

SELENE のデータアーカイブ状況、最新科学成果と展望 SELENE: its data archive status, scientific results, and a vista of the future

岩田 隆浩^{1*}, 春山 純一¹, 大嶽 久志², 晴山 慎², 山本 幸生¹, 斎藤 義文¹, 岡田 達明¹, 大竹 真紀子¹, 三谷 烈史¹
IWATA, Takahiro^{1*}, HARUYAMA, Junichi¹, OTAKE, Hisashi², HAREYAMA, Makoto², YAMAMOTO, Yukio¹, SAITO,
Yoshifumi¹, OKADA, Tatsuaki¹, OHTAKE, Makiko¹, MITANI, Takefumi¹

¹JAXA 宇宙科学研究所, ²JAXA 月・惑星探査プログラムグループ

¹ISAS/JAXA, ²JSPEC/JAXA

Three years have passed since the Selenological and Engineering Explorer (SELENE) ended its mission in June 2009. SELENE science-and-project team members have made efforts to improve the accuracy of the data, and many data products have been registered in the SELENE data archive system. Numbers of published scientific papers and peer reviewed in international journals are reached to be almost 100; nearly half of them have been published in these years. SELENE data are highly contributing on the lunar sciences. Taking into account of this situation, SELENE team members are planning to hold an international science symposium for SELENE achievements on January, 2013, aiming to keep and further acquisition of initiative on the lunar science in the international lunar science community, and to encourage lunar scientists to realize post-SELENE lunar explorations. In this paper, we report the status of data archive, scientific results including individual and integrated sciences, and a vista of the future activities.

キーワード: 月, SELENE, かぐや, データアーカイブ

Keywords: Moon, SELENE, Kaguya, data archive

月周辺で観測される電子サイクロトロン高調波 Generation of Electron Cyclotron Harmonic waves around the Moon

片山 由美子^{1*}, 小嶋 浩嗣¹, 斎藤 義文², 笠原 禎也³, 大村 善治¹, 山本 忠輝², 横田 勝一郎², 西野 真木², 橋本 弘藏⁴, 小野 高幸⁶, 綱川 秀夫⁶

KATAYAMA, Yumiko^{1*}, KOJIMA, Hirotsugu¹, SAITO, Yoshifumi², KASAHARA, Yoshiya³, OMURA, Yoshiharu¹, YAMAMOTO, Tadateru², YOKOTA, Shoichiro², NISHINO, Masaki N.², HASHIMOTO, Kozo⁴, ONO, Takayuki⁶, TSUNAKAWA, Hideo⁶

¹ 京都大学生存圏研究所, ² 宇宙航空研究開発機構宇宙科学研究本部, ³ 金沢大学総合メディア基盤センター, ⁴ 古代学協会, ⁵ 東北大学大学院理学研究科地球物理学専攻, ⁶ 東京工業大学大学院理工学研究科地球惑星科学専攻

¹Research Institute for Sustainable Humanosphere, Kyoto University, ²Institute of Space and Astronautical Science, Japan Aerospace Exploration Agency, ³Information Media Center, Kanazawa University, ⁴The Paleological Association of Japan, ⁵Division of Geophysics, Graduate School of Science, Tohoku University, ⁶Department of Earth and Planetary Sciences, Tokyo Institute of Technology

We study plasma wave generations around the moon based on the plasma wave data observed by the KAGUYA spacecraft which is the Japanese mission to the moon. The WaveForm Capture receiver revealed that various plasma waves are excited due to moon-space plasma interactions. In the present paper, we focus on the Electron Cyclotron Harmonics (ECH) among the plasma wave phenomena taking place around the moon. The ECH waves have been widely studied in the relation to the electron precipitation in the terrestrial magnetosphere due to the loss cone instability. However, that does not directly link to the observation of the ECH around the moon orbit. KAGUYA observes the ECH around its orbit very frequently. That is unlikely to occur without the moon at the distance of 60RE from the Earth. ECH waves are observed around the moon with KAGUYA plasma wave data.

First, we analyze the observation points to know why ECH waves are observed under the environment around the moon. By examining observation points in the SSE coordinates, it is revealed that ECH waves are observed only when the moon stays inside the magnetosphere. Furthermore, we found ECH waves are mostly observed on the night side, where surface of the moon is not lit by the sunlight. We also found the existence of the good correlation between the observation of ECH and magnetic anomalies.

Next, we examine plasma particle data. Lunar Prospector found that once ambient magnetic fields connect to the magnetic anomaly, the resultant mirror force causes the reflection of electrons with their velocity distributions above the loss cone angle. In addition to the loss cone distribution, Lunar Prospector also found the existence of low energy electron beams that are accelerated by the negative potential of the moon surface on the night side. We found the good correlation of the ECH waves to the loss cone electron distribution with low energy electron beams. We assumed low energy beam is necessary to excite ECH waves as well loss cone distribution. However, loss cone distribution and low energy beam are observed not only in the magnetosphere but also in the wake region which is found when the moon is in the solar wind. However, we never observe of ECH waves in the lunar wake region. We assumed ECH waves are generated only under the parametric condition in the magnetosphere.

Next, in order to study the generation of the ECH waves, we calculated the linear growth rate by solving the kinetic plasma dispersion relation using the realistic plasma parameters of electromagnetic environment of lobe, plasma sheet and wake based on the KAGUYA observation. The result shows fundamental harmonic and second harmonic are unstable under the coexistence of the electron of the electron loss cone and the low energy electron beam.

