

PRESS RELEASE

令和7年5月26日

名古屋市立大学

東北大学

立命館大学

北海道大学

太陽系の「石のタイムカプセル」の“模様”を数値計算で再現！

～小惑星や隕石に含まれる不思議な形をした鉱物の結晶成長過程の解明へ～

Science Advances、

公開日時（米国東部時間令和7年5月23日（金）14時および日本時間5月24日（土）3時）

研究成果の概要

名古屋市立大学 三浦均准教授、東北大学 中村智樹教授、森田朋代大学院生、渡邉華奈大学院生、中国科学院・立命館大学 土山明教授、北海道大学 木村勇氣教授、宇宙航空研究開発機構 小山千尋研究開発員らの共同研究グループは、小惑星や彗星、隕石などの地球外物質に含まれるミリメートルサイズの球状粒子「コンドリュール」が溶融状態から急冷凝固する過程の数値シミュレーションを行い、特異な形の鉱物「棒状カンラン石」の結晶成長過程を世界で初めて理論的に再現しました。本研究成果により、今後、国際宇宙ステーションにおける微小重力環境下でのコンドリュール再現実験と合わせて、初期太陽系における物質進化過程や惑星形成過程の理解が飛躍的に進むことが期待されます。

本研究成果は Science の姉妹誌である「Science Advances」（令和7年5月24日付）に掲載されました。

【研究のポイント】

- ・太陽系の「石のタイムカプセル」であるコンドリュールの特異な“模様”を、世界で初めて数値シミュレーションによって再現した。
- ・本研究成果は、初期太陽系における物質進化過程や惑星形成過程の解明に繋がることが期待できる。

【背景】

コンドリュールは、約46億年昔の初期太陽系において、なんらかの過程によって加熱溶融したのち、急冷凝固することで形成した球状粒子です。その中には、「棒状カンラン石」という、地球上の岩石には見られない特異な形のカンラン石^(注1)という鉱物の結晶が含まれています（図1）。雪の形が

周囲の温度や水蒸気量によって千差万別に変化するように、結晶の形は周囲の環境を反映して変化するため、棒状カンラン石の特異な形は初期太陽系の環境を推測するための重要な手がかりです。棒状カンラン石の形成条件を調べるため、これまで数多くのコンドリュール再現実験が行われてきました。しかし、棒状カンラン石の形成過程を理論的に再現する試みはほとんど行われていませんでした。

そこで、本研究グループは、溶融コンドリュールの急冷凝固過程を数値シミュレーションすることにより、棒状カンラン石を再現し、その形成メカニズムや形成条件を理論的に明らかにするという試みに挑みました。

(a) 実際の“模様”

