



HOKKAIDO UNIVERSITY

Title	High-Resolution Helium Isotope Imaging Reveals Solar Wind Helium Distribution in a Carbonaceous Chondrite [an abstract of dissertation and a summary of dissertation review]
Author(s)	和田, 壮平
Degree Grantor	北海道大学
Degree Name	博士(理学)
Dissertation Number	甲第16529号
Issue Date	2025-06-30
Doc URL	https://hdl.handle.net/2115/95737
Rights(URL)	https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/
Type	doctoral thesis
File Information	Sohei_Wada_abstract.pdf, 論文内容の要旨



学 位 論 文 内 容 の 要 旨

博士の専攻分野の名称 博士（理 学） 氏 名 和田 壮平

学 位 論 文 題 名

High-Resolution Helium Isotope Imaging Reveals Solar Wind Helium Distribution in a Carbonaceous Chondrite

(ヘリウム同位体イメージングによる炭素質コンドライト中の
太陽風由来ヘリウム微細分布の解明)

本論文では、炭素質コンドライト中の太陽風に由来する ^4He の微細分布を明らかにした。過去の太陽風は、隕石中に太陽風由来の希ガスとして保存されている。希ガスは一般に固体物質中では極めて微量であるため、太陽風打ち込みにより二次的に付加された希ガスを識別できる。典型的なエネルギーの太陽風が固体物質に打ち込まれると、その到達深さは $0.1\ \mu\text{m}$ 未満である。そのため、太陽風打ち込みは、大気を持たない天体の最表面に物質が存在する場合にのみ発生する。太陽風の照射期間は、物質が母天体の最表面に滞在した期間を示すため、母天体における地質学的プロセスの時間スケールを示す重要な指標となる。さらに、隕石中の太陽風由来の希ガス分布は、母天体における表層物質の混合と堆積プロセスに関する新たな知見をもたらす。本研究では、レーザーを用いた飛行時間型二次中性粒子質量分析計（LIMAS）による ^4He イメージングにより、炭素質コンドライト Northwest Africa 801（NWA 801）中の太陽風由来 ^4He 微細分布を解明した。

第二章では、サブミクロン ($0.1\text{--}0.25\ \mu\text{m}$) の空間分解能の ^4He イメージングにより、NWA 801 隕石のマトリクスに含まれる鉱物粒子の表面に太陽風 ^4He が打ち込まれたことを実証した。また、 ^4He イメージから算出した太陽風 ^4He 照射量を用いて個々の鉱物粒子の太陽風 ^4He 照射期間を推定した。これまでの研究により、希ガスに富む隕石は、構成物質の粒径ごとの希ガス濃度を比較すると、体積に比べて表面積の割合が相対的に大きくなる、粒径の小さい粒子ほど高い濃度を示し、粒子表面に希ガスが濃集する太陽風打ち込みの特徴を示すことが明らかになった。また、希ガスに富む隕石の構成物質を段階的に化学エッチングしながら希ガス分析を行うと、粒子表面に対応する初期の段階で太陽風に近い同位体組成のヘリウムやネオンが放出されることが明らかになった。これらの結果は、隕石へ太陽風打ち込みが起こった証拠と考えられている。しかし、構成鉱物の表面に太陽風が打ち込まれたことは、その場分析によって実証されていない。本研究では、NWA 801 隕石の個々の鉱物粒子に対し、サブミクロンの空間分解能で LIMAS による ^4He イメージングを行った。NWA 801 隕石のマトリクスは、主に $1\text{--}50\ \mu\text{m}$ の鉄ニッケルメタル、水酸化鉄、硫化鉄、かんらん石、輝石の粒子と、 $0.1\ \mu\text{m}$ 以下の微細基質から構成される。 ^4He イメージングの結果、粒子周囲の微細基質よりも高い $^4\text{He}^+$ シグナルが、鉄ニッケルメタル、水酸化鉄、硫化鉄、かんらん石、輝石の各粒子の形状に沿って検出された。粒子境界を横切るラインプロファイルを取得すると、 $^4\text{He}^+$ シグナルのピーク位置は各粒子と周囲の微細基質の境界部分に存在し、ピーク幅は $0.1\text{--}0.25\ \mu\text{m}$ であった。この結果は、 ^4He が粒子の表面から $0.1\ \mu\text{m}$ 以内の極浅い深さに含まれているか、 ^4He を含む $0.1\ \mu\text{m}$ 以下の微細基質が粒子の周囲を覆っていることを意味する。分析した粒子のうち、鉄ニッケルメタルの斜めに研磨されたエッジ

