけるアンモニアの濃集機構を実証 https://www.jamstec.go.jp/j/about/press_release/20231003/ 炭素質コンドライト隕石と小惑星リュウグウのアミノ酸クライシス https://www.elsi.jp/news_events/highlights/2023/amino_acid_crisis/</p>
--

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	渋谷 岳造 (Shibuya Takazo) (00512906)	国立研究開発法人海洋研究開発機構・超先鋭研究開発部門(超先鋭研究開発プログラム)・主任研究員 (82706)	
研究分担者	山本 正浩 (Yamamoto Masahiro) (60435849)	国立研究開発法人海洋研究開発機構・超先鋭研究開発部門(超先鋭研究開発プログラム)・研究員 (82706)	

6. 研究組織（つづき）

	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	高井 研 (Takai Ken) (80359166)	国立研究開発法人海洋研究開発機構・超先鋭研究開発部門・ 部門長 (82706)	

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