

DOE を用いた月面天測望遠鏡の開発及び DOE 試作状況 Development of ILOM using DOE and situation of trial manufacturing of DOE

鹿島 伸悟^{1*}; 荒木 博志¹; 花田 英夫¹; 鶴田 誠逸¹; 鈴木 浩文²; 安田 進³; 宇都宮 真³
KASHIMA, Shingo^{1*}; ARAKI, Hiroshi¹; HANADA, Hideo¹; TSURUTA, Seiitsu¹; SUZUKI, Hirofumi²; YASUDA,
Susumu³; UTSUNOMIYA, Shin³

¹ 国立天文台 RISE 月惑星探査検討室, ² 中部大学工学部機械工学科, ³ 宇宙航空研究開発機構

¹RISE Project Office, National Astronomical Observatory of Japan, ²Mechanical Engg., Chubu University, ³Japan Aerospace Exploration Agency

【要旨】

次期 SELENE 計画の一環として、月面に天測望遠鏡を設置することを考えている。これにより、月の微妙な振動や変動を高精度に測定・解析し、月の内部構造やその起源を明らかにすることが目的である。本発表では、月面という過酷な温度環境の中でも、星像位置決定精度 1mas という高性能を実現することが可能な望遠鏡対物レンズの開発と、そのキーテクノロジーである DOE(Diff ractive Optical Element) の特徴や環境解析結果、中部大鈴木研と共同開発している DOE の製造方法及び試作品の状況等を報告する。

【DOE】

DOE はその名の通り回折で光を曲げるものである。従来のレンズは屈折で光を曲げるが、回折と屈折は色分散が逆であるため、これらを組み合わせることで、劇的に色収差を補正することが可能となり、従来は必須であった低分散ガラスも不要となる。従来は必須であったこの低分散ガラスは屈折率の温度変化が非常に大きく、ある温度では性能の出ている光学系が、温度が少し変化すると色収差が大きく出て性能が NG となるため、非常に狭い温度範囲でしか使えないという欠点があった。一方 DOE にはそんな特性はなく、少々温度が変化しても高性能をキープできるため、月面という過酷な温度環境の元でも現実的な温度範囲で使える光学系とすることが可能となる。

ただ DOE には、回折効率が波長に依存するという欠点と、高精度なものは製作が非常に困難という問題点もある。前者に関しては、ILOM のように、「像を見る」ことではなく、「星像の重心を正確に検出する」という目的に於いては、少々不要次数光による迷光が重畳しても検出精度に影響がないことを定量的な解析により示した。また、製造に関しては、高精度光学部品製造の権威である中部大工学部の鈴木研と協力研究体制を敷き、最適な製造法を考案して頂くことにより、十分実用となる DOE を製造することが可能となった。

【今後の展開】

DOE の製造目処は立ったため、それと組み合わせる屈折レンズや鏡筒を試作し、地上試験等で望遠鏡としての光学性能を確認することが今後必要である。また、DOE 以外にも天頂筒の構成に必須な水銀面(水銀皿)や折り曲げプリズム(スパイダプリズム)といったキーコンポーネントもあるため、これらに関しても試作し、光学系と組み合わせた性能確認を行うことも必要であると考えている。

キーワード: 月面天測望遠鏡, 回折光学素子

Keywords: ILOM, DOE, SELENE

月面コーナーキューブミラーの角度・変形・DAO解析 Angle, deformation and DAO (Dihedral Angle Off-set) Analysys of the corner cube mirror for LL

鹿島 伸悟^{1*}; 野田 寛大¹; 荒木 博志¹; 花田 英夫¹; 國森 裕生²; 大坪 俊通³
KASHIMA, Shingo^{1*}; NODA, Hiroto¹; ARAKI, Hiroshi¹; HANADA, Hideo¹; KUNIMORI, Hiroo²; OTSUBO, Toshimichi³

¹ 国立天文台 RISE 月惑星探査検討室, ² 情報通信研究機構, ³ 一橋大学社会学研究科

¹RISE Project Office, National Astronomical Observatory of Japan, ²National Institute of Information and Communications Technology, ³Social Sciences, Hitotsubashi University

【要旨】

次期 SELENE 計画の一環として、月面に口径 20cm クラスの新たなコーナーキューブミラー (CCM) を設置することを考えている。これにより、地球・月間の距離を cm オーダーで精測し、その微妙な変動を高精度に解析することで、月の内部構造やその起源を明らかにすることが可能となる。このような高精度の測定を可能にするには、各ミラーの直角精度 0.1 秒、面精度 $10/\lambda$ 以下、DAO 角 0.6 秒 \pm 0.1 秒といった非常に高精度な加工・組立及び測定が必要となる。

【角度誤差解析】

完全な平面が完璧に直角に形成された CCM が月面に於いて環境温度や重力によりどのように変形するか、そしてそのように変形した場合の光学応答がどうなるかに関しては報告済みであるが、そもそも完全な平面や完璧に直角に形成することは不可能であるため、これらの初期エラーに関して解析しておく必要がある。

