

平成 29 年 5 月 31 日現在

機関番号：14501

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2014～2016

課題番号：26610174

研究課題名（和文）雰囲気制御・無容器加熱法によるコンドリュール再現実験の新展開

研究課題名（英文）Reproduction experiments of chondrules using a newly developed ambient-controlled levitation system

研究代表者

瀬戸 雄介 (Seto, Yusuke)

神戸大学・理学研究科・講師

研究者番号：10399818

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,300,000円

研究成果の概要（和文）：コンドリュールは45.6億年前に形成した太陽系最古の物質である。本研究では、再現実験からコンドリュールの加熱・冷却環境を制約することを目的として、雰囲気制御炉と浮遊加熱法を組み合わせたシステムを開発した。ベースとなる炉体として縦型管状炉を使用し、内部にガスノズルを設置して、雰囲気制御下での浮遊溶融実験を可能にした。このシステムを使って、天然の岩石やコンドリュールを模擬した組成物質の浮遊溶融実験を行ったところ、自形性の高い斑状のカンラン石が全溶融状態から晶出することが分かった。この結果は、これまで考えられていたコンドリュール形成モデルの修正を迫るものである。

研究成果の概要（英文）：We developed a gas-levitation system embedded in ambient-controlled tube furnace in order to reproduce micro-textures of chondrules, and to constrain their formation conditions. A vertical tube furnace was used as a heating device. An inner tube was inserted into the outer tube, and a gas-nozzle was set on at the top of the inner-tube. H₂+CO₂ mixed gas were introduced into the both inner and outer core tubes. Levitated samples were observed by a long focal CCD camera. Using the system, we demonstrated the containerless cooling experiments for molten silicate droplets. As starting materials, natural peridotite and oxide mixture corresponding to a type IIA chondrule were used. The present results showed that porphyritic texture is possible to be formed from fully molten states. The gas levitation system developed in the present study is a powerful technique to simulate the molten-quenched texture of early solar materials.

研究分野：鉱物学

キーワード：コンドリュール ガス浮遊 無容器加熱 結晶成長

1. 研究開始当初の背景

コンドリュールには、コンドリュールと呼ばれる直径 0.1 ~ 10 mm 程度の球形状の物体が含まれている。この物体は、原始惑星系円盤において付着成長した固体微粒子の集合体が、瞬間的な加熱イベントによって部分的あるいは完全に熔融した後、急速な冷却によって形成したと考えられている。年代学的な研究によれば、コンドリュールの形成時期は数百万年にわたっており、これは星雲ガスの凝縮が始まった太陽系の内惑星領域において、広範かつ高頻度の高温過程が存在していたことを示している。ただし、その形成環境は十分に理解されているとはいえない。コンドリュールの形成プロセスについては、観測や理論に基づいて様々なモデル(X-wind、衝撃波、衝突熔融、星雲稲妻など)が提出されているが、確固とした定説はまだないようである。コンドリュール組織の再現を実際に試みた研究も行われているが、少数の研究グループが実施しているのみであり、報告されている冷却速度にも数桁の幅($10^0 \sim 10^4$ K/hr)がありほとんど制約されていないという現状があった。

2. 研究の目的

コンドリュールを形成した加熱熔融イベントは、それまでの分散し希薄であった固体物質(星間塵)を空間的に集密/局在化させた重要なイベントであった。一体どのような熱源が、どのように物質を加熱したのだろうか? 現在の惑星形成論において、星間物質(<1 μm)がどのようにして微惑星(m ~ km)サイズに成長したかについては長く議論が続いており、それらのスケールをつなぐコンドリュールの存在は、微惑星形成過程において決定的な役割を担った可能性があり、コンドリュールの形成時における円盤環境を制約する事は極めて重要である。本研究では、再現実験による物質科学的な見地からコンドリュールの加熱・冷却環境を制約することを目的として、雰囲気制御炉と浮遊加熱法を組み合わせたシステムを開発した。

3. 研究の方法

本研究で開発した実験装置の外観とシステム構成の模式図を図 1 に示す。ベースとなる炉体は、一般的な縦型管状炉である複ら管型管状炉を使用した。複ら管型タイプは両電極部が一方の端にあるため配線が容易であり、浮遊システムを組み込むのに適している。加熱炉本体には、温度調節計、サイリスタ、電流計、電圧計、R 熱電対を各種結線し 0.1 °C オーダーでの精密な温度制御を可能にした。

