

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 6 月 12 日現在

機関番号：14401

研究種目：基盤研究(A)

研究期間：2012～2014

課題番号：24244072

研究課題名(和文) 探査機VLBI観測による月惑星内部構造の研究：金属核の大きさ・状態と起源

研究課題名(英文) Interior structure of the moon and planets by VLBI observation of spacecraft: Size, state and the origin of metallic core

研究代表者

佐々木 晶 (Sasaki, Sho)

大阪大学・理学(系)研究科(研究院)・教授

研究者番号：10183823

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 35,300,000円

研究成果の概要(和文)：月内部の物理状態とくに金属核・下部マントルの状態を明らかにするため、衛星VLBI電波源観測用の広帯域受信システム(アンテナ)の基礎開発と、測地・月震データに基づく月内部構造推定を行った。S/X帯の同時受信が可能な広帯域特性(2-10GHz)を有するヴィバルディアンテナ(単体およびアレイ)を試作し、性能試験を行った。月内部を8層に分けてマルコフ連鎖モンテカルロ法によって推定した。月の核の半径は最大400km、下部マントルの部分溶融層は200km以上で、密度から酸化チタンに富む可能性がある。

研究成果の概要(英文)：In order to clarify the state of metallic core and lower mantle, we developed wideband radio signal receiving system for observing VLBI resources and we construct plausible models from geodetic and seismic data. We considered a spherically symmetric elastic Moon with eight layers including a low-velocity zone. The thickness, density, and elastic parameters in each layer were estimated using Markov Chain Monte Carlo method. Mean crustal thickness, the radii of the outer fluid core and the solid inner core were estimated to be  $43 \pm 10$  km,  $310 + 90$  km, and 0 - 270 km, respectively. If we take into account the upper bound of the fluid core size of 400 km which is 200 indicated by magnetic observation, the thickness of the low-velocity - partially molten zone at the bottom of the mantle is at least about 200 km. The inferred density of the lowermost mantle suggests lunar magmas with high TiO<sub>2</sub> content which prefer mantle overturn scenario.

研究分野：惑星科学

キーワード：月内部構造 重力 VLBI 潮汐ラブ数 金属核 月の起源

## 1. 研究開始当初の背景

月の起源説では、46億年前の原始地球に火星サイズの天体が衝突したときに放出された物質から形成されたという、巨大衝突説が有力である。形成時の月は、高温溶融状態で、マグマオーシャンが形成され、その中で金属核が分離した。月は揮発性物質に乏しくなる。平均密度や磁場観測から金属核の半径は500km以下と考えられているが、正確には決められていない。探査機の磁気探査により、月表面の一部に磁気異常が残っていることが確実となり、過去に溶融核でダイナモ作用が起きた可能性が高い。また、月レーザ測距による自転変動の解析から、誤差が大きいが現在の月の核が融けていることが示唆されていた。一方で、月下部マントルでは月震源が無いことから、剛性率が低く柔らかい可能性がある。しかし、アポロ着陸計画で設置された熱流量計のデータの再解析結果は、従来の見積りよりも熱流量値が低いことを示しており、高温月内部モデルは考えにくい。月の核が融けているならば、硫黄を代表とする揮発性成分が融点を下げている可能性が高い。月の下部マントルは、地球のアセノスフェアの圧力に相当するので、月の深部に水が存在すれば剛性率は低くなる。最近、月内部からの噴出ガラスに水が含まれていることが明らかになっている。月内部の揮発性成分の存在は、巨大衝突による月の高温起源説に修正を求めることになる。

月内部の柔らかさを表すパラメータが、潮汐ラプ数  $k_2$  である。外力による内部変形をもたらす重力変化の大きさを表す指標である。内部が柔らかければ変形による重力場の変化は大きく、潮汐ラプ数  $k_2$  は高い値をとる。月は地球を楕円軌道で公転するため、地球の潮汐力による内部流動が、低次重力場の変化として観測される。

測地的な観測手法の1つである VLBI は、天体の位置決定や地上局の位置決定だけでなく、近年では月惑星探査にも応用されている。例えば VLBI 技術を用いた探査機の位置決定を通して月や惑星の重力場や回転変動を計測することができる。誤差要因のひとつである大気や電離層による伝搬遅延を取り除くために行う相対 VLBI では、複数の探査機間の距離、あるいは離角が問題となる。SELENE の VRAD ミッションでは、2機の子衛星の離角が小さい場合 (0.1 度以下) には同一ビーム VLBI 法を、離角がそれ以上の場合にはスイッチング VLBI 法を用いて観測を行った。観測周波数は S 帯 (2.2GHz) と X 帯 (8.4GHz) であり、ビーム幅の制限のためにすべての時間で高精度な同一ビーム VLBI 法を適用できなかった (国立天文台 VERA 局の口径 20m の電波望遠鏡の場合、S 帯のビーム幅は約 0.6 度、X 帯では約 0.1 度である)。