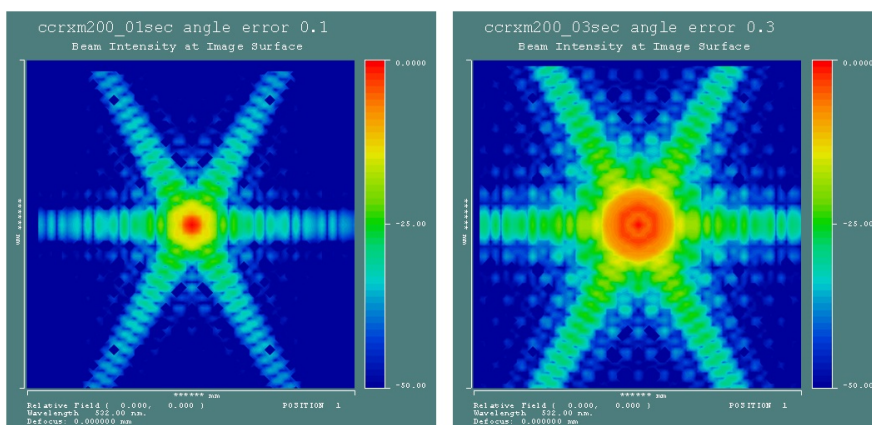
下図は CCM の 3 面の全ての各 2 面に 0.1 秒及び 0.3 秒の角度エラーを与えた場合の光学応答である。地球月間の距離、及びその間のビームの拡がりも考慮している。角度エラーが 0.1 秒から 0.3 秒になっただけで、大きく劣化していることが見て取れる。

【今後の展開】

下図では各面は完全な平面としているが、実際には製造誤差・熱変形・重力変形が重畳するため、これらを全て考慮した解析をする必要がある。かなり複雑且つ評価の難しい解析となるが、必要且つ重要な解析であり、今後の課題である。

キーワード: 月レーザ測距, コーナーキューブミラー, 光学応答

Keywords: LLR, CCM, SELENE



月レーザー測距用ホロー型新規月面反射板の開発 Development of the Retroreflector on the Moon for the Future Lunar Laser Ranging

荒木 博志^{1*}; 鹿島 伸悟¹; 野田 寛大¹; 國森 裕生²; 千葉 皓太³; 大坪 俊通⁴; 宇都宮 真⁵; 松本 吉昭⁶
ARAKI, Hiroshi^{1*}; KASHIMA, Shingo¹; NODA, Hirotomo¹; KUNIMORI, Hiroo²; CHIBA, Kouta³; OTSUBO, Toshimichi⁴
; UTSUNOMIYA, Makoto⁵; MATSUMOTO, Yoshiaki⁶

¹ 国立天文台, ² 情報通信研究機構, ³ 岩手大学, ⁴ 一橋大学, ⁵ 宇宙科学研究所, ⁶ (株) プラネット

¹National Astronomical Observatory of Japan, ²National Institute of Communication and Technology, ³Iwate University, ⁴Hitotsubashi University, ⁵Japan Aerospace Exploration Agency, ⁶PLANET Co. Ltd.

月レーザー測距 (LLR) は過去 40 年以上にわたり、月の回転、潮汐、および内部構造を制約する重要なデータを供給し続けている。LLR の測距精度は過去 20 年間では、地上局におけるレーザー光の発振・受信システム改良やレーザー光の大気遅延モデルの改良が進んだため、2cm 以下になっている。しかしながら月の深部構造 (流体コアの存否・サイズ・形状、マントルの非弾性など) のさらなる理解のためには、さらにひと桁以上の高精度測距が必要とされている。そこで我々は将来の月面設置を目標に、原理的に測距誤差を発生させない「単一素子ホロー型逆反射板 (Corner Cube Mirror; CCM)」の開発研究を進めている。CCM はオプティカルコンタクトで 3 枚の鏡を接合した 3 面鏡であり、アポロ 11 号地点に置かれた LLR 用コーナーキューブをしのぐ反射効率を持たせるため、口径 20cm を目標にしている。ミラーの材質については、「熱膨張率/熱拡散率」及び剛性率をもとに極低膨張率ガラスセラミック (クリアセラム Z-EX (CCZ-EX); オハラ) か単結晶シリコンを候補とした。さらに CCM のミラー部だけでなく CFRP 製ジンバルと組み合わせた熱モデルを作製し、月面の温度環境における熱変形/光学応答シミュレーションを行った。その結果、ミラーの固定方法に敏感ではあるが、(1) ミラーに影が付いて温度差がしやすい日照条件でも光学性能の劣化は十分小さくできること、(2) 差はわずかではあるがクリアセラム Z-EX よりも単結晶 Si の方が性能面で優れていることがわかった。

キーワード: 月レーザー測距, 逆反射板, ホロー型, 単結晶シリコン, 変形, 光学性能

Keywords: LLR, corner cube mirror, hollow, single crystal Si, deformation, optical performance

Lunar Laser Ranging Trial at Koganei SLR station Lunar Laser Ranging Trial at Koganei SLR station

野田 寛大^{1*}; 國森 裕生²; 荒木 博志¹
NODA, Hiroto^{1*}; KUNIMORI, Hiroo²; ARAKI, Hiroshi¹

¹ 国立天文台, ² 情報通信研究機構

¹National Astronomical Observatory of Japan, ²National Institute of Information and Communications Technology

Introduction: The Lunar Laser Ranging (LLR) is a technique to measure the distance between laser stations on the Earth and retroreflectors on the Moon, by detecting the time of flight of high-powered laser emitted from the ground station. Since the Earth-Moon distance contains information of lunar orbit, lunar solid tides, and lunar orientation and rotation, observation data of LLR have contributed to the lunar science, especially for the estimation of the inner structure of the Moon through orientation, rotation and tide. There are five retroreflectors on the Moon, Apollo 11, 14, 15 (U. S. A.), Lunokhod 1 and 2 (french-made, carried by former U. S. S. R.). The Apollo 15 has largest aperture among them, and almost 75 % of the total LLR data are from Apollo 15 site.