炉心管には気密性の高い SSA-S チューブ(外/内径: 50/42 mm, 長さ: 600 mm, 以降外側炉心管と呼ぶ)を使用し、さらにその内側に、細い SSA-S チューブ(外/内径: 32/26 mm, 長さ: 650 mm, 以降は内側炉心管と呼ぶ)を挿入した。両炉心管の下部には、ガス導入口を設

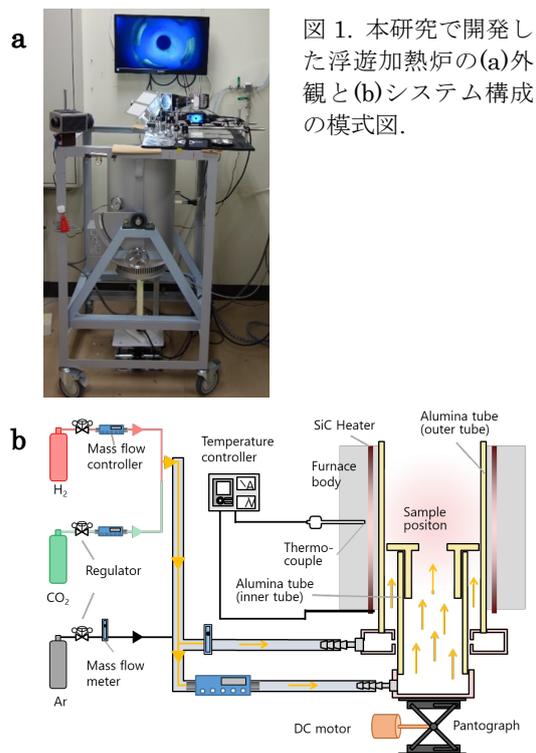


図 1. 本研究で開発した浮遊加熱炉の(a)外観と(b)システム構成の模式図。

けており、独立にガス流量をコントロールすることが出来る。

内側炉心管は、地面に固定したパンタグラフの上に設置し、加熱炉本体とは独立に可動する。パンタグラフには電動モーターを接続し、さらに遠隔操作のためのコントローラーを作製した(図 2)。また、内側炉心管を昇降させる際に上端が揺れるのを防ぐために、内側炉心管の上端にアルミ製のガイドを設置した。このような昇降システムによって、試料は炉心管最上部と最高温度地点を行き来することが出来るようになり、通常の管状炉では不可能な高速昇温、冷却が実現しスムーズな試料交換を可能となった。

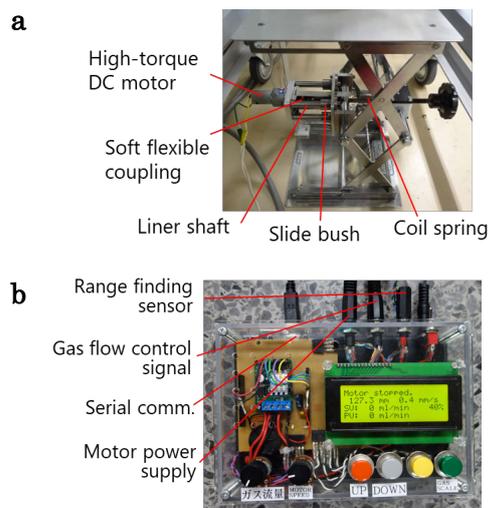


図 2. 炉心管昇降システム。(a)モーター制御パンタグラフと(b)コントローラー部。

内側炉心管の最上部には試料を浮遊させるためのガスノズルを設置した。ガスノズル

の素材として、当初はグラファイト、窒化ホウ素、ジルコニアなどを加工して予備実験を行ったが、高温での損耗や加工の容易さの観点から、非晶質カーボンがノズル素材として最も適していると判断した。ノズル形状についても、試行錯誤的に調整を行い、浮遊させる試料の直径が 1.5 mm の場合、ノズル穴直径 1 mm, 円錐角 90°程度が適していることが分かった。

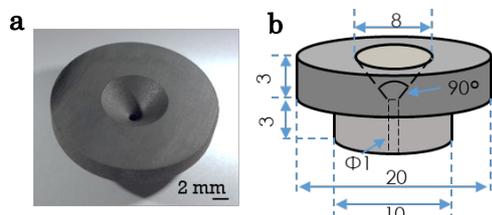


図 3. 本研究で作成したガスノズルの(a)外観と(b)設計図の一例. 単位はミリメートル.

