

隕石中の難揮発性包有物の形成速度論に基づく

太陽系最初期の物理化学環境解析

Physicochemical analysis of early solar system based on formation kinetics of refractory inclusions of meteorites

課題番号：16H06349

根本 尚義（YURIMOTO, HISAYOSHI）

北海道大学・理学研究院・教授



研究の概要（4行以内）

太陽系形成の最初期の高温プロセスは、原始星や原始惑星系円盤の天文観測でも観測されておらず、その物理化学環境はいまだにはっきりとしない。本研究では、難揮発性包有物の同位体岩石学・鉱物学的研究に、室内実験による難揮発性包有物の再現実験を組み合わせ、太陽系最初期の高温プロセスの物理化学環境を定量的に制約する。

研究分野：数物系科学

キーワード：地球化学、宇宙化学、隕石、太陽系、原始惑星系

1. 研究開始当初の背景

太陽系形成の最初期に内側太陽系で高温ガスからの固体凝縮プロセスや加熱による固体溶融プロセスがあったことは、始源的隕石中の難揮発性包有物（CAI や AOA）の存在から明らかである。惑星材料物質が経験したこの高温プロセスは、原始星や原始惑星系円盤の天文観測でも観測されておらず、その物理化学環境はいまだにはっきりとしない。

2. 研究の目的

本研究では、難揮発性包有物の同位体岩石学・鉱物学的研究に、室内実験による難揮発性包有物の再現実験を組み合わせ、太陽系最初期の高温プロセスの物理化学環境を定量的に制約することを目的とする。特に本研究により、現在全く決定されておらず、仮定に基づき考察されてきた原始惑星系円盤内縁領域の圧力条件、水蒸気分圧とガス/ダスト比が初めて決定できることが期待される。

3. 研究の方法

初期太陽系条件を再現する実験を考案し、CAI 溶融時の酸素同位体交換速度、CAI 鉱物メリライトの蒸発速度、AOA 形成を制約するためのエンスタタイト形成速度、金属鉄均質核形成速度を決定する。実験試料と炭素質コンドライト中の CAI, AOA 両者の組織、元素・酸素同位体分布を、同位体顕微鏡を中心とする分析システムで詳細解析し、速度論データと融合し、初期太陽系での CAI, AOA, 金属鉄と続く高温ガスからの物質形成が起こった場の温度圧力条件およびその時間変

化（初期太陽系高温史）を定量的に制約する。特筆すべきところは、実験室の模擬難揮発性包有物をミクロンオーダーの同位体分布様式により評価し、太陽系最初期の物理化学環境を求める方法である。

4. これまでの成果

CAI 組成メルトの結晶化実験・酸素同位体交換実験 低水蒸気圧・高温での CAI 模擬物質の溶融・結晶化実験をおこなうための実験装置（赤外線集光加熱真空炉）として、石英ガラス管を真空チャンバーとし、外部から赤外線集光加熱機構で加熱する装置を考案・作成した（図 1）。白金線を用い、CAI 組成のガラスを石英ガラス真空チャンバー内に吊し、外部から赤外線集光加熱装置で加熱する。この方式では金属ヒーターを用いるようなヒーターからの汚染、H₂O 含有ガスによるヒーター損傷の可能性がない。¹⁸O に濃集した H₂O を入れた定温槽内を経由した水素ガスを、チャンバー内に一定流量で導入し、バタフライバルブで調整する排気速度とのバランスにより、チャンバー内に初期太陽系円盤条件に近い一定圧力（100～0.1 Pa）環境を定常的につくりだすシステムの製作に成功した。装置内導入ガスの組成を分析するため、差動排気四重極型質量分析システムが設置されている。完成したシステムを用い、模擬 CAI メルトと水蒸気との同位体交換実験をおこなった。生成物の組織観察、急冷メルトと晶出結晶の組成分析、結晶方位解析を FE-SEM-EDS-EBSD システムを用いておこなった。生成物の酸素同位体分布は同位体顕

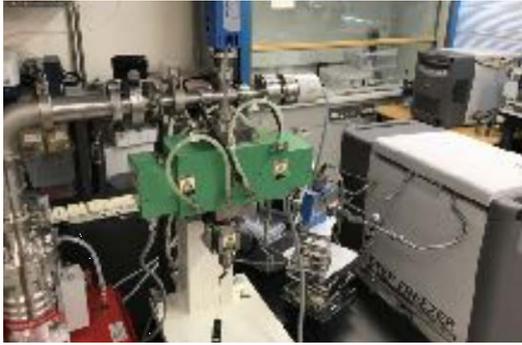


図1 製作した酸素同位体交換実験加熱炉

微鏡を用いて分析した。

決定した酸素同位体交換凝縮係数より、模擬 CAI メルトと水蒸気との酸素同位体交換反応は、高水蒸気圧条件ではその律速過程がメルト中での酸素自己拡散、低水蒸気圧条件ではメルトへの水蒸気の供給によることを明らかにした。天然 CAI の鉱物間の酸素同位体多様性と比較し、CAI メルトはメリライト結晶化温度より高温での加熱時間が 10 日以上であったことを初めて実験的に明らかにした (山本大貴 博士論文 2019; Yamamoto et al., in prep.)。本研究の中で、CAI メルト中での酸素の自己拡散係数の決定にも成功した。これらの結果は、初期太陽系円盤の圧力条件が 10^{-4} bar 程度であったことを示唆する。