In the present paper, we examine the parametric dependence of the destabilization of the ECH waves by the linear dispersion analysis and we establish the comprehensive generation model of the ECH waves around the moon.

キーワード: KAGUYA, Electron Cyclotron Harmonics, loss cone instability, the Moon

月磁気異常のグローバル月面マッピング 月火成活動・月ダイナモ活動について Global mapping of the lunar magnetic anomalies at the surface: implications for the sub-surface igneous event

綱川 秀夫^{1*}, 高橋 太¹, 清水 久芳², 渋谷 秀敏³, 松島 政貴¹

TSUNAKAWA, Hideo^{1*}, TAKAHASHI, Futoshi¹, SHIMIZU, Hisayoshi², SHIBUYA, Hidetoshi³, MATSUSHIMA, Masaki¹

¹ 東京工業大学大学院理工学研究科, ² 東京大学地震研究所, ³ 熊本大学理学部

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

We have developed a new method to map three components of the lunar magnetic anomaly field at the surface with a high spatial resolution. This method has been applied to the low altitude observations by the magnetometer of Kaguya (MAP-LMAG) and Lunar Prospector. Regional maps at the same altitudes from the two datasets show good agreement, for example, the anomalies in and around the South Pole-Aitken basin. Connecting regional maps of 15 deg x 15 deg size, a global map of the lunar magnetic anomalies was provided for three components from the Lunar Prospector dataset. As a result, the lunar magnetic anomalies are distributed almost over the lunar surface and show many lineated patterns with some spot-like ones. These patterns suggest ~4 Ga global event of the magnetic anomaly formation in the dynamo field of the early Moon. It is inferred from the Rima Sirsalis anomaly region that the lineated magnetic anomalies are originated from dike-like intrusions. If it is a case, the lineation indicates a direction of the horizontal maximum stress field in the early lunar crust. We will discuss a possible subsurface igneous event of the early Moon.

キーワード: 月, 磁気異常, ダイナモ, かぐや, 火成活動, 応力場

Keywords: moon, magnetic anomaly, dynamo, Kaguya, igneous activity, stress field

かぐや衛星搭載磁力計で観測された階段状磁場変化解析から推定した月の電気伝導度

Electrical Conductivity of the Lunar Interior from Magnetic Transient-Response

比嘉 哲也^{1*}, 吉村 令慧², 大志万 直人², 松島 政貴³, 清水 久芳⁴, 高橋 太³, 渋谷 秀敏⁵, 綱川 秀夫³

HIGA, Tetsuya^{1*}, YOSHIMURA, Ryokei², OSHIMAN, Naoto², MATSUSHIMA, Masaki³, SHIMIZU, Hisayoshi⁴, TAKAHASHI, Futoshi³, SHIBUYA, Hidetoshi⁵, TSUNAKAWA, Hideo³

¹ 京都大学大学院理学研究科, ² 京都大学防災研究所地震防災研究部門, 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 東京大学地震研究所, ⁵ 熊本大学大学院自然科学研究科

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

月の起源・進化に対する理解を深める上で、月の電気伝導度構造（内部構造）を明らかにすることは必要不可欠である。本研究では、かぐや衛星に搭載された磁場観測装置 LMAG の高精度な磁場データを用いて、月の電気伝導度構造に制約を与えることを試みた。

LMAG は、主に月面上での微細な磁気異常図のマッピングを行うことを目的として搭載されたが、かぐや衛星が高度 100 km で観測を行っていた 2007 年 12 月 21 日から 2008 年 10 月 31 日の期間に観測された磁場データ中に、月の電磁誘導効果起源の磁場変化が記録されていないかの検討を加えた。

月による電磁誘導現象が発生した場合、LMAG では、電磁誘導のソースとなる磁場変化と月の電磁誘導による 2 次磁場の和として磁場変化が記録されていることが期待される。電磁誘導のソースとなる磁場変化として、月から遠方において太陽側の惑星間空間に位置する ACE 衛星もしくは WIND 衛星で観測された階段状の惑星間空間磁場変化に着目し、この磁場変化に対応すると考えられる時間ウインドウ内でのかぐや衛星磁場観測データと比較することにより、月の電磁誘導現象の記録の有無を判別した。

3 衛星の磁場データを精査した結果、ACE もしくは WIND で観測された階段状の磁場変化に対して、月周辺で、ある時定数で緩和するような磁場変化が 22 例確認できた。

定量的な検討を加えるために、衛星の配置とデータが良質であった 3 例を抽出し解析を行った。その結果、月、かぐや衛星、磁場変化の方向の相対位置関係の違いにより、同様な磁場変化が入力として存在していても、かぐや衛星が観測する月の電磁誘導の応答に見かけ上の違いがあることがわかった。この違いについては一様導体球の階段状磁場変化に対する理論応答を計算することで説明が可能であり、選び出した 3 例の変化は、確かに月の電磁誘導によって生じた磁場変化であると結論づけられた。

この 3 例の階段状の磁場変化の振幅はいずれも 10 nT 程度であり、誘導磁場が減衰するまでの時間はおよそ 500 秒であった。月を電気伝導度が一様な導体球としてモデル化し、かぐや高度において、この振幅 10 nT の階段状磁場に対して 500 秒程度で減衰するような誘導磁場を生じる電気伝導度の値を見積もると、 $1.0\text{-}4.0 \times 10^{-4}$ S/m と推定された。

