

令和元年5月31日現在

機関番号：12601

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2016～2018

課題番号：16K05618

研究課題名(和文) 微生物代謝過程を考慮した海洋生物化学循環モデルの開発と原生代海洋環境変動の解明

研究課題名(英文) A study on the Proterozoic marine environment with a new model of marine biogeochemical cycle including microbial metabolism

研究代表者

田近 英一 (Tajika, Eiichi)

東京大学・大学院理学系研究科(理学部)・教授

研究者番号：70251410

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,400,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、きわめて貧酸素な環境条件にあった原生代の海洋化学環境と海洋微生物生態系活動の関係について、海洋生物化学循環-海洋微生物生態系-大気光化学系結合モデルを開発して検討を行った。その結果、完全な無酸素環境においては、鉄酸化光合成細菌の活動が大気へのメタン放出を飛躍的に増加させることによって、暗い太陽条件における気候形成に大きな役割を果たしていた可能性を明らかにした。一方、原生代の貧酸素環境における海洋一次生産は、現在の10-20%程度、酸素放出率は現在の25%程度であったことを明らかにした。このことは、原生代の酸素濃度が現在の1%以下であったことに合理的な説明を与えるものである。

研究成果の学術的意義や社会的意義

地球環境は、本来的に、大気・海洋・生命圏・固体地球等が互いに関連し合って成立しているが、そうした地球のシステム論的な理解はこれまできわめて限定的である。本研究は、生命圏を含む地球システムのモデリングによって、暗い太陽のパラドックスとして知られる初期地球環境の古典的問題の定量的な説明に初めて成功したほか、原生代の海洋基礎生産が現在の10%程度しかなかったことが当時の低酸素環境の一因であったことを初めて明らかにすることができた。こうしたシステム論的アプローチは、今後ますます重要となるはずであり、そのような方法論の開拓に本研究の学術的意義がある。

研究成果の概要(英文)：We investigated characteristic features of marine biogeochemistry and microbial ecosystem under the anoxic condition during the Proterozoic, by developing a coupled model of marine biogeochemical cycle, marine microbial ecosystem, and atmospheric photochemistry. We found that, under anoxic condition, Fe-based photosynthetic bacteria must have played an important role in producing a large methane flux to the atmosphere, which affected climate under the faint young Sun condition on early Earth. We also found that marine primary productivity and the O₂ production during the Proterozoic under the weakly oxygenated condition are estimated to be only 10-20% and 25% of the present values, respectively. The smaller O₂ production may be consistent with the very low levels of O₂ in the Proterozoic atmosphere.

研究分野：地球惑星システム科学

キーワード：海洋生物化学循環 微生物代謝過程 酸化還元環境 モデリング 原生代

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19、CK - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

代表者の研究グループは、還元的海洋内部で生じる種々の生化学反応プロセスを考慮した海洋物質循環モデル(CANOPS)を開発し、海洋の酸化還元状態の決定要因となる海洋生物化学循環の応答について研究を行うことによって、顕生代において海洋が繰り返し貧酸素化したとされる現象(海洋無酸素イベント)の発生メカニズムを初めて定量的に明らかにすることに成功した(Ozaki et al., 2011 EPSL; Ozaki and Tajika, 2013 EPSL)。この成果は、現在とは異なる多様な酸化還元条件下での海洋生物化学循環のモデル開発に世界に先駆けて取り組み、海洋生物化学循環を詳細に検討したことで初めて得られた知見である。

一方、原生代の海洋は、基本的に貧酸素条件にあることから、このモデルを拡張することによって、原生代海洋の海洋生物化学循環を明らかにすることができるはずである。たとえば、原生代の海洋一次生産性の決定因子や微生物生態系の群集構造については、その重要性にもかかわらず、詳細はいまだに不明である。それらの定量的推定が可能となれば、原生代における大気酸素濃度が現在の 1/100 以下であった理由の解明につながるはずである。

そこで、本モデルの優位性を活かし、鉄に代表される微量生元素循環及び海洋微生物生態系のモデリングに取り組むことによって、原生代の海洋生物化学循環と海洋一次生産性、微生物生態系活動などに関する定量的な議論が可能であると考えられる。原生代の海洋における遊離酸素生成率を明らかにすることができれば、当時の地球表層環境が長期にわたって還元的傾向にあったことも説明できる可能性がある。

