

ストロマトライト中のチタン鉱物は、太古の微生物が利用していた“天然の日焼け止め”の痕跡？

【本研究成果のポイント】

- 27 億年前の岩石に含まれる微小管は微生物の生痕化石^{注1}ではなく、岩石の溶解とその内部でのチタナイト^{注2}の結晶化で形成した。
- チタンの濃集には、当時の微生物活動が関与していたことが分かった。
- 太古の微生物は紫外線から身を守るために、二酸化チタン (TiO_2) を“天然の日焼け止め”として利用していた可能性がある。

概要

新潟大学理学部の M. Satish-Kumar 教授、同大学大学院自然科学研究科博士後期課程の S. Kiran さん（研究当時）、産業技術総合研究所地質調査総合センターの中村佳博主任研究員、東京大学大学院理学系研究科の大藤弘明教授らの研究グループは、西オーストラリアのピルバラクラトンに分布する約 27 億 2 千万年前に形成されたタンビアナ層に含まれる生命の痕跡とされる特徴的な構造について、オーストラリアのカーティン大学と共同研究を行いました。当時の地球にはまだ酸素やオゾン層がほとんどなく、強烈な紫外線が地表に降り注いでいました。タンビアナ層中の大昔の微生物が作った層状の構造物（ストロマトライト^{注3}）を詳しく調べたところ、炭素（有機物）を伴う「ごく小さな管状の構造」が存在し、その内部がチタナイト（カルシウムとチタンを含むケイ酸塩鉱物）で埋め尽くされていることがわかりました。透過型電子顕微鏡やアトムプローブトモグラフィー分析の結果、この管状の構造は、有機物や黄鉄鉱の周りで局所的に岩石が溶け、そこに鉱物が移動した痕跡（アンビエント・インクルージョン・トレイル^{注4}と呼ばれる現象）であることが明らかとなりました。チタンの濃集には、当時の微生物が関わっている可能性が高く、微生物は強い紫外線から身を守るために“天然の日焼け止め”としてチタン鉱物を利用していた可能性が示唆されました。

1. 研究の背景

太古代（約 40 億～25 億年前）の岩石に保存された微細構造は、初期生命と当時の地球環境を理解する上での重要な資料となり得ます。特に、変成した枕状溶岩や火山砕屑岩から発見されるチタナイト（カルシウムとチタンを含むケイ酸塩鉱物）の微小管状構造は、微生物が栄養を求めて火山ガラスを溶解・穿孔した痕跡として解釈され、最古級の生痕化石候補とされてき

ました。しかし、同様の構造は非生物的な溶解作用や流体と岩石の反応、変成鉱物の結晶成長によっても形成します。そのため、それらの形態的特徴が微生物の穿孔痕に似ているという理由だけでは、初期生命の痕跡であることの証明にはなりません。そこで本研究では、西オーストラリアのピルバラクラトンに分布する約 27 億 2 千万年前のタンビアナ層から、炭質物を伴うチタナイト微小管の詳細な地質学的研究を実施しました。これまでチタナイト微小管に関する主要な研究対象が火山ガラスであったのに対し、本研究ではストロマトライト質炭酸塩岩中に含まれるものを新たに発見しました。本研究グループは、微小管の起源、チタンの供給・濃集過程、炭質物との関係を詳しく議論し、太古の地球表層に生息していた微生物が紫外線から身を守るために（チタナイト微小管の材料である）二酸化チタンを利用していた可能性を提案しました。なお、二酸化チタンは、私たちが日常で使用している日焼け止めにも紫外線防止のための主成分として含まれています。

II. 地質学的特徴

本研究の対象となるピルバラクラトンタンビアナ層はフォーテスキュー層群に属し、ストロマトライト石灰岩、泥岩、シルト岩、礫岩、火山砕屑物などから構成されます。堆積環境は、火山活動の影響を強く受けた湖沼から浅水域であったと考えられています。調査地域のストロマトライトは、明暗の葉理が波状またはレンズ状に連続する特徴を示します。その上位には、リップルを伴う細粒層やオンコイド^{注5}質の層が重なります。このように初生的な堆積構造は残されていますが、約 22 億年前にプレーナイトーパンペリー石相（約 200°C、約 15Km の深さ）の低変成作用を経験しています。

