

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 6 月 14 日現在

機関番号：62616

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2011～2015

課題番号：23540500

研究課題名(和文)「かぐや」月全球重力場モデルにもとづく盆地補償メカニズムと形成過程の研究

研究課題名(英文)Lunar Gravity Models Derived from Kaguya Tracking Data: Applications to Formation of the Lunar Basins

研究代表者

竝木 則行(Namiki, Noriyuki)

国立天文台・RISE月惑星探査検討室・教授

研究者番号：50274428

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 4,100,000円

研究成果の概要(和文)：平成23-24年度では月重力モデルと地形モデルの相関解析を実施した。高次の局所重力・地形アドミッタンスは一定の地殻密度に対応して一定になると期待されたが、計算結果は10-30%の変動を示した。よって平成25-26年度は高地の局所アドミッタンス解析に注力した。この研究では月地殻がこれまで想定された以上に密度が小さく、空隙率が高いことが示唆された。平成27年度は盆地タイプの遷移を定量的に検証する数値モデルの構築を計画した。モホ面隆起によって生じる応力場を計算して、断層の発生条件を探索するアルゴリズムについて理論的研究を行った。これらの研究は小惑星探査機はやぶさ2のレーザ高度計開発に活用された。

研究成果の概要(英文)：The correlation of lunar gravity and the topography models were carried out in FY2011-2012. Local admittance of gravity and topography was expected to show constant value corresponding to the crustal density, however, the numerical results revealed a variation of 10 to 30%. Therefore in FY2013-2014, I have focused on the study of local admittance of lunar highland. This study indicated that the density of the lunar highland crust was smaller than previously considered, and that the lunar crust had high porosity. In FY2015, I worked to construct a numerical model to evaluate quantitatively a transition of types of lunar mascon basins. In this model, an uplift of lunar Moho is assumed, and related stress field is calculated. Then development of fault system is theoretically examined. These studies have been utilized in the development of laser altimeter of Japanese asteroid explorer, Hayabusa2.

研究分野：惑星科学

キーワード：内部構造 重力 惑星探査

1. 研究開始当初の背景

(1) 国内・国外の研究動向及び位置づけ

月の重力探査は、1966年に旧ソビエト連邦がルナ10号探査機の軌道解析を行ったことから始まった。その後、アメリカのルナ・オービターやアポロ司令船の追跡データが蓄積され、月重力場は球面調和関数の展開係数として表されるようになった。また、地上局から探査機までの視線方向の加速度が解析され、月表側の海の上には”mascon”と呼ばれる強い正の重力異常があることが発見された。”Mascon”をもつ盆地は”mascon盆地”と呼ばれ、衝突盆地の地下に重大な密度異常が存在していることを意味する。同時に、その密度異常が完全なアイソスタシーに達していないことも示唆している。このように、masconは月の熱史を制約する重要な鍵と見なされてきた。

近年ではKonoplivらがルナ・プロスペクターの観測に基づく重力場モデル、LP165Pを使って月重力場の推定とmasconの研究を行い、月表側と縁辺部の衝突盆地と巨大クレーターを4つのタイプに分類している。残念ながらルナ・プロスペクターを含む過去の月探査では月全球の軌道データが観測されていなかった。月は公転と自転が同期回転しているので、地球に対して常に同じ側(表側)を向けており、地上観測局からは、反対側(裏側)を決して見るできないためである。このため、これまで月全体の1/3におよぶ領域が観測空白域として残されていた。

これに対して「かぐや」では全球重力場の解析を目指して、月裏側に回り込んだ主衛星の軌道を追跡した。リレー衛星とよばれる小型衛星を月周回軌道で分離し、主衛星から地上観測局に向けて発信される測距信号を中継させることで世界で初めて月裏側の4-way観測を成功させた(図1)。新たな観測から導き出された月の重力場モデルは月の二分性や内部構造を探るための貴重な情報を提供している。「かぐや」の成果によって、初めて月の表側と裏側の盆地を比較することが可能となり、月盆地の形成過程を実証的に議論することができるようになった。

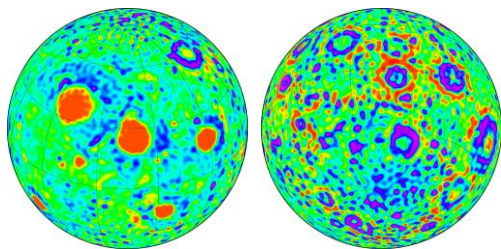


図1 「かぐや」の観測した月のフリーエア重力(2)着想に至った経緯、研究成果を進展させる内容

研究代表者は「かぐや」の月全球重力場モデルに基づく重力異常の特徴から、衝突盆地を

Type I, II, および primary mascon 盆地の3タイプに分類することを提唱している。このうち primary mascon 盆地とは、いわゆる”mascon 盆地”であり、その中でも月重力場観測の初期から同定されてきた最も典型的な mascon 盆地を指す。これに対し、Type I, および Type II 盆地は月の裏側と縁辺部に見つかる衝突盆地で、フリーエア重力異常図では盆地の中心部に正の高まり、それを取り巻く負のリング、さらに外側を取り巻く正のリング、という特徴的な同心円構造を示す(図1および2)。この特徴は「かぐや」の重力観測が初めて明らかにした重力異常パターンであり、月熱史と起源に重要な制約をもたらす発見と考えられる。

