

「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。そこでは, 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, エラトステネス紀末~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と、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 讓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に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ものも今回示す (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、更に奥へ暗く広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