

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和 6 年 5 月 29 日現在

機関番号：17102

研究種目：若手研究

研究期間：2021～2023

課題番号：21K13986

研究課題名(和文) 太陽系始原的固体物質の酸素同位体進化をもたらした原始太陽系円盤の物理化学条件

研究課題名(英文) Physicochemical conditions of the protosolar disk yielding oxygen isotopic evolution of primitive solar system solid materials

研究代表者

山本 大貴 (Yamamoto, Daiki)

九州大学・理学研究院・助教

研究者番号：00846868

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,400,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、原始太陽系円盤の物理化学条件の解明のため、非晶質ケイ酸塩や難揮発性包有物(CAI)メルトとCOガスとの酸素同位体交換反応や速度を室内実験から初めて検証した。その結果、非晶質ケイ酸塩に関しては、非晶質ケイ酸塩が全体の酸素同位体平衡を促進する触媒となり、太陽系の多くのケイ酸塩粒子が定常降着円盤中で-600-700 Kの温度を経験したことがわかった。CAIメルトに関しては、全体の同位体交換反応速度はCAIメルトとH<sub>2</sub>Oガスとの同位体交換速度で決定され、熔融CAIは-1400度、全圧100 Pa以上の条件下で合計2-3日程度加熱されたことがわかった。

研究成果の学術的意義や社会的意義

これまで定性的にか議論されてこなかった地球外物質の酸素同位体組成に関して、室内実験による反応速度データを用いて解釈をおこなうことにより、惑星材料物質(隕石構成物質)が経験した原始太陽系円盤の物理化学的条件を分析データから定量的に引き出すことが可能となった。これにより物質化学的証拠に基づいた信頼性のある原始太陽系円盤モデルの構築が可能となることが考えられ、他の原始惑星系円盤に対しての太陽系の特異性・普遍性の解釈につながる可能性がある。

研究成果の概要(英文)：A series of experiments between amorphous silicates/calcium-, aluminum-rich inclusions (CAI) melt and low pressure CO gas was performed in order to investigate the physicochemical conditions of the protosolar disk. We found that amorphous silicate dust would play an important role in catalyzing the isotopic equilibrium in silicate-CO-H<sub>2</sub>O system, and most of primitive silicate dust would have been thermally processed at temperatures above -600-700 K in the dynamically accreting protosolar disk. We also found that the overall isotope exchange rate between CAI melt and disk gas would be determined by CAI melt-H<sub>2</sub>O reaction and igneous CAI would be heated at -1400 °C and the total pressure higher than -100 Pa for -2-3 days.

研究分野：惑星化学、実験宇宙化学

キーワード：酸素同位体進化 始原的太陽系物質 原始太陽系円盤 一酸化炭素 非晶質ケイ酸塩 難揮発性包有物(CAI)

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属します。

## 1. 研究開始当初の背景

原始太陽を取り巻く原始太陽系円盤は、様々な化学的・物理的過程を通じた惑星材料物質の誕生・進化の場として、太陽系天体の進化を大きく左右する。ゆえに原始太陽系円盤の温度・圧力などの物理化学条件は、太陽系天体の多様性を理解するための最も基礎的かつ重要な情報である。太陽系外の原始惑星系円盤を直接観測できる時代になりつつあるが、現在の太陽系を誕生させた原始太陽系円盤の物理化学条件を推定するためには、地球外物質から情報を読み出す必要がある。惑星材料固体物質に最も多く含まれる元素である酸素は $^{16}\text{O}$ 、 $^{17}\text{O}$ 、 $^{18}\text{O}$ の3つの同位体をもつ。多くの隕石構成物質において、酸素同位体組成は $^{16}\text{O}$ に富むものから乏しいものまでの数%に及ぶ多様性があり、これは原始太陽系円盤における始原的固体物質とCOや $\text{H}_2\text{O}$ といった円盤ガスとの酸素同位体交換の結果であるとされる。地球外物質の中で最も始原的な物質の酸素同位体組成が太陽の同位体組成に一致することから、太陽系形成最初期に形成された固体物質は太陽の同位体組成を持っていたと考えられる。一方、ガス成分はCOガスの自己遮蔽効果を通じて、太陽の酸素同位体組成よりも $^{16}\text{O}$ に富むCOガスと $^{16}\text{O}$ に乏しい $\text{H}_2\text{O}$ ガスが形成するような同位体分別を起こす。これにより、同位体組成が異なる始原的固体物質、CO、 $\text{H}_2\text{O}$ の3つの同位体リザーバが形成され、始原的固体物質は原始太陽系円盤において周囲の物理化学条件に応じてCO、 $\text{H}_2\text{O}$ と酸素同位体を交換し、太陽の同位体組成から二次的な同位体組成へと変化する。ゆえに地球外物質の酸素同位体組成は原始太陽系円盤の物理化学条件制約のための貴重な情報源となる。

