

令和 2 年 6 月 11 日現在

機関番号：32661

研究種目：研究活動スタート支援

研究期間：2018～2019

課題番号：18H05874・19K21055

研究課題名（和文）地球システムモデルによる原生代の大気組成の制約

研究課題名（英文）Proterozoic atmospheric chemistry constrained by an Earth system model of biogeochemistry

研究代表者

尾崎 和海（OZAKI, Kazumi）

東邦大学・理学部・講師

研究者番号：10644411

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 2,300,000円

研究成果の概要（和文）：地球表層圏での主要生元素（炭素、窒素、リン、硫黄、酸素）の物質循環を包括的に考慮した数値モデルを開発し、地質記録を制約条件とした大規模数値実験を実施することで、原生代中期（約18億年前から8億年前）の大気組成と物質循環を推定した。その結果、当時の海洋が必須栄養素であるリンに枯渇しており、海洋生態系の一次生産が現在に比べて著しく抑制されていたことが明らかになった。この研究成果は、当時の地球大気が貧酸素条件にあった原因を初めて定量的に示したものである。

研究成果の学術的意義や社会的意義

原生代中期の時代は、真核生物の進化や放散、およびその後の動物の出現に重要な意味を持つ時代である。当時の海洋が必須栄養塩であるリンに枯渇し、生態系活動レベルが著しく抑制されていたとの知見は、生命と地球環境の共進化を理解する上での重要な発見である。地質時代の表層環境推定は主に地質学的・地球化学的分析データに基づいて行われてきたが、本研究により、大気組成及びそれを規定する物質循環の制約という未解明の問題に対して数値モデルを用いた新しい研究アプローチの基盤が確立できたという点で、その学術的意義が大きい。

研究成果の概要（英文）：We develop a novel quantitative approach that constrains the global biogeochemical cycles of C, N, P, O, and S through biogeochemical model inversion based on data from the geologic record. Our approach provides an integrated, quantitative, and statistically informative picture of the global biogeochemical state of the mid-Proterozoic Earth system, opening new perspectives on a wide range of scientific questions in research seeking to understand Earth system evolution. In particular, our results greatly refine current understanding of the global oxygen budget during the mid-Proterozoic, and provide persuasive evidence for a strongly suppressed oxygenic biosphere as the primary cause of Earth's protracted oxygenation.

研究分野：地球惑星科学

キーワード：原生代 大気中酸素濃度 大気中メタン濃度 大気中二酸化炭素濃度 生物地球化学 物質循環 数値モデル

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。

## 様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

### 1. 研究開始当初の背景

地球の大気組成(本研究では酸素  $O_2$ 、二酸化炭素  $CO_2$ 、メタン  $CH_4$ に着目する)は、気候状態や水圏の化学状態と密接に関連し生命進化に影響すると同時に、生命活動によって影響されてきた。これらの関係を理解することは、「なぜ地球は生命の星であり続けてきたのか」といった根本的問いに直結する。この視点で地球史を眺めたとき、原生代中期の時代(およそ 18 億年前から 8 億年前)は、真核生物の進化やその後の動物の出現に重要な意味を持つ時代として注目されよう。多くの研究者は、当時の大気中  $O_2$  濃度が現在よりも低かった点については見解が一致しているが、具体的な値については、現在値の 0.1% - 10%という程度でしか制約ができておらず、活発な議論が行われている(e.g., Zhang et al., 2016; Planavsky et al., 2016)。大気中  $CO_2$  濃度についても、推定手法によって大きな不確定性があることが指摘されており(Sheldon, 2013; Kanzaki and Murakami, 2015)  $CH_4$  濃度についても議論が続いている(Olson et al., 2016; Zhao et al., 2018)。地質記録から当時の大気組成を推定するのは困難であり、近年の地質学的・地球化学的データに基づく推定にもオーダーレベルの不確定性が残っているのが現状である。また、たとえ正確な推定ができたとしても、その背後にある物質循環の全体としての振る舞いを明らかにすることは難しい。地質学的時間スケールでの大気組成は、生物活動や化学反応を伴う物質循環によって規定されているため、大気組成を規定する物質循環を評価できる定量的アプローチが必要とされている。

