

令和 5 年 5 月 25 日現在

機関番号：10101

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2020～2022

課題番号：20K04036

研究課題名(和文) 個々のプレソーラー粒子の希ガス同位体分析による星間滞留環境の解明

研究課題名(英文) Noble gas isotope analysis for individual presolar grain to study environment of interstellar material

研究代表者

馬上 謙一 (BAJO, KEN-ICHI)

北海道大学・理学研究院・助教

研究者番号：70624758

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,300,000円

研究成果の概要(和文)：プレソーラー炭化ケイ素(SiC)は炭素星やAGB星の星周で形成したと考えられている。これらの星では、太陽系とは異なる同位体組成を持つ。またこれらの星周で形成したSiCは高エネルギー粒子を含む恒星風や星間での銀河宇宙線が照射されているはずである。SiCに残されている恒星風起源希ガスの深さ方向のプロファイルは恒星風のエネルギーを反映していると考えられる。本研究ではプレソーラーSiC中のHeの深さ方向分析を行った。その結果、深さ方向にHeの分布が見られた。これは恒星風がHeイオン注入されていることを示唆しており、Heプロファイルから見積もられた恒星風のエネルギーは約10keVであった。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究により、プレソーラーSiCのHeの起源は恒星風によるイオン注入であることが分かった。本研究で用いた同位体ナノスコープによって空間分解能10nmレベルの深さ方向分析に成功した。このことによってはじめてSiC粒子の極めて表層に濃縮する恒星風起源Heを検出することができた。AGB星が放出している恒星風と、太陽風との違いを調べていくことで、太陽系外の恒星の様子を物質科学的に明らかにできると考えている。

研究成果の概要(英文)：Presolar silicon carbide (SiC) is known to form around carbon and AGB stars. These stars have an isotopic composition different from that of the Solar System. The SiC formed in this region should have been exposed to stellar winds and interstellar galactic cosmic rays. Depth profiles of noble gases for the SiC can reveal the implantation of the stellar wind. The depth profiles reflect the energy of the stellar winds. In this study, depth profiles of He in presolar SiC were analysed. The results show a depth profile of He. This indicates that the stellar wind He is implanted in the SiC. The energy of the stellar wind estimated from the He profile is 10-20 keV.

研究分野：同位体宇宙化学

キーワード：希ガス 深さ方向分析 プレソーラー粒子 恒星風

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

始原隕石中に存在している、太陽系形成以前から存在していたプレソーラー粒子は、超新星爆発や漸近巨星分枝星での原子核反応を反映した様々な成分が隕石中に存在していることが分かっている。プレソーラー希ガス同位体のキャリアは SiC やダイヤモンド、グラファイトなどが知られている。二次イオン質量分析装置などの高感度な局所分析が可能になると、隕石薄片を用いた μm スケールの点分析や同位体イメージングによりプレソーラーケイ酸塩も発見され始めた。局所分析において有用な元素は、プレソーラー粒子の主要元素である、C, N, O, Si であった。

プレソーラー粒子は、形成してから原始太陽に取り込まれるまでである期間、星間物質として星間を漂っているはずである。その期間は 20 億年よりは短いと考えられていた。近年、プレソーラー粒子 1 個ずつの分析を行うことで、星間滞留期間を推定する研究がおこなわれている。研究に用いられた核種は、 ^6Li と ^3He 、 ^{21}Ne で、ともにプレソーラー粒子の構成原子と銀河宇宙線の原子核反応によって生成された宇宙線照射起源核種である。しかしながら、プレソーラー粒子は大きくても数 μm 、一般的なサイズは数百 nm しかなく、同位体分析は極めて難しい。

また、AGB 星近傍で形成されたと考えられるこれらの粒子は起源とする AGB 星の恒星風をあびている可能性があるが、この恒星風起源希ガスに着目した研究はない。本研究では、粒子表面の微量希ガス深さ方向分析を行うことで、プレソーラー SiC 粒子最表層 (100 nm 以下) に存在する可能性がある、恒星風起源希ガスの定量を試みた。

2. 研究の目的

本研究では宇宙線照射起源および恒星風起源 He 及び Ne に着目し、プレソーラー SiC 粒子の星間滞留期間を推定するとともに、滞留時に SiC がどのような荷電粒子に去られているかを見積もることを目標とする。滞留中に二次的に SiC が変質(宇宙線によるスパッタリングや加熱による脱ガス)があると、測定した Ne 同位体の宇宙線照射年代は実際の照射年代よりも短くなる可能性がある。