からは、他の粒子より幅広く、ピーク位置が鉄ニッケルメタル側にシフトした $^4\text{He}^+$ プロファイルが観察された。もし、 ^4He を含む $0.1\ \mu\text{m}$ 以下の微細基質が粒子の周囲を覆っていた場合、エッジが斜めに研磨されていても他の粒子と同様のプロファイルが観察されるはずである。したがって、鉱物粒子の形状に沿って検出された ^4He 分布は、隕石中の構成鉱物の表面に太陽風が打ち込まれた直接証拠である。次に、 ^4He 濃度ラインプロファイルから各鉱物粒子の太陽風 ^4He 照射量を算出した。太陽風 ^4He 照射量は、 2.7×10^{16} から 5.8×10^{17} atoms cm^{-2} であった。太陽風 ^4He 照射期間は、照射された当時の太陽風フラックスと母天体の位置を仮定することで、太陽風 ^4He 照射量から求められる。当時の太陽風フラックスは現在と同程度であったと考えられているため、計算には現在の値を用いた。NWA 801 隕石が分類されるレナッツォ型炭素質コンドライトの推定母天体集積位置 (4 天文単位) で太陽風の照射が起こった場合、分析した 8 粒子の太陽風 ^4He 照射期間は 3800 年から 8 万 2000 年である。このうち 7 粒子の太陽風 ^4He 照射期間は 3800 年から 1 万 6000 年である。本研究で得られた太陽風 ^4He 照射期間は、NWA 801 隕石母天体におけるレゴリス混合が 1 万年程度の頻度で起こっていたことを示唆する。

第三章では、LIMAS を改造して広領域イメージングシステムを構築することによって、一度に ^4He イメージングできる大きさを従来の約 10 倍まで拡大した。また、開発した手法を用いて、空間分解能 $2.4\ \mu\text{m}$ で NWA 801 隕石のマトリックスの網羅的な ^4He イメージングを行い、NWA 801 隕石の太陽風 ^4He 分布と岩石学的組織の関係を明らかにした。LIMAS は、一次イオンビームによって試料からスパッタした中性粒子に対し、対物レンズを用いて収束させたレーザービームを照射してポストイオン化することで、希ガスの局所分析を実現している。イオン化領域はレーザービームの収束径によって制限されるため、従来の LIMAS による ^4He イメージング領域は $40\ \mu\text{m}$ 四方に限られていた。NWA 801 隕石のマトリックスには数十ミクロン程度の鉱物粒子が微細基質に散在しているため、岩石学的組織と対応した希ガス分布の取得にはイメージング領域が不十分であった。本研究では、分析中に対物レンズを動かし、レーザービームの照射位置を一次イオンビームの照射位置に合わせて移動させるシステムを構築した。 ^4He 注入シリコン基板を用いた基礎実験を行い、構築したシステムにより一度に $100 \times 150\ \mu\text{m}$ の ^4He イメージングが可能となったことを確認した。NWA 801 隕石のマトリックスから 15 領域を選び、 $100 \times 150\ \mu\text{m}$ の ^4He イメージングを行った結果、マトリックスに存在する、比較的細粒 (数ミクロン) な鉱物粒子と微細基質から構成される数十から数百ミクロンの塊状領域からは ^4He が検出されない一方で、破碎された外形をもつコンドリュールのリムの一部と、塊状領域の間隙に存在する比較的粗粒 (数十ミクロン以下) な鉱物粒子から構成される領域からは ^4He が検出された。比較的粗粒な鉱物粒子から構成される ^4He が検出された領域は、母天体上で破碎を受けた領域と考えられる。NWA 801 隕石中の ^4He の産状は、母天体に降着して一度固結した構成物質が、母天体への天体衝突による破碎作用を受けてその一部が未固結の状態になり、太陽風が照射されたことを示唆する。NWA 801 隕石母天体では、数十から数百ミクロンの規模でレゴリス混合プロセスが起こり、現在の岩相が形成されたと考えられる。

第四章には、本論文のまとめと結論が記されている。本研究では、その場分析によって NWA 801 隕石の構成鉱物の表面に太陽風が打ち込まれたことを実証した。また、NWA 801 隕石中の太陽風 ^4He 分布と岩石学的組織の関係、および各鉱物粒子の太陽風 ^4He 照射期間から、NWA 801 隕石母天体では、レゴリスを数十から数百ミクロンの規模で混合するプロセスが、典型的に 1 万年程度の頻度で起こっていたことが示唆された。