

## 月の巨大衝突構造における海の火成活動 Mare basalt volcanism within the giant impact structure of the Moon

田口 雅子<sup>1\*</sup>; 諸田 智克<sup>1</sup>; 加藤 伸祐<sup>1</sup>  
TAGUCHI, Masako<sup>1\*</sup>; MOROTA, Tomokatsu<sup>1</sup>; KATO, Shinsuke<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 名古屋大学大学院環境学研究科

<sup>1</sup> Nagoya University Graduate School of Environmental studies

Toward an understanding of the evolution of the Earth and other terrestrial planets, it is important to study the thermal evolution of the Moon. Estimate of volumes and eruption ages of lava ponds is essential to construct the volcanic history of the Moon. Therefore, these estimates have been performed in the lunar maria, a lowland area covered with basalt.

The South Pole-Aitken (SPA) basin, located on southern lunar farside, is one of the oldest and largest impact structures in the solar system. The basin ranges ~13 km in depth, and its rim crest diameter is about 2500 km. Previous studies of numerical simulation for SPA-forming impact indicate that the large impact generated a melting zone ranging 500 km depth and changed the thermal condition of the underlying mantle.

In order to evaluate the effect of the SPA-forming impact on volcanic activity, we estimated the thickness and the volumes of lava ponds of Apollo, Leibnitz, Ingenii, located within the SPA, using high-resolution image data obtained by Kaguya. Volumes of these maria were estimated as 4440-7330 km<sup>3</sup>, 4880-12580 km<sup>3</sup>, and 5830-53570km<sup>3</sup>, slightly smaller than estimate of previous study. In comparing the volumes of lava ponds of northern lunar farside, there is no significant difference, suggesting that SPA-forming impact did not contribute to magma production.

Keywords: SPA, mare volcanism, Apollo, Leibnitz, Ingenii

## ボロノイ分割を用いて評価した月全球クレーターの空間分布 Global spatial distribution of the lunar craters characterized by the Voronoi tessellation

伊東 里保<sup>1</sup>; 本田 親寿<sup>1\*</sup>; 平田 成<sup>1</sup>; 諸田 智克<sup>2</sup>  
ITO, Riho<sup>1</sup>; HONDA, Chikatoshi<sup>1\*</sup>; HIRATA, Naru<sup>1</sup>; MOROTA, Tomokatsu<sup>2</sup>

<sup>1</sup> 会津大学, <sup>2</sup> 名古屋大学大学院環境学研究科

<sup>1</sup>The University of Aizu, <sup>2</sup>Graduate School of Environmental Studies, Nagoya University

A surface of bodies in the solar system has been exposed by numerous numbers of impact craterings. The impact craters are formed by the hypervelocity impact of meteorites or interplanetary bodies. The impact craterings basically occur at random on the planetary surface. However, the surface of the Moon, which has same rotation and revolution periods, is expected to indicate a bias of spatial distribution of craters even though the surface has a same formation age. According to theoretical analyses, cratering rate altered by this synchronized rotation effect indicates maximum at the apex of leading side and minimum at the trailing side (Zahnle et al., 2001; Le Feuvre and Wieczorek, 2011). On the other hand, this asymmetry of crater spatial distribution by synchronized rotation effect was assessed by Morota et al. (2005) and Werner and Medvedev (2010). Morota et al. (2005) showed that number density of rayed craters at the apex is the highest on the lunar surface. Werner and Medvedev (2010) showed that peak of high number density of rayed craters observed at the distance of about 60° from the apex where is at the leading side including the apex. Because the formation term of rayed craters is in the past from the present to 1 Ga, the synchronized rotation effect of impact cratering had been achieved in this term.

A purpose of this research is to assess the spatial distribution of the global lunar craters without distinction of rayed or not. The assessed craters contain older craters than that of rayed craters, so we could evaluate the synchronized rotation effect at the ancient time before the rayed crater formation. By using the Voronoi tessellation, the global spatial distribution of the lunar craters have the potential of differences by assessing several crater-sets. A result of this research might suggest that the synchronized rotation effect to the lunar craters was not identified in the term before rayed crater formation. In addition to this result, we confirmed the effect of secondary craters which were produced by the Orientale basin formation near the apex.

