



HOKKAIDO UNIVERSITY

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_review.pdf, 審査の要旨 https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/



学位論文審査の要旨

博士の専攻分野の名称 博士（理 学） 氏 名 大 槻 悠 太

審査担当者	主査	准教授	川 崎 教 行
	副査	教 授	塚 本 尚 義
	副査	教 授	永 井 隆 哉
	副査	助 教	馬 上 謙 一

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)

博士学位論文審査等の結果について（報告）

地球外物質に照射された太陽風起源希ガスは、過去の太陽風の組成の復元による地球の揮発性物質の研究や太陽風と固体物質との相互作用の理解を深めるために有用である。太陽風起源希ガスは物質表面から深さ 100 nm 以内に濃集する。月試料の He と Ne は部分的に失われている事が知られているが、従来の希ガス分析法は空間分解能に限界があり、物質表面 100 nm 以内に注入される希ガスの詳細な分布や元素、同位体分別のメカニズムは不明であった。

本論文では、月の典型的な鉱物で、比較的希ガスの分別を受けていないイルメナイトに注入された太陽風起源希ガスの保持・分別機構を明らかにするため、局所希ガス深さ方向分析および数値シミュレーションを行った。まず、これまでに ^4He 局所分析が可能だった同位体ナノスケープの分析条件最適化を行い、 ^4He 、 ^{20}Ne 、 ^{22}Ne 、 ^{36}Ar 、 ^{40}Ar の同時深さ方向分析法を確立した。分析精度と測定限界を評価し、新手法が月イルメナイトの分析に有効であることを示した。

続いて、新手法で月イルメナイト粒子の分析を行った結果、表面 100 nm 以内の希ガス濃度が従来のバルク分析法と調和的であることから、月試料に含まれる希ガスは大部分が太陽風由来であることを示した。 $^{20}\text{Ne}/^{22}\text{Ne}$ 比の深さ方向分布より、イルメナイト表面付近において深さ依存で同位体分別されていることを初めて実証した。また、 $^4\text{He}/^{20}\text{Ne}$ と $^{20}\text{Ne}/^{36}\text{Ar}$ 比の深さ方向分布もナノメートルスケールで分別されており、バルク組成に寄らず深さ方向分布の傾向が類似することから、 ^4He と ^{20}Ne は格子欠陥を介して結晶から漏れ出るように失われていることを明らかにした。

続いて、分析の結果を踏まえ、月イルメナイトにおけるイオン注入およびスパッタリングの数値シミュレーションを行った。月イルメナイトの文献値との比較により、 $^{20}\text{Ne}/^{22}\text{Ne}$ 、 $^{36}\text{Ar}/^{84}\text{Kr}$ 、 $^{84}\text{Kr}/^{132}\text{Xe}$ 比が物質表面から数十ナノメートルのスパッタリングで説明できるが、 $^{20}\text{Ne}/^{22}\text{Ne}$ 比と太陽風照射量との関係性を再現するには一般的なモデルでは不十分であることを明らかにした。

以上の結果は、ナノメートルスケールの希ガスの分布を定量的に分析する事により初めて詳細な議論が可能となった最先端の研究結果である。確立された分析手法は他の地球外物質にも適用できるものであり、希ガス宇宙・地球化学研究に新たな視点をもたらすものである。

よって著者は、北海道大学博士（理学）の学位を授与される資格あるものと認める。