

## 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： 6 2 6 1 6  
 研究種目： 基盤研究(B)  
 研究期間： 2010～2013  
 課題番号： 2 2 3 4 0 1 2 8  
 研究課題名(和文) 月の自転軸のゆらぎを通して中心核の物性をしらべるための月面望遠鏡の開発  
 研究課題名(英文) Development of a telescope on the moon for investigating the property of the lunar core through rotational fluctuations  
 研究代表者  
 花田 英夫 (HANADA HIDEO)  
 国立天文台・准教授  
 研究者番号： 6 0 1 3 2 6 7 7

研究成果の概要(和文)：月面に望遠鏡を設置して星を観測することによって、月の自転軸の揺らぎを通して、月の内部を調べることができる。そのために、将来の月面着陸を想定して写真天頂筒(PZT)型小型望遠鏡を開発した。月面で観測する場合に問題となり得る大きな温度変化に対して、対物レンズに回折レンズを用いることによって、許容できる温度条件を大幅に緩和することができた。また、水平面の基準となる水銀面の振動は観測精度に大きく影響するので、面振動の最小となる最適な水銀皿を開発しその影響を補償する。

研究成果の概要(英文)：The interior of the Moon can be effectively investigated by observations of the lunar rotation using a small telescope set on the lunar surface. We developed a small telescope of PZT (Photographic Zenith Tube) type, assuming a future lunar mission which will set the telescope on the Moon. It was shown that a diffraction lens in the objective can loosen the temperature condition required for accurate observations very much. We developed a mercury pool which can reduce the effects of vibrations on the observational accuracy, considering the vibration of the mercury surface may cause a serious effect.

## 交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2010年度	3,900,000	1,170,000	5,070,000
2011年度	6,600,000	1,980,000	8,580,000
2012年度	2,700,000	810,000	3,510,000
年度			
年度			
総計	13,200,000	3,960,000	17,160,000

研究分野：数物系科学

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、回転変動、中心核、月面望遠鏡、PZT

## 1. 研究開始当初の背景

(1)月のコアを調べる有効な方法は、コアの大きさや状態が反映される自転の微細な変化を観測することである。Williams他(2001)は、約30年間のLLRのデータから複数の周波数成分を持つ強制秤動について消散項(外力トルクの変動の位相とずれて生じる振動成分)を求め、その振幅を比較した。彼らは緯度方向の物理秤動に関して周期27.6日および一定のオフセットの二成分について、また経度方向の物理秤動に関しても206日、305日、1095日周期の三成分の消散項を新たに求めた。

消散メカニズムとして下部マン托ルの固体摩擦による消散 $Q$ と、マン托ル-流体核間の摩擦による消散 $f$ の両者を考え、前者の大きさは周波数に大きく依存するはずであるとし、任意の周波数の項の消散が一ヶ月周期の現象に対する消散 $Q$ の周波数(単位は月にとる)の $w$ 乗倍と仮定した。彼らは核マン托ル境界での消散 $f$ がゼロのとき、様々な周波数の消散項の大きさを統一的に説明できる $Q$ と $w$ の組み合わせが存在しないことを示した。

それらを矛盾なく説明するためには  $f$  が 0.34、すなわち一ヶ月周期の固体潮汐による消散  $Q$  の約1/3の核マントル境界での消散が必要であると示し、流体核の存在を示唆した。しかし、強制秤動の消散項の振幅はたかだか数ミリ秒角程度であり、LLRの精度と比較すると十分な信頼性があるとは言えない。

(2)そこで、月の回轉變動からコアの状態についての情報が得られる可能性を初めて示した重要な研究成果を進展させ、コアについての制約条件をより確実なものにするために、LLRと独立なより高精度な観測を行うことが重要であると考えた。そのために、以前月面の望遠鏡による位置天文観測を行うことを提案し、これまでで以上の高精度の観測が可能であることを示した。

(3)また、月の回轉變動の高精度観測によって、コアとマントルとの相対運動が引き起こす自由コア章動を検出できる可能性が生じる。自由コア章動を観測することによって、月のコアの物理的性質を明らかにする（液体かどうか）、コアの半径と扁平率を決める、コア-マントル境界での密度差を決めることが可能となる。

