

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成25年5月31日現在

機関番号：62616

研究種目：基盤研究（C）

研究期間：2010～2012

課題番号：22540441

研究課題名（和文） 逆VLBIを用いた月・惑星内部構造の研究

研究課題名（英文） Study of lunar and planetary internal structure by inverse VLBI

研究代表者

松本 晃治（MATSUMOTO KOJI）

国立天文台・RISE月惑星探査検討室・准教授

研究者番号：30332167

研究成果の概要（和文）：将来の月探査計画を念頭におき、軌道・重力場解析ソフトウェア GEODYN II に対して逆VLBI観測を扱えるような改修を施した。数値シミュレーションを通して将来ミッションで期待される潮汐ラブ数 k_2 の推定精度を見積もった。潮汐ラブ数などの測地観測とアポロ月震データとを組み合わせることで月内部構造を推定するソフトウェアを開発した。また、耐月面環境アンテナの検討や、火星周回衛星と着陸機の追跡データから火星回転変動を推定するミッションの概念検討を行った。

研究成果の概要（英文）：Bearing future lunar explorations in mind, we modified orbit and gravity estimation software GEODYN II so that it can handle with inverse VLBI observation. We estimated through a numerical simulation the accuracy of tidal Love number k_2 which is anticipated for the future lunar mission. We developed software to estimate the internal structure of the Moon by combining selenodetically observed parameters such as tidal Love numbers and Apollo seismic data. We studied antenna system which is durable on the lunar surface environment. A mission concept was also studied for estimating the rotation of the Mars from satellite-to-satellite tracking data between a Martian orbiter and a lander.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2010年度	1,800,000	540,000	2,340,000
2011年度	800,000	240,000	1,040,000
2012年度	800,000	240,000	1,040,000
年度			
年度			
総計	3,400,000	1,020,000	4,420,000

研究分野：惑星測地学

科研費の分科・細目：地球惑星科学、固体地球惑星物理学

キーワード：月内部構造・重力場・潮汐ラブ数・VLBI・惑星回転

1. 研究開始当初の背景

2007年に打ち上げられた「かぐや」によって重力・地形モデルは大幅に改良された。ドップラ中継により裏側重力場が直接観測され、表と裏の誤差の非対称性はほぼ解消された。相対VLBIデータを加えることにより軌道精度が向上した。レーザ高度計の測距データから、全球高解像度地形モデルが構築された。これらのデータは衝突盆地の形成メカニズムや信頼度の高い地殻厚さモデルの構築に繋がった。ただし、短波長側では次数70次以降で重力場モデルの信頼性に問題があり、この次数が地殻厚さモデルの解像度を制限していた。国外に目を向けると、2009年6月に打ち上げられたLunar Reconnaissance Orbiter (LRO)がさらに精度・解像度の高い地形データを取得中であり、2011年に打ち上げられる予定(研究開始当時)のGravity Recovery and Interior Laboratory (GRAIL)によって重力の短波長成分が大幅に改良されると期待された。表層付近の構造はこの二つのミッションによってさらに理解が進むが、コアや下部マントルなど深部構造に感度を持つ長波長成分(もしくは低次の重力場係数)や潮汐ラブ数の精度については将来ミッションでの改善が必要となると考えられた。また、火星については着陸機を用いた回転変動の観測がほとんど無いため、深部構造に対する理解が進んでいるとは言えない状況であった。そこで我々は新しい測地学的観測手法である「逆VLBI」を適用することによって月・惑星内部構造の推定精度を上げることがを提案した。