円盤での酸素同位体進化を記録する始原的固体物質には、原始太陽系円盤の主要固体微粒子と考えられる非晶質ケイ酸塩ダスト、太陽系最古の物質であり高温で形成された難揮発性包有物(CAI)があり、これらの物質には酸素同位体変動が記録されている。これまで、非晶質ケイ酸塩ダストやCAIメルトと $\text{H}_2\text{O}$ ガスとの酸素同位体交換のプロセスや速度は推定されており、さらに、気相でのCO- $\text{H}_2\text{O}$ 間の同位体交換機構・速度も同様にして推定されている(Alexander, 2004, GCA)。あとに残すは、COと始原的固体物質との同位体交換機構及び速度である。これを明らかにすることで、始原的固体物質-CO- $\text{H}_2\text{O}$ の3つのリザーバ間の同位体交換の理解が完了し、地球外物質の酸素同位体組成から円盤物理化学条件を制約することができる。

## 2. 研究の目的

非晶質ケイ酸塩やCAIメルトとCOとの酸素同位体交換反応の機構・速度を取得し、始原的固体物質-CO- $\text{H}_2\text{O}$ の3つのリザーバ間の同位体組成の進化を温度、圧力、ガス組成をパラメータとして記述可能なモデルを構築する。それに基づき、地球外物質の酸素同位体多様性をもたらした原始太陽系円盤の物理化学条件(温度、CO・ $\text{H}_2\text{O}$ 分圧、全圧)を制約する。

## 3. 研究の方法

<非晶質ケイ酸塩の酸素同位体交換実験> 高周波熱プラズマ法で合成された非晶質ケイ酸塩粒子を出発物質として、低圧COガス条件を再現可能な自作の低ガス圧真空反射加熱炉を用い、 $^{18}\text{O}$ に濃集したCOガスと643-883 K、 $P_{\text{CO}} = 0.05\text{-}1\text{ Pa}$ で酸素同位体交換実験をおこなった。加熱後物質はペレットにしたあと、真空中で周囲のガスとの同位体交換を避けながら焼結させ、北海道大学の二次イオン質量分析計(SIMS)で酸素同位体組成分析をおこなった。

<CAIメルトの酸素同位体交換実験> ケラマックス縦型管状炉を用いてCAI組成の球形ガラス(出発物質)を大気中で作成した。出発物質と $\text{C}^{18}\text{O}$ との酸素同位体交換実験は、高温・低圧COガス環境を再現可能な自作の低ガス圧集光型真空高温加熱炉を用いて、1420及び1460°C、 $P_{\text{CO}} = 0.1, 0.5, 1\text{ Pa}$ でおこなった。加熱後物質はFE-SEMによる観察後に、北海道大学のSIMSでガラスの酸素同位体組成のライン分析をおこなった。

## 4. 研究成果

<非晶質ケイ酸塩の酸素同位体交換実験> 粒子内部の拡散プロセス、粒子表面へのガス供給プロセスが律速段階となるような同位体組成の時間変化が観察された。ガス供給律速のときの、粒子表面でのCOガスの同位体交換効率は、 $\text{H}_2\text{O}$ ガスの場合と比較し2-3桁程度低いことがわかった。また粒子内部の拡散に律速される同位体交換速度の温度との関係を定量的に推定した。本研究結果と、先行研究の非晶質ケイ酸塩と $\text{H}_2\text{O}$ ガスとの同位体交換速度やCO- $\text{H}_2\text{O}$ ガス間の同位体交換速度との比較から、非晶質ケイ酸塩とCOガスとの同位体交換速度は、非晶質ケイ酸塩- $\text{H}_2\text{O}$ ガス間の同位体交換速度よりも遅いものの、ガス間の同位体交換よりも圧倒的に速いことがわかった。このことは、非晶質ケイ酸塩が、CO、 $\text{H}_2\text{O}$ 両ガスと同位体交換を起こすことにより、酸素同位体平衡を促進する触媒のような効果を持っていることを示す。円盤でのダストの移動と反応の理論計算から、定常降着円盤において、~600-700 K程度で非晶質ケイ酸塩-CO- $\text{H}_2\text{O}$ 間の同位体平衡が達成されることがわかり、多くの始原的ケイ酸塩ダストがこのクリティカルな温度を経験した可能性を見出した。