月裏側と縁辺部に分布する Type I, II 盆地の同心円構造をもとに、盆地構造形成・進化の定性的なモデルを考えることができる。第一に、外側の負—正のフリーエア重力異常は盆地地形の凹みとリング構造に対応し、ブーゲー重力異常には表れない(図2)。

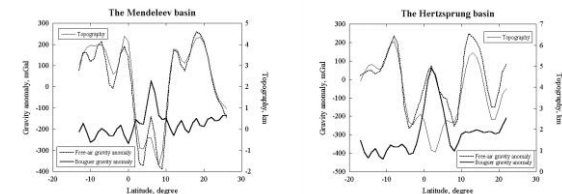


図2 Type I (左)とII (右) 盆地の地形(細い実線)、フリーエア重力異常(点線)、ブーゲー重力異常(太い実線)の経線に沿ったプロフィール。

これは、月裏側の地形がリソスフェアの固い弾性で支えられ続けてきたことを意味する。第二に、Type IとIIの盆地中心の正の重力異常は、衝突時にモホ面の過補償による上昇がそのまま固定されたためと考えられる(図2)。Type I盆地ではこの密度異常をリソスフェアの弾性で支えているが、Type II盆地では脆性変形が起こり、多重リング盆地の形成に結びついたのであろう。また、リング断層系は玄武岩マグマの火道として、溶岩の噴出を誘導したかもしれない。第三に、表側にのみ存在する primary mascon 盆地では地形の凹みとリング構造に対応するようなフリーエア重力異常はなく、弾性的に地形緩和が起きたと考えられる。中心部の重力異常が切り立った台地状の形状をしているのは地殻—マントル境界で集中的な粘性緩和が起こったためで、マグマが地下深部からエントロピーを輸送したと推定できる。このような定性的モデルは「かぐや」の地形・重力データを相関解析することで定量的に評価できる。さらに数値計算モデルを構築することで実証的研究に発展させることができるはずである。

2. 研究の目的

日本の月探査機「かぐや」はリレー衛星によ

る 4-way ドップラ観測により、月裏側の重力場観測を行い、世界で初めて月の全球重力場モデルを完成させた。新しい重力場モデルは、月の表側と裏側では盆地の補償メカニズムが大きく異なっていることを明らかにし、月の熱史に重要な制約条件を与える可能性を示している。我々は「かぐや」の観測結果から、盆地の補償メカニズムが定性的に Type I, II, primary mascon 盆地に分類されることを提唱している。この仮説を地形と重力の相関解析で定量的に検証し、月盆地の補償メカニズムと形成過程を解明する。さらに月内部構造と熱的進化の実証的数値モデルを開発し、「かぐや」の様々な観測データを統合的に理解することを目指す。

3. 研究の方法

盆地の補償メカニズムと形成過程を解明するために、三段階の研究計画を提案する。第一段階はウェーブレット変換による局所地形・重力場解析である。この段階はすでに予備的研究を開始しているため、平成 23 年度は最適窓関数の選択に焦点を絞り、年度内に成果をとりまとめる。第二段階は脆性変形とマグマ熱輸送とりいれた数値モデルの構築であり、平成 24-25 年度に行う予定である。数値計算では境界要素法による弾性・脆性変形モデルと、有限要素法による二相流の温度構造・流動の時間変化モデルをそれぞれ構築する。第三段階では内部構造モデルにもとづく「かぐや」データの統合的理解を目指す。第二段階で構築した内部構造・進化モデルをベースに、形態学的観測データ、元素・鉱物組成データ、リソスフェア変形情報、磁気異常データを取り込んで、初期熱史、二分性、月の起源への観測的制約を考察する。

4. 研究成果

平成 23-24 年度では月重力モデルと地形モデルの相関解析を実施した。高次の局所重力地形アドミッタンスは一定の地殻密度に対応して一定になると期待されたが、計算結果は 10-30%の変動を示した。よって平成 25-26 年度は高地の局所アドミッタンス解析に注力した。この研究では月地殻がこれまで想定された以上に密度が小さく、空隙率が高いことが示唆された。平成 27 年度は盆地タイプの遷移を定量的に検証する数値モデルの構築を計画した。モホ面隆起によって生じる応力場を計算して、断層の発生条件を探索するアルゴリズムについて理論的研究を行った。これらの研究は小惑星探査機はやぶさ 2 のレーザ高度計開発に活用された。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 7 件)

