



PRESS RELEASE

岡山大学記者クラブ

文部科学記者会

科学記者会

御中

令和 7 年 8 月 20 日

岡 山 大 学

地球大酸化イベントは海洋中のニッケルと尿素が鍵を握っていた

◆発表のポイント

- ・約 21～24 億年前に地球の大気中に大量に酸素が出現した「大酸化イベント¹」の原因として、海水中のニッケルと尿素が重要な役割を果たしていたことを明らかにしました。
- ・始生代（約 40 億～25 億年前）の海水を模した環境下で、紫外線による尿素の生成を実験的に確認し、尿素が原始シアノバクテリア²の重要な窒素源となっていたことを示しました。
- ・一方で、海水のニッケル濃度が高いとシアノバクテリアの成長が抑制されることも確認し、海水中のニッケルの減少がシアノバクテリアの増殖と酸素濃度の上昇を促したことを示しました。

岡山大学大学院自然科学研究科の Dilan M. Ratnayake 大学院生（研究当時。現在、スリランカ・ペラデニア大学講師）、学術研究院先鋭研究領域（惑星物質研究所）の田中亮吏教授、学術研究院教育研究マネジメント領域の中村栄三教授（特任）の研究グループは、海水中のニッケルと尿素濃度のバランスによって、シアノバクテリアの成長と酸素放出が制御され、大酸化イベント（Great Oxidation Event, GOE）を引き起こしたことを明らかにしました。

地球史における重大な現象である大酸化イベントが生じた原因については、さまざまなモデルが提案されてきましたが、酸素供給源であったシアノバクテリアが光合成を始めてから大酸化イベントが発生するまでには約 10 億年の時間差が生じた理由はこれまで分かっていませんでした。

本研究では、始生代の海洋に紫外線が照射されることにより尿素が生成され、その尿素とニッケル濃度バランスによりシアノバクテリアの増殖が制御された結果、この時間差が生じたことを解明しました。さらに、これらの要素が現代の生命のあり方を規定する上で、大きな役割を果たしたことを示しました。

この研究成果は 8 月 12 日に、*Nature Portfolio* 「Communications Earth and Environment」オンライン版に掲載されました。

◆研究者からのひとこと

この研究は、まるで巨大なジグソーパズルを完成させるようなものでした。幸い、ピースはほぼ全てそろっていたので、実験そのものは比較的短期間で終わることができましたが、その後の考察やモデルの構築には多くの時間を要しました。思考に研究費はかかりませんので、それが唯一の救いだったと言えるかもしれません。



Dilan M. Ratnayake 大学院生
（研究当時）



PRESS RELEASE

当時大学院生だったディランさんとは、実験計画立案からデータの評価、結果の考察に至るまで、毎日のように議論しました。研究は、当初予想していなかった方向にどんどん進み、最後には地球史における重要な発見につながりました。さまざまな自然現象に対する強い興味とチャレンジ精神を持つディランさんの研究者としての今後の活躍が楽しみです。



田中教授

■発表内容

<背景>

地球の大気には約 21%の酸素が含まれており、私たちはこの空気を呼吸することにより生命を維持しています。しかしながら、他の惑星の大気には酸素はほとんど含まれておらず、地球も約 46 億年の歴史の前半、すなわち約 24 億年前までは無酸素状態が続いていました。そんな中、約 24 億年前、地球の大気に初めて酸素が大量に出現した大酸化イベント（Great Oxidation Event, GOE）が起きました。GOE における主要な酸素供給源は最初の酸素発生型光合成細菌³であるシアノバクテリアであると考えられています。しかし、GOE 以前の約 10 億年間、シアノバクテリアが出現していたにもかかわらず、大気中の酸素濃度は非常に低いままでした。なぜ酸素濃度の上昇にこれほど時間がかかったのかを解明することは、GOE を理解するうえでの重要な鍵とされてきました。

