

令和 6 年 6 月 21 日現在

機関番号：10101

研究種目：研究活動スタート支援

研究期間：2022～2023

課題番号：22K20376

研究課題名（和文）微小領域希ガス同位体イメージングに基づく始原隕石中の彗星物質の特定

研究課題名（英文）Identification of cometary material in primitive meteorites based on micro-area noble gas isotope imaging

研究代表者

小長谷 智哉（Obase, Tomoya）

北海道大学・理学研究院・博士研究員

研究者番号：40963757

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 2,200,000円

研究成果の概要（和文）：微小領域He同位体イメージングと電子顕微鏡観察を組み合わせ、隕石中のHe-4に富む微小物質の岩石鉱物学的特徴を調べる手法を確立した。その手法を用いて始原的なCRコンドライトの細粒マトリクス部からHe-4に富む物質を発見し、物質中のHe-4分布と岩石鉱物学的特徴を明らかにした。He-4は物質に含まれる2 μ mのシュライバーサイト中に均質かつ高濃度に存在した。この分布は大量の太陽高エネルギー粒子が打ち込まれたことを示唆し、前主系列星期の活発な太陽活動を反映すると考えられる。

研究成果の学術的意義や社会的意義

太陽に似た質量を持つ若い恒星の観測から、前主系列星期の太陽は現在と比べて非常に活動的であり、多量の高エネルギー粒子やX線を放出していたと推測されている。太陽活動は原始惑星系円盤や惑星大気に大きな影響を与えるため、太陽系の物質進化過程において重要である。本研究での発見は若い太陽の活発な活動の証拠であると考えられ、初期太陽系物質進化過程を理解する上で重要な成果である。

研究成果の概要（英文）：In this study, we established a method to characterize the petrology and mineralogy of μ m-sized materials containing large amount of He-4 by combining nm-scale isotope imaging technique and electron microscopy. Using this method, we found a He-4-rich material in the fine-grained matrix of a primitive CR chondrite. He-4 is homogeneously distributed in the 2- μ m schreibersite in the material, suggesting that the schreibersite was exposed to large amounts of solar energetic particles. The He-4 distribution most likely reflects extreme solar activity during the pre-main-sequence phase.

研究分野：宇宙化学

キーワード：同位体ナノスコープ ヘリウム CRコンドライト 太陽風 前主系列星期太陽

様式 C-19、F-19-1 (共通)

1. 研究開始当初の背景

希ガスは揮発性が高く化学的に不活性であるため、太陽系固体物質中の存在度は太陽組成に比べて非常に低い。コンドライトは未分化な天体に由来し、太陽系初期物質の情報を残す始原的な隕石である。コンドライト中の希ガスの大半は不溶性有機物やナノダイヤモンドに濃集しており、母天体における水質変質作用の影響をあまり受けない。CR コンドライトの一部には母天体における二次的変質をほとんど経験せず、特に始原的な隕石が存在する。このような始原的 CR コンドライトには、He と Ne を高濃度に含み、かつ水との反応で変質する物質が存在することが知られているが、物質の詳細や起源は不明である (Obase et al. 2021; Krietsch et al. 2019)。Obase et al. (2021)では、He と Ne の量比・同位体組成・放出温度などが一部の彗星物質と同様であることから本物質が彗星物質と共通の起源を持つ可能性を提案した。この仮説を検証するためには、物質の岩石鉱物学的特徴を明らかにして彗星物質と比較する必要がある。

近年、二次中性粒子質量分析装置である同位体ナノスコープ (LIMAS) を用いたナノメートルスケールでの同位体イメージング法が開発された (Bajo et al. 2016; Bajo and Yurimoto 2024)。本装置は一次ビームとして Ga の集束イオンビームを用いており、照射電流に応じた空間分解能で試料表面をスパッタする。表面から放出された中性粒子をフェムト秒レーザーによりポストイオン化したのち、マルチターン飛行時間型質量分析計 (MULTUM II) によって複数のイオンを同時に検出する。本装置はイオン化ポテンシャルの高い He を含む希ガス同位体の検出が可能である。また一次ビームを走査することでナノメートルスケールでの同位体イメージングを行うことができる。彗星物質中の ${}^4\text{He}$ 濃度は LIMAS による検出限界よりも高いため、同位体イメージングにより CR コンドライト中の He と Ne に富む物質の分布を可視化することが期待された。