## 2. 研究の目的

(1)これまでの光学解析によってある程度見通しを得た技術、一つは、回折レンズの導入による温度変化の影響を受けにくい対物レンズ、もう一つは、補償光学の傾斜補償の導入による、傾斜の自己校正機能を持った望遠鏡を開発し、詳細解析、地上での鉛直線偏差の観測を通して、月面環境でも1ミリ秒角の精度を達成できる位置天文観測用の望遠鏡の性能特性を明らかにするとともに、目標精度を達成するための環境条件を明らかにすることを目的とする。

(2)月面の望遠鏡の観測から得られる科学成果を明確にするために、これまでの観測の系統誤差の評価を行い、各種の観測を矛盾無く説明できる月の新しいモデルを構築する。

## 3. 研究の方法

(1)月面で観測することを想定した写真天頂筒(PZT)型小型望遠鏡の開発と、観測結果と月の内部構造を関係付けるための、現状より一桁高精度の観測に対応する月の内部構造モデルの開発からなる。

(2)前者は、温度変化の大きい月面で高精度の観測を実現するために、回折レンズと補償光学の技術を応用することで解決することを目指し、環境条件と精度の関係等について光学解析、熱解析を行いながら、最適な実現可能な仕様を確立するとともに、試作機を製作して室内実験および地上観測によって、月面環境で精度を達成できることを示す。

(3)後者については、これまでの月内部構造モデルに「かぐや」等の最新の成果を加えた、より高精度のモデルの開発と、星表を用いた

実際の観測のシミュレーションにより、月のコアに関する情報を得ることが可能であることを示し、そのために必要な観測条件（期間、頻度等）を明らかにする。

## 4. 研究成果

(1)月面の温度環境で初期の精度、1ミリ秒角を達成できる望遠鏡を実現するために、回折レンズを用いた対物レンズを設計し、温度変化の星像中心位置に与える影響をシミュレーションで調べた結果、1ミリ秒角を達成するための温度条件は $\pm 5^{\circ}\text{C}$ 以下と、従来の屈折レンズを組み合わせた対物レンズに比べて1桁以上緩和できることを示した(図1)。温度変化の影響をさらに軽減するために、一様、軸対称、水平勾配等、種々な温度変化に対する星像中心位置のずれの大きさ、方向と場所との関係をシミュレーションによって明らかにし、それらの影響を変位のパターンを関数で近似して補正することを試みた結果、補正可能な温度変化の範囲は $10^{\circ}\text{C}$ 以上とさらに緩和され、回折レンズと組み合わせることによって、月面の温度環境で、多層断熱膜やヒータを併用することによって、初期の目標精度を達成できる見通しを得た。

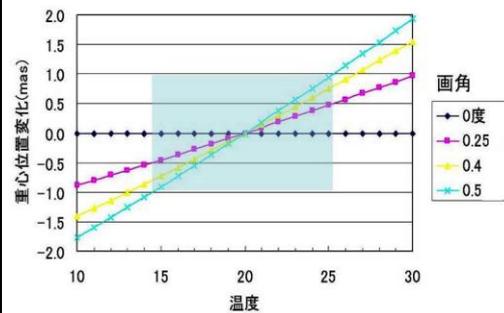


図1. 回折レンズを用いた場合の温度変化による星像重心位置の変化

(2)対物レンズの光学的な性能を種々の条件で調べ、1ミリ秒角の星像中心位置決定精度実現に問題無いことを光線追跡シミュレーションで明らかにした。調べた内容は、太陽光の漏れ込み(迷光)の影響、望遠鏡内の光学素子表面での反射によるゴーストの影響、回折レンズ固有の不要次数光の影響の3種類である。迷光については、信号対雑音比を減少させることによる星像位置決定精度の劣化と、検出器上の背景光に勾配を生じることによる星像位置にずれを生じる二つの影響が考えられるが、前者については、信号対雑音比の条件から許される迷光の強度が入射光の10-10以下となり、それを満たすために、約30cmのフードと、1%以下の鏡筒内部の反射率が必要であることを示した。後者については、両端の差が、頂上の高さの約0.1%以下であれば問題無いことがわかった。ゴーストと不要次数光の影響については、許容値に対して桁違いに小さく、全く問題無いことがわかった。