生物種、特に微生物の増殖は、多様な環境要因に依存しており、栄養素の存在が特に重要な役割を果たします。これらの栄養素のうち、窒素の生物学的利用可能性は原始的なシアノバクテリアにとって不可欠であり、その存在は増殖率に大きく影響します。地球化学的証拠により、GOE の約 10 億年前からニトロゲナーゼ⁴による窒素固定が存在していたことが示唆されていますが、原始的なシアノバクテリアがこのエネルギー的に高コストな窒素固定プロセスに対応できたかどうかは分かっていません。さらに窒素固定酵素は好気性条件下で不活化する傾向にあります。現代のシアノバクテリアは、酸素から窒素固定酵素を保護する機能を有していますが、このような窒素固定に関する進化過程も地球史における議論の対象となっています。

<発表内容>

本研究では、尿素が微生物への代替窒素源として機能したとの仮説を立て、大気中の窒素分子を尿素へ変換する非生物的経路を実験的証明することとしました。その結果、始生代の地球環境を模擬した実験を通じ、尿素が原始シアノバクテリアにとって重要な窒素源であったことを実証しました。具体的には、尿素は紫外線の照射により、アンモニウム (NH_4^+)、シアン化物

(CN^-)、鉄イオン (Fe^{2+}) を含む溶液から容易に生成されることが明らかとなりました。紫外線を長時間照射することで、これらの化合物を含む水溶液から尿素が効率よく生成されることが確認されました。さらに、さまざまな条件下でのシアノバクテリア培養実験を行った結果、寒天培地で培養したシアノバクテリアは高濃度の尿素およびニッケルが存在する環境下でも成長可能でした。しかしながら、溶液中で培養したシアノバクテリアは、尿素濃度が一定以上 (2



PRESS RELEASE

mmol/L) になるとその成長が阻害されました。一方、ニッケルは尿素をアンモニアへ変換するウレアーゼ⁵という酵素の活性に必須な元素ですが、溶液中のニッケル濃度が約 136 nmol/L で最適な増殖速度が得られ、それ以上の濃度では逆に成長が阻害されることが確認されました。

これらの実験結果から、始生代の環境条件におけるシアノバクテリア生存条件を推定しました。遊離酸素の存在を示す地質学的証拠から、シアノバクテリアは約 29 億年前には存在していたと考えられています。しかしながら、当時の海水は高濃度のニッケルを含んでおり、紫外線の照射も現在よりはるかに強力でした。また、メタン化細菌は約 35 億年前に発生したと推測されているため、当時の大気にはメタンが豊富に存在し、これにより尿素は継続的に生成可能でした。本研究で行った計算からは、比較的短期間に海洋中に 2 mmol/L 以上の尿素が広範に生成・蓄積される条件が整っていたと推定できます。しかし、約 24 億年前頃までは、シアノバクテリアは微生物マットを形成するような地域でのみ局所的に成長したのみで、全球的な酸素増加にはつながりませんでした。海洋中のニッケル濃度は約 30 億年前から減少し始めたことが分かっており、これにより、シアン化水素の生成が減少し、尿素の生成・蓄積の減少へと転じました。その結果、海洋中のシアノバクテリアの増殖が促進されました。これらのプロセスを経た結果、シアノバクテリアの出現から約 10 億年遅れて大酸化イベントが発生したと推定できます。

