

SELENE月レーダサウンダによる月全球地下サウンディングに基づく研究

Studies based on global subsurface radar sounding of the Moon by SELENE (Kaguya) Lunar Radar Sounder (LRS): A summary

*熊本 篤志¹、山口 靖²、山路 敦³、小林 敬生⁴、押上 祥子⁵、石山 謙¹、中村 教博¹、後藤 由貴⁶

*Atsushi Kumamoto¹, Yasushi Yamaguchi², Atsushi Yamaji³, Takao Kobayashi⁴, Shoko Oshigami⁵, Ken Ishiyama¹, Norihiro Nakamura¹, Yoshitaka Goto⁶

1.東北大学大学院理学研究科、2.名古屋大学大学院環境学研究科、3.京都大学大学院理学研究科、4.韓国地質資源研究院、5.国立天文台、6.金沢大学理工学域

1.Tohoku University, 2.Nagoya University, 3.Kyoto University, 4.KIGAM, 5.NAOJ, 6.Kanazawa University

The Lunar Radar Sounder (LRS) onboard the SELENE (Kaguya) spacecraft successfully performed subsurface radar sounding of the Moon and passive observations of natural radio and plasma waves from the lunar orbit. The operation of LRS started on October 29, 2007. Until the end of the operation on June 10, 2009, 2363 hours worth of radar sounder data and 8961 hours worth of natural radio and plasma wave data were obtained [Ono et al., 2010]. We found subsurface regolith layers at depths of several hundred meters, which were interbedded between lava flow layers in the nearside maria. [Ono et al., 2009]. Using the measured depths and structures of the buried regolith layers, we could determine several key parameters on tectonics, surface layer evolution, and volcanism in the maria: Base on the determined parameters such as the formation age of the ridges, effective permittivity of the uppermost basalt layers, and the lava flow volumes in the nearside maria, we made the following suggestions: (1) Global cooling, which forms ridges in southern Serenitatis, became dominant after 2.84 Ga. [Ono et al., 2009], (2) The porosity of the uppermost basalt layer in Mare Humorum was estimated to be 19-51%, much more than the average of Apollo rock samples (7%) [Ishiyama et al., 2013], and (3) The average eruption rate of the lava flow in the nearside maria was 10^{-3} km³/yr. at 3.8 Ga and decrease to 10^{-4} km³/yr at 3.3 Ga [Oshigami et al., 2014]. Thanks to the high downlink rate from the SELENE/LRS (0.5 Mbps), we could obtain almost raw (simply pulse-compressed) waveform data from the lunar subsurface radar sounding. Using this dataset, synthetic aperture radar (SAR) processing was applied with trying several permittivity models in the analyses on the ground [Kobayashi et al., 2012]. This dataset is provided via SELENE Data Archive (<http://l2db.selene.darts.isas.jaxa.jp/index.html.en>), which will be useful for researchers who have new ideas for applying them to the investigations of the lunar surface structures and there evolutions.

キーワード：月周回衛星SELENE（かぐや）、月レーダサウンダ、海のテクトニクス、海の火山活動

Keywords: SELENE (Kaguya), Lunar Radar Sounder (LRS), Tectonics in the maria, Volcanism in the maria

ハイパースペクトルリモートセンシングによる月火山性ガラスに富む領域の全球搜索
Global Survey of Exposure Areas of Volcanic Glass-Rich Sites on the Moon based on
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⁷、春山 純一⁴
*Satoru Yamamoto¹, Ryosuke Nakamura², Tsuneo Matsunaga¹, Yoshiko Ogawa³, Yoshiaki Ishihara⁴, Tomokatsu Morota⁵, Naru Hirata³, Makiko Ohtake⁴, Takahiro Hiroi⁶, Yasuhiro Yokota⁷, Junichi Haruyama⁴

1.国環研、2.産総研、3.会津大、4.JAXA/ISAS、5.名古屋大、6.ブラウン大、7.筑波惑星研究会
1.NIES, 2.AIST, 3.Univ. of Aizu, 4.JAXA, 5.Nagoya Univ., 6.Brown Univ., 7.TPSG

Spectral Profiler (SP) onboard SELENE/Kaguya has obtained continuous spectral reflectance data (hyperspectral data) for about 70 million points on the Moon in the visible and near-infrared wavelength ranges. Using a data mining approach with all the SP data, global distributions of large area sites with exposed end-member of various lunar major minerals have been revealed: olivine-rich sites, purest anorthosite sites, high Ca pyroxene-rich sites, low Ca pyroxene-rich sites, and spinel-rich sites. In addition to these sites, it is expected that there are exposure sites of quenched glasses from volcanic eruptions on the lunar surface. Although several remote-sensing observations for the volcanic glasses on the Moon have been reported, the global distribution of the glass-rich sites on the Moon has been unknown. Thus, we conducted the global survey using SP data to reveal the global distribution of the glass-rich sites on the Moon. From the global distribution data, we will discuss the compositional variation of the lunar mantle and/or the distribution of the amount of volatiles in the mantle.

キーワード：リモートセンシング、ハイパースペクトル、月、かぐや
Keywords: remote-sensing, hyperspectral, Moon, Kaguya/SELENE

月南極-エイトケン盆地の衝突溶融物から推定する月内部組成

Compositional estimation of the lunar interior based on the mineralogy of impact melt pool of South Pole-Aitken basin

*大竹 真紀子¹、上本 季更²、春山 純一¹、中村 良介³、松永 恒雄⁴、山本 聡⁴、横田 康弘⁵、石原 吉明¹、岩田 隆浩¹

*Makiko Ohtake¹, Kisara Uemoto², Junichi Haruyama¹, Ryosuke Nakamura³, Tsuneo Matsunaga⁴, Satoru Yamamoto⁴, Yasuhiro Yokota⁵, Yoshiaki Ishihara¹, Takahiro Iwata¹

1.宇宙航空研究開発機構 宇宙科学研究本部、2.東京大学、3.産業総合研究所、4.国立環境研究所、5.つくば惑星研究会

1.Institute of Space and Astronautical Science, Japan Aerospace Exploration Agency, 2.Tokyo Univ., 3.National Institute of Advanced Industrial Science and Technology, 4.National Institute for Environmental Studies, 5.Tsukuba Planetary Study Group

The South Pole-Aitken (SPA) basin is the largest basin (2400 x 2050 km) that is clearly identified on the Moon. The basin impact is very large, so it has been suggested that most of the crustal material within the SPA was excavated, and it is likely that the mantle materials have been exposed within the basin. However, the mineralogy of the SPA basin was not well known previously because it is one of the oldest basins (pre-Nectarian in age), and its surface has become obscured by intensive cratering and mixing since its formation. Therefore, it is very important to investigate the mineralogy and composition of the impact melt pool and to evaluate if the impact melt pool had undergone magmatic differentiation to acquire rare direct information of the lunar interior (possibly mantle) composition. In this study, we used a mineralogical map based on high-spatial-resolution reflectance spectra using the SELENE (Kaguya) Multiband Imager (MI). We investigated not only the mineralogy but also the layer thickness, distributions, chemical abundance, and stratigraphy within the central area of the basin.

As the results, we classified the rock types for six units as, 1) LCP-dominant unit (L1) located around the central depression, 2) HCP-dominant unit (H1) located within the depression, 3) HCP-dominant unit (H2) with relatively deeper spectral absorption at 1050 nm than the 950 and 1000 nm and tends to have longer wavelengths in the band center than the H2 unit, 4) an LCP-dominant unit (L2) observed at the central peaks of the large craters, which formed after the SPA basin impact, 5) the HCP-dominant unit (MB) having even longer wavelengths in the band center and higher iron content than H1 and L2 units, 6) plagioclase dominant rock (An). HCP-dominant rock types (H1 and H2) have the largest coverage in the central depression. Based on the crater wall and floor observation on the L1 unit, it is clear that the H1 unit extends under the L1 unit. The L1 thickness is estimated to be 100 to 500 m based on the estimated excavation depth of the observed craters. Based on the crater central peak observation of the H1 unit, the LCP-dominant L2 unit underlays the H1 unit, and the H1 thickness is from 6.5 to 6.9 km. Similarly, H1 extends under the H2 unit and is up to 2 km thick. The thickness of L2 is at least 8 km thick, based on the diameters of the smallest and largest craters that have central peaks of the red layer. As a result, columnar sections of the area are determined as L2 > H1 > (L1/H2) from bottom to top.

We interpreted the L1 unit as mantle material ejected by an SPA formed impact event based on its spectra, thickness, and chemical composition. We also interpreted the H1 and L2 units as the impact melt of the SPA basin that had undergone magmatic differentiation because this layer is larger and thicker than the normal mare basalt observed on the Moon. In addition, the average FeO abundance is 2 wt.% lower than that of mare basalt.

Hurwitz and Kring (2014) studies SPA impact melt differentiation and derived estimated stratigraphy

considering the different lunar bulk composition (different impact melt composition) and mantle overturn. Stratigraphy of our observation (lower LCP layer of at least 8 km and upper HCP layer of 6~7 km) is matched to the stratigraphy of a post-overturn model in their study, which estimated relatively thick olivine layer (~30 km) > LCP layer (12 km) > HCP layer (5 km) from bottom to top in the differentiated column. This suggest that the composition of the SPA impact melt indicates the lunar upper mantle after the mantle overturn. In other words, the SPA impact event occurred after the LMO cumulate overturn. This is possibly direct evidence that the mantle overturn occurred early in the history of the Moon.

キーワード：月、内部、組成、鉱物、衝突溶融物

Keywords: Moon, interior, composition, mineralogy, impact melt

Tychoクレーター対蹠点付近のejecta堆積物の分光学的特徴

Spectral characteristics of possible antipodal ejecta deposits of Tycho crater

*平田 成¹、晴山 慎²、石原 吉明³、横田 康弘、中村 良介⁴、大竹 真紀子⁵

*Naru Hirata¹, Makoto Hareyama², Yoshiaki Ishihara³, Yasuhiro Yokota, Ryosuke Nakamura⁴, Makiko Ohtake⁵

1.会津大学 コンピュータ理工学部、2.聖マリアンナ医科大学生理学教室（物理学分野）、3.国立研究開発法人 宇宙航空研究開発機構 宇宙科学研究所 科学衛星運用・データ利用ユニット、4.産業技術総合研究所、5.宇宙航空研究開発機構 宇宙科学研究本部 固体惑星科学研究系

1.Dep. of Computer Science and Engineering, Univ. of Aizu, 2.Department of Physiology (Physics), St. Marianna University School of Medicine, 3.Institute of Space and Astronautical Science, Japan Aerospace Exploration Agency, 4.National Institute of Advanced Science and Technology, 5.Department of Planetary Science, Institute of Space and Astronautical Science, Japan Aerospace Exploration Agency

最近の月探査機の観測により、Tychoクレーターの対蹠点に衝突溶融物が堆積していることがわかった。近傍には衝突溶融物のソースとなり得る大型のクレーターは存在しないことから、この堆積物はTychoクレーターから飛来した放出物が対蹠点に集中することで形成されたものと考えられる。

今回、月探査機かぐやの分光データを用いて、Tychoクレーター対蹠点とその周辺の分光学的特徴を解析した。かぐやSPデータから作成された独立成分マップでは、Tychoクレーター対蹠点とその周辺に、周囲の月高地物質とは異なる分光特徴を持つ物質が、広い範囲に分布していることがわかった。分布範囲の広がり、先行研究で知られていたものよりかなり大きい。

対蹠点堆積物は、低アルベド、可視域での緩いスペクトル傾斜、弱い1- μm 吸収という分光学的特徴を示す。これらの特徴は、周囲の月高地物質と異なるだけでなく、Tychoクレーター周辺の衝突溶融物のそれとも異なっている。このことは、衝突溶融物の源岩がTychoクレーター周辺の溶融物のそれとは異なる可能性や、対蹠点へと飛来した後、現地の物質と混合した可能性を示唆している。

キーワード：Tycho、対蹠点、ejecta、かぐや、分光

Keywords: Tycho, antipode, ejecta, SELENE/Kaguya, spectroscopy

月裏側におけるマグマ噴出条件の不均質性

Heterogeneity in magma eruption on the lunar farside

*田口 雅子¹、諸田 智克¹、加藤 伸祐¹*Masako Taguchi¹, Tomokatsu Morota¹, Shinsuke Kato¹

1.名古屋大学大学院環境学研究科

1.Graduate School of Environmental Studies, Nagoya University

月の海の分布は低地および地殻の薄い領域に限られている。このことは、月面で見られるマグマ噴出量の地域性はマントルにおけるマグマ生成量の水平不均質によるものだけでなく、表面へのマグマ噴出が表層構造に大きく影響を受けていることを示す。Morota et al. (GSL Special Publications, 401, 127-138, 2015) では、表面のマグマ噴出の地域差について全球的な調査が行われた。その結果、月裏側でもSouth Pole-Aitken (SPA) 盆地領域とFeldspathic Highlands Terrane (FHT) では、同じ地殻厚であっても海領域の比率が異なり、SPAではよりマグマが噴出しやすいという結果が得られている。この要因としては、SPAの地殻密度が高いことが原因であると考えられている。一方で、我々がこれまでに行ってきたSPA内のマグマ噴出量の推定では、SPA内の主要な海における噴出量はFHTと大きな差はない(田口 他, JpGU Meeting 2015, PPS23-P01)。Morota et al. (2015) では、マグマ噴出の条件の指標として地殻厚のみを考慮していた。しかしながら、標高も表面へのマグマの噴出しやすさを考える上で重要な指標であり、海領域の地殻厚、標高についての系統的調査が必要である。本研究では、月裏側の海でのマグマ噴出領域と表層構造との関係を明らかにし、噴出の条件について制約を与えることを目的とする。そのために、かぐやMIデータを用いて裏側の海領域を再定義し、その領域の地殻厚や標高を調査した。