キーワード: 月面クレーター, 空間分布, ボロノイ分割

Keywords: lunar craters, spatial distribution, Voronoi tessellation

## かぐやレーダーサウンダー観測データに基づいた月の海の地下構造の3次元化 Three-dimensional lunar mare subsurface structures based on the SELENE radar sounding

石山 謙<sup>1\*</sup>; 熊本 篤志<sup>1</sup>; 中村 教博<sup>2</sup>

ISHIYAMA, Ken<sup>1\*</sup>; KUMAMOTO, Atsushi<sup>1</sup>; NAKAMURA, Norihiro<sup>2</sup>

<sup>1</sup> 東北大学大学院理学研究科地球物理学専攻, <sup>2</sup> 東北大学大学院理学研究科地学専攻

<sup>1</sup>Department of Geophysics, Tohoku University, <sup>2</sup>Department of Earth Science, Tohoku University

月の海領域に堆積している溶岩から、月の火山活動の履歴を議論するために、これまで溶岩の噴出年代 [e.g., Hiesinger et al., 2000] や、その組成 [e.g., Lucey et al., 2000]、月面の地形 [e.g., Haruyama et al., 2008] などの主として月表面の観測データを統合した月の地質図が作成されてきた [e.g., Hiesinger et al., 2000; Hackwill et al., 2006; Bugiolacchi and Guest, 2008]。一方で、月では、表面の情報だけでなく、1970年代のアポロ17号ミッションや2007~2008年のSELENE (かぐや) ミッションで行われた地下レーダサウンディングによって地下の観測も行われている。これらの観測結果は表面だけではわからない地下層のつながりや不連続性の確認につながり、地表の情報で行われてきた地質解釈の検証も行っていくことができる。

かぐや衛星に搭載された月レーダーサウンダー (LRS) は、電磁波を放射し、月面と地下からの反射波を観測し、グローバルな月地下構造探査を行った [Ono et al., 2009]。この観測データと従来の地質図 [引用元] を比較し、月の溶岩の噴出フラックス [Oshigami et al., 2014] や月の海領域の空隙率 [Ishiyama et al., 2013] の議論が行われた。本研究ではさらに、従来の地質図との比較、新たな地質図への統合を目指して、緯度方向に1°、経度方向に約2°以下の間隔で地下反射面の深さを調べ、地下反射面の3次元データベースを作成した。講演では、このデータベースを使った月の海領域における3次元地下構造を、従来の地質図との比較検証の状況を紹介する。

## トリウム分布データおよび地殻厚データを用いた月の高地地殻形成過程についての考察

### An interpretation of formation process of the lunar highland crust using Th distribution map and crustal thickness data

山本 圭香<sup>1\*</sup>; 春山 純一<sup>1</sup>; 小林 進悟<sup>2</sup>; 大竹 真紀子<sup>1</sup>; 岩田 隆浩<sup>1</sup>; 石原 吉明<sup>1</sup>  
YAMAMOTO, Keiko<sup>1\*</sup>; HARUYAMA, Junichi<sup>1</sup>; KOBAYASHI, Shingo<sup>2</sup>; OHTAKE, Makiko<sup>1</sup>; IWATA, Takahiro<sup>1</sup>; ISHIHARA, Yoshiaki<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 宇宙航空研究開発機構, <sup>2</sup> 放射線医学総合研究所

<sup>1</sup>Japan Aerospace Exploration Agency, <sup>2</sup>National Institute of Radiological Sciences

月の地殻の構造とその形成過程についての理解は、月の初期の熱進化を解明する上で重要である。本研究では、地殻の形成過程についての手がかりを得るために、月の高地において、Kobayashi et al. (2012) による SELENE のガンマ線スペクトロメータから得られた月のトリウム分布と、LRO および GRAIL 衛星から得られた月の地殻厚マップとの相関を調査した。Kobayashi et al. (2012) において既に示されているように、両者は基本的に良い逆相関を示す。しかしながら、詳細はいくらか異なっており、トリウム分布がいくつかの極小点を持ち、それぞれの大きさの差はそれほど顕著でないのに対し、地殻厚の極大点は大きさの差が顕著であり、球面調和関数の 22 項に相当する部分が月の高地で卓越している。この差を説明するために、われわれは以下のような二段階の地殻形成のシナリオを考えた。すなわち、1) 月の表面において初期に生じた複数の核を中心とした水平方向の成長による薄い地殻の層の形成、2) 月の地殻厚の二分性に関わるその後の下方への大規模な成長、である。トリウムの分布として捉えることのできるのは 1) の部分のみであり、われわれは、これが地殻厚との空間パターンの違いを表しているのではないかと考えた。発表では、この説と、過去のいくつかの地殻形成の仮説の整合性について議論をおこなう。

キーワード: トリウム分布, 月地殻厚, SELENE, GRAIL, 月地殻形成

Keywords: Thorium abundance, lunar crustal thickness, SELENE, GRAIL, lunar crustal formation