2. 研究の目的

本研究は本質的にミッション打ち上げ前のフィージビリティスタディであり、以下の点を明らかにする。逆VLBIをシステムとして実装する際に考えられる技術的な問題点とその解決策を検討し、目標とする観測精度を明らかにする。重力場を推定するソフトウェアに対して、逆VLBIを観測量として追加する修正を行う。これを用いて、様々なミッションシナリオに対するシミュレーションを行い、達成される重力場係数やポテンシャルラブ数 k_2 の精度を明らかにする。逆VLBI観測量から惑星回転変動を推定するソフトウェアを開発し、シミュレーションを用いて、逆VLBIによって達成される回転パラメータ(歳差・章動・極運動・自転速度変動)の精度を明らかにする。重力場係数 $\cdot k_2$ ・回転パラメータが前述の精度で求めた場合、コアのサイズ、熔融状態、密度など内部構造パラメータがどの程度の精度で決定できるかを明らかにする。

3. 研究の方法

(1) 観測システムの中でも特に重要となるのは、厳しい月面環境に耐えることが要求されるアンテナ部分である。小型・軽量かつ $-200\sim 120^\circ\text{C}$ の広い温度範囲に耐性を有する給電回路およびパッチアンテナ素材の検討を行う。

(2) 「かぐや」の軌道・重力場解析にはNASA Goddard Space Flight Center (GSFC)が開発したGEODYN IIというソフトウェアが用いられた。GEODYN IIは「かぐや」の相対VLBIデータも解析した実績があるソフトウェアであるが、逆VLBIは扱える観測量として組み込まれていなかった。そこで開発元のNASA GSFCを訪問し、David Rowlands博士およびFrank Lemoine博士の協力のもとにソースコードを改修して逆VLBIを観測量として組み込む。

(3) 日本の次期月探査計画SELENE-2で想定されている周回機と着陸機がそれぞれ1機という構成を前提とし、前項で整備したソフトウェアを用いて、従来の観測量である2-wayドップラ・相対VLBIに加えて逆VLBIを用いた場合にどのような精度で重力場係数や潮汐ラブが推定できるかに関するシミュレーションを行う。

(4) 月に関する測地データ(質量、慣性モーメント、ラブ数 h_2, k_2)およびアポロ月震計による走時データが与えられた場合に内部構造を推定するソフトウェアを開発し、(3)で得られた測地データの精度を仮定すると内部構造がどのように推定されるかに関するシミュレーションを行う。

(5) 日本の火星探査計画MELOSを念頭に置き、周回機と着陸機を用いた火星回転変動観測の概念検討を行う。

4. 研究成果

(1) 耐月面環境アンテナの要素検討

給電回路に適用可能と考えられる工法として半田付け、ボンディング、勘合の3つを考え比較検討した。考慮すべき月面の温度環境は -200°C から 120°C とした。半田付けは合金形成による接続工法であるが、半田そのものが高・低温の温度サイクルにさらされると、合金を形成している各金属の組織が肥大化、合金としての性質が損なわれて劣化する可能性が高い。

ボンディングは溶接の一種であり、接合部分の信頼性が高い。また、素材として柔らかい金属である金を採用するため、機械的な変形に対する耐性も高く、300°C以上の温度差が生じる月面環境下での使用にも適する。勘合はSMAコネクタに代表される機械的な接続方式であり、素材として採用しているベリリウム銅は-250°Cから200°Cまでの広い温度範囲にて延性を有しており、機械的な接続に必要となるバネ性の保持範囲が広い。以上より、パッチアンテナ基板と同軸コネクタの接続にはボンディングと勘合が適用可能であると考えられるが、機械的な変形に対する耐性を考慮して、図1に示す金ボンディングによる接続が最適であるという結論を得た。

アンテナ基板素材の検討も行った。これまで実績のあるアルミ素材では、比誘電率の温度依存性によって共振周波数が変化するため、性能維持温度範囲が-80°C~80°Cに限定されていた。しかし、基板素材として温度依存性が小さいマコールを使用すれば、月面温度環境でも所要の性能を維持できる見込みがあることが分かった。