2. 研究の目的

本研究は、原生代の海洋化学組成と微生物生態系の活動との関係について、海洋生物化学循環モデルを用いて明らかにしようとするものである。貧酸素条件にある海洋における主要生元素の循環に加えて微量生元素循環や微生物代謝過程を詳細に考慮した全く新しい数値モデルを開発し、当時の海洋一次生産性とその律速因子および微生物生態系の挙動、ひいては大気海洋酸化還元状態の安定性の解明を目指す。

3. 研究の方法

代表者の研究グループは、これまで顕生代における海洋の酸化還元状態とその支配要因について、主要生元素の生物地球化学循環モデリングに基づく理論的研究を行ってきた。とくに、海水中の溶存酸素が低下する海洋無酸素イベントが発生する条件を定量的に明らかにするため、富酸素条件のみならず貧酸素条件で生じる生化学反応を考慮した世界に類を見ない海洋生物化学循環モデル(CANOPS)を開発し、海洋の化学構造の変化に関する定量的な議論を行ってきた。本研究では、このモデルを拡張し、海洋微生物生態系とその代謝過程(生化学反応)及び鉄などの微量金属生元素の循環を導入することによって、原生代における海洋生物化学循環を表現できるモデルを新規に開発する。海洋の酸化還元環境のエンドメンバーとして、太古代のように完全な無酸素環境下における生物化学過程のモデルを開発することによって、現在と太古代の中間的な酸化還元環境にある原生代の貧酸素的海洋条件を表現することができる。そこでまず海洋微生物生態系として、基礎生産者(複数の酸素非発生型光合成細菌及び化学合成細菌)と分解者を考慮したモデルを開発する。また、こうした微生物生態系は最終的にメタンと二酸化炭素を大気に放出することから、大気中でのメタンや二酸化炭素を含む分子種の光化学反応も考慮する必要があり、既存の大気光化学モデルを導入して結合する。このような海洋生物化学循環-海洋微生物生態系-大気光化学系結合モデルを開発し、無酸素条件から貧酸素条件に至る範囲で、モデルがどのような挙動を示すのかを統計的アプローチを用いて詳細に調べる。

4. 研究成果

(1) 本研究計画で開発した海洋鉄循環及び酸素非発生型光合成細菌を基礎とする原始的微生物生態系モデルを基に、海洋鉄循環がグローバルな物質循環や地球環境システムにどのような寄与を果たしているのかについて、全球酸化還元収支に基づく検討を行った。無酸素的な条件が海洋表面の日射の透過する浅い層(有光層)にまで広がっていたと考えられる太古代~原生代初期においては、水素資化光合成細菌や鉄酸化光合成細菌が活動していた可能性があり、鉄還元菌や有機物の嫌氣的分解をはじめとした原始的微生物代謝過程が重要であったと考えられる。そこで、電子供与体(水素及び鉄)の循環や有機物の嫌氣的分解過程なども考慮した、これまでにない海洋生物化学循環-海洋微生物生態系-大気光化学系結合モデルを構築し、海水中の鉄濃度の変化に応じてシステム全体がどのように応答するのかを詳細に調べた。その結果、鉄濃度の増減は、鉄酸化光合成細菌の活動を通じて大気組成、とりわけ温室効果気体であるメタンの供給率を通じた大気中のメタン濃度に強く影響を与える因子であることを見出した。すなわち、水素を電子供与体として利用する水素資化光合成細菌とそれによって生成された有機物の嫌氣的分解(メタン発酵)のみでは地球の気候を温暖に保つために必要なメタンフラックスを生成することができないが、鉄酸化光合成細菌の活動も考慮すると、発生するメタンのフラックスが非線形的に増幅され、大気中のメタン濃度も非線形的に増大するという現象を発見した。この結果、複数の光合成細菌が共存することによって初めて、当時の地球環境を温暖に保つことができるメタン濃度(~1,000ppm)が実現可能となることが示された。この発見は、微量生元素である鉄の循環と原始的微生物生態系および気候形成の間に密接な関係があることを