System Description: Since there is no Japanese station which can range the Moon so far, a precursor ranging experiment by using the Satellite Laser Ranging (SLR) facility in the NICT Koganei campus in Tokyo is ongoing. The SLR station has a 1.5 m Cassegrain telescope with Coude focus. Normally it is equipped with a laser with 20mJ, 20Hz repetition rate, and 35 picoseconds pulse width for satellite ranging. In addition to it, a wide-pulse width laser (3 nanoseconds, which corresponds to 45 cm in 2-way range) with energy of about 350 mJ per shot, repetition rate of 10Hz, wavelength of 532 nm is introduced to detect photons from the lunar retroreflectors for demonstration. As the pulse width is broad, the high accuracy ranging is not expected, therefore it is solely used for the confirmation of the optical link budget between the ground station and retroreflectors on the Moon. As the photon detector, we use a SPAD (Single Photon Avalanche Diode) and also an MCP (Micro Channel Plate) photo multiplier whose quantum efficiency is twice as much as that of the SPAD in use. For the pointing, a CCD imager is also available in the same detector box. They can be switched by reflecting mirrors. To suppress the background noise, a bandpass filter (0.3 nm FWHM, 50 % transparency) and spatial filter (pinhole) with diameter of 400 microns are installed and checked. For better link budget, the contamination of optical elements of the telescope and on the optical bench was checked. The alignment of the laser emission path with respect to the laser receiving path and laser beam divergence has been adjusted to maximize the efficiency of the laser emission.

Pointing: Because the retroreflectors are small and they are not visible from ground telescopes, we point the telescope to known small-sized craters (~10 km in diameter) whose positions are known in selenographic coordinate and thus in topocentric coordinate at the observation site. Then the offset angles in azimuth and elevation direction from the predicted pointing direction are determined so that the center of the crater comes to the center of the CCD images which are colligned with the SPAD and the MCP. This procedure confirms the pointing of the telescope.

Observations: Trials for the lunar return have been conducted since autumn 2013. As of the date of submission, the ranging to the Moon is not successful. Therefore we need to detect the return from the Apollo 15 site by using the nanosecond laser pulse for the first step. As the next step, we need to know the condition on which lunar ranging is successful in Koganei, for example, lunar phase, distance to the retroreflectors, libration angles, and atmospheric conditions.

Keywords: Lunar Laser Ranging, Satellite Laser Ranging, Moon, internal structure

SELENE-2/月電磁探査装置 (LEMS): インバージョンのテスト SELENE-2/Lunar ElectroMagnetic Sounder (LEMS): a test of inversion

松島 政貴^{1*}; 清水 久芳²; 藤 浩明³; 吉村 令慧⁴; 高橋 太¹; 綱川 秀夫¹; 渋谷 秀敏⁵; 松岡 彩子⁶; 小田 啓邦⁷; 小川 和律⁶; 田中 智⁶

MATSUSHIMA, Masaki^{1*}; SHIMIZU, Hisayoshi²; TOH, Hiroaki³; YOSHIMURA, Ryokei⁴; TAKAHASHI, Futoshi¹; TSUNAKAWA, Hideo¹; SHIBUYA, Hidetoshi⁵; MATSUOKA, Ayako⁶; ODA, Hirokuni⁷; OGAWA, Kazunori⁶; TANAKA, Satoshi⁶

¹ 東京工業大学, ² 東京大学地震研究所, ³ 京都大学, ⁴ 京都大学防災研究所, ⁵ 熊本大学, ⁶ 宇宙航空研究開発機構宇宙科学研究所, ⁷ 産業技術総合研究所

¹Tokyo Institute of Technology, ²ERI, University of Tokyo, ³Kyoto University, ⁴DPRI, Kyoto University, ⁵Kumamoto University, ⁶ISAS/JAXA, ⁷AIIST

Understanding of lunar origin and evolution can be advanced through investigation of the lunar interior structure. The present thermal state of the Moon can be clues to the Moon's thermal history. In the SELENE-2 mission, we propose a lunar electromagnetic sounder (LEMS) to estimate the electrical conductivity structure of the Moon, which can be used to deduce the thermal structure of the Moon.

Temporal variations in the magnetic field of lunar external origin induce eddy currents in the lunar interior depending on the electrical conductivity structure and frequencies of the temporal variations. The eddy currents, in turn, generate temporal variations in the magnetic field of lunar internal origin. Therefore electromagnetic response of the Moon is obtained from magnetic field measurements by magnetometers onboard a lunar orbiter and a lunar lander. The response function is then used to estimate the electrical conductivity structure by solving an inverse problem. Here we assume a one-dimensional structure for electrical conductivity distribution. We show some results for a test of inversion.

ペネトレータ 1 点設置による月震観測と月内部構造探査 Moonquake observation and lunar interior exploration by one penetrator station

山田 竜平^{1*}; 石原 吉明²; 小林 直樹²; 村上 英記³; 白石 浩章²; 早川 雅彦²; 田中 智²
YAMADA, Ryuhei^{1*}; ISHIHARA, Yoshiaki²; KOBAYASHI, Naoki²; MURAKAMI, Hideki³; SHIRAISHI, Hiroaki²; HAYAKAWA, Masahiko²; TANAKA, Satoshi²

¹ 国立天文台 RISE 月惑星探査検討室, ² 宇宙航空研究開発機構, ³ 高知大学

¹National Astronomical Observatory of Japan / RISE Project, ²Japan Aerospace Exploration Agency, ³Kochi University

日本の月探査計画「LUNAR-A」を通して開発されたペネトレータは人工衛星からの自由落下により天体表面に内部に搭載した観測機器を設置するシステムである。ペネトレータは複雑な着陸機構と熱制御機構を必要としないため、従来の軟着陸機と比較して小型軽量であり、天体表面に観測ネットワークを構築するのに優れたシステムである。一方、表面への衝突貫入時に強い衝撃が加わるため、ペネトレータ内部の観測機器はその衝撃に耐えて性能を維持するだけの耐衝撃性を確立する必要がある。これまでの研究では、ペネトレータ搭載用の地震計は月面貫入時に予測されるよりも高い衝撃を加えても、月震観測に必要な性能を維持できる事を示しており (Yamada et al., 2009)、またデータ送信に使用するペネトレータ-母船間の通信機能も正常に動作する事を確認できている (田中等, 2010)。

