

論文審査の結果の要旨

氏名 酒井 理紗

月の平均元素組成は、地球-月系の形成と月の初期進化を理解する上で非常に重要な量である。この問題は、従来から様々な研究者が取り組んできた問題ではあったが、月探査で得られた個々の観測量を個別に検討する手法が採られてきた。本論文は、マグマオーシャンから斜長岩質地殻が形成する物理的・化学的条件を満たされねばならないという制約を月の平均元素組成に課することによって、様々な探査結果を系統的に検討するというアプローチを初めて採った。その結果、月の平均元素組成に関して幾つかの重要な新しい制約条件を得ることに成功している。

本論文は6章から構成される。

第1章は、イントロダクションであり、これまでの探査が得た月内部構造に関する観測事実と、月の起源と初期進化に関する現状の理解をレビューした上で、月の平均元素組成の重要性を述べている。先行研究では、月の起源・進化に対して特に重要な FeO 量と Al₂O₃ 量に対して、それぞれ地球物理的手法、地球化学的手法によって独立に推定しているために、強い制約は得られていなかった。しかし、月の形成と初期進化には、どちらも多成分系の化学進化が密接に関わっているため、両者を同時に推定することの重要性が述べている。

第2章では、マグマオーシャンの化学・物理的進化を評価するために本研究で構築した分化モデルについて述べている。先行研究では、最大分別結晶化と平衡結晶化という二つの両極端な結晶分離モデルによって、マグマオーシャンの分化が取り扱っていた。本研究では、マグマからの結晶分離効率をパラメーターとすることで、最大分別結晶化と平衡結晶化の間の分化過程を任意に扱うことができる多段階分離モデルを用いている。マグマオーシャン分化過程に対する結晶分離効率の影響を評価できるモデルを構築したのは、月科学においては初めての試みである。

第3章では、構築した分化モデルを用いて、MELTS プログラムによる熱力学計算と組み合わせで得られた結果を述べている。マグマオーシャンの冷却に伴い結晶化する主要鉱物の種類や析出順序、地殻が形成し始めるまでのマグマオーシャン固化率に関して先行研究と矛盾がないことを確認した上で、様々な初期条件のマグマオーシャンに対して行った計算結果から、初期 FeO 量、初期 Al₂O₃ 量、結晶分離効率のそれぞれが、地殻形成時までの残液組成、析出鉱物量比に与える影響を明らかにした。

第4章では、分化モデルの計算結果をもとに、現在の斜長岩質地殻を説明するための四つの制約条件を検討している。一つ目の制約条件では、観測された地殻厚を作るに十分な斜長石量が析

出すという条件で、 Al_2O_3 量の下限値を決定している。二つ目の制約条件では、乱流状態のマグマオーシャン中で斜長石が浮上分離するという条件で、 FeO 量の下限値を決定している。三つ目の制約条件では、地殻中の斜方輝石の Mg\# を作れるメルト組成でなければならないという条件で、 FeO 量の上限値を決定している。四つ目の制約条件では、地殻を構成する斜長石の希土類元素パターンからマントル中の単斜輝石量を推定しており、 Al_2O_3 量の上限値を決定している。

これらの四つの制約条件から、月のバルク組成は地球の岩石成分のバルク組成に対して、1.2–1.8 倍の FeO 量、0.8–1.1 倍の Al_2O_3 量と従来の推定に比べ非常に狭い組成範囲に制約された。特に重要な結果は、月の Al_2O_3 量は地球以下であるという点である。これは、長年信じられてきた月が地球より多い Al_2O_3 量を持つとの推定が必ずしも正しくないことを意味する。この Al_2O_3 量推定は、マグマオーシャンの詳細な物理過程にほとんど依存せず、マントル形成過程で単斜輝石がほとんど析出しない ($< 3 \pm 1 \text{ wt\%}$) との結論から導かれているため、信頼性が高い。

第5章では、制約した月平均元素組成が持つ月の起源と初期進化に対する波及効果について述べている。月の起源に関しては、近年議論されている3つの巨大衝突モデルに対して、起こりうる月円盤での高温での化学進化を考慮すると、衝突天体組成の月円盤が形成される巨大衝突モデルを支持する。これは FeO 量と Al_2O_3 量を同時に高い精度で制約した結果初めて得られた知見である。また月の初期進化に関しては、制約した組成から形成される内部構造が示されている。マグマオーシャンから形成される内部構造は、マントルオーバーターンや海の玄武岩のソースとなる初期条件を与えるものであり、これらの研究に対する貢献が期待される。

第6章では、全体の結論を述べている。

なお、本論文は永原 裕子氏、小澤 一仁氏、橋 省吾氏、久城 育夫氏との共同研究であるが、論文提出者が主体となって、分化モデルの構築および結果の考察を行ったもので、論文提出者の寄与が十分であると判断する。以上のことから、本論文に博士（理学）の学位を授与できるものと認める。