2. 研究の目的

CR コンドライト中の He と Ne に富む物質の岩石鉱物学的特徴を明らかにすることを目的とした。

3. 研究の方法

CR コンドライトに分類される MIL 090657 隕石および EET 92048 隕石の研磨試料を作成した。どちらの隕石も He と Ne に富む物質を含むことが分かっている (Obase et al. 2021)。研磨試料に対し LIMAS による ${}^4\text{He}$, ${}^{26}\text{Mg}$, ${}^{32}\text{S}$, ${}^{58}\text{Ni}$ の同位体イメージングを行った。スポットサイズ $1.5\mu\text{m}$ の一次ビームによるイメージングを行った結果、MIL 090657 隕石から ${}^4\text{He}$ に富む大きさ約 $10\mu\text{m}$ の物質を発見した。本物質に対し小さなスポットサイズ (800nm および 300nm) の一次ビームを用いて高空間分解能のイメージングを行った後、走査電子顕微鏡 (SEM) 観察および集束イオンビーム装置を用いて作成した薄膜試料の透過電子顕微鏡 (TEM) 観察を行った。

4. 研究成果

${}^4\text{He}$ に富む物質は MIL 090657 隕石の細粒マトリクス部に埋まっていた。この物質は主に数十 nm の硫化鉄微結晶からなる多孔質の集合体で構成されていた。集合体にはマグネタイトおよび Ni に富む硫化物の微結晶も含まれていた。集合体の外縁付近には最大 $2\mu\text{m}$ のシュライバーサイトが存在していた。更に外側には最大 $3\mu\text{m}$ の自形の硫化鉄が物質を囲うように存在していた。スポットサイズ 800nm のビームでの同位体イメージングの結果、高濃度の ${}^4\text{He}$ (4×10^{19} atoms cm^{-3}) がシュライバーサイトから検出された。一方、微結晶集合体や自形硫化鉄からはほとんど検出されなかった。最も小さなスポットサイズ (300nm) の一次ビームを用いた同位体イメージングの結果、 ${}^4\text{He}$ は $2\mu\text{m}$ のシュライバーサイトの内部に均一に分布していることが明らかになった。

物質を構成する多孔質な微結晶集合体は、その組織や鉱物組成からトチリナイトの熱分解によって形成されたと考えられる。トチリナイトは CR コンドライト母天体集積後まもなく発生した水質変質作用によって Fe-Ni 合金または硫化鉄から形成された可能性が高い。シュライバーサイトと自形硫化鉄の産状は Lauretta et al. (1998) による鉄隕石硫化実験の生成物によく似ていた。このためシュライバーサイトと自形硫化鉄は太陽系星雲中の H_2S との反応により Fe-Ni 合金の表面に生成されたと考えられる。

シュライバーサイト中の高濃度の ${}^4\text{He}$ は太陽風のような高エネルギー粒子の注入によりもたらされたと考えられる。一部の隕石は太陽風希ガスを豊富に含むが、それらは太陽風に曝された母天体表面レゴリスが固化して形成されたものであると考えられている。一方、MIL 090657 隕石全岩の希ガス同位体組成には太陽風希ガスの寄与が認められない (Obase et al. 2021)。このため、シュライバーサイトが ${}^4\text{He}$ を獲得したのは初期太陽系における母天体集積以前だった可能性が高い。微結晶集合体や自形硫化鉄中の He は、母天体集積後の水質変質作用や加熱による相

変化の際に失われたと考えられる。

イオン注入シミュレーション (SRIM/TRIM) を行った結果、現在の平均的な太陽風 ${}^4\text{He}$ (4keV) がシュライバーサイトに注入されると約 20nm の深さで停止する。これは粒径 $2\mu\text{m}$ のシュライバーサイトに見られた均質分布と矛盾する。 ${}^4\text{He}$ の均質分布は、シュライバーサイトが 1MeV 以上のエネルギーを持つ多量の太陽高エネルギー粒子 (solar energetic particles; SEP) に曝されたことを示唆する。太陽に似た質量の前主系列星からは強力な X 線フレアが頻繁に発生することから、前主系列星期の太陽は現在よりも桁違いに多量の SEP を放出していたと推測されている (Feigelson et al. 2002)。本研究で発見したシュライバーサイトの高濃度かつ均質な ${}^4\text{He}$ 分布は、前主系列星期の太陽が現在と比べて非常に活動的だった証拠であると考えられる。

