

令和 4 年 5 月 27 日現在

機関番号：14501
研究種目：基盤研究(B)（一般）
研究期間：2018～2021
課題番号：18H01268
研究課題名（和文）原始太陽系を模擬した浮遊溶融システムの新規開発

研究課題名（英文）Development of a new levitated melting system that simulates the primitive solar 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） 13,300,000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、再現実験によってコンドリュールの形成環境を制約することを目的として、浮遊加熱システムを新規開発した。このシステムでは、管状炉の内部にガス浮遊ノズルを導入し、さらに近赤外レーザーを照射することによって、還元的雰囲気を保ちながら2000℃を超える温度で物体を浮遊溶融させることが出来る。このシステムを用いて、様々な岩石やコンドリュールを模擬した物質に対して浮遊溶融実験を行い、天然で見られるコンドリュール組織を再現することに成功した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

コンドリュールとは、原始惑星系円盤において、微粒子の集合体が瞬間的な加熱によって溶融し、その後急冷してできた球状物質である。本研究では、コンドリュールの形成環境（非接触・超高温・還元的状態）を模擬するために、雰囲気制御管状炉・レーザー加熱装置・ガス浮遊法を組み合わせたハイブリッド浮遊加熱装置を開発した。この装置を用いて様々な出発物質の浮遊溶融実験を実施し、実験生成物を実際の隕石中のコンドリュール組織と比較を行うことで、原始惑星系円盤におけるコンドリュール形成条件の制約が可能となった。

研究成果の概要（英文）：Chondrules are the oldest material in the solar system, having formed 4.56 billion years ago. In this study, a new levitation heating system was developed to constrain the formation environment of chondrules through reproducible experiments. In this system, a gas levitation nozzle is introduced inside a tube furnace and further irradiated with a near-infrared laser to levitate and melt objects at temperatures exceeding 2000 °C while maintaining a reductive atmosphere. Using this system, levitated melting experiments were conducted on various rocks and chondrule-simulating materials, and the system successfully reproduced the naturally occurring chondrule structure.

研究分野：鉱物学

キーワード：コンドリュール 浮遊加熱法

1. 研究開始当初の背景

コンドライト隕石は、約45.6億年前に形成した太陽系最古の岩石であり、地球に落下する隕石の90%以上がこのタイプの隕石である。コンドライト隕石には、コンドリュールと呼ばれる直径0.1~10mm程度の球形状の物体が含まれている(図1)。この物体は、45.6億年前の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。コンドリュールは無重力・無接触で固結したため、図1のように通常の地球環境では形成し得ないユニークな凝固組織を呈する。この多様な内部組織は、円盤中における微粒子の化学組成、周囲のガス種・分圧、加熱・冷却速度を反映していると考えられている。

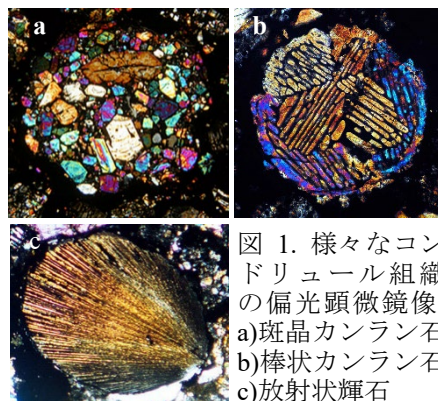


図1. 様々なコンドリュール組織の偏光顕微鏡像.
a)斑晶カンラン石
b)棒状カンラン石
c)放射状輝石

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。現在の惑星形成論において、星間物質(<1μm)がどのように微惑星(m~km)サイズまで成長したかについては長く議論が続いているが、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、そ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。

2. 研究の目的

本研究の目的は、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である。コンドリュール組織の再現実験については古くから様々な研究者によって試みられてきたが、その多くは試料を何らかの容器に固定し、熔融/冷却する手法であった。この方法では、融液が容器材料と接触する部位に温度分布や核形成頻度の不均質が生じるため、実際のコンドリュールの形成条件(非接触状態での冷却)と直接対比できないという問題があった。近年ではレーザー加熱とガス浮遊による無容器加熱法を利用することが可能になっている。この方法を用いると極めて大きな過冷却(融点温度を下回っても固化しない現象)が実現し、容器に接触する場合とは異なる凝固組織が形成することが分かってきた。しかし、従来のガス浮遊法は精密な雰囲気制御や冷却速度制御が困難であるという欠点があり、さらなる改良が必要である。理論的なアプローチによっても、コンドリュール形成時の熱源や周囲の環境についての様々なモデル(双極流説、衝撃波説、天体衝突熔融説など)が提案されているが、物質科学的な制約が乏しいため、定説がないという現状がある。