III. 研究手法と成果

ストロマトライト試料については、詳細な産状観察や鉱物記載、鉱物化学組成分析を行い、チタナイト微小管と炭質物を含む試料については、透過型電子顕微鏡観察、アトムプローブトモグラフィーによる分析を実施しました。これにより、肉眼スケールからナノメートルないし原子スケールに至るまでの鉱物組成や元素分布を連続的に追跡・評価しました。

微小管は直径約 1~3 マイクロメートル、最大長約 15 マイクロメートルで、主としてチャート質石英とミクライト質方解石からなる基質中に伸びています。管は単独または集合体として存在し、湾曲、ねじれ、分岐を伴い、中心から放射状に広がる集合形態を示します。管の先端や内部には炭質物または黄鉄鉱が認められ、炭質物はチタナイトの周縁にも局所的に集中しています（図 1）。

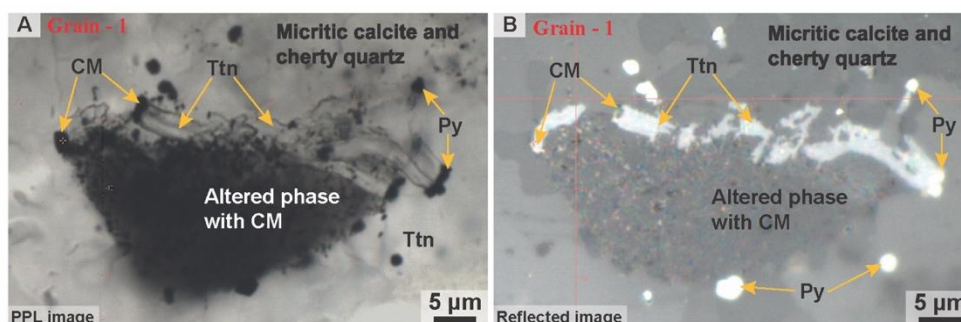


図 1 チタナイト微小管の顕微鏡写真。透過光（左）と反射光（右）による写真。

電子線後方散乱回折（EBSD）および透過電子顕微鏡下での電子回折の結果、チタナイト微小管は途中で枝分かれしている部分も含め、全体としてほぼ共通の結晶方位を持つことが分かりました。各部位ごとの結晶方位差は2度未満であり、微小管が連続的な結晶成長によって形成したチタナイトからなることが分かりました（図2）。

