



Title	Solar Wind Noble Gas Fractionation in Lunar Ilmenites : A Study Based on Depth Profiling Analyses and Numerical Simulations
Author(s)	大槻, 悠太
Degree Grantor	北海道大学
Degree Name	博士(理学)
Dissertation Number	甲第16751号
Issue Date	2026-03-25
DOI	https://doi.org/10.14943/doctoral.k16751
Doc URL	https://hdl.handle.net/2115/99596
Type	doctoral thesis
File Information	Yuta_Otsuki_abstract.pdf, 論文内容の要旨 https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/



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 大槻 悠太

学位論文題名

Solar Wind Noble Gas Fractionation in Lunar Ilmenites:
A Study Based on Depth Profiling Analyses and Numerical Simulations
(希ガス局所分析および数値シミュレーションに基づく月イルメナイトの
太陽風起源希ガスの分別に関する研究)

地球外物質に含まれる太陽風起源希ガスは、揮発性が高いため固体物質中に含まれにくい。このため、それらは過去の太陽風の組成やエネルギーを理解する手がかりとなるほか、近年では地球の材料物質に注入される太陽風起源希ガスが地球の希ガス組成を理解するための鍵として重要視されている。アポロミッション以降、月試料を用いて過去の太陽風の情報を解析するための研究が多数行われてきた。しかし、一般的な希ガス分析法は空間分解能に限界があり、物質最表層のおよそ 100 nm に注入される太陽風起源希ガスの微細な分布を直接観察することができなかった。そのため、一般に太陽風組成と比べて軽い希ガス種が失われている月試料でどのようなメカニズムで分別されているかを理解するには限界があった。

近年、飛行時間型二次中性粒子質量分析装置 LIMAS が開発され、地球外物質における高空間分解能の ^4He 局所分析が可能となった。LIMAS を用いた先行研究では、例えば ^4He の深さ方向分布を用いた過去の太陽風エネルギーの解析などが行われてきた。しかし、一般に ^4He は鉱物から失われやすいことが知られており、より堅牢な議論のためにはそれより失われにくい Ne や Ar の同位体を用いて解析することが望まれる。また、高空間分解能で元素比の分析ができれば、これまでおおまかに拡散によるものと理解されてきた希ガスの分別メカニズムに新たな知見をもたらさう。しかし、LIMAS ではこれまで主に太陽風起源希ガスのなかで最も豊富な ^4He が分析対象とされており、Ne や Ar の分析はほとんど行われていなかった。本研究では、LIMAS を用いたナノスケール希ガス深さ方向分析を Ne および Ar 同位体に拡張した。これにより、月イルメナイトにおけるナノスケールでの希ガスの元素・同位体分別の様態を観察し、バルク粒子における希ガスの分別メカニズムを明らかにすることを目的とした。

第2章では、LIMAS の分析条件の最適化により、月と小惑星の典型的な鉱物であるイルメナイトとオリビン主要元素に加え、 ^4He 、 ^{20}Ne 、 ^{22}Ne 、 ^{36}Ar 、 ^{40}Ar の5同位体を同時測定する手法を確立した。測定限界はいずれも月イルメナイト中の典型的な希ガス濃度よりも十分に低いことを確認した。加えて、分析精度と安定性の評価を行い、月イルメナイト粒子間のバルク $^4\text{He}/^{20}\text{Ne}$ 比と $^{20}\text{Ne}/^{36}\text{Ar}$ 比、および単一粒子内での深さ方向の $^4\text{He}/^{20}\text{Ne}$ 、 $^{20}\text{Ne}/^{36}\text{Ar}$ 、 $^{20}\text{Ne}/^{22}\text{Ne}$ 比の変化を識別できることを確認した。

確立した新手法に基づき、第3章ではアポロ17号ソイル試料 71501 中の三つのイルメナイト粒子の希ガス局所深さ方向分析を行った。分析領域から深さ方向分布の解析に適した領域を選別し、希ガス深さ方向分布を取得したところ、 ^4He 、 ^{20}Ne 、 ^{22}Ne 、 ^{36}Ar はどれもイルメナイトの表層 100 nm 以内に濃集していることが分かった。また、 $^{20}\text{Ne}/^{22}\text{Ne}$ 比の深さ方向分布は深さ 50 nm 程度において、かつて SEP (太陽高エネルギー粒子) component と呼ばれ、深さ数マイクロメートルに保持されていると考えられていた重い $^{20}\text{Ne}/^{22}\text{Ne}$ 組成を示した。この結果は、月試料に見られる太陽由来の第2の成分と考えられていた重い Ne が実際には SEP 起源ではなく、太陽風注入時に深さ方向に同位体分別された Ne であることを定量的な深さスケールに基づいて確認した初めての証拠である。また、 $^4\text{He}/^{20}\text{Ne}$ 、 $^{20}\text{Ne}/^{36}\text{Ar}$ 比の深さ方向分布から、イルメナイト中では He と Ne が濃度分布の形を維持したまま失われていることが明らかになった。これは、He と Ne がイルメナイトに注入された後、太陽風照射由来の欠陥に蓄積され、欠陥同士がネットワークを形成して物

質表面に到達することで希ガスの損失が起こることを示唆する結果である。

第3章において、月試料で実際に見られる希ガス深さ方向分布が、現在の太陽風速度分布に基づくイオン注入シミュレーションでよく再現されることを示した。この事実に基づき、第4章では、イオン注入シミュレーションに基づいて太陽風注入-スパッタのモデルを構築し、スパッタによる月イルメナイト中での希ガスのバルク組成と深さ方向分布の進化を見積もり、月イルメナイトの文献値と比較した。その結果、月試料で報告されている $^{20}\text{Ne}/^{22}\text{Ne}$ 、 $^{36}\text{Ar}/^{84}\text{Kr}$ 、 $^{84}\text{Kr}/^{132}\text{Xe}$ 比のバルク組成と深さ方向分布は、数十ナノメートルのスパッタによって統一的に説明された。このとき、希ガス深さ方向分布は注入とスパッタの平衡に近づいており、照射量と物質に保持される量の線形性から大きく外れる。このため、月試料の希ガス濃度から得られる太陽風照射期間は下限値として慎重に扱われるべきであることを示した。

第5章では本研究全体を総括した。本研究では、LIMASによる高空間分解能希ガス深さ方向分析法が、太陽風照射を受けた物質表層のHeのみならずNeおよびArを同時に分析するための強力な手法になることを示した。物質表面での希ガス元素・同位体分別の将来的な分析により太陽風と固体物質の相互作用による太陽風起源希ガスの分別プロセスがより詳細に明らかになることが期待される。加えて、第3章で希ガス濃度分布の形を保ったまま希ガスが失われることを明らかにしたが、これは希ガス深さ方向分布が過去の太陽風エネルギーの解析のための強力なツールとなり得ることを示す。