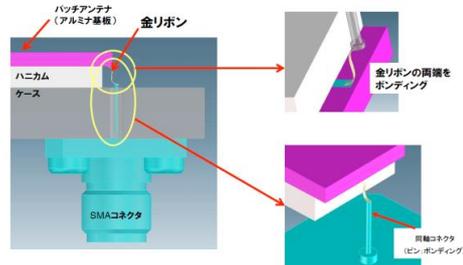


図1 金ボンディングによる給電

(2) 潮汐ラブ数推定シミュレーション

改修したGEODYN IIを用いて、以下の前提条件の下に潮汐ラブ数 k_2 を推定する数値シミュレーションを行った。周回衛星は近月点高度100km、遠月点高度800kmの極軌道（傾斜角=90°）をとる。着陸機の座標は（0°, 0°）とする。地上局は臼田局およびVERA局とする。観測量は2-way Doppler、相対VLBI、および逆VLBIとする。ミッション期間は約3ヶ月（84日）とし、地上局は1日6時間観測するとする。重力場係数の初期共分散として「かぐや」モデルSGM100hを適用し、非保存力のモデル化誤差や着陸点座標誤差の影響を考慮して k_2 誤差はformal errorの10倍として評価する。図2は2-way Dopplerおよび相対VLBIを観測量とした場合に達成される k_2 誤差とアーク長の関係を示したものである。「かぐや」を含む過去の衛星追跡データと合わせ、2週間の

アーク長を確保できれば、 k_2 を1%より良い精度で求めることが出来ることが示された。また、逆VLBIを加えることで1.2倍の精度向上が見込めることが分かった。着陸機が1機の場合は逆VLBIの観測機会が幾何学的に限られてしまうが、複数の着陸機を分散配置すれば、さらに逆VLBIの効果が増えることが期待される。

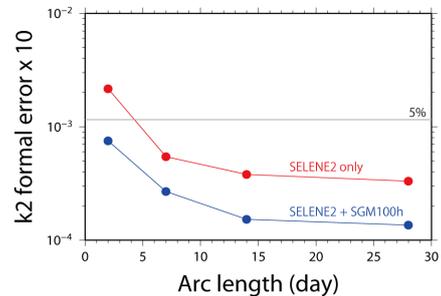


図2. 期待される潮汐ラブ数 k_2 の精度とアーク長との関係。

(3) 月内部構造推定ソフトウェアの開発

最初に1次元月内部構造モデル（密度・横弾性率・体積弾性率の鉛直プロファイル）から k_2 を計算するプログラムを整備し、核の半径と状態（流体か固体か）に対して潮汐ラブ数 k_2 が感度を持つことを確認した。核の半径を350kmとすると、核が固体か流体かで k_2 におよそ5%の差が出ることが分かった。次に、月の質量、慣性モーメント、ラブ数 h_2 、 k_2 が測地データとして得られた場合に月の内部構造を推定するソフトウェアを開発した。内部構造パラメータの数よりデータの数が少ないため、マルコフ連鎖モンテカルロ法によってベイズ推定する手法を採用した。核の構造を拘束するためには、測地データだけでは不十分で、表面からマントル下部までの構造も制約することが肝要であることが分かった。アポロ計画で既に得られた月震データは地殻・マントル構造へ制約を与え得る。そこで、測地データとアポロ計画で取得された深発月震の走時データとを組み合わせることで月の内部構造を推定するようにソフトウェアを改修した。これを用いて、将来ミッションでポテンシャルラブ数 k_2 や低次重力場係数の精度が改善された場合に、どの程度核の構造を拘束できるかを調べるシミュレーションを行った。月内部構造は5層（地殻、上・中・下部マン

トル、流体核)で近似できると仮定する。この場合、k2の精度が「かぐや」モデルの6%程度の場合には流体核の半径を拘束することは出来ないが、将来ミッションで1%のk2の精度が達成されれば、流体核の半径を拘束できることが分かった。図3は核半径の事後分布を示している。シミュレーションで設定した核半径の真の値は380kmであり、推定された値もそれに近くなっている。また、推定値まわりの分布の分散から推定精度は約10%であると見積もられた。ここで整備されたソフトウェアは今後k2などの測地データの精度が向上した際に、月深部構造の研究に役立つと期待される。