### 2. 研究の目的

本研究は、大気中の酸素( $O_2$ )、二酸化炭素( $CO_2$ )およびメタン( $CH_4$ )の濃度を規定する地球表層圏での主要生元素(C, N, P, O, S)循環を包括的に考慮した新規の数値モデル(CANOPS 全球酸化還元収支モデル)を構築し、地質記録を制約条件とした統計手法と組み合わせることで、これまでにないレベルで原生代中期の時代(約 18 億年前から 8 億年前)の大気組成を制約し、その背後にある物質循環を明らかにすることを目的とする。本研究を通して、原生代地球表層圏の酸化還元状態と気候状態を、物質循環に基づく理論の見地から総合的に理解するための基盤づくりを行うものである。

### 3. 研究の方法

研究代表者が開発を行ってきた海洋物質循環モデル(CANOPS カノープス)を大気海洋系の酸化還元収支の評価ができるよう高度化する。そのうえで、地質記録を制約条件とした統計的手法を適用し、原生代中期の大気組成とその決定機構を明らかにする。具体的には、硫黄循環とメタン循環を開放系として扱えるようモデルを改良するほか、大気中での  $O_2$ - $O_3$ - $CH_4$  光化学反応や宇宙空間への水素散逸過程、陸域での酸化風化作用、海底堆積場での初期続成作用、および還元ガスの脱ガス流入過程を扱えるよう、モデルの改良が行われた。これにより、大気・海洋・堆積場中での生元素循環の素過程を包括的に考慮したうえで大気海洋系の酸化還元収支を評価することがはじめて可能となった。

開発された数値モデルを用いて、以下の実験が実施された。

- A) 地球表層圏での炭素、リン、硫黄循環に影響する重要なパラメータに着目し、2 万を超える条件について数値実験(モンテカルロシミュレーション)を行った。その際、定常状態に達するまでモデルを積分したうえで、得られた海水の硫酸イオン濃度が地質記録による制約条件(0.1 - 1 mM)を満たす場合のみを抽出することで、大気組成( $O_2$ ,  $CH_4$ )と物質循環の制約が行われた。海洋の硫酸イオン濃度は、大気海洋の酸化還元状態と生物活動レベルを間接的に反映するため、硫酸イオン濃度を成約することで当時の海洋での生物生産を制約することができる。
- B) A)の実験では、大気中酸素濃度は境界条件として扱われたが、これを酸化還元収支に基づいて動的に計算できるようモデルの改良を行った。様々な条件に対し、どのような大気組成( $O_2$ ,  $CH_4$ )が実現するのかについて系統的な実験を行い、その安定性・不安定性を評価した。また、実験により制約された大気組成と物質循環を解析した。
- C) B)で開発された CANOPS 全球酸化還元収支モデルと、すでに開発済みの炭素循環・気候モデル(CANOPS 気候システムモデル)を結合し、地球表層圏の主要生元素循環を包括的に議論可能な新たなモデル(CANOPS 地球システムモデル)を開発した。固体地球からの脱ガス率や大陸面積などの境界条件に対し、どのような大気組成( $O_2$ ,  $CH_4$ ,  $CO_2$ )が実現するのかについて、試験実験を通してモデルの検証を行った。

## 4. 研究成果

### (1) 研究の主な成果

大気中酸素濃度が現在値の0.1% - 10%の範囲であったとした場合について、制約された物質循環結果を下図に示す。地質学的時間スケールでの酸素生成過程である有機炭素の埋没フラックスは、 $1.36^{+1.27}_{-0.81}$  Tmol C yr<sup>-1</sup>と推定された。これは、現在海洋での推定値の10%程度である。一方、もう一つの主要な酸素生成過程である黄鉄鉱の埋没フラックスは、現在海洋と同程度であったものと推定された。有機物と黄鉄鉱の埋没除去の結果として計算される総酸素生成フラックスは  $3.86^{+1.58}_{-1.30}$  Tmol O<sub>2</sub> equiv. yr<sup>-1</sup>と求まった。これは、現在の酸素生成率の約25%に相当する。

