

「かぐや」LRS: 月表面反射観測における表面粗さの影響 Surface roughness effect on KAGUYA LRS surface echo observation and its calibration

小林 敬生^{1*}; 李 承烈¹
KOBAYASHI, Takao^{1*}; LEE, Seung ryeol¹

¹ 韓国地質資源研究院

¹ Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources

KAGUYA Lunar Radar Sounder (LRS) was an HF (5MHz) radar whose primary mission was to explore subsurface of the Moon. Its footprint covered whole surface of the Moon in its operation period. All the data was processed by applying Synthetic Aperture Radar (SAR) algorithm so that the signal-to-noise ratio of target echoes as well as the spatial resolution was improved.

The data was further processed to extract nadir surface echoes so that the surface property of the Moon was studied in a spectral range of the HF band. The physical property that can be known directly from the data was the apparent reflectivity of the lunar surface in the frequency range of the HF band: The data contains scattering effect of surface roughness due to the surface terrain. We need to separate this scattering effect from the data so that we can make quantitative evaluation of the surface reflectivity. In order to meet this requirement, we carried out simulation of KAGUYA LRS observation to evaluate the surface scattering effect due to the lunar surface terrain.

The simulation was based on Kirchhoff approximation method. The Lunar Imager/SpectroMeter (LISM) Digital Elevation Model (DEM) data was utilized to simulate actual lunar surface terrain. Flat surface observation was simulated as the reference case before the simulation of actual LRS observation was carried out. We assumed that the dielectric constant of the lunar surface material was 4.0.

Our simulation revealed that even a mare surface where the surface is often regarded to be flat certainly behaved as a rough surface which gave a rise to decrease of the nadir echo intensities for a few decibels in comparison to the flat surface reflection. This effect gives a significant influence on estimation of regolith thickness in maria. Newly estimated regolith thickness was approximately a meter smaller than previously estimated value: it turned out to be 6 - 7 m in Mare Imbrium.

キーワード: かぐや, LRS, HF レーダ, 表面反射, 散乱

Keywords: KAGUYA, LRS, HF radar, surface echo, scattering

かぐやで観測されたレーダエコー強度に基づく月表面誘電率の決定 Determination of the dielectric constant of the lunar surface based on the radar echo intensity observed by the Kaguya

熊本 篤志^{1*}; 石山 謙¹; 小林 敬生²; 押上 祥子³; 春山 純一⁴

KUMAMOTO, Atsushi^{1*}; ISHIYAMA, Ken¹; KOBAYASHI, Takao²; OSHIGAMI, Shoko³; HARUYAMA, Junichi⁴

¹ 東北大学, ² 韓国地質資源研究院, ³ 国立天文台, ⁴ 宇宙航空研究開発機構

¹Tohoku Univ., ²KIGAM, ³NAOJ, ⁴JAXA

In the planetary radar observation, echo power and delay time depend on the effective dielectric constant, or equivalent dielectric constant including the voids in the planetary uppermost media. As for the Moon, because there is almost no material whose dielectric constant is far from the basalt rocks, the effective dielectric constant of the lunar uppermost media is considered to depend mainly on their porosity. So if we can determine the effective dielectric constant of the lunar uppermost media, we can derive their bulk density, or density including the voids based on the empirical relation between the dielectric constant and bulk density of the Apollo samples [Carrier et al., 1991].

If we are going to use echo power for determination of the permittivity, we should note that the radar echo intensity depends not only on the dielectric constant but also on the roughness of the surface. Therefore, we have determined the permittivity of the lunar surface with considering the surface roughness. In the analysis, the dielectric constant is determined by using the radar echo intensity obtained by Kaguya Lunar Radar Sounder (LRS) [Ono et al, 2000; 2008; 2010], and the surface roughness parameters derived from Digital Terrain Model (DTM) based on Kaguya Terrain Camera (TC) observation [Haruyama et al., 2008]. The global distributions of the echo powers in a frequency range of 4-6 MHz were derived from the Kaguya/LRS dataset. We have used the intensity of off-nadir echoes in an incident angle from 5 to 15 degree. The reason why nadir echoes are not used in the analysis is because the echo intensity changes drastically in small incident angle range due to the poor range resolution from the spacecraft to the off-nadir reflection point. The echoes arrived after the arrival of the nadir surface echo were identified as off-nadir echoes in this study. In addition, we have also derived the global distribution of the surface roughness parameters. The RMS height of the surface can be obtained by $\langle(z(x+L)-z(x))^2\rangle$, where $z(x)$ is height of the surface derived from the Kaguya TC/DTM, L is baseline length, and $\langle\rangle$ denotes the average. If we assume the self-affine surface model, the roughness parameters H and s can be obtained by the least square fitting of the RMS heights to sL^H . The off-nadir surface echo power can be calculated based on the radar equation. Assuming Kirchhoff Approximation (KA), the backscattering coefficient in the radar equation can be obtained from the roughness parameters H and s , and assumed dielectric constant [cf. Bruzzone et al., 2011]. Using the backscattering coefficient, we can calculate the expected off-nadir surface echo powers. By performing the comparison between calculated and observed echo powers, we can determine most plausible dielectric constant. In the calculation of the echo powers, the transmitting loss of LRS have to be determined, which are however difficult to measure in the ground tests. So we estimated the transmitting loss to be 5.8 dB by assuming that the average dielectric constant is to be 5.3, which are derived from bulk density of 2.55 g/cm³ in the highlands reported based on GRAIL observations [Wieczorek et al., 2013].

The obtained Hurst exponent H is less than 0.5 in the maria, and about 0.9 in the highland. The parameter s is about 1 in the maria, and about 0.3 in the highland. By applying the analysis method mentioned above, we could obtain the observed and calculated surface echo powers in the regions where $H < 0.5$, and $H > 0.9$. Based on them, we could estimate the average dielectric constant in the maria ($H < 0.5$) to be 7, and that in the highland ($H > 0.9$) to be 4. The bulk densities are therefore estimated to be 3.0g/cm³ in the maria ($H < 0.5$), and 2.1g/cm³ in the highland. It suggests that there are more voids in the highland than in the maria due to longer exposure to the meteorite impacts.

Keywords: Kaguya (SELENE), Lunar Radar Sounder (LRS), Terrain Camera (TC), Surface roughness, Bulk density, Dielectric constant

虹の入り江および雨の海北西部における構造発達史 Tectonic evolution of Sinus Iridum and northwestern Imbrium regions

嵩由美子^{1*};山路敦¹;佐藤活志¹;春山純一²;諸田智克³;大竹真紀子²;松永恒雄⁴
DAKE, Yuko^{1*}; YAMAJI, Atsushi¹; SATO, Katsushi¹; HARUYAMA, Junichi²; MOROTA, Tomokatsu³; OHTAKE, Makiko²
; MATSUNAGA, Tsuneo⁴

¹ 京都大学理学研究科地球惑星科学専攻, ² 宇宙航空研究開発機構宇宙科学研究所, ³ 名古屋大学大学院環境学研究科, ⁴ 国立環境研究所

¹Graduate School of Science, Kyoto University, ²Japan Aerospace Exploration Agency / Institute of Space and Astronautical Science, ³Graduate School of Environmental Studies, Nagoya University, ⁴National Institute for Environmental Studies

リッジは、多くが海内部に集中して、弧を描くように分布することから溶岩堆積時の荷重で表層が水平短縮した構造だと考えられてきた。しかし近年、1.0 Ga以降に形成された lobate scarps (Watters et al., 2010) や、溶岩堆積後に形成されたリッジの発見が報告されている (Ono et al., 2008)。溶岩堆積時の変形以外の要因として、月の冷却に伴う変形や軌道進化に伴う変形が考えられる。溶岩堆積時の変形であれば、構造形成は溶岩大量噴出時期と一致するはずである。そこで本研究では、リッジが変形させている溶岩と堰き止めている溶岩のクレーター年代を求め、構造形成年代制約を行った。主に使った画像は、SELENE が取得した可視画像、近赤外域画像、地形データである。

その結果、本研究地域の主要なリッジ形成は、雨の海の溶岩大量噴出時期である 3.