ペネトレータの耐衝撃性が確立された一方、LUNAR-A 計画の中止によりペネトレータの月表面への設置は未だ実現できていない。そこで、現在我々はイプシロンロケットを使用した次期小型探査計画において月面へのペネトレータの設置と観測の実証を行う事を計画している。小型探査計画においては、その厳しい重量制限のために従来のペネトレータシステムでは 1 本しか搭載する事ができない。そのために、我々はペネトレータ 1 点での観測においてどのような科学成果が得られるかの検討を行っている。

まず、ペネトレータ搭載用地震計では NASA の Apollo ミッションで設置した地震計により観測された深発月震、浅発月震、隕石衝突の観測が可能である。これら月震イベントの活動度をアポロ当時と比較して検証する事が重要なテーマとなる。特に隕石衝突においては、その衝突時の発光を地上望遠鏡から観測し、衝突位置を高精度で決定できれば、1 点でも月地殻厚や地殻内部構造の情報を得る事が期待できる。本発表では、これら月震イベントの検出期待個数や月震データから期待される成果について、検討した結果を報告すると共に、最良の科学成果が得られるペネトレータ 1 点設置点についても検討した結果を述べる。また、小型探査計画の後に実施が期待されるネットワーク観測に発展した場合、どれだけの科学成果が得られるようになるかも議論する予定である。

キーワード: ペネトレータ, 月震観測, 月内部構造探査, 小型衛星探査, 隕石衝突発光

Keywords: Penetrator, Moonquake Observation, Lunar Interior Exploration, Small Satellite Exploration, Meteoroid Impact Flash

「かぐや」月レーダー反射エコーの複素減衰率 On the attenuation of reflected echoes of Lunar Radar Sounder onboard Kaguya

藤 浩明^{1*}; 熊本 篤志²

TOH, Hiroaki^{1*}; KUMAMOTO, Atsushi²

¹ 京都大学大学院理学研究科, ² 東北大学大学院理学研究科

¹Graduate School of Science, Kyoto University, ²Graduate School of Science, Tohoku University

The successful Japanese Moon probe, KAGUYA, was equipped with a variety of state-of-the-art scientific instruments including the Lunar Radar Sounder (LRS; Ono et al., 2010). LRS is a frequency modulated continuous wave (FMCW) radar with carrier frequencies from 4 to 6 MHz, and succeeded in observing distribution of reflectors beneath almost all the Moon's surface (Ono et al., 2009). Pommerol et al. (2010) further pointed out that the presence of the reflectors in lunar maria is negatively correlated with abundance of TiO₂ because of its high electrical conductivity.

Loss tangent is defined as a ratio of the conduction to displacement current within an electric medium and hence an indicator of high electrical conductivity. If loss tangent is small enough, the permittivity and the electrical conductivity of the Moon's surface can be determined at the same time by comparing the reflected echo of LRS with its source pulse. Namely, by estimating the complex ratio of the received signal to the transmitted pulse, the dielectric constant can be known from the phase difference while the electrical conductivity can be derived by the observed amplitude attenuation and the permittivity obtained from the phase difference.

However, determination of the complex ratios is not straightforward because the reflected echoes are the product of a pulse compression technique and thus needs deconvolution to restore the true amplitude and phase of the echoes. Preliminary analysis of the LRS waveform data collected at the end of the fast down-link (21.3 Gbps) mode [Jun. - Sep. 2008] showed that quality of the data is sufficient enough to perform necessary deconvolution. This implies that LRS can also be used as a ground penetrating radar.

In this presentation, the principle and the method for estimating the permittivity and electrical conductivity are first described in addition to the data used. Interpretation of the derived complex ratios and its spatial distribution on the Moon's surface is finally discussed and summarized.

REFERENCES

Ono, T. et al., Lunar Radar Sounder Observations of Subsurface Layers Under the Nearside Maria of the Moon, *Science*, 323, 909-912 doi:10.1126/science.1165988, 2009.

Ono, T. et al., The Lunar Radar Sounder (LRS) onboard the KAGUYA (SELENE) spacecraft, *Space Sci. Rev.*, 154, 145-192, doi:10.1007/s11214-010-9673-8, 2010.

Pommerol, A. et al., Detectability of subsurface interfaces in lunar maria by the LRS/SELENE sounding radar: Influence of mineralogical composition, *Geophys. Res. Lett.*, 37, L03201, doi:10.1029/2009GL041681, 2010.

キーワード: 地中レーダー, 電気伝導度, 誘電率, 送信パルス, 反射エコー, 誘電正接

Keywords: Ground penetrating radar, Electrical conductivity, Permittivity, Source pulse, Reflected echo, Loss tangent

かぐや衛星観測データに基づく雨の海の地下層の年代決定 The accumulation ages of subsurface layer in Mare Imbrium based on the SELENE observation data

石山 謙^{1*}; 熊本 篤志¹; 中村 教博¹
ISHIYAMA, Ken^{1*}; KUMAMOTO, Atsushi¹; NAKAMURA, Norihiro¹