結果として、予想されるように、海をつくったマグマは地殻が薄く、標高の低い領域に選択的に噴出していることがわかった。しかし、SPAとFHTを比較すると、FHTの方が標高の高い地点でもマグマが噴出している。また、海領域の平均標高と地殻厚のばらつきは、FHTに比べてSPAでは大きくなっており、マグマ噴出条件の不均質性が強いことがわかった。例えばIngenii領域ではマグマの噴出量が多いが、Apollo領域では少ない。また噴出量の緯度依存性も確認された。

表面で観測されるマグマ量の空間的な違いは、マグマ生成量や表面への噴出のしやすさの違いによる。表面への噴出のしやすさは、表層の密度構造やマグマの密度などに依存し、SPAではFHTに比べて鉄量の高い物質で覆われているため、マグマ噴出には有利であると考えられる。しかし本研究で得られた結果はこれと逆センスであることから、SPA、FHT両領域でマグマ生成量が異なっていた可能性があり、SPAではマグマ生成量が少なかったと考えられる。

キーワード：月の裏側、海の火成活動、South Pole-Aitken 盆地

Keywords: lunar farside, mare volcanism, South Pole-Aitken basin

かぐや分光データの自動分類に基づく月地質図の作成

Lunar geologic map based on auto classification of Kaguya spectral data

*晴山 慎¹、石原 吉明²、大竹 真紀子²、唐牛 譲²、小林 直樹²、本田 親寿³、平田 成³、諸田 智克⁴、鎌田 俊一⁵

*Makoto Hareyama¹, Yoshiaki Ishihara², Makiko Ohtake², Yuzuru Karouji², Naoki Kobayashi², Chikatoshi Honda³, Naru Hirata³, Tomokatsu Morota⁴, Shunichi Kamata⁵

1.聖マリアンナ医科大学生理学教室（物理学分野）、2.宇宙航空研究開発機構、3.会津大学、4.名古屋大学、5.北海道大学

1.St. Marianna University School of Medicine, 2.Japan Aerospace Exploration Agency, 3.University of Aizu, 4.Nagoya University, 5.Hokkaido University

Geologic mapping is essential to understand the history of the crust formation and the volcanic activity of its planet or satellite. For the Moon, many researchers have made the lunar geological map. Those work were mainly based on albedo, texture and topography of the lunar terrain, and relative age from crater counting, which were obtained in the Apollo era. There is no mineral and chemical composition-oriented geologic map of the entire Moon up to today, while those have been reported about many local area.

By using reflectance spectrum data set obtained by the Spectral Profiler (SP) and Multiband Imager (MI) aboard Kaguya, we have started a project to make a new geological map that is mineral and chemical composition-oriented. The SP observed lunar reflectance with 296 bands in the wavelength range of 510 to 2600 nm with footprint of 500 mx500 m. The SP data of 160 bands between 510 and 1600 nm was averaged pixel by pixel of 0.5 degree interval in longitude and latitude and was removed a continuous part from each reflectance spectrum, called as SP-Cube Depth. And, the abundance map of titanium oxide calculated from MI data was also used for this work.

To construct the geologic map, the unsupervised clustering methods as K-means and ISODATA were adopted to classify the SP-Cube Depth. These are similar algorithm, but the input parameters for the classification are different. One of them is the final number of class. While the K-means needs it, the ISODATA do not need it. Since nobody knows the true number of class as the lunar spectral surface unit, the ISODATA is more suitable for this work than the K-means. However, comparing with the K-means, the ISODATA requires more calculation time, as the data increase. Therefore, at first, we divided the entire Moon into 7 classes by K-means, which correspond approximately to two mare regions, South Pole-Aitken (SPA), two highland regions, boundary regions between mare/SPA and highland, and relatively fresh crater ejecta. Then, the 3 classes corresponding to the mare regions and the boundary region between mare and highland were divided into 5 classes in each by the titanium content, because the sensitivity for that is small in the SP-Cube depth. Finally, all classes were applied to the ISODATA to classify the SP-Cube Depth. As a result, the SP-Cube Depth was divided into 66 classes in total.

Focusing on the Aristarchus and Marius regions, Aristarchus crater, the Aristarchus plateau and the Marius hills can be classified as other classes. At Aristarchus crater, inside and outside of the crater was divided into other classes. The crater ejecta in the outside were recognized as some classes near the crater and one of their classes has SPA-like spectrum as low calcium pyroxene type.

This report presents the analytical procedure and the result of automatic classification of lunar reflectance spectra.

キーワード：月、地質図、分光、教師なし分類、かぐや

Keywords: Moon, geologic map, spectroscopy, unsupervised clustering, SELENE/Kaguya

かぐやガンマ線分光計によるPKT領域の高Th濃度地域におけるTh, Kの詳細分布

The detailed distributions of Th and K in the high-Th concentration regions of the Procellarum KREEP terrane observed by Kaguya Gamma-ray Spectrometer

*関根 北斗¹、長岡 央¹、長谷部 信行^{1,2}

*HOKUTO SEKINE¹, Hiroshi Nagaoka¹, Nobuyuki Hasebe^{1,2}

1.早稲田大学先進理工学部、2.早稲田大学理工学術院総合研究所

1.School of Advanced Science and Engineering, Waseda University, 2.Research Institute for Science and Engineering, Waseda University

Thorium (Th) and potassium (K) are incompatible elements that remained in the melt phase during the crystallization process of the lunar magma ocean. Therefore, the distributions of these elements on the lunar surface provide valuable information regarding magmatic activity and differentiation of the Moon.

Kaguya Gamma-ray Spectrometer (KGRS) [Hasebe *et al.*, 2008] onboard Japanese lunar explorer Kaguya determined elemental composition of the lunar surface with the high precision among previous gamma-ray remote sensing missions. The KGRS, which employed a high-purity germanium (Ge) detector, observed lunar gamma rays from the high altitude (100 ± 20 km) from December 14, 2007 to December 10, 2008. Subsequently, the KGRS resumed observation from the low altitude (50 ± 20 km) from February 10, 2009. The energy resolution of gamma-ray lines at 2615 keV was $\sim 0.8\%$ in full width at half maximum throughout the low-altitude phase, which was better than that of the high-altitude phase and was ~ 9 times better than that of Lunar Prospector Gamma-Ray Spectrometer (LP-GRS). It contributed to unique and high-precision identification of Th and K lines. Furthermore, the spatial resolution of the KGRS was $\sim (67\text{km})^2$ throughout the low-altitude phase, which was ~ 4 times better than that of the high-altitude phase. It enabled us to produce higher spatial resolution maps of Th and K.

Global distribution maps of Th and K on the lunar surface derived from the data acquired by LP-GRS and the data acquired by the KGRS during the high-altitude observation have been reported. According to them, there are several areas where Th concentration is prominently higher than their surrounding regions on the lunar surface. Th concentrations in some of the high-Th regions located in the province known as the Procellarum KREEP terrane (PKT) of the near side (e.g., Aristarchus crater, Aristillus crater, Mairan crater, La Condamine crater, Birmingham crater, and Archytas crater) are 7-12 ppm, whereas they are 3-5 ppm in their surrounding regions. In this study, using the low-altitude data set of KGRS, we derive higher spatial resolution maps of Th and K abundance of the PKT, based on $3^\circ \times 3^\circ$ pixels, and we discuss the detail distributions of Th and K in the high-Th concentration regions of the PKT.

Keywords: Moon, gamma ray spectroscopy, thorium, potassium, the Procellarum KREEP terrane

「かぐや」搭載 α 線検出器ARDによる月面上のラドンガス放出の時間変動の検出

Time variation of radon gas emanation on the lunar surface observed by Kaguya/ARD

*小島 浩一¹、木下 克之¹、伊藤 真之¹、高島 健²、三谷 烈史²、吉田 健二³、奥野 祥二⁴、西村 純²*Koichi Kojima¹, Katsuyuki Kinoshita¹, Masayuki Itoh¹, Takeshi Takashima², Takefumi Mitani², Kenji Yoshida³, Shoji Okuno⁴, Jun Nishimura²

1.神戸大学、2.宇宙科学研究所/JAXA、3.芝浦工業大学、4.神奈川大学

1.Kobe University, 2.Institute of Space and Astronautical Science / JAXA, 3.Shibaura Institute of Technology, 4.Kanagawa University

We analyzed the data obtained by the Alpha-Ray Detector (ARD) onboard the lunar orbiter Kaguya and detected intensity increases of alpha-particles from ^{222}Rn on the lunar surface. Although the time variation of the radon alpha-particle intensity was implied by the observations of Apollo 15, 16, and the Lunar Prospector, we observed the variation directly for the first time. We divided the entire observation period of January to June 2008 into the time periods of 2 weeks which approximately corresponds to the time necessary for Kaguya/ARD to observe the entire lunar surface. Then, we evaluated the ^{222}Rn alpha-particle intensity using the sliding-window algorithm for each period and detected at least 7 events of statistically significant signal higher than 4s. In all cases, duration of the alpha-particle intensity increase was less than 2 weeks. The result implies that the observed radon gas emanation is a sporadic event caused by opening of some path to the lunar surface after subsurface accumulation of gas. We examined the timing of the events relative to the passage of the terminator and found that 5 out of 7 events were within 5 days around the terminator passage. Thus, at least some of the gas emission events are possibly triggered by the stress due to the temperature gradient in the lunar crust.

キーワード：月、ラドン、 α 線、かぐや、ARD

Keywords: Moon, radon, alpha-particle, Kaguya, ARD

月磁気異常領域における太陽風イオン反射の質量依存性

Mass dependence of solar wind ion reflection over lunar crustal magnetic anomalies

*加藤 大羽¹、斎藤 義文²、横田 勝一郎²、西野 真木³*Daiba Kato¹, Yoshifumi Saito², Shoichiro Yokota², Masaki N Nishino³

1. 東京大学大学院理学系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. 名古屋大学宇宙地球環境研究所

1. Department of Earth and Planetary Science, The University of Tokyo, 2. Japan Aerospace Exploration Agency Institute of Space and Astronautical Science, 3. Institute for Space-Earth Environmental Research, Nagoya University

月は満月の前後を除いた約8割の期間で地球磁気圏の外側に位置している。この期間、月には地球のような全球的な固有磁場も濃い大気も存在しないため、太陽風と月面が直接相互作用している。1960年代に磁気異常と呼ばれる局所的に強い磁場を持つ領域が月面で発見されて以降、月磁気異常と太陽風の相互作用の解明は、月周辺プラズマ環境における代表的な科学目標となっている。

太陽風イオンはH⁺が主成分で、次にHe⁺⁺が数パーセントほど存在し、その他の重イオンはごく微量のみ含まれている。月磁気異常領域上空では太陽風イオンの10パーセント程度が磁場によって反射されることが知られている。しかしながらイオンの質量は磁気反射の運動を決める重要なパラメーターであるにも関わらず、反射イオンの質量依存性についてこれまで十分な理解が得られていない。

本研究では月周回衛星「かぐや」搭載イオン観測装置MAP-PACE-IEA, IMAと磁場観測器MAP-LMAGの観測データを用いて、月磁気異常でのイオン反射過程を定量的に理解することを目的とする。

反射イオンの解析を行った結果、太陽風H⁺と太陽風He⁺⁺の月磁気異常による反射が確認された。H⁺とHe⁺⁺で共に反射による加熱が確認されたが、He⁺⁺の方が強く減速しておりフラックス反射率も小さいことが分かった。また観測方向の違いによる速度差が大きいほど、反射イオンの温度が高くなることが分かった。垂直方向で観測された反射イオンの方が低高度まで侵入した反射軌道を取るため、「かぐや」衛星の高度より下の領域でイオン加熱が行われ、非断熱的な反射を行うと考えられる。またさらに反射H⁺と反射He⁺⁺で高エネルギーイオンのフラックス損失を比較した結果、フラックス損失の傾向にはラーマー半径依存が存在することが分かった。そのため月磁気異常領域上空の太陽風イオンは、He⁺⁺の方がより低高度まで侵入し衝突が起りやすいと考えられる。

天体の固有磁場によるイオン反射は、あらゆる天体で起こる普遍的な物理素過程である。月磁気異常領域は太陽系内で最小スケールの天体固有磁場の1つであり、この領域でのイオン反射メカニズムの解明は月周辺プラズマ環境のみならず、他の天体が持つ多様な環境の理解にも応用できると考えられる。

キーワード：月、太陽風、磁気異常

Keywords: Moon, solar wind, magnetic anomaly

Excitation of selenogenic ion cyclotron waves: Implications from ARTEMIS observations and dispersion analysis