0 Ga よりも若いことが分かった。ラプラス岬の南に位置する NNE-SSW 走向のリッジ群は、44° 以北では 2.1 Ga の溶岩を堰き止め、以南では変形させている。従って、このリッジ群は、北部は 3.3 から 2.1 Ga の間に、南部は 2.1 Ga 以降に形成されたと考えられる。同様に、ラプラス岬の南の E-W 走向のリッジ群は、主に 3.0 から 2.1 Ga の間に形成されたが、2.1 Ga 以降に一部地域が成長していることがわかった。

また、LROC NAC 画像を使って見つかった 1.0 Ga 以降の小構造も報告する。

キーワード: リッジ, 構造形成年代, クレーター年代, マスコンテクトニクス

Keywords: Mare ridges, Deformation ages, Crater ages, Mascon tectonics

月地殻表層の水平短縮量 Evaluation of the horizontal shortening in the shallow part of the lunar crust

山路 敦^{1*}; 嵩 由美子¹; 佐藤 活志¹; 春山 純一³; 諸田 智克²; 大竹 真紀子³; 松永 恒雄⁴
YAMAJI, Atsushi^{1*}; DAKE, Yuko¹; SATO, Katsushi¹; HARUYAMA, Junichi³; MOROTA, Tomokatsu²; OHTAKE, Makiko³
; MATSUNAGA, Tsuneo⁴

¹ 京都大学大学院理学研究科地球惑星科学専攻, ² 名古屋大学大学院環境学研究科, ³ 宇宙航空研究開発機構宇宙科学研究本部, ⁴ 国立環境研究所環境計測研究センター

¹Divisin of Earth and Planetary Scieces, Kyoto University, ²Graduate School of Environmental Studies, ³Institute of Space and Astronautical Science, JAXA, ⁴Center for Environmental Measurement and Analysis, National Institute for Environmental Studies

月の起源や熱史を制約するために, mare ridge (以下, リッジ) や lobate scarp などの地質構造が利用されている。その際, 弾性係数などから強度を推定し, それを超える応力が発生したという議論がなされるのが普通である。しかし, 既存断裂やメガレゴリス層の存在のため, マクロスケールの表層物質の強度の推定は難しい。地質構造から歪み量を評価する方が直接的だが, SELENE など近年のデータでそれが可能になってきた。

これまでも歪み量の見積もりはあるが, まったく不確かである。インブリア紀以降の全球冷却で月の半径が約 1km 減少したとされるが, それは根拠の薄弱な MacDonald (1960) の議論に依拠する。Apollo 時代の地形データにもとづいて, リッジが褶曲構造であるとの仮定のもとに, Bryan (1973) は 1 つのリッジ形成による水平短縮を 0.5% とした。これがリッジによる短縮量を代表しているとするなら, 月の半径の減少量はやはり 1km 程度である。

本研では, 雨の海北西部および虹の入り江の地質構造を, SELENE の LISM データおよび LROC 画像で精査した。地下におけるリッジの実態は断層関連褶曲 (fault related fold) であろうが, その逆断層が月面を破る場合と破らない場合がある。前者なら, 逆断層の変位量と傾斜角から水平短縮量が見積もられる。後者なら, 海の玄武岩は水平に堆積したと仮定し, リッジ群を横切る測線での地形断面の長さとして現在の水平距離を比較することで, 短縮量を見積もることができる。前者の例は, 雨の海北部のリッジで見つかった。ここでは, 500m 規模の水平短縮がある。ところが, その他のリッジでは, 月面を断層が破っているにせよ, 断層による短縮量は観測にかからないくらい小さかった。また, 断層ではなく褶曲による短縮量を TC からつくられた DTM で検討した結果, リッジ群の形成によるこの地域の地殻短縮量は, Rryan の見積もりよりずっと小さく, 0.001% の桁に過ぎないことが分かった。この小ささは, 見積もり自体の正しさよりむしろ, DTM の精度では捉えられないほど短縮量が小さいことを意味する。

LROC 画像でこの地域のリッジ群を精査したが, クレータがリッジを形成したと思いき逆断層で切られる例は散見されるものの, 逆断層による目立った短縮を示すクレータは見られなかった。上述の 500m 短縮を起こしたリッジでも同様である。このことは, 約 30 億年前の玄武岩堆積直後, 溶岩平原にまだクレータがあまりできないうちに 500m 短縮が完了したことを意味する。嵩ほか(当セッションの発表)により, この地域の主要なリッジの少なくとも一部は 10 億年以上の長期にわたって成長してきたことが分かったが, その間の短縮量としては非常に小さかったといえる。この地域で今回 LROC 画像により, エラステネス紀末~コペルニクス紀のグラーベンを発見した。これらのことは, そのように最近になるまで, この地域が水平伸長と水平短縮の境界的な状況にあったことを示唆する。これは, 30 数億年まえから月の表層はずっと水平短縮で, 月の半径は 1km 程度短縮したという, 普及している描像に反する結果である。

キーワード: テクトニクス, リンクル・リッジ, グラーベン, バランス断面
Keywords: tectonics, wrinkle ridge, graben, restoration

月の海の火成活動：20億年前のスーパーホットプルームイベントの検証 Volcanic activity of lunar maria: Verification of super hot plume event at 2.0 Ga ago

加藤 伸祐^{1*}; 諸田 智克¹; 渡邊 誠一郎¹; 山口 靖¹; 大嶽 久志²; 大竹 真紀子²

KATO, Shinsuke^{1*}; MOROTA, Tomokatsu¹; WATANABE, Sei-ichiro¹; YAMAGUCHI, Yasushi¹; OTAKE, Hisashi²; OHTAKE, Makiko²

¹ 名古屋大学大学院環境学研究科地球環境科学専攻, ² 宇宙航空研究開発機構

¹Nagoya University Graduate School of Environmental Studies, ²Japan Aerospace Exploration Agency

固体惑星の形成と進化の体系的な理解に向けて、地球型惑星の小型端成分である月の初期進化を理解することは重要である。しかし、月のマグマオーシャンからの固化過程やその後の大規模な構造変化の有無については未だに良く分かっていない。

それを解決するための手段として、月の海の玄武岩を調べることは有効である。海の玄武岩の組成と年代の関係から、マンツルの組成や熱進化に関する情報が得られる可能性があり、マグマオーシャンの固化モデルや月マンツルの進化モデルを制約できると期待される。月の海の年代は、衛星によって得られた画像データを用いて、クレーターの浸食やサイズ頻度、層序関係などのクレーター年代学的手法に基づいて多くの研究によって調べられてきた。その結果、海の玄武岩の年代は、月の火山活動史の終盤(およそ20億年前)において、2度目のピークを持ち、最後の噴出はほぼ嵐の大洋と雨の海の地域に限られることを示した。

本研究では、月周回衛星「かぐや」に搭載されたマルチバンドイメージャによる分光データを用いて高分解能で算出されたチタン含有量を、玄武岩ユニットごとに地質を考慮して平均し、年代との相関関係を調べた。その結果、噴出が長く続いた Procellarum や Imbrium といった海では、約23億年前にチタン含有量が急激に増加していることが分かった。このチタン含有量の変化はマグマソースが変化したことを示唆しているのかもしれない。そこで本研究では、23億年前以前を「Phase 1 火成活動」、23億年前以後を「Phase 2 火成活動」と呼ぶことにする。これらの事実から、我々はマンツルの組成・構造変化に関して、20億年前頃にスーパーホットプルームが起こったという可能性を提示する。