¹ 東北大学理学研究科

¹ Graduate School of Science, Tohoku University

かぐや衛星に搭載された月レーダーサウンダー (LRS) は、主に月の海のチタン含有量が低い領域で、地下数百 m からの電磁波の反射波を観測することに成功した [Ono et al., 2009; Pommerol et al., 2010]。また、かぐや衛星に搭載された分光・地形カメラ (MI・TC) によって、月の表面組成 [e.g., Otake et al., 2012] や、月の海の溶岩の噴出年代 [e.g., Morota et al., 2011] の詳細が明らかにされている。さらに、かぐや LRS・MI・TC の各観測データを組み合わせることで、クレーターの周辺の地下構造が推定されるとともに [Oshigami et al., 2012]、誘電率の推定によって月表層の地質が隕石衝突によって多くの空隙を含む可能性が示唆された [Ishiyama et al., 2013]。本研究では、雨の海の北部における溶岩流ユニット (ユニット 12 と 8 [Bugiolacchi and Guest, 2008]) において、LRS で観測された地下層の年代推定を行った。地下層の年代決定は、溶岩の噴出時期・噴出量を明らかにし、月の火山活動の履歴を議論する上で非常に重要である。

LRS データより、ユニット 8 の地下には、3 つの地下エコーがあることが同定された。この地下エコーからは、地下の溶岩ユニットの間にレゴリス層が存在することが示唆される [e.g., Ono et al., 2009]。最も深い地下エコーは、ユニット 12 と 8 の境界と一致しているため、ユニット 12 の上にユニット 8 が堆積していることが同定された。先行研究では、ユニット 12 と 8 の表面年代は、クレーターカウンティングを用いて、双方とも 3.31 ± 0.19 Ga と推定されていた [Bugiolacchi and Guest, 2008]。しかしながら、彼らは TC の空間分解能 (10 m/pixel) よりも低い空間分解能のデータ (60~150 m/pixel) を使用しているため、表面年代推定において誤差を生じていた可能性がある。そこで、本研究では TC データを使用して、ユニット 12 の表面年代を推定したところ、 $3.58 (+0.04/-0.06)$ Ga と推定された。これは LRS データから導かれたユニット 12 と 8 の層序関係ともよい一致を示している。

また、LRS で明らかにされた地下層の層序と斜長石・鉄・チタンの含有量マップをもとに溶岩流ユニットの再識別を行った結果、ユニット 8 はさらに複数の異なる溶岩流ユニットに分割されることがわかった。講演では、クレーターカウンティングによる再識別された溶岩流ユニットの表面年代の決定、LRS で同定された地下層との対応検討の結果を示し、これらの溶岩流ユニットがかかわる火山活動の履歴について議論を行う。

月マントル深部における高Ti玄武岩マグマの存在の実験的証拠 Experimental evidence for the deep high-Ti basalt magma in the lunar mantle

五十嵐 愛子^{1*}; 鈴木 昭夫¹; 大谷 栄治¹; 朝原 友紀¹; 坂巻 竜也¹
IGARASHI, Mako^{1*}; SUZUKI, Akio¹; OHTANI, Eiji¹; ASAHARA, Yuki¹; SAKAMAKI, Tatsuya¹

¹ 東北大学大学院理学研究科地学専攻

¹Division of Earth and Planetary Materials Science, School of Science, Tohoku University

The existence of high seismic attenuation zone at the depths greater than about 800 km implies that the lower mantle of the Moon could be partially molten (Nakamura et al., 1973; 1974). There is a longstanding hypothesis that the last fraction of the lunar magma ocean crystallized into a layer of dense Ti-rich cumulates at the shallow depths (~100 km) early in the lunar history. It has been suggested that the cumulates subsequently sank into the deep interior of the moon because of its gravitational instability (e.g., Ringwood and Kesson, 1976). It is necessary to investigate the melting relations of the high-Ti basalt that may be erupted from the depths at high pressure (>4 GPa). In this study, melting relations of Apollo 14 black glass (Delano, 1986), the most Ti-rich lunar ultramafic glasses, were experimentally determined at the pressure of 4 GPa and the temperature range from 1300 C to 1450 C.

The high-pressure and high-temperature experiments were performed by using 3000 ton Kawai-type multi-anvil apparatus of Tohoku University. The samples were packed into graphite capsules and the experimental temperatures were measured by using W-Re thermocouples. The compositions of run products were analyzed by using FE-SEM (Field Emission Scanning Electron Microscopy). Our experiments depicted that the liquidus and solidus temperatures were determined to be 1450 C and 1325 C respectively at 4 GPa.

The liquidus phase is garnet, and the first consuming phase is ilmenite. Estimated temperature profile of the Moon at depths of 700 km -1200 km are between 1100 C and 1400 C (e.g., Gagnepain-Beyneix et al., 2006). The densities of partial melts and total melt were calculated by using the partial molar volume of the oxide components at one atmosphere (Lange and Carmichael, 1987) and the Birch-Murnaghan equation of state (Sakamaki et al., 2010). The densities of the melts formed by partial and total melting of the Apollo 14 black glass were heavier than those of the lunar deep mantle. Crystal-liquid density crossover is inevitable at the depth around 800 km, the pressure corresponding to 4 GPa. Therefore, the high-Ti basalt magma can exist stably if the lunar temperature profile is close to the upper bound of the estimated lunar temperature profile, suggesting existence of the low-velocity and low attenuation anomalies caused by chemical heterogeneities in the lunar deep mantle.

