

令和 3 年 6 月 4 日現在

機関番号：62616

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2017～2020

課題番号：17K05643

研究課題名(和文)地球物理観測と熱化学的制約を統合した月内部構造の研究

研究課題名(英文) Study of lunar internal structure by combining geophysical observation and thermochemical constraints

研究代表者

松本 晃治 (Matsumoto, Koji)

国立天文台・RISE月惑星探査プロジェクト・准教授

研究者番号：30332167

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,300,000円

研究成果の概要(和文)：月のマントルについて、組成と温度をパラメータとして密度と弾性率を計算する定式化を行い、仮定した温度範囲の下で、最新の測地観測データおよびアポロ走時データと調和的な月内部構造モデルをマルコフ連鎖モンテカルロ法によって構築した。その結果、マントルは化学的に少なくとも2層に分かれていることが示唆された。低速度・低粘性層の物質がチタンに富む玄武岩であるとすれば、この層を下部マントルより高温に維持する機構が必要であり、潮汐加熱がその候補となる。

研究成果の学術的意義や社会的意義

内部構造は、月や惑星の起源・進化を考える上で非常に重要な情報であるが、身近な天体である月でさえ観測が限られており、内部構造の不確実性はまだ大きい。本研究では、月についてアポロ時代の月震データと最新の測地データに熱化学的制約を加えることにより、マントル部分の組成を含む月内部構造モデルを構築した。温度の仮定は残るものの、マントルの化学的な成層構造や月深部の潮汐加熱を示唆する結果が得られた。この手法は将来新たな観測データ得られた際の内部構造解析にも適用できると考えられる。

研究成果の概要(英文)：We developed a formulation to calculate density and elastic modulus of the lunar mantle from composition and temperature as parameters. Based on Markov Chain Monte Carlo method we constructed lunar internal structure models that are consistent with both the latest geodetic observation data and Apollo seismic travel time data. The results suggest the existence of at least a two-layered chemical composition of the lunar mantle. If low-velocity and low-viscosity layer is composed of Ti-rich basalt, a mechanism is required to keep this layer hotter than the overlying mantle layer for which candidate is tidal heating.

研究分野：惑星測地学

キーワード：月内部構造 月マントル組成 潮汐加熱

## 1. 研究開始当初の背景

内部構造は、月や惑星の起源・進化を考える上で非常に重要な情報である。最も身近な天体である月の場合、月震、月レーザ測距 (Lunar Laser Ranging: LLR)、電磁気、重力、地形の観測によって内部構造が拘束されてきた。特に、地球以外の天体において地震観測が成功した例は未だ月の他に存在せず、アポロ月震データは内部構造モデルの構築に寄与してきた。しかし、月震観測点は月の表側の限られた範囲にしか存在しないため、約 1000 km より深い部分について、走時データから構造の情報を得るのは困難であった。

一方で、最新の測地観測データが新たな拘束条件を与えつつある。これらには、質量、平均半径、慣性モーメント、潮汐ラブ数  $k_2$ 、エネルギー消散を表すクオリティーファクター  $Q$  が含まれる。潮汐ラブ数は潮汐力に対する天体の応答を表し、密度、弾性率、粘性率の内部プロファイルに依存する。測地観測データは、2011 年に打ち上げられた米国の Gravity Recovery and Interior Laboratory (GRAIL) により飛躍的に向上した。 $k_2$  の推定精度は約 1% まで向上し [Konopliv et al., 2013]、GRAIL で精度が向上した重力場係数や  $k_2$  を LLR のデータ解析に導入することにより、慣性モーメントや  $Q$  の推定精度が向上した [Williams and Boggs, 2015]。

マントル最下部に低速度層が存在し、部分溶融が起きていることは S 波の減衰から示唆されてきた。Harada et al. [2014] は、この層において粘性が極めて低ければ、LLR で推定された  $Q$  の周波数依存性を説明できることを数値計算で示した。この結果は、月深部の比較的狭い領域で潮汐エネルギー消散による熱が集中して生じていることを示唆する。我々の先行研究では、Harada et al. [2014] のアイデアを取り入れ、アポロ月震計データと GRAIL・LLR による最新の測地データの双方に調和的な月内部構造を推定した [Matsumoto et al., 2015]。先行研究 [Weber et al., 2011] では低速度層の厚さは 150 km、密度は 3400 kg/m<sup>3</sup> であったが、我々の先行研究では低速度・低粘性層の厚さは少なくとも 170 km、密度は 3450 ~ 3650 kg/m<sup>3</sup> と推定された。核・マントル境界付近の圧力 (約 4.5 GPa) 下におけるこの密度は、高温高压実験 [Sakamaki et al., 2010] で測定されたチタンを多く含む玄武岩の密度と調和的である。マグマオーシャンが固化する最終段階で、マントル上部に形成されたチタン富裕層が、重力不安定を起こして深部に沈んだと言われている (マントルオーバーターン仮説)。この結果は、マントルオーバーターンの痕跡を見ている可能性がある。