管状炉サイズなどの制約から、浮遊させた試料は 600 mm 以上離れた位置から観察する必要があり、さらに、実験中は試料および周辺の赤熱による強烈な輻射によってコントラストが失われる。この問題を解決するため、本研究では炉の上部に光学定盤を設置し、観察光学システムを開発した。光学定盤上に長焦点 CCD カメラと高出力の LED 光源を設置した。照明光はレンズで集光したのち、ミラーを介して炉心管内に落射させた。CCD カメラはミラー及び紫外赤外フィルターなどの光学素子を経て、浮遊中の試料の状態をリアルタイムで観察・撮影する。さらに光路の途中にハーフミラーを設置し、放射温度計によって試料部付近の輻射温度を測定できるようにした(図 4)。このような観察光学系によって、1500 °C を超えるような高温実験においても明瞭な試料の像観察を行うことが出来るようになった。

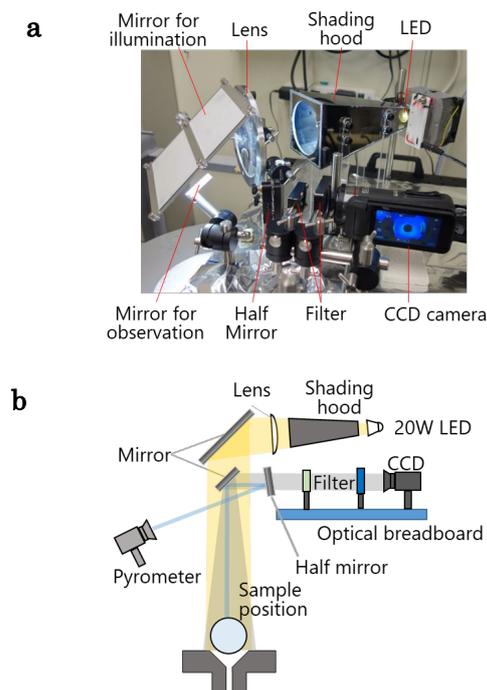


図 4. 観察光学系の(a)外観と(b)断面模式図.

浮遊加熱実験の出発物質として、本研究では、天然のカンラン岩(北海道幌満産)と、Type IIA (Fe-rich なカンラン石に近い組成を持つ)コンドリュールを模擬した酸化物ガラスを使用した。両試料は、事前に直径 1~2 mm の球状に加工したものをを用いた。浮遊実験時は、IQF のフガシティーに調整した H₂/CO₂/Ar ガスを導入し、10⁵ K/hr 程度の速度で 1500 °C に加熱し、3 分間程度保持したのち、10⁴ K/hr 程度の速度で冷却した。

回収した試料は、表面を光学顕微鏡で観察した。さらに切断研磨し、断面の組織や化学組成を、エネルギー分散型 X 線検出器を備えた走査型電子顕微鏡によって観察・分析した。

4. 研究成果

幌満産のカンラン岩を用いた実験では、浮遊熔融させ回収した試料の表面はガラス光沢をしており、真球形状に変化していた(図 5ab)。断面を観察したところ、実験前には存在していなかった多数の気泡が確認された(図 5cd)。この気泡は、カンラン石中に存在していた含水鉱物(おそらく蛇紋石)中の水分が熔融中に揮発したものだと考えられる。

カンラン岩試料は、今回の装置で達成可能

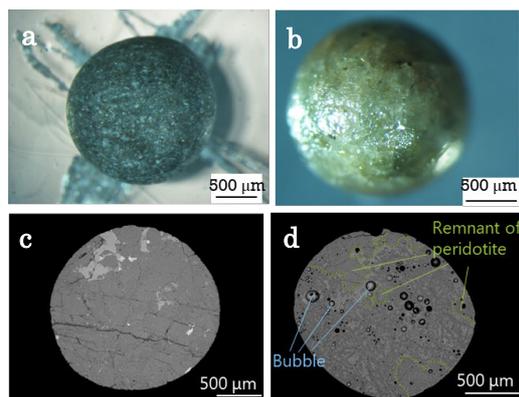


図 5. 幌満産カンラン岩の(a)実験前と(b)実験後の表面の光学顕微鏡像、及び(c)実験前と(d)実験後の断面の後方散乱電子像.