キーワード: 月, かぐや, LMAG, 電磁誘導, 電気伝導度

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

月レーダーサウンダーによる'危難の海'磁気異常下の地下玄武岩溶岩層 Subsurface magnetized basalt layers underneath the Mare Crisium by Lunar Radar Sounder

坂東 雄一¹, 中村 教博^{1*}, 熊本 篤志²

BANDO, Yuichi¹, NAKAMURA, Norihiro^{1*}, KUMAMOTO, Atsushi²

¹ 東北大学大学院理学研究科地学専攻, ² 東北大学惑星プラズマ・大気研究センター

¹Department of Earth Science, Tohoku University, ²Planetary Plasma and Atmospheric Research Center, Tohoku University

Paleomagnetic measurements of 3.7-billion-year-old mare basalt sample 10020 revealed the presence of strong intensity of mean 60 microteslas as the lunar paleofield. Current lunar dynamo theory (continuous mechanical stirring dynamo) generates a long-lived lunar magnetic field for more than one billion years with an intensity of 1-10 microteslas, contradicting such intense paleomagnetic record. There are several regions showing strong lunar magnetic anomalies around the mare. The orbital magnetic field measurements with magnetic inversion techniques on the mare Crisium suggested that subsurface basalt layers ~ 1 km depth are magnetized with an intensity of 1 A/m from the estimation of Apollo return samples. However, there is no data for subsurface structure underneath the mare Crisium. In this presentation, we report the subsurface structure of layered basalt lava by using the lunar radar sounder onboard Kaguya. Lunar Radar Sounder imaging with a synthetic aperture radar analysis revealed the cryptic subsurface basalt layer of 500 m thickness at 360 m underneath the Crisium basin. Considering the surface crater age and the duration for hiatus of two paleo-regoliths as LRS reflectors, the age of the basalt is about 3.7 billion years. This thick basalt layer explains total magnetic field strength above the Crisium basin from lunar prospector data if the basalt acquired a thermo remanent magnetization under 100 microteslas with 1 % iron content. Such high iron content and large volume of basalt lava plausibly results from the eruption of thorium- and titanium-rich lunar mare basalts due to the removal of the ilmenite-rich thermal blanket at the base of the lunar mantle. Our results support the presence of the late, intense lunar paleofield.

かぐや月レーダサウンダの最大探査深度の評価 Evaluation of the maximum detection depth of the Kaguya Lunar Radar Sounder

熊本 篤志^{1*}, 小林 敬生², 小野 高幸¹
KUMAMOTO, Atsushi^{1*}, KOBAYASHI, Takao², ONO, Takayuki¹

¹ 東北大学大学院理学研究科, ² 韓国地質資源研究院

¹ Graduate School of Science, Tohoku University, ² Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources

Introduction: Recent studies based on the subsurface radar sounding of the Moon by Kaguya Lunar Radar Sounder (LRS) have prominently shown that the radar sounder is a powerful tool for geological investigations of the planets and satellites [cf. Ono et al., 2009; 2010]. On the other hand, we have also recognized several limitations in the actual radar sounder observations. Based on Kaguya/LRS data, it was reported that there were found inhomogeneity of the subsurface reflectors in the Oceanus Procellarum [Oshigami et al., 2009]. As for the inhomogeneity, it was also pointed out that the abundance of the ilmenite such as FeO and TiO₂ affects the detectability of the subsurface echoes [Pommerol et al., 2010]. The result suggests that rich ilmenite in the lunar surface material could cause the radio wave attenuation and degrade the detectability of the subsurface echoes and maximum detection depth of the radar sounder. In the present study, we performed estimation of the subsurface echo powers based on the reflection coefficient at the buried regolith layers and attenuation rate in the basalt lava flow layers. Then we also estimate the maximum detection depth of Kaguya/LRS.

Estimation of Subsurface Echo Power: We made the following assumptions: (i) The subsurface reflectors detected by LRS are buried regolith layers. Their thickness is several meters, which is much less than LRS range resolution (75 m in vacuum). Their permittivity is ~ 4 . (ii) The layers between the subsurface reflectors are basalt lava flow layers. Their thickness is several hundred meters, which can be determined by LRS. Their permittivity is ~ 6.25 . The mass density is $\sim 3 \text{ g/cm}^3$. (iii) The abundances of FeO and TiO₂ of the subsurface basalt layers are almost similar with those on the lunar surface, which can be derived from Clementine UV-Visible image data [Lucey et al., 2000]. Based on the assumptions, we can calculate the reflectance at the buried regolith layers, and attenuation per meter in the basalt lava flow layers. Due to the interference between radio wave reflected at the upper and lower boundaries of the buried regolith layer, the total reflectance at the buried regolith layer depends on the thickness of the buried regolith layer. It also depends on the permittivity gap between basalt layers above and below the buried regolith layer. The loss tangent map was derived from the FeO and TiO₂ map. The loss tangent in the nearside maria was estimated to be ~ 0.016 , which is much more than that assumed in the prelaunch estimations [Ono et al., 2000; 2008]. Based on the calculated reflectance and attenuation rate, and noise level of Kaguya/LRS, which is 50 dB less than the nadir surface echo level, the maximum detection depth of Kaguya/LRS, D_{max} , can be estimated. D_{max} in the nearside maria is estimated at $\sim 1 \text{ km}$ if assuming permittivity of ~ 6.25 .