キーワード: 高圧, 月マントル, 月の高Ti玄武岩, マントルオーバーターン

Keywords: high pressure, lunar mantle, high-Ti basalt, mantle over turn

月面クレータからみた過去 10 億年の太陽系内側の天体衝突史 History of heavenly bodies collision of the solar system inside of the past one billion years studied from a lunar crater

加藤 麻美^{1*}; 諸田 智克¹

KATO, Mami^{1*}; MOROTA, Tomokatsu¹

¹ 名古屋大学大学院環境学研究科地球環境科学専攻

¹ Nagoya University Graduate School of Environmental Studies

月は過去 40 億年の天体衝突の記録をクレータとして保存しており、それは太陽系小天体の衝突・軌道進化を読み解く上で重要な情報源である。天体衝突史の理解は、アポロやルナの岩石試料の放射年代とクレータ数密度の関係から得られているが、アポロの岩石試料は 39 億年～31 億年に集中しているため、過去 30 億年間の天体衝突史の歴史はよくわかっていない。一方で、月の光条クレータの統計研究や月試料中の衝突ガラスの研究、地球クレータの統計研究などから、ここ数億年にクレータ生成率が上昇したという仮説が提案されている。

月面クレータ記録から天体衝突史を解明する手段として個々のクレータの形成年代を決定することは非常に有効である。天体衝突によってクレータが形成される際に、放出物の堆積によってその付近の地形がリセットされ、その後、時間がたつにつれ、クレータ放出物上により小さいクレータが蓄積する。クレータの相対年代はその後に出来た小クレータの個数密度から決定することが可能である。

近年の月探査の成功により高解像度の画像データによる月面の詳細画像が蓄積され個々のクレータの精度の高い年代決定が可能となった。そこで、本研究では、月周回衛星「かぐや」データを用いて、光条クレータを対象にクレータ年代学によって形成年代を求めることで、過去 10 億年間のクレータ形成頻度の時間変化について議論する。

キーワード: 月, クレータ, クレータ年代学

Keywords: Moon, crater, cratering chronology

月の線状重力異常の形成過程と熱進化 Formation process of linear gravity anomalies and thermal evolution of the Moon

澤田 なつ季^{1*}; 諸田 智克¹; 石原 吉明²; 平松 良浩³

SAWADA, Natsuki^{1*}; MOROTA, Tomokatsu¹; ISHIHARA, Yoshiaki²; HIRAMATSU, Yoshihiro³

¹ 名古屋大学環境研究科地球環境科学専攻, ² 宇宙航空研究開発機構, ³ 金沢大学自然科学研究科

¹Graduate School of the Environmental studies, Nagoya University, ²JAXA, ³Graduate School of Natural Science and Technology, Kanazawa University

1. はじめに

重力分布による月内部の密度構造の解明は月の初期進化過程を理解するための一つの手段である。Andrew-Hanna et al. (2013) は GRAIL の重力データを解析し、大規模な線状の重力異常を複数発見した。彼らはこの線状の重力異常の成因を月の初期における全球規模の膨張とマグマの貫入によるものと推定している。そのような大規模なマグマ貫入イベントは重力データ以外にもその痕跡を残すことが期待される。本研究の目的は、地形データと FeO 濃度分布を用いて線状重力異常に対応する地形的特徴の存在とマグマ貫入由来の痕跡を調査し、月の線状重力異常の形成過程を検討することである。

2. 解析データと手法

対象箇所は Andrew-Hanna et al. (2013) で同定された 20 の線状重力異常である。使用するデータは LOLA の 1/1024° の月面地形グリッドデータと Clementina の 10pix/° の月面 FeO 濃度分布図である。地形データの解析では、線状重力異常を中心に 300km 以内の領域を切り出し、フィルター処理により小規模なクレーターによる地形の起伏を除去する。線状重力異常に対して垂直な側線毎に線状重力異常上の標高を基準として相対評価した平均標高・標準偏差・平均勾配を計算し、地形断面図を作成した。「線状重力異常付近」を±50km 以内の領域とし、「周辺領域」を 100km 以上離れた領域と設定した。作成した地形断面図を用いて、「線状重力異常付近」と「周辺領域」の地形との比較により、線状重力異常領域の地形学的形態分類、谷地形、山地形、未区分地形の分類、を行った。FeO 濃度分布の解析では、FeO 濃度分布を用いて「線状重力異常付近」の平均 FeO 濃度と標準偏差を計算した。

3. 結果

地形データの解析から、線状重力異常の分布は谷地形とよく対応することが明らかになった。このことから、線状重力異常域は月形成初期における引張応力場による地溝的領域に形成されたと推測される。

FeO 濃度分布を解析した結果、高地に存在する「線状重力異常付近」の平均 FeO 濃度は 6.72 ± 1.62 [wt%] となり、月の高地試料 (<6[wt%]) と比較して高いことが明らかとなった。これはクレーター掘削による貫入岩の露出の可能性を示唆する。

4. 考察と結論

上記の観測事実と Head and Wilson (1992) の熱史から線状重力異常の原因である線状構造の形成過程について以下の仮説を提唱する。月の初期は熱膨張過程のため引張な応力状態であった。~4.0Ga に引張応力場により亀裂が生じた後に、マグマが貫入したことで線状構造が作られたと考えられる。4.0~3.0Ga に海を形成したマグマ活動によって線状構造が隠された。その後の月全球の冷却に伴う圧縮応力場、または衝突盆地固有の圧縮応力場により、3.8~3.0Ga に海でリッジが形成された。リッジを形成する際に線状構造付近で生じた亀裂を利用したと推測される。

キーワード: マグマ貫入イベント, 熱膨張, リッジ, FeO 濃度, 月面地形データ

Keywords: magmatism intrusions event, expansion, ridge, FeO concentration, Lunar topography data

プリズムモデルによる月磁気異常磁化ソースの推定 Source of the lunar magnetic anomalies estimated with the prism model

横山 貴史^{1*}; 高橋 太¹; 綱川 秀夫¹
YOKOYAMA, Takashi^{1*}; TAKAHASHI, Futoshi¹; TSUNAKAWA, Hideo¹