初めて指摘したものであり、初期地球におけるいわゆる「暗い太陽のパラドックス」(太陽が暗くて日射量が低いにもかかわらず初期地球環境が温暖～高温であったという逆説)を、鉄酸化光合成細菌を含む原始的微生物生態系の活動に起因する二酸化炭素とメタンの温室効果で解決できるとするものである。この研究成果は、投稿論文にまとめ、Nature Geoscience 誌で発表した。

(2) 一般に富酸素環境であったと考えられる顕生代においても、海洋が無酸素化する「海洋無酸素イベント」が繰り返し発生したことが知られている。そうした海洋条件においては、光合成細菌であるシアノバクテリアや緑色硫黄細菌が活動していたことを示唆するバイオマーカーが発見されている。前者は海洋の有光層が窒素制限になっていることを示唆するものであり、後者は有光層が硫化水素で充満するような「海洋ユーキシニア」の状態になったことを示唆する。これは、まさに原生代海洋のアナロジーとしてモデルの検証に有益な事例であるといえる。そこで、海洋生物化学循環モデルに好気性光合成生物である藻類とシアノバクテリア、絶対嫌気性光合成細菌である緑色硫黄細菌を想定した生態系モデルを導入し、どのような条件でそうした環境が発生し、これらの光合成生物がどのように基礎生産に寄与するのかについて調べた。その結果、全球平均気温の増加に伴って海洋内部の酸化還元境界が上昇し、ある臨界温度を超えると、酸化還元境界が有光層に達することが明らかになった。無酸素水塊中では脱窒が進行するために窒素が枯渇するようになり、それによって藻類は窒素制限によって活動が著しく抑制される。代わりに、窒素固定能を持つシアノバクテリアが基礎生産を担うようになる。さらに、海洋の湧昇域においては、硫化水素を含む水塊が有光層にまで上昇することによって、緑色硫黄細菌が基礎生産を担うようになることが分かった。この結果は、顕生代における海洋無酸素イベントの地質学的証拠を定量的に理解するために有効であり、さらに原生代海洋における生態系の挙動を理解するためにも有益である。この研究成果は、論文としてまとめ、投稿予定である。

(3) 当初の達成目標である原生代海洋一次生産性を明らかにするため、本研究で開発した海洋生物化学循環モデルを用いて詳細な検討を行った。原生代海洋における海洋一次生産性やその律速因子についてはこれまでほとんどわかっておらず、当時の大気海洋系における酸化還元状態やその安定性の解明において重要な課題となっている。そこで、これまで開発を行ってきた海洋生物化学循環モデルを用いて、地質記録を制約条件とした統計手法(モンテカルロシミュレーション)を適用することで、当時の海洋一次生産の制約を試みた。地質記録に基づく原生代海洋における硫酸イオン濃度を制約条件として課すことで、モデルが含む不確定なパラメータについて大規模かつ系統的な感度実験を実施した。その結果、原生代における海洋一次生産は現在のたかだか10-20%程度、大気海洋系への遊離酸素放出率は現在の25%程度であったことなどを初めて明らかにすることに成功した。この結果は、当時の大気酸素濃度が現在よりもずっと低いレベルに維持されていたことに合理的な説明を与えるものである。さらに、原生代の大气メタン濃度についても制約を行ったほか、全球酸化還元収支についても総合的な描像を得ることに成功した。この研究成果は、投稿論文にまとめ、Geobiology 誌で発表した。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計3件)

Ozaki, K., Reinhard, C.T., and Tajika, E. (2019) A sluggish mid-Proterozoic biosphere and its effect on Earth's redox balance, *Geobiology*, 17, 3-11, doi.org/10.1111/gbi.12317. 査読有

Tajika, E. and Harada, M. (2019) Great Oxidation Event and Snowball Earth, in *Astrobiology -From the Origins of Life to the Search for Extraterrestrial Intelligence* (eds. Yamagishi, A., Kakegawa, T. and Usui, T.), Springer Nature, doi.org/10.1007/978-981-13-3639-3_17. 査読有

Ozaki, K., Tajika, E., Hong, P.K., Nakagawa, Y., and Reinhard, C.T. (2018) Effects of primitive photosynthesis on Earth's early climate system, *Nature Geoscience*, 11, 55-59, doi:10.1038/s41561-017-0031-2. 査読有

〔学会発表〕(計16件)

渡辺泰士, 田近英一, 尾崎和海, 洪鵬 (2019) 初期地球の炭素循環と気候の安定性: 大気光化学と海洋微生物生態系の役割, 生命の起源および進化学会第44回学術講演会 (2019/3/20, 国立天文台).