## かぐや MI データを用いた危難の海盆地南西辺縁部の月高地における鉱物分布の解析 Mineral distribution on lunar highland in the southwest sector of the Crisium basin with SELENE MI

菅宮 岳<sup>1\*</sup>; 平田 成<sup>1</sup>  
SUGAMIYA, Takeshi<sup>1\*</sup>; HIRATA, Naru<sup>1</sup>

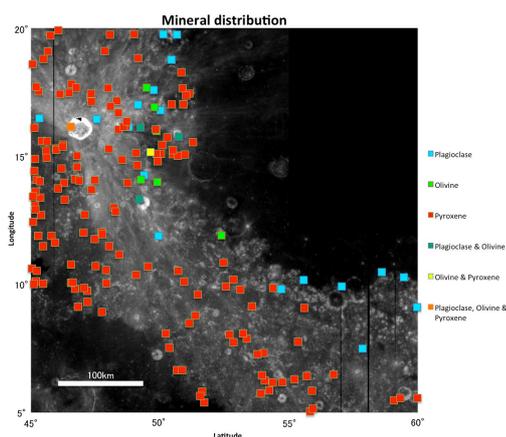
<sup>1</sup> 会津大学 CAIST/ARC-Space  
<sup>1</sup> CAIST/ARC-Space, The University of Aizu

SELENE (Kaguya) Multiband Imager (MI) provides a global and homogeneous spatial coverage of multiband data set of the moon. Its spectral coverage ranges visible and near infrared wavelength including absorption features of major lunar highland minerals: plagioclase, olivine, and pyroxene. We perform an extensive survey of mineral outcrops with MI multiband data on lunar highland in the southwest sector of the Crisium basin. It is reported that outcrops of these major minerals are found in this region by sparse survey with SELENE (Kaguya) Spectral Profiler observation (Nakamura et al., 2012; Yamamoto et al., 2010, 2012, 2014). It is also expected that a large impact event forming the Crisium basin excavate vertical stratigraphy of lunar highland, and possibly mantle materials.

Possible mineral outcrops are identified at which deep absorptions are found in continuum-removed spectra of MI. Position of absorption centers of plagioclase, olivine, and pyroxene are 1250, 1050, and 950 nm, respectively. Most outcrops are associated to craters in the target regions. They are often found on the inner wall and the ejecta blanket of craters.

Plagioclase outcrops exhibit PAN (purest-anorthosite) like spectra with the clear 1250 nm absorption that was reported by Ohtake et al. (2009) and Yamamoto et al. (2012). Most of them are found at small craters with diameter of <1 km, whereas Ohtake et al. (2009) reported that PAN were found mainly on craters with diameter of >30 km. However, our researched region is placed adjacent or within the Crisium basin. As Yamamoto et al. (2012) suggested, PAN blocks could be excavated from deep region of the highland crust by the Crisium basin impact event. We also confirm an observation by Yamamoto et al. (2012) that olivine outcrops also associate with PAN exposures in this region.

キーワード: かぐや, MI, 月, 高地, 斜長石, 危難の海  
Keywords: SELENE, MI, the Moon, Highland, Plagioclase, Mare Crisium



## 月表面反射スペクトルの教師なし分類と月地質 (2) Unsupervised Classification of the Moon's Surface Reflectance Spectra and Geological Significance (2)

晴山 慎<sup>1\*</sup>; 石原 吉明<sup>2</sup>; 大竹 真紀子<sup>2</sup>  
HAREYAMA, Makoto<sup>1\*</sup>; ISHIHARA, Yoshiaki<sup>2</sup>; OHTAKE, Makiko<sup>2</sup>

<sup>1</sup> 聖マリアンナ医科大学, <sup>2</sup> 宇宙航空研究開発機構  
<sup>1</sup>St. Marianna University School of Medicine, <sup>2</sup>Japan Aerospace Exploration Agency

Clarifying of lunar geological map is essential in understanding the initial formation of lunar crust and the mixing process of lunar surface rocks due to igneous activities and meteorite impacts. However, the global geological map shown today has been published in the 1980s after the Apollo era, which does not include various new knowledge found in recent exploration. Therefore, we started a project to make a new global geological map of the Moon based on new data as topography, mineral and elemental composition acquired by Japanese lunar explorer "Kaguya".

A basic item for the project is a classification map of reflectance spectra obtained by Multiband Imager (MI) and Spectral Profiler (SP) aboard Kaguya, which include information of rock and mineral kinds. However, since the data collected by MI and SP is very huge, data processing for whole moon is impossible to complete by working of only human's eyes and hands. And, the classification should be exclude researcher's subjective or philosophy as possible, especially in the first phase of analysis. Standing this point of view, we adopt ISODATA (Iterative Self-Organizing Data Analysis Technique) method as Unsupervised Classification (UC) with Independent Component Analysis (ICA) for classification of the reflectance spectra.