## 2. 研究の目的

月内部の溶融状態を明らかにすることが、本研究の大きな目的である。

研究開始時は、そのために、将来月探査における VLBI 低次重力場精密計測のため、(1) 複数探査機電波源を同時に観測できる 2 ビーム相対 VLBI 受信システムの開発・設置・試験を行うこと、(2) 月内部構造モデルの検定により  $k_2$  観測精度、相対 VLBI 観測への要求精度を明らかにすることを計画していた。

NASA の Grail mission が当初の予想以上に高精度に月の低次重力場の値を測定し、 $k_2$  の精度が上がった。そのため、回転変動などの測地パラメータも測定できる広帯域受信システムの基礎開発と、 $k_2$  および他の測地・月震データから最も信頼度のある内部構造モデルを求めることを主目的とした。受信システムの開発と、月内部構造モデルの検定という大きな二本柱という点では変更はない。

## 3. 研究の方法

### 3.1 アンテナ開発

将来の月惑星探査における相対 VLBI 観測を想定し、複数の探査機の常時同時観測を可能とする広帯域・広域受信機システムについて検討を行った。S/X 帯の同時受信が可能なアンテナ素子として広帯域特性 (2-10GHz) を有するヴィバルディアンテナを選択し、広帯域特性はアレイ化による実現を目指した。目標性能は SELENE-2 に提案していた VLBI 電波源ミッションの要求を踏まえ、リターンロス は S/X 帯ともに 3 以下、アレイの利得は S/X 帯ともに 21 dBi 以上、アンテナシステム雑音は S 帯では 650 K 以下、X 帯では 900 K 以下とした。Rajaraman (2004、博士論文) を参考とし、電磁解析ソフトウェア HFSS14.0 を用いてアンテナを設計した。設計においては、スロットラインやキャピティなどアンテナ形状を決めるパラメータの最適化を行った。図 A に設計モデルとパラメータを示す。その後、基板設計、同軸コネクタインターフェイス方式の検討、アレイ化にむけたアンテナ素子の配置検討を行い、単素子アンテナならば 24 素子アレイアンテナを試作した (図 B)。

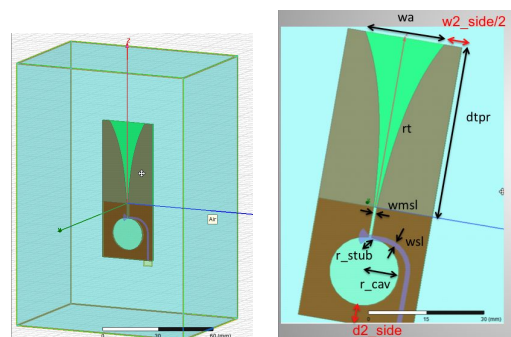


図 A アンテナの設計モデルとパラメータ

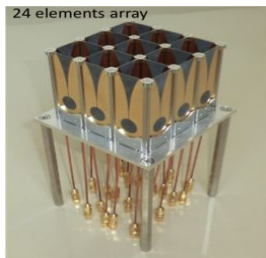


図 B 試作モデル (単素子、アレイ)

### 3.2 月内部構造

質量、平均慣性モーメント、ラブ数などの測月学的な観測データも内部構造を拘束しうる。特にラブ数は天体の潮汐変形のし易さを表す。最新の GRAIL ミッションにより月の潮汐ラブ数  $k_2$  の精度は 1% まで向上した。本研究では、 $k_2$  を含む最新の測月データとアポロ月震計による走時データを組み合わせ、月内部構造を推定した。

月の内部を、レゴリス、地殻、上部・中部・下部マントル、低速度、流体外核、固体内核の 8 層に分けたモデルを考える。推定パラメータはそれぞれの層の厚さ、密度、ずり弾性率、体積弾性率、および粘性率である。ただし、レゴリス層の厚さは 1 km とし、上部・中部マントル境界と中部・下部マントル境界はそれぞれ表面から 500 km、900 km の位置に固定した。マントルと固体内核の粘性率は  $10^{21}$  Pa s、固体内核の密度は  $8000 \text{ kg/m}^3$  と仮定した。59 個の月震源からの 302 個の走時データと、質量、平均慣性モーメント、 $k_2$ 、1 か月および 1 年周期の  $Q$  の値に fit するようなモデルパラメータを、マルコフ連鎖モンテカルロ法によって推定した。