- ① Mizuno, T., Kase, T., Shiina, T., Mita, M., Namiki, N., Senshu, H., Yamada, R., Noda, H., Kunimori, N., Hirata, N., Terui, F., Mimasu, Y., Development of the Laser Altimeter (LIDAR) for Hayabusa2, Space Science Reviews, 2016, in press, DOI 10.1007/s11214-015-0231-2.
- ② Senshu, H., Oshigami, S., Kobayashi, M., Yamada, R., N. Namiki., Noda, H., Ishihara, Y., Mizuno, T., Dust Detection Mode of the Hayabusa2 LIDAR, Space Science Reviews, 2016, in press, DOI 10.1007/s11214-016-0242-7.
- ③ Yamada, R., Senshu, H., Namiki, N., Mizuno, T., Abe, S., Yoshida, F., Noda, H., Hirata, N., Oshigami, S., and 3 more, Albedo Observation by Hayabusa2 LIDAR: Instrument Performance and Error Evaluation, Space Science Reviews, 2016, in press, DOI 10.1007/s11214-016-0240-9.
- ④ Namiki, N., Mizuno, T., Hirata, N., Noda, H., Senshu, H., Yamada, R., Ikeda, H., Matsumoto, K., Oshigami, S., Miyamoto, H., Abe, S., Sasaki, S., Araki, H., Tazawa, S., Shizugami, M., Ishihara, Y., Kobayashi, M., Wada, K., Demura, H., Kimura, J., Scientific Use Of LIDAR data Of Hayabusa-2 Mission, 査読有, Proceedings of An International CJMT-1 Workshop on Asteroidal Science, 2014, pp. 74-96, http://www.astro.ncu.edu.tw/people/ip_wing/file/CJMT1_Proceeding.pdf.
- ⑤ 並木則行, 小松吾郎, 白井寛裕, 杉田精司, 宮本英昭, 久保田孝, 石上玄也, 出村裕英, 岡田達明, 三浦弥生, 長勇一郎, 後藤和久, 千秋博紀, 和田浩二, 石橋高, 荒井朋子, 小林正規, 大野宗祐, 火星ローバ検討グループ, ローバによる火星地質調査計画, 地質学雑誌, 査読有, Vol. 118, No. 10, 2012, pp. 606-617, DOI:10.5575/geosoc.2012.0016.

[学会発表] (計 10 件)

- ① Namiki, N., Mizuno, T., Senshu, H., Yamada, R., Noda, H., Shizugami, M., Hirata, N., Ikeda, H., Abe, S., Matsumoto, K., Oshigami, S., Yoshida, F., Hirata, N., Miyamoto, H., Sasaki, S., Araki, H., Tazawa, S., Ishihara, Y., Kobayashi, M., Wada, K., Demura, H., Kimura, J., Mita, M., Kawahara, K., Kunimori, H., Hayakawa M., Kobayashi, N., Performance of Hayabusa-2 LIDAR in Acceptance and Verification Tests, The 46th Lunar and Planetary Science Conference, 17 Mar. 2015, The Woodlands, USA.
- ② N. Namiki, Lunar Internal Structure Estimated From Local Admittance between

Gravity and Topography, The 1st Beijing Forum on Lunar and Deep-space Exploration (招待講演), 4 Sep. 2013, Beijing, China.

- ③ N. Namiki, T. Mizuno, N. Hirata, H. Noda, H. Senshu, R. Yamada, H. Ikeda, S. Abe, K. Matsumoto, S. Oshigami, S. Sasaki, H. Araki, S. Tazawa, M. Shizugami, M. Kobayashi, K. Wada, Y. Ishihara, H. Miyamoto, H. Demura, J. Kimura, F. Yoshida, N. Hirata, Scientific Use Of LIDAR Data Of Hayabusa-2 Mission, AOGS, 26 Jun. 2013, Brisbane, Australia.
- ④ N. Namiki, N. Hirata, and S. Sugita, Geodetic and geological analysis of 1999JU3 from Hayabusa-2 LIDAR and ONC data, International Asteroid Science Workshop, CJMT 2012 (招待講演), 18 Oct. 2012, Macau, China.
- ⑤ Noriyuki Namiki, Lunar Gravity Models Derived From Kaguya Tracking Data: Applications to Admittance of Lunar Highlands, International Symposium for Lunar and Planetary Science, 27 Mar. 2012, Macau, China.
- ⑥ Noriyuki Namiki, Lunar Gravity Models Derived From Kaguya Tracking Data (RSAT), The 6th KAGUYA Science Working Team Meeting, 10 Jan. 2012, Nagoya University, Nagoya, Aichi, Japan.

〔図書〕 (計 0 件)

〔産業財産権〕

○出願状況 (計 0 件)

○取得状況 (計 0 件)

〔その他〕

ホームページ等

6. 研究組織

(1) 研究代表者

竝木 則行 (NAMIKI, Noriyuki)

国立天文台・RISE 月惑星探査検討室・教授
研究者番号：50274428

(2) 研究分担者

なし ()

(3) 連携研究者

なし ()