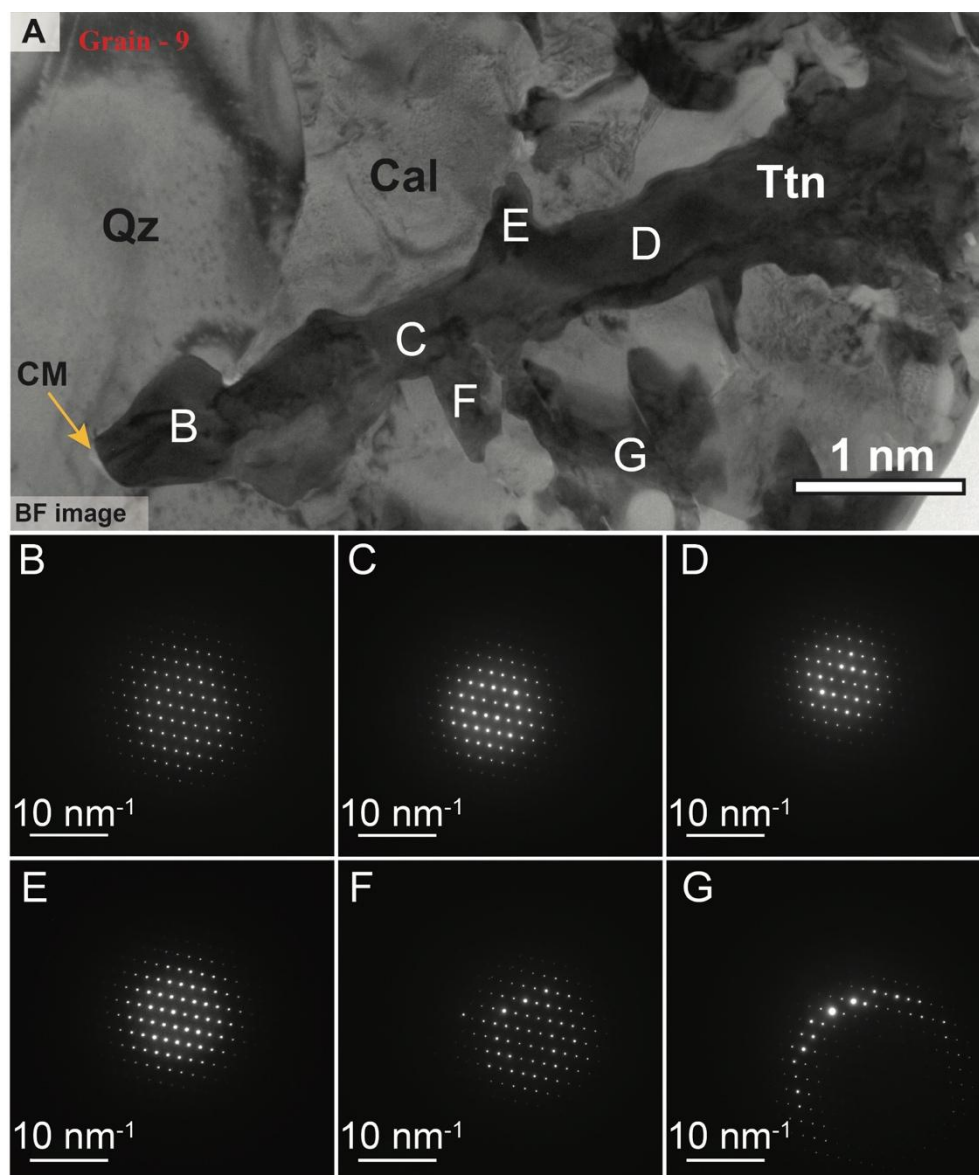


図2 チタナイト微小管の透過型電子顕微鏡写真（上）と制限視野電子回折像（下A～G）

一方、アトムプローブ分析ではAlとTiの局所的な変動は見られたものの、微小管の成長方向に対応する規則的な組成累帯構造は確認されませんでした。この結果は、微小管構造が変成反応によるチタナイトの樹枝状結晶成長で形成された可能性が低いことを示唆しています（図3）。