シュライバーサイトを真空中で加熱すると、約 1000°C で He を放出する (Nishimura et al. 2008)。一方 CR コンドライト中の He と Ne に富む物質は約 400°C で He を放出した (Obase et al. 2021)。すなわち今回発見したシュライバーサイトは研究開始当初の狙いであった物質とは異なる可能性が高い。今回の同位体イメージングで目的の物質が見つからなかったのは、①物質の ${}^4\text{He}$ 濃度が低いか大きさが一次ビームに比べて小さいために検出できなかった、②不均質に分布しており今回の分析領域に存在しなかった、という可能性が考えられる。

本研究では微小領域希ガス同位体イメージングと電子顕微鏡観察を組み合わせた研究手法を確立した。この手法による ${}^4\text{He}$ に富む物質の発見により、若い太陽活動を記録する物質が始原的隕石中に存在することを示した。今後、分析領域を広げることや他の始原的隕石にも本手法を応用することによって類似の物質が更に発見されれば、初期太陽活動の理解が進むと期待される。

<引用文献>

- Bajo K., Itose S., Matsuya M., Ishihara M., Uchino K., Kudo M., Sakaguchi I., and Yurimoto H. 2016. High spatial resolution imaging of helium isotope by TOF-SNMS. *Surface and Interface Analysis* 48:1190-1193.
- Bajo K., and Yurimoto H. 2024. Nanoscale analysis of noble gas in solids. *Journal of Analytical Science and Technology* 15:1-9.
- Feigelson E. D., Garmire G. P., and Pravdo S. H. 2002. Magnetic Flaring in the Pre-Main-Sequence Sun and Implications for the Early Solar System. *The Astrophysical Journal* 572:335-349.
- Krietsch D., Busemann H., Riebe M. E. I., King A. J., and Maden C. 2019. Complete Characterization of the Noble Gas Inventory in CR Chondrite Miller Range 090657 by Direct Etch Release. In *82nd Annual Meeting of The Meteoritical Society*. p. 6296.
- Lauretta D. S., Lodders K., and Fegley B. 1998. Kamacite sulfurization in the solar nebula. *Meteoritics & Planetary Science* 33:821-833.
- Nishimura C., Matsuda J. I., and Kurat G. 2008. Noble gas content and isotope abundances in phases of the Saint-Aubin (UNGR) iron meteorite. *Meteoritics & Planetary Science* 43:1333-1350.
- Obase T., Nakashima D., Choi J., Enokido Y., Matsumoto M., and Nakamura T. 2021. Water-susceptible primordial noble gas components in less-altered CR chondrites: A possible link to cometary materials. *Geochimica et Cosmochimica Acta* 312:75-105.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計5件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 1件）

1. 発表者名 小長谷智哉, 馬上謙一, 松本恵, 和田壮平, 坂本尚義
2. 発表標題 CRコンドライトMIL090657中のHeに富むクラスト: 前主系列星期太陽起源の高エネルギー粒子照射の証拠
3. 学会等名 日本地球惑星科学連合2024年大会
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 小長谷智哉, 馬上謙一, 松本恵, 和田壮平, 坂本尚義
2. 発表標題 MIL090657隕石中のHeに富む粒子の岩石鋳物学的特徴
3. 学会等名 惑星物質科学のフロンティア研究集会
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 Obase T, Bajo K, Wada S, Matsumoto M, Yurimoto H
2. 発表標題 Evidence for exposure to solar energetic particles from the young Sun
3. 学会等名 Solar System symposium in Sapporo 2024 (国際学会)
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 小長谷智哉, 馬上謙一, 和田壮平, 坂本尚義
2. 発表標題 MIL090657隕石の微小領域ヘリウムイメージング
3. 学会等名 日本質量分析学会 同位体比部会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 小長谷 智哉, 馬上 謙一, 大槻 悠太, 坂本 尚義
2. 発表標題 イトカワレゴリス粒子表面の太陽風ヘリウム三次元分布
3. 学会等名 日本地球惑星科学連合2023年大会
4. 発表年 2023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
---------	---------