*Peter Chi¹, H. Y. Wei¹, William M. Farrell², Jasper S. Halekas³

1.Department of Earth, Planetary, and Space Sciences, University of California, Los Angeles,
2.Planetary Magnetospheres Laboratory, NASA Goddard Space Flight Center, 3.Department of Physics
and Astronomy, University of Iowa

A unique type of electromagnetic waves can occur when the Moon is inside the Earth's magnetotail. First detected by the Apollo Lunar Surface Magnetometers, these waves are narrowband ion cyclotron waves (ICW's), and their occurrence is due to the presence of the Moon. The exact generation mechanism of these narrowband ICW's at the Moon is still an open question. Here we investigate the excitation of ICW's at the Moon through ARTEMIS observations near the Moon and wave dispersion analysis. Two types of narrowband ICW's have been observed by ARTEMIS. The first type is found when ARTEMIS was close to and magnetically connected to the Moon. The ESA instrument aboard ARTEMIS detected keV ions that are typical of the Earth's plasma sheet. The velocity distribution of ions shows a half-sphere geometry, except for ions with higher energies that can come over from the other side of the Moon through gyration motion. The second type is detected when ARTEMIS was several lunar radii from the Moon and was not magnetically connected. The ESA instrument detected ions at energies of around 100 eV, and the ion velocity distribution was mostly symmetric with a net flow velocity. With the dispersion analysis by WHAMP, we find that the observed particle distributions for both types of wave events are ion cyclotron unstable. These wave and particle observations support the hypothesis that each of two different processes near the Moon could lead to ion cyclotron waves. First, the ICW events at locations near and magnetically connected to the Moon strongly hint a wave generation through the absorption of ions by the Moon. This process is similar to the loss-cone-induced ion cyclotron instability in the inner magnetosphere, and it implies that the presence of the Moon can modify the local plasma condition in the Earth's magnetotail. Second, the ICW's located at several lunar radii from the Moon are likely caused by PUI's that originate from the lunar exosphere. Because PUI's are one of the major loss mechanisms of the lunar exosphere, the observations of ICW's at the Moon can help understand the loss of volatiles from the Moon.

Keywords: Lunar exosphere, Ion cyclotron waves, Terrestrial magnetotail

磁気異常上空の小型磁気圏境界における電子ダイナミクスに関する粒子シミュレーション解析
Simulation analysis on the electron dynamics in the magnetosphere boundary above a lunar
crustal magnetic anomaly

*臼井 英之¹、松原 琢磨¹、三宅 洋平¹、西野 真木²

*Hideyuki Usui¹, Takuma Matsubara¹, Yohei Miyake¹, Masaki Nishino²

1.神戸大学 大学院 システム情報学研究科、2.名古屋大学 宇宙地球環境研究所

1.Graduate school of system informatics Kobe University, 2.Institute for Space-Earth Environment
Research

3次元プラズマ粒子シミュレーションにより解明することである。本研究では、月面下に中心を持つ1つの磁気ダイポールをReiner Gamma磁気異常としてシミュレーション領域内に設定し、ダイポール中心から磁気圧と太陽風動圧が釣り合う点までの距離を磁気異常の代表長 L とする。磁気異常では L が太陽風電子のジャイロ半径よりも十分大きく、イオンのジャイロ半径より小さい。このような状況において、磁気異常上空において小型磁気圏が形成されることはこれまでの研究において明らかにされており、磁気圏境界層において、太陽風電子とイオンの磁場に対する応答差に起因する静電界が形成されることも知られている。磁気圏境界層では、電子フラックスによる強い電流が観測されているが、この電子フラックスの原因を電子運動論レベルで解明することが本研究の目的である。境界層低緯度領域においては朝側から夕方側に向かう電子流が顕著であるが、中高緯度領域においては逆に夕方側から朝側に向かう電子の流れが主に見えた。このような二層の電子ドリフト運動の構造により磁気圏層間側、すなわち磁気異常上空の南北両半球において電子電流の渦的構造が見られた。地球磁気圏におけるChapman Ferraro境界層電流に相当するが、磁気異常による小型磁気圏の場合、月面があるため磁気異常上空で閉じた電流構造となっている。また赤道域での電子流に特に着目し、そのメカニズムを運動論レベルで調べた。昼間側magnetopauseでは電子密度が急激に減少し、同時にそこでは上述した強い外向きの電場が発生する。Magnetopauseに流入する電子は一様にこの電界によって大きく加速を受け、それによってラーマ半径が大きくなる。このため、magnetopauseの最内側ではジャイロ運動によって電子はdusk側に最大速度を持つ。これにより正味の電子流はmagnetopauseの最内側で最も強くなる。このことは電子の有限ラーマ半径を考慮しないと再現、理解できないことであり、本研究で得られた知見の中でも最も重要なものである。本講演ではシミュレーション結果を用いてこれらの電子流メカニズムの詳細を議論する。

キーワード：プラズマ粒子シミュレーション、磁気異常、電子ダイナミクス

Keywords: plasma particle simulation, magnetic anomaly, electron dynamics

月面近傍プラズマ環境における帯電ダスト挙動に関する粒子シミュレーション

Particle simulations on charged dust dynamics in the lunar plasma environment

*三宅 洋平¹、船木 裕司²、西野 真木³

*Yohei Miyake¹, Yuji Funaki², Masaki N Nishino³

1.神戸大学計算科学教育センター、2.神戸大学大学院システム情報学研究科、3.名古屋大学宇宙地球環境研究所

1.Education Center on Computational Science and Engineering, Kobe Univ., 2.Graduate School of System Informatics, Kobe Univ., 3.Institute for Space-Earth Environmental Research, Nagoya Univ.

月は固有磁場を持たないため、その表面は太陽風プラズマと直接相互作用し、帯電している。この静電的な力学作用により、月表層のレゴリスを構成する微粒子の一部が浮遊しており、ダストと呼ばれている。このダストが月面ローバーなどの探査機や生体に悪影響を及ぼす可能性が示唆されており、また月表層のプラズマに帯電ダストが入り混じることにより、月面近傍の静電的環境そのものが大きく変化することが予想される。将来の月面探査への影響を評価する上でも月の帯電ダストの挙動を理解することは重要である。

本研究では、これまで人工衛星・プラズマ相互作用の研究に幅広く用いられてきたプラズマ粒子シミュレーション技術を応用し、月面昼側環境における帯電ダストの振る舞いを定量的に評価する。このために、①太陽風プラズマの降り込みと光電子放出により形成される月面静電環境の再現、②月面近傍プラズマ中における微小ダストの帯電特性の数値モデリング、を行ったうえで、③帯電ダストの浮遊および輸送過程を解明する。平らな月面だけではなく、近年かぐや衛星で発見された特徴的な縦孔地形にも着目し、その初期解析結果を紹介する。

キーワード：月、ダスト、プラズマ、月面帯電、縦孔、粒子シミュレーション

Keywords: the Moon, dust grains, plasma, lunar surface charging, vertical hole, PIC simulation

月隕石Northwest Africa 2727中のシリカリッチ岩石片の鉱物学岩石学的研究と月のシリカリッチな火成活動との関連性

Mineralogy and petrology of a rock fragment of felsite in lunar meteorite Northwest Africa 2727 breccia: Implications for silica- and Th-rich volcanism and scientific targets toward a future landing mission on the Moon

*長岡 央¹、Fagan Timothy²、鹿山 雅裕³、長谷部 信行¹

*Hiroshi Nagaoka¹, Timothy Fagan², Masahiro KAYAMA³, Nobuyuki HASEBE¹

1.早稲田大学先進理工学部、2.早稲田大学教育学部地球科学専修、3.神戸大学大学院理学研究科地球惑星科学専攻

1.School of Advanced Science and Engineering, Waseda University, 2.Department of Earth Sciences, School of Education, Waseda University, 3.Department of Earth and Planetary Sciences, Faculty of Science, Kobe University

Based on previous study of lunar returned samples and meteorites, the main suites of pristine nonmare igneous rocks have been classified into the following four types: (1) ferroan anorthosite (FAN) or ferroan anorthositic-suite (FAS), (2) magnesian suite (Mg-suites), (3) alkali-anorthosite-suite and (4) KREEP basalt and possibly related rocks such as quartz-monzogabbro (QMG) /monzodiorite (QMD), granite and felsite. The latest suite type, the evolved rock samples related to KREEP, may have been derived from residue of the lunar magma ocean (urKREEP), or from low degrees of partial melting or some other process to account for their high incompatible trace element (high-ITE) compositions. Granite and felsite have Th-rich compositions (10 to 60 ppm), and such lunar samples with bulk SiO₂ content of >60wt% originated from silicic volcanic or exposed intrusive material. Recent global remote sensing data have presented several candidates of silicic volcanism over the Moon based on indicators such as ITE-rich compositions, dome-like topography, characteristic infrared spectra (Christiansen Feature), and high albedo. Silica-rich, broadly granitic samples have been identified in lunar returned samples and lunar meteorites, but are rare. Lunar meteorite Northwest Africa (NWA) 2727 is a breccia paired with NWA 773 and the other meteorites of the NWA 773 clan. An olivine cumulate gabbro (OC) is common to most of these lunar meteorites within the NWA 773 clan; in fact NWA 2977 and 6950 consist entirely of OC lithology. However, in addition to the OC lithology, several clast types, including in olivine phyric basalt, pyroxene phyric basalt, pyroxene gabbro, ferroan symplectite, and alkali-rich-phase ferroan (ARFe) rocks have been discovered from the NWA 773 clan. The ARFe clasts have K-feldspar and/or felsic glass, a silica phase and minerals rich in incompatible elements such as merrillite. In this work, we characterize a felsic clast in NWA 2727 and compare our results with other lunar samples to discuss silicic volcanism.

A polished thin section (PTS) of NWA 2727 was investigated by a combination of petrographic microscopy and electron probe micro-analysis. The NWA 2727 breccia includes a variety of large-scaled lithic clasts (>1mm) including: OC, ferrogabbro, pyroxene-phyric basalt, and the felsic igneous clast. The felsic clast has a modal composition of 37% silica, 34% plagioclase, 14% K-feldspar, 6% high-Ca pyroxene, 5% fayalite, 3% Ca-phosphate, 1% ilmenite, and traces of troilite and chromite. Feldspar compositions of the plagioclase are near An₈₅₋₉₀. Two compositional types of pyroxene were identified—one near hedenbergite (Wo₄₆Fs₅₃, Mg# = 1 [calculating Mg# as Mg/(Mg+Fe)×100]) and the other with zoning and more magnesian compositions (Wo₂₅₋₃₀Fs₅₅₋₆₅, Mg# = 8-20). The K-feldspar is also zoned with variable concentrations of Ba, clearly detected in elemental X-ray maps (quantitative analyses of Ba are planned). The abundance of silica + feldspars (>80 mode%), the high proportion of K-feldspar to plagioclase, and the very ferroan compositions of

mafic minerals attest to the felsic composition of this clast. Subhedral-euhedral olivine crystals up to 0.3 mm in maximum length are preserved, and silica and K- and Ba-feldspar occur in elongate parallel crystals indicating an igneous origin. These observations indicate that this clast was derived from silica-rich magma.

Silicic volcanism is also interesting from the viewpoint of landing site candidates for future lunar landing mission. Global gamma-ray observations have presented several high-Th regions in PKT, but the main lithology of the Th-rich regions remains a subject of dispute; possibilities include mafic impact-melt breccia, KREEP basalt, QMD, and felsite/granite. If a lander/rover mission to a high-Th region is equipped for analysis of major elements, in situ analyses on the Moon can be compared with silica-rich samples such as the felsic clast in NWA 2727.

