

氏 名 菅 野 貴 之

学位（専攻分野） 博士(理学)

学 位 記 番 号 総研大甲第752号

学位授与の日付 平成16年3月24日

学位授与の要件 数物科学研究科 天文科学専攻

学位規則第4条第1項該当

学 位 論 文 題 目 Lunar Interior Studies Using the Lunar

Prospector Line-of-sight Acceleration Data

論 文 審 査 委 員 主 査 教授 真鍋 盛二  
教授 河野 宣之  
教授 日置 幸介  
助教授 佐藤 忠弘  
助教授 阿部 豊 (東京大学)

## 論文内容の要旨

Gravity field studies have been playing an important role in investigating physical properties, origin, and evolution of terrestrial planets and satellites. Information on the Moon's gravity field has been provided by radio tracking data of lunar satellites. The study began in 1966 with the satellite Luna 10, followed by Lunar Orbiters I-V and Apollo 15, 16 sub-satellites in 1960's. Several gravity field models, based on a spherical harmonic expansion, were produced from the analysis of the tracking data. The accuracy of the gravity model was dramatically improved by the recent two lunar satellites, the Clementine and the Lunar Prospector in 1990's.

The Lunar Prospector was launched on January 7, 1998. After finishing the 1 year nominal mission at the  $100\text{km} \times 100\text{km}$  polar orbit, 6 months long extended mission was carried at the average height of 30km. The highest-resolution gravity model called LP165P was produced from the low-altitude extended mission tracking data. Lunar gravity studies have a difficulty peculiar to the Moon. i.e., direct tracking data are available only at the lunar nearside because of its synchronized spin and orbital motion. The lack of farside data has been hindering us from making high resolution gravity anomaly map. In fact, the LP165P gravity anomaly map, obtained imposing artificial constraints to stabilize the estimation of coefficients using only nearside tracking data, has many spurious linear features; the model is reliable only up to 110<sup>th</sup> degree/order at the farside.

On the other hand, line-of-sight acceleration of the Lunar Prospector satellite during its extended low-altitude mission are available at the Planetary Data System Geosciences Note web site. Direct inversion of such data into surface mass distribution has two merits, i.e., high resolution can be attained without relying on artificial constraints, and short computation time by estimating regional parameter sets stepwise. We downloaded the LOS data product and used them for analysis of lunar gravity field. We assume that masses giving rise to the gravity anomaly are condensed in a thin layer on the lunar reference surface. First the surface is divided into large blocks as large as 500-600km, then they are subdivided into small blocks of about 25km in size. Assuming gravity anomaly at satellite positions are sum of the gravity fields of these small blocks, we estimated their masses using the least-squares method. The validity of the method is also confirmed using synthesized data. We moved the position of large block throughout the nearside to get the free-air gravity anomalies over the entire nearside. Resolution of the obtained anomaly map is equivalent to conventional model using spherical harmonics complete to 225<sup>th</sup> degree/order. Our model has much less spurious signatures than past models.

To take advantage of the high resolution of the obtained map, we calculated mass deficits associated with medium-sized craters (mostly formed in 4.6-3.9 Gy before present, 80-300km in diameter). They are found to be nearly proportional to 2.6 power

of crater diameter. This is somewhat smaller than those inferred from topographies, which may be due to the existence of higher density impact melt sheet on the crater floor.

Next we performed terrain corrections for the raw LOS acceleration data using the lunar topography grid data obtained by the Clementine laser altimetry. By conducting same inversion for the corrected data, we obtained Bouguer gravity anomaly map that mainly reflects the topography of Moho. Mass deficits are not seen in the Bouguer anomaly map for the medium-sized craters, suggesting that isotatic compensation did not occur for craters up to 300km in diameter. This indicates the lunar lithosphere was already as thick as 100km at the time of these crater formations, which will serve as an important constraint to discuss the initial thermal status and the cooling history of the Moon since its genesis.

## 論文審査結果の要旨

直接見えない地下構造を探る手段として、重力は測地学の重要分野として昔から研究されてきた。惑星探査の時代の到来とともにつき惑星の重力場がそれを集会する人工衛星の起動の摂動から計測されるようになった。短波長の重力異常からは比較的浅い部分の密度構造やアイソスタシー補償の情報が得られ、長波長の重力異常からは自転の遠心力や他天体の潮汐力がもたらす天体の大局的な形や地下深部の構造（流体核の存在等）に関する情報が得られる。巨大衝突による誕生、表と裏の二分性、冷却史など月の起源と進化に関する様々な課題に重力を切り口に取り組みことは月科学にとって有意義と考えられる。

月の重力の研究はソ連のルナ計画やアメリカのアポロ計画で始まり、最近のクレメンタイン衛星やルナー・プロスペクター衛星（いずれもアメリカ）で地形データを利用して、月の表側の短波長の重力異常を求め、そこから月浅部の構造、リソスフェアとアイソスタシー補償、月の熱史等を論じたものである。