このように、月内部構造研究は月の進化や熱史を制約しうるが、必ずしもデータの質と量が十分でない為、不明な点も多い。たとえば、マントルはどのようなバルク組成を持つのか、低速度層は本当に部分溶融しているのかはよく分かっていない。それらに迫るためには、組成と温度のモデル化も必要である。

## 2. 研究の目的

地球物理データと熱化学的制約を統合し、マントルの鉱物組成と温度構造を含めた月内部構造モデルを構築する。現在我々が手にしている観測値を用いて分解できる月内部構造はどの程度なのかを明らかにし、最適なパラメータ数でインバージョンを行う。マントル最下部にあると言われる低速度層が部分溶融しているかを調べ、その維持に潮汐加熱がどの程度寄与しているかを明らかにする。これらの結果を用いて月の進化や熱史を議論する。

## 3. 研究の方法

月を 9 層の球殻に分割し、各層の厚さ ( $t$ )、密度 ( $\rho$ )、弾性率 ( $\mu$ )、粘性率 ( $\eta$ ) をパラメータとした。マントル部分については、 $Al_2O_3$ 、 $FeO$ 、 $MgO$  それぞれの濃度と温度を 1 次パラメータとし、これを基に 2 次パラメータである密度 ( $\rho$ )、弾性率 ( $\mu$ ) を計算するコードを開発した。マントル組成は、Kronrod and Kuskov [2011] に従ってギブスエネルギーを最小化することにより熱化学的に計算した。

マントルは 4 分割し、かつて存在した Lunar Magma Ocean は上部 3 層の深さまで達し、化学組成的に混合していると仮定した [Kronrod and Kuskov, 2011]。これはマントルを化学組成の観点で 2 層、地震学の観点で 4 層に分けることに相当する。 $Al_2O_3$  のバルク量に関して、Bulk Silicate Earth (BSE) 的なモデルと難揮発性元素に富む Bulk Silicate Moon (BSM) モデルの二つを考慮した。観測値として月の質量、慣性モーメント、ポテンシャルラブ数  $k_2$ 、1 か月および 1 年周期の  $Q$ 、月震走時を考え、観測値に合うパラメータをマルコフ連鎖モンテカルロ法で推定した。

## 4. 研究成果

図 1 に深さ 1000 km における温度を 1200 K と仮定した場合の P 波、S 波速度プロファイルを、図 2 に  $Al_2O_3$  のバルク量が BSE 的なモデルにおいて、下部マントル中の深さ 1000 km における温度を 950 ~ 1400 K と変化させた場合に得られたマントルパラメータの事後分布を示す。図 2 から、どの温度プロファイルであっても、下部マントルの  $Al_2O_3$  濃度は上部マントル 3 層のそれよ

り大きく推定され、マントルは化学的に二分されることが示唆される。SiO<sub>2</sub>濃度はパラメータではないが、システム全体として酸化物が 100 wt%となることから計算でき、その値は 52~53 wt%であった。BSE より高い SiO<sub>2</sub>濃度は、上部マントルを構成する鉱物は olivine より low-Ca orthopyroxene が支配的であることを示唆する。深さ 1000 kmにおける下部マントルの温度が 1350 以上の場合、1次パラメータやP波速度の事後分布が不安定となった。したがって、下部マントルの温度の上限は 1250 程度と考えられる。下部マントル直下の低速度・低粘性層の密度は 3400kg/m<sup>3</sup>以上と推定され、Matsumoto et al. [2015]の結果と調和的であった。一方、Sakamaki et al. [2010]の高圧実験で考慮されている温度の下限值はおよそ 1400 である。低速度・低粘性層の物質がチタンに富む玄武岩であるとすれば、温度勾配を考慮してもこの層を下部マントルより高温に維持する機構が必要であり、潮汐加熱がその候補となる。なお、難揮発性元素に富むBSMモデルを用いても同様な結論が得られる。