## 4. 研究成果

### 4.1 アンテナ開発

アンテナの電気特性として、リターンロス、ビームパターン、アンテナシステム雑音温度の計測を行った。リターンロスと放射中心方向から 90 度までのビームパターンは電波暗室で計測した。図 C に示すように、S 帯 (2.2 GHz) のリターンロスは 4.2、X 帯 (8.4 GHz) のリターンロスは 1.2 であった。図 D には単素子のビームパターンを、図 E には 12 素子アレイの合成パターンを示す。12 素子アレイの放射中心方向の利得は S 帯では 5 dBi、X 帯では 19.6 dBi (12 素子アレイ) であった。これらの測定値は概念設計時に解析によっ

て得られた性能とほぼ同様の値である。アンテナシステム雑音温度は常温 (20 ) と高温 (90 ) の電波暗箱を製作し、HOT/COLD 法を用いて計測した。

以上の測定結果から、X 帯については要求性能を満たすことを確認したが、S 帯については要求性能を下回った。そこで、最適化を行うパラメータを増やし、アンテナの再設計を行った (図 F)。X 帯の性能を維持したまま、S 帯のリターンロスとビームパターンが改善されることを確認した。

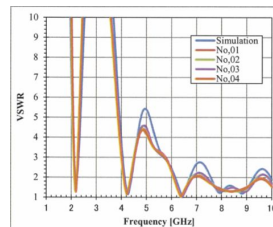


図 C リターンロス

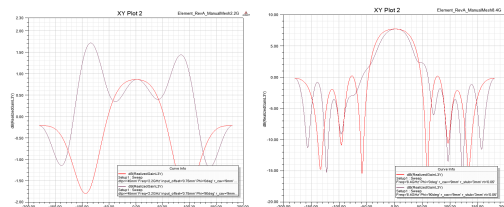


図 D 単素子パターン @2.2 [GHz] 主偏波 (左) と単素子パターン @8.4 [GHz] 主偏波 (左)。赤線は E-Plane、黒線は H-Plane。

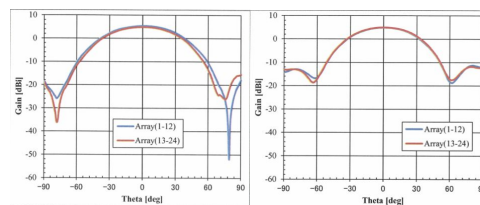


図 E E-Plane 合成パターン (左) と H-Plane 合成パターン (右) @2.2 [GHz] 主偏波

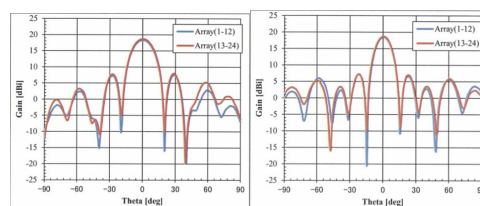


図 F E-Plane 合成パターン (左) と H-Plane 合成パターン (右) @8.4 [GHz] 主偏波

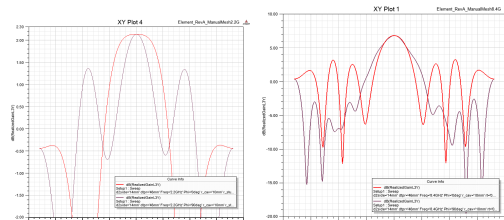


図 G 再設計後の単素子パターン @2.2 [GHz] 主偏波 (左) と単素子パターン @8.4 [GHz] 主偏波 (左)。赤線は E-Plane、黒線は H-Plane。