渡辺泰士, 田近英一, 尾崎和海, 洪鵬 (2018) 太古代の炭素循環における大気光化学及び海洋微生物生態系の役割, 第4回地球環境史学会年会 (2018/11/17-18, 東北大学).

尾崎和海, 田近英一, C.T. Reinhard (2018) 原生代中期の“停滞した生態系”とその酸素収支への影響, 第4回地球環境史学会年会 (2018/11/17-18, 東北大学).

- 田近英一, 尾崎和海 (2018) 海洋無酸素イベントにおける基礎生産者の多様性, 第4回地球環境史学会年会 (2018/11/17-18, 東北大学).
- 田近英一 (2018) 地球はなぜ生命の惑星なのか - ハビタブル・プラネット地球の炭素循環と環境の進化 -, 日本冷凍空調学会平成30年度通常総会特別講演 (2018/5/25, 東京ガーデンパレス). (招待講演)
- 田近英一, 尾崎和海, 洪 鵬, 中川祐介, C.T. Reinhard (2018) 原始的微生物生態系と暗い太陽のパラドックス, 日本地球惑星科学連合2018年大会 (2018/5/20-25, 幕張メッセ国際会議場). (招待講演)
- 田近英一, 尾崎和海, 洪 鵬, 中川祐介, C.T. Reinhard (2018) 原始的微生物生態系と初期地球の気候形成, 生命の起源および進化学会第43回学術講演会 (2018/3/15, 埼玉大学).
- 田近英一 (2017) 太古代の海洋微生物生態系と暗い太陽のパラドックス, 2017年度日本地球化学会第64回年会 (2017.9.14, 東工大). (招待講演)
- Ozaki, K., Tajika, E., Hong, P., Reinhard, C., and Nakagawa, Y. (2017) Climatic consequences of methane boosting by photoferrotrophs in the Archean atmosphere, Goldschmidt 2017 (13-18 August, 2017, Paris).
- Ozaki, K., Tajika, E., Hong, P.K., Reinhard, C.T. (2017) Primitive photosynthesis and Earth's early climate, Geobiology 2017 (11-14 June, 2017, Banff, Canada).
- Tajika, E., Kobayashi, T., and Ozaki, K. (2017) Behaviors of marine primary producers during ocean anoxic events, JpGU-AGU Joint Meeting 2017 (20-25 May, 2017, Chiba).
- Ozaki K., and Tajika, E. (2017) Limited O₂ production in the Mid-Proterozoic oceans, Astrobiology Science Conference 2017 (24-28 April, 2017, Arizona).
- 田近英一 (2017) 地球史を通じた炭素循環と二酸化炭素の変遷, 石灰石鉱業協会地質委員会 (2017/2/10, 石灰石鉱業協会).
- 尾崎和海, 田近英一 (2016) 抑制された中生代の遊離酸素成成立, 第2回地球環境史学会年会 (2016/11/26-27, 早稲田大学).
- Ozaki, K. and Tajika, E. (2016) Stability and dynamics of Proterozoic oceanic euxinia, Goldschmidt 2016 (26 June-1 July, 2016, Yokohama). (Invited)
- ⑩ 田近英一, 尾崎和海, 大井手香菜 (2016) 有光層ユーキシニアの発生条件と生物地球化学循環, 日本地球惑星科学連合2016年大会 (2016.5.22-26, 幕張メッセ国際会議場).

〔図書〕(計1件)

田近英一 (2019) 「46億年の地球史」(知的生きかた文庫), 三笠書房, 253p.

6. 研究組織

(1) 研究分担者

なし

(2) 研究協力者

研究協力者氏名: 尾崎 和海

ローマ字氏名: (OZAKI, Kazumi)

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。