3. 研究の方法

同位体ナノスコープは、サンプル表面を Ga イオンビームによりスパッタし、真空中に放出させた粒子を fs レーザーによってイオン化し、そのイオンを多重周回型質量分析計により、質量分析することができる。

試料として Murchison 隕石中の SiC 粒子を用いた。この粒子は Murchison 隕石に物理・化学的処理を行い、さらに密度と粒子の大きさによる振り分けを行い分類した粒子の内、1.5-3 μm の大きさを持つ粒子である。試料表面は金蒸着を行った。

プレソーラー SiC の同定は、北海道大学に設置された SEM-EDS システムを用いた。試料は金板上に SiC 粒子が散逸した状態で乗っているため、Si および C の元素マップを取得した。この二次電子像および、元素マップから SiC 粒子の大きさ及び位置を同定した。

プレソーラー SiC 中の ^4He の深さ方向の分布とフルエンスを見積もるために、20 keV の ^4He を 3×10^{15} 、100 keV の ^{20}Ne を 1×10^{14} 個 cm^{-2} 照射した SiC 基板の分析を行った。この SiC 基板を用いて、基礎実験を行い、プレソーラー SiC 分析の深さ方向分析を定量的に行う実験手法を確立した。そして、プレソーラー SiC 粒子の 1 粒ずつの深さ方向分析を計 11 粒子行った。

4. 研究成果

図 1 に示すように、プレソーラー SiC 粒子の深さ方向分析の結果、主要元素である Si と C はイオン強度が一定なプロファイルが得られた。また、すべての粒子においてブランクレベルより 1 桁以上高い ^4He が検出された(表)。この He 濃度は先行研究で得られている結果と整合的であった。この中の 1 粒子(#3, 図 1)では ^4He の深さ方向プロファイルに山状の分布が確認できた。図 2 に #3 粒子の形状と、分析後の SiC 粒子の電子顕微鏡写真を示す。

図 1 に示す ^4He の深さ方向プロファイルは恒星風によるイオン注入の結果である可能性が高い。 ^4He プロファイルのピークは 100 nm 程度であり、10 keV 程度でのイオン注入があったことが推察できる。

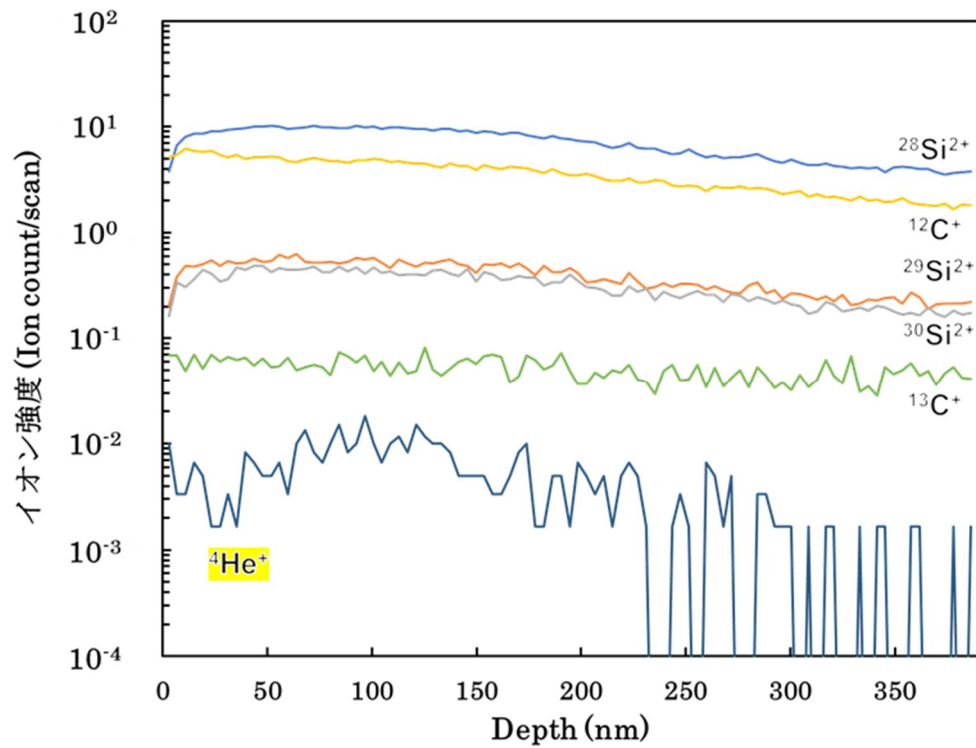


図 1 . プレソラー-SiC 粒子 (#3) の He , C , Si 深さ方向プロファイル . イオン強度は質量スキャン毎のイオンカウント , 深さは SiC 基板を測定した際のスパッタレートをを用いた .