(b) 模式図

(c) 数値計算結果

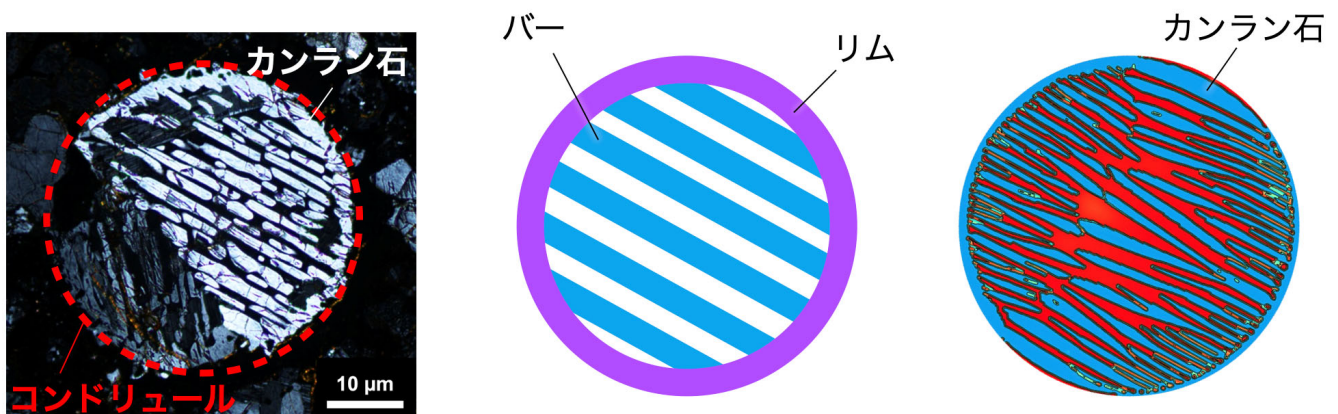


図1：(a)コンドリュールに含まれる棒状カンラン石。白い部分がカンラン石の結晶である。(b)棒状カンラン石の模式図。コンドリュール周囲を取り巻くリムと、その内部にほぼ平行に並ぶ多数のバーで特徴付けられる。リムとバーは別々の結晶ではなく、単一の結晶である。(c)数値シミュレーションによって再現された棒状カンラン石に類似した結晶成長パターン（模様）。

【研究の成果】

本研究グループは、急冷する溶融コンドリュール内部でカンラン石が結晶成長する過程をフェーズフィールドモデル^(注2)に基づいて数値シミュレーションし、棒状カンラン石に極めて類似した結晶成長パターンを世界で初めて理論的に再現しました。この結果に基づき、棒状カンラン石の形成メカニズムに関する新しい理論モデルを提唱しました。さらに、棒状カンラン石が形成するには、従来考えられていたよりも溶融コンドリュールが速く冷却される必要があることを明らかにしました。

溶融コンドリュールは、いわば宇宙空間に生じた「微小なマグマ」であり、その中にはカンラン石などの鉱物を構成する多様な成分が含まれます。これが宇宙空間のような高真空環境で加熱されると、特定の成分が蒸発して失われ、溶融コンドリュールの表面付近にこれらの成分が枯渇した「蒸発層」が生じます。蒸発層内では、カンラン石結晶に対する過冷却度^(注3)が大きくなると同時に、溶融コンドリュールの化学組成がカンラン石結晶と適合することにより、カンラン石が急速成長してコンドリュール周囲を取り巻くリムが形成されることがわかりました。また、リムが成長する過程において、その内側で界面不安定^(注4)という現象が生じた結果、リムの内側に多数の平行バーが発生することがわかりました。

棒状カンラン石がこのようなメカニズムで形成したとすると、溶融コンドリュールの表面に生じた蒸発層が残っているうちに棒状カンラン石が作られる必要があります。そのために必要な冷却速度を理論的に見積もったところ、1秒あたり1℃以上の速さで冷却する必要があることが判明しました。この冷却速度は、従来の再現実験が示していた値（1秒あたり1℃以下）よりも速く、このことはコンドリュールが従来考えられていた条件とはまったく異なる条件で形成された可能性を示唆しています。これまでの標準的なコンドリュール形成シナリオは従来の再現実験の結果に基づいて検討されており、本研究成果はそれらの形成シナリオを根底から見直すことの必要性を提示しています。

【研究の意義】

惑星形成の理論研究によると、コンドリュールのようなミリメートルサイズ～センチメートルサイズの粒子は、惑星の形成において重要な役割を果たしたことが示唆されています。本研究成果は、初期太陽系における物質進化のみならず、惑星形成に関する我々の理解を飛躍的に進歩させることができると考えています。

【今後の展開や社会的意義】

本研究グループは、国際宇宙ステーション「きぼう」日本実験棟^(注5)の微小重力環境を利用したコンドリュールの再現実験プロジェクト「Space Egg（代表：中村智樹）」を計画しています。本実験は2022年度「きぼう」での静電浮遊炉を利用した材料研究テーマ募集【基盤研究利用コース】として選定されており、2025年度に実験を実施する予定です。宇宙実験でコンドリュールの“模様”が再現されれば世界初の快挙であり、本数値計算手法はその実験結果を直接検証する現時点で唯一の理論解析手法を提供します。宇宙での再現実験と数値シミュレーションという世界に例を見ない研究協力体制により、関連分野における日本の高い研究力を国際的にアピールすることができます。