本研究の方法は、将来新たな月震データ等が得られた場合に应用できると考えられる。また、火星など地震データが得られつつある他の天体への応用も考えられる。

## 引用文献

- Harada, Y., et al. (2014), Strong tidal heating in an ultralow-viscosity zone at the core-mantle boundary of the Moon, *Nat. Geosci.*, 7, 569-572, doi:10.1038/NGEO2211.
- Konopliv, A. S., et al. (2013), The JPL lunar gravity field to spherical harmonic degree 660 from the GRAIL primary mission, *J. Geophys. Res. Planets*, 118, 1415-1434, doi:10.1002/jgre.20097.
- Kronrod V.A., Kuskov O.L., 2011. Inversion of seismic and gravity data for the composition and core sizes of the Moon. *Izv. Phys. Solid Earth* 47, 711-730, <http://dx.doi.org/10.1134/S1069351311070044>
- Matsumoto, K., et al. (2015), Internal structure of the Moon inferred from Apollo seismic data and selenodetic data from GRAIL and LLR, *Geophys. Res. Lett.*, 42, 7351-7358, doi:10.1002/2015GL065335.
- Sakamaki, T., et al. (2010), Density of high-Ti basalt magma at high pressure and origin of heterogeneities in the lunar mantle, *Earth Planet. Sci. Lett.*, 299, 293-297, doi:10.1016/j.epsl.2010.09.007.
- Weber, R. C., P.-Y. Lin, E. J. Garnero, Q. Williams, and P. Lognonné (2011), Seismic detection of the lunar core, *Science*, 331, 309-312, doi:10.1126/science.1199375.
- Williams, J. G., and D. H. Boggs (2015), Tides on the Moon: Theory and determination of dissipation, *J. Geophys. Res. Planets*, 120, 689-724,doi:10.1002/2014JE004755.

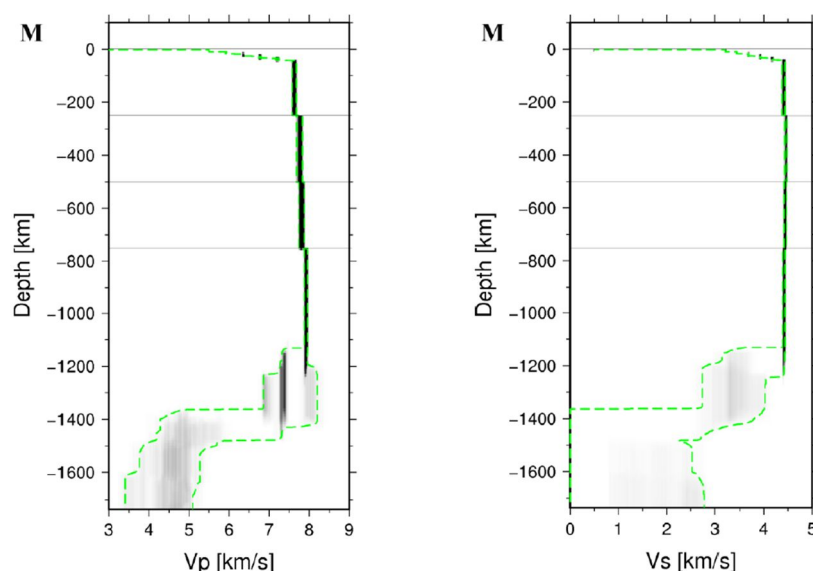


図1 深さ 1000 kmの温度を 1200 と仮定した場合の P 波および S 波速度構造。黒色が濃いほど確率が高いことを示す。緑の線は 95%信頼区間を示す。