スーパーホットプルーム仮説を検証するために、我々は測地学的データを用いて解析を行った。地形とセレノイドの差を計算し、マップ化すると、PKTの若い噴出のちょうど中央付近で台地状の特徴が見られた。この構造の規模は、北東-南西方向に1,000 km、北西-南東方向に1,200 km、周囲の海からの標高差はおよそ700 mであった。これはおそらくスーパーホットプルームの上昇に伴って形成されたものであると考えられる。そして、その構造を中心として、Phase2の噴出による玄武岩ユニットが形成された。スーパーホットプルームの上昇が、約20億年前であるとする、およそその海の形成が終わった後であり、地殻構造の変化は、何らかの形で残されているはずである。本発表では、Phase2のHiチタンな噴出とスーパーホットプルームの関係性についての検証を行う。

キーワード: 月, 月の海, チタン含有量, PKT, スーパーホットプルーム, セレノイド

Keywords: Moon, lunar mare, titanium content, the Procellarum KREEP Terrane, super hot plume, selenoid

月のマントル進化の数値シミュレーション Numerical models of mantle evolution in the moon

小河 正基^{1*}
OGAWA, Masaki^{1*}

¹ 東京大学総合文化研究科

¹ Graduate School of Arts and Sciences, Univ. of Tokyo

月では、火成活動はマントル進化史の最初の10億年程度のうちにピークを過ぎ、その後は急速に衰えた。この特徴を理解することを目的とし、火成活動とマントル対流によるマントル進化の数値シミュレーションを行った。その結果、月のような小さい惑星では火成活動の時間スケールが火星などより大きな惑星より遥かに長く数億年程度になることがわかった。これは、より大きな惑星では、マントル対流の湧昇域でマグマが生成されるとその浮力のためさらにこの湧昇流が強まるというポジティブフィードバックがかかるが、月はこのフィードバックがかかるにはマントルのレイリー数が低すぎるためである。この長い時間スケールは月の海を形成した火成活動の時間スケールをよく説明する。また、このポジティブフィードバックの欠如は、火成活動の熱史への影響（サーモスタット効果）も弱い事を意味する。もともと月ではその低いレイリー数のため対流による熱輸送の熱史への効果も弱いため、このことは、月の進化にとって最も重要なのは、熱拡散による地表面からの冷却である事を示唆する。実際マグマオーシャンの効果を考慮せず、組成的に均質で温度はソリダス温度に等しいという初期条件から出発した予備的なマントル進化の数値シミュレーションでは、最初期の火成活動によりマントルから放射性元素が地殻に濃集して以降、マグマの母岩中の浸透率や地殻マントル全体の放射性元素の存在量などのパラメーターの値によらず、熱拡散によるリソフェアの厚さの増加の結果、火成活動は最初の10億年程度で衰えるという結果を得た。この結果は月の火成活動史の大枠は説明するが、同時に、現実の月で見られるおおよそ20億年前まで続いた局所的な火成活動を理解するためには、マグマオーシャンの効果を考慮する必要のある事も示唆する。

キーワード: マントル進化, マントル対流, 火成活動, 月

Keywords: mantle evolution, mantle convection, magmatism, the moon

ボロノイダイアグラムを用いた月面クレーターから二次クレーターの抽出について Identification of secondary craters based on the Voronoi diagram of the lunar craters

木下 達生¹; 本田 親寿^{1*}; 平田 成¹; 諸田 智克²
KINOSHITA, Tatsuo¹; HONDA, Chikatoshi^{1*}; HIRATA, Naru¹; MOROTA, Tomokatsu²

¹ 会津大学, ² 名古屋大学大学院環境学研究科

¹The University of Aizu, ²Graduate School of Environmental Studies, Nagoya University

We developed an automatic method for detecting crater clusters with crater spatial distribution based on the Area Voronoi tessellation technique. In the method based on the hierarchical cluster analysis, the evaluation of crater strongly depends on the closest one crater (or one cluster). In the method based on Voronoi tessellation on the other hand, it depends on the adjacent all craters. Since, this approach does not misjudge the pair craters evaluated cluster by the method based on the hierarchical cluster analysis. When a small crater is close adjacent a large crater, a boundary line of Voronoi tessellation is in the rim of the crater. This is different from the line a person pulls by intuition. So, we select Area Voronoi tessellation. For estimate an area of Voronoi, we adopted the wave front method (Watanabe and Murashima, 2006). We applied the Area Voronoi tessellation to observed crater spatial distribution. If the area of Voronoi cell is small, the crater becomes the candidate of the crater cluster. As a result, for the evaluation of crater spatial distribution, we propose that the Area Voronoi diagram is suitable to identify candidates of secondary crater.

キーワード: 二次クレーター, ボロノイダイアグラム

Keywords: secondary crater, Voronoi diagram

かぐやスペクトルプロファイラデータを動的に解析するためのウェブアプリケーション開発 Development of a web application for dynamic analysis of the Kaguya Spectral Profiler data

杉本 紘平¹; 林 洋平²; 小川 佳子^{1*}; 平田 成¹; 寺 蘭 淳也¹; 出村 裕英¹; 松永 恒雄³; 山本 聡³; 横田 康弘³; 大竹 真紀子⁴; 大嶽 久志⁴

SUGIMOTO, Kohei¹; HAYASHI, Yohei²; OGAWA, Yoshiko^{1*}; HIRATA, Naru¹; TERAZONO, Junya¹; DEMURA, Hirohide¹; MATSUNAGA, Tsuneo³; YAMAMOTO, Satoru³; YOKOTA, Yasuhiro³; OHTAKE, Makiko⁴; Otake, Hisashi⁴

¹ 会津大学, ² 産総研, ³ 国環研, ⁴ 宇宙研

¹University of Aizu, ²AIST, ³NIES, ⁴ISAS/JAXA

Kaguya is a Japanese lunar orbiter launched on September 14, 2007 and observed the moon for about 2 years. The Spectral Profiler (SP) on board Kaguya was a spectrometer which provided global data set of visible-near infrared continuous reflectance spectra of the Moon. GEKKO is a web-application used to visualize the data observed by SP. GEKKO displays the graph of SP spectra and tables of ancillary data with thumbnail images simultaneously taken by Kaguya imager/camera. The current version of GEKKO is very useful for viewing SP spectra, but does not include analysis functions.

The goal of this study is to develop a framework for implementing analysis functions of the SP data. For transferring the data from the client, the original GEKKO connects to the server using MapServer. However, in case of MapServer, the client-researchers can only analyze in a predetermined manner. Therefore, we prepared CGI scripts and incorporated them into GEKKO.

By using the new GEKKO system, the clients-researchers will be able to dynamically analyze the SP data. The clients can select, coordinate and add the functions according to their objectives. We prepared the basic functions commonly used for the spectral analysis, such as running average, normalization and also similarity measurement.

月サウスポールエイトケン盆地の岩石・鉱物分布 Rock and mineral distribution of the lunar South Pole-Aitken basin

上本 季更^{1*}; 大竹 真紀子²; 春山 純一²; 山本 聡³; 中村 良介⁴; 松永 恒雄³; 岩田 隆浩²
UEMOTO, Kisara^{1*}; OHTAKE, Makiko²; HARUYAMA, Junichi²; YAMAMOTO, Satoru³; NAKAMURA, Ryosuke⁴; MATSUNAGA, Tsuneo³; IWATA, Takahiro²

¹ 東京大学, ² 宇宙航空研究開発機構, ³ 国立環境研究所, ⁴ 産業技術総合研究所

¹The University of Tokyo, ²Japan Aerospace Exploration Agency, ³National Institute for Environmental Studies, ⁴National Institute of Advanced Industrial Science and Technology

背景: サウスポール・エイトケン (以下 SPA) 盆地は月裏側の南半球に広がる月最大級の衝突盆地 (直径約 2200~2500 km) [1] であり、表面の地殻がはぎとられ、月マントルが露出しているといわれている [2]。そのため、SPA は月内部の組成を調べる上で最も重要な領域の 1 つである。SPA の中心部では、月マントル物質が地下深くまで溶融し貯留しているインパクトメルトプールが形成されたと考えられている [3]。その組成を調査することは、未だ解明されていない月マントル組成解明に繋がれると考える。ただし現在、SPA 盆地の内部は、盆地形成以降に噴出した溶岩流 (以下マーレ) による被覆や、衝突飛散物等による表面の混合により [4]、インパクトメルトプールの露出面積や鉱物・化学組成、溶融規模などは不明である。さらに、SPA 中心部は同プールを形成するインパクトメルトと似た鉱物組成をもつ溶岩流 (以下クリプトマーレ) が存在する可能性があるとして先行研究で言われているが [4]、先行研究では地形や反射率から推測されているのみである上に、使用したデータの解像度が低く、スペクトルの解析波長も短いため、各岩石同士の層序関係や、鉱物種を詳細に調査しておらず、中心部の地質は曖昧といえる。