キーワード：珪長岩、月隕石

Keywords: felsite, lunar meteorite

月面における水の起源と水源地：物質科学的見地からの検討

Origin of water and water reservoirs on the Moon as considered from the perspective of material sciences

*鹿山 雅裕¹、富岡 尚敬²、大谷 栄治³、中嶋 悟⁴、瀬戸 雄介¹、長岡 央⁵、Fagan Timothy⁶、Götze Jens⁷、三宅 亮⁸、小澤 信³、関根 利守⁹、宮原 正明⁹、松本 恵¹、庄田 直起¹、留岡 和重¹

*Masahiro KAYAMA¹, Naotaka Tomioka², Eiji Ohtani³, Satoru Nakashima⁴, Yusuke Seto¹, Hiroshi Nagaoka⁵, Timothy Fagan⁶, Jens Götze⁷, Akira Miyake⁸, Shin Ozawa³, Toshimori Sekine⁹, Masaaki Miyahara⁹, Megumi Matsumoto¹, Naoki Shoda¹, Kazushige Tomeoka¹

1.神戸大学大学院理学研究惑星学専攻、2.海洋研究開発機構高知コア研究所、3.東北大学大学院理学研究科地球学専攻、4.大阪大学理学研究科宇宙地球科学専攻、5.早稲田大学先進理工学部、6.早稲田大学教育学部地球科学専修、7.TU Bergakademie Freiberg, TU Bergakademie Freiberg, Institute of Mineralogy、8.京都大学大学院理学研究科地球惑星学専攻地質学鉱物学教室、9.広島大学大学院理学研究科地球惑星システム学専攻

1.Department of Planetology, Graduate School of Science, Kobe University, 2.Kochi Institute for Core Sample Research, Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology, 3.Department of Earth and Planetary Materials Science, Graduate School of Science, Tohoku University, 4.Department of Earth and Space Science, Osaka University, 5.School of Advanced Science and Engineering, Waseda University, 6.Department of Earth Sciences, Waseda University, 7.TU Bergakademie Freiberg, Institute of Mineralogy, 8.Department of Geology and Mineralogy, Graduate School of Science, Kyoto University, 9.Department of Earth and Planetary Systems Science, Graduate School of Science, Hiroshima University

月探査機によるスペクトル観測から、月面において様々な水の化学種（水酸基、鉱物に結合する分子水、氷）が大量に検出されている。各種水の供給源として太陽風と彗星・小惑星の衝突が提案されているものの、これらの現象では大量に存在する水酸基や鉱物に結合する分子水の由来、月面における水の不均一性を十分に説明できない。近年、月隕石の微小部分分析から深部岩体やマントルにおいて大量の水の存在が示唆されており、月探査機から南極エイトケン盆地やプロセルム盆地においてカンラン石に富むマントル起源の露出岩体や深部岩体由来の中央丘が発見された。これらの事実から、マントル起源の水が大量に月面に供給され得る可能性が示唆される。本研究では、岩相を異にする月隕石の微小部分分析から水の化学種を同定し、月面に分布する水の起源解明を試みた。さらに、月の土壌（主にレゴリス）や露出岩体（斜長岩地殻、海の玄武岩、カンラン石に富む中央丘、角礫岩層およびマントル岩体）の全岩含水量を物質科学的な側面から定量的に推定することで、月面における水源地の検討を行った。

はんれい岩質月隕石は主要構成鉱物としてカンラン石、単斜輝石および斜長石を含有し、玄武岩質月隕石は単斜輝石斑晶と輝石および斜長石の基質から成る。角礫岩質月隕石は玄武岩・はんれい岩質クラストとそれらの礫質部から構成されている。各種岩相の主要構成鉱物を対象とした水の定量分析として、高温透過赤外吸収その場加熱実験を行った。鉱物相同定には透過電子顕微鏡、放射光X線回折ならびにラマン分光装置を供し、化学組成ならびにモード解析には走査型電子顕微鏡を用いた。

赤外吸収分光その場加熱実験の結果、はんれい岩質月隕石の主要構成鉱物に共通して顕著な水の吸収帯が確認された。同様の吸収帯は玄武岩質月隕石の単斜輝石斑晶においても検出されるものの、その吸光度は極めて低い。同様の傾向は角礫岩質月隕石においても認められる。段階過熱実験から、これら吸収帯は鉱物に結合する水酸基と分子水に帰属される。Beer-Lambert法から、はんれい岩質月隕石におけるカンラン石、輝石および斜長石の含水量はそれぞれ633、627および674 ppm（水酸基は373、468および517 ppm）と推定され、玄武岩質月隕石の単斜輝石斑晶は169 ppm（水酸基は106 ppm）となる。走査型電子線顕微鏡観察から礫質部においてのみ扁桃体状シリカ粒子の存在が見出された。透過型電子顕微鏡観察からこのシリカ粒子は平均粒径9 nmを有する微晶質ナノシリカの集合体として存在し、各種微小分析による相同定から月の流体に由来するモガナイトと判明した。モガナイトは非角礫質月隕石に産出しないことから、天体衝突に伴う水酸基および分子水の脱水と角礫化による流体の捕縛を経て沈殿したと推察される。

月土壌ならびに露出岩体における全岩含水量は、天体衝撃による水の損失率と太陽風による水の付加率を補正した上で、本研究で得られた各種鉱物の含水量と岩相のモード組成から推定できる。はんれい岩質および玄武岩質月隕石の全岩含水量はカンラン石に富む中央丘と海の玄武岩に対応し、それぞれ757および25 ppmとなる。海の玄武岩の場合、単斜輝石斑晶（11 vol.%）にのみ水が検出されることから全岩含水量は低く、その主な原因としてマグマ噴出時の脱ガス作用が考えられる。角礫岩層の全岩含水量は668 ppmとなり、盆地の永久影に限り流体はモガナイトを生成せずにコールドトラップされることから、モガナイトの体積を流体のそれと判断することができ、その結果として780 ppmにも達する。全岩含水量はマントル岩体で808 ppmと最大となり、斜長石近くで23 ppmと最少となる。一方で、月土壌に関しては70 ppmと推定される。マントル岩体ならびに中央丘と周囲の角礫岩層は最も湿潤と予想されていた月土壌の10倍以上の全岩含水量を保持し、これらの露出岩体は、極表層（<100 nm）にしか存在しないレゴリスと比べて広範囲（数kmの露出領域）に分布することから、月面で最も水に富み、また巨大な水源地といえる。

月土壌に含まれる水は太陽風の水素に由来する水酸基であることから、月面に存在する水酸基の大部分はマントルから供給された水であり、一部が太陽風に由来する。鉱物に結合する分子水はマントル起源の水にのみ起因し、氷についてはマントル起源（衝突角礫化により捕縛）と彗星・小惑星由来の両方が考えられる。彗星・小惑星から供給された氷は月土壌や各露出岩体に共通して存在し、月面の不均一な熱分布に従って存在する。従って、温度の低い高緯度の地域ほど全岩含水量は高いと予想される。つまり、月探査の将来構想として、南極エイトケン盆地、次いでプロセラルム盆地のマントル岩体や中央丘が最も重要な探査地域の候補となり得る。

キーワード：月、水の起源、水源、月隕石、マントル岩体、カンラン石に富む中央丘

Keywords: Moon, Origin of water, Water reservoir, Lunar meteorite, Olivine-bearing site, Olivine Hill

月の水、地球の水、そして、月探査

Review of lunar water studies and the implication to future exploration program.

*橋爪 光¹、藤谷 渉²、春山 純一³、山中 千博¹

*Ko Hashizume¹, Wataru Fujiya², Junichi Haruyama³, Chihiro Yamanaka¹

1.大阪大学大学院理学研究科、2.茨城大学理学部、3.JAXA-宇宙科学研究所

1.Graduate School of Science, Osaka University, 2.Faculty of Science, Ibaraki University,

3.JAXA-ISAS

月科学が今パラダイム転換の時期を迎えようとしている。これまで長らく、月は完全に無水の岩石天体であると考えられていた。しかし、Saal et al., (2008)を皮切りに、月岩石中の特定の鉱物やガラス中に水が続々と発見され (Robinson & Taylor, 2014)、これは、月マントル中に水が存在した証拠として考えられている。今や月は、月-地球系の一部を構成する重要な天体、つまりは、水惑星・地球の出自を解明する鍵を秘めた天体であると認識されている (Hauri et al., 2015)。月岩石を調べることにより、水を始めとした揮発性物質がいつ、どこから、どれだけ、月や地球に供給され、いつどのようにして海洋・大気・生命圏が形成し進化した、あるいは、失われたのか、を確かな証拠を元に検証できるのではないかと考えられつつある。本講演では、近年飛躍した月の水に関する地球化学的研究を簡潔にレビューした上で、現状明らかになりつつある問題点を指摘し、地上分析から宇宙探査にまたがるこの大きな研究課題の今後の方向性について、セッション参加者と共に考える材料を提供したい。

キーワード：月岩石、水惑星、同位体組成

Keywords: Lunar Rocks, Water Planet, Isotope Composition

月地下における微量水の同位体計測に向けたオンサイトレーザー分光装置の開発計画
On-site isotope laser spectrometry aiming underground lunar water

*山中 千博¹、橋爪 光¹、田坂 直也¹、時田 茂樹²

*Chihiro Yamanaka¹, Ko Hashizume¹, Naoya Tasaka¹, Shigeki Tokita²

1.大阪大学大学院 理学研究科、2.大阪大学レーザーエネルギー学研究中心

1.Graduate School of Science, Osaka University, 2.Institute of Laser Engineering, Osaka University

月面にはどの程度の水があるのか？月の水を探す研究は多くの関心を集めている¹⁾。実際2008年に火山性ガラスに水分子が捕獲されている証拠があるが^{2,3)}、月における水の存在量についての調査結果は極めて不確定である。当然ながら、月の日照時の表面温度(～395K)、および弱い重力から、月面に存在する水は、短時間に宇宙空間に散逸する。ある程度の水があり得る地点は、極域の永久影になったクレーターであり⁴⁾、もしくは表面温度の日変動を受けない深さにある地下⁵⁾ということになる。

月の水は、月が形成された直後から後、地球と同じように、水を含んだ彗星や小惑星、隕石の衝突により持ち込まれたか、太陽風の中のプロトンが月面の酸化物鉱物と反応して形成されたものと考えられている。月の水の出自を知るには、同位体組成の情報が重要である。ただし、サンプルリターンは水の豊富な地球での汚染を考えると得策ではなく、よって月面で測定するためには着陸機に搭載可能な装置が必要である。

我々の想定する装置は、水の吸収強度の強い2.7において狭帯域の中赤外レーザー(DFB、もしくはEr:ZBLANファイバーレーザー)を用いたレーザー同位体分光器であり、月面地下から加熱回収した水蒸気を一旦、凝結回収し、再度水蒸気化して、H, D, および ¹⁶O, ¹⁷O, ¹⁸O同位体の吸収線に同調したレーザーによる計測を行うものである。もし同位体存在比が、地球と同様のD/H, ¹⁸O/¹⁶O2.0 とすると、通常のLambert-Beer則)においてLをkm程度にする必要がある。NASAのMars Science Laboratory: Curiosityに搭載されたレーザー同位体測定機は高反射鏡を用いたヘリオットセルで対応しており、市販の水・炭素・窒素同位体測定装置でも高反射鏡を組み合わせて用いて長い光路長を形成してcavity enhanced spectroscopyを実現している。

日本のPayloadの要請から、電源込みで数kgとなるような軽量かつアラインメントフリーであるような装置が望ましい。半導体(LD)レーザーもしくはLD励起ファイバーレーザー(レーザー媒質は数g)による軽量化はある程度目算がつき、今後は高反射鏡を用いないファイバーcavityセルや電子的CRDS(cavity ring-down)の開発を進めている。

1) Feldman et al., *Science* 281. pp.1496 (1998)

2) Saal, et al., *Nature* 454. pp.192 (2008)

3) Saal et al., *Science* 340. pp.1317 (2013)

4) Binder, *Science*, 281. pp.1475 (1998)

5) Hashizume, private comm.

キーワード：月の水、同位体、レーザー同位体計測

Keywords: lunar water, isotope, Laser isotope measurement

Approachミッションでの科学観測による成果

Expected results on the lunar science from scientific observations in Approach mission

*山田 竜平¹、石原 吉明²、小林 直樹²、村上 英記³、田中 智²、竹内 希⁴、白石 浩章²、早川 雅彦²、後藤 健²、菊池 冬彦¹、西田 圭介⁴

*Ryuhei Yamada¹, Yoshiaki Ishihara², Naoki Kobayashi², Hideki Murakami³, Satoshi Tanaka², Nozomu Takeuchi⁴, Hiroaki Shiraishi², Masahiko Hayakawa², Ken Goto², Fuyuhiko Kikuchi¹, Keisuke Nishida⁴

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 宇宙科学研究所、3.高知大学、4.東京大学
1.National Astronomical Observatory of Japan, RISE project, 2.Japan Aerospace Exploration Agency, Institute of Space and Astronautical Science, 3.Kochi University, 4.University of Tokyo

ペネトレータは日本の月探査計画「LUNAR-A」ミッションを通して開発され、内部に搭載した観測機器を人工衛星からの自由落下により、天体表面に貫入設置させるハードランディングプローブである。ペネトレータ内部に搭載する地震計は、月面貫入時以上の衝撃を受けても、月震観測に必要な性能を維持できる事を確認しており(Yamada et al., 2009)、またペネトレータ-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)。ペネトレータは、天体表面でネットワーク観測を実現するのに優れたツールであり、将来の月惑星の地球物理観測への適用が期待されている。

このペネトレータの月面での技術実証、及び科学観測を行うために、現在、イプシロンロケットに搭載する小型科学衛星へ小型ペネトレータ2本を搭載する事を提案している(Approachミッション)。小型ペネトレータではLUNAR-Aで確立した耐衝撃性技術、観測装置を継承しつつ、2/3サイズにペネトレータを縮小する事を目指しており、2本搭載によって観測成立の冗長性の確保と科学成果の拡充が期待できる。

Approachミッションでは、2本のペネトレータで、地震、熱流量観測を行う事を計画している。このミッションでは、地震観測点数が少ないため、隕石の衝突発光を地上で観測することで、隕石衝突イベントの位置決定を行い、その走時データから地殻厚さを決定する事を目的としている。これにより、地殻厚さを従来よりも高精度に決定することで、月重力データと組み合わせて地殻の体積とAlの総量を推定することを行う。また、2点観測から、深部を通ってきた地震波を識別し、月深部構造を調べる事も期待できる。熱流量観測においては、月表層に放射性元素が濃集している地域(Procellarum KREEP Terrane)と、濃集量が少ない高地地殻での観測を行う事で、バルクとしての放射性元素量を決定することを目指している。本発表では、これらの科学観測から得られる成果を定量的に評価した結果を示すとともに、その結果から月の起源や進化についてどうアプローチしていけるかを議論したい。