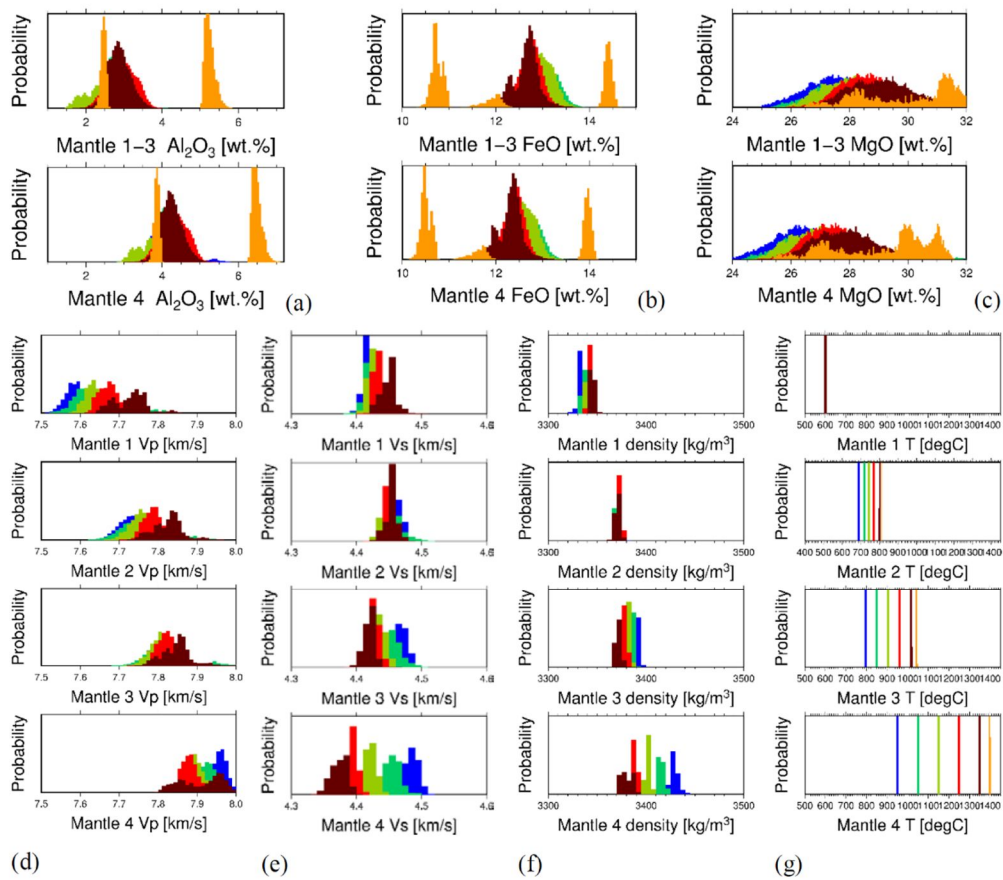


図2 マントル4層における、1次パラメータの事後分布：(a)  $\text{Al}_2\text{O}_3$ 濃度、(b) FeO濃度、(c) MgO濃度、2次パラメータの事後分布：(d) P波速度、(e) S波速度、(f) 密度、および、(g) 深さ150 km、375 km、625 km、1000 kmにおける温度。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計2件（うち査読付論文 0件/うち国際共著 2件/うちオープンアクセス 2件）

1. 著者名 E. Kronrod, K. Matsumoto, O. Kuskov, V. Kronrod, R. Yamada, and S. Kamata	4. 巻 468
2. 論文標題 Joint inversion of geophysical (seismic and selenodetic) and geochemical data for internal structure and composition of the Moon	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering	6. 最初と最後の頁 12015
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1088/1757-899X/468/1/012015	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 該当する

1. 著者名 E. Kronrod, K. Matsumoto, O. Kuskov, V. Kronrod, R. Yamada and S. Kamata	4. 巻 1301
2. 論文標題 The effect of temperature distribution in the lunar mantle on joint inversion of geochemical (bulk chemical composition), seismic and selenodetic (GRAIL and LLR) data	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Journal of Physics: Conference Series	6. 最初と最後の頁 12001
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1088/1742-6596/1301/1/012001	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 該当する

〔学会発表〕 計2件（うち招待講演 0件/うち国際学会 2件）

1. 発表者名 E. Kronrod, K. Matsumoto, O. Kuskov, V. Kronrod, R. Yamada, and S. Kamata
2. 発表標題 Adjustment of geophysical and geochemical models of the Moon
3. 学会等名 The 49th Lunar and Planetary Science Conference（国際学会）
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 E. Kronrod, K. Matsumoto, O. Kuskov, V. Kronrod, R. Yamada and S. Kamata
2. 発表標題 The effect of temperature distribution in the lunar mantle on joint inversion of geochemical (bulk chemical composition), seismic and selenodetic (GRAIL and LLR) data
3. 学会等名 Fundamental and applied problems of mechanics - 2018 (FAPM-2018)（国際学会）
4. 発表年 2018年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究協力者	Kronrod Ekaterina (Kronrod Ekaterina)		
研究協力者	原田 雄司 (Harada Yuji)		
研究協力者	Kronrod Victor (Kronrod Victor)		
連携研究者	鎌田 俊一 (Kamata Shunichi) (40723474)	北海道大学・大学院理学研究院・准教授  (10101)	

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関			
ロシア連邦	ベルナツキー地球化学・分析化学研究所 (GEOKHI RAS)			
中国	澳門科技大学太空科学研究所			