手法: 本研究では、月周回衛星かぐやによって得られた標高情報 (LALT) と標高情報から製作した地形凸凹、分光データ (MI・SP) による盆地内部の岩石・鉱物組成を用いて、インパクトメルトプールの位置とサイズ (直径)、および岩相の推測をおこなった。

結果・考察: SPA 盆地内に地形の窪みが存在し、その外側と内側で、鉱物・化学組成が大きく異なり、外側では地殻物質や溶岩噴出物などが複雑に入り組んで存在するのに対し、内側では高カルシウム輝石に富む岩石が広く存在することが解った。さらにその地域の鉱物分布を詳細に解析した結果、主に低カルシウム輝石に富む岩石、高カルシウム輝石に富む岩石、マーレ物質に分けられた。SPA 盆地形成後にできたクレーターの内部や中央丘等の情報を使うことで、層序は上から、上部低カルシウム輝石層およびマーレ物質層→高カルシウム輝石層→下部低カルシウム輝石層と推測される。高カルシウム輝石層は、最上面に分布している領域に加え上部低カルシウム輝石層やマーレ物質層の一部覆われている部分も考慮すると、窪地全域に広範囲に存在することや、下部低カルシウム輝石層の中央丘 (最小のもの約直径 60km) から見積もると少なくとも約 10km は層厚が考えられる。この地域のマーレと比較すると、面積、層厚ともに数十倍の差が認められるため、クリプトマーレとは考えにくい。よって高カルシウム輝石層はインパクトメルトプールであると推測した。上部低カルシウム層の由来は窪地外側や分布状況、産状から盆地形成時の飛散物と考えられるが、下部低カルシウム輝石層の由来は、インパクトメルトプールの分化等を考慮にいれなければならず、今後の課題である。

[1] Alexander, 1978 [2] Spudis et al., 1994, [3] Lucey et al., 1997, [4] Pieters et al., 2000

キーワード: サウスポールエイトケン, 月, 岩石, 鉱物
Keywords: South Pole-Aitken, lunar, rock, mineral

ハイパースペクトルリモートセンシングによる月高地におけるCaに富む輝石の全球分布 Global Distribution Trend of High-Ca Pyroxene on the Lunar Highland by Satellite Hyperspectral Remote Sensing

山本 聡^{1*}; 中村 良介²; 松永 恒雄¹; 小川 佳子³; 石原 吉明⁴; 諸田 智克⁵; 平田 成³; 大竹 真紀子⁴; 廣井 孝弘⁶; 横田 康弘¹; 春山 純一⁴

YAMAMOTO, Satoru^{1*}; NAKAMURA, Ryosuke²; MATSUNAGA, Tsuneo¹; OGAWA, Yoshiko³; ISHIHARA, Yoshiaki⁴; MOROTA, Tomokatsu⁵; HIRATA, Naru³; OHTAKE, Makiko⁴; HIROI, Takahiro⁶; YOKOTA, Yasuhiro¹; HARUYAMA, Junichi⁴

¹ 国環研, ² 産総研, ³ 会津大, ⁴ JAXA, ⁵ 名古屋大, ⁶ ブラウン大

¹ NIES, ² AIST, ³ Univ. of Aizu, ⁴ JAXA, ⁵ Nagoya Univ., ⁶ Brown Univ.

The studies using the spectral data obtained by Spectral Profiler (SP) and Multiband Imager (MI) onboard the Japanese lunar explorer SELENE/Kaguya revealed the global distributions of the purest anorthosite (PAN), olivine-rich materials, orthopyroxene-rich, and spinel-rich materials over the entire Moon. However, the global distribution of high-Ca pyroxene (HCP)-rich sites has been unclear so far. In addition to mare region, which is dominated by HCP, it has been reported that several ray craters on highland regions show HCP-dominant spectra. Thus, the global distribution of HCP-rich sites, especially for the lunar highland regions, would provide important information for the structure and evolution of the lunar crust and mantle. Thus, using the global data set of the SP, we conducted the global survey to find HCP-rich sites on the Moon, especially for the lunar highland regions. Here, we report the global distribution trend of the HCP-rich sites based on this survey.

キーワード: リモートセンシング, ハイパースペクトル, かぐや

Keywords: Remote-sensing, Hyperspectral, Kaguya

月高地地殻の化学組成から推定するマグマオーシャンの固化過程 Solidification of the lunar magma ocean suggested by composition of the highland crust

大竹 真紀子^{1*}; 小林 進悟²; 武田 弘³; 諸田 智克⁴; 石原 吉明¹; 松永 恒雄⁵; 横田 康弘⁵; 春山 純一¹; 山本 聡⁵; 小川 佳子⁶; 唐牛 譲¹; 佐伯 和人⁷

OHTAKE, Makiko^{1*}; KOBAYASHI, Shingo²; TAKEDA, Hiroshi³; MOROTA, Tomokatsu⁴; ISHIHARA, Yoshiaki¹; MATSUNAGA, Tsuneo⁵; YOKOTA, Yasuhiro⁵; HARUYAMA, Junichi¹; YAMAMOTO, Satoru⁵; OGAWA, Yoshiko⁶; KAROUJI, Yuzuru¹; SAIKI, Kazuto⁷

¹宇宙航空研究開発機構, ²放射線医学研究所, ³千葉工大, ⁴名古屋大, ⁵国立環境研究所, ⁶会津大, ⁷大阪大

¹Japan Aerospace Exploration Agency, ²National Institute of Radiological Sciences, ³Chiba Inst. of Technology, ⁴Nagoya University, ⁵National Institute for Environmental Studies, ⁶The University of Aizu, ⁷Osaka University

研究背景と目的: これまでに月高地地殻の Mg 値 (Mg/[Mg+Fe] のモル%比) が月の表側より裏側で高く、裏側を構成する岩石の方が表側よりもより未分化なマグマより結晶化した事が報告されている [1]。Mg 値の他にもう 1 つ Th 濃度もマグマの分化過程の情報源として重要である。Th は液相濃集元素であり、マグマの冷却過程で液相に濃集するため先に結晶化した岩石はより Th 濃度が低い。実際の月面観測からも月裏側の高地地殻は表側に比べて Th 濃度が低い事が報告されており [2]、Mg 値と Th 濃度の結果は定性的には整合している。本研究では Mg 値と Th 濃度の相関を調べる事により観測された月表と裏側の Mg 値や Th 濃度の違いがマグマオーシャンの固化時に形成した結果かどうかを評価し、また地殻形成時のマグマオーシャンの組成推定を試みる。

研究手法: かぐやの γ 線データを用いて Th 濃度のグリッドデータを作成する。その後、かぐやの反射スペクトルデータを用いて Th 濃度に対応する解像度を持つ Mg 値データを作成する。一方、マグマの分化過程シミュレーションプログラム (メルツ) [3] を使い、マグマオーシャンの初期組成を仮定した場合に想定される Mg 値と Th 濃度の変化を計算により求め、これと実測の比較を行う。計算にはマグマオーシャンの組成は地球の地殻+マントル組成やこれまでに推定されている月マグマオーシャン組成を出発時の組成として用いた。

結果: 観測された Mg 値と Th 濃度にはマグマの分化過程から想定される負の相関があり、また相関は 2 本のトレンドに分かれているように観察される。一方、シミュレーションによるマグマの分化トレンドと実測値を比較すると、上記 2 つのトレンドのうちの 1 方と地球の地殻+マントル組成から開始した場合のトレンドが類似し、月マグマオーシャン組成から開始した場合は 2 つのトレンドともに大きく異なる事が解った。

考察: 観測された Mg 値と Th 濃度に負の相関がある事は、これらパラメータが実際にマグマオーシャンの固化過程を反映している事を示すと考えられるが、2 つのトレンドの成因については現状不明である。一方でシミュレーション結果と実測値の比較は、従来の月マグマオーシャン組成推定の再評価が必要である事を示唆し、実測値を説明する為には従来よりも Mg 値の高い月マグマオーシャン組成が必要となる可能性もある。ただし今回のシミュレーションは計算条件等の評価が充分でなく、今後より詳細な検討が必要である。

[1] Ohtake, M. et al. (2012) Nature GeoSci. 5, 384-388. [2] Kobayashi, S. et al. (2012) Earth Planet. Sci. Lett. 337, 107-116. [3] Ghiorso and Sack (1995) Contrib. Mineral. Petrol. 119, 197-212.