(3)レンズの温度や放射線による劣化の影響を調べるために、回折レンズを用いた市販のカメラレンズに対して、月面の温度変化に相当する熱真空試験と、月面で1年間受けるガンマ線に

相当する放射線試験を行った。その結果、透過率や回折効率については、多少の劣化は認められたものの、観測可能な許容範囲に収まった。しかし、反射防止膜に微小なひび割れが検出された。それを解決するために、多層反射防止膜に代わる有機膜等について、温度変化の影響を温度試験で調べたところ、かなりの改善が見られた。最終的には月面環境の熱真空試験で詳しく調べる必要があるが、今後の課題である。

(4)望遠鏡の底部に設置され、基準の水平反射面となる水銀皿は、対物レンズに次いで重要な要素であるが、外部の振動に励起されて面振動を起し、最悪の場合は、星像位置を目標精度の約1000倍変化させる可能性があることが明らかになった。月面では地上と比べて、振動レベルは二桁以上小さいことが知られているが、地上での性能試験にも影響するので、面振動の特性を明らかにし、補正方法を確立することが重要な課題である。

ここでは、地上試験観測用の水銀皿の試作を行い、必要な光学的有効径を探るとともに、水銀面の面精度や振動の影響などを測定した。その結果、水銀皿の深さが0.25mmまたは0.5mm程度あれば0.09~0.2波長の面精度があることが確認でき、この程度の深さであれば製造中心位置に対する振動の影響も小さいことが確認できた。つぎに、実際に水銀皿を望遠鏡に組み込み、人工光源を用いたCCD上の星像中心位置の変化を、3成分の地面振動、傾斜とともに記録し、相互の関係を詳細に調べ、水銀面の振動の影響を目標精度で補正できる見通しを得た。

(5)理論的な研究では、月の極に設置した望遠鏡で観測する月の回転変動から月の内部構造を求めることを目標とし、まず、月の内部構造を仮定して1年分の疑似観測データを計算したところ、月レーザ測距、クレメンタイン月探査機、ルナプロスペクタ月探査機、かぐや月探査機の4種類の観測から得られた月の重力場モデルから予想される星の軌跡の差は、月面望遠鏡の目標観測精度の1ミリ秒角より大きく10ミリ秒角以上であることを示した。つまり、1ミリ秒角の精度で観測することによって月の内部構造を推定することが充分可能なこと示した。

つぎに、観測データから月の内部構造を求める逆問題を解くために、月固定座標系で表される粘弾性の月について検討した結果、重力場モデルと弾性パラメータに対して、星の軌跡は高い感度があり、それらのパラメータが月の回転変動の解析理論で表されることを示した。その結果、回転変動の観測値の許容誤差が見積もられ、たとえば、潮汐ラブ数 $k_2$ に高い感度がある周期成分を見つけた。

## 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10件)

① 鶴田誠逸, 花田英夫, 荒木博志, 浅利一善, 鹿島伸悟, 宇都宮真, 神谷友裕, 月面天測望遠鏡(ILOM)地上試験用水銀皿の試作, 第32回天文学に関する技術シンポジウム2012集録, 査読無し, 65-68, 2012.

② 鹿島伸悟, 鶴田誠逸, 荒木博志, 花田英夫, 月面天測望遠鏡(ILOM)へのDOE適応検討, 第32回天文学に関する技術シンポジウム2012集録, 査読無し, 80-82, 2012.

③ Petrova, N., Abdulmyanov, T. and Hanada, H., Some qualitative manifestations of the physical libration of the Moon by observing stars from the lunar surface, Adv Space Res., 査読有り, 50, 1702-1711, doi: org/10.1016/j.asr.2012.06.029, 2012.

④ Hanada, H., H. Araki, S. Tazawa, S. Tsuruta, H. Noda, K. Asari, S. Sasaki, K. Funazaki, A. Sato, H. Taniguchi, M. Kikuchi, T. Takahashi, A. Yamazaki, J. Ping, N. Kawano, N. Petrova, N. Gouda, T. Yano, Y. Yamada, Y. Niwa, Y. Kono and T. Iwata, Development of a digital zenith telescope for advanced astrometry, Science China (Physics, Mechanics & Astronomy), 査読有り, 55, 723-732, doi: 10.1007/s11433-012-4673-1, 2012.

