

# 論文審査の結果の要旨

氏名 山田 真保

本論文は、フォルステライト ( $\text{Mg}_2\text{SiO}_4$ ) の蒸発に伴うMgの同位体分別および拡散のカイネティクスに関するもので、以下の八章からなる。

第一章は序論として、低圧・高温条件下での鉱物の蒸発が、原始太陽系星雲における化学分別・同位体分別に重要であることを述べ、宇宙での主要鉱物であるフォルステライト結晶を対象に、カイネティックな蒸発過程および蒸発に伴う同位体分別の今までの実験的研究について概括している。フォルステライトの様々な物性は異方性を示すが、蒸発に伴う同位体分別に関しては、これまで異方性が確認されていない。本論文の目的は、拡散が支配する単結晶フォルステライトの蒸発を利用し、Mgの自己拡散と蒸発時の同位体分別について異方性を調べることである。これらの異方性から蒸発過程のメカニズムを明らかにし、天然試料へ応用することで初期太陽系星雲の熱史を詳しく解析できる可能性があることを主張している。

第二章ではフォルステライトの真空蒸発実験を行い、蒸発速度を求めている。合成フォルステライト結晶を真空チャンバ中で加熱し蒸発させている。蒸発速度および同位体分別の異方性・温度依存性・時間変化について調べるために、結晶軸方向が異なる3種類の試料を用意し、1500 ~ 1750 で、蒸発時間は12 ~ 166時間と変化させて実験している。

第三章では二次イオン質量分析器 (SIMS) を用いたMg同位体分析手法とその改良点について述べ、蒸発試料の表面測定および表面から内部へのプロファイル測定を行っている。出発物質プロファイル測定、深さに依存したSIMS特有の同位体分別の変化を調べ、さらに二次イオン加速電圧にオフセット電圧をかけ、高エネルギーのイオンを測定することで、より安定した測定が行えるようになった。この方法はこれまでよりも約10倍深いプロファイル測定にも有効であることを示した。また、 $^{25}\text{Mg}$ 測定に対する妨害イオンである $^{24}\text{MgH}$ の影響が減少し、 $^{25}\text{Mg}$ の測定精度を向上させている。

第四章では、拡散が支配する場合の同位体分別モデルについて述べている。これはWang et al. (1999)によって導出されたもので、蒸発が十分進行し定常状態であると仮定してモデルが適用されている。しかし、申請者は、拡散係数が不明の場合は、非

定常状態のモデルを用いるのが妥当であると主張している。また、プロファイル測定結果だけでなく、蒸発試料表面の同位体組成の時間変化からも、拡散係数と同位体分別係数を同時に求められることを示した。

第五章では、Mg 同位体の表面組成測定結果およびプロファイル測定結果についてまとめ、両者の異方性を見いだしている。第四章のモデルと第二章で得た蒸発速度を用いて、Mg 自己拡散係数と同位体分別係数を、それらの異方性を議論するのに十分な精度で決定している。また定常状態に達するのは  $a$  軸、 $c$  軸方向では 1600 以上で蒸発させた場合で、それ以外は定常状態に達していないことを示した。

第六章では、Mg の自己拡散係数について議論している。この温度範囲でフォルステライトの  $b$ 、 $c$  軸方向の Mg 自己拡散係数を求めたのは本論文が初めてであり、 $c$  軸方向の拡散速度が大きいという明らかな異方性を発見した。本論文で求められた活性化エネルギーは、今までの低温での結果より大きい値を示す。これは 1500 以上では内因的欠陥が、不純物による外因的欠陥より卓越し、内因的な拡散が起こっているためであると、結論している。

第七章では Mg の蒸発による同位体分別係数について議論している。同位体分別係数は  $c$  軸方向が  $b$  軸方向より大きく、この異方性を確認したのは、申請者が初めてである。蒸発による同位体分別係数については、気体分子運動論から蒸発分子質量比の逆数の平方根であると予想されるが、これまでの実験値は全て予想値より小さく、その原因は今まで明らかにされていない。申請者は、表面での蒸発の素過程について考察し、同位体分別係数は、特に凝縮相表面に吸着した同位体結合する原子（団）の振動数脱離に起因すると結論し、予想値と実験値の差および異方性について説明した。

第八章は結論で、フォルステライト蒸発試料の Mg 同位体分析から Mg の自己拡散係数と同位体分別係数を同時に求め、それぞれに異方性があることを発見した。1500 以上では Mg はフォルステライト中で内因的拡散を起こすことを示した。同位体分別係数の異方性の原因、および同位体分別係数の予想値と実験値の差について、蒸発の素過程から考察し、分別が表面吸着同位体の離脱速度に依存していると考えらることで説明可能であることを示した。

以上のように、山田真保の業績は、惑星科学の発展に重要な寄与をするものであり、博士（理学）取得を目的とする研究として十分であると審査員一同が認めた。なお、本論文の一部は、複数の研究者との共同研究であるが、論文提出者の寄与は十分であると判断する。

従って、博士（理学）の学位を授与できると認める。