ICA is a powerful tool for analysis of multispectral or hyperspectral datasets to extract mutually independent components (ICs) from a set of mixed-random signals. This work is the first examination to apply ICA to the reflectance spectra from lunar surface, though ICA has been adopted to lunar gamma-ray spectra obtained gamma-ray spectrometer onboard Kaguya [10]. It was found that the global maps of extracted ICs clearly showed some mineral and/or rocks distributions as true signals, some characteristic patterns as noises due to mechanical and observational conditions and many random noises.

After ICA, the signal ICs are put in UC. This work employed ISODATA method as UC. ISODATA calculates class means evenly distributed in the data space then iteratively clusters the remaining pixels using minimum distance techniques. Users do not need to know the number of clusters and can define threshold values for parameters as minimum distance or minimum number of pixels for a class and so on. As a result, whole moon were divided into 50 -100 classes, though it was depended on the threshold values.

This report will shows the detail procedure for classification of lunar reflectance spectra and discusses validity and applicability of this procedure based on the results.

Keywords: Moon, Geological Classification, Reflectance, Independent Component Analysis, Unsupervised Classification, Kaguya

## 地形と相関しない月の重力異常とその成因 Gravity anomaly uncorrelated with topography in the Moon and its origin

内田 眞子<sup>1\*</sup>; 石原 吉明<sup>2</sup>; 平松 良浩<sup>1</sup>  
UCHIDA, Mako<sup>1\*</sup>; ISHIHARA, Yoshiaki<sup>2</sup>; HIRAMATSU, Yoshihiro<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 金沢大学, <sup>2</sup> 宇宙航空研究開発機構

<sup>1</sup>Kanazawa Univ., <sup>2</sup>JAXA

Zuber et al (2013) は、月探査機 GRAIL の初期ミッションフェーズの観測データの解析によって得られた球面調和関数 420 次まで展開された重力場データに基づき、80 次~300 次においては重力乱れポテンシャルの 98% が地形起因であるが、残りの 2% は地形と相関せず地下の高密度物質に起因すると提唱した。現在では GRAIL の全ミッションフェーズの観測データの解析により、月の重力場は球面調和関数 900 次まで展開されており (Lemoine et al., 2014; Konopliv et al., 2014)、月内部の詳細な情報を取得することが可能になった。

本研究では、最新の測月データに基づき月における地形と相関しない重力異常が認められる地域を検出し、ブーゲー異常の 3 次元解析の実施により地殻内の密度構造とその成因の推定を目指す。

地形データは球面調和関数 1080 次のモデル LRO.LTM01\_PA.1080 (Neumann, 2013) を用いる。ブーゲー異常は球面調和関数 900 次の重力ポテンシャル係数データ (Lemoine et al., 2014) と地形データから計算する (補正密度 2560 kg/m<sup>3</sup>)。なおブーゲー異常は、重力モデルの信頼性 (Lemoine et al., 2014) を考慮し、球面調和関数の最大次数を 600 次として求めた。得られたブーゲー異常データと地形データから、地形と相関していない重力異常が認められる 23 地域を検出した。ブーゲー異常からモホ面の深さを Wiczorek and Phillips (1998) の重力インバージョンで算出し、モホ面の起伏によるブーゲー異常を差し引いたブーゲー異常を地殻内の密度異常によるブーゲー異常 (以降、残差ブーゲー異常) とする。モホ面の深さを求める際には、先行研究によるアポロ 12/14 号サイトの地殻厚と地殻の平均厚さと調和的な厚さになるように地殻密度 (2750 kg/m<sup>3</sup>) とマントル密度 (3360 kg/m<sup>3</sup>) を設定した。正の残差ブーゲー異常が顕著に認められる 14 地域に対して、Banerjee and Gupta (1977) の角柱近似の手法を適用し、地殻中の高密度領域 (密度差 610 kg/m<sup>3</sup>) の形状及び位置を見積もった。残りの 9 地域については、残差ブーゲー異常がほぼ 0 となり、地形と相関していないブーゲー異常がモホ面の起伏で説明できることが分かった。

角柱近似を適用した 14 地域全てにおいて、地殻中の高密度領域は水平方向に卓越した形状であり、モホ面に接するように位置する。月探査機「かぐや (SELENE)」のマルチバンドイメージャ (MI) (Ohtake et al., 2008) によって得られた波長 750nm の反射率マップとの比較から、この 14 地域は反射率が低い海に分布する。また、この 14 地域はリッジや衝突盆地のリング構造に沿って分布する。したがって、角柱近似で得られた高密度領域は過去の火成活動とリッジ・衝突盆地の形成プロセスに関連していることが示唆される。