キーワード: 月, かぐや, セレーネ, 地殻, マグマオーシャン

Keywords: Moon, Kaguya, SELENE, Crust, Magma Ocean

月裏側中央高地産の最もカルシウム濃度の高い斜長石 Plagioclase with High Ca Contents from the Central Farside Highland.

武田 弘^{1*}; 長岡 央²; 唐牛 譲³; 大竹 真紀子⁴; 矢沢 勇樹⁵; 山口 亮⁶
TAKEDA, Hiroshi^{1*}; NAGAOKA, Hiroshi²; KAROUJI, Yuzuru³; OHTAKE, Makiko⁴; YAZAWA, Yuuki⁵; YAMAGUCHI, Akira⁶

¹ 東京大学大学院理学系研究科, ² 早稲田大学理工学部, ³ 宇宙科学研究所, ⁴ 宇宙科学研究所, ⁵ 千葉工業大学工学部, ⁶ 国立極地研究所

¹Graduate School of Sciences, The University of Tokyo, ²Waseda Univ., ³JAXA/ISAS, ⁴JAXA/ISAS, ⁵Faculty of Engineering, Chiba Institute of Technology, ⁶National Inst. of Polar Research

月裏側中央高地に最もカルシウム濃度の高い斜長石が存在することを、月隕石と「かぐや」リモートセンシング・データで検証した。このような高カルシウム斜長石が弱い有機酸に溶けることより、その資源的利用と地球環境への影響につき述べる。

キーワード: 斜長石, 月地殻, 裏側高地, 資源的利用

Keywords: plagioclase, lunar crust, farside highland, resource utilization

月の水、地球の水 Volatile accretion on the Moon - A clue for the emergence of a habitable Earth.

橋爪 光^{1*}; 春山 純一²
HASHIZUME, Ko^{1*}; HARUYAMA, Junichi²

¹ 大阪大学理学研究科, ² 宇宙航空研究開発機構/宇宙科学研究本部

¹Osaka University, Graduate School of Science, ²Japan Aerospace Exploration Agency / Institute of Space and Astronautical Science

月には大気が無く、月表土試料を調べても無水であり、月面は揮発性物質とはおよそ無縁な乾ききった環境のように見える。月と地球は太陽から同じ距離にある天体同士なのに、揮発性物質という観点から見ると、この二つは全く対照的な姿を見せる。地球を覆う揮発性物質は二次大気起源、すなわち、太陽系星雲そのものではなく、地球に集積した惑星物質に含まれていた成分が起源であると考えられている。いつ地球に供給されたのか、という問いの答えはまだ決着していない。地球形成と同時に供給されたという考え方もあるし、集積がほぼ完了した段階で地球表面に集中的に供給されたという考え方もある。ここでもう一度問う。なぜ月は全く無水に見えるのだろうか？ 月・地球系への惑星揮発性物質の供給タイミングに関する先ほどの選択肢の内、特に後者ならば、月に揮発性物質が相当量降着していて不思議ではないと思うのだが。もちろん、月は小さい天体なので、大気を永久には保持できない、というのが現在の月面が無水に見える大きな要因であろう。しかし、月形成初期において、揮発性物質の存在下で火成活動が起これば、地球の場合と同様、揮発性物質は岩石中に少ないながら必ず捕獲されているはずである。また、月試料には、月面上空に一時的に放たれた揮発性物質が、太陽風と相互作用をしながら表土にイオン打ち込みされる、という揮発性物質の記録モードもあるらしい。月試料には、水惑星地球の出自を明らかにする情報が記録されていても不思議ではない。ただ、ひょっとすると、その情報を引き出すのにふさわしい試料を、我々がまだ手にしていないだけかもしれない。講演では、月表土に降着する揮発性物質、その正体や降着率、を月試料から読み解く最近の試みをまず紹介する。そして、ここで掲げた問題の解決に向けて、われわれが今後目指すべき月科学の方向についても議論したい。

キーワード: 月レゴリス, 揮発性物質, 同位体組成, 降着率

Keywords: Lunar Regolith, Volatile Compound, Isotope Composition, Accretion Rate

月天体を形成する多状態混合固化した地球外物質 Extraterrestrial solidified materials with multi-mixture on the Moon

三浦 保範^{1*}
MIURA, Yasunori^{1*}

¹ 国内外大学
¹In & Out Universities

本研究は次のように最新の考えとデータにまとめられる。

- 1) 月の研究は、地球の早期物質のでき方と地球外天体のでき方に貴重な情報を提供してくれる。
- 2) 月の表層物質は、地球の固体岩石と同じ鉱物や形成と思われるが、地球の鉱結晶と同じ同定法を使うので差異がわからない。しかし地球外では非晶質を含む多状態を混合した固体化物質である。
- 3) 月の準球形天体が衝突溶融形成により形成されているのは、均質岩石でなく不規則分布と衝突孔分布から推察できる。
- 4) 月の多状態含有固体物質の内部分布と保存などにより、不規則に表面や衝突孔内部に流体質の特徴が観察されている。
- 5) 月の岩石が地球の岩石と形成が異なることがイオン衝撃実験でわかる。地球の多層に分かれる結晶質岩石（マグマ溶融）物質は、かたいケイ酸塩構造が形成されているので、最初にイオン衝撃で発生するのはアルカリイオン (Na,K,Ca等) である。しかし月面の岩石は、衝突熱の形成のため、脆弱なケイ酸 (Si,Al) が多くイオン衝撃で破壊され高い発生になる。
- 6) 地球の衝突岩石においても、原岩のケイ酸構造がかたいので地球と同じイオン衝撃の形式を示す。
- 7) 月の岩石は無大気・無水天体である月外物質で衝撃された多状態含有固体や固体相の破壊だけでなく、衝突しながら粒子が増大する、「衝突進化物質」よりなる天体であることを示している。
- 8) 地球創成期は月と同じ衝突形成で、不規則表面が地球に残存しているが、内部の軽元素流体が大量に放出し（巨大衝突）、凝固した海水層を形成する過程によってかなり異なった状態圏の循環層を示す天体となり、その循環系でマクロ生命循環体が発生したと考えられる。

キーワード: 月, 混合物, 固化物, 物質状態, ケイ酸塩骨格構造, イオン衝撃実験
Keywords: the Moon, mixture, solidified material, material state, ilicate framework, ion bombardment run

月衝突盆地の掘削深度の再検討 Re-examination of Excavation Cavity of the Impact Basins of the Moon based on GRAIL based Crustal Thickness Model

石原 吉明^{1*}; 中村 良介²
ISHIHARA, Yoshiaki^{1*}; NAKAMURA, Ryosuke²

¹ 宇宙航空研究開発機構, ² 産業技術総合研究所
¹JAXA, ²AIST

Large impact features, whose diameters are more than hundreds of kilometers, are called impact basins. Large impact basins can provide comparatively clear information of the cratering process and/or constrain the lunar thermal history. The internal or subsurface structures of basins can be assessed through an analysis of their associated gravitational and topographic signatures. The recently Kaguya/SELENE mission has improved the crustal thickness model not only for the nearside but also for the farside based on the first direct farside gravity and global topography mapping. Moreover most recent GRAIL mission vastly improved spatial resolution and overall accuracy of the lunar gravity models and lunar crustal thickness models. The GRAIL crustal thickness model gives us the opportunity to re-analyse excavation depth and diameter of basin forming impact processes anywhere on the Moon with improved accuracy. This study uses the GRAIL crustal thickness model, to reconstruct the excavation cavity geometry of large impact basins on the Moon.