Discussion: In the prelaunch studies, maximum detection depth of the Kaguya/LRS was estimated to be 5 km because loss tangent of 0.006 was assumed in them. That was, however, too small in the nearside maria. It was reported that Apollo Lunar Sounder Experiment (ALSE) detected the subsurface reflectors at depths of 1 km and 2 km in Mare Serenitatis [Peeples et al., 1978]. Because the transmitting power and dynamic range of ALSE are almost the same with those of Kaguya/LRS, the maximum detection depth of ALSE should be about 1 km. Therefore, it is quite unnatural that ALSE detected reflectors at a depth of 2 km. It was found in the present study that the subsurface echo power depends on the thickness of the buried regolith layers and permittivity gap among the basalt lava flow layers. The results will enable us to discuss the regolith accumulation rate, difference of lava flow compositions, and the evolution of the volcanic activity in the lunar maria in future works.

Keywords: Kaguya (SELENE), Lunar Radar Sounder (LRS), Subsurface radar sounding, Buried regolith layers, Basalt lava flow layers, Ilmenite abundance

カンラン石の粉体と焼結体との反射スペクトルの比較 Comparison of reflectance spectra of sintered olivine with those of olivine powder.

丸山 薫^{1*}, 佐伯 和人¹, 大井 修吾²
MARUYAMA, Kaori^{1*}, SAIKI, Kazuto¹, OHI, Shugo²

¹ 大阪大学大学院理学研究科宇宙地球科学専攻, ² 京都大学大学院人間・環境学研究科

¹Department of Earth and Space Science, Graduate School of Science, Osaka University, ²Graduate School of Human and Environmental Studies, Kyoto University

月表層の岩石の種類や構成鉱物の組成を全球的に知るためにリモートセンシングによる可視近赤外反射スペクトルデータが使われている。この際、岩石の構成鉱物の粒径が粉体と同様に推定できるか否かは、議論の分かれるところである。そこで本研究では、粉体と焼結体(擬似岩石)との反射スペクトルの違いを調べた。

月の高地の地殻を形成する主要鉱物の一つであるということと、焼結で結晶構造が変化しないということから、カンラン石を用いて粉体と擬似岩石との反射スペクトルを比較する実験を行った。カンラン石はサンカルロス産のものを使用した。焼結体は、カンラン石を砕いたものをふるいでいくつかの粒径のグループに分け(75-100 μ m, 230-250 μ m)、それをピストンシリンダー型高圧発生装置で1GPa、1400-1500 で加圧焼結させた。また、焼結体はアイソメットで断面を出した後、表面を鏡面にしたものと粗い面にしたものを用意した。鏡面はダイヤモンドペーストで、粗い面はサンドペーパーの1000番で研磨した。作成した焼結体を薄片にし、偏光顕微鏡観察から粒径を測定し、同じ粒径の粉体試料を準備した。スペクトル測定の際は、粉体はアルミのパンに流し込み、表面を平らにした。スペクトル測定には、光源にはハロゲンランプ、検出器にはCCDカメラを用いた画像分光顕微鏡(測定波長範囲は380-1100nm、波長分解は5nm)を使用した。試料からの反射光はグリズムで分光している。また、反射率を求める際の基準にはスペクトラロンを使用し、入射角40度、観測角0度の条件で測定を行った。測定結果は、粉体と焼結体では反射スペクトルは大きく異なり、焼結体の方が反射率が極端に低くなった。焼結体の表面の粗さの違いによるスペクトルの違いは今回の測定では不明瞭であった。また、粉体では粒径が小さくなるほど反射率は大きくなり、焼結体では粒径が小さくなるほど反射率は小さくなった。この測定結果から、焼結体の反射スペクトルと粉体の反射スペクトルを比較して焼結体中の鉱物の粒径を推定するには、粉体とは異なる散乱モデルが必要であることが示唆される。

Keywords: reflectance spectrum, olivine, sintered olivine, remote-sensing, lunar surface, hyper-spectral sensor

月隕石およびかぐやリモセン探査から推定される最古の月地殻が保存されている地域からの将来のサンプルリターン探査の提案 Regions with the Oldest Crust for Future Sample Return Missions as Inferred from Lunar Meteorites and the Kaguya Data.

武田 弘^{1*}, 大竹真紀子², 長岡央³, 小林進悟⁴, 諸田智克⁵, 春山純一², 唐牛謙⁶, 山口亮⁷, 廣井孝弘⁸, 佐伯和人⁹, 三河内岳¹, 三谷烈史², 長谷部信行³

TAKEDA, Hiroshi^{1*}, Makiko Ohtake², Hiroshi Nagaoka³, Shingo Kobayashi⁴, Tomokatsu Morota⁵, Junichi Haruyama², Yuzuru Karouji⁶, Akira Yamaguchi⁷, Takahiro Hiroi⁸, Kazuto Saiki⁹, Takashi Mikouchi¹, Takefumi Mitani², Nobuyuki Hasebe³

¹ 東京大学理学系研究科地惑専攻および千葉工大フォーラム研究, ² 宇宙科学研究所, ³ 早稲田大学, ⁴ 国立環境研, ⁵ 名古屋大学, ⁶ 宇宙科学研究所, ⁷ 国立極地研, ⁸ ブラウン大学, ⁹ 大阪大学

¹Univ. of Tokyo, Graduate School of Science, ²JAXA/ISAS, ³Waseda Univ., ⁴National Inst. of Radiological Sci., ⁵Nagoya Univ., Graduate School of Environmental Studies, ⁶JAXA/JSPEC, ⁷National Inst. of Polar Res., ⁸Brown Univ., Dept. Geol. Sci., ⁹Osaka Univ., Dept. of Earth and Space Sci.