大気中酸素濃度は生成と消費の動的バランスによって決まっている。そのため、当時の大気中酸素濃度が低く維持されていた原因としては、酸素生成の抑制か酸素消費の卓越のいずれかであると考えられるが、本研究成果は、現在に比べて酸素生成が抑制されていたとの立場を支持するものである。また、本研究により、海洋表層での輸出生産（新生産）が抑制されていたことが示された。これは、必須栄養素であるリンの濃度が著しく低濃度であったためであると解釈される。この他、窒素固定率が現在に比べて抑制されていたこと、大気中メタン濃度は従来の推定よりも低く10 ppmv程度であったこと（図1b）など、新たな知見が得られた。さらに、大気-海洋系の酸化還元収支についての定量的描像を初めて示すことができた（図1c）。

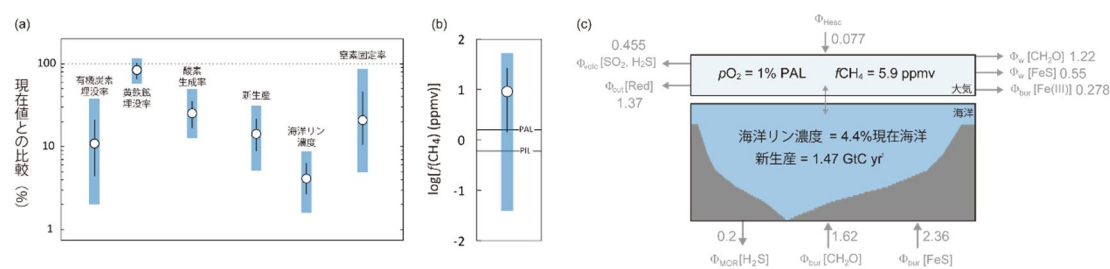


図1. 原生代中期の物質循環と大気組成の制約結果。(a) 物質循環フラックス、(b) 大気中メタン濃度、(c) 大気-海洋系の酸化還元収支（フラックスの単位は Tmol O<sub>2</sub> equiv. yr<sup>-1</sup>）。Ozaki et al. (2019)の結果に基づく。

このほか、開発された CANOPS 地球システムモデルを用いた実験により、固体地球内部からの還元ガスの流入率を境界条件として大気中酸素およびメタン濃度を求めた。その結果、大気組成には大局的に3つの安定状態（現在レベル、原生代レベル、太古代レベル）を取りうるが見いだされた。この結果は、地質記録から推測される段階的な酸素濃度上昇シナリオに対応する可能性がある。

### (2) 国内外におけるインパクト

本研究成果は、これまでに報告されてきた地質記録から推測される地球環境の描像と整合的な結果であるだけでなく、その背後にある物質循環を定量的に明らかにした点で意義がある。物質循環に基づく原生代の地球表層化学環境の推定は欧米を中心に行われるようになってきているが、本研究のように、地質記録とプロセススペースの物質循環モデルを融合した研究は存在しない。CANOPS モデルは、効率的な計算手法によって迅速な算術処理が行える物質循環モデルであり、地質記録に基づく制約条件を課した統計手法が適用できるという点で世界的に見ても高い独自性と優位性を誇っている。このように、新しい研究手法を確立した意味で意義がある。本研究成果は、当該雑誌において2018-2019年に出版された論文のうち、12ヶ月間のダウンロード数が最も多かった論文トップ10%にランクインしていることから、注目されていると言える。