## 4.2 月内部構造

先行研究と比べると、本研究では低速度層がより厚く、またその層の密度がより高く見積もられた。図 H は流体外核半径と低速度層の厚さについての 2 次元事後確率分布を示す。密度増加は、揮発性物質による融点降下による部分熔融モデルでは説明しにくい。二つのパラメータの間には負の相関がある。すなわち、小さな流体外核には厚い低速度層が伴わなければならない、その逆も成り立つ。流体外核の上限値はおよそ 400 km であり、これは電磁気観測から導かれる上限値 (Shimizu et al., 2013) と調和的である。低速度層は少なくとも 200 km 以上の厚さを持つことが示唆される。低速度層内の P 波速度は  $7.2 \pm 1.0$  km/s、S 波速度は  $2.9 \pm 0.5$  km/s、粘性率は約  $2.5 \times 10^{16}$  Pa s、密度は  $3550 \pm 110$  kg/m<sup>3</sup> と見積もられた。Sakamaki et al. (2010) の高温高圧実験の結果から、低速度層を構成する物質の候補として Ti に富む物質が挙げられる。Elkins-Tanton (2011) が提唱する初期マグマオーシャンのバルク組成から、この層における TiO<sub>2</sub> 含有量は 11~15 wt.% であると示唆される。月深部に Ti に富む物質が存在することは、過去に表層付近で濃集した高密度鉍物が深部に沈み込んだ (マントルオーバーターン) という進化シナリオを支持する。

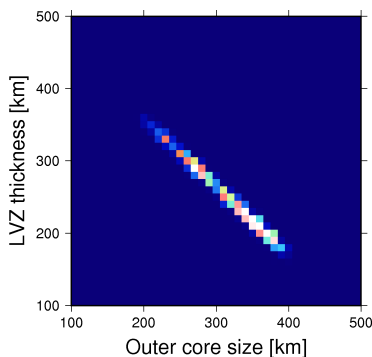


図 H 流体外核半径と低速度層の厚さについての 2 次元事後確率分布。

## 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)

Harada, Y., Goossens, S., Matsumoto, K., Yan, J., Ping, J., Noda, H., Haruyama, J., Strong tidal heating in an ultralow-viscosity zone at the core-mantle boundary of the Moon Nature Geoscience, 査読有, Vol. 7, 2014, pp.569-572, DOI:10.1038/ngeo2211

Yamada, R., Matsumoto, K., Kikuchi, F., Sasaki, S., Error determination of lunar interior structure by lunar geodetic data

on seismic restriction, Physics of the Earth and Planetary Interiors, 2014, 査読有, Vol.231, pp.56-64, DOI:10.1016/j.pepi.2014.02.005

Morota, T., Ishihara, Y., Sasaki, S., Goossens, S., Matsumoto, K., Noda, H., Araki, H., Hanada, H., Tazawa, S., Kikuchi, F., Ishikawa, T., Tsuruta, S., Kamata, S., Otake, H., Haruyama, J., Ohtake, M., Lunar mare volcanism: lateral heterogeneities in volcanic activity and relationship with crustal structure, Geolog. Soc., London, Spec. Publ., 査読有, Vol.401, 2014, pp.1-12 DOI: 10.1144/SP401.11

松本晃治, 日本の月・惑星測地学の現状と今後の展望, 日本測地学会誌, Vol.59, 査読有, 2013, pp.63-70

Kamata, S., Sugita, S., Abe, Y., Ishihara, Y., Harada, Y., Morota, T., Namiki, N., Iwata, T., Hanada, H., Araki, H., Matsumoto, K., and Tajika, E., Viscoelastic deformation of lunar impact basins: Implications for heterogeneity in the deep crustal paleo-thermal state and radioactive element concentration, J.Geophys. Res., 2013, 査読有, Vol.118, pp.398-415, DOI:10.1002/jgre.20056.

Sasaki, S., Ishihara, Y., Goossens, S., Araki, H., Matsumoto, K., Noda, H., Hanada, H., Kikuchi, F., Namiki, N., and Iwata, T., The First Precise Global Gravity and Topography of the Moon by KAGUYA (SELENE), Transaction of Japan Society for Aeronautical and Space Sciences, Aerospace Technology Japan, 2012, 査読有, Vol.10, Tk\_27-Tk\_31, DOI:10.2322/tastj.10.Tk\_27

Sasaki, S., Hanada, H., Araki, H., Noda, H., Kikuchi, F., Iwata, T., Matsumoto, K., Kawano, N., Tsuruta, S., Tazawa, S., Liu, Q., Asari, K., Ishikawa, T., Funazaki, K., Kunimori, H., and SELENE-II group, In Situ Measurements of Lunar Rotation for the Study of the Interior of the Moon, Transaction of Japan Society for Aeronautical and Space Sciences, Aerospace Technology Japan, 査読有, Vol.8, 2012, To\_3\_7-To\_3\_10, DOI: 10.2322/tastj.8.To\_3\_7