¹ 東京工業大学大学院理工学研究科

¹Department of Earth and Planetary Sciences, Tokyo Institute of Technology

月は現在グローバルな固有磁場を持たないが、アポロ計画以降、磁力計や電子反射計の観測により月には磁気異常が多数存在することが知られている。これは地殻の岩石が持つ残留磁化によるものである。しかし、その獲得メカニズム、記録している磁場、すなわち磁気異常の起源には諸説ありまだ明らかになっていない。主に考えられている起源としては、Hood et al. (2001)、Hood et al. (2013) などは、Reiner Gamma、Rima Sirsalis 磁気異常などの巨大衝突盆地から放射状に分布・伸長するように見える磁気異常のソースとして、インパクトで飛散した ejecta の堆積物を示唆している。この場合、磁気異常ソースは表面付近に分布していると考えられる。また、Purucker et al. (2012) は、South-Pole Aitken 盆地北西部の WNW-ESE に伸長する磁気異常群のソースとして岩脈を考え、幅約 30km の 2 次元板状モデルで磁気異常を説明している。岩脈モデルの場合、水平方向に細長く鉛直方向に深い磁気異常ソースとなる。このように月の磁気異常は月地殻の形成・進化の情報も含み、磁気異常ソースの深さ分布や形状、磁化の情報を得ることは非常に重要である。ソースモデルとして、Hemingway&Garrick-Bethell (2012) や Nicholas et al. (2007) は、dipole をつかって磁気異常をモデル化している。また、また、Hood (2011) や Richmond et al. (2003) では、月表面に置いた円盤ソースで磁気異常をモデル化している。しかし、これらのモデルではソースの形状や深さ分布に関して有意に情報を得られない。そこで本研究では、磁気異常ソースとして一様に磁化したプリズムを仮定し、位置・サイズ・磁化ベクトルだけでなく上面・下面の深さもパラメータとして取り扱い、表面のソース、地殻内部のソースも可能なモデル化を行った。

これまでにモデル解析を行った地域は、衝突盆地内で観測される磁気異常として Crisium、Mendel-Rydberg の 2 箇所、衝突盆地との関連が見られない独立した磁気異常として Reiner Gamma、Rima Sirsalis、Descartes、Airy、Abel の 5 箇所である。解析には Lunar Prospector と Kaguya の磁力計による低高度観測データ（磁気圏内観測、Wake 側観測）を使用した。磁気異常ソースとして一様に磁化した鉛直方向の直方体を仮定し、中心点の緯度・経度、水平方向の縦横サイズ、上面・下面の深さ、磁化の大きさ・方位をパラメータとした。Dipole モデルの結果を参考に初期値を決め、反復的にパラメータ値を変化させる反復法として解き、モデル磁場と観測磁場との差が収束するパラメータ解を求めた。これを反復的に変化させフォワード法として解き、モデル磁場と観測磁場との一致が良くなるようにパラメータ解を求めた。収束解を得たのち、磁気異常ソースの個数を変え、最適数を赤池情報量基準 (AIC) を用いて選択した。

現時点での解析結果から、ほとんどのソースモデルに共通する特徴として以下の 3 つが挙げられる。(1) 上面深度は表面～数 km であり、下面深度は数 km～20km 程度となった。(2) 水平方向のサイズとして、縦横比が 2 以上の細長い形状となり、幅は数 km のものが多い。(3) 磁化強度は 1 A/m を超え、月リターンサンプルの磁化強度より一桁以上大きくなった。下面深度の結果から、今回解析した磁気異常ソースとして、月地殻内部の物質を考えるモデルの方が ejecta モデルよりも妥当と考えられる。一方、一部のソース形状の水平伸長方向は Imbrium 盆地から放射状になっているとも解釈でき、巨大盆地形成と関連する可能性もありうる (Hood et al., 2001)。

今後、複雑な磁気異常地域の解析が進め、様々な磁気異常ソースの特徴を把握することで、磁気異常生成メカニズムにとって重要な情報を得られると期待される。さらに、磁気異常ソースの位置と高アルベド地域 (swirl) 分布との関係についても検討する予定である。

キーワード: 月, 磁気異常, プリズムソースモデル, スワール
Keywords: moon, magnetic anomaly, prism source model, swirl

階段状磁場変化に対する月の電磁応答 Lunar Electromagnetic responses to the stepwise changes in the IMF

比嘉 哲也^{1*}; 吉村 令慧²; 大志万 直人²; 清水 久芳³; 松島 政貴⁴; 高橋 太⁴; 渋谷 秀敏⁵; 綱川 秀夫⁴
HIGA, Tetsuya^{1*}; YOSHIMURA, Ryokei²; OSHIMAN, Naoto²; SHIMIZU, Hisayoshi³; MATSUSHIMA, Masaki⁴; TAKA-
HASHI, Futoshi⁴; SHIBUYA, Hidetoshi⁵; TSUNAKAWA, Hideo⁴

¹ 京都大学大学院理学研究科, ² 京都大学防災研究所, ³ 東京大学地震研究所, ⁴ 東京工業大学大学院理工学研究科, ⁵ 熊本大学理学部

¹Graduate School of Science, Kyoto University, ²Disaster Prevention Research Institute, ³Earthquake Research Institute, University of Tokyo, ⁴Department of Earth and Planetary Sciences, Tokyo Institute of Technology, ⁵Department of Earth and Environmental Sciences, Kumamoto University