本提案は月裏側高地にあるトリウムの最も少なく原始地殻の残っている可能性のある地域よりサンプルリターンを行うことは、月科学を大きく発展させるだけでなく、アポロ計画で、人類がまだ石を手にしたことの無い地域より、「未踏の地域の月の石」を初めて持ち帰る探査を提案するものである。月の裏側にある大きな盆地は月初期にできて以後、表側のように溶岩により満たされること無く、古い地形が未だに残っている。この月裏側について、「かぐや」の得た大きな成果である重力分布図、地形カメラ (TC), マルチバンドイメージャ (MI), レーザ光度計 (LALT) により地形図、地殻の厚さの分布図、ガンマ線分光計 (GRS) によるトリウム分布図より、地殻がもっとも厚く、トリウムの最も少ない地域が発見された。また MI, スペクトルプロファイラ (SP) よりアポロ試料の斜長岩より、より始原的な月地殻が残っている可能性が高いと考えられる。ドーファー 489, 307, 309 月隕石の鉱物学的、地球化学的研究より、この地域にあるデリクレー・ジャクソン・ベズン底で形成された可能性を示した。アポロ月試料によって長年の間推定されていたモデルには一部に矛盾が見られる。この様な月斜長岩を裏側から回収することは、「かぐや月探査」の成果をさらに発展させ、月の二分性の解明につながる可能性がある。

キーワード: 月, 裏側, ベズン, 月隕石, 月地殻, マグネシウム番号

Keywords: Lunar farside, basin, lunar meteorites, lunar crust, Kaguya mission, Dirichlet-Jackson Basin

斜長岩質地殻形成過程の再評価に基づく月バルク組成への制約 Lunar Bulk Composition Constrained by Reevaluation for Formation Mechanism of Anorthosite Crust

酒井 理紗^{1*}, 久城 育夫¹, 永原 裕子¹, 小澤 一仁¹, 橋 省吾¹

SAKAI, Risa^{1*}, KUSHIRO, Ikuo¹, NAGAHARA, Hiroko¹, OZAWA, Kazuhito¹, TACHIBANA, Shogo¹

¹ 東京大学大学院理学系研究科

¹Earth and Planet. Sci., Univ. of Tokyo

Recent observations by lunar explorations have shown that the lunar highland crust is highly anorthositic in composition and is ~45-60 km thick. The Moon has been thought to have undergone a global magma ocean stage very early in its history and the anorthositic crust was formed by accumulation of anorthite crystallized in the lunar magma ocean (LMO).

The bulk composition of the Moon has been estimated by previous studies from geochemical and geophysical data. There are, however, large disparities among the estimates, because of the lack of direct chemical and structural information on the lunar interior right after the solidification of the magma ocean. The initial composition of the LMO, particularly FeO and refractory elements (Al₂O₃ and CaO), largely affects physical properties of melts as well as the phase relation of anorthite crystallization, and thus the dynamics of the cooling LMO.

Tonks & Melosh (1990) suggested that crystals could be separated from the magma when a settling/floating velocity for crystals calculated from Stokes' law are much larger than a convective velocity in magma ocean. The laboratory experiments intended for a terrestrial magma chamber, however, have revealed that the crystal separation does not take place at the convective region, but at the boundary layer of fluid, where the effects of viscosity are significant (Martin and Nokes, 1989, Solomatov et al. 1993).

We have developed a fractional crystallization model of LMO and investigated the conditions for the effective floatation of anorthite in the LMO to reproduce the observed critical features of the lunar crust to constrain the FeO and refractory element contents (Sakai et al., 2010, 2011). In this study, we refined our model by considering crystal separation in the boundary layer (Solomatov et al., 2003) and tried to constrain the contents of FeO and refractory elements in the initial LMO more rigorously.

The results showed that the initial FeO content should be more abundant than that of BSE, and the degree of enrichment of refractory elements should be < less than 2.3 times of the BSE. These values satisfy the conditions for floatation of anorthite found in the Apollo sample (James, 1972; Wilshire et al., 1972). The new model with boundary layer fractionation supports our previous conclusion that the FeO content of the LMO is larger than that of the BSE.

The higher FeO content estimated for the LMO than the BSE implies that the impactor that hit the proto-Earth was enriched in FeO than the BSE or that the oxygen fugacity of the LMO was higher than the BSE.

キーワード: 月バルク組成, マグマオーシャン, 斜長岩質地殻, 分化モデル

Keywords: Lunar Bulk Composition, Magma Ocean, Anorthosite Crust, Differentiation Model

月の小クレータを用いたクレータ年代学 Cratering chronology for small lunar craters

諸田 智克^{1*}, 春山 純一², 本田 親寿³, 大竹 真紀子², 平田 成³, 出村 裕英³, 山本 聡⁴, 松永 恒雄⁴, 横田 康弘⁴, 中村 良介⁵, 石原 吉明⁶, 渡邊 誠一郎¹, 古本 宗充¹

MOROTA, Tomokatsu^{1*}, HARUYAMA, Junichi², HONDA, Chikatoshi³, OHTAKE, Makiko², HIRATA, Naru³, DEMURA, Hirohide³, YAMAMOTO, Satoru⁴, MATSUNAGA, Tsuneo⁴, YOKOTA, Yasuhiro⁴, NAKAMURA, Ryosuke⁵, ISHIHARA, Yoshiaki⁶, WATANABE, Sei-ichiro¹, FURUMOTO, Muneyoshi¹