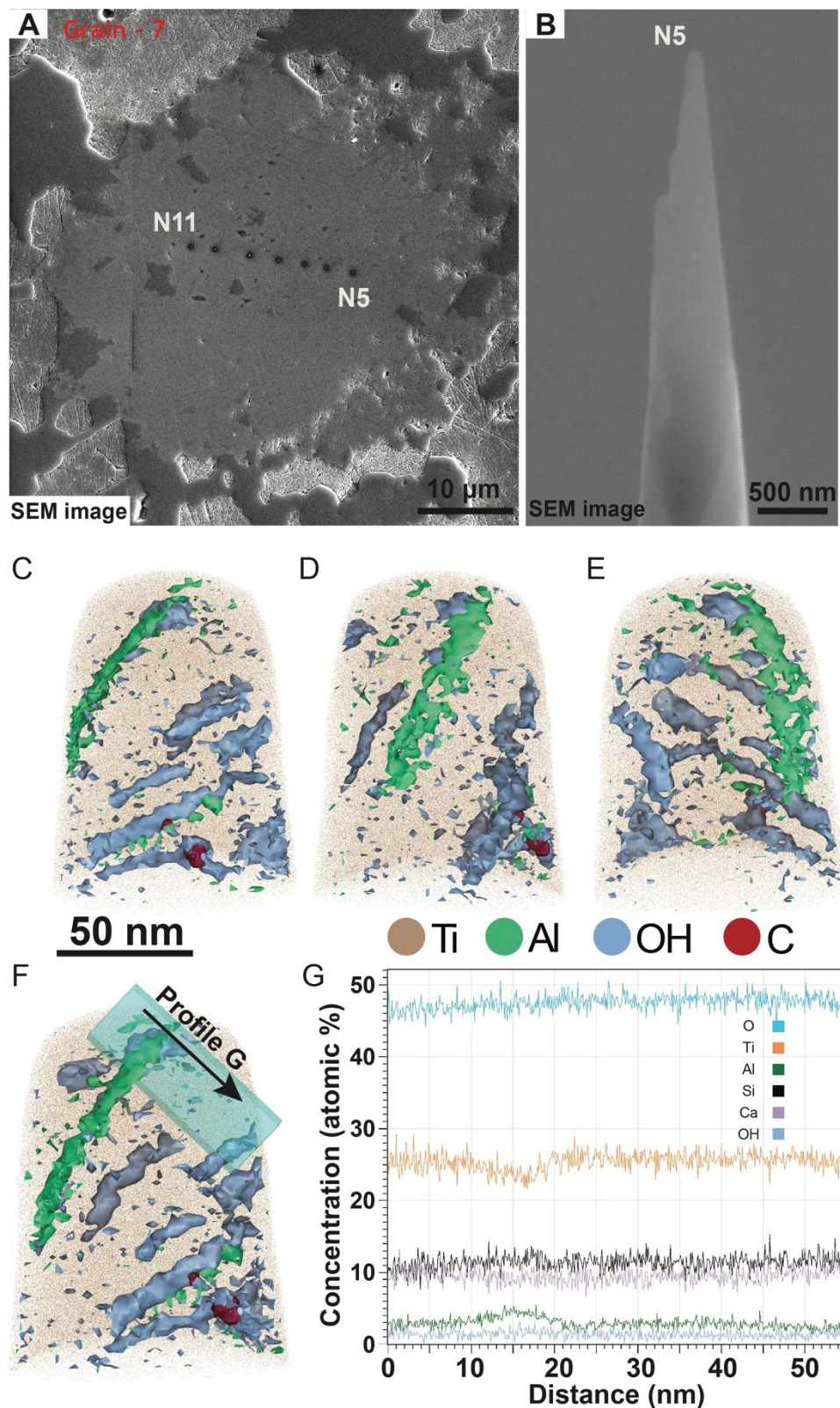


図3 チタナイト微小管中からアトムプローブ分析用の針状試料を切り出した点 (A)、集束イオンビームを用いて針状に加工したチタナイト (B)、チタナイト結晶内のアルミニウムと水酸基と炭素の3次元分布 (C,D)

一般的な微生物穿孔は、新鮮な火山ガラスの割れ目などを起点として約 100 マイクロメートルほど掘り進められ、明瞭な根元（起点）を持つ場合があります。これに対して、本研究

の微小管は最大でも約 15 マイクロメートルと短く、明確な起点部を持たず、湾曲や分岐をしたり、放射状の集合組織をなし、先端部には炭質物または黄鉄鉱を伴います。この産状は「アンビエント・インクルージョン・トレイル (ambient inclusion trail : AIT)」の特徴とよく一致します。AIT は、埋没した有機物の熱分解によって生じる有機酸が周囲の鉱物を溶解し、そうして生じたガスや流体が炭質物や黄鉄鉱などの粒子を押し動かすことで形成される管状の軌跡です。微小管が緑泥石基質中ではなく、石英－方解石基質中のみ観察され、周期的な Al-Ti 組成累帯（変化）を示さないことから、変成作用によって形成される樹枝状チタナイトの可能性も低いといえます。したがって本研究グループは、炭質物や黄鉄鉱に伴って形成された既存の溶解軌跡の内部を後にチタナイトが充填したと解釈しています。

IV. チタナイト微小管の形成モデル

チタナイトの微小管の形成過程を三段階に分けて説明します。第一段階では、火山砕屑物を含む炭酸塩の堆積環境（ストロマトライト形成場）に微生物のコロニー（微生物マット）が発達し、微生物は紫外線から身を守るためにアナターゼ型 TiO_2 を生成しました。第二段階では、埋没と（地熱による）加熱によって微生物由来の有機物が分解し、有機酸が放出されました。有機酸は方解石、石英、変質火山物質などと反応し、炭質物や黄鉄鉱を先端に伴う管状の溶解軌跡を形成しました。同時に、流体中への Ti、Ca、Si の濃縮も進んだと考えられます。第三段階では、埋没と低度変成作用の進行に伴い、 TiO_2 、石英、方解石およびメタンを含む流体の反応によってチタナイトの形成が加速化し、先に生じた溶解軌跡管の内部を充填しました。周囲に含まれる炭質物の炭素同位体比は -47.3‰ ～ -39.6‰ と著しく軽く、生物由来のメタンが反応に関与したことを支持しています（図 4）。