以上のように、原始惑星円盤を模擬(無容器、還元雰囲気)することは技術的に困難な点が多く、コンドリュール再現の実験的な研究報告は未だ十分ではない。そのため本研究では、過去の再現実験の欠点を補うべく、新たな加熱熔融法として縦型管状炉/ガス浮遊法/レーザー加熱法を組み合わせたハイブリッドシステムを独自開発することに挑戦した。

3. 研究の方法

上述の目的を達成するために、本研究では浮遊加熱システムを新規開発した(図2)。炉本体には縦型管状炉を使用し、外側炉心管の内部に、浮遊用ノズルを装着した細い炉心管(内側炉心管)を設置した。両炉心管の下部から流量を制御したH₂+CO₂+Ar混合ガスを導入して、還元雰囲気を実現した。内側炉心管は、ガスノズル部と共にパンタグラフによって昇降し、試料交換位置と最高温度位置を移動する。炉の上部には光学定盤を設置し、ミラーを介した

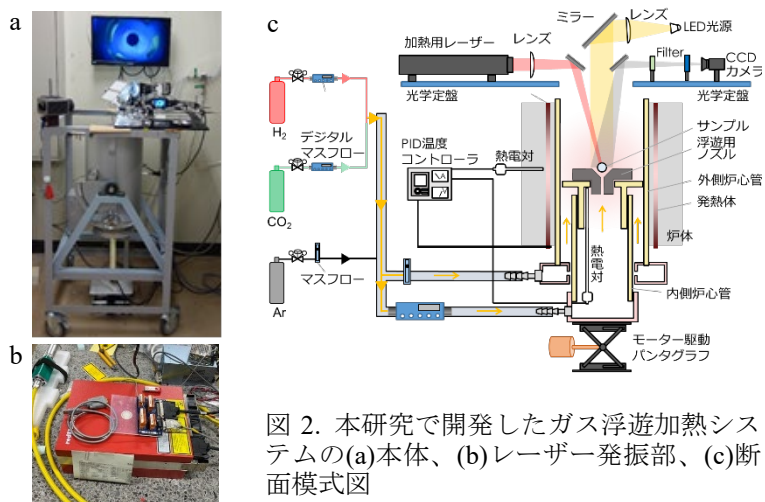


図2. 本研究で開発したガス浮遊加熱システムの(a)本体、(b)レーザー発振部、(c)断面模式図

CCDカメラによって、加熱浮遊中の試料を観察できるようにした。高温では輻射が顕著となり像観察が困難となるため、高出力LED光を集光して試料部照射し、高温でも明瞭な撮影を可能

とした。試料の加熱については、炉心管を円筒状に囲む電気抵抗発熱体(シリコンカーバイド)に加えて、最大出力 100W のファイバーレーザーを試料位置で集光させることによって超高温を達成するハイブリッド加熱システムを構築した。これによって、管状炉単体では熔融が難しい物質(例えば Mg_2SiO_4 , 融点 $1900^{\circ}C$)に対しても十分な加熱を行うことができるようになった。加熱中の試料の温度は、輻射温度計で測定した。また、ガス浮遊をさせるためのノズル材料には、熱的な摩耗が少なく、ケイ酸塩融体との反応に不活性なアモルファスカーボンを使用した。安定な浮遊状態を実現するためのノズル穴の形状については試行錯誤的に最適化を試みた。浮遊させる試料の直径が 2~3 mm 程度の場合、ノズル穴直径 1 mm, 円錐角 90° 程度、円錐角底面は 3~4 mm 程度が適していることが分かった(図 3)。

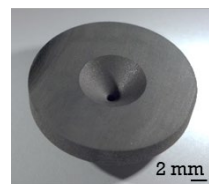


図 3. ガスノズルの試作例

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

本稿では Murchison 隕石と Allende 隕石を出発物質として用いた実験結果を示す。前者は後者に比して H_2O や C といった揮発性成分を多く含む特徴がある。両試料とも事前に乳鉢で十分な量を粉砕して均質化し、上述の浮遊加熱システムに導入した。約 $2000^{\circ}C$ で浮遊させたまま全溶融状態を 30 秒間保持し、その後急冷回収した。Murchison 隕石を出発物質とした回収試料(図 4)では、多くの場合試料は若干の凹凸はあるものの全体として光沢があり真球に近い形状に変化していた。断面観察(図 4b,c)によれば、試料の内部は定方向に配列した板状のカンラン石が発達しており、その隙間を SiO_2 成分に富むガラスが埋めていることが分かった。板状カンラン石は典型的な厚みが $20 \mu m$ 程度であり、内部は梯子状の骨格構造を呈しており、 Fa_{20} - Fa_{40} の化学ゾーニングを示していた。さらに電子後方散乱回折(EBSD)で結晶方位を解析したところ、カンラン石の平板は(010)面に相当することが分かった。これは、天然の板状カンラン石コンドリュールの組織と同一である。また、球体の中心部には空隙がよく見られたが、これは揮発性成分が気化して試料内部に閉じ込められたためと考えられる。Allende 隕石を出発物質とした実験結果(図 5)でも、同様に板状カンラン石が発達した組織が頻繁に観察された(図 5c)。平板のサイズも同程度であったが、内部に梯子状の骨格構造は見られなかった。また球状の金属(Iron globule)も生成しており、その組成は $Fe_{90}Ni_{10}$ であった。これは天然のコンドリュールにもよく見られる組織であり化学組成もほぼ一致する。試料内に大きな空隙は見られず、これは Allende 隕石が Murchison 隕石に比べて揮発性成分に乏しいことと整合的である。両試料とも、斑晶カンラン石組織(図 1a)は再現できなかった。

板状カンラン石は実際のコンドリュールでしばしば観察される組織である(図 1b)が、天然のものは板の厚みが大きく、化学ゾーニングや梯子状の骨格構造を持たない。また、天然では結晶方位の揃ったリムが発達していることが多いが、実験では再現できなかった。また、天然でよく見られる斑状カンラン石組織は再現できなかった。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おり、コンドリュールの形成条件(特に最高温度や溶融状態)の再考を促す重要な結果であると考えられる。

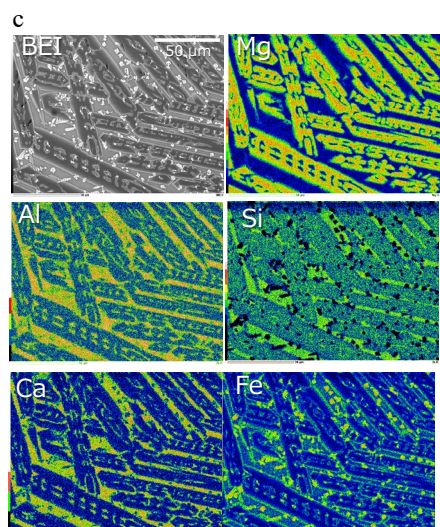
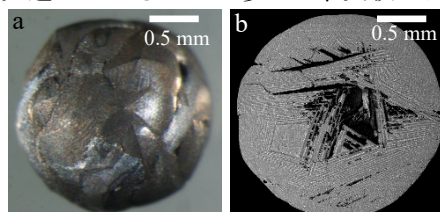


図 4. Murchison 隕石を出発物質とした浮遊溶融急冷回収物の (a)表面光学顕微鏡像、(b)断面 BEI 像、(c)断面元素像

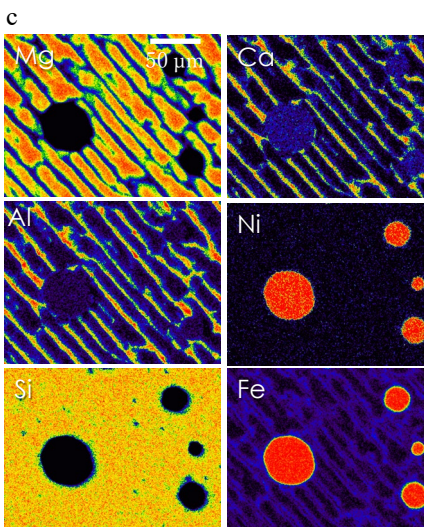
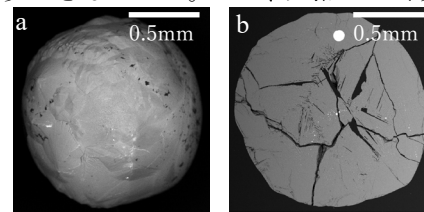


図 5. Allende 隕石を出発物質とした浮遊溶融急冷回収物の (a)表面 BEI 像、(b)断面 SEM 像、(c)断面元素像

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計3件（うち査読付論文 3件／うち国際共著 1件／うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 Takayoshi Nagaya, Atsushi Okamoto, Ryosuke Oyanagi, Yusuke Seto, Akira Miyake, Masaaki Uno, Jun Muto, Simon R. Wallis	4. 巻 105
2. 論文標題 Crystallographic preferred orientation of talc determined by an improved EBSD procedure for sheet silicates: Implications for anisotropy at the slab: mantle interface due to Si-metasomatism	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 American Mineralogist	6. 最初と最後の頁 873-893
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.2138/am-2020-7006	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 Uchino T, Teramachi N, Matsuzaki R, Tsushima E, Fujii S, Seto Y, Takahashi K, Mori T, Adachi Y, Nagashima Y, Sakaguchi Y, Ohishi K, Koda A, Sakurai T, Ohta H.	4. 巻 101
2. 論文標題 Proximity coupling of superconducting nanograins with fractal distributions	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 PHYSICAL REVIEW B	6. 最初と最後の頁 35146
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1103/PhysRevB.101.035146	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Murakami, Y., Nakamura, A.M., Yokoyama, K., Seto, Y., Hasegawa, S.	4. 巻 182
2. 論文標題 Collisional disruption of highly porous targets in the strength regime: Effects of mixture	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Planetary and Space Science	6. 最初と最後の頁 104819
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1016/j.pss.2019.104819	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計8件（うち招待講演 0件／うち国際学会 3件）

1. 発表者名 家本 あかね, 瀬戸 雄介, 三宅 亮
2. 発表標題 5つのCMコンドライト中のTCIの微細組織観察とCMコンドライト母天体の水質環境の推定
3. 学会等名 JpGU-AGU Joint meeting 2020
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 家本あかね, 瀬戸雄介, 三宅亮
2. 発表標題 水質変質程度の異なるCMコンドライト中TCIの微細組織観察
3. 学会等名 2019年鉱物科学会年会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Suzumura A, Seto Y, Itoh S.
2. 発表標題 Petrographic study of a compact type A CAI with partial melting process
3. 学会等名 The 82nd Annual Meeting of the Meteoritical Society (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 瀬戸雄介, 大塚 真弘, 三宅亮
2. 発表標題 動力学的回折理論に基づく電子回折シミュレーションと鉱物への応用
3. 学会等名 日本地球惑星科学連合2019年大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Yusuke Seto, Shiori Adachi, Kazushige Tomeoka
2. 発表標題 Hydrothermal experiments of anorthite with implications for Na-metasomatism on carbonaceous chondrite parent body
3. 学会等名 The Ninth Symposium on Polar Science (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Akimasa Suzumura, Yusuke Seto, Shoichi Itoh
2. 発表標題 Petrographic study of a compact type A CAIs with partial melting process
3. 学会等名 The Ninth Symposium on Polar Science (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 瀬戸 雄介, 足立 菜, 市村 隼
2. 発表標題 コンドライト母天体を模擬したアノーサイト水質変質実験
3. 学会等名 日本鉱物科学会2018年会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 家本 あかね, 瀬戸 雄介, 三宅 亮
2. 発表標題 CMコンドライト中のtype- TC1の微細組織観察
3. 学会等名 日本鉱物科学会2018年会
4. 発表年 2018年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

Seto's home page
<https://yseto.net/>

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
--	---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------