Our method of reconstructing the excavation cavity of large impact basins is fairly simple. We assume that the thinned crust and uplifted Moho beneath features is a direct consequence of (1) the amount of crustal material excavated during the cratering process and (2) the subsequent rebound of the crater (basin) floor. We first construct azimuthally averaged profiles for the surface topography, mare thickness and subsurface structure of the Moho for each basin. Next, we restored the uplifted Moho and overlying crust to its pre-impact position. Estimating procedures of pre-impact position is almost the same as previous analysis. After removing mare fill, this process resulted in a roughly parabolic surface depression, that we interpret as being the first-order representation of the basin's excavation cavity.

One of the most important values of understanding the large impact basin is the depth-to-diameter ratio of the excavation cavity. We examine the depth versus the diameter of our reconstructed excavation cavities (excluding the Imbrium Basin and the South Pole-Aitken Basin). It seems that up to 400 km cavity diameter, the depth (hex) and diameter (Dex) are linearly related. Further more, the linear relationship ($\text{hex}/\text{Dex}=0.079\pm 0.006$) is almost consistent with, though slightly smaller than, the value for craters orders of magnitude smaller in size ($\text{hex}/\text{Dex}=0.1$), suggesting that proportional scaling is valid for basin scale impact structures except the largest impact structures on the Moon. One of the reasons of smaller depth-to-diameter ratio are probably effects due to the post impact modifications. Impact basins which has excavation cavity diameter larger than 400 km show the different state. The average crustal thickness of GRAIL lunar crustal thickness model is 34 to 43 km. So excavation cavity diameter of 400 km is located the regime boundary between the excavation/melting cavity within crust regime and the excavation/melting cavity exceed the Moho interface regime.

キーワード: 衝突盆地, 掘削領域, 溶融領域, 月
Keywords: Impact Basin, Excavation Cavity, Melting Cavity, Moon

GRAIL の Level-1b と Level-2 データを用いた月重力異常の推定 Lunar gravity anomaly recovery with the GRAIL level-1b and level-2 data

橋本 実奈^{1*}; 日置 幸介¹
HASHIMOTO, Mina^{1*}; HEKI, Kosuke¹

¹ 北海道大学大学院理学院自然史科学専攻

¹Department of Natural History Sciences, Faculty of Science, Hokkaido University

現在までにいくつかの月の全球重力場モデルが得られているが、2011年9月に打ち上げられた双子衛星 GRAIL (Gravity Recovery and Interior Laboratory) によるものが、最も空間分解能が高い。従来地球局から月周回衛星のドップラー追尾によって求められた月の表側の重力場は、SELENE におけるリレー衛星を用いた衛星間 tracking によって全球で得られるようになった。一方 GRAIL は GRACE と同じ”Tom and Jerry”方式を採用しており、双子衛星間のマイクロ波測距データから重力場を推定する。全球で均一な精度で重力異常分布が得られ、既に Science の特集号でその科学的成果が注目されている。GRAIL による重力場のデータ (Level-2 data) は十月に公開済みだが、今回はそれに先立って公開された Level-1b データを用いて試験的に月の重力場の推定を試みたので、その結果を簡単に報告する。

データは PDS Geosciences Node (<http://www.pds.wustl.edu/>) からダウンロードした。GNV1B データは一分毎の衛星の位置と速度が与えられている。また KBR1B データには衛星間の距離、距離変化率、距離変化の加速度が 5 秒毎に与えられている。今回はこれら二種類のデータファイルをダウンロードし、衛星高度の低い適当な部分を取り出して、距離変化加速度を観測データとして月面上の質量分布をパラメータ推定した。プログラムは、かつて Lunar Prospector の延長低高度ミッションの視線加速度データから月の重力異常を求めるプログラム (Sugano & Heki, EPS 2004; Sugano & Heki, GRL 2005) を改造して用いた。

今回の発表では 2012 年 3 月 2-15 日の表側のデータと、5 月 25-29 日の裏側の距離変化加速度の値を、双子衛星の中心の位置を用いて地図上にプロットしたのを見せる。衛星高度が 25 km 以下の部分のみを取り出した。その結果距離変化の加速度が全体に青みを帯びて (負の値をとって) おり、それはプロットした範囲がいずれの期間も近月点近傍であるためである。北から南、南から北のいずれの方向に衛星が飛んでいても、ケプラーの第二法則により近月点に近づくとつれて衛星が速くなり衛星間距離が増え、近月点を過ぎると距離が減少する。つまり距離変化の加速度は近月点付近では負となる。

裏側は緑や黄色の模様とところどころに見えた。これは短波長の重力異常に伴う加速度である。表側と裏側を比較すると、のっぺりした前者に比べて後者の方が細かい加速度変化を繰り返していることがわかった。更に表側の一部について、加速度データを用いて月面上の質量分布を推定したのも今回示す (推定結果はフリーエア重力異常に換算)。湿りの海の正の重力異常 (マスコン) を十分に捉えることができた。

次に GRAIL の Level-2 data を用いて個々のクレーターの重力異常を推定する予定である。クレーターの重力異常は、クレーター内部の物質が取り除かれて周囲に堆積することで形成される。従来はクレーターの直径や深さは隕石などの衝突物体の質量やスピードで決まるとされている。月の表裏ではカウラ定数が異なることが知られている (橋本・日置, 2014) が、クレーターの大きさや深さも系統的に異なるとされている。そこには温度の違いが関係しており、一般に熱史の違いの結果の一つとして理解できる。最近の研究では、熱いマンツルの温度をもつ表側に生じた衝突盆地は、同じ大きさの物体が裏側に衝突して生じた衝突盆地に比べて大きくなることが示唆された (Miljkovi?, K. et al., 2013)。本研究では、これらを明らかにすることを目標とし、GRAIL の詳細な重力場データで個々のクレーターの重力異常の大きさを表と裏で比較を試みる。

深発月震の地震モーメント分布と月深部構造に関する考察 Consideration of the seismic moment distribution of deep moonquake and the lunar deep structure

山田 竜平^{1*}; 野田 寛大¹; 荒木 博志¹
YAMADA, Ryuhei^{1*}; NODA, Hiroto¹; ARAKI, Hiroshi¹

¹ 国立天文台 RISE 月惑星探査検討室

¹National Astronomical Observatory of Japan / RISE Project

NASA の Apollo ミッションで設置された月地震計ネットワーク (Apollo12 号, 14 号, 15 号, 16 号) により、月深部 700-1200km の間である特定の震源域から、月地震 (深発月震) が繰り返し発生する事が確認された。深発月震は、各震源域で月-地球-太陽の位置関係、すなわち月内部に作用する潮汐力に参与して周期的に発生することが分かっている (e.g., Lammlein, 1977, Bulow et al., 2007)。深発月震の震源位置は現在 106 個同定されており (Nakamura, 2005)、各々の震源においてその活動度や発生するイベント大きさ、また発生メカニズムが異なる事も示唆されている (Araki, 2001)。

Yamada et al., (2013) では、特に Apollo 観測時に活発で震源位置が良く決まっている深発月震源 15 個を選び、Apollo12 号で観測されたこれらの震源からの各深発月震イベントの地震モーメントの導出を行った。地震モーメントの導出には、観測された地震イベントの振幅値から、Apollo 地震計の特性、波が伝搬した経路の内部構造の特性、幾何減衰の効果、震源域における断層の放射パターンを補正する必要がある (Goins et al., 1981)。この解析で、最新の月内部構造モデル VPREM00N (Garcia et al., 2011) を使用したところ、震源ごとに地震モーメントの分布は異なり、特に遠地の震源程、大きい地震モーメントのイベントを発生し、震源間で最大で 1 桁程度、モーメントの大きさに差異がある事が分かった。