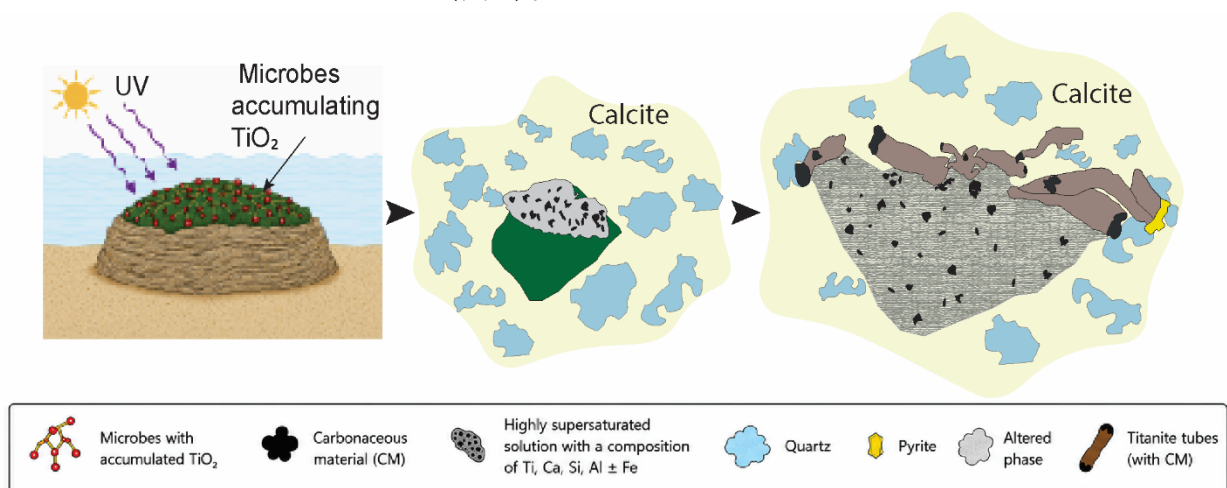


図 4 ストロマトライト中に含まれるチタナイト微小管の形成モデル

V. 今後の展開

太古地球の極限環境で微生物が紫外線防護のために二酸化チタンを利用していた可能性を示唆する本研究の結果は、生命の起源と進化を探る上で極めて重要です。今後は、実験室での環境再現やシミュレーションを通じて、微生物がチタンを集積し、二酸化チタンを形成するメカニズムや生命維持における UV 遮へい効果の重要性について、より定量的・多角的に検証することが望まれます。さらに火星や氷衛星など、強力な放射線にさらされる天体における生命の

存在の可能性やその痕跡を探索研究への応用も期待されます。本成果は、地球外生命探索をはじめ、惑星科学・宇宙生物学研究の新たな道を切り拓くものです。

VI. 研究成果の公表

本研究成果は、2026 年 9 月 2 日、Elsevier 社の学術雑誌「Geoscience Frontiers」に掲載されました。

【論文タイトル】 Localized TiO₂ accumulation in Archean stromatolites: implications for titanite microtube formation and possible UV shielding

【著者】 S. Kiran, M. Satish-Kumar, Y. Nakamura, H. Ohfuji, S.M. Reddy, D.W. Saxey

【doi】 10.1016/j.gsf.2026.102453

VII. 謝辞

本研究は、独立行政法人日本学術振興会（JSPS）の科学研究費助成事業（JP20KK0081）の支援を受けて実施されました。

【用語解説】

（注 1）生痕化石

生物そのものではなく、生物の生活・活動の痕跡が地層や岩石中に残って化石となったもの。

（注 2）チタナイト（くさび石/スフェーン）

チタン・カルシウム・ケイ素からなる鉱物で、緑や黄褐色で輝きが強く、宝石としても人気があります。地球の岩石に普遍的に含まれ、風化や変質に強く壊れにくいため、太古代などの初期地球の環境を知る「タイムカプセル」として地質学で重宝されています。また、微細な管状構造を作る場合もあり、それらは古代微生物の生命活動に関わっていた可能性もあるとして古くから注目されてきました。

（注 3）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。

（注 4）アンビエント・インクルージョン・トレイル（AIT）

岩石、特に先カンブリア時代の堆積岩の内部見られる特徴的な管状、トンネル状の跡のことです。有機物などの分解によって生じた流体やガスなどで後押しされて小さな鉱物粒子が移動することによってできると考えられています。

（注 5）オンコイド

地質学では、オンコイドは石灰藻が形成する直径 2mm 以上の球状または円盤状の炭酸塩堆積物を指します。粒子の表面には生物起源の微生物や藻類が成長しており、細粒の堆積物によって結合されています。

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