地質学的・地球科学的分析データに基づいて進んでいる原生代の地球表層環境研究であるが、本研究では「大気組成およびそれを規定する物質循環の制約」という未解明問題に数値モデルを用いて取り組み、地球表層環境の化学的進化についての定量的理解へ向けた基盤づくりが行われた。この手法をさらに発展させることで、地球大気と生命の進化の全容解明への足掛かりとなると考えられる。

### (3) 今後の展望

原生代中期の海水リン濃度が低く保たれていた具体的なメカニズムについては、本研究からは絞り込めない。地球環境と生命の共進化を考える上で重要な研究対象であるが、今後、原生代海洋のアナロジーとなる現世環境についての観測・分析結果や地質記録に基づく制約からこの問題への理解が進むことが望まれる。また、開発された CANOPS 地球システムモデルによる大気中 CO<sub>2</sub> 濃度推定は、モデルの開発は完了したが、その検証と大規模数値実験が今後の課題として残された。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計3件（うち査読付論文 3件/うち国際共著 3件/うちオープンアクセス 3件）

1. 著者名 Ozaki, K., Reinhard, C. T., Tajika, E.	4. 巻 17
2. 論文標題 A sluggish mid-Proterozoic biosphere and its effect on Earth's redox balance	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Geobiology	6. 最初と最後の頁 3-11
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1111/gbi.12317	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 Planavsky, N. J., Reinhard, C. T., Isson, T. T., Ozaki, K., Crockford, P. W.	4. 巻 20
2. 論文標題 Large mass-independent oxygen isotope fractionations in mid-Proterozoic sediments: Strong evidence for a low-oxygen atmosphere	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Astrobiology	6. 最初と最後の頁 628-636
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1089/ast.2019.2060	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 Ozaki, K., Thompson, K., Simister, R. L., Crowe, S. A., Reinhard, C. T.	4. 巻 10.3026
2. 論文標題 Anoxygenic photosynthesis and the delayed oxygenation of Earth's atmosphere	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Nature communications	6. 最初と最後の頁 1-10
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1038/s41467-019-10872-z	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

〔学会発表〕 計11件（うち招待講演 8件/うち国際学会 5件）

1. 発表者名 尾崎和海、田近英一
2. 発表標題 原生代中期の"停滞した生物活動"とその酸素収支への影響
3. 学会等名 地球環境史学会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Kazumi Ozaki
2. 発表標題 The co-evolution of atmosphere and biosphere
3. 学会等名 The 1st International Workshop for Aqua Planetology (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Kazumi Ozaki
2. 発表標題 The coupled evolution of life and atmosphere
3. 学会等名 Geobiology 2nd Conference (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 尾崎和海
2. 発表標題 太古代一顕生累代の大気海洋環境と微生物相
3. 学会等名 日本古生物学会シンポジウム (招待講演)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Planavsky, N., Reinhard, C. T., Isson, T., Ozaki, K., & Crockford, P.
2. 発表標題 Low Mid-Proterozoic atmospheric oxygen levels?
3. 学会等名 Goldschmidt (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Cole, D., Ozaki, K., Planavsky, N., Reinhard, C. T.
2. 発表標題 Intermediate atmospheric oxygen levels, ocean ventilation, and global biospheric productivity
3. 学会等名 Goldschmidt (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 尾崎和海
2. 発表標題 地球表層圏のリン循環と大気海洋の進化
3. 学会等名 第1回リンと生命の起源研究会 (招待講演)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 尾崎和海
2. 発表標題 地球史を通じた一次生産の変遷とその制限要因
3. 学会等名 日本地球化学会 (招待講演)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 尾崎和海
2. 発表標題 生物地球化学循環モデルを用いた地球表層環境の進化に関する理論的研究
3. 学会等名 日本地球化学会 (招待講演)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 尾崎和海
2. 発表標題 全球酸化還元収支モデルを用いた中期原生代の大气組成の制約
3. 学会等名 地球環境史学会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Ozaki, K.
2. 発表標題 The history of Earth's biospheric productivity: a biogeochemical modeling perspective
3. 学会等名 The JpGU-AGU Joint meeting 2020 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2020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