¹名古屋大, ²宇宙研, ³会津大, ⁴国環研, ⁵産総研, ⁶国立天文台

¹Nagoya Univ., ²ISAS/JAXA, ³Univ. Aizu, ⁴NIES, ⁵AIST, ⁶NAOJ

地球や他の固体天体に比べて、月は早い段階で主な地質活動が終了した。そのため月面には過去 40 億年に及ぶ地質イベントの情報が残されており、月面クレータは地球・月系の長期的な衝突履歴をほぼ完全に保存した数少ない直接的記録である。月面クレータ記録から過去の天体衝突史をひも解くための最も基礎的な作業は、個々のクレータの形成年代を決定すること、それらのイベントを時間軸に並べていくことである。しかしながら、正確な絶対年代が決定されているのはアポロ着陸点付近の少数のクレータだけで、相対年代に関しても直径 30km 以上のものに限られており、その信頼性も高いとは言えないのが現状である。

クレータ年代学を用いてクレータの形成年代を決定する場合、クレータのフロアや周囲の放出物堆積領域の上に形成された小クレータを使う必要がある。しかし一般に、クレータフロアや放出物堆積領域の面積は小さい。年代決定精度を高めるためには、統計量を増やす必要があり、そのためには直径 100m 以下の小クレータを統計に加える必要がある。しかしながら、主にデータの欠如に起因する問題から、直径数百 m 以下の小クレータを用いたクレータ年代学は十分に確立されたとは言えない。そのため、正確に絶対年代が分かっているのは、アポロ計画で岩石試料が得られているクレータや、アポロ着陸点周辺に位置し、層序関係から年代推定が可能なクレータなど、少数のクレータに限られている。また、相対年代に関しても直径 30km 以上のものに限られており、その信頼性も高いとは言えないのが現状である。

小クレータを用いた年代決定における本質的な問題は、これまで小クレータを同定するに堪える高解像度画像が欠落していたために、月面における小クレータの標準サイズ頻度分布形状が精度よく決定されていなかったことである。そこで本研究では、(1)「かくや」画像、LRO 画像を用いて直径 < 500 m のクレータに対してサイズ頻度分布を調査し、月面クレータの標準サイズ頻度分布をより小さいクレータまで拡張する。次に、(2) 新たな標準サイズ分布を用いて、絶対年代とクレータ数密度の関係式の再導出を行うことで、小クレータを用いた年代決定手法を確立する。

クレータカウンティングにおいて二次クレータ混入がたびたび問題視される。本研究では特に新鮮なクレータのイジェクタを解析領域とすることで二次クレータの混入を最小限に抑えることができる。

キーワード: 月, クレーター, サイズ頻度分布, クレーター年代学

Keywords: Moon, crater, size-frequency distribution, cratering chronology

Mare Humorum におけるクレーターの光条消失時間について Retention time of crater rays materials in Mare Humorum

本田 親寿^{1*}, 松壽彩乃¹, 平田成¹, 諸田智克², 浅田智朗¹

HONDA, Chikatoshi^{1*}, Ayano Shoji¹, Naru Hirata¹, Tomokatsu Morota², Noriaki Asada¹

¹ 会津大学, ² 名古屋大学大学院環境学研究科

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

Surfaces of astronomical objects are scarred with millions of impact craters. Impact craters are the remains of collisions between, for example, asteroids, comets, or meteorites and the Moon. Such objects hit the Moon at a wide range of speeds, and impact craters are formed. Relatively fresh craters have crater rays. Crater rays are obviously bright streaks of materials that we can see extending radially away from host craters. The most recently formed craters on the lunar surface have bright and more or less radial rays, which are usually superimposed over all other terrains. In general, rays are bright because they excavate immature soils.

Lunar crater rays disappear over time, and it is considered that the reason of it is space weathering that is a process of surface materials being altered by exposure of solar wind, cosmic rays, and micrometeorite bombardments. Wilhelms et al. (1987) and Werner and Medvedev (2010) described the crater rays disappearance occurs in about 1.1 Gyr and 750 Myr, respectively. However, as a result of analyzing the retention time of the crater rays of highlands, it turned out that the new result time was longer than the time from the previous studies (Suzuki, 2011).

This study focuses on space weathering effect to understand why the disappearance time of the crater rays in highlands is longer. We suppose that a degree of space weathering relates to iron content on the lunar surface. Lunar highlands are iron-poor areas. In contrast, lunar maria are iron-rich areas. The purpose of this research is to investigate that crater ray disappearance time in maria is different in lunar highlands. We examined the time in Mare Humorum which is filled in iron-rich basaltic materials. As a result, the disappearance time of crater rays in Mare Humorum is 250 Myr (2.0 Gyr at highlands). This implies that the space weathering effect depends on the iron content on the lunar surface.