キーワード：ペネトレータ、月内部構造探査、月震観測、熱流量観測、小型探査衛星

Keywords: Penetrator, Lunar interior exploration, Moonquake observation, Heat flow observation, Small-sized exploration satellite

宇宙科学研究所／月惑星探査データ解析グループの取り組みについて
Direction of "Lunar and Planetary Data Analysis Group" of ISAS

*大嶽 久志¹、大竹 真紀子¹、田中 智¹、増田 宏一¹、山本 幸生¹、三浦 昭¹、石原 吉明¹

*Hisashi Otake¹, Makiko Ohtake¹, Satoshi Tanaka¹, Koichi Masuda¹, Yukio Yamamoto¹, Akira Miura¹, Yoshiaki Ishihara¹

1. 宇宙航空研究開発機構

1. Japan Aerospace Exploration Agency

月周回衛星「かぐや」は月惑星科学の進展に貢献し、1990年代以降の世界の月探査機で第2位の論文数を創出している。今後、月惑星の起源・進化解明をめざして更に高次の研究で世界を牽引し、「かぐや」等の月惑星探査の成果を最大化するためには、大量の探査データ（海外探査機も含む）を高次処理・解析可能な体制と環境が必要である。これは日本が月惑星探査の戦略／計画を立案し、技術研究を行う観点でも重要である。

米国ではNASAやUSGS（地質調査所）等が高次プロダクト作成のための体制・環境を構築し、研究・探査に活かされている。日本においてはユーザ個人のデータ処理能力・努力に依存する状況であるため、このままでは世界トップクラスのサイエンス成果の発信や、自立的な探査戦略／計画の立案が今後難しくなることが予想される。

このような現状の課題に対し、2016年度よりISASに新設した「月惑星探査データ解析グループ」が今後どう取り組むべきかについて述べたい。

キーワード：探査、大量データ、解析

Keywords: exploration, large amount of data, analysis

黒色月試料の炭素含有研究： 月面物質の急冷固化形成

Carbon Contribution of the dark moon samples: Quenched solids of the lunar materials

*三浦 保範¹*Yasunori Miura¹

1.客員（山口市、国内外大学）

1.Visiting (Yamaguchi, In & Out Universities)

大気をもたない天体は、月天体を含め全体が黒色になって見える。これまで、月面表面の白黒は、地形の光反射によるアルベドの差と、有色鉱物の違いにより説明されている。これは、天体を構成する物質やでき方を一般的に理解できるが、それ以外の発展的な解明が進まない要因である。最近、筆者らの対比的な研究により、地球の岩石中の炭素量と人工的な物質実験により、月面上の試料（米国アポロ報告値）と月隕石試料（本実験）には、有意な炭素量とその炭素含有組織が確認でき、黒色化した月面には炭素物質の寄与が大きいことが分かっている。

月面の岩石物質は、月面の海の玄武岩（火山岩）と高地のガブロ・斜長岩（深成岩）中の黒色鉱物（輝石、橄欖石と金属鉱物）の違いによって説明されている。しかし、地球のように多量の白色鉱物の石英や長石が多く広く生成していないため、月面鉱物は限定された組成範囲内で特異的に黒灰色化している。

本件の研究において、アポロ月面と月隕石(NWA4483とY-86032)等で得られる月面鉱物は、地球鉱物に比べて、結晶度が低く、流体が少ないため岩石種・鉱物種と含水鉱物が極端に少なく、シリカ・長石組成変動がないため、結果的に月面での内部活動が非常に少ないことを示している。月面の炭素含有量の差が、海と高地の岩石鉱物の違いよりも、表土ソイルや破碎岩に非常に多いことが、これまでの報告文献値から解明できます。対比研究として、地球の岩石では、バルク分析・電顕分析による炭素含有量が、有色鉱物が多くなるほど、そして深成岩より火山岩に多いことが分かりました。これは成因的に冷却過程で炭素量が異なることを直接的に示し、一般に考えられている未知の地球の内部の深さによる説明とは異なることを示します。本件の人工照射実験においても、急冷照射ほど炭素含有組織が広く形成されていることが確認されています。

本研究成果は、次のようにまとめられます。

- 1) 地球の岩石の色はシリカ（長石）量で分類されているが、月面岩石は鉱物種より（衝撃時の）冷却の違いによる炭素量で分類できる。
- 2) 月面の炭素量は急冷岩石（表土・破碎岩）に多いことが分かった。対比的に、地球の岩石では急冷した火山岩ほど多い。
- 3) レーザー照射実験で炭素含有組織が急冷固化する事が確認し再現でき、これは月面の炭素含有物質の生成が衝撃波反応でできていることが確認できる。
- 4) 月と地球の対比的な研究から、月表面に急冷角礫化に多い炭素含有固化物が含まれるため、その結果として、黒灰色化した月天体表面に炭素が寄与していることが分かった。まとめとして、大気をもたない天体は、月天体を含め全体が暗黒色になって見える。これまで、月面表面の白黒は、地形の光反射によるアルベドの差と有色鉱物の違いにより説明されている。これは、天体を構成する物質やでき方を一般的に理解できるが、それ以外の発展的な解明が進まない原因である。最近、筆者らの対比的な研究において、地球の岩石中の炭素量と人工的な物質実験により、月面上の試料（米国アポロ報告値）と月隕石試料（本実験）には、有意な炭素量とその炭素含有組織が確認でき、黒色化した月面には炭素物質の寄与が大きいことを示している。

キーワード： 黒色月試料、炭素含有影響、急冷固化形成

Keywords: Blackish dark color of lunar samples, Carbon content effect, Quenched solids formation

月のPKT中心領域における火成活動と表面地形の層序学的関係

Stratigraphy of mare basalts and topographic features in the central region of the Procellarum KREEP Terrane of the Moon

*加藤 伸祐¹、諸田 智克¹、山口 靖¹、渡邊 誠一郎¹、大嶽 久志²、大竹 真紀子²

*Shinsuke Kato¹, Tomokatsu Morota¹, Yasushi Yamaguchi¹, Sei-ichiro Watanabe¹, Hisashi Otake², Makiko Ohtake²

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

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

月のマグマオーシャンからの固化過程やその後の内部の大規模な構造変化の有無を理解する上で、月の火成活動史を復元することは有効である。月の海の玄武岩の組成と年代との関係からマンツルの水平・鉛直方向の組成に関する情報が得られる可能性があり、それによって月マンツルの進化モデルを制約できると期待される。クレーターカウンティングによって決定された月の海の玄武岩の年代は海の火成活動にセカンドピークが存在することを示している。セカンドピークをつくるような活動は主に月の表側の熱源元素が多く濃集しているProcellarum KREEP Terrane (PKT)に集中している。このセカンドピークを引き起こした原因とそのマグマソースを解明することは、月の熱進化史に重要な制約を与えられると考えられる。

月の海を構成する溶岩流の噴出年代とチタン含有量の関係を調査したこれまでの我々の研究から、約23億年前を境にしてチタン含有量が有意に上昇していることが分かっている。このチタン含有量の違いはマグマソースの違いであると考えられるため、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」と呼ぶこととする。そして、Phase-2火成活動はPKTの一部の領域で短期間に集中して起きていること、選択的に高いチタン含有量であること、セカンドピークの年代とよく一致することから、月深部に起源を持つホットブルームによるものであるという仮説を提唱している。

もしホットブルームが起こったとすると、それに伴う何らかの地形的な痕跡が残されている可能性がある。そこで地形とセレノイドとの差をとってみると、PKTの中心で直径約1000km、高さ500mの円形の台地状の地形が観測された。またこの台地はPhase-2の火成活動の中心地とよく一致している。また、この領域のリッジの走向と台地状地形の位置と照らしあわせてみると、台地状地形の上部にあたる領域では台地状地形に関係して分布していると解釈できる。このことから台地状地形の成因はPhase-2活動と強く関係していることが示唆される。

我々はかぐやマルチバンドイメージャ(MI)と地形カメラ(TC)の画像データ、標高データ(DTM)を用いて、PKTにおけるPhase-1、Phase-2の火成活動による溶岩流とリッジの層序学的な関係を調査した。その結果、台地状地形に沿ったリッジはPhase-2火成活動の前後で形成されていることが分かった。また、金星のコロナの形成において同心円状のリッジの形成はコロナ地形の緩和の段階で形成することが示唆されているが、本研究で提唱しているホットブルーム発生から緩和の時期と月のリッジの形成時期は近いこと、ホットブルーム仮説とリッジの形成の関係に矛盾はない。また、溶岩流ユニットの形状からマグマの流れの方向を推定したところ、Phase-2ユニットは台地状地形から噴出し、周囲に広がっているように見える。これは、Phase-2マグマ活動は嵐の大洋・雨の海の中心領域において集中的に噴出したことを示唆しており、これもホットブルーム仮説と矛盾しない結果である。

キーワード：月、火成活動、月の海、地形、海のリッジ、層序学

Keywords: Moon, Volcanism, Lunar mare, Topography, Mare ridge, Stratigraphy

太陽風中の月周辺でかぐや衛星によって観測された広帯域ノイズと電子加熱について

Broadband noise and associated electron heating observed by Kaguya around the Moon in the solar wind

*津川 靖基¹、加藤 雄人²、寺田 直樹²、町田 忍¹、綱川 秀夫³、高橋 太⁴、渋谷 秀敏⁵、清水 久芳⁶、松島 政貴³、斎藤 義文⁷、横田 勝一郎⁷、西野 真木¹

*Yasunori Tsugawa¹, Yuto Katoh², Naoki Terada², Shinobu Machida¹, Hideo Tsunakawa³, Futoshi Takahashi⁴, Hidetoshi Shibuya⁵, Hisayoshi Shimizu⁶, Masaki Matsushima³, Yoshifumi Saito⁷, Shoichiro Yokota⁷, Masaki N Nishino¹

1.名古屋大学宇宙地球環境研究所、2.東北大学大学院理学研究科、3.東京工業大学大学院理工学研究科地球惑星科学専攻、4.九州大学大学院理学研究院、5.熊本大学大学院自然科学研究科、6.東京大学地震研究所、7.宇宙航空研究開発機構・宇宙科学研究所

1.Institute for Space-Earth Environmental Research, Nagoya University, 2.Graduate School of Science, Tohoku University, 3.Department of Earth and Planetary Sciences, Tokyo Institute of Technology, 4.Faculty of Sciences, Kyushu University, 5.Department of Earth and Environmental Sciences, Graduate School of Science and Technology, Kumamoto University, 6.Earthquake Research Institute, University of Tokyo, 7.Institute of Space and Astronautical Science, Japan Aerospace Exploration Agency

Broadband electromagnetic noise in the frequency range up to ~ 10 Hz has been detected around the Moon at ~ 100 km altitude [Halekas et al., 2008; Nakagawa et al., 2011; Tsugawa et al., 2012]. Halekas et al. [2008] suggested that the waves are associated with electron energizations and are basically generated through the interaction between the solar wind plasma and crustal magnetic field. Nakagawa et al. [2011] studied the characteristics of the broadband waves by considering properties of whistler-mode waves propagating in the solar wind frame of reference. Tsugawa et al. [2012] showed that the statistical distributions of the intense noise are clearly located at the magnetic anomalies. While they discussed the possible generation process of the waves through resonant or non-resonant instability by ions reflected from the lunar surface, details of the generation process of the waves have not been clarified yet.

We analyzed the broadband noise observed by Kaguya statistically, and suggest that the absolute condition to observe the noise at altitudes ~ 100 km are 1) the spacecraft is connected to the Moon through the magnetic field, and 2) the solar wind ions are reflected considerably in the connected region on the Moon. The fluxes of reflected ions depend on the solar wind parameters and the magnetisms of the lunar crusts. In a usual solar wind condition (roughly the dynamic pressure < 2 nPa), the second condition is mostly satisfied above the magnetic anomalies. In the solar wind with larger density and faster speed than usual (roughly the dynamic pressure > 2 nPa), the second condition can be satisfied above not only magnetic anomalies but also unmagnetized surface. Electrons are often energized perpendicular to the ambient magnetic field or isotropically in association with the noise and reflected ions. The electron heating above the lunar magnetic anomalies are also associated with the broadband electrostatic noise in the frequency range up to ~ 10 kHz [Kasahara et al., 2011]. Their correlation is suggested in analogous to the transverse ion acceleration due to broadband extremely low frequency noise in the Earth's auroral region [e.g., Andre et al., 1998].