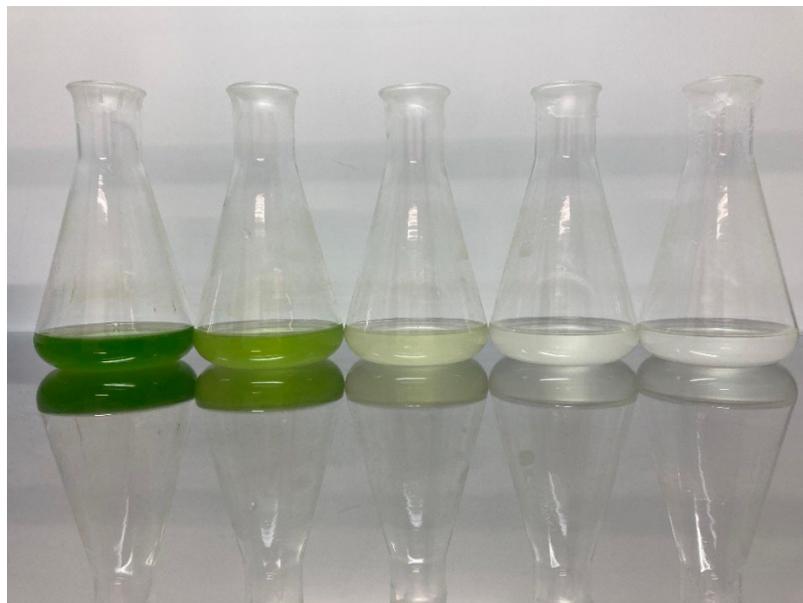


図 1： ニッケル濃度一定下での異なる尿素濃度におけるシアノバクテリアの成長。尿素濃度は左から右へ増加する。



PRESS RELEASE

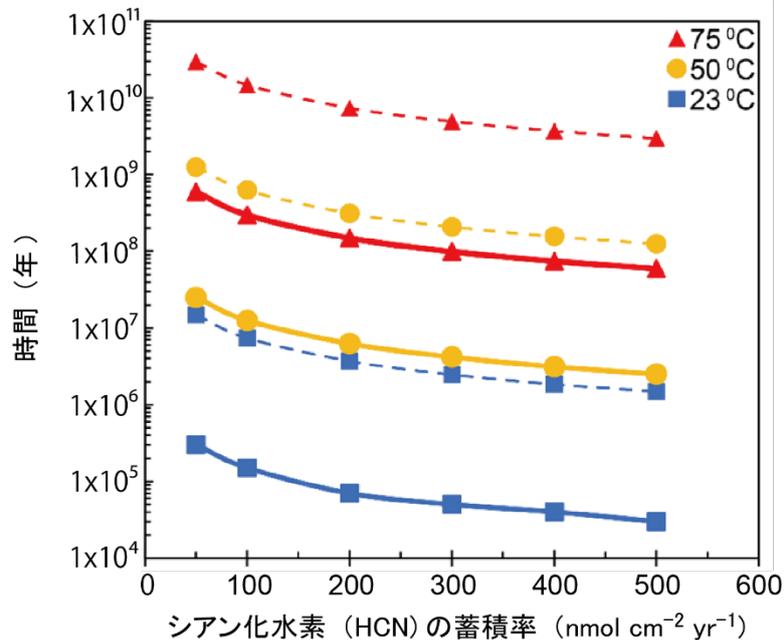


図 2： 原始海洋において、異なる HCN 生成率と温度下で pH8.4、全深度で均一な尿素生成率の下で、 2mmol L^{-1} の尿素濃度を生成するのに要する推定時間。実線と破線は、7 日間の曝露後の尿素収率 2.5% と 0.05% に対応する。