以上より、次のシナリオが考えられる。リッジあるいは衝突盆地の形成の際、地殻内に生じた亀裂によってマグマ貫入が促進され、地殻内へマグマが貫入した。しかし月の揮発性物質は乏しく、貫入の際に十分な圧力・浮力が得られなかったために、モホ面付近の地殻深部で水平な板状に広がるように貫入が進行し、地殻中の高密度領域の成因となった。なお、この高密度領域の密度はマントルと同等と考えられるため、本解析では波長の長いものについてはモホ面の起伏として検出されたと考えられる。

謝辞: 本研究では LOLA Data Archive (<http://imbrium.mit.edu/LOLA.html>) の地形データ、NASA PDS Geoscience Node (<http://pds-geosciences.wust.edu/missions/grail/default.htm>) の重力ポテンシャルの係数データを使用しました。また、モホ面の深さ及びモホ面の起伏によるブーゲー異常の計算には SHTOOLS (<http://shtools.igpp.fr>) を用いました。記して感謝致します。

キーワード: リッジ, 衝突盆地, 重力インバージョン, 貫入, 火成活動  
Keywords: ridge, impact basin, gravity inversion, intrusion, magmatism

## 月表面のレゴリス形成における熱疲労の影響 The effect of thermal fatigue on the moon surface

安藤 滉祐<sup>1\*</sup>; 諸田 智克<sup>1</sup>  
ANDO, Kosuke<sup>1\*</sup>; MOROTA, Tomokatsu<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 名古屋大学大学院環境学研究科

<sup>1</sup> Graduate School of Environmental Studies, Nagoya University

天体の表面状態はその天体の地質進化過程を強く反映していると考えられ、実際に天体間でその表面状態は大きく異なっている。たとえば月表面はほとんどが細粒子からなるレゴリス層に覆われ、小惑星イトカワにはボルダーに覆われた領域とレゴリスに覆われた領域が存在する。

従来、ボルダーから細粒化する原因は微小天体の衝突が支配的であるとされてきた。しかし近年、小惑星表面においてのボルダーの破壊、細粒化には微小衝突よりも熱疲労による影響が大きい可能性が指摘されている (Delbo et al. 2014)。そこで本研究では、温度環境の異なる月の赤道付近と高緯度付近における小クレータに伴ったボルダーのサイズ分布を調査し、熱疲労によるボルダーの細粒化の影響について議論する。用いたデータは LRO の高解像度画像である。

結果として、微小クレータによって内部及び周囲に存在するボルダーの数密度は大きく異なっていた。これは微小クレータの形成年代を反映しており、新鮮な微小クレータはクレータ形成時につくられた多くのボルダーを保存しているのに対し、時間がたつにつれボルダーが破壊され、細粒化していることを反映している。このボルダーの破壊速度の緯度依存性について議論する。

## 日照域の月面レゴリス中への水の捕獲 Water trapped at lunar regolith

蓮中 亮太<sup>1\*</sup>  
HASUNAKA, Ryota<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup> 大阪大学 理学研究科 宇宙地球科学専攻

<sup>1</sup>Department of Earth and Space Science, Graduate School of Science, Osaka University

従来、月面は非常にドライで地中大气ともほぼ無水であると考えられていた。アポロミッションなどの過去の観測でも月固有の水は確認できなかった。微小隕石や太陽風によって月には水の供給はあるとしても供給された水は直ちに宇宙空間へ散逸し月面には残らないだろうと思われていた。しかし、近年の観測ミッションに伴うリモートセンシングにより、月面には一定量の水が存在することを示唆する観測結果が得られつつある。2009年に行われたLCROSSの探査で月の極域には $5.6 \pm 2.9\text{wt}\%$ の水が存在する事を示唆する観測結果が得られている。(Colaprete et al.,2010) また赤外観測でも全球で水酸基が確認されていてこれは月面上の水の存在を示す可能性がある。(Pieters et al.,2009)