月の線状重力異常の形成仮説

Formation process of linear gravity anomalies of the Moon

澤田 なつ季¹、*諸田 智克¹、加藤 伸祐¹、石原 吉明²、平松 良浩³Natsuki Sawada¹, *Tomokatsu Morota¹, Shinsuke Kato¹, Yoshiaki Ishihara², Yoshihiro Hiramatsu³

1.名古屋大学大学院環境学研究科、2.宇宙航空研究開発機構、3.金沢大学理工研究域

1.Graduate School of Environmental Studies, Nagoya University, 2.Japan Aerospace Exploration Agency, 3.Institute of Science and Engineering, Kanazawa University

月はマグマオーシャンの状態から始まり、その後のマントル再溶融による火山活動があったと考えられている。しかしマグマオーシャンからマントル再溶融までの熱進化の経緯について明らかになっていない。その一つの原因は、初期に起こったであろうマグマ活動やテクトニクスの情報がその後の天体衝突によって破壊され、不明瞭になっているからである。一方、Andrews-Hanna et al. [Science, 339, 675-678, 2013] は月の重力分布図から線状重力異常 (Linear Gravity Anomaly: LGA) を発見し、その成因が初期の全球膨張によるマグマの貫入であると提案した。もしLGAの源が貫入岩であるとすると、その一部は表面に噴出した可能性、又は、貫入岩の一部がその後の天体衝突により掘削され、表面に露出した可能性がある。そこで本研究ではLGAの形成仮説を検証するため、反射スペクトルデータを用いた貫入岩露出の有無の調査を行った。

かぐやのマルチバンドイメージャー (MI) データから算出したFe含有量を用いて、LGA2の周辺地域においてFe量の高い点を抽出した。さらにMIデータから表面のスペクトルの吸収深さの特徴を用いて、これら高Fe物質の起源がマントル再溶融由来か、下部地殻由来かを区別することで、貫入岩の探索を行った。その結果、LGA2上の直径150 kmのRocheクレータと直径100 kmのEotvosクレータの間の領域で高Fe物質が多く分布しており、それらがマントル再溶融起源に近い組成であることが分かった。それらとRocheクレータの放出物の分布との空間的な対応関係は整合しないため、当初、想定したLGAソース物質がRoche形成によって掘り起こされたものであるという説明は成立しない。そのため、この物質がLGAソースであるとは結論づけることができなかった。一方、それらのマントル再溶融起源物質はRocheクレータやEotvosクレータの放出物に含まれていることから、RocheクレータとEotvosクレータによって掘り返されたものであり、それらのクレータ形成以前のマグマ活動でつくられたものであると言える。Rocheクレータの形成年代はクレータ年代学により39億年前と求められていることから [Hiesinger et al., 44th LPSC, 2827, 2013]、今回発見された物質は39億年前以前のマグマ活動の痕跡と考えられる。

キーワード：月、火山活動、線状重力異常、貫入岩

Keywords: Moon, volcanism, linear gravity anomaly, intrusion

月クレーター崩壊度地質ユニット年代測定法の適用評価

Evaluation of chronological measurement method of geological units by collapsed crater on the Moon

*坪内 彩音¹、春山 純一²、三宅 互¹

*Ayane Tsubouchi¹, Junichi Haruyama², Wataru Miyake¹

1.東海大学 工学研究科、2.宇宙航空研究開発機構 宇宙科学研究所

1.Graduate school of engineering, Tokai University, 2.Institute of Space and Astronautical Science, Japan Aerospace Exploration Agency

The age of the moon is an important clue in understanding the former state of igneous activity of the moon. To explore the time course of the scale and the eruption of the magma leads to pursue the internal evolution of the moon. Generally, exploring crater size frequency distribution is used to determine the model ages of lunar geological units. However, this age determination is susceptible to the influence of secondary craters, and an error is likely to occur in the measured age. Therefore, by using another age determination, it is necessary to confirm whether the measurement age by the age determination that is free from influence of the secondary crater should be investigated. The way based on the status of crater collapse is another expected method for age determination of lunar geological units. In order to establish this method, it is needed to investigate the correlation between the age of the geological units and a parameter value expressed by F which is corresponding to the total amount of impacted objects disrupting the craters. Since the F value is a numerical value determined by the most collapsed crater in a geological unit, it does not include the effects of secondary craters probably occurring after the formation of the oldest most collapsed craters. Here, we explore the correlation relationship between the F values and the model ages based on crater size frequency distribution for several lunar geological units, and discuss the possibility of the way based on crater collapse as an age determination of lunar geological units.

キーワード：年代学、月面クレーター、クレーター崩壊度

Keywords: chronology, lunar craters, status of crater collapse

月隕石に記録された水に富む月の上部マントル

Water-rich lunar upper mantle as recorded in lunar meteorites

*鹿山 雅裕¹、中嶋 悟²、富岡 尚敬³、瀬戸 雄介¹、大谷 栄治⁴、Fagan Timothy⁵、長岡 央⁶、小澤 信⁴、関根 利守⁷、宮原 正明⁷、三宅 亮⁸、福田 惇一⁹、留岡 和重¹、市村 隼¹、松本 恵¹、鈴木 康太¹、Götze Jens¹⁰
 *Masahiro KAYAMA¹, Satoru Nakashima², Naotaka Tomioka³, Yusuke Seto¹, Eiji Ohtani⁴, Timothy Fagan⁵, Hiroshi Nagaoka⁶, Shin Ozawa⁴, Toshimori Sekine⁷, Masaaki Miyahara⁷, Akira Miyake⁸, Jun-ichi Fukuda⁹, Kazushige Tomeoka¹, Shun Ichimura¹, Megumi Matsumoto¹, Kouta Suzuki¹, Jens Götze¹⁰

1.神戸大学大学院理学研究科地球惑星科学専攻、2.大阪大学理学研究科宇宙地球科学専攻、3.海洋研究開発機構高知コア研究所、4.東北大学大学院理学研究科地球科学専攻、5.早稲田大学教育学部地球科学専修、6.早稲田大学先進理工学部、7.広島大学大学院理学研究科地球惑星システム学専攻、8.京都大学大学院理学研究科地球惑星学専攻地質学鉱物学教室、9.Department of Geology and Geophysics, Texas A&M University、10.TU Bergakademie Freiberg, Institute of Mineralogy

1.Department of Earth and Planetary Sciences, Faculty of Science, Kobe University, 2.Department of Earth and Space Science, Osaka University, 3.Kochi Institute for Core Sample Research, Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology, 4.Department of Earth and Planetary Materials Science, Graduate School of Science, Tohoku University, 5.Department of Earth Sciences, Waseda University, 6.School of Advanced Science and Engineering, Waseda University, 7.Department of Earth and Planetary Systems Science, Graduate School of Science, Hiroshima University, 8.Department of Geology and Mineralogy, Graduate School of Science, Kyoto University, 9.Department of Geology and Geophysics, Texas A&M University, 10.TU Bergakademie Freiberg, Institute of Mineralogy

アポロ計画以来、月回収試料を対象とした全岩分析から月は表面から内部に至るまで水に枯渇 (<1 ppb) した天体と考えられてきた。しかし近年、月回収試料および月隕石に含まれる二次鉱物の質量分析から大量の水酸基が検出され、水に富む月のマントルモデルが提唱されている。マントルの熔融からマグマの噴出に至るまでのいくつかの仮定（鉱物とメルト間における水の分配係数、マントルの部分熔融の割合、二次鉱物の晶出時における主要構成鉱物の比率、脱ガス作用による水の損失率など）を踏まえた上で、アパタイトやメルト包有物の含水量からマントルには9-585 ppmにも及ぶ水の存在が示唆された。しかし、この水に富むマントルモデルについては未だ懐疑的な見方も多く、二次鉱物から得られた値はあくまでも不確かな仮定（地球の鉱物や火星のメルトの値を参照、月を模擬していない）をもとにした予想値に過ぎない。最近では、二次鉱物を対象とした塩素や酸素同位体分析から水に枯渇した (< 10 ppb) マントルモデルも提唱されているものの、水素を対象とした分析ではないことからあくまで間接的証拠に過ぎない。本研究では、マントル由来の水を含む角礫岩質月隕石に対して赤外吸収分光その場加熱実験を行い、主要構成鉱物であるカンラン石および単斜輝石の含水量を定量的に推定することで、プロセラルム盆地直下に位置する上部マントルの含水量を従来必要とされていた仮定を使わずに決定する。

角礫岩質月隕石はカンラン石や単斜輝石を主要構成鉱物とするはんれい岩質クラストと単斜輝石斑晶を含む玄武岩質クラスト、さらにそれらの礫質部から成る。本研究で用いた隕石試料には外縁部においてフュージョンクラストが存在し、さらに各クラストと礫質部を横断する衝突熔融脈が観察される。

角礫岩質月隕石に対する赤外吸収分光その場加熱実験 (120 °C) の結果、はんれい岩質クラストの単斜輝石は 3750、3600および3500 cm⁻¹付近に、カンラン石は3550、3500および3250 cm⁻¹付近に顕著な水の吸収帯を示す。フュージョンクラストおよび衝撃熔融脈内に分布する単斜輝石やカンラン石においても同様の水の吸収帯は認められるものの、はんれい岩質クラストと比べてそれらの吸光度は著しく低い。これは天体衝突時に発生した高温効果および大気圏突入時の摩擦熱による脱水現象が原因と考えられる。よって、はんれい岩質クラストに内在する水は月に由来するものであり、地球風化作用による副産物ではない。さらに、はんれい岩質クラストのカンラン石および単斜輝石に対しては、120から550 °Cの範囲における段階過熱実験を行った。300 °Cまでの段階過熱では各鉱物ともに吸光度に変化は見られないものの、300から500 °Cの範囲において温度増加に伴い吸光度の著しい減少を示す。これは300 °C以上で脱水するTightly bound molecular waterの特性である。一

部の吸収帯は550 °C以上の段階過熱実験後も残存し、さらに異方性を有することからも鉱物に配列を持って結合した構造水に帰属される。

Beer-Lambert法をもとに、積分吸光度、試料の厚さおよび吸収係数から各鉱物における含水量を定量的に評価した。その結果、はんれい岩質クラストの単斜輝石は>339-1363 ppm（うち構造水は>157-1051 ppm）、カンラン石は>199-1152 ppm（構造水は>199-906 ppm）もの含水量に達することが判明した。得られた値と主要構成鉱物のモード組成から月のマントルにおける含水量を仮定なしで直接的に推定することが可能であり、プロセラルム盆地直下の深さ>30から>400 kmにも及ぶ上部マントルにおいて、>631 ±498 ppmもの水が存在することが明らかとなった。驚くべきことに、この値は地球のマントルに匹敵する含水量である。推定された含水量は水に富むマントルモデルと非常に調和的である一方、水に乏しいとする先行研究とは一致しない。この原因として、月のマントルにおける水分分布は非常に不均一かつ部分的にしか水が存在しない可能性が示唆される。少なくともプロセラルム盆地直下の上部マントルの一部に大量の水を含む領域が存在することから、ジャイアントインパクト後の初期物質の集積や冷却過程、月におけるマグマオーシャンの分化作用、深部月震の原因さらには太陽系初期の地球と月における水の起源を紐解く上でこの月内部の水が重要な鍵となり得る。月内部における水は有人探査における水の利用や基地建設、さらには月の進化史を明らかにする重要なテーマであり、月探査の将来構想、特に着陸計画とサンプルリターンを実施する上で、月周回衛星かぐやから発見されたプロセラルム盆地やエイトケン盆地に分布する深部露出岩体は重要な探査地域と言える。

キーワード：月、月のマントル、月隕石、マントルの含水量、赤外吸収分光、プロセラルム盆地

Keywords: Moon, Lunar mantle, Lunar meteorite, Mantle water content, Infrared absorption spectroscopy, Procellarum basin

月の衝突盆地地下密度構造の時空間変化

A spatio-temporal change of the density structure beneath impact basins of the Moon

*内田 眞子¹、石原 吉明²、鎌田 俊一³、平松 良浩¹*Mako Uchida¹, Yoshiaki Ishihara², Shunichi Kamata³, Yoshihiro Hiramatsu¹

1.金沢大学、2.宇宙航空研究開発機構、3.北海道大学

1.Kanazawa Univ., 2.JAXA, 3.Hokkaido Univ.