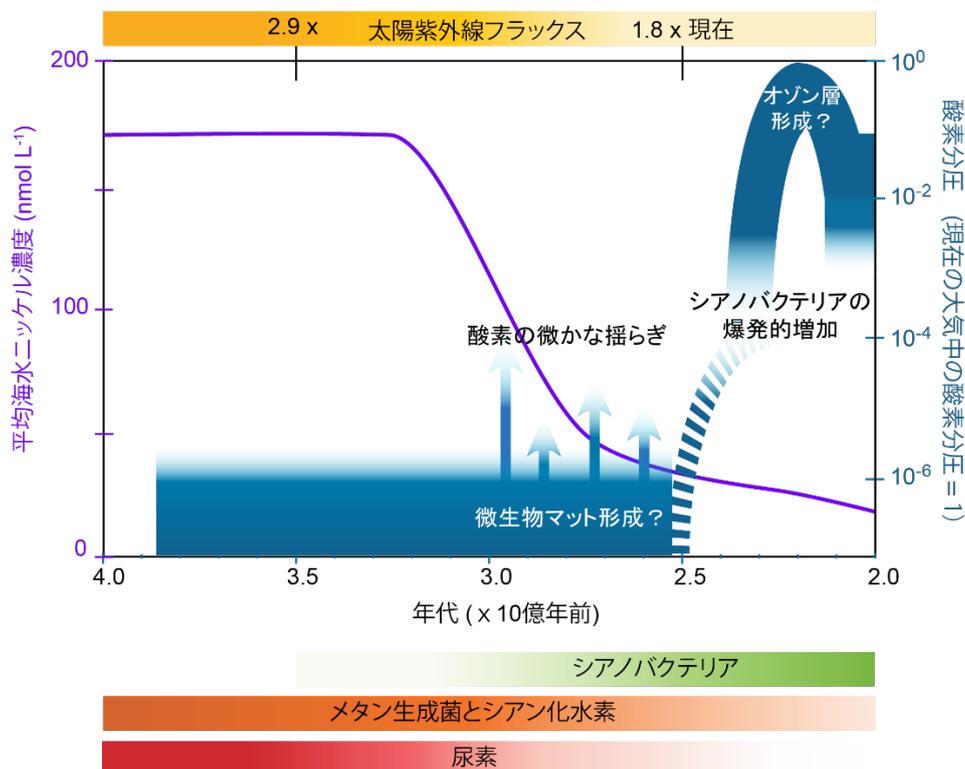


図 3： 初期地球大気中の酸素分圧進化モデル。太陽紫外線フラックス、海水中的シアノバクテリア量、メタン生成菌とシアン化水素量、尿素量の連続的変化もそれぞれの色の濃淡で示している。



PRESS RELEASE

<社会的な意義>

生命が生存するためには酸素は欠かせません。本研究は、シアノバクテリアの出現以降大酸化イベントに至る過程を説明する新たな理論的モデルを提案しました。特に、ニッケルや尿素といった微量元素と化合物が地球環境の変化に重要な役割を果たしていたことを示し、地球の酸素環境進化に関する理解を深めることができました。本研究結果は、地球生命の進化史のみならず、生命存在可能な惑星の条件を探る研究にも重要な示唆を与えることが期待されます。

■論文情報

論文名 : Biogeochemical impact of nickel and urea in the great oxidation event

掲載紙 : *Communications Earth and Environment*

著者 : Dilan M. Ratnayake, Ryoji Tanaka, and Eizo Nakamura

DOI : <https://doi.org/10.1038/s43247-025-02576-8>

URL : <https://www.nature.com/articles/s43247-025-02576-8>

■研究資金

本研究は、日本学術振興会科学研究費（20K04108、23K17707、24K00745）、科学技術振興機構次世代研究者挑戦的研究プログラム（JPMJSP2126）の支援を受けて実施しました。

■補足・用語説明

1. 大酸化イベント（GOE）：約21億年前～24億年前に地球の大気中に酸素が大量に現れ、地球環境を一変させた現象。
2. シアノバクテリア：光合成によって酸素を放出する細菌の一種。地球史において初めて酸素を生み出した生物とされる。
3. 酸素発生型光合成細菌：光合成により酸素を発生する細菌
4. ニトロゲナーゼ：窒素固定を行う細菌が持っている酵素。大気中の窒素をアンモニアに変換する反応を触媒する。
5. ウレアーゼ 尿素をアンモニアに変換する酵素で、その活性にはニッケルが必要。

<お問い合わせ>

岡山大学 学術研究院先鋭研究領域（惑星物質研究所）
教授 田中亮吏
（電話番号）0858-43-3748 （FAX）0858-43-2184