月面に水があるとするなら「月の気候学」、すなわち、月面に対する水の供給、月面上での水の移動、月面での水の捕獲、月面からの水の散逸のような水の流れを考える必要がある。本発表では、月面に供給された水の捕獲という点に注目し、表土中の水の挙動を数値シミュレーションにより考察した。同様の考察を Schorghofer & Taylor (2007) が行っている。彼らはレゴリスを構成する岩石微粒子への水の吸着に注目し、水分子が岩石への吸着と脱離を繰り返しながらレゴリスに捕獲されるメカニズムを提示した。これは主に、極域に存在する永久陰における水の捕獲に対応する。これに対し、本研究において私たちは、太陽光が当たり表面の温度が大きく日周変化する地域での水の捕獲について考察した。レゴリス内部の温度は、数十 cm 厚の表層においては、日照に伴い大きく変動するが、それ以深では、ほぼ一定を示す。高緯度域においては、レゴリス深部の定常温度において水が凝縮する。レゴリス中の熱伝導と水蒸気の拡散を比較すると、水が凝縮しない高温域では、熱よりも水蒸気の方が速く拡散する。ところが、水が凝縮する低温域では、水蒸気圧が下がるため、水が効率的に移動できなくなる。月外から供給（あるいは、月面で生成）され、月面上で希薄な蒸気として存在する水分子は、夜間、温度の下がったレゴリス表面に凝縮する。凝縮した水分子は、日照開始と共に蒸発する。水蒸気の一部はレゴリス内部へと拡散する。日照熱に追われるように内部に拡散した水蒸気は、低温なレゴリス深部において凝縮し、そこで固定・蓄積される。

シミュレーションの結果、月の緯度  $84^\circ$  以上の範囲において、レゴリス中に水が凝縮し、長期間保持されることが確認された。その凝縮量は月の水供給に対して 0.1% 程度であった。水の凝縮は、レゴリスの深さ 10 cm 以上の部分においてのみ見られた。これは、レゴリス表面を月面上空から観察しても検出され難い、「隠れた」月面水の存在を意味する。

キーワード: 月, レゴリス, 水, シミュレーション

Keywords: moon, regolith, water, simulation

## 月レゴリス粒子の3次元形状の特徴：イトカワ・衝突実験粒子との比較 Features of 3D shapes of lunar regolith particles: comparison with Itokawa particles and experimental impact fragments

櫻間 卓志<sup>1\*</sup>; 土山 明<sup>1</sup>; 中野 司<sup>2</sup>; 上杉 健太郎<sup>3</sup>

SAKURAMA, Takashi<sup>1\*</sup>; TSUCHIYAMA, Akira<sup>1</sup>; NAKANO, Tsukasa<sup>2</sup>; UESUGI, Kentaro<sup>3</sup>

<sup>1</sup> 京都大学大学院理学研究科地球惑星科学専攻, <sup>2</sup> 産業技術総合研究所 地質情報研究部門, <sup>3</sup> 高輝度光科学研究センター スプリング8

<sup>1</sup>Division of Earth and Planetary Sciences, Graduate School of Science, Kyoto University, <sup>2</sup>Geological Survey of Japan, AIST, <sup>3</sup>SPRing-8/JASRI

月や小惑星などの大気のない天体でのレゴリスの形成・進化を明らかにするため、レゴリス粒子の3次元形状分布が測定され、高速衝突実験破片粒子との比較がなされている。はやぶさ計画による小惑星イトカワの粒子の3次元外形はマイクロCTにより測定され[1]、その3次元形状分布が衝突実験破片粒子[2]のものとは区別できないが、アポロ16号(デカルト高地)の月粒子(60501)[3]はイトカワ粒子に比べてより球状に近いことが提唱された。また、60501に加えてアポロ11号(静かの海)の月粒子(10084)の3次元形状分布が測定され[4]、10084粒子もイトカワ粒子より球状に近いことが示された。しかしながら、これらの研究では1粒子毎をCT撮影しているため、データ取得に長時間を要するだけでなく、その粒子数も60個程度に留まっている。また、月のレゴリスは一般的には多様性をもっていると考えられるため、より多くのサンプルのデータを効率よく求める必要がある。そこで本研究では、より多くの月レゴリス粒子サンプルについて効率良くCT撮影し、月レゴリス粒子の3次元形状の特徴を明らかにするとともに、イトカワ粒子や高速衝突実験破片粒子との比較を試みた。

アポロサンプル(10084, 60501)に加えて、旧ソ連の無人月探査機ルナ16, 20, 24号が持ち帰ったサンプルL1613-3(Luna 16: 豊かの海)、L2001-4(Luna 20: アポロニウス高地)、L24130.3-2~4(Luna 24: 危機の海)の7種類のサンプルを用いた。爪楊枝に両面テープを巻きつけ、その周りにレゴリス粒子を貼り付けることにより、一度に多数の粒子の撮影をSPRing-8 BL20B2の放射光マイクロX線CTを用いて行った(X線エネルギー: 17.9, 18.1 または 20 keV、画素サイズ: 1.73  $\mu$  m/voxel)。二値化により抽出した粒子のうち有為な3次元形状測定が可能な10000以上の画素数をもつ粒子[5]のうち、粒子同士が接触していない粒子を解析した(現在のところ10084は156個、L2001-4は90個を解析した)。