な上限温度(1500 °C)では全熔融に至らず、一部カンラン石は溶け残っていた。溶け残ったカンラン石の表面付近を観察すると、元の組成(Mg_{1.80}Fe_{0.20}SiO₄)に比べてわずかに Mg に富む組成(Mg_{1.88}Fe_{0.12}SiO₄)のカンラン石が覆いかぶさるように成長(overgrown)している様子が観察された(図 6a)。オーバーグロースしたカンラン石はジグザグな表面をしており、急速な成長過程であったことを示している。また、完全に熔融したと考えられる部分からは、斑状のカンラン石が成長している様子や、板状のカンラン石が成長している様子が観察された。前者は、10-20 μm の大きさで自形性が高く、比較的等方的な形状を示していた(図 6b)。後者は、断面上では厚み 3-12 μm、幅 100-200 μm 程度の短冊形を示す。また、内部は梯子状の骨格構造を持ち、多くの空洞を含んでいる(図 6cd)。両者とも結晶の最表面ではわずかに Fe に富む。板状組織と斑状組織は、

それぞれが優勢に成長する領域が明瞭に分かたれており、両組織が混ざり合うような領域は観察されなかった。結晶間を埋める部分は、ガラス質で、 SiO_2 と Al_2O_3 に富む化学組成をしていた。

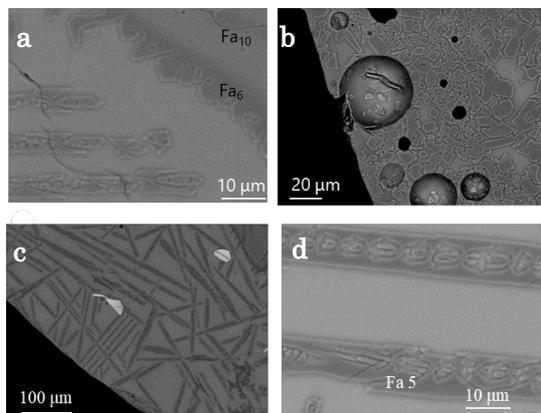


図 6. 幌満産カンラン石の回収試料の後方散乱電子像. (a)溶け残ったカンラン石の表面組織. (b)斑状カンラン石. (c,d)板状カンラン石.

Type IIA 組成物質を用いた実験では、カンラン岩の場合と同様に、実験後はガラス光沢をしており、真球形状に変化した。ただし、Feに富む化学組成であるため、表面は黒く変色していた。

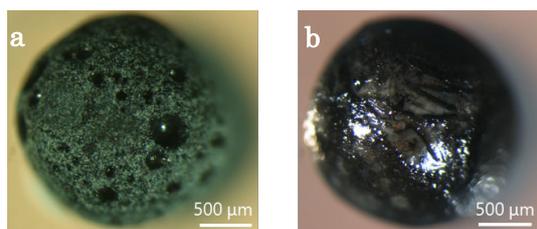


図 7. Type IIA 組成物質の(a)実験前と(b)実験後の表面の光学顕微鏡像。

Type IIA 組成物質は $1500\text{ }^\circ\text{C}$ で全溶解するため、溶け残り物質は観察されない。結晶化した物質は主にカンラン石であり、斑状組織や、板状組織が観察された(図 8ab)。前者は、 $10\text{-}20\text{ }\mu\text{m}$ の大きさで自形性が高く、比較的等方的な形状を示していた(図 8c)。後者は、断面上では厚み $10\text{-}130\text{ }\mu\text{m}$ 、幅 $200\text{-}1300\text{ }\mu\text{m}$ 程度の短冊形を示し、内部は梯子状の骨格構造を持つ(図 8d)。これらの組織は、カンラン岩を出発物質とした実験結果とよく似ているが、晶出した結晶サイズは有意に大きい。これは、Feに富むケイ酸塩メルトの拡散速度が速いため、同じ冷却速度でも結晶が大きく成長したためと考えられる。また、板状カンラン石や斑状カンラン石は、ともに結晶の中心部から外縁部に欠けて、顕著な化学ゾーニングを示していた。また、板状組織と斑状組織は、それぞれが優勢に成長する領域が明瞭に分かたれており、両組織が混ざり合うような領域は観察されなかった。結晶間を埋める部分は、ガラス質で、 SiO_2 、 Al_2O_3 、FeOに富む化学組成をしていた