[学会発表] (計38件)

① 鹿島伸悟, 荒木博志, 鶴田誠逸, 花田英夫, 安田進, 宇都宮真, 月面天測望遠鏡(ILOM)へのDOE適用検討, 第13回宇宙科学シンポジウム, 2013年1月8~9日, 神奈川県相模原市JAXA宇宙科学研究所.

② 鶴田誠逸, 花田英夫, 荒木博志, 浅利一善, 鹿島伸悟, 宇都宮真, 神谷友裕, 月面天測望遠鏡(ILOM)地上試験観測用水銀皿の開発, 日本測地学会第118回講演会, 2012年11月2日, 宮城県仙台市福祉プラザ.

③ H. Hanada, S. Tsuruta, H. Araki, S. Kashima, K. Asari, S. Tazawa, H. Noda, K. Matsumoto, S. Sasaki, K. Funazaki, A. Satoh, H. Taniguchi, H. Kato, M. Kikuchi, Y. Itou, K. Chiba, K. Inaba, N. Gouda, T. Yano, Y. Yamada, Y. Niwa, H. Kunimori, N. Petrova, A. Gusev, J. Ping, T. Iwata, S. Utsunomiya, T. Kamiya and K. Heki, Technical development of a small digital telescope for in-situ lunar orientation measurements (ilom), 3rd Moscow Solar System Symposium (3M-S3), 2012年10月11日, ロシア宇宙科学研究所IKI (ロシア連邦).

④ Petrova, N., T. Abdulmyanov and H. Hanada, Some preliminary estimates of the possibility of determining the Lunar physical libration in the project ILOM, 日本地球惑星科学連合2012年大会, 2012年5月25日, 千葉県幕張メッセ.

⑤Hanada, H., H. Araki, S. Tazawa, S. Tsuruta, H. Noda, K. Asari, Y. Ishihara, K. Matsumoto, S. Sasaki, K. Funazaki, A. Satoh, H. Taniguchi, H. Kato, M. Kikuchi, K. Murata, Y. Itou, K. Chiba, H. Wakamatsu, N. Petrova, A. Gusev, N. Gouda, T. Yano, Y. Yamada, Y. Niwa, J. Ping, N. Kawano, T. Iwata and K. Heki, Development of a Small Telescope for Observations of Lunar Rotation, Astro Kazan 2011. 2011. 8.

⑥Hanada, H., J. Ping, K. Funazaki, N. Kawano, N. Petrova, H. Araki, S. Tazawa, S. Tsuruta, H. Noda, S. Sasaki, Z. Li, X. Su, A. Sato, H. Taniguchi, M. Kikuchi, T. Takahashi, A. Yamazaki, S. Sato and T. Iwata, Development of a Photographic Zenith Tube for observation of the lunar rotation and the deflection of the vertical, IAG Symposium Terrestrial Gravimetry, 2010年6月23日, Elektroprigor研究所, Санкт-Петербург (ロシア連邦).

[産業財産権]

○出願状況 (計1件)

名称: 回折光学素子を用いた月面天測望遠鏡  
発明者: 鹿島伸悟  
権利者: 自然科学研究機構  
種類: 特許  
番号: 特願2013-80826  
出願年月日: 2013年3月1日  
国内外の別: 国内

[その他]

ホームページ等

<http://www.miz.nao.ac.jp/rise/instruments/ilom>

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

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

### (2) 研究分担者

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  
(H24→連携研究者)  
日置 幸介 (HEKI KOSUKE)  
北海道大学・理学研究院・教授  
研究者番号: 30280564  
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  
(H24→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  
(H24→連携研究者)  
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  
(H24→連携研究者)

### (3) 連携研究者

鶴田 誠逸 (TSURUTA SEIITSU)  
国立天文台・RISE月惑星探査検討室・  
主任研究技師  
研究者番号: 10260019  
田澤 誠一 (TAZAWA SEIICHI)  
国立天文台・RISE月惑星探査検討室・  
主任技術員  
研究者番号: 40465927