粒子の軸長の測定には、3軸楕円体近似(Ovoid Approximation: OA)法およびノギス(Bounding Box: BB)法[4]を用いた。なおBB法では、短軸(S)・中軸(I)・長軸(L)を決める順序により軸長が変わるため、衝突実験破片粒子の測定に対応するように短・中・長軸の順[6]および長・中・短軸の順に決める[2]の2つの手法を用いた。このようにして求めた短軸/中軸比と中軸/長軸比より3次元形状分布を求め、従来の月粒子データ[3,4]やイトカワ粒子[7]、衝突実験破片粒子[2,5,6]と比較した。Kolmogorov-Smirnov(KS)検定を用いて、2つの分布に有意な違いがあるか否かを検定した。

この結果、少なくとも10084については撮影方法(1粒子毎または同時に多数)の違いによる有意な違いは認められなかった。また、現在解析したサンプルについては、月レゴリス粒子同士では海と高地の違いも含めて基本的には有為な違いは認められなかった。一方、イトカワレゴリス粒子や高速衝突実験の破片粒子の分布と比較すると月粒子の方がより球状に近いことがわかった。月ではレゴリスでの滞在時間が10億年程度[8]と長いと、長期間にわたりガーデニングにより月レゴリス粒子は摩耗し、球状に近づいていったと考えられる。発表までには、より多くのサンプルを解析する予定である。

[1] Tsuchiyama et al. (2011) Science 333: 1125. [2] Capaccioni et al. (1984) Nature 308: 832. [3] Katagiri et al. (2014) J. Aerosp. Eng.. 10: 1061. [4] Tsuchiyama et al., (2013) Goldschmidt Conf. Abstract 2361. [5] 島田 (2014) 大阪大学理学研究科修士論文. [6] Fujiwara et al. (1978) Nature, 272: 602. [7] Tsuchiyama et al (2014) MAPS, 49: 172. [8] Wieler (2002) Rev. Mineral. Geochem., 47: 21.

キーワード: アポロ計画, ルナ計画, はやぶさ計画, X線CT, スプリング8

Keywords: Apollo mission, Luna mission, Hayabusa mission, X-ray tomography, SPRing-8

月レーザー測距用ホロー型反射板の開発 - 光学接着面の加熱実験 -  
Development of hollow type retroreflector for future LLR - thermal tolerance test of the optical contact surface -

荒木 博志<sup>1\*</sup>; 鹿島 伸悟<sup>1</sup>; 野田 寛大<sup>1</sup>; 安田 進<sup>2</sup>; 宇都宮 真<sup>2</sup>; 鶴田 誠逸<sup>1</sup>; 浅利 一善<sup>1</sup>; 大坪 俊通<sup>3</sup>; 國森 裕生<sup>4</sup>

ARAKI, Hiroshi<sup>1\*</sup>; KASHIMA, Shingo<sup>1</sup>; NODA, Hiroto<sup>1</sup>; YASUDA, Susumu<sup>2</sup>; UTSUNOMIYA, Shin<sup>2</sup>; TSURUTA, Seiitsu<sup>1</sup>; ASARI, Kazuyoshi<sup>1</sup>; OTSUBO, Toshimichi<sup>3</sup>; KUNIMORI, Hiroo<sup>4</sup>

<sup>1</sup> 国立天文台, <sup>2</sup> 宇宙航空研究開発機構, <sup>3</sup> 一橋大学, <sup>4</sup> 情報通信研究機構

<sup>1</sup>National Astronomical observatory of Japan, <sup>2</sup>Japan Aerospace Exploration Agency, <sup>3</sup>Hitotsubashi University, <sup>4</sup>National Institute of Information and Communications Technology

月レーザー測距 (LLR) は 1969 年の月面反射板設置から継続して行われ、月の暦、天体基準座標系、重力物理学、地球 - 月系力学、月内部構造解明等に重要な役割を果たしてきた。しかし月の深部構造の理解を深めるためには現状 (ノーマルポイントで 2cm 以下) の 1 桁以上の高精度が必要とされ、反射効率の高い新規の月面反射板設置が望まれている。

このため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。昨年度は口径 20cm の CCM について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い、単結晶シリコンが性能面で最適であることを示した。CCM の製法は 3 枚の鏡を互いに直角にオプティカルコンタクトする「三面貼合法」をベースに考えている。オプティカルコンタクトの強度は接着後の高温処理で強化されることが知られており、その定量的評価は CCM の設計上重要である。