以上の結果を天然のコンドリュール組織

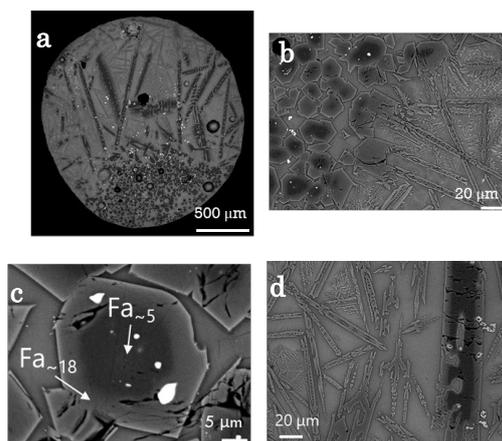


図 8. 幌満産カンラン石の回収試料の後方散乱電子像. (a)全体像. (b)斑状組織と板状組織. (c)斑状カンラン石の拡大. (d)板状カンラン石の

と比較する。斑状のカンラン石組織は、天然のコンドリュールで最も頻りに観察される組織である。これまで、このような斑状組織は、部分熔融状態からの冷却で形成したと考えられてきた。すなわち、溶け残った結晶を核として融液からカンラン石が再成長することで、自形性の良い斑状組織が形成するというモデルである。しかし今回の研究では、明らかに溶解している部分からも、斑状のカンラン石が成長している様子が観察された。この事実は、コンドリュールの形成条件(特に最高温度や熔融状態)の再考を促す重要な結果である。ただし、再現した斑状組織はサイズが小さく、化学ゾーニングを持っていた。これらの特徴は天然の斑状組織と一致しない。さらに、板状カンラン石も実際のコンドリュールでもしばしば観察される組織であるが、天然のものはサイズが大きく、化学ゾーニングや梯子状の骨格構造を持たない。このような天然との相違は、冷却速度の違い(すなわち実験の冷却速度が速すぎる)、あるいは、天然のコンドリュールには何らかの焼きなまし(annealing)過程があった可能性を示唆している。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 3 件)

- ① Ichimura S., Seto Y., Tomeoka K. Nepheline formation in chondrite parent bodies: Verification through experiments, *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 査読有, 210 巻, 217, 114-131, doi: 10.1016/j.gca.2017.04.025.
- ② Matsumoto M., Tomeoka K., Seto Y. Nepheline and sodalite in chondrules of the Ningqiang carbonaceous chondrite: Implications for a genetic relationship with those in the matrix, *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 査読有, 208 巻, 2017,

220-233, doi: 10.1016/j.gca.2017.03.032.

- ③ Tsujino N., Nishihara Y., Yamazaki D., Seto Y., Higo Y., Takahashi E. Mantle dynamics inferred from the crystallographic preferred orientation of bridgmanite, *Nature*, 査読有, 539 巻, 2016, 81-84, doi: 10.1038/nature19777.

〔学会発表〕(計 3 件)

- ① 瀬戸 雄介、鈴木 康太、庄田 直起、霧 囲気制御ガス浮遊システムによるコンドリユール組織の再現実験、日本地球惑星科学連合 2017 年大会, 2017 年 5 月 22 日、幕張メッセ国際会議場(千葉県).
- ② 鈴木康太、庄田直起、市村隼、瀬戸雄介、霧 囲気制御ガス浮遊システムの開発: コンドリユール組織の再現を目指して、日本鉱物科学会 2016 年年会、2016 年 9 月 23 日、金沢大学(石川県).
- ③ 鈴木 康太、庄田 直起、市村 隼、瀬戸 雄介、管状炉型霧 囲気制御ガス浮遊システムの開発: コンドリユール組織の再現を目指して、日本地球惑星科学連合 2016 年大会、2016 年 5 月 24 日、幕張メッセ国際会議場(千葉県).

〔その他〕

ホームページ等

<http://pmsl.planet.sci.kobe-u.ac.jp/~seto>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

瀬戸 雄介 (SETO Yusuke)

神戸大学・大学院理学研究科・講師

研究者番号: 10399818

(2) 研究分担者

なし

(3) 連携研究者

三宅 亮 (MIYAKE Akira)

京都大学・大学院理学研究科・准教授

研究者番号: 10324609

松本 恵 (MATSUMOTO Megumi)

神戸大学・研究基盤センター・特命技術員

研究者番号: 50725455