<CAIメルトの酸素同位体交換実験> メルト内部の酸素拡散及びメルト表面での同位体交換

が同時に進行する拡散プロファイルが取得され、表面濃度非定常の3次元拡散方程式から、両プロセスの反応速度パラメータを取得した。非晶質ケイ酸塩同様、メルト表面でのCOガスの同位体交換効率は、H<sub>2</sub>Oガスの場合と比較し2-3桁程度低いことがわかった。CAIメルト-H<sub>2</sub>Oガス間の同位体交換速度、CO-H<sub>2</sub>Oガス間の同位体交換速度、CAIメルト-COガス間の同位体交換速度の順に遅くなることから、CAIメルト-H<sub>2</sub>Oガス間の同位体交換速度がメルトの同位体組成を決定するプロセスであることがわかった。この結果と天然タイプB溶融CAIの酸素同位体組成分布から、タイプB溶融CAIが、1400°C付近で全圧100 Pa以上の条件で、2-3日加熱されたという熱履歴が推定された。

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計6件（うち査読付論文 5件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 Yamamoto Daiki, Kawasaki Noriyuki, Tachibana Shogo, Kamibayashi Michiru, Yurimoto Hisayoshi	4. 巻 336
2. 論文標題 Oxygen isotope exchange kinetics between CAI melt and carbon monoxide gas: Implication for CAI formation in the earliest Solar System	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Geochimica et Cosmochimica Acta	6. 最初と最後の頁 104 ~ 112
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.gca.2022.09.006	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 Yamamoto Daiki, Kawasaki Noriyuki, Tachibana Shogo, Kamibayashi Michiru, Yurimoto Hisayoshi	4. 巻 314
2. 論文標題 An experimental study on oxygen isotope exchange reaction between CAI melt and low-pressure water vapor under simulated Solar nebular conditions	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Geochimica et Cosmochimica Acta	6. 最初と最後の頁 108 ~ 120
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.gca.2021.09.016	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Ishizaki Lily, Tachibana Shogo, Okamoto Tamami, Yamamoto Daiki, Ida Shigeru	4. 巻 957
2. 論文標題 Effective Reaction Temperatures of Irreversible Dust Chemical Reactions in a Protoplanetary Disk	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 The Astrophysical Journal	6. 最初と最後の頁 47 ~ 47
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3847/1538-4357/acf310	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 Yamamoto Daiki, Kawasaki Noriyuki, Tachibana Shogo, Ishizaki Lily, Sakurai Ryosuke, Yurimoto Hisayoshi	4. 巻 374
2. 論文標題 An experimental simulation of oxygen isotope exchange reaction between amorphous silicate dust and carbon monoxide gas in the early Solar System	5. 発行年 2024年
3. 雑誌名 Geochimica et Cosmochimica Acta	6. 最初と最後の頁 93 ~ 105
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.gca.2024.04.014	査読の有無 無
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6件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 2件）

1. 発表者名 山本 大貴, 橘省吾, 川崎教行, 上林海ちる, 塚本尚義
2. 発表標題 CAI-CO-H <sub>2</sub> O間の酸素同位体交換速度論から制約される原始太陽系円盤の物理化学条件
3. 学会等名 日本地球惑星科学連合 2022年大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 D. Yamamoto, N. Kawasaki, S. Tachibana, H. Yurimoto
2. 発表標題 O-isotope Evolution of Silicate Dust in the Protosolar disk
3. 学会等名 Solar System Symposium in Sapporo 2023 (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Yamamoto D., Tachibana S., Kawasaki N., Kamibayashi M., and Yurimoto H.
2. 発表標題 O-isotope exchange kinetics between CAI melt and carbon monoxide gas in the protosolar disk
3. 学会等名 The 53rd Lunar and Planetary Science Conference (LPSC 2022) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 山本大貴、川崎教行、橘省吾、上林海ちる、 塚本尚義
2. 発表標題 難揮発性包有物メルトとCOガスとの酸素同位体交換実験
3. 学会等名 日本鉱物科学会2021年年会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 山本大貴、川崎教行、橘省吾、上林海ちる、 垠本尚義
2. 発表標題 CAI-CO-H2O間の酸素同位体交換速度論から制約される原始太陽系円盤の物理化学条件
3. 学会等名 日本地球惑星科学連合2022年大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 山本 大貴, 橘省吾, 川崎教行, 上林海ちる, 垠本尚義
2. 発表標題 非晶質ケイ酸塩ダストとCOガスとの酸素同位体交換速度論: 初期太陽系における酸素同位体進化への示唆
3. 学会等名 日本地球惑星科学連合2021年大会
4. 発表年 2021年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

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
---------	---------