[学会発表] (計 22 件) (総件数 65)

Matsumoto, K., Yamada, R., Kikuchi, F., Kamata, S., Ishihara, Y., Iwata, T., Hanada, H., Sasaki, S., Internal structure of the Moon inferred from Apollo seismic

data and selenodetic data from GRAIL and LLR.、The 46th Lunar and Planetary Science Conference、2015年3月16-20日、ウッドランド(アメリカ)

Matsumoto, K., Yamada, R., Kikuchi, F., Kamata, S., Ishihara, Y., Iwata, T., Hanada, H., Sasaki, S.、Lunar internal structure modeling using Apollo seismic travel time data and the latest selenodetic data from GRAIL and LLR、AGU Fall Meeting 2014、2014年12月15-19日、サンフランシスコ(アメリカ)

Yamada, R., Araki, H., Noda, H., Matsumoto, K.、Constraints on source parameters on deep moonquakes and lunar interior structure、AGU Fall Meeting 2014、2014年12月15-19日、サンフランシスコ(アメリカ)

松本晃治、山田竜平、菊池冬彦、花田英夫、鎌田俊一、石原吉明、岩田隆造、佐々木 晶、アポロ月震計による走時データと最新の測月データから推定される月内部構造、日本測地学会第122回講演会、2014年11月5-7日、つくばサイエンス・インフォメーションセンター(茨城県)

松本晃治、菊池冬彦、河野裕介、浅利一善、花田英夫、佐々木 晶、地上局用広帯域・広視野受信機システムの性能評価、日本測地学会第122回講演会、2014年11月5-7日、つくばサイエンス・インフォメーションセンター(茨城県)

Matsumoto, K., Yamada, R., Kikuchi, F., Kashima, S., Ishihara, Y., Iwata, T., Hanada, H., Sasaki, S.、2014、Lunar internal structure inferred from Apollo seismic travel time data and the latest selenodetic data、Japanese-Russian Lunar-Planetary Workshop (JRLPW2014)、2014年10月21日、国立天文台(東京都)、2014年10月24日水沢 VLBI 観測所(岩手県)

Kikuchi, F.、Some effective methods and instruments for VLBI observation of lunar and planetary explorer、Japanese-Russian Lunar-Planetary Workshop (JRLPW2014)、2014年10月21日、国立天文台(東京都)、2014年10月24日水沢 VLBI 観測所(岩手)

Matsumoto, K., Yamada, R., Kikuchi, F., Kashima, S., Ishihara, Y., Iwata, T., Hanada, H., Sasaki, S.、Lunar internal structure modeling using Apollo seismic travel time data and the latest selenodetic data、The Fifth Moscow Solar System Symposium、2014年10月13-18日、

モスクワ(ロシア)

菊池冬彦、河野裕介、浅利一善、松本晃治、花田英夫、佐々木 晶、地上局用広帯域・広域受信機システムの開発、日本惑星科学会秋季講演会、2014年9月24-26日、東北大学(宮城県)

松本晃治、山田竜平、菊池冬彦、鎌田俊一、石原吉明、岩田隆造、花田英夫、佐々木 晶、アポロ月震計による走時データと最新の測月データから推定される月深部構造、日本惑星科学会秋季講演会、2014年9月24-26日、東北大学(宮城県)

Matsumoto, K., Yamada, R., Kikuchi, F., Kamata, S., Iwata, T., Ishihara, Y., Hanada, H., Sasaki, S.、Deep Interior Structure of the Moon Inferred from Apollo Seismic Data and the Latest Selenodetic Data、AOGS 11th Annual Meeting (AOGS2014)、2014年7月28日-8月1日、(北海道)

Hanada, H., Kikuchi, F., Noda, H., Matsumoto, K., Kono, Y., Tsuruta, S., Asari, K., Araki, H., Kashima, S., Funazaki, K., Kunimori, H., Sasaki, S.、Present status of VLBI, ILOM and LLR for future lunar missions.、Chang'E Lunar Dynamics Workshop (CLDW2014)、2014年6月2-7日、北京(中国)

Matsumoto, K.、Geodetic observations and insights into the interior、GALA General Meeting、2014年5月7-8日、東京工業大(東京都)

Matsumoto, K.、Deep interior structure of the Moon inferred from the Apollo seismic data and the latest selenodetic.、SELENE SYMPOSIUM 2014 - International Symposium of Lunar Science and Exploration using data from Multi-Instruments -、2014年3月4-5日、国立天文台(東京都)