キーワード: クレーター, 光条, 宇宙風化

Keywords: crater, ray, space weathering

シリカ高压相が示す 27 億年前の月への天体衝突

Planetesimal collision on the Moon at 2.7 Ga indicated by silica high-pressure polymorph

宮原 正明^{1*}, 金子 詳平¹, 大谷 栄治¹, 境 毅¹, 長瀬 敏郎¹, 鹿山 雅裕², 西戸 裕嗣³, 平尾 直久⁴

MIYAHARA, Masaaki^{1*}, Shohei Kaneko¹, OHTANI, Eiji¹, SAKAI, Takeshi¹, NAGASE, Toshiro¹, KAYAMA, Masahiro², NISHIDO, Hirotsugu³, Naohisa Hirao⁴

¹ 東北大学, ² 広島大学, ³ 岡山理科大学, ⁴ JASRI

¹Tohoku Univ., ²Hiroshima Univ., ³Okayama Univ. of Sci., ⁴JASRI

The existence of a high-pressure polymorph in a meteorite is suggestive of its parent body having gone through a dynamic event. The moon's many craters and thick regoliths imply that it has experienced heavy meteorite bombardments. Several previous studies proposed that only a very few high-pressure polymorphs are contained in lunar surface materials (lunar meteorite and Apollo samples) because most high-pressure polymorphs melted and disappeared through high-temperature condition induced by a dynamic event under rarefied atmosphere on the moon [1-2]. However, Ohtani et al (2011) [3] studied lunar meteorite, Asuka 881757 in detail, and identified high-pressure polymorphs of silica, coesite and stishovite. ⁴⁰Ar-³⁹Ar radiometric age of Asuka 881757 indicates that coesite and stishovite were formed by a dynamic event occurred at 3.8 Ga, which is relevant to a planetesimal collision occurred during late heavy bombardment. In this study, we studied another lunar meteorite, NWA 4734 by a Raman spectroscopy, scanning electron microscope (SEM), synchrotron X-ray diffraction (XRD) and transmission electron microscope (TEM) to search for high-pressure polymorphs and clarify planetesimal collision history on the Moon.

NWA 4734 originates from lunar basalt, and contains many shock-melt veins and melt-pockets, implying that NWA 4734 was heavily shocked. Many cristobalite grains with mosaic-like textures exist in NWA 4734. Back-scattered electron (BSE) images show that cristobalite adjacent to the shock-melt veins and melt-pockets have tweed-like textures. Such portions including tweed-like textures were excavated with a focused ion beam (FIB) system, and became block pieces. We scanned the block pieces with a synchrotron X-ray at SPring-8 BL-10. We identified a high-pressure polymorph of silica, alpha-PbO₂ type silica (seifertite) based on the X-ray diffraction (XRD) patterns. Seifertite was reported only from shocked Martian meteorites up to now [4]. BSE images show that cristobalite grains in the host-rock of NWA 4734 have lamellae-like textures. Raman spectroscopy analysis and XRD patterns reveal that such portions include stishovite. Dendritic coesite was also found in the shock-melt veins. Phase equilibrium diagram deduced from high-temperature and -pressure synthetic experiments indicate that the stable pressure field of seifertite is ~100 GPa or more. On the other hand, recent several studies propose that the stable pressure field depends on the differences of starting materials for the synthetic experiments and impurities (e.g., Al)[5-6]. Original silica in NWA 4734 is not quartz but cristobalite and contains small amounts of Al and Na. Accordingly, now, it is difficult to estimate shock-pressure condition recorded in NWA 4734 based on present phase equilibrium diagram. Nonetheless, high-pressure condition of ~40 GPa or more would be essential for the formation of seifertite at least [6]. ⁴⁰Ar-³⁹Ar radiometric age of NWA 4734 is 2.7 Ga [7], which is the one of the youngest age among lunar meteorites. We could regard 2.7 Ga as planetesimal collision age because ⁴⁰Ar-³⁹Ar radiometric age is very sensitive to thermal metamorphism. Our present study allows us to infer that catastrophic planetesimal collision had continued on the Moon till 2.7 Ga at least.

[1] Papike, in Reviews in Mineralogy and Geochemistry, 36, 7-17-11, 1998.

[2] Lucey, et al. in Reviews in Mineralogy and Geochemistry, 60, 83-220, 2006.

[3] Ohtani et al., PNAS 108, 463-466, 2011.

[4] Sharp et al., Science 284, 1511-1513, 1999.

[5] Lakshtanov et al., PNAS 104, 13588-13590, 2007.

[6] Dubrovinsky et al., Chem. Phys. Lett. 333, 264-270, 2001.

[7] Fernandes et al., Lunar Planet. Sci. Conf. XL. 1045pdf, 2009.

月表面の岩石鉱物の衝突形成と軽元素等の内部保存の研究

Study on impact formation of lunar mineral rocks and interior reservoir of light elements

三浦 保範^{1*}

MIURA, Yasunori^{1*}

¹ 非常勤 (大学)

¹ Visiting (Univs.)

月鉱物岩石と軽元素循環などについては下記の様に問題点がある。

- 1) 乾燥した無大気月面には、地球型3物質状態圏の循環システムがない。
- 2) 月面の玄武岩岩石は大きな岩塊や鉱物岩石がアポロ試料に残存しているが、基盤的な峡谷地形は発見されていない。
- 3) 月表面の岩石が地球型惑星の結晶質の広い基盤岩でなく、多孔ガラス質表土ソイルと衝突破碎岩が広く厚く分布している。

本研究では、次のようにまとめることができる (Miura, 2012 印刷中)。

1) 不均質な月面状態で、大気や海を形成する軽元素が生成しなかったために現在の月面ができたと考えられる。事実、古いアポロ月岩石は空隙が多く軽元素炭素の多い岩石データが報告値から得られている。