太陽系最古の物質 CAI の形成過程を時間刻みの分解能で決定する Allende 隕石 (CV3) 中の溶融 CAI TS-34 は、初期の溶融メルト (>1820 K) から ^{16}O に富むスピネルが晶出 (1820-1670 K) して固結後、再溶融 (1670 K) し、そのメルトからメリライト (1670-1400 K)、単射輝石 (1500-1300 K)、斜長石 (1480-1390 K) の順に結晶化した。晶出鉱物の酸素同位体組成は共存していたメルトの酸素同位体組成と等しい。このメルトの酸素同位体組成の変動を晶出鉱物の酸素同位体分布の解析により、時間刻みに CAI 形成過程を決定する方法を確立した。TS-34 を作ったメルトは、時間とともに、 ^{16}O に富む組成 (1820 K) から ^{16}O に乏しい組成 (1670 K) に変化し、再び ^{16}O に富む組成 (1320 K) に戻った。この時、 ^{16}O に乏しい組成から ^{16}O に富む組成に戻るのに要する時間は 2 週間程度であることがわかった (Kawasaki et al., 2018)。

Vigarano (CV3) 隕石中の CAI V2-01 はメリライトを主要構成鉱物とし、高温ガスから凝縮でつくられた。この太陽組成ガスが 1400 K ならば、原始太陽系星雲ガスの圧力は、この CAI 形成中に 3×10^{-4} bar から 1×10^{-4} bar に減少したことを示す。この時、酸素同位体組成が ^{16}O に乏しい組成から ^{16}O に富む組成に変化し、 $^{25}\text{Mg}/^{24}\text{Mg}$ 比も変化した

(Kawasaki et al., 2017)。また、短寿命核種である ^{26}Al を用いた年代測定により、CAI は太陽系開闢期 (45 億 67 百万年前) の 20 万年間の間に形成されていることが明らかになった。 (Kawasaki et al., 2019)。

5. 今後の計画

今後は、これまでの研究 (CAI 組成メルトの結晶化実験・酸素同位体交換実験、非晶質ケイ酸塩の結晶化実験・酸素同位体交換実験、CAI の鉱物学岩石学・酸素同位体分布、メリライトの蒸発実験) を継続発展させるとともに、初期太陽系円盤中の AOA 形成場と金属鉄形成場の温度・圧力推定とキネティクスを決定に取り組む。そして、全ての実験で求めた速度論データと隕石の分析結果を融合し、太陽系開闢時の高温プロセスの物理化学環境を定量的に制約し、太陽系初期物質進化環境の初期条件を明確化する。そして、太陽系形成年代 45 億 67 百万年という時代の天体物理的描像の具体化に挑む。

6. これまでの発表論文等 (受賞等も含む)

Kawasaki, N., Park, C., Sakamoto, N., Park, S. Y., Kim, H. N., Kuroda, M. and Yurimoto, H. (2019) Variations in initial $^{26}\text{Al}/^{27}\text{Al}$ ratios among fluffy Type A Ca-Al-rich inclusions from reduced CV chondrites. *Earth Planet. Sci. Lett.* **511**, 25-35.

Yamamoto, D., Kuroda, M., Tachibana, S., Sakamoto, N. and Yurimoto, H. (2018) Oxygen isotopic exchange between amorphous silicate and water vapor and its implications for oxygen isotopic evolution in the early solar system. *Astrophys. J.* **865**, 98.

Yamamoto D. and Tachibana S. (2018) Water vapor pressure dependence of crystallization kinetics of amorphous forsterite. *ACS Earth Space Chem.* **2**, 778-786.

Kawasaki, N., Simon, S. B., Grossman, L., Sakamoto, N. and Yurimoto, H. (2018) Crystal growth and disequilibrium distribution of oxygen isotopes in an igneous Ca-Al-rich inclusion from the Allende carbonaceous chondrite. *Geochim. Cosmochim. Acta* **221**, 318-341.

Takigawa A., Kamizuka T., Tachibana S. and Yamamura I. (2017) Dust formation and wind acceleration around the aluminum oxide-rich AGB star W Hydrae. *Science Advances* **3**, eaao2149.

7. ホームページ等

<http://vigarano.ep.sci.hokudai.ac.jp/>