

20億年前の岩石に生命の痕跡はどう残るのか

— インド・ジャマルコトラ層のストロマトライト研究から
火星生命探査へ —

【本研究成果のポイント】

- インド・ジャマルコトラ層（約19～22億年前）のストロマトライト^(注1)を対象に、生命の痕跡（バイオシグネチャー）の保存状態を詳細に解析した。
- 顕微鏡観察、ラマン分光分析、炭素同位体分析など複数手法を組み合わせ、岩石中に微生物由来の有機物が現在も残存していることを確認した。
- 地殻変動や熱変成作用を受けた後でも、生命痕跡が鉱物学的・分光学的特徴として長期間保存される可能性を示した。
- 炭酸塩鉱物と有機物の複合構造から、当時の微生物活動が鉱物形成に関与した可能性を示し、火星における生命痕跡の探索技術の発掘に大きく貢献する成果となる。

新潟大学理学部の M. Satish-Kumar 教授、インド宇宙科学技術大学の V.J. Rajesh 教授（新潟大学リエゾンプロフェッサー）らの共同研究グループは、インドの約19～22億年前の地層「ジャマルコトラ層」に存在するストロマトライトを調査しました。顕微鏡観察や炭素同位体分析など複数の手法により、岩石内に微生物由来の有機物の痕跡が現在も保存されていることを確認しました。また、炭酸塩鉱物と有機物が混在する構造から、当時の微生物活動が鉱物形成に関与した可能性を示しました。本研究成果は、火星における生命痕跡探査への応用が期待されます。

1. 研究の背景

生命の起源や進化を解明するうえで、古い時代の岩石に残された「生命痕跡（バイオシグネチャー）」は重要な手がかりとなります。ストロマトライトは、微生物の活動によって炭酸塩岩中に形成された層状の堆積構造で、地球初期の生命活動の痕跡を記録する代表例として知られています。しかし、岩石中の有機物や微細構造は、数十億年に及ぶ地殻変動や熱変成作用により変質・消失する可能性があり、生命の痕跡がどの程度保存されるのかは未解明な点が多くありました。近年、火星探査においても生命痕跡の検出が主要な目標となっており、ストロマトライトは火星の岩石に保存される生命痕跡を評価するための比較対象として注目されています。特に、鉱物と有機物が共存する岩石中で、微生物由来の特徴がどのように保存されるかを

理解することは、探査機による分光観測や将来のサンプル解析の基礎となります。本研究では、約 20 億年前のストロマトライトを対象に、顕微鏡観察、ラマン分光分析、炭素同位体分析などを組み合わせ、変成作用を受けた岩石中における生命痕跡の保存可能性を検証しました。

II. 研究手法と成果

本研究では、インド西部ラジャスタン地域に分布する約 19~22 億年前のジャマルコトラ層から産出するストロマトライトを対象として、変成作用を受けた岩石中で生命痕跡がどの程度保持されているのかを、多面的な分析手法を組み合わせ検証しました。

本研究チームはまず、岩石試料から薄片を作製し、偏光顕微鏡および走査型電子顕微鏡による詳細な観察を行いました。その結果、ストロマトライト特有の層状構造が良好に保存されており、内部には微細な有機物が含まれることが明らかになりました。さらに、これらの有機物が炭酸塩鉱物と密接に共存しており、微生物活動が鉱物形成に関与した可能性が示唆されました。

次に、ラマン分光分析を用いて有機物と鉱物の化学的特徴を評価しました。ラマン分光法は、物質の分子構造や結晶性を非破壊で解析できる手法であり、火星探査機にも分析装置の搭載が予定されている重要な技術です。分析の結果、岩石中の有機物から特徴的なバンドが検出され、これらが熱変成作用を受けた有機物であることが確認されました。また、有機物は局所的に炭酸塩鉱物やシリカ鉱物と共存しており、微生物活動に由来する有機物が鉱物中に取り込まれることで、長期間保存された可能性が示唆されました。

さらに、炭素同位体分析によって有機物中の炭素同位体比 ($^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$) を測定しました。その結果、軽い炭素同位体に富む特徴が確認され、生物活動に伴う炭素固定作用を反映している可能性が示されました。この同位体的特徴は、無機的な炭素供給だけでは説明しにくく、生命活動に由来する重要な証拠と考えられます。