2) 古い全月面的基盤岩が大規模に安定的に形成衝突破壊されるモデル MO よりは、月外天体 (水惑星巨大衝突や小惑星天体) が月面で混合し古くから衝突進化して、不規則な月面岩石を形成しているモデル IE が、これらの問題点を説明しやすい。前者モデル MO は地下深部に残存して掘削しても確認が不可能に近い。後者モデル IE では、衝突孔の中央丘は比較的徐冷場所のため地下深部物質ではなく、ガラス質表土ソイルが比較的徐冷で結晶化した表面物質集合体である可能性が高いことも説明できる。

3) 炭素と Ca・希土類 (REE) 元素が玄武岩より衝突性岩石に非常に多く含まれるデータ解析 (Miura, 2012 印刷中) などは、衝突性層状分化した IE モデルを支持している。

4) 無大気月面の鉱物岩石は、衝突時の場所による冷却速度の相違で、ガラスと結晶物質変化を繰り返し、組成組織変化をした衝突進化生成物である。事実、長石組成が混合変化し、マグマ的最终分化生成物の低温石英 (地球型マグマ岩石生成物) が月面に広く生成されていない。

キーワード: 月岩石鉱物, 炭素軽元素, 内部保存, 衝突形成, 多孔物質, ガラス質物質

Keywords: lunar mineral rocks, carbon light elements, interior reservoir, impact evolved formation, porous materials, glassy materials

月の極、月の水 Lunar Polar Region, Lunar Water

春山 純一^{1*}, 斎藤 義文¹, 大竹 真紀子¹, 松永 恒雄², 山本 聡², 横田 康弘², 諸田 智克³, 石原 吉明⁴, 小林 進悟⁵
HARUYAMA, Junichi^{1*}, SAITO, Yoshifumi¹, OHTAKE, Makiko¹, MATSUNAGA, Tsuneo², YAMAMOTO, Satoru², YOKOTA, Yasuhiro², MOROTA, Tomokatsu³, ISHIHARA, Yoshiaki⁴, KOBAYASHI, Shingo⁵

¹ 宇宙航空研究開発機構, ² 国立環境研究所, ³ 名古屋大学, ⁴ 国立天文台, ⁵ 独立行政法人 放射線医学総合研究所
¹Japan Aerospace Exploration Agency, ²National Institute for Environmental Studies, ³Nagoya University, ⁴National Astronomical Observatory of Japan, ⁵National Institute of Radiological Sciences

The lunar polar regions are often referred to be attractive as locations for a lunar exploration target, and where humans start colonization. The reasons of the assertion are for instance, first, water "must" be present in some permanently shadowed areas near the poles, and second, there are locations near the poles where the sun illuminates in long duration time, supplying energy continuously, and third the stable temperature conditions could be attained which is very convenient for astronauts and instrument to operate. However, these reasons should be reconsidered with recent observation results attained by SELENE, LRO, and other lunar explorers. On the other hand, the scientific interests on the regions have been highly grown. In this presentation, we outlook and discuss the new views of the lunar polar region.

キーワード: 月, 探査, 極, 水, 氷, セレーネ

Keywords: moon, exploration, polar region, water, ice, SELENE

かぐや測地データから示唆される月の海の変形 Deformation of lunar maria inferred from Kaguya geodetic data

鎌田 俊一^{1*}, 杉田 精司², 阿部 豊¹, 石原 吉明³, 並木 則行⁴, 花田 英夫³, 岩田 隆浩⁵, 荒木 博志³

KAMATA, Shunichi^{1*}, SUGITA, Seiji², ABE, Yutaka¹, ISHIHARA, Yoshiaki³, NAMIKI, Noriyuki⁴, HANADA, Hideo³, IWATA, Takahiro⁵, ARAKI, Hiroshi³

¹ 東大・理・地惑, ² 東大・新領域・複雑理工, ³ 国立天文台 RISE 月探査プロジェクト, ⁴ 千葉工大惑星探査研究センター, ⁵ 宇宙航空研究開発機構宇宙科学研究所

¹Earth & Planet. Sci., Univ. of Tokyo, ²Comp. Sci. & Eng., Univ. of Tokyo, ³RISE project, NAOJ, ⁴PERC, Chitech, ⁵ISAS/JAXA

月で過去に起きた変形の空間、時間スケールを知ることは、月内部構造の進化、特に熱進化を理解する上で重要である。本研究の目標は、かぐやで得られた地形・重力場データの最新版（地形：LALT 1/16°グリッドデータ Ver. 2.0, 重力場：SGM150j [1]）を用いて、海の玄武岩マグマ噴出後における、大規模な変形を読み解くことである。

海の玄武岩マグマは、地球のマグマと比較しても粘性が非常に小さいことが知られている [e.g., 2]。したがって、海の溶岩が大量に噴出した地域の表面地形は、噴出時のセレノイド（月のジオイド面）に沿うことが期待される。したがって、現在の表面地形と現在のセレノイドとの差は、海の溶岩噴出後に起きた変形を反映している可能性がある。そこで、まず我々は、年代決定がなされた [e.g., 3] 玄武岩ユニットに対し、セレノイドに対する表面地形の傾きを求めた。その結果、ほぼ全てのユニットにおいて、表面地形は有意に傾いていることが分かった（信頼区間 99%）。この結果は、ユニットサイズよりも大きな空間スケールの変形が海の溶岩噴出後に起きた可能性を示している。また、この傾きの大きさは若いユニット（< 25 億年）のほうが古いユニット（> 25 億年）よりも小さいことが分かった。この結果は、年