従来月の重力場は他の天体と同様に重力場ポテンシャルを球関数で展開したときの係数（ストークス係数）として表現されてきた。しかし月は自転と公転が同期しているため、地球から裏側を見ることができない。重力場のモデルは、月を周回する衛星の電波を地球局で受信した際の周波数のドップラーを計測データとして求められる。従って月の重力モデルの推定は、片側だけの計測データをもとに本質的にグローバルな関数であるストークス関数を推定するという悪条件のもとに行われている。そのため従来は、次数とともに係数が小さくなるという仮定（カウラの法則）を拘束条件として用いていた。しかし拘束条件の強さに仮定が介在するため、同じ計測データを用いても研究者によって得られるモデルが大きく異なる難点があった。また計算機の処理能力の関係で、高次係数まで一気に推定するのが困難であった。申請者が考案した、regionalに月表面の質量分布を直接推定する方法はこの二つの難点を克服したものであり、実用的な価値が高い。

得られた重力異常図は、短波長成分のノイズが小さい点が特長である。申請者はそれを生かすためにクレーター（衝突盆地）という(1)同一の原因で生じ、(2)様々なサイズがそろった地形に注目し、それらの重力異常から月科学的な諸問題に取り組んだ。まず生の重力異常（フリーエア異常）から中規模のクレーター（直径 60km~300km）の質量欠損とクレーター直径の関係を経験的に求めた。そのべき乗の数値は重力を用いて月で初めて決定されたものであるが、地球上で発見されたより少数、かつ小規模なクレーターについて推定された値に近いものであった。またモデルに当てはめた後のデータのばらつきが、申請者の重力異常図に基づくものの方が、ストークス係数で表した従来の重力異常図を用いた場合より有意より小さくなることが確認された。

さらに申請者はレーザ高度計のグリッドデータを用いて月表面地形による重力異常の分を取り除き（地形補正）、主に地下の構造を反映する重力異常図（ブーゲー異常）を作成した。月の地下浅部で大きい密度コントラストを持つのは軽い地殻と重いマンツルの境界であるモホ面である。クレーターのような凹地ができると、モホ面が持ち上がってアイソスタシー補償を達成しようとする。しかし実際には月の冷たい表面からある程度の深さまでの部分（リソスフェア）が硬くなっており（粘性が下層より何桁も高い）、そのたわみ剛性の影響で、長波長の地形と短波長の地形で補償の程度が異なる。申請者は直径 300km

程度までのクレーターの下のもホ面は平らである（ブーゲー異常がゼロ）ことを見出し、短波長の地形がリソスフェアの剛性で支えられていることを確認した。これは従来誤差の大きい重力異常図をベースに行われていた混乱気味の議論に決着をつける重要な結論である。

リソスフェア厚に拘束条件を与えるためには直径が 300km を越える衝突盆地下のモホの形状を知る必要がある。それらの多くは盆地内での玄武岩質溶岩の噴出によってマスコン（質量集中）となっている。玄武岩は典型的な月の地殻岩石より密度が大きい、申請者は海の玄武岩の層厚を見積もってそれらの寄与を取り除く処理を施した。溶岩補正後のブーゲー重力異常から、様々なサイズの衝突盆地下のモホの盛り上がりを求め、多くの衝突盆地が形成されたネクタリアン代のリソスフェア厚が 20km から 60km 程度の間にあることを見出した。誕生当時マグマオーシャンが表面を覆っていた月が徐々に冷却固化し、リソスフェア厚は時代とともに増大してきたと考えられる。申請者によって得られたリソスフェア厚は、マグマオーシャンの深さやその後の月マントル内部の熱対流などに関して月の熱史の解明に必須な拘束条件を与えるものであり、その学術的な意義は高く評価できる。

なお現時点ではサンプル数が少なく決定的な議論は出来ないが、嵐の大洋の中心に近いほどリソスフェアが薄い傾向が見えており、月の温度分布が横方向に不均一であった可能性を暗示している。これは将来の我が国の月探査計画（SELENE 計画）で月の裏側や縁辺部の重力異常データが補強された後の研究方向を示唆する重要な課題である。

なお、審査委員全員の出席の下、公開の論文発表を行った。まず、申請者による論文内容の口頭発表を約 40 分間行い、その後引き続き申請者に対し審査委員及び一般聴講者による質疑応答を約 20 分行った。

申請者は、研究の背景、目的・意義、観測・解析手法の斬新性、また研究結果の要点、その重要性やこの分野に与えたインパクトなどについて、明快に説明し、質疑に対しても的確に対応した。

その後審査委員のみによる審議を行った。その結果、論文の学術的な価値は十分に認められる事、出版済みの学術論文も含めて、申請者の寄与は主である事を確認した。さらに申請者の天文学に関する学識や力量も十分であることを確認し、また論文が明快な英文で記述されている事から、語学力についても問題ないことを確認した。

異常の試験・審査の結果、申請者は天文科学において、博士（学術）の学位を受けるにふさわしい力量を持つものと認め、審査委員全員一致により合格と判定した。