月の起源・進化に対する理解を深める上で、月の電気伝導度構造（内部構造）を明らかにすることは必要不可欠である。かぐや衛星の磁場観測装置 LMAG で取得された磁場データに関して、2007 年 12 月 21 日から 2008 年 10 月 31 日の期間（衛星高度 100 km）のデータを用いて、電気伝導度の推定を行っている。月において電磁誘導現象が発生した場合、電磁誘導のソースとなる磁場変化と、月の電磁誘導による二次磁場の和として磁場変化が観測されていることが期待され、定点観測である Apollo12 号ではそのような事例が報告されている（例えば Dyal and Parkin, 1971）。本研究では、月の遠方太陽側に位置する ACE 衛星もしくは WIND 衛星で観測された階段状の惑星間空間磁場変化に着目し、月への到来時刻に対応する時間帯の LMAG データにも、前述の電磁誘導現象と考えられる記録を確認した。

上記のかぐやにおける観測事例に対して、月を一様導体球と仮定して電気伝導度を求める Dyal and Parkin (1971) の手法を適用すると、階段状磁場変化の主たる成分に対する電磁応答が再現でき、一様導体球とみなした月の電気伝導度は、 $1 \times 10^{-4} \sim 4 \times 10^{-4}$ S/m と推定された。他方 LMAG データには、入力磁場の微小成分に対して、モデル計算からは予測されない信号が含まれていることが明らかになった。Apollo、Lunar Prospector のデータについても精査した結果、このような信号は、階段状磁場変化到来時に共通するものであるとわかった。本発表では、かぐや、Apollo、Lunar Prospector の磁場データを用いた電気伝導度のモデル計算の結果と、新たに判明した特異な信号について報告する予定である。

キーワード: 月, かぐや, LMAG, 電磁誘導, 電気伝導度

Keywords: Moon, KAGUYA, SELENE, LMAG, induction, conductivity

Plasma observations above strong lunar crustal fields in the solar-wind wake Plasma observations above strong lunar crustal fields in the solar-wind wake

NISHINO, Masaki n^{1*} ; SAITO, Yoshifumi² ; TSUNAKAWA, Hideo³ ; TAKAHASHI, Futoshi³ ; YOKOTA, Shoichiro² ; MATSUSHIMA, Masaki³ ; SHIBUYA, Hidetoshi⁴ ; SHIMIZU, Hisayoshi⁵ ; FUJIMOTO, Masaki² ; NISHINO, Masaki n^{1*} ; SAITO, Yoshifumi² ; TSUNAKAWA, Hideo³ ; TAKAHASHI, Futoshi³ ; YOKOTA, Shoichiro² ; MATSUSHIMA, Masaki³ ; SHIBUYA, Hidetoshi⁴ ; SHIMIZU, Hisayoshi⁵ ; FUJIMOTO, Masaki²

¹Nagoya University, ²ISAS/JAXA, ³Tokyo TECH, ⁴Kumamoto University, ⁵Earthquake Research Institute, The University of Tokyo

¹Nagoya University, ²ISAS/JAXA, ³Tokyo TECH, ⁴Kumamoto University, ⁵Earthquake Research Institute, The University of Tokyo

Plasma signature around crustal magnetic fields is one of the most important topics of the lunar plasma sciences. Although recent spacecraft measurements are revealing solar-wind interaction with the lunar crustal fields on the dayside, plasma signatures around crustal fields on the night side have not been fully studied yet. Here we show evidence of plasma trapping on the closed field lines of the lunar crustal fields in the solar-wind wake, using SELENE (KAGUYA) plasma and magnetic field data at 15 km altitude. In contrast to expectation on plasma cavity formation at the strong crustal fields, electron flux is enhanced above one of the strongest crustal fields, Crisium Antipode (CA), where the magnetic field along the spacecraft orbit is as strong as 80 nT. The enhanced electron fluxes above CA are characterized by bidirectional beams in the lower energy range (typically lower than 100 eV), which shows that these electrons are trapped on the closed field lines of the crustal magnetic fields, although a possibility of opened field configuration with cusps is not totally excluded. The observed electrons on the closed field lines may come from the lunar night side surface, while the mechanism of electron supply onto the closed field line remains to be solved.

キーワード: Lunar crustal field, Lunar plasma environment, Lunar wake, SELENE (KAGUYA)

Keywords: Lunar crustal field, Lunar plasma environment, Lunar wake, SELENE (KAGUYA)

A long-term all-sky imager observation of lunar sodium tail A long-term all-sky imager observation of lunar sodium tail

NISHINO, Masaki n^{1*}; SHIOKAWA, Kazuo¹; OTSUKA, Yuichi¹
NISHINO, Masaki n^{1*}; SHIOKAWA, Kazuo¹; OTSUKA, Yuichi¹

¹Solar-Terrestrial Environment Laboratory, Nagoya University

¹Solar-Terrestrial Environment Laboratory, Nagoya University

The Moon possesses long tail of neutral sodium atoms that are emitted from the lunar surface and transported anti-sunward by the solar radiation pressure. Since the earth crosses the lunar sodium tail for a few days around the new moon, the resonant light emission from sodium atoms can be detected from the ground. Although it has been reported that bright emissions from sodium atoms of the tail is observed during the Leonids meteor shower, only few events without meteor shower have been investigated so far. Here we show a long-term (over 15 years) observation of the lunar sodium tail using all-sky imager at Shigaraki Observatory (35N, 136E), Japan. We have surveyed our database of all-sky sodium images at a wavelength of 589.3 nm to find that a bright spot emerges around the anti-lunar point for a few days around the new moon. Although the sodium spot is the brightest during the Leonids meteor shower, a weaker sodium spot is detected in the period without meteor shower as well. The sodium spot gradually moves eastward (roughly, 0.2 hours a day), which shows that the sodium tail is strongly affected by the earth's gravity. We will present the latest results of our data analysis to discuss signatures of the lunar sodium tail as well as the origin of the lunar sodium exosphere.

キーワード: Lunar sodium tail, Lunar exosphere, All-sky imager observation

Keywords: Lunar sodium tail, Lunar exosphere, All-sky imager observation