Yamada, R.、Improvement in determination accuracy of lunar interior structure from analysis of new lunar gravity data.、SELENE SYMPOSIUM 2014 - International Symposium of Lunar Science and Exploration using data from Multi-Instruments -、2014年3月4-5日、国立天文台(東京都)

菊池冬彦、松本晃治、岩田隆造、鶴田誠逸、浅利一善、花田英夫、河野裕介、鎌田俊一、Goossens, S.、佐々木 晶、SELENE-2/VLBI 検討チーム、月着陸探査計画 SELENE-2/VLBI 電波源の開発状況、平成24年度 VLBI 懇談会シンポジウム、2013年12月24-26日、筑波大学(茨城県)

Matsumoto, K., Yamada, R., Kikuchi, F., Iwata, T., Hanada, H., Ishihara, Y., Kamata, S., Sasaki, S., Radius of lunar core estimated by GRAIL results, AGU Fall Meeting 2013, 2013年12月9-13日、サンフランシスコ(アメリカ)

松本晃治, 山田竜平, 菊池冬彦, 花田英夫, 岩田隆浩, 石原吉明, 鎌田俊一, 佐々木 晶, GRAIL の結果を用いた月のコア半径の見積もり、日本測地学会第120回講演会、2013年10月29-31日、国立極地研究所(東京都)

Matsumoto, K., A simulation study for constraining the lunar internal structure by geodetic and seismic data, International Symposium on Planetary Sciences (IAPS2013), 2013年7月1-4日、上海(中国)

Yamada, R., Matsumoto, K., Kikuchi, F., Sasaki, S., Scientific Evaluations of the VLBI Observation on Future Lunar Explorations, AOGS 10th Annual Meeting, 2013年6月24-28日、ブリスベン(オーストラリア)

<sup>21</sup> Matsumoto, K., Yamada, R., Kikuchi, F., Goossens, S., Kamata, S., Iwata, T., Hanada, H., Ishihara, Y., Sasaki, S., A simulation study for constraining the lunar internal structure by geodetic and seismic data, Japan Geoscience Union Meeting 2013, 2013年5月19-24日、幕張メッセ(千葉県)

<sup>22</sup> Sasaki, S., Kikuchi, F., Matsumoto, K., Noda, H., Araki, H., Hanada, H., Yamada, R., Kunimori, H., Iwata, T., Investigation of lunar interior volatile from the state of the core and the lower mantle: SELENE-2 VLBI-LLR proposals, Japan Geoscience Union Meeting 2013, 2013年5月19-24日、幕張メッセ(千葉県)

〔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  
国立天文台 RISE 月惑星探査検討室の HP にて  
情報公開  
<http://www.nao.ac.jp/project/rise.html>

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

佐々木 晶(SASAKI SHO)  
大阪大学・大学院理学研究科・教授  
研究者番号: 10183823

### (2) 研究分担者

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

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

川口 則幸(KAWAGUCHI NORIYUKI)  
国立天文台・水沢 VLBI 観測所・名誉教授  
研究者番号: 90214618

(H24, H25 H26: 研究協力者)

河野 裕介(KONO YUSUKE)  
国立天文台・水沢 VLBI 観測所・助教

研究者番号: 00370106

(H26 H24, H25: 連携研究者)

### (3) 連携研究者

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: 10353426

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

亀谷 収(KAMEYA OSAMU)  
国立天文台・水沢 VLBI 観測所・助教  
研究者番号: 70202025

寺家 孝明(JIKE TAKAAKI)  
国立天文台・水沢 VLBI 観測所・助教  
研究者番号: 40425400

小山 友明(OYAMA TOMOAKI)  
国立天文台・水沢 VLBI 観測所専門研究職員  
研究者番号: 70425403

岩田 隆浩(IWATA TAKAHIRO)  
独立行政法人宇宙航空研究開発機構  
宇宙科学研究所・准教授

研究者番号: 20201949

諸田 智克(MOROTA TOMOKATSU)  
名古屋大学・大学院環境学研究科・助教  
研究者番号: 30415898

日置 幸介(HEKI KOSUKE)  
北海道大学・大学院理学研究科・教授  
研究者番号: 30280564

### (4) 研究協力者

山田 竜平(YAMADA RYUHEI)  
国立天文台・RISE 月惑星探査検討室・研究員  
研究者番号: 60647379