今回我々は単結晶シリコンをオプティカルコンタクトさせたサンプルを用いて 100 °C から 1000 °C までの高温さらし実験を行い、1000 °C で処理したサンプルの剪断強度は 100 °C 処理のサンプルに比べて 5-6 倍強化され、かつこの処理による面精度、面粗さの劣化は無視できることを確認した。現在単結晶シリコン製の口径 20cm CCM モデルを製作中である。このモデルについても同様の高温処理実験を行い、面角度変化の測定結果を発表する予定である。

キーワード: 月レーザー測距, 逆反射板, ホロー型, 光学接着, 加熱, 強度

Keywords: LLR, CCM, hollow, optical contact, thermal, strength

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

松島 政貴<sup>1\*</sup>; 清水 久芳<sup>2</sup>; 藤 浩明<sup>3</sup>; 吉村 令慧<sup>4</sup>; 高橋 太<sup>5</sup>; 綱川 秀夫<sup>1</sup>; 渋谷 秀敏<sup>6</sup>; 松岡 彩子<sup>7</sup>;  
小田 啓邦<sup>8</sup>; 小川 和律<sup>9</sup>; 田中 智<sup>7</sup>  
MATSUSHIMA, Masaki<sup>1\*</sup>; SHIMIZU, Hisayoshi<sup>2</sup>; TOH, Hiroaki<sup>3</sup>; YOSHIMURA, Ryokei<sup>4</sup>;  
TAKAHASHI, Futoshi<sup>5</sup>; TSUNAKAWA, Hideo<sup>1</sup>; SHIBUYA, Hidetoshi<sup>6</sup>; MATSUOKA, Ayako<sup>7</sup>; ODA, Hirokuni<sup>8</sup>;  
OGAWA, Kazunori<sup>9</sup>; TANAKA, Satoshi<sup>7</sup>

<sup>1</sup> 東京工業大学, <sup>2</sup> 東京大学地震研究所, <sup>3</sup> 京都大学, <sup>4</sup> 京都大学防災研究所, <sup>5</sup> 九州大学, <sup>6</sup> 熊本大学, <sup>7</sup> 宇宙航空研究開発機構  
宇宙研究所, <sup>8</sup> 産業技術総合研究所, <sup>9</sup> 東京大学

<sup>1</sup>Tokyo Institute of Technology, <sup>2</sup>ERI, University of Tokyo, <sup>3</sup>Kyoto University, <sup>4</sup>DPRI, Kyoto University, <sup>5</sup>Kyushu University,  
<sup>6</sup>Kumamoto University, <sup>7</sup>ISAS/JAXA, <sup>8</sup>AIST, <sup>9</sup>University of Tokyo

The so-called giant impact hypothesis is likely to explain the origin of the Moon in view of physical and chemical evidence such as angular momentum, materials possibly through magma ocean processes, and compositional similarity of the Earth and the Moon. Numerical simulations of such a giant impact indicate that most of the Moon-forming material around the proto-Earth originates from the projectile. This means that such a standard giant impact is difficult to form the Moon whose isotopic composition is essentially identical to the Earth's as found from the lunar samples in the Apollo mission. This would be a reason why new giant-impact models are devised. It should be noted that the lunar samples were obtained only from the lunar surface, and that information on bulk composition and interior structure of the Moon is still insufficient. Therefore it is of significance to obtain information regarding the whole lunar composition and interior structure, which can advance our understanding of lunar origin and evolution.

In the SELENE-2 mission, we propose a lunar electromagnetic sounder (LEMS) to estimate the electrical conductivity structure of the Moon. The electrical conductivity varies with temperature even for the same composition, and therefore it can be used to deduce the present thermal structure of the Moon.

Temporal variations in the magnetic field of lunar external origin, which can be observed by magnetometers onboard a lunar orbiter and a lunar lander, induce eddy currents in the lunar interior depending on the electrical conductivity distribution and frequencies of the temporal variations. The eddy currents, in turn, generate temporal variations in the magnetic field of lunar internal origin, which can be observed by a magnetometer onboard a lunar lander. Thus electromagnetic response of the Moon is obtained by magnetic field measurements. Then the electromagnetic response function is used to estimate the electrical conductivity structure by solving an inverse problem. We show results for some tests of inversion, assuming a one-dimensional interior structure for electrical conductivity distribution.

キーワード: 電磁探査, 月内部構造, SELENE-2

Keywords: electromagnetic sounding, lunar interior structure, SELENE-2