本研究では、この結果の妥当性を検証するために、同一震源イベントで Apollo15 号, 16 号で観測されたデータからも地震モーメントの評価を行った。この結果、本来同じであるはずの地震モーメントの値が、例え同一イベントであっても各ステーションデータから求められる地震モーメント間で異なる値を示す事が分かった。特に、ネットワークから離れた遠地の震源である程、地震モーメントの差異が大きい傾向があるため、モーメントを導出するのに使用した内部構造モデルに問題がある事が示唆される。特に地震計に到達する地震波の振幅値に対する影響が大きいのは地震波エネルギーの減衰の程度を表す Q 値である。これまでの研究では (e.g., Nakamura and Koyama 1982)、特に深部の Q 値に不確定性が高い事が示唆されており、VPREM00N でも誤差の大きい値を使用している。そこで、本研究では各ステーションデータから求めた地震モーメントの差異が最も小さくなるような Q 値の導出を試みた。このとき、震源域における放射パターンも不確定性が高く、地震モーメントの値に影響を与えるので、有り得る放射パターンの影響も考慮して、解析を行った。本発表ではこれら解析を通して求めた深発月震の地震モーメント分布と月マントル中の新しい Q 値について報告と議論を行う予定である。

キーワード: 深発月震, 地震モーメント, 月震活動度, 月マントル, 月 Q 値, 月深部構造

Keywords: Deep Moonquake, Seismic Moment, Lunar Seismic Activity, Lunar Mantle, Lunar Seismic Quality Factor, Lunar Deep Structure

月のアルカリ外気圏の構造と変動 Variation of the ionized lunar sodium and potassium exosphere

横田 勝一郎^{1*}; 斎藤 義文¹; 浅村 和史¹; Nishino Masaki²; 綱川 秀夫³
YOKOTA, Shoichiro^{1*}; SAITO, Yoshifumi¹; ASAMURA, Kazushi¹; NISHINO, Masaki²; TSUNAKAWA, Hideo³

¹宇宙研, ²名大太陽地球環境研究所, ³東工大

¹ISAS/JAXA, ²STE Lab., ³Tokyo Institute of Tech.

Lunar exosphere has been observed and studied on many occasions by ground-based telescopes since the discovery of surface-bounded alkali exosphere. The observed exospheric components were alkali atoms such as Na and K because the emission lines are much brighter than for other conceivable components. The structure, source, and the transport mechanisms of the lunar exosphere have been discussed based on these ground-based observations of the alkali atoms. As for the source mechanism of the thin lunar alkali exosphere, five processes were proposed as follows: thermal desorption, electron-stimulated desorption (ESD), photon-stimulated desorption (PSD), ion-induced desorption (sputtering), and vaporization by micrometeoroid impacts. Structure of the lunar exosphere gives us the key parameters to investigate the source mechanism. The observed Na exosphere distribution suggested that PSD and/or sputtering do not simply release the exospheric particles. Since PSD is capable of releasing alkali atoms only out of very shallow region in the lunar soils, PSD has relatively limited store of the exospheric particles in the lunar surface. If there was no replenishing process, PSD would deplete surface alkalis. We present latitude and longitude distributions of Na⁺ and K⁺ fluxes from the Moon derived from the Kaguya low-energy ion data. Although the latitude distribution agrees with the previous ground-based telescope observations, dawn-dusk asymmetry has been found in the longitude distribution. Our model of the lunar surface abundance and yield of Na and K demonstrates that the abundance decreases to around 50%, at dusk compared to that at dawn due to the emission of the exospheric particles. It is also implicated that the surface abundance of Na and K need to be supplied during the night in order to explain the observed lunar exosphere with the dawn-dusk asymmetry.

キーワード: 月, 外気圏, アルカリ大気, 質量分析

Keywords: Moon, Exosphere, Alkali atmosphere, Mass analyses

月周辺の太陽風中で観測されるホイッスラーモード波動の様々な形態 Various appearances of whistler-mode waves observed near the Moon in the solar wind

津川 靖基^{1*}; 加藤 雄人¹; 寺田 直樹¹; 綱川 秀夫²; 高橋 太²; 渋谷 秀敏³; 清水 久芳⁴; 松島 政貴²
TSUGAWA, Yasunori^{1*}; KATO, Yuto¹; TERADA, Naoki¹; TSUNAKAWA, Hideo²; TAKAHASHI, Futoshi²; SHIBUYA,
Hidetoshi³; SHIMIZU, Hisayoshi⁴; MATSUSHIMA, Masaki²

¹ 東北大学理学研究科地球物理学専攻, ² 東京工業大学大学院理工学研究科地球惑星科学専攻, ³ 熊本大学大学院自然科学研究科, ⁴ 東京大学地震研究所

¹Department of Geophysics, Tohoku University, ²Department of Earth and Planetary Sciences, Tokyo Institute of Technology, ³Department of Earth and Environmental Sciences, Kumamoto University, ⁴Earthquake Research Institute, University of Tokyo

Narrowband whistler-mode waves whose frequencies close to 1 Hz have been observed near the Moon [Farrell et al., 1996; Nakagawa et al., 2003; Halekas et al., 2006; Tsugawa et al., 2011]. Broadband whistler-mode waves in the frequencies up to about 10 Hz with no preferred polarity have also been observed near the Moon [Halekas et al., 2008; Nakagawa et al., 2011; Tsugawa et al., 2012]. In addition, the lunar magnetometer (LMAG) aboard Kaguya detected right-hand polarized broadband waves, which is relatively weak and appears in the frequency range of several Hz. Since the angle between the wave vector and the sunward direction is large, the waves are not significantly Doppler shifted, indicating that they are whistler-mode waves. We also reveal the existence of harmonic waves whose fundamental waves appear in the frequencies near 1-2 Hz. The fundamental waves resemble the narrowband whistler-mode waves.

We construct criteria to select these waves and perform statistical analyses. Based on the statistical properties, we suggest possible scenarios of the generation and propagation of the four types of waves around the Moon. Whistler-mode waves in the frequency near the lower hybrid frequency generated through the reflection of ions by the Moon would be observed as (1) the narrowband waves in the spacecraft frame when the group velocity vector points to the sunward and is cancelled by the solar wind velocity, as (2) the broadband waves in the interaction region with various wave components, as (3) the right-hand polarized broadband waves when the wave vector points perpendicular to the sunward, and as (4) the harmonic waves in the same condition with NR with a large compressional component enough to be steepened.

K-Ar年代測定のための、LIBSを用いたAr輝線の検出実験 Detection experiment of Ar emission lines for K-Ar dating using Laser-Induced Breakdown Spectroscopy

奥村 裕^{1*}; 芝崎 和夫¹; 大石 峻裕¹; 長 勇一郎²; 亀田 真吾¹; 三部 賢治²; 三浦 弥生²; 杉田 精司²
OKUMURA, Yu^{1*}; SHIBASAKI, Kazuo¹; OISHI, Takahiro¹; CHO, Yuichiro²; KAMEDA, Shingo¹; MIBE, Kenji²; MIURA, Yayoi N.²; SUGITA, Seiji²

¹ 立教大学, ² 東京大学

¹Rikkyo University, ²The University of Tokyo

現在 JAXA では月周回衛星 SELENE(かぐや)の後続機として SELENE-2 の打ち上げを検討している。SELENE-2 では無人探査ローバーを月に着陸させ、まだ謎の多い月表面物質の科学調査を行う予定である。月面物質についての情報はアポロ計画で持ち帰られた試料に大きく依存しているが、月全体の特徴を反映していない可能性がある。