【用語解説】

- (注1) カンラン石：岩石に含まれる代表的な鉱物の結晶。カンラン石そのものは、地球外物質だけでなく、地球上の岩石にも普遍的に存在している。形成環境を反映した多様な形を示す。
- (注2) フェーズフィールドモデル：物質の相変化（液相から固相など）を連続的な場の変数を用いて表現する数理モデル。主に、合金凝固の分野において広く活用されている。
- (注3) 過冷却度：その物質が完全に溶融する温度を基準とした冷却の度合いを表す量。過冷却度が大きいほど、結晶を成長させる作用が強い。例えば、水の融点は摂氏0℃だが、急冷すると氷点下においても液体の状態で存在でき（過冷却水）、温度を下げるほど凍結しやすくなる。
- (注4) 界面不安定：平坦な結晶面が成長する際、結晶面に生じた微小な凹凸が時間とともに増幅され、多数の突起が発生する現象。様々な結晶の成長過程において観察される。雪に見られる美しい樹枝状の結晶の形成にも、界面不安定現象が関与している。
- (注5) 「きぼう」日本実験棟：宇宙航空研究開発機構が開発した日本の宇宙実験棟。国際宇宙ステーションに登載されており、高品質タンパク質結晶生成実験を始め、微小重力環境を利用した様々な実験が行われている。

【研究助成】

本研究は、大幸財団（三浦均）の研究助成、科学研究費補助金（三浦均、JP20K05347、JP19H00820、JP22K18306）、科学研究費補助金（中村智樹、JP24H00259）、東北大学 2025 年度オープンアクセス推進のための APC 支援事業の支援を受け実施されました。

【論文タイトル】

Decoding the formation of barred olivine chondrules: Realization of numerical replication

【著者】

三浦 均^{1*}、森田 朋代²、中村 智樹^{2*}、渡邊 華奈²、土山 明^{3、4}、木村 勇氣⁵、小山 千尋⁶
所属 1) 名古屋市立大学 大学院理学研究科、2) 東北大学 大学院理学研究科、3) 中国科学院広州地球科学研究所、4) 立命館大学 総合科学技術研究機構、5) 北海道大学 低温科学研究所、6) 宇宙航空研究開発機構 有人宇宙技術部門

(*Corresponding author)

【掲載学術誌】

学術誌名 : Science Advances

DOI 番号 : 10.1126/sciadv.adw1187

【研究に関する問い合わせ】

名古屋市立大学 大学院理学研究科 准教授 三浦 均

住所 : 名古屋市瑞穂区瑞穂町山の畑 1

E-mail : miurah@nsc.nagoya-cu.ac.jp

【宇宙実験に関する問い合わせ】

東北大学 大学院理学研究科 教授 中村 智樹

住所 : 仙台市青葉区荒巻字青葉 6-3

E-mail : tomoki.nakamura.a8@tohoku.ac.jp

【報道に関する問い合わせ】

名古屋市立大学 経営企画部広報室広報係

住所 : 名古屋市瑞穂区瑞穂町字川澄 1

TEL : 052-853-8328 FAX : 052-853-0551

E-mail : ncu_public@sec.nagoya-cu.ac.jp

東北大学 大学院理学研究科 広報・アウトリーチ支援室

住所 : 仙台市青葉区荒巻字青葉 6-3

TEL : 022-795-6708

E-mail : sci-pr@mail.sci.tohoku.ac.jp

立命館大学 総合企画部 広報課

住所：京都市中京区西ノ京朱雀町 1

E-mail：r-koho@st.ritsume.ac.jp

北海道大学 社会共創部広報課

住所：札幌市北区北 8 条西 5 丁目

TEL：011-706-2610 FAX：011-706-2092

E-mail：jp-press@general.hokudai.ac.jp

連携できる企業様でご関心をお持ちいただける場合は、下記の問い合わせ先までご連絡ください。

【共同研究に関する企業様からの問い合わせ】

名古屋市立大学 産学官共創イノベーションセンター

住所：名古屋市瑞穂区瑞穂町字川澄 1

TEL：052-853-8041 FAX：052-841-0261

E-mail：ncu-innovation@sec.nagoya-cu.ac.jp