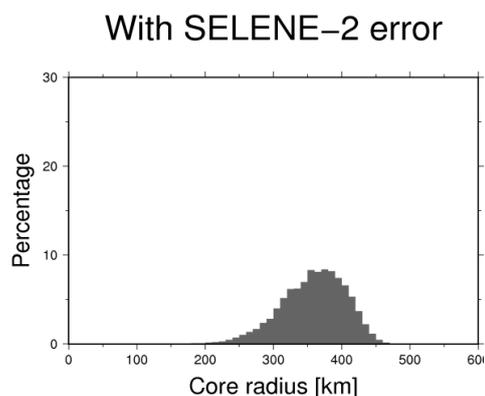


図3. k2精度=1%の条件の下にベイズ推定された流体核コア半径の事後分布。

(4) 火星回転観測の検討

「かぐや」の技術を継承した4-way ドップラや逆VLBI手法を用いた火星回転観測の概念検討を行った。1masより良い精度で回転パラメータを推定することが期待されるが、機器に多くの質量や電力が必要となることが予想される。より効率の良い機器の検討・開発が今後の課題となる。

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2件)

① Iwata, T., K. Matsumoto, Y. Ishihara, F. Kikuchi, Y. Harada and S. Sasaki, Measurements of Martian Rotational Variations by Space Geodetic Techniques, Trans. JSASS Aerospace Tech. Japan, 査読有, Vol. 10, No. ists28, 2012, Pk_25-Pk_29, DOI:10.2322/tastj.10.Pk_25

② Sasaki, S., H. Hanada, H. Noda, F. Kikuchi, H. Araki, K. Matsumoto, H. Kunimori, T. Iwata, S. Goossens, T. Otsubo and K. Funazaki, Lunar Gravity and Rotation Measurements by Japanese Lunar Landing Missions, Trans. JSASS Aerospace Tech. Japan, 査読有, Vol. 10, No. ists28, 2012, Tk_33-Tk_36, DOI:10.2322/tastj.10.Tk_33

[学会発表] (計20件)

① Matsumoto, K., Contribution of SELENE-2 geodetic measurements to constrain the lunar internal structure, American Geophysical Union Fall Meeting 2012, 2012年12月29日, Moscone Center (サンフランシスコ、アメリカ合衆国)

② 松本晃治, SELENE-2/VLBI ミッションによる月内部構造制約、日本地球惑星科学連合2012年大会、2012年05月25日、幕張メッセ

③ Matsumoto, K., VLBI radio sources on a lander and an orbiter for study of lunar internal structure proposed for SELENE-2 mission, European Geosciences Union General Assembly 2011, 2011年4月8日, Austria Center Vienna (ウィーン、オーストリア)

6. 研究組織

(1) 研究代表者

松本 晃治 (MATSUMOTO KOJI)
国立天文台・RISE月惑星探査検討室・
准教授
研究者番号：30332167

(2) 研究分担者

該当なし

(3) 連携研究者

花田 英夫 (HANADA HIDEO)
国立天文台・RISE月惑星探査検討室・
准教授
研究者番号：60132677
(H23→H24:連携研究者)
菊池 冬彦 (KIKUCHI FUYUHIKO)
国立天文台・RISE月惑星探査検討室・
専門研究職員
研究者番号：30465926

荒木 博志 (ARAKI HIROSHI)
国立天文台・RISE月惑星探査検討室・助教
研究者番号：10290884
野田 寛大 (NODA HIROTOMO)
国立天文台・RISE月惑星探査検討室・助教
研究者番号：10290884
佐々木 晶 (SASAKI SHO)
国立天文台・RISE月惑星探査検討室・教授
研究者番号：10183823