そこで、我々は月の調査を行うローバーに搭載する元素組成・固化年代測定装置として LIBS(Laser Induced Breakdown Spectroscopy:レーザー誘起絶縁破壊分光装置)を提案している。LIBS は高エネルギーのパルスレーザーを測定対象に照射しプラズマ光を発生させ、その光を分光することによって元素組成分析を行う装置である。LIBS を用いた元素測定は NASA の火星探査ローバー「Curiosity」によって既に実証されている。また、固化年代測定は K-Ar 年代測定によって行うことを検討している。K-Ar 年代測定は K の放射壊変を利用した年代測定法である。K は多くの岩石鉱物に含まれており、その放射性同位体である ⁴⁰K は、半減期 12.5 億年で ⁴⁰Ar に崩壊してゆく。したがって岩石に含まれる ⁴⁰K に対する ⁴⁰Ar の割合を測定することにより、その岩石が固化した年代を測定することができる。現在、LIBS を用いて K の輝線は検出されているが Ar の輝線は検出されていない。既にその場で K-Ar 年代測定を行うため、K を LIBS で定量し Ar を四重極質量分析計(QMS)を用いて定量する、という手法が検討されている。この方法では LIBS と QMS の2つの観測器が必要となる。我々が検証している手法は、LIBS によって Ar の定量分析も行うことで LIBS のみで固化年代測定を行うことを目標としており、実現すれば装置を小型化することが可能となる。

LIBS によって大気中で生成されるプラズマの温度はおよそ 1eV(11600K)であると知られている。その条件下で検出できる可能性が高い Ar 輝線の波長は 104.8nm と 106.7nm である。この波長の付近には主要元素の中性、1 価イオンの輝線がないため Ar 輝線の検出は可能であると考えていた。この波長の光は大気中の窒素や酸素に吸収されてしまうため大気中では測定不可能である。そこで我々は真空紫外分光装置を用いた実験を行い Ar 輝線の検出を目指した。実験を行った結果、生成されるプラズマの温度が想定していた 1eV よりも高い数から数十 eV まで加熱されており、Ar の輝線に対して他の価数の高いイオン(e.g. Si(IV), Fe(II))の輝線が強くなっていることがわかった。このため、Ar 輝線を検出するためにはプラズマの温度を低減させる必要がある。我々は測定対象に照射されるパルスレーザーのエネルギー密度を小さくすることによってプラズマの温度を下げ、104.8nm と 106.7nm の Ar 輝線の検出実験を行った。またプラズマの温度が 1eV のときは検出が困難であると考えていた真空紫外-近赤外領域の Ar 輝線についても検証した。

キーワード: LIBS, 元素組成, K-Ar 年代測定, 惑星探査, 月

Keywords: LIBS, elemental compositions, K-Ar dating, Planetary Explora, Moon

月の縦孔・地下空洞探査 Unprecedented Zipangu Underworld of the Moon Exploration (UZUME)

春山 純一^{1*}; 河野 功¹; 久保田 孝¹; 大槻 真嗣¹; 西堀 俊幸¹; 岩田 隆浩¹; 石原 吉明¹; 山本 幸生¹; 永松 愛子¹; 長谷 中利昭³; 清水 久芳⁴; 諸田 智克⁵; 道上 達広⁶; 白尾 元理⁷; 宮本 英昭⁴; 小林 憲正²; 山本 聡⁸; 横田 康弘⁸; 橋爪 光⁹; 佐伯 和人⁹; 小松 吾郎¹⁰

HARUYAMA, Junichi^{1*}; KAWANO, Isao¹; KUBOTA, Takashi¹; OTSUKI, Masatsugu¹; NISHIBORI, Toshiyuki¹; IWATA, Takahiro¹; ISHIHARA, Yoshiaki¹; YAMAMOTO, Yukio¹; NAGAMATSU, Aiko¹; HASENAKA, Toshiaki³; SHIMIZU, Hisayoshi⁴; MOROTA, Tomokatsu⁵; MICHIKAMI, Tatsuhiro⁶; SHIRAO, Motomaro⁷; MIYAMOTO, Hideaki⁴; KOBAYASHI, Kensei²; YAMAMOTO, Satoru⁸; YOKOTA, Yasuhiro⁸; HASHIZUME, Ko⁹; SAIKI, Kazuto⁹; KOMATSU, Goro¹⁰

¹ 独立行政法人 宇宙航空研究開発機構, ² 横浜国立大学, ³ 熊本大学, ⁴ 東京大学, ⁵ 名古屋大学, ⁶ 近畿大学, ⁷ 惑星地質研, ⁸ 国立環境研, ⁹ 大阪大学, ¹⁰ ダヌンツィオ大学

¹ Japan Aerospace Exploration Agency, ² Yokohama National University, ³ Kumamoto University, ⁴ University of Tokyo, ⁵ Nagoya University, ⁶ Kinki University, ⁷ Planetary Geology Institute, ⁸ National Institute for Environmental Studies, ⁹ Osaka University, ¹⁰ Università d'Annunzio

2007年に我が国が打ち上げた月探査機 SELENE (かぐや) に搭載された地形カメラのデータから、月のマリウス丘、静の海、賢者の海に、直径、深さともに、50~100 mに及ぶ巨大な縦孔構造が発見された。これらは、月地下に存在する大きな空洞構造の上に開いたものと考えられた。その後、これらの縦孔構造は、明らかに地下の地下空洞構造に繋がっていることが確認されるようなデータが集積されている。こうした地下の空洞構造は、地球からの類推で、溶岩チューブや、マグマ溜まり、或いは断層起源の空洞などが考えられる。これらの縦孔・地下空洞は、様々な科学的な点から興味がある。加えて、こうした縦孔或いは地下空洞は、火星にも存在する。火星の地下空洞に至っては、生命が発現・維持・進化するのに、火星上でも最も可能性の高い所であると言える。月・火星の縦孔・地下空洞は、月惑星科学の観点から最も重要な探査対象の一つである。

しかしながら、深さ数 10m 以上にも及ぶ縦孔を降下し、数 10cm~数 m にも及ぶ岩体の散在する縦孔底を走破し、更に奥へ暗く拡がる空間へと探査を進める事は、非常にチャレンジングである。しかしだからこそ、我々は、これら縦孔・地下空洞の探査をミッション・探査システム・アウトリーチなど、様々な観点から議論を重ね、「Unprecedented Zipangu Underworld of the Moon Exploration (UZUME) 計画」として、探査を実現しようとしている。本講演では、現在の UZUME 計画の検討状況を報告する。

キーワード: 月, SELENE, 縦孔, 地下空洞

Keywords: Moon, SELENE, hole, cavern

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、これらについても試作し、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。

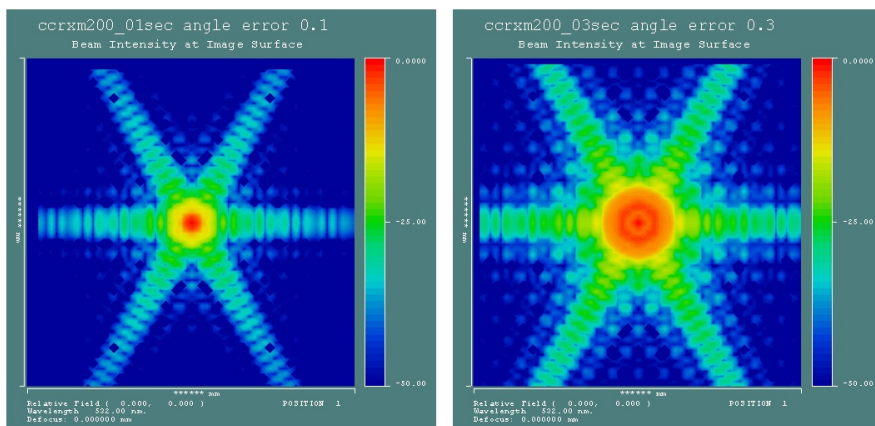
下図は CCM の 3 面の全ての各 2 面に 0.1 秒及び 0.3 秒の角度エラーを与えた場合の光学応答である。地球月間の距離、及びその間のビームの拡がりも考慮している。角度エラーが 0.1 秒から 0.3 秒になっただけで、大きく劣化していることが見て取れる。

【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