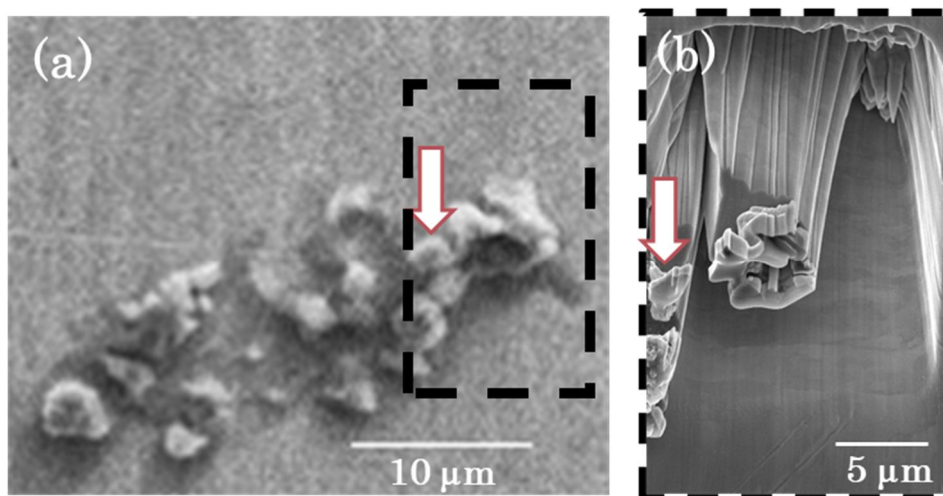


図 2 . SiC 粒子の深さ方向分析前の分析範囲周辺の二次電子像(a)と , 分析後の二次電子像(b) . (a) の黒枠で囲まれた範囲は分析範囲を示す . 矢印は図 1 に示した#3 粒子である .

表 . 11 個のプレソーラー-SiC の ^4He 強度 .

Grain	^4He ($\times 10^{-4}$ count/scan)
A3-01	45
A3-02	1.6
A3-03	1.6
A3-04	2.2
A3-05	1.6
A3-06	1.6
A3-07	2.4
A3-08	2.3
A3-09	1.3
A3-10	3.1
A3-11	4.5

ブランクレベルはそれぞれの分析ごとに測定し , $(0.01-0.9) \times 10^{-4}$ count/scan であり , 平均値は 0.4×10^{-4} count/scan だった .

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計2件（うち査読付論文 2件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 大槻 悠太, 馬上 謙一, 坂本 尚義	4. 巻 69
2. 論文標題 同位体ナノスコープによる地球外物質の希ガス深さ方向分析に向けた微小粒子分析法の開発	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Journal of the Mass Spectrometry Society of Japan	6. 最初と最後の頁 197-201
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.5702/massspec.21-122	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 馬上 謙一	4. 巻 71
2. 論文標題 同位体ナノスコープによる希ガス局所分析	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Journal of the Mass Spectrometry Society of Japan	6. 最初と最後の頁 1-2
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	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3件（うち招待講演 2件 / うち国際学会 0件）

1. 発表者名 和泉 樹
2. 発表標題 プレソラー-SiC のヘリウム深さ方向分析
3. 学会等名 日本地球化学会 第69回年会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 馬上 謙一
2. 発表標題 同位体ナノスコープを用いた局所希ガス分析法の開発
3. 学会等名 Japan Geoscience Union Meeting 2023 (招待講演)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 馬上謙一
2. 発表標題 同位体ナノスコープを用いた地球外物質の局所ヘリウム分析
3. 学会等名 第5回 マイクロビームアナリシス技術部会（招待講演）
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
研究 分 担 者	川崎 教行 (KAWASAKI NORIYUKI) (50770278)	北海道大学・理学研究院・准教授 (10101)	

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