月の大規模地形である衝突盆地は過去の巨大衝突の痕跡であり、そのような巨大衝突は月の表層や内部構造の進化に大きな影響を及ぼしている。すなわち衝突盆地の理解は、月の進化過程を理解するうえで必須である。現在、月探査機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次まで展開されたモデルが公開されており [Lemoine et al., 2014 ; Konopliv et al., 2014]、月内部の情報を、従来よりも詳細に取得可能になった。本研究では、GRAILの高解像度重力モデルを用いて月の衝突盆地下のモホ面構造の起伏形状を算出し、議論する。地形データは球面調和関数1080次に展開されたモデル(モデル名:LRO_LTM01_PA_1080) [Neumann, 2013] を用いる。ブーゲー異常は球面調和関数900次に展開された重力ポテンシャル係数データ(モデル名:GRGM900C) [Lemoine et al., 2014] と地形データから計算する(補正密度2560 kg/m³、計算最大次数600次)。本研究ではマントル密度は3360kg/m³ [Ishihara et al., 2009]、地殻密度はHan et al. (2014)で求められた地殻密度の範囲で、Wieczorek and Phillips (1998)の重カインバージョンより全球的なモホ面の厚さ分布を求め、アポロ12・14号地点の地殻厚が同地点の月震の解析から算出された地殻厚 [Khan and Mosegaard, 2002; Lognonne et al., 2003] に最も調和的になる2750 kg/m³を採用した。下方接続フィルタが1/2になる次数は100次、計算最大次数は600次とした。この手法で算出した密度構造は、以降Global modelと称する。角柱モデリングを用いた重カインバージョン [Rama Rao et al., 1999] により、フィルタリングの制約条件を受けない局所的な密度構造を決定した。地殻・マントル密度はGlobal modelと同様で、角柱は水平方向に10kmx10kmの大きさを持つ四角柱とした。初期境界深さは各解析領域内における、Global modelによるモホ面深さの最深点とし、角柱が到達する最浅点は地形面における最深点とした。なお、密度境界面が地形面を突き破らないよう制約条件を課している。この手法で算出した密度構造を、以降Prism modelと称する。Prism modelの断面構造を定量的に評価するため、以下の手法をとった。まず各衝突盆地毎にPrism modelの10間隔、360平均の断面構造プロファイルを作成し、高ブーゲー異常域 [Neumann et al., 2015] の1.5倍の領域に切り取る。得られた断面構造プロファイルのうち、中心から高ブーゲー異常域の半径 [Neumann et al., 2015] までを「内側領域」とし、高ブーゲー異常域半径より外側の範囲を「外側領域」とする。中心から断面構造プロファイルの深度幅のうち上位15%に含まれる点までの距離をD_{upper}、中心から外側領域のデータ点より得られた1次近似直線と断面構造プロファイルの交点までの距離をD_{lower}とする。最後にD_{upper}/D_{lower}の比(=D_{upper}/D_{lower})を算出し、各衝突盆地で得られたPrism modelの形状の定量的な評価とする。D_{upper}/D_{lower}の値を全球的に比較すると、その値は盆地の空間スケールに正の相関を持ち、表側に値の大きい盆地、裏側に値の小さい盆地が偏在するといった分布の地域性を持つように見える。なお、後者は月面の元素分布による区分 [Jolliff et al., 2000] や長期粘弾性変形計算による地温勾配上限値 [Kamata et al., 2013] より推察される月の内部温度構造の地域性と調和的であることから、衝突盆地形成後の内部温度構造の違いを反映していると考えられる。講演では、本研究で得られた衝突盆地地下密度構造の形状の違いを支配する要因が、「盆地の空間スケール」と「内部温度構造」のどちらであるのか、長期粘弾性変形計算から得た結果を交え考察する。

キーワード：衝突盆地、インバージョン、粘弾性変形

Keywords: impact basin, inversion, viscoelastic deformation

微小磁気異常の解析に基づく古月磁極の推定

Paleomagnetic poles of the early Moon estimated from small isolated magnetic anomalies

*池内 悠哉¹、綱川 秀夫¹、高橋 太²*Yuma Ikeuchi¹, Hideo Tsunakawa¹, Futoshi Takahashi²

1.東京工業大学大学院理工学研究科地球惑星科学専攻、2.九州大学大学院理学府地球惑星科学専攻

1.Department of Earth and Planetary Sciences, Tokyo Institute of Technology, 2.Department of Earth and Planetary Sciences, Kyushu University

現在の月に、地磁気のような全球的磁場はないが、月地殻起源の磁気異常が観測されている。磁気異常ソースは残留磁化を持っており、熱残留磁化や衝撃残留磁化と考えられる。月岩石の岩石磁気学的研究によれば熱残留磁化を持つとされ、その場合は長期間安定するダイナモ磁場が周囲の磁場として妥当な候補である。磁気異常は形成時の月磁場を記録しているため、磁気異常の磁化方位を解析することで、過去の月ダイナモの磁極を推定することができ、さらに過去の月磁極、月自転軸の移動の可能性について重要な情報を得ることができよう。

KaguyaとLunar Prospectorが観測した月上空(高度20~40km)の観測磁場データを使用し、孤立した磁気異常に磁気双極子ソースモデルを仮定することで磁化方位を求め、仮想的な古月磁極を推定する先行研究が行われている[Takahashi et al., 2014]。しかし、月上空の観測磁場データは月地殻の磁場を比較的広範囲に平均化したものであり、微小構造を十分に表していない可能性もあることから磁気双極子ソースモデルの仮定が適切性が問題となりうる。そこで本研究では、月表面の磁場データであるSVMデータ[Tsunakawa et al., 2015]を使用して解析を行う。SVMデータは月上空の観測磁場データよりも空間分解能が高く、磁気異常の構造を詳細に表しており、磁気双極子ソースモデルの仮定が適切な磁気異常の選出に有効である。

SVMデータより磁気双極子ソースモデルの仮定が適切であると判断した磁気異常を抽出して仮想的な古月磁極の推定を行った。比較的精度良く求められた数十個の磁極を解析した結果、現在の月北極付近と東半球低緯度地域に古月磁極のまとまりが見られた。この結果より、過去の月磁極が現在の北極付近と東半球低緯度地域を移動した可能性が考えられる。

キーワード：月、磁気異常、磁極

Keywords: Moon, magnetic anomaly, paleomagnetic pole

地球起源酸素イオンの月面への降り込み：かぐやの観測

Kaguya observation of oxygen ion precipitation from the Earth to the Moon

*横田 勝一郎¹、斎藤 義文¹、北村 成寿¹、西野 真木²、綱川 秀夫³*Shoichiro Yokota¹, Yoshifumi Saito¹, Naritoshi Kitamura¹, Masaki N Nishino², Hideo Tsunakawa³

1.宇宙航空開発研究機構・宇宙科学研究所、2.名古屋大学、3.東工大

1.Japan Aerospace Exploration Agency Institute of Space and Astronautical Science, 2.Nagoya University, 3.Tokyo Institute of Technology

月はかつて、ティアと名付けられた巨大隕石が地球へ衝突したのを機に形成されたと広く考えられている。この隕石衝突による月形成モデルは数値計算等で理論的に研究されていて、また月から得た試料の同位体分析による実証の試みがなされている。数値計算モデルによる研究では月の物質の大部分はティアから供給されたということが提唱されている。しかしながら、同位体分析では月と地球の試料で非常に近似した結果が得られていて、これは地球が月に対して大きく物質供給したことを示唆することになる。数値計算と同位体計測は矛盾した結果を示していたが、最近の精度の良い同位体分析により、アポロによる月試料が170/160において地球の試料とは異なる結果も出るようになってきている。

同位体分析が月と地球の試料で近似した結果が出た理由として、地球での試料の汚染などがまず考えられている。一方で、GEOTAIL衛星を始めとした地球磁気圏観測衛星により、特に酸素イオンが地球起源粒子として地球から散逸し、地球磁気圏尾部へと流されていくことが観測されている。最も遠い場合だと200地球半径離れた地球磁気圏で、地球起源の酸素イオンが観測されている。酸素イオンの流出は太陽風の状態に大きく依存した間欠的なイベントではあるが、地球電離圏から脱出したイオンは磁気圏を漂流し、ある割合では地球に再帰する。月は一か月に5日ほど60地球半径離れたところで地球磁気圏を通過するため、地球起源の酸素イオンは月表面に輸送される機会があると考えることが可能である。

月探査衛星「かぐや」は太陽風が静穏な時期ではあるが2008年を100km高度で周回した。イオン分析器が「かぐや」には搭載されていて、地球磁気圏においてイオンを観測している。地球磁気圏イオンに酸素イオンが含まれていることが観測データから示されていて、地球から月面へ酸素イオンが流入が「かぐや」によって観測されている。我々はこの酸素イオンの流量と観測時間から、地球から月へと輸送される酸素イオンの量を見積もった。本発表では酸素イオンの輸送量を示し、月試料の同位体分析に対する影響を考察する。

キーワード：月の同位体、かぐや衛星、質量分析

Keywords: Isotope of the Moon, Kaguya spacecraft, Mass analyses

将来の月着陸探査機搭載能動型蛍光X線分光計の概要とその開発状況

Instrumental performance and present status of development of Active X-ray Spectrometer for future lunar landing mission

*長岡 央¹、長谷部 信行¹、草野 広樹²、天野 嘉春²、柴村 英道²、太田 亨³、Fagan Timothy³、内藤 雅之¹
*Hiroshi Nagaoka¹, Nobuyuki Hasebe¹, Hiroki Kusano², Yoshiharu Amano², Eido Shibamura², Tohru Ohta³, Timothy Fagan³, Masayuki Naito¹

1.早稲田大学先進理工学部、2.早稲田大学理工学研究所、3.早稲田大学教育学部地球科学専修

1.School of Advanced Science and Engineering, Waseda University, 2.Research Institute for Science and Engineering, Waseda University, 3.Department of Earth Sciences, School of Education, Waseda University

Recent Chinese lunar landing mission (Chang'E 3) was successful in landing on the surface of the Moon after their twice successful remote observations. The landing mission investigated the elemental compositions of landing sites in more detail, and obtained new "ground truth" by using alpha particle X-ray spectrometer, which could have not been provided by any returned samples. The compositions of major elements as Mg, Al, Si, K, Ca, Ti, Fe of landing site help us to understand its petrogenesis and evolution. In Japan, the global investigation of Kaguya promoted our knowledge and understanding of the origin and evolution of the Moon. The landing and/or sample-returned missions in the future will be followed in order to investigate the geology in more details, in the next.

We have been developing the active X-ray spectrometer (AXS) as elemental analyzer on site, in order to prepare for future lunar landing mission. Present AXS consists of active X-ray generators with pyroelectric crystal (LiTaO₃), and a silicon drift detector (SDD). Here, the present status of development is reported, and the instrumental performance of AXS and the observation targets of AXS will be discussed.

キーワード：能動型蛍光X線分光計、着陸探査

Keywords: Active X-ray spectrometer, landing mission

月の断層活動終了年代の推定：一次元クレーター年代学の提案

One-dimensional crater chronology: A method of estimating the termination age of faulting

*嵩 由美子¹、山路 敦¹、佐藤 活志¹*Yuko Daket¹, Atsushi Yamaji¹, Katsushi Sato¹

1. 京都大学理学研究科

1. Graduate School of Science, Kyoto University

月のリッジやグラーベンを形成した断層の活動終了年代を制約するために、月面の断層上に分布するクレーターを使った推定方法「一次元クレーター年代学」を提案する。断層でずらされ変形したクレーターは断層活動終了よりも前に形成されたことを、断層上に分布するにも関わらず変形していないクレーターは断層活動が終了した後に形成されたことを意味する。一次元クレーター年代学とは、リッジを形成した断層上に分布するクレーターのうち、変形していないクレーターの線密度を観測することで断層活動終了年代を見積もる方法である。単位面積あたりのクレーター生成頻度とそのサイズ分布はよく研究されている（例えば Ivanov et al., 2001）。そこで、単位時間・単位断層長あたりに形成されるクレーターのサイズと頻度の関係式と、クレーター線密度と経過年数の関係式を数値実験により明らかにした。これらの関係式を用いることで、断層上の変形していないクレーターの線密度から、断層活動終了年代を推定することができる。

月のテクトニックな地質構造の代表であるリッジやグラーベンは、主に海の内部や周縁部に弧状あるいは放射状に分布しているため、海の玄武岩溶岩の荷重によって形成されたと考えられてきた（例えば Solomon and Head, 1979）。この変形は溶岩の堆積と同時に起こったと考えられるため、主要な火山活動の終了（30億年前）と共に構造形成も終了した（例えば Solomon and Head, 1980）というのが一般的な見解であった。しかし近年、溶岩堆積時の荷重による変形では説明できない若い構造が報告されている（例えば Ono et al., 2009; Watters et al., 2011）。これらの構造は、全球冷却に伴う収縮や、月-地球系軌道進化に伴う変形の結果できた可能性があり、これらの成因で形成される構造の形成年代や形成位置、歪量には偏りがあると推測されている（例えば Solomon and Chaiken, 1976; Melosh, 1980）。従って各地質構造の位置や形成年代、歪量を見積もることで、月科学において大きな課題である熱史や軌道進化史の解明に寄与できると考えられる。しかし、構造形成がいつまで続いていたのかの定量的な見積もりはこれまでされてこなかった。今回提案する方法を月に適用することで、いつまで構造形成が続いていたかを定量的に見積もることができるだろう。

キーワード：月、構造発達史、クレーター年代学、リッジ

Keywords: Moon, Tectonic history, Crater chronology, Mare ridge

統計的投票アルゴリズムを用いた月地形データの強調手法について

Enhancement of lunar topographic data with statistical voting algorithm

宇津宮 昂平¹、*本田 親寿¹Kohei Utsumiya¹, *Chikatoshi Honda¹

1.会津大学

1.The University of Aizu

In addition to terrestrial planets, grabens and ridges that are typical topographic features on the moon indicate stress activity of the lunar surface. The grabens, which show negative channel-like reliefs result from tensile stress in lunar subsurface. On the other hand, the ridges, which show positive reliefs, result from compressive stress in the lunar subsurface. Especially, grabens and ridges have been supposed to be indicators of thermal evolution of the moon, because these feature result from expansion and constriction of the moon.

In order to find grabens and ridges by visual inspection, images taken by exploration camera are usable. However, some of ridge have gentle slope and some of graben have shallow channel-like relief, so it is difficult to identify these degraded features by visual inspection. In addition to degraded features, visibility of these topographic features is affected by spatial resolution and sun-lighting condition. Therefore, we use the Digital Terrain Model (DTM) of the moon for production of enhanced topographic data. The DTM provides elevation data of the lunar surface and is not generally affected by sun-lighting condition. However, it is difficult to identify small grabens and ridges with DTM data. In previous research with a similar purpose, roughness parameter (Root Mean Square Slope, here after RMS) with DTM data was utilized to identify several topographic features such as craters, ridges, and lava flows. The RMS with DTM data depends on a parameter set of calculation window size and data sampling step size. Appropriate parameter combination of these two parameters was needed to adjust to every scale of topographic features. In this study, on the basis of topographic data, we developed new calculation algorithm based on statistics named as "statistical voting algorithm". In this algorithm, we calculated an average and standard deviation in calculation window and it vote to each pixel which has a significant difference comparing with the average value. Continuously, we do same procedure along with moving calculation window. We expect that this algorithm is good at identifying small degraded or small-scale topographic feature.

As a result, and an availability of the statistical voting algorithm with DTM data to enhance the contrast of DTM data at the topographic features was confirmed. The appropriate parameter of this algorithm is window size 640 pixels in both case of grabens and ridges. This algorithm is useful to identify not only normal topographic features but also small and indistinct ones. However, small target superposed on large topographic feature could not be identified by visual inspection with our statistical voting algorithm data.

キーワード：地形、数値地形モデル、統計的投票アルゴリズム

Keywords: Topographic feature, Digital Terrain Model, Statistical voting algorithm

小型月着陸実験機SLIMによる科学観測

Scientific observation plan for Smart Lander for Investigating Moon mission

*大竹 真紀子¹、大嶽 久志¹、坂井 真一郎¹、櫛機 賢一¹、澤井 秀次郎¹、福田 盛介¹

*Makiko Ohtake¹, Hisashi Otake¹, Shinichiro Sakai¹, Kenichi Kushiki¹, Shujiro Sawai¹, Seisuke Fukuda¹

1.宇宙航空研究開発機構 宇宙科学研究本部

1.Institute of Space and Astronautical Science, Japan Aerospace Exploration Agency

Main objective of Smart Lander for Investigating Moon (SLIM) mission is to develop and demonstrate technology of high-precision landing on the Moon, which enables us to explore not only the Moon but the other planetary body with gravity. This mission is planned to land on the lunar surface within a hundred meters from the pre-fixed destination, and it is extremely attractive for landing site dependent study themes. Therefore, although weight and other resource budgets are very limited for this mission because the mission aims to develop a challenging light weight and small lander, possibility of a payload have been discussed recently within that strict resource budgets for adding extra result to the mission. Around 20 instruments were proposed for the mission as the results of efforts of instrument team members and candidate instruments and candidate objectives were identified. In this presentation, the candidate instruments and their objectives will be discussed with the information of current status the mission.

キーワード：月、SLIM、高精度着陸

Keywords: Moon, SLIM, high-precision landing

嵐の大洋の3つの火山性地形群を貫く線形質量異常構造についての考察

Linear mass anomalies going through three volcano complex areas in the Oceanus Procellarum

*山本 圭香¹、春山 純一¹、大竹 真紀子¹、岩田 隆浩¹、石原 吉明¹

*Keiko Yamamoto¹, Junichi Haruyama¹, Makiko Ohtake¹, Takahiro Iwata¹, Yoshiaki Ishihara¹

1.宇宙航空研究開発機構 宇宙科学研究所

1.Institute of Space and Astronautical Science, Japan Aerospace Exploration Agency

In western part of the Oceanus Procellarum of the lunar nearside, there are several large-scale volcanic complexes, in which volcanic geographical features are highly concentrated. In this study, Gravity Recovery and Interior Laboratory (GRAIL)-derived lunar gravity field data is used to investigate the geophysical relevance of the major volcanic complexes in the region. One of our concerns is whether the volcanisms of these complexes are caused by common factors or not. We estimated Bouguer gravity anomaly in the region and investigated the directions of the linear structure of the anomalies. The result shows that there are linear mass anomalies, which connect the mass anomalies at the volcano complexes of Aristarchus Plateau, Marius Hills and Flamstead Basin. The observed linear structures lie inward of the large quasi-rectangular pattern revealed by Andrews-Hanna et al., and much shallower than the pattern. Considering that, the observed linear structures should have been created later than the quasi-rectangular outer structure. After the quasi-rectangular pattern was created, magma rose to the surface through the cracks. The observed linear structure is supposed to be created through cooling of the overflowed magma. The geological units, which the linear structures go through, are younger than that of the outer quasi-rectangular pattern. The linear cracks created by cooling are weaker than other locations. Therefore, magma probably rose easier than in other area. That may be why the three currently observed volcano complexes lie on the same linear structure.

キーワード：月重力場、GRAIL、火成活動

Keywords: lunar gravity field, GRAIL, volcanic activity

最古の月玄武岩隕石がどこからきたか？

Where did the oldest lunar mare sample come from?

*杉山 賢一¹、中村 良介²、小澤 信¹、寺田 健太郎³、中村 智樹¹、中嶋 大輔¹、大谷 栄治¹

*Kenichi Sugiyama¹, Ryosuke Nakamura², Shin Ozawa¹, Kentaro Terada³, Tomoki Nakamura¹, Daisuke Nakashima¹, Eiji Ohtani¹

1.国立大学法人 東北大学大学院 理学研究科 地学専攻、2.産業技術総合研究所、3.大阪大学大学院理学研究科
1.Department of Earth and Planetary Material Sciences, Faculty of Science, Tohoku University,
2.AIST, 3.Graduate School of Science, Osaka University

Introduction: Kalahari 009 is a lunar meteorite classified as a very-low-titanium (VLT) mare basalt breccia and known as one of the oldest mare basalts with the U-Pb age of 4.35 ± 0.15 Gyr (Terada et al., 2007). This meteorite provides the information of the lunar oldest mare magmatism prior to the Late Heavy Bombardment around 3.8-4.1 Gyr ago and potentially facilitates understanding of the origin of lunar mare magma activity. Here we report search for the source crater of the Kalahari 009 meteorite and shock products in the meteorite.

Analytical Methods: The source crater of Kalahari 009 was searched in a region from northern latitude of 60 degree to southern latitude of 60 degree using data of the Multiband Imager (MI) and Gamma Ray Spectrometer (GRS) obtained by the lunar explorer SELENE (KAGUYA). We selected candidates of the source crater, of which FeO, TiO₂ and Th concentrations are comparable to those in Kalahari 009 (16 wt% of FeO, 0.45 wt% of TiO₂ and 0.09 ppm of Th) (Sokol et al., 2008). To estimate the compositions of FeO and TiO₂ we used the algorithms for deriving the abundances of FeO and TiO₂ based on MI image data (Otake et al., 2012). At the same time, optical maturity parameter (OMAT), which is an index of relative surface age of craters, was also calculated to search for the source crater of Kalahari 009 using the method in Lucey et al. (2000).

To reveal the impact history of Kalahari 009, we observed the thin section of the meteorite using the field emission scanning electron microscope (JEOL 7001F) and Raman spectrometer (JASCO NRS-2000).

Result and Discussion: 254 craters with concentrations of FeO (14-17 wt%), TiO₂ (≤ 1 wt%) and Th (≤ 1 ppm) were identified. It was suggested that Kalahari 009 was ejected together with the Kalahari 008 highland breccia (Sokol et al., 2008), and therefore the source crater may be located in a region of cryptomare. 92 out of 254 craters are located in cryptomare. The cosmic exposure age of Kalahari 009 is from 220 ± 40 yr to ~ 0.3 Myr (Nishiizumi et al., 2005), which means that the craters with relatively high OMAT are candidates of the source crater. Thus, the source crater of Kalahari 009 is probably one of 92 craters in cryptomare having relatively high OMAT.

In the thin section of Kalahari 009, shock products such as coesite, ringwoodite, partly mosaicism and planar fracturing in plagioclase and olivine were observed. According to the shock classification in Stöffler et al. (1991), the shock pressure is estimated as 30-35 GPa. The presence of ringwoodite suggests the shock pressure of ~ 7 -14 GPa based on the Fe₂SiO₄ phase diagram (Ohtani, 1979). Thus, it is inferred that Kalahari 009 experienced the shock pressure of ~ 7 -35 GPa. The Ar-Ar dating of Kalahari 009 showed that the meteorite experienced significant loss of radiogenic Ar at 1.7 Gyr (Fernandes et al., 2007). Thus, Kalahari 009 has experienced at least one impact which caused loss of radiogenic Ar and/or produced shock-induced minerals.

In summary, we describe a possible ejection scenario of Kalahari 009 based on the results of the present and previous studies. An impact event occurred at 1.7 Gyr, but the ancient basalt clast remained in the impact crater as a breccia. Then, the 2nd impact produced a small crater inside the large crater between ~ 0.3 Myr and 220 ± 40 yr and ejected the meteorite from the small crater.

In the presentation, we will discuss the source crater of Kalahari 009 in conjunction with the impact history of the meteorite.

キーワード：月、かぐや、クリプトマーレ

Keywords: Moon, Kaguya/SELENE, Cryptomare

月のレオロジー構造と深発月震の発生メカニズム

The rheological structure of moon interior and the mechanism of deep moonquake.

*東 真太郎¹、片山 郁夫²*Shintaro Azuma¹, Ikuo Katayama²

1.東京工業大学地球生命研究所、2.広島大学理学研究科地球惑星システム学専攻

1.Earth-Life Science Institute, Tokyo Institute of Technology, 2.Department of Earth and Planetary Systems Science, Hiroshima University

アポロ計画によって8年以上月震波の観測が行われ、月の内部構造に関する我々の理解は大きく前進した。この月震波のデータを解析することで、月にも月震（地殻変動）が起きていることや、内部は分化しており、地殻は斜長石、マントルは地球と同様苦鉄質鉱物（カンラン石や輝石）で構成されていることが支持されている（reviewed by Wieczorek et al., 2006）。月震のデータから我々は様々な月の内部の知見を得てきたが、月震のメカニズム自体については幾つかの仮説はあるものの(e.g., Weber et al., 2008; Frohlich and Nakamura 2009), 未だに議論がある。月震は発生領域や発生メカニズムによって、浅発月震、深発月震、熱月震、インパクトによる月震に分類されており、我々はこの月震の中でも深さ約800-1200 km付近で起きる深発月震の発生メカニズムについて、月内部のレオロジー構造とともに考察を行った。この深発月震の特徴として、決まった場所で繰り返し起きていることや、非常に小さな応力降下(~0.1 MPa)があげられる(e.g., Lammlein, 1977; Nakamura 1981)。この深発月震の発生メカニズムを考察することは、月内部の不均一性や、月内部の進化を解明する大きな手がかりとなる可能性がある。

月内部のレオロジー構造を検証する際、月内部の温度構造を見積もる必要がある。これについては先行研究において観測された熱流量などから推察されている温度構造を用いた(Kuskov et al., 2002)。圧力については、地殻の密度を(3000 kg/m³), マントルの密度3300 (kg/m³), モホ面の深さを60 (km)に設定し(Hood and Zuber, 2000), 上載岩圧を計算した。上記の温度・圧力構造を基に、脆性破壊領域はByerleeの法則を用いて強度の計算を行い(Byerlee, 1978), 塑性変形領域においては流動則を用いて計算を行った。特に地殻については斜長石の流動則(Rybacki and Dresen, 2000; Rybacki et al., 2006)を適用し、マントル部分についてはかんらん石の流動則(Karato and Jung, 2003)を適用した。歪速度については不確定なので10⁻¹⁴ (s⁻¹)と10⁻¹⁹(s⁻¹)の二通りの歪速度を仮定し計算を行い、月内部のレオロジー構造を決定した。本研究ではこのレオロジー構造の決定と地球で起きている深発地震のメカニズムのモデルを参考にすることで深発月震のメカニズムについて考察を行った。

まず計算された月内部のレオロジー構造から、深発月震は明らかに塑性変形領域で発生していることがわかった。通常、塑性変形領域では破壊や滑りは起こらない。そこで地球で起きている深発地震の発生メカニズムのモデルとして提案されている断熱不安定が、月内部でも引き起こされる可能性について考察を行った。この断熱不安定を引き起こすためには、(1)変形による温度上昇が熱拡散を上回ることと(大きい歪速度), (2)その温度上昇に伴う強度の減少が変形による加工硬化を上回る必要(比較的低温条件)がある(Karato et al., 2001)。計算の結果、まずドライの条件下では、月内部で断熱不安定を引き起こすことは非常に難しいことがわかった。なぜなら、潮汐力によって生み出される月内部の応力は非常に小さく(0.1 MPa), 熱的不安定を引き起こすために必要な歪速度(>10⁻¹⁴ s⁻¹)に対し、ドライ条件では実現できる歪速度に限界(<10⁻¹⁵ s⁻¹)があるからである。しかし、ウェット条件(500-1000 ppm H/Si)では歪速度も飛躍的に大きくなり(>10⁻¹⁴ s⁻¹), 断熱不安定を引き起こす可能性が示された。さらにその断熱不安定が引き起こされる温度圧力条件は深発月震が観測されている深さの温度圧力条件(1000-1500 °C, 3.5-4.5 GPa)に近いことも示された。このことから月内部には不均一に水が存在しており、その水の不均一性が原因で深発月震は繰り返し同じ場所で起きているのかもしれない。

キーワード：月、深発月震、レオロジー構造

Keywords: Moon, Deep moonquake, Rheological structure