以上の結果から、本研究は、地殻変動や熱変成作用を受けた約 20 億年前の岩石中においても、生命痕跡が鉱物学的・化学的情報として長期間保存され得ることを示しました。特に、ラマン分光分析と、鉱物と有機物の共存関係の解析が有効であることを示した点は、将来の火星探査における生命痕跡の探索技術の発展に大きく貢献する成果です。火星表層にも類似した炭酸塩鉱物を含む堆積物が残されている可能性があることから、本研究は地球外生命探査の基盤研究として重要な意義をもちます。

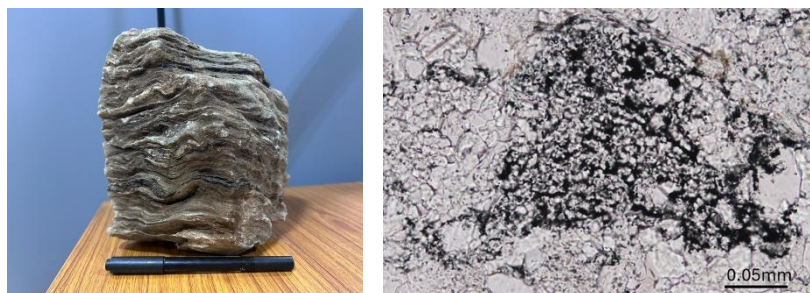


図 1. ラジャスタン州のストロマトライト試料（左）と顕微鏡で確認された有機物の痕跡（右）

III. 今後の展開

本研究で得られた成果を踏まえ、今後はラマン分光分析や炭素同位体分析をさらに精密化することで、ナノスケールでの有機物の分布や鉱物との相互作用をより詳細に明らかにすることが期待されます。また、数十億年前の岩石中に残された生命痕跡の事例を蓄積することで、その保存条件の解明が進むと考えられます。さらに、本成果は、今後の火星をはじめとする地球外天体での生命探査において、鉱物と密接に関わって保存された有機物に着目することの重要性を示しています。特に、火星表層では、酸化や放射線により有機物が分解されやすいが、有機物が鉱物内部に取り込まれている場合には、長期間保存される可能性が高まります。そのため、探査機によるラマン分光観測や現地での分析では、有機物を保持しやすい鉱物を選定し、鉱物と有機物の共存関係に注目することが、生命痕跡を見いだすための有効な視点となります。加えて、将来的な火星サンプルリターンでも、高精度同位体分析やナノスケール観察を組み合わせることで、生命痕跡の検証精度が飛躍的に向上することが見込まれます。これにより、地球外生命の存在可能性をより高い精度で評価することが可能になるとともに、生命誕生環境の普遍性の理解にも貢献すると考えられます。

IV. 研究成果の公表

本研究成果は、2026年3月30日、イギリスの王立天文学会誌「Monthly Notices of the Royal Astronomical Society」に掲載されました。

【論文タイトル】 *Stromatolites as archives of ancient biosignatures: Insights from the Jhamarkotra Formation, India, and implications for Mars*

【著者】 K. Preeti, M. Satish-Kumar, V.J. Rajesh

【doi】 10.1093/mnras/stag534

V. 謝辞

本研究論文は、文部科学省（MEXT）の大学の世界展開力強化事業「インド太平洋地域の『仮想フィールド』を利活用したハイブリッド型フィールド科学人材育成プログラム“S-EARTH”」の学术交流および国際共同研究活動の一環として実施されました。本事業は、インド太平洋地域における大学間連携を基盤に、現地フィールド調査とデジタル技術を融合した新たな教育・研究体制を構築し、地球科学、環境科学、資源科学、防災科学分野における次世代の国際的フィールド科学人材を育成することを目的としています。筆頭著者は、本プロジェクトの交換留学生として新潟大学に1年間滞在し、大学院生や研究者との共同研究を通じて安定同位体分析に関する研究を実施しました。

【用語解説】

（注1）ストロマトライト

シアノバクテリアなどの微生物の活動によって形成される、細かな層状の堆積構造です。石灰岩やドロマイトなどの岩石中に保存されることが多く、地球初期の生命活動を示す代表的な痕跡の一つです。現在でも、一部の浅海域や塩湖などで見ることができます。

本件に関するお問い合わせ先

新潟大学理学部

教授 サティッシュ クマール

E-mail : satish@geo.sc.niigata-u.ac.jp