

## 口頭講演 | R5：地球外物質

■ 2024年9月14日(土) 9:00 ~ 12:00 | 会場 ES025 東山キャンパス

## R5：地球外物質

座長:松本 恵(東北大学)、山本 大貴(九州大学)、瀬戸 雄介(大阪公立大学)、松本 徹(京都大学)

9:00 ~ 9:15

[R5-01] 非晶質ケイ酸塩の凝縮実験と分光分析から制約されるAGB星周ダストの化学組成の多様性

「発表賞エントリー」

\*榎本 華子<sup>1</sup>、瀧川 晶<sup>1</sup>、茅原 弘毅<sup>2</sup>、小池 千代枝<sup>2</sup> (1. 東大・地惑、2. 大阪産業大)

9:15 ~ 9:30

[R5-02] 炭素質コンドライトDOM 08006中のプレソーラー酸化物から探る星周ダストの形成過程

「発表賞エントリー」

\*橋爪 宏幸<sup>1</sup>、瀧川 晶<sup>1</sup> (1. 東京大・院地惑)

9:30 ~ 9:45

[R5-03] 原始惑星系円盤を運動するダストの不可逆化学反応の進行

\*石崎 梨理<sup>1</sup>、橘 省吾<sup>1</sup> (1. 東大・地惑)

9:45 ~ 10:00

[R5-04] 蒸発-結晶化実験によるタイプB CAI形成における昇温過程での蒸発の影響の評価

「発表賞エントリー」

\*鶴岡 靖朗<sup>1</sup>、橘 省吾<sup>1</sup> (1. 東大・院理)

10:00 ~ 10:20

[R5-05] 揮発性物質を含んだ微惑星の衝突によるコンドリュールの形成

「招待講演」

\*城野 信一<sup>1</sup> (1. 名古屋大・環境学)

10:20 ~ 10:35

[3Lecture-301-10-6add] 休憩

10:35 ~ 10:55

[R5-06] コンドルール構成鉱物の化学組成から制約する真のコンドルール形成期間

「招待講演」

\*福田 航平<sup>1</sup>、木多 紀子<sup>2</sup>、木村 眞<sup>3</sup> (1. 阪大・院理、2. ウィスコンシン大、3. 国立極地研究所)

10:55 ~ 11:10

[R5-07] 放射状輝石コンドリュールの形成プロセス：浮遊させたメルトの結晶化実験に基づく制約

「発表賞エントリー」

\*渡邊 華奈<sup>1</sup>、中村 智樹<sup>1</sup>、森田 朋代<sup>1</sup> (1. 東北大・院理)

11:10 ~ 11:25

[R5-08] ポイキリティック・シャーゴットイト火星隕石の岩石組織・鉱物組成多様性から読み解く母岩体層状構造の推定

「発表賞エントリー」

\*山崎 奏次郎<sup>1</sup>、山口 亮<sup>2</sup>、三河内 岳<sup>3</sup> (1. 東大・院理、2. 国立極地研、3. 東大・総研博)

11:25 ~ 11:40

[R5-09] 火星隕石Asuka 12325のTi-Crに富むスピネルの高圧相転移

\*竹之内 惇志<sup>1</sup>、伊神 洋平<sup>2</sup>、三河内 岳<sup>3</sup>、三宅 亮<sup>2</sup>、山口 亮<sup>4</sup> (1. 京大・総博、2. 京大・院理、3. 東大・総研博、4. 極地研)

---

11:40 ~ 11:55

[R5-10] シリカ鉱物を用いたメソシデライトの熱史推定

\*大野 遼<sup>1</sup>、竹之内 惇志<sup>2</sup>、三河内 岳<sup>3</sup>、山口 亮<sup>4</sup>、杉浦 直治<sup>5</sup>、三宅 亮<sup>1</sup> (1. 京大・理、2. 京大博、3. 東大博、4. 極地研、5. 千葉工大)

---

11:55 ~ 12:00

調整

## 非晶質ケイ酸塩の凝縮実験と分光分析から制約されるAGB星周ダストの化学組成の多様性

### Revealing Chemical Compositional Variety of Amorphous Silicate Dust around AGB Stars by Condensation Experiment and Spectroscopic Analysis

\*榎本 華子<sup>1</sup>、瀧川 晶<sup>1</sup>、茅原 弘毅<sup>2</sup>、小池 千代枝<sup>2</sup>

\*Hanako Enomoto<sup>1</sup>, Aki Takigawa<sup>1</sup>, Hiroki Chihara<sup>2</sup>, Chiyoeko Koike<sup>2</sup>

1. 東大・地惑、2. 大阪産業大

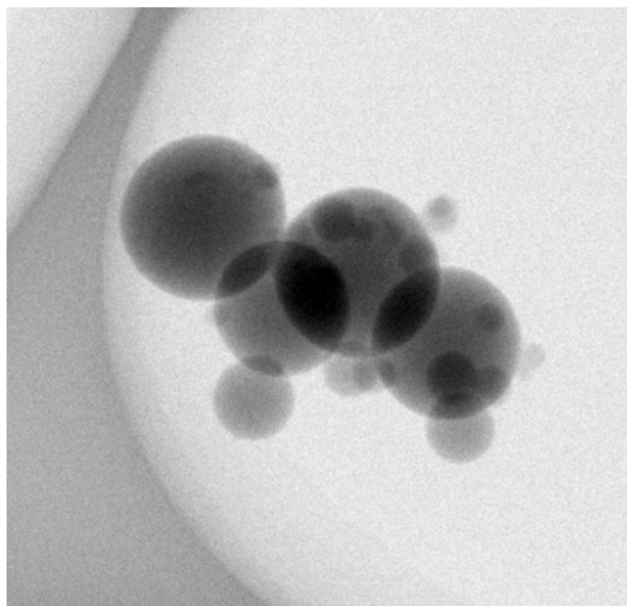
1. UTokyo, 2. Osaka Sangyo univ.

進化末期の中小質量星である漸近巨星分枝 (AGB) 星は、先太陽系から生き残ったプレソーラー粒子の主な起源である。AGB星起源のプレソーラーケイ酸塩は、 $(\text{Mg}+\text{Fe})/\text{Si}$ の値に幅があることや(Floss & Haenecour, 2016), Alに富む非晶質ケイ酸塩の存在が明らかになっている(Nguyen et al., 2016)。一方、酸素に富む AGB星の観測スペクトルは10, 18  $\mu\text{m}$ に非晶質ケイ酸塩ダストに由来するピークを示す。ピークの位置や幅が星ごとに異なることから、星周ダストの化学組成も多様であることが示唆される。しかし、非晶質ケイ酸塩の具体的な化学組成の制約は困難で、星周ダストとプレソーラー粒子の性質がどのように対応するのかは、十分に議論されていない。従来、AGB星周ダストは、複数の観測データと鉱物の実験室データから合成された光学定数が与えられた「アストロノミカルシリケート」で広く解釈されてきた (Draine&Lee, 1984; Ossenkopf et al., 1992)。しかし、アストロノミカルシリケートは、化学組成や構造が想定されていない架空の物質であり、ダストの形成条件や過程を議論できない。また、実験によって様々なダスト模擬物質が合成されてきたが (Dorschner, et al., 1995, Jäger et al., 2003, Mutschke et al., 1998), アストロノミカルシリケートに代わり観測を解釈できる物質は提示されていない。これはダストの模擬物質として使われる非晶質ケイ酸塩の多くが Mg-Si-Fe系の化学量論的組成で合成され、ダストの化学組成制約に利用できる光学定数が限られているためである。そこで、本研究は、Mg-Al-Si, Mg-Ca-Al-Si系で系統的な凝縮実験を行い、ダスト模擬物質の光学定数を決定した。誘導熱プラズマ装置 (JEOL TP-40020NPS; Kim et al., 2021) を用い、出発物質の組成を系統的に変化させたダスト凝縮実験を行った。生成物の結晶相をXRD (Rigaku RINT-2100), バルク組成をEPMA (JEOL JXA-8530F), 粒子ごとの組成と構造をSTEM (JEOL JEM-2800) で分析し、KBr媒質に分散させた生成物の吸光度を測定した (JASCO FT/IR-4200)。一部の生成物について、生成物を圧密したペレットで反射率を測定した (Thermo Nicolet 6700)。生成物の光学定数は、反射率から決定した高波数での誘電率を用いて、吸収スペクトルをローレンツ振動子モデルでフィッティングすることによって求めた。また、決定した光学定数を用い、KBr媒質の影響のない、すなわち真空中での生成物の吸収スペクトルを、球状粒子を仮定し直径0.1-10  $\mu\text{m}$ のサイズ範囲で算出した。生成物は主に球状の非晶質ナノ粒子 (10-150 nm) であり、バルク化学組成は出発物質からわずかに変化していたが、出発物質が完全に蒸発しなかったためである。Mg-Al-Si系では、Al/Siが0.07から0.53までの非晶質ケイ酸塩が生成した。Mg-Ca-Al-Si系では、 $(\text{Mg}+\text{Ca})/\text{Si}^{-1}$ のもとで0から1のCa/Mg比を持つ生成物、 $(\text{Mg}+\text{Ca})/\text{Si}^{-2}$ のもとでCa/Mg $\sim$ 0.2, 0.5の生成物が得られた。ケイ酸塩の吸収ピークには、次のような組成依存性が見られた。Al/Siが0.07から0.53に増加すると、10  $\mu\text{m}$ ピークは9.4から9.6  $\mu\text{m}$ に移動した。Ca/Mgが0から1に増加すると、10  $\mu\text{m}$ ピークは9.4から9.7  $\mu\text{m}$ へ、18  $\mu\text{m}$ ピークは17.7から19.1  $\mu\text{m}$ へ移動した。 $(\text{Mg}+\text{Ca})/\text{Si}^{-1}$ から $2^{-}$ へ変化すると、10  $\mu\text{m}$ ピークは長波長へ、18  $\mu\text{m}$ ピークは短波長へ系統的に変化した。最もケイ酸塩に富むグループのAGB星であるTY DraとIK Tauのダストスペクトルと、実験生成物の吸収スペクトルの計算結果を比較した。TY Draは1.5  $\mu\text{m}$ サイズのCIコンドライト的組成 ( $\text{Mg}_{0.89}\text{Al}_{0.07}\text{Si}$ ) の非晶質ケイ酸塩で、IK Tauは $< 1 \mu\text{m}$ サイズのAlに富む非晶質ケイ酸塩 ( $\text{Mg}_{0.93}\text{Al}_{0.53}\text{Si}$ ) で最もよく再現された。本研究により、アストロノミカルシリケートで解釈できなかった、星ごとに異なるダストの化

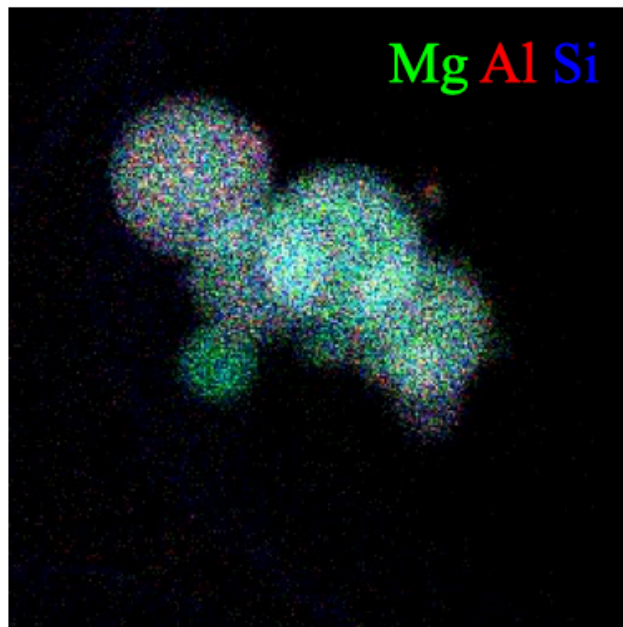
学組成が制約された。しかし、最もケイ酸塩に富むと分類されるAGB星にもAlに富むダストが存在することは、プレソラーケイ酸塩の多くがAlに乏しいことと矛盾する。これは、従来知られていない、星周低温領域でのSiに富むダスト形成過程がある可能性を示す。

キーワード：星周ダスト、非晶質ケイ酸塩、プレソラー粒子、実験、分光

Keywords: circumstellar dust, amorphous silicate, presolar grain, experiment, spectroscopy



200 nm



200 nm

実験で生成した非晶質ナノ粒子のSTEM-BF像(左)と  
STEM-EDS元素マップ(右)

## 炭素質コンドライトDOM 08006中のプレソーラー酸化物から探る星周ダストの形成過程

### Formation process of circumstellar dust studied from presolar oxides in carbonaceous chondrite DOM 08006.

\*橋爪 宏幸<sup>1</sup>、瀧川 晶<sup>1</sup>

\*Hiroyuki Hashizume<sup>1</sup>, Aki Takigawa<sup>1</sup>

1. 東京大・院地惑

1. UTokyo EPSS

プレソーラー粒子は隕石や惑星間塵、彗星の塵などで稀に見つかる非常に大きな同位体比異常を持つ粒子で、太陽系形成以前の星周ダストの生き残りとして推定されている[1]。プレソーラー酸化物/珪酸塩の主な起源天体は酸素に富むAGB星で、その星周には天体観測から結晶質アルミナ、スピネルに加え、非晶質珪酸塩や非晶質/遷移アルミナも多く存在すると考えられている[2]。酸処理残渣の分析で同定された酸化物の多くは結晶質コランダムやスピネルである。酸処理残渣のプレソーラースピネル粒子は、化学量論的なスピネルに加え、多様なAl/Mg比の粒子が存在する[3]。プレソーラー粒子の結晶構造や組織は、星周ダスト形成場の条件や変化を記録している可能性があるが、酸処理法では、結晶構造によってはAlに富む酸化物でも溶解してしまうため、一部のプレソーラー酸化物を見逃してしまう可能性がある。一方、隕石薄片のその場同位体分析により求められた隕石マトリクス中のプレソーラー粒子の存在度は、珪酸塩の数百ppmに対し酸化物は数十ppmと低いため、結晶構造などが調べられた酸化物の数はいまだに数個しかない[4]。本研究では、星周でのダスト形成過程およびその後の変成過程の解明のため、その場分析で酸素同位体異常を持つAlに富むプレソーラー酸化物を同定し、透過型電子顕微鏡(TEM)分析により結晶構造や組成を決定した。炭素質コンドライトDOM 08006(CO3.00)薄片のマトリクスのサブミクロンサイズのAlに富む粒子を含む領域をSEM-EDS (HITACHI HT-SU6600, JAXA ISAS)の元素MAPを用いて抽出し、CAMECA NanoSIMS50(東京大学AORI)/50L(東京大学農学部)を用いて同位体測定をおこなった。1辺10 $\mu$ mの領域にCs+ビーム(~0.9 pA)を照射して二次イオン(16O, 17O, 18O, 12C2, 12C13C, 28Si, 27Al16O)および二次電子像を同時に取得した。酸素同位体比(17O/16Oまたは18O/16O)を計算し、太陽系物質と有意に異なる(ポアソン分布での4 $\sigma$ 以上)ものをプレソーラー粒子とした。このうちいくつかを集束イオンビーム(FIB)法により約200 nmの厚さに切り出し(FEI Versa3D Dualbeam, 東京大学)、TEM (JEOL JEM-2800, 東京大学)で電子回折像とEDSマップを取得し、結晶構造と化学組成を分析した。マトリクス中の太陽系組成のAlに富む酸化物粒子についてもFIB-TEM分析をおこなった。マトリクス領域7500  $\mu$ m<sup>2</sup>の分析により、プレソーラー酸化物4個、プレソーラー珪酸塩20個を同定した(Extreme Group 1が1個、Group 1が18個、Group 3が2個、Group 4が3個)。Alに富む粒子を含む領域に限って同位体分析を行うことで、従来より5倍程度効率よくプレソーラー酸化物が発見できることがわかった。このうち、低中質量のAGB星や赤色巨星を起源とすると考えられているGroup 1に分類される粒子のFIB-TEM分析を実施した。分析したプレソーラー酸化物は2個で、1つは非化学量論的スピネル(Mg/Al=0.1-0.4)の結晶であり、ガスから直接凝縮したか、星周でコランダムまたは欠陥スピネル構造を持つ遷移アルミナとして凝縮したのちMg, Oガスと反応して形成したと考えられる。もう1つはAlに富む粒子と珪酸塩の混合粒子で、今回は珪酸塩の領域のみ切り出すことができた。切り出した粒子は(Fe+Mg)/Si=約1.25の非化学量論的な非晶質珪酸塩と推定された。さらに2個のプレソーラー珪酸塩をTEM分析した結果、いずれも非晶質珪酸塩であった。これらの珪酸塩は、星周で直接非晶質なものとして凝縮したか、あるいはより結晶性が高い状態で凝縮したが宇宙線などの影響により非晶質化して形成したと考えられる。発表ではこれらの粒子に加え、他のGroupに分類されるプレソーラー粒子についても詳細な微細構造分析をおこなった結果を紹介する。(参考文献)[1] Nittler, L. R. and Ciesla, F. (2016) *ARAA* **54**, 53. [2] Takigawa, A., et al. (2019) *ApJL* **878**, L7. [3] Zinner, E., et al. (2005) *GCA* **69**, 4149. [4] Zega, T. J., et al.

(2019) *M&PS* 55, 1207.

キーワード：プレソーラー粒子、隕石、スピネル、星周ダスト、酸化物  
Keywords: Presolar grains, meteorite, spinel, circumstellar dust, oxides

## 原始惑星系円盤を運動するダストの不可逆化学反応の進行

### Progress of irreversible chemical reactions on dust moving in a protoplanetary disk

\*石崎 梨理<sup>1</sup>、橘 省吾<sup>1</sup>

\*Lily Ishizaki<sup>1</sup>, Shogo Tachibana<sup>1</sup>

1. 東大・地惑

1. UT EPS

#### 背景

原始太陽系円盤でダストが経験した化学反応は、現在の太陽系天体の化学的性質の決定に重要な役割を果たしたと考えられる。原始太陽系円盤で進行したと考えられる化学反応の実験的研究は多数なされてきた。例えばYamamoto et al. (2018)では非晶質フォルステライト( $Mg_2SiO_4$ )と円盤環境を模擬した低圧 $H_2O$ ガス間の酸素同位体交換速度を決定し、典型的な円盤寿命と比較することで、現在の太陽系天体の酸素同位体組成を達成するには、材料となった非晶質ケイ酸塩ダストが $\sim 500$  K以上の高温環境で円盤 $H_2O$ ガスと酸素同位体交換をおこなう必要があると示した。しかし、実際の円盤ではダストの運動によって温度や圧力などが刻々と変化するため、原始太陽系円盤でのダストの化学反応進行を理解するにはダストのダイナミクスを考慮する必要がある。本研究では、原始惑星系円盤内を運動するダストが経験する仮想的な不可逆化学反応の進行を調べた。

#### 手法

原始惑星系円盤内をガスとよく馴染んで運動するダスト粒子を追跡する3Dモンテカルロシミュレーションをおこなった(Ciesla 2010; 2011; Okamoto & Ida 2022)。円盤モデルとして、ガス密度に比例する粘性加熱( $\alpha$ 粘性モデル; Shakura & Sunyaev 1973)を熱源とする鉛直・動径温度構造を持つ定常降着円盤を採用した。ダストの吸光度は $2.5 \text{ cm}^2/\text{g}$ 、主星質量は太陽質量 $M_\odot$ で一定とした。乱流粘性係数 $\alpha$ は $10^{-2}$ 、 $10^{-3}$ 、質量降着率 $M_g$ は $10^{-6}$ 、 $10^{-7}$ 、 $10^{-8} M_\odot/\text{yr}$ とし、計6通りの円盤で計算をおこなった。各パラメータセットに対してダスト粒子1万個をスノーライン中心面で放出し、ダストの温度履歴に基づいてJMA式(Johnson & Mehl 1973; Avrami 1973)で表される仮想不可逆反応の進行を調べた。スノーラインにおいて反応進行度 $X=0$ でシミュレーションを開始し、JMA式を微分して得られた微小反応進行度 $\delta X$ を積算することで反応進行を計算した。広範な化学反応を調べるため、活性化エネルギー $E_a$ は20-1000 kJ/mol、前指数因子 $\nu$  (/s)の自然対数は10-60、アブラミ指数 $n$ は0.5-4の範囲とし、 $\sim 200$ -1500 Kの温度範囲で進行する反応を計算した。全反応が完了した( $X$ が0.99を超えた)時点で計算を打ち切り、最大 $10^6$ 年間計算した。

#### 結果・議論

全ての円盤パラメータに対し、全ての反応がそれぞれ固有の狭い温度帯で進行・完了することがわかった。反応進行度 $X$ が特定の値(0.8, 0.9, 0.99)を超える以前に経験した最高経験温度のヒストグラムは対数正規分布によってよくフィッティングされ、この最大値および分散を「反応ライン温度( $T_{\text{react}}$ )」およびその「幅」と定義した。反応タイムスケールと拡散移動タイムスケールを比較することで、これら2つの「反応ライン」パラメータを半解析的に予測できる式の開発に成功した(Ishizaki et al. 2023)。不可逆反応が実際に円盤で完了する際の反応タイムスケール $t_{\text{eff}}$ も「反応ライン」予測式から得られる。 $t_{\text{eff}}$ は中心星からのある距離におけるダストの降着タイムスケールとほぼ等しくなる反応タイムスケールに相当する。 $t_{\text{eff}}$ は円盤・反応パラメータの双方に依存し、本研究で扱ったパラメータ範囲では $\sim 0.005$ -266年となる。円盤パラメータを固定した場合、 $t_{\text{eff}}$ は反応パラメータに依って最大4桁程度の範囲に収まる(例： $\alpha=10^{-3}$ 、 $M_g=10^{-7} M_\odot/\text{yr}$ で $\sim 0.1$ -160年)。

$t_{\text{eff}}$ は前指数因子に負、アブラミ指数に正の相関をもち、活性化エネルギーに対しては負の相関(例： $\alpha=10^{-3}$

、 $M_g=10^{-7}M_{\odot}/\text{yr}$ 、 $\ln(\nu [/\text{s}])=30$ 、 $n=1$ のとき $E_a=500 \text{ kJ/mol}$ で $\sim 2.6$ 年、 $E_a=100 \text{ kJ/mol}$ で $\sim 32$ 年)をもつ。850 kJ/mol程度の大きな活性化エネルギーをもつ非晶質エンスタタイト( $\text{MgSiO}_3$ )の結晶化(Kobayashi et al. in prep;  $\ln(\nu [/\text{s}])=81.0$ 、 $n=1.5$ )では、 $t_{\text{eff}}$ は円盤パラメータに依って22日から2年となる。一方、活性化エネルギーが414 kJ/mol程度の非晶質フォルステライトの結晶化(Yamamoto & Tachibana 2018;  $\ln(\nu [/\text{s}])=40.2$ 、 $n=1.5$ )では、 $t_{\text{eff}}$ は73日から8年となる。この $t_{\text{eff}}$ の違いは、活性化エネルギーが大きな反応では低温での反応進行がほぼなく、十分高温領域に到達してから効果的に反応進行することで説明できる。これら非晶質ケイ酸塩の結晶化の例では、 $t_{\text{eff}}$ は実験室で実現可能な反応時間も含み、室内実験で得た結果をそのまま円盤に応用できる円盤条件が存在しうることを示唆する。

キーワード：原始惑星系円盤、原始太陽系円盤、ダスト、モンテカルロシミュレーション

Keywords: protoplanetary disk, protosolar disk, dust, Monte Carlo simulation

# 蒸発-結晶化実験によるタイプB CAI形成における昇温過程での蒸発の影響の評価

## Experimental study of the effect of evaporation during temperature rise on type B CAI formation

\*鶴岡 靖朗<sup>1</sup>、橘 省吾<sup>1</sup>

\*Yasuaki Tsuruoka<sup>1</sup>, Shogo Tachibana<sup>1</sup>

1. 東大・院理

1. UTokyo Sci.

隕石中の難揮発性包有物 (CAI) は、太陽系で形成された最古の物質であり、原始太陽系円盤の初期進化の過程が記録されている。タイプB CAIは円盤ガス中で熔融と結晶化を経験し、その際にMgとSiが蒸発したと考えられている [1-4]。タイプB CAIは、その組織から、メリライト (ゲーレナイト ( $\text{Ca}_2\text{Al}_2\text{SiO}_7$ )-オケルマナイト ( $\text{Ca}_2\text{MgSi}_2\text{O}_7$ )) のマンテル構造を持つタイプB1とそれを持たないタイプB2の2つに分類される [e.g., 5]。低圧の水素ガス中でのCAIメルトの蒸発-結晶化実験 [6] により、水素ガス圧が1 Pa以上の場合、水素により蒸発が促進され、メルトの表面付近がMgとSiに枯渇することで、タイプB1 CAIに類似したメリライトマンテルが形成されることが示された。しかし、先行研究 [6] は、最高温度からの冷却過程の蒸発に注目しており、昇温過程で起こりうる蒸発については考慮していない。タイプB CAIの加熱メカニズムは判明しておらず、昇温と冷却のタイムスケールが同程度だった場合 [e.g., 7], 昇温時の蒸発がCAIの組成や組織に影響した可能性がある。本研究では、CAIメルトの蒸発-結晶化実験を行い、昇温時の蒸発によるメリライトマンテル形成への影響について議論した。

太陽系元素存在度からの平衡凝縮トレンド上のCAI  $\chi$  組成 [8] のメルトの蒸発-結晶化実験を、真空炉 [4, 6] を用いて行った。ガラスとスピネルからなる出発物質を、水素ガス圧1, 10 Pa下で、1100°Cから最高温度1420°Cまで20°C hr<sup>-1</sup>で昇温し、1420°Cで1時間加熱した後、1100°Cまで20°C hr<sup>-1</sup>で冷却した。昇温時の蒸発の効果を見るため、最高温度に達した直後に急冷した試料も作成した。また、先行研究 [6] と同様に、最高温度に達してから水素ガスを導入し、1時間加熱した後、20°C hr<sup>-1</sup>で冷却した試料も作成した。実験前後に試料の重量を測定し、蒸発量を決定した。走査電子顕微鏡 (SEM) と付属のエネルギー分散型X線分光法 (EDS) 装置を用いて、試料断面の組織観察と鉱物元素分析を行った。

水素ガス圧10 Pa下では、昇温時の水素ガスの有無に関わらず、メリライトマンテルが形成された。しかし、昇温時から水素を導入した試料の方がマンテルの組成変化が緩やかであった (図1)。また、昇温時から水素を導入した試料の方が水素にさらされる時間が長いにも関わらず、最高温度に達してから水素を導入した試料と蒸発量が同程度であった。最高温度に達した直後に急冷した試料には、樹枝状メリライトとガラスのほか、表面全体を覆ってはいないものの表面付近にÅk ~ 10 mol% のメリライト結晶も見られた。水素ガス圧1 Pa下では、最高温度に達してから水素を導入した試料は、メリライトが部分的に表面を覆う一方 [6], 昇温時から水素を導入した試料ではメリライトマンテルが形成された。

最高温度に達した直後に急冷した試料のÅk ~ 10 mol% のメリライトは、CAI  $\chi$  組成メルトからの析出が予測されない組成であり、昇温中のMgとSiの蒸発に伴うメルト組成変化が影響したと考えられる。昇温中のメルト組成変化や結晶成長は、メリライトの析出を促進し、マンテルの組成ゾーニングの違いや、水素ガス圧1 Pa下でのマンテル形成に寄与したと予想される。また、早期のマンテル形成はメルトからの蒸発を妨げたと考えられる。

今回、昇温中の蒸発がメルトの組成変化やメリライト結晶成長を引き起こし、メリライトマンテル形成に影響することを明らかにした。今後は、条件を系統的に変化させた実験を行い、メリライトマンテル形成に対する昇温中の蒸発の効果を理解し、加熱イベントの制約も含め、原始太陽系円盤でのCAI形成過程の解明を目指す。

す。

[1] Grossman, L. et al. (2000) *GCA* 64, 2879. [2] Richter, F. M. et al. (2002) *GCA* 66, 521. [3] Richter, F. M. et al. (2007) *GCA* 71, 5544. [4] Mendybaev, R. A. et al. (2021) *GCA* 292, 557. [5] Wark, D. A. & Lovering, J. F. (1982) *GCA* 46, 2581. [6] Kamibayashi, M. et al. (2021) *ApJ* 923, L12. [7] McNally, C. P. et al. (2014) *ApJ* 791, 62. [8] Grossman, L. et al. (2002) *GCA* 66, 145.

キーワード：難揮発性包有物、溶融、蒸発、結晶成長、原始太陽系円盤

Keywords: CAIs, melting, evaporation, crystal growth, protosolar disk

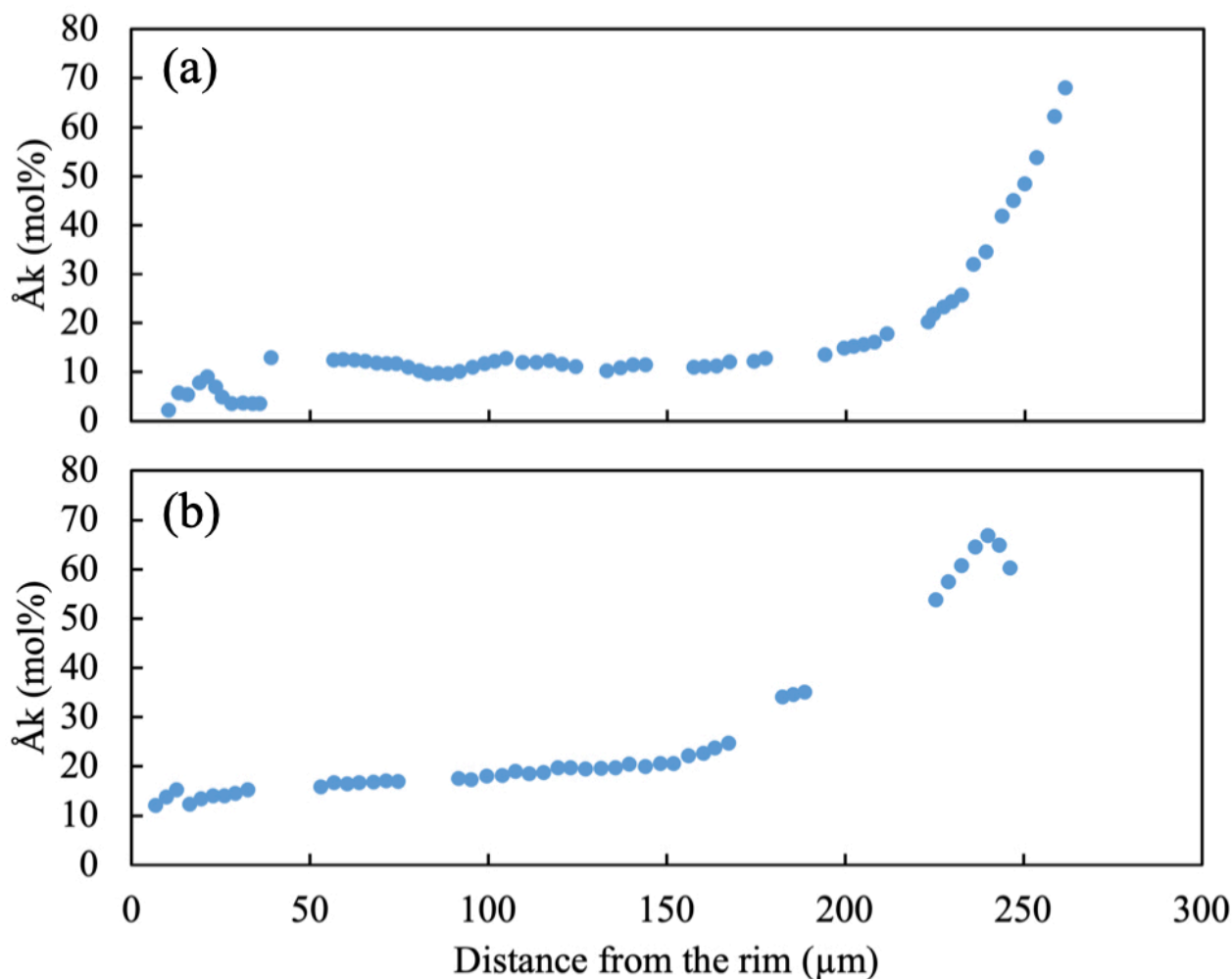


図1. メリライトマンタルの組成ゾーニング. 最高温度からの冷却過程のみ水素を導入した試料 (a) では, 組成がほぼ一定の部分が見られる一方, 昇温時から水素を導入した試料 (b) では, 試料中心に向かって緩やかにオケルマナイト (Åk) 成分の割合が上昇している.

## 揮発性物質を含んだ微惑星の衝突によるコンドリュールの形成

### Chondrule formation by collisions of planetesimals containing volatiles

\*城野 信一<sup>1</sup>

\*Sin-iti Sirono<sup>1</sup>

1. 名古屋大・環境学

1. Navoya Univ.

地球に落下してくる隕石の8割を「普通コンドライト」と呼ばれる種類が占めています。その体積の8割を「コンドリュール」と呼ばれる直径0.1-1mm程度の球体が占めます。年代を計測すると太陽系で最初の固体(CAI)が凝縮してから1-3百万年であることから、太陽系形成時に何らかの加熱イベントが発生し岩石が融解した上、何らかのメカニズムで細粒化した後に隕石母天体に落下、その後に熱変性および水質変性を受けて隕石になったものと考えられています。コンドリュールの組織から冷却速度が推定されており、10-1000 K/hrと見積もられています。第二次世界大戦直後から研究がされていますが未だに形成メカニズムが明らかになっていません。そのため、隕石中に残されている様々な記録の解釈ができていないのが現状です。形成メカニズムが明らかになれば膨大な隕石データから惑星形成過程に関する情報を取り出せるようになります。

これまでに提案されてきた形成メカニズムの中でも有力なものは「衝撃波加熱モデル」と「微惑星衝突モデル」です。前者においては、原始太陽系円盤に浮かぶダストアグリゲイトが衝撃波を通過することでガスとの摩擦によって加熱されます。後者では、惑星形成過程で必然的に発生する微惑星の相互衝突によって微惑星を溶融します。しかし両方には問題点があります。衝撃波が弱いとダストアグリゲイトは加熱されず、強いと蒸発してしまうため、衝撃波加熱モデルではコンドリュールを生成するパラメータ空間が狭いです。一方で微惑星の衝突においては、かなり高速の衝突速度が必要でありまた溶融したメルトをmmサイズまで分裂させるのが困難でした。

木星が形成されると、木星の巨大な質量によって周囲の微惑星の運動が励起されます。その結果として微惑星は高速衝突します。高速衝突した微惑星は岩石が溶融する程度まで温度が上昇します。水や有機物といった揮発性物質が微惑星に含まれていれば、温度上昇に伴って揮発性物質が急速に膨張し、岩石メルトが細かいサイズまで分裂することが可能です。ガスは膨張にエネルギーを使うため温度が低下します。ガスと接触しているメルトから熱がガスに移ることでメルトの温度も低下します。ここから冷却速度が決定されます。このプロセスの数値シミュレーションを行いました。その結果、コンドリュールのサイズは0.4-1.8mm、冷却速度は30-18,000 K/hrとなり、観測されているデータをよく説明することがわかりました。

普通コンドライト隕石は鉄の量と酸化還元度の違いでH, L, LLと分類されています。微惑星に含まれる揮発性物質が水の場合と有機物の場合とで酸化還元度が異なるため、コンドライト隕石の酸化還元度の多様性も揮発性成分の違いで説明できます。また、放射性物質の壊変によって微惑星内部が高温になっていることも考えられます。この場合金属鉄の一部は微惑星の中心へ移動してコアを形成し、衝突に関与する表面付近の鉄の量は少なくなります。これによって鉄の量の多様性も説明できます。コンドリュールの別の特徴として、KやNaといった揮発性物質が残されていること、また同位体分別を起こしていない、という点が上げられます。これらの特徴を満たすためには、コンドリュールの空間的密度が原始太陽系円盤における値よりもかなり高い必要があると言われてきました。衝突で形成されたコンドリュールの空間的密度およびガスの密度は非常に高いため、これらの特徴も自動的に満たすことができます。

キーワード：コンドリュール、微惑星、衝突  
Keywords: chondrule, planetesimal, collision

---

口頭講演

## R5：地球外物質

座長:松本 恵(東北大学)、山本 大貴(九州大学)、瀬戸 雄介(大阪公立大学)、松本 徹(京都大学)

2024年9月14日(土) 09:00 ~ 12:00 ES025 (東山キャンパス)

---

10:20 ~ 10:35

[3Lecture-301-10-6add]休憩

## コンドルール構成鉱物の化学組成から制約する真のコンドルール形成期間

## Constraining the true timescale of chondrule formation through chondrule mineral chemistry

\*福田 航平<sup>1</sup>、木多 紀子<sup>2</sup>、木村 眞<sup>3</sup>\*Kohei Fukuda<sup>1</sup>, Noriko T Kita<sup>2</sup>, Makoto Kimura<sup>3</sup>

1. 阪大・院理、2. ウィスコンシン大、3. 国立極地研究所

1. Osaka Univ. Sci., 2. UW-Madison, 3. NIPR

<sup>26</sup>Alは半減期約70万年で<sup>26</sup>Mgに壊変する短寿命放射性核種であり、コンドルールの形成年代決定に広く用いられている [1]。斜長石はAl/Mg比が比較的高く (<sup>27</sup>Al/<sup>24</sup>Mg ~25-2,000程度)、コンドルールのAl-Mg年代測定を行う上で重要な鉱物である。しかし、斜長石の化学組成・同位体比はカンラン石や輝石に比べて母天体上での二次的な熱変成作用に敏感なため、Al-Mg年代測定結果を解釈する上で変成作用の影響評価が重要となる。本研究では、コンドルールが経験した熱変成の程度を推定することを目的とし、熱変成度の異なるCVコンドライトに含まれるコンドルール中カンラン石・輝石・斜長石の元素分析を行った。将来的に、本研究結果と高精度Al-Mg年代測定法を組み合わせることで、変成による影響を取り除いた真のコンドルール形成期間を決定することを主たる目的とする。

8つのCVコンドライト [Allende (CV3.6), MIL 07002 (CV3.7), MIL 07671 (CV3.7), MIL 15381 (CV3.6), NWA 6991 (CV3), NWA 5028 (CV3), Leoville (CV3.1-3.4), RBT 04143 (CV3.6)]中に見つかった51個のコンドルールを分析した。元素分析にはウィスコンシン大学設置のCAMECA社製SX-Five FE EPMAを使用した。

カンラン石・輝石のMg# (= Mg/[Mg + Fe] molar %)の比較を行った。カンラン石は輝石に比べてFe-Mg相互拡散速度が大きいと、熱変成度の高い隕石中のコンドルールに含まれるカンラン石のMg#は、輝石に比べて低い傾向にある [2]。つまり、カンラン石と輝石のMg#を比較することで、個々のコンドルールが被った熱変成度を評価することができる。熱変成度の低いコンドライト中のコンドルールに含まれるカンラン石・輝石のMg#は互いに良い一致を示した。このことは、両鉱物が化学的に均一なメルトから晶出したことを示唆する。しかし、NWA 5028を除き、他7つのCVコンドライト中コンドルールにおけるカンラン石・輝石のMg#は一部非平衡であり、かつカンラン石のMg#は輝石に比べて系統的に低いことが確認された。熱変成度の高いコンドライト(CV3.6-3.7)中のコンドルールは、熱変成度の比較的低いLeoville (CV3.1-3.4) に比べて高い非平衡度を示した。このことから、カンラン石・輝石のMg#の非平衡度合いは、母天体上における熱変成の影響を反映していると解釈した。

斜長石のMgO量、An# (= [Ca]/ [Na + K + Ca] molar %)、シリカ過剰 ([Si<sub>4</sub>O<sub>8</sub>])の度合いを評価することで、斜長石の変成度の推定を試みた。シリカ過剰は月玄武岩の斜長石に見出されており [3]、斜長石が高温条件下 (1200-1500度, 1気圧下) で結晶化することでシリカ過剰が顕著になることが実験的に示されている [4]。したがって、コンドルール中の斜長石に記録されたシリカ過剰は、コンドルール形成時の高温段階の情報を斜長石がそのまま保持している証拠となり得る [5]。NWA 5028およびRBT 04143の一部のコンドルールを除き、ほとんどのコンドルールはシリカ過剰を示さなかった。NWA 5028はサブタイプの分類がなされていないものの、当初CR2に分類された隕石であり、CVコンドライトの中でも変成度の低いサンプルである。RBT 04143は角礫岩であり、一部熱変成度の低いクラストの存在が明らかとなっている [6]。本研究の結果も、RBT 04143には熱変成を免れた始原的なコンドルールが含まれていることを示唆しており、今後これらのコンドルールに対しAl-Mg年代測定を実施することでCVコンドライトに含まれるコンドルールの形成期間を制約できると期待される。NWA 5028およびRBT 04143以外のCVコンドライト中のコンドルールはシリカ過剰を示さなかったため、コンドルール形成時に記録されたシリカ過剰は、母天体上での熱変成によって失われたと解釈できる。このことは、カンラン石・輝石間に見られたMg#非平衡度と熱変成度の関係とも整合的である。

参考文献: [1] Kita et al. (2000) GCA 64, 3913-3922. [2] Kiumura and Ikeda (1997) Antarct. Meteorites 8, 123-138. [3] Dymek et al. (1975) LPSC 6<sup>th</sup>, 49-77. [4] Longhi & Hays (1979) Am. J. Sci. 279, 876-890. [5] Tenner et al. (2019) GCA 260, 133-160. [6] Ishida et al. (2012) Polar Sci. 6, 252-262.

キーワード：コンドルール、Al-Mg年代、斜長石、シリカ過剰

Keywords: chondrule, Al-Mg chronology, plagioclase, excess Si

## 放射状輝石コンドリュールの形成プロセス：浮遊させたメルトの結晶化実験に基づく制約

### Reproduction Experiments of Radial Pyroxene Chondrules Using a Gas-jet Levitation System under Reducing Conditions

\*渡邊 華奈<sup>1</sup>、中村 智樹<sup>1</sup>、森田 朋代<sup>1</sup>

\*Kana Watanabe<sup>1</sup>, Tomoki Nakamura<sup>1</sup>, Tomoyo Morita<sup>1</sup>

1. 東北大・院理

1. Tohoku Univ. Sci.

#### 【目的】

コンドリュールは隕石中に含まれる数 $\mu\text{m}$ ～数 $\text{cm}$ の球状粒子である(図1(a))。この粒子は主にかんらん石や輝石等のケイ酸塩結晶と、その隙間のメソスタシスガラス・鉄ニッケル合金や鉄硫化物から成り、特有の結晶形態を示す。コンドリュールは、原始太陽系星雲中で前駆物質が加熱され、熔融・冷却を経て形成された。コンドリュールの結晶形態・化学/同位体組成等は形成時の何らかの条件を反映しているが(e.g., Jones, 2012)、それら条件は未解明である。本研究では、輝石が放射状に伸長したコンドリュール(Radial Pyroxene (RP))の浮遊結晶化実験を行った。実験でRPコンドリュールの結晶形態および結晶とガラスの化学組成を再現し、形成時の条件を制約することを目指した。

#### 【手法】

本研究ではガスジェット浮遊装置を用いた。この装置では、出発物質をArガス又はAr-H<sub>2</sub>ガスで浮遊させ、CO<sub>2</sub>レーザーを照射して加熱・冷却を行う。酸化還元度を制御したチャンバーを用い、原始太陽系星雲中と同等の酸素フガシテ下(Villeneuve et al., 2015)で実験を行った。まず浮遊状態の出発物質を約1900°C程度で全熔融させ、冷却した。冷却途中の任意の温度でseedingを行いメルトを結晶化させた。Seedingとは、星雲中のダストを想定した粉末をメルトに衝突させる操作である(Nagashima et al., 2008)。その後seedingした温度で一定時間(6～7200秒間)温度保持し、急冷した。出発物質には、天然RPコンドリュールの主要元素の酸化物粉末(Na<sub>2</sub>O, MgO, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, SiO<sub>2</sub>, CaO, FeO)を混合させ、平均的な天然物のバルク組成(Dodd, 1978; Lux et al., 1981; Nagahara, 1981)となるよう調合したものをを用いた。

さらに、計31個の実験合成試料と計14個の天然RPコンドリュールについて、FE-SEM/EDS、FE-EPMA/WDSによる観察・分析を行った。使用したコンドライト隕石(H3.2, LL3.2, CO3.0)は国立極地研究所からの提供を受けた。

#### 【結果】

浮遊状態のメルトにseed粉末が接触すると、接触点から即座に結晶が成長した。実験合成試料には、試料表面上の数点から放射状に伸長した低カルシウム輝石が確認された(図1(b))。この放射状輝石は、天然のRPコンドリュールの典型的な特徴(Gooding & Keil, 1981)と一致していた。また結晶化後の温度保持時間が500秒以上と長い試料にのみ、メソスタシスガラス中に金属鉄の粒子が見られ、天然RPコンドリュールにも類似した鉄ニッケル合金の粒子や鉄硫化物の粒子が確認された(図1(c), (d))。輝石結晶とメソスタシスガラス間の鉄分配係数 $D_{\text{Fe}}$  ( $D_{\text{Fe}} = \text{Fe mol}\%_{\text{pyroxene}} / \text{Fe mol}\%_{\text{mesostasis}}$ )について、天然RPコンドリュールの $D_{\text{Fe}}$ の平均は2.7と非常に高く、メソスタシスガラスよりも結晶の方がはるかに鉄に富んでいた。それに対し実験試料では、結晶化後の温度保持時間が150秒以下と短い時、低い $D_{\text{Fe}}$ を示した(平均0.4)。一方で温度保持時間が1000秒以上と長い場合 $D_{\text{Fe}}$ は1に近付き、いくつかの実験試料では1を超えていた。本結果から、結晶化後の温度保持時間が長い試料が、天然のRPコンドリュールに近い $D_{\text{Fe}}$ を示すことが確認された。

## 【考察】

本結果は、温度保持時間が長い実験試料と天然RPコンドリュールが同じ条件を経たことを示している。温度保持時間が長い実験試料のメソスタシスガラスには、金属鉄の粒子が晶出しており、これら粒子は温度保持時間が短い試料中には確認されなかった。出発物質中の鉄はFeOとして存在するため、この結果は結晶成長後に残液中(固化後メソスタシスガラスになる)に溶けたFeOが還元され、金属鉄となって晶出したことを示している。残液中のFeOが還元され金属鉄中に取り込まれると、残液中のFeOが取り除かれFeO濃度が低下する。その結果輝石結晶に対して残液中のFeO濃度が低くなり、 $D_{Fe}$ が高くなったと考えられる。天然RPコンドリュールの形成時にも同様の反応が起こった可能性がある。天然RPコンドリュールのメソスタシスガラス中には鉄ニッケル合金の粒子・鉄硫化物の粒子が確認されることから、輝石結晶の成長後に残液中に溶けたFeOが還元または硫化されて残液中からFeOが取り除かれ、高い $D_{Fe}$ を示すと考えられる。これはRPコンドリュールの $D_{Fe}$ が、コンドリュール形成時の酸化還元度・冷却速度を制約する指標となることを示す成果である。なお本成果はWatanabe et al. (2024), *The Astrophysical Journal*で発表済みである。

キーワード：コンドリュール、輝石、浮遊実験、分配係数、還元反応

Keywords: chondrule, pyroxene, levitation experiment, partition coefficients, reduction reaction

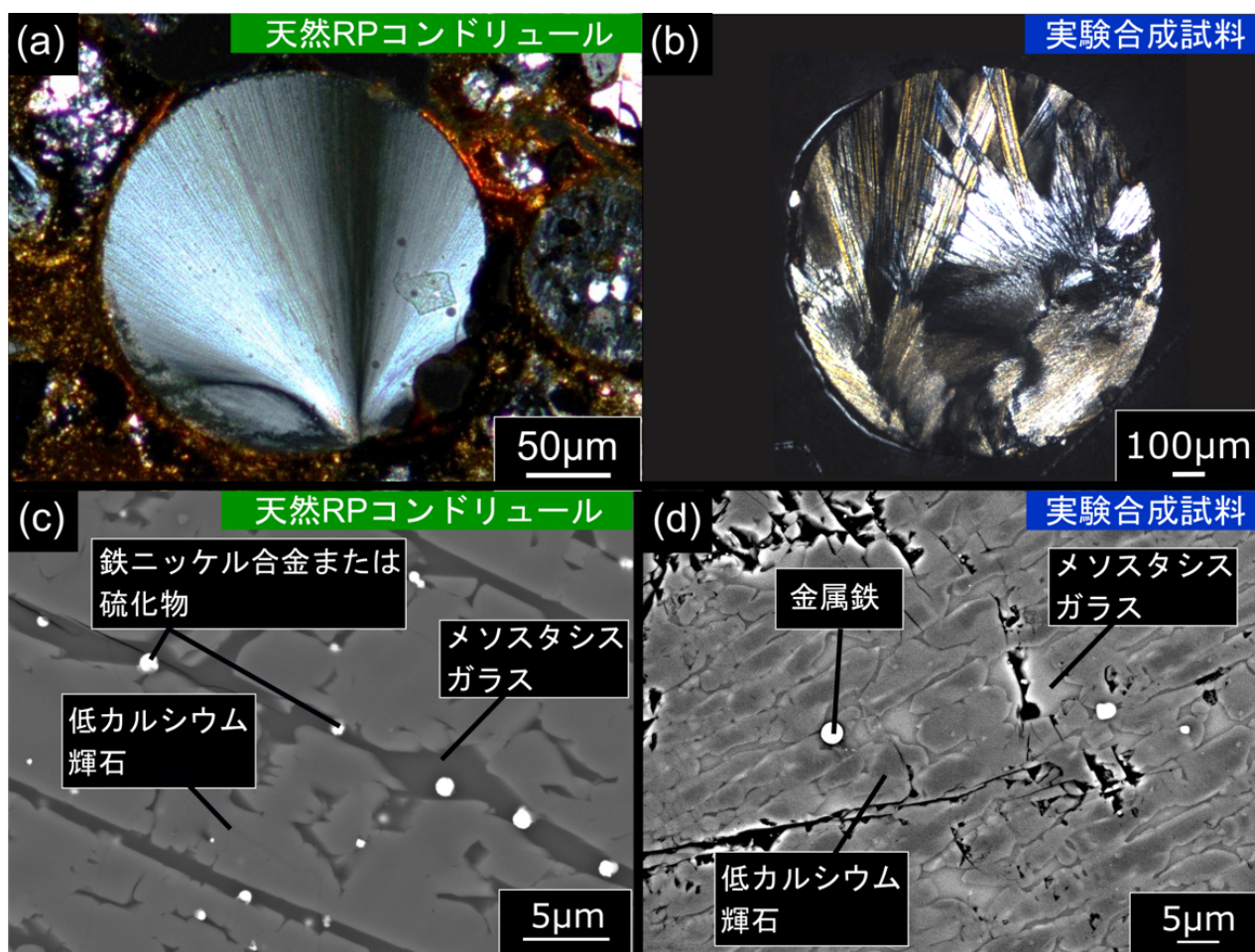


図1. 天然RPコンドリュールと実験合成試料の比較。(a)-(b)偏光顕微鏡による観察像(クロスニコル像)、(c)-(d)SEM-BSE像。(d)の実験合成試料は1536°Cで3600秒間温度保持した。

## ポイキリティック・シャーゴットイト火星隕石の岩石組織・鉱物組成多様性から読み解く母岩体層状構造の推定

### Stratigraphy of poikilitic shergottite parent body(ies) as deduced from their textural and mineral compositional diversities

\*山崎 奏次郎<sup>1</sup>、山口 亮<sup>2</sup>、三河内 岳<sup>3</sup>

\*Sojiro Yamazaki<sup>1</sup>, Akira Yamaguchi<sup>2</sup>, Takashi Mikouchi<sup>3</sup>

1. 東大・院理、2. 国立極地研、3. 東大・総研博

1. Fac. Sci., Univ. Tokyo, 2. Natl. Inst. Polar Res., 3. Univ. Museum, Univ. Tokyo

はじめに：シャーゴットイトは岩石学的特徴から、カンラン石フィリック、玄武岩質、ポイキリティックの3タイプに分類され、それぞれ異なる分化度のマグマ、もしくは結晶化過程を経て形成されたと考えられている(e.g., Udry+ 2020)。これらの中で、ポイキリティック・シャーゴットイト(P-She)は、数mmサイズの輝石オイコクリストが、小さなカンラン石チャダクリストを取り囲む特徴的なポイキリティック組織を示す。輝石オイコクリストはコアが低Ca輝石で、ピジョン輝石を経て普通輝石のリム部分からなり、最初に深部マグマ溜まりで形成され、最終的にこれらを含むマグマが地表付近に上昇・貫入し、固化することでP-Sheが形成されたと考えられている(e.g., Rahib+ 2019)。しかし、地表付近でのマグマ最終結晶化過程についてはあまり議論されていない。本研究では、近年、南極やサハラ砂漠で数多くのP-Sheが発見され、岩石学・地球化学的な多様性が明らかになってきていることから、これらP-Sheの岩石組織・鉱物組成を分析・比較することで、火星地殻内に普遍的に存在していると考えられるP-She母岩体の最終結晶化過程に制約を与えることを試みた。

試料及び分析手法：本研究では、4個のenriched P-She (RBT 04261, NWA 4468, NWA 13227, NWA 14127)、5個のintermediate P-She (NWA 12241, NWA 13250, NWA 13366, NWA 13369, ALH 77005)、現在唯一のdepleted P-SheであるAsuka 12325の薄片試料について、EPMA (JEOL JXA-8900L, JXA-8200)で元素マップの取得及び鉱物組成の分析を行なった。各鉱物相のモード組成と、非ポイキリティック組織中のカンラン石の結晶サイズ分布(CSD)分析については、取得した元素マップからImage Jを用いて解析した。

結果：合計9つのP-Sheの分析の結果、輝石の鉱物組成については試料間に大きな差は見られず、コア部分が $En_{69\pm 8}Wo_{12\pm 7}$ 、リム部分は $En_{51\pm 5}Wo_{35\pm 5}$ 程度であった。マスケリナイト(斜長石衝撃変成ガラス)についても、 $Ab_{35}Or_1$ - $Ab_{55}Or_5$ と類似した組成を示すものが多かったが、NWA 14127は $Ab_{35}Or_1$ - $Ab_{45}Or_{10}$ とKに富むトレンドを示した。マスケリナイトは、ポイキリティック組織の外側の非ポイキリティック組織にのみ存在するが、そのモード組成は、斜長石が結晶化後期に晶出することから、マグマ最終結晶化時の他の鉱物の集積度合いを反映していると考えられる。試料の浅部貫入時の冷却速度については、輝石オイコクリストのオーザイトリムに見られるTi拡散プロファイルから、輝石温度計より初期温度を1200℃として冷却速度を見積もった(Cherniak 2012)。その結果、NWA 12241など、冷却速度が約0.17℃/年、CSD分析によるマグマの滞留時間が約120日と、比較的ゆっくり冷却されたと考えられる試料ほどカンラン石組成幅が $Fo_{62-70}$ と狭く、一方でNWA 13227やNWA 14127など冷却速度が約1℃/年、マグマの滞留時間が約40日と比較的速く冷却されたとされる試料については $Fo_{40-70}$ とカンラン石の組成幅が広がっていた。また、マグマの冷却速度と非ポイキリティック組織中のマスケリナイトのモード組成には負の相関が見られた。P-Sheの貫入マグマ岩体の熟進化を、ポイキリティック組織の輝石組成から初期温度を1200℃、固化温度を1000℃とし、熱拡散方程式を用いて見積もった結果、約500mの母岩体サイズが得られた。

考察と結論：冷却速度が比較的遅いと考えられるNWA 12241については、非ポイキリティック組織でのカンラン石の結晶サイズが比較的大きく、Mg-Fe組成幅も狭いことから、深部マグマ溜まりから地表付近に貫入したマグマが、岩体の中心付近で他の鉱物を集積させながらゆっくり冷却されて形成されたと考えられる。一方で、冷却速度が比較的速いと推定されるNWA 14127やNWA 13227については、カンラン石の結晶サイズが

比較的小さく、組成幅も広いことから、貫入マグマが貫入岩体の岩壁に近い部分で集積が進む前に急冷されて固化した可能性がある。以上のように、本研究から、P-Sheの岩石組織・鉱物組成に多様性を与える要因は、同一貫入岩体内での冷却速度及び、集積深度の違いであることが示唆され、ポイキリティック組織を含む、同様の層状構造を持つP-She母岩体が、火星地殻内に普遍的に存在している可能性があることが明らかになった。

キーワード：ポイキリティック シャーゴツタイト、カンラン石、輝石、貫入、冷却速度

Keywords: Poikilitic shergottite, Olivine, Pyroxene, Intrusion, Cooling rate

## 火星隕石Asuka 12325のTi-Crに富むスピネルの高圧相転移

### High pressure phase transition of Ti-Cr-rich spinel in Asuka 12325 Martian meteorite

\*竹之内 惇志<sup>1</sup>、伊神 洋平<sup>2</sup>、三河内 岳<sup>3</sup>、三宅 亮<sup>2</sup>、山口 亮<sup>4</sup>

\*Atsushi TAKENOUCHI<sup>1</sup>, Yohei Igami<sup>2</sup>, Takashi Mikouchi<sup>3</sup>, Akira Miyake<sup>2</sup>, Akira Yamaguchi<sup>4</sup>

1. 京大・総博、2. 京大・院理、3. 東大・総研博、4. 極地研

1. The Kyoto Univ. Museum, 2. Kyoto Univ. Sci., 3. The Univ. Museum, The Univ. of Tokyo, 4. NIPR

高圧相の研究は隕石の衝撃変成の理解や地球深部の状態を探る上で重要である。隕石ではこれまで様々な鉱物の高圧相が発見されているが、本研究ではTiやCrに富むスピネルであるクロマイト-ウルボスピネル固溶体の相転移に着目する。クロマイトには約16~18 GPa以上で高圧相が2種類存在し、約1300 °C以上の高温側ではxieite (空間群Cmcm)、それ以下ではchenmingite (空間群Pnma) が安定である (Ma et al. 2019)。ウルボスピネルは4~16 GPaではFeTiO<sub>3</sub>とFeOに分解するが、それ以上の高圧ではtschaunerite (空間群Cmcm) になることが知られている (Ma et al. 2021)。いずれも火星隕石中の衝撃溶融領域の近くで発見・記載された典型的な高温高圧鉱物である。近年、火星隕石Asuka 12325 (A 12325) を観察していたところ、TiとCrに富むスピネル中に、イルメナイトの離溶とは異なる、高圧相転移と見られるラメラ状の構造が見られた (Takenouchi et al. 2023)。今回はその詳細な観察と相同定を行い、TiとCrに富むスピネルの高圧相転移条件について報告する。

観察した試料は国立極地研究所より貸与されたA 12325の薄片と厚片1枚ずつを用いた。走査型電子顕微鏡 (SEM) による観察と電子後方散乱回折 (EBSD) 分析は国立極地研究所のSEM (JEOL JSM-7100F) を用いた。また、元素組成分析では国立極地研究所の電子プローブマイクロアナライザー (EPMA, JXA-8200) を用いた。鉄の価数測定のために高エネルギー加速器研究機構BL-4Aにて放射光X線吸収端近傍構造 (SR-XANES) 分析を行った。集束イオンビーム (FIB) による切り出しと透過型電子顕微鏡 (TEM) による観察には、京都大学大学院理学研究科のFIB-SEM (Helios NanoLab G3 CX) とTEM (JEM-2100F) を用いた。

EPMAによる組成分析では、A 12325中のスピネルはCr<sub>2</sub>O<sub>3</sub>量が18~57 wt%、TiO<sub>2</sub>が1~18 wt%と幅広い組成を示した。各分析点では化学量論数が酸素24に対して0.5ほどずれていたため、FeOの一部をFe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>に置き換えることで化学量論数を合わせる操作を行った。その結果、最もTiに富むスピネルにおいて約8 wt%ほどのFe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>が含まれる計算となり、その平均的な組成は(Mg<sub>0.18</sub>Fe<sup>2+</sup><sub>0.80</sub>Mn<sub>0.02</sub>)<sub>Σ1</sub>(Cr<sub>0.66</sub>Al<sub>0.21</sub>Fe<sup>2+</sup><sub>0.45</sub>Fe<sup>3+</sup><sub>0.22</sub>Ti<sub>0.46</sub>)<sub>Σ2</sub>O<sub>4</sub>であった。観察したスピネルは命名規則に従うとすべてTiに富むクロマイトであった。XANESによる鉄の価数測定では、今のところ有意な三価鉄は検出できていないが、配位数の差による強度変化も考慮した詳細な解析が必要と考えられる。SEM観察では、Tiに富むクロマイトにのみラメラ状の構造が見られた。ラメラは衝撃溶融脈の分布とは関連せず、脈から離れた場所でも広く観察された。EBSD分析によると、ラメラ部はクロマイトとは異なりchenmingiteに近い菊池パターンを示した。FIBで切り出してTEMで観察したところ、明瞭なラメラ状の組織が確認され、その回折像は消滅則を考慮するとやはりchenmingiteで指数付けされた。ラメラは特定の結晶方位に沿って形成しており、(111)<sub>chr</sub>//(1-11)<sub>chen</sub>等の方位関係が見られた。ラメラの内部は結晶方位の概ね揃った細粒な粒子の集合であったが、一部の回折スポットの強度が弱くなる雁行脈状の領域がラメラ内部に存在していた。

A 12325はこれまでの研究で、衝撃圧力が17-22 GPa程度と推定されている。その場合、溶融脈から離れた場所での上昇温度はおおよそ250 °Cに満たない。つまり、今回のTiに富むchenmingiteは17-22 GPa、250 °C以下という条件で相転移していた。従来chenmingiteへの相転移は速度論的な制約で衝撃溶融脈から数マイクロン離れた高温領域 (~1350 °C) でのみ見つけていたが、Tiが入ることで相転移が容易に起こせる可能性が示唆された。

通常高圧鉱物から見積もられる衝撃圧力は下限値のみである。今回のTiに富むchenmingiteは、相転移の

速度論的な制約が弱く、よりピーク圧力に近い衝撃変成条件を反映できる可能性がある。また、衝撃溶融脈の様な局所的な組織がなくても衝撃圧を見積もることが可能なため、試料の少ない火星隕石の衝撃変成度を見積もる指標として非常に有用である。よりTiに富む場合（Crに富むウルボスピネル）でも同様の高圧相転移が見られるかは今のところ不明だが、今後化学組成と高圧相転移条件の関係を明らかにしていく。

キーワード：クロマイト、火星隕石、衝撃変成作用、高圧相転移

Keywords: Chromite, Martian meteorite, shock metamorphism, high-pressure phase transition

## シリカ鉱物を用いたメソシデライトの熱史推定

### Estimation of thermal history using silica minerals in mesosiderites

\*大野 遼<sup>1</sup>、竹之内 惇志<sup>2</sup>、三河内 岳<sup>3</sup>、山口 亮<sup>4</sup>、杉浦 直治<sup>5</sup>、三宅 亮<sup>1</sup>

\*Haruka OONO<sup>1</sup>, Atsushi Takenouchi<sup>2</sup>, Takashi Mikouchi<sup>3</sup>, Akira Yamaguchi<sup>4</sup>, Naoji Sugiura<sup>5</sup>, Akira Miyake<sup>1</sup>

1. 京大・理、2. 京大博、3. 東大博、4. 極地研、5. 千葉工大

1. Kyoto Univ., 2. Museum of Kyoto Univ., 3. Museum of Univ. Tokyo, 4. NiPR, 5. Chiba Int. Tech.

はじめに：我々はこれまでシリカ鉱物が隕石の特に400°C以下の低温での冷却速度を見積もる上で有用である可能性を示した(Ono+ 2021)。例えば、シリカ鉱物はメルトから最初にクリストバライト (Crs) として晶出した場合、冷却の過程で、その冷却速度の違いにより、石英やトリディマイトに相転移すると示唆した。この場合、石英に相転移するよりもトリディマイトに相転移するほうが遅い冷却速度を経験していることを示し、その時のトリディマイトは、400°C以下における冷却速度の違いによって擬直方晶系トリディマイト (PO) と単斜晶系トリディマイト (MC) に分けられるとしている。しかし、POやMCに相転移する際に期待される冷却速度は $\sim 10\sim 4$  °C/yrと非常に遅いため、実験での定量的な推定は困難である。そこで本研究では、シリカ鉱物に加え、メソシデライトは、これらに加えて、800-1000°C程度での冷却速度を推定可能な輝石も含まれている。そのため、Fe-Niメタルと輝石が示す冷却速度と存在するシリカ鉱物の相や形態を比較することで、ユークライトと同様にメソシデライトの熱史を推定することができると考えた。結果：今回は3つの試料 (ALH-77219 (1B)、NWA 2924 (3A)、Asuka- (A) 881154 (1A)) の観察および分析を行なった。それぞれの試料に含まれているシリカ鉱物をSEM (JEOL JSM-7100; JSM-7001F) で観察し、相同定は顕微ラマン分光計 (JASCO NRS-1000) を用いて行なった。メソシデライトは鉱物学および再結晶化度合いによって、それぞれA~Cおよび1~4のサブタイプに分類されており (Hewins, 1984; 1988)、各試料のサブタイプは上述括弧内に示している。全ての試料に共通してMC中にラメラ状のPOが存在していた。その他に、NWA 2924ではCrsが存在しており、“Fish-scale” と呼ばれる割れ目が顕著に見られ、稀にPOと共存していた。A 881154では、石英がMCおよびラメラ状POと共存していたが、MCは単体でも存在していた。考察：今回の結果では、再結晶化度合いが高いタイプ3に分類したNWA 2924にCrsが見られ、タイプ1の両試料にはCrsは存在せず、MCとPOが見られた。メソシデライトは形成過程が複雑であるため、その分類においても形成過程の複雑さが反映されていると指摘されている (Zachen, 2024)。本研究の結果においても、分類の複雑さが現れていると考えられ、再結晶化度合いとシリカ鉱物の組み合わせについては、慎重に議論すべきである。また、NWA 2924中にCrsとPOが共存している様子が確認された。これは、Crsが部分的にトリディマイトに相転移した結果であると考えられる。同じ組み合わせのシリカ相は、UngroupedのエコンドライトであるErg Chech 002 (EC002) 隕石中でも報告されており、その冷却速度は輝石の離溶ラメラを用いて $\sim 1000\sim 1200$ °Cにおいて $3\sim 3$ °C/day程度と推定されている (e.g., Barrat et al. 2021)。このことから、NWA 2924はEC002と同様に $3\sim 3$ °C/day程度の冷却速度を経験したと考えられる。一方で、NWA 2924にはPOラメラを持つMCも見つかっており、これは集積岩ユークライトのMoamaで類似したものが見つかっている(Ono+ 2019)。Moamaは輝石の離溶ラメラから冷却速度が $\sim 800\sim 900$ °Cにおいて $10\sim 4$ °C/yr程度と見積もられており、先のCrsとPOの組み合わせよりも非常に遅い冷却を経験したことになる。以上のことから、NWA2924は母天体の表層付近と深部の物質が混合した隕石であると考えられる。先行研究では、メソシデライトは母天体上で一度破砕された物質が、地殻物質と混合して形成されたと報告されており(Haba+ 2019)、NWA2924ではそれと矛盾しない熱履歴が推測された。まとめ：本研究では、今後は、定量的な見積もりを行うため、輝石の離溶ラメラや化学的ゾーニングおよびFe-Niメタルから冷却速度を推定していく予定である。また、再結晶化度合いとシリカ鉱物の組み合わせにおいても、これまでの分類と比較しながら慎重に検討して議論を行っていきたいと考えている。

キーワード：メソシデライト、シリカ鉱物、トリディマイト、クリストバライト、隕石

Keywords: Mesosiderite, Silica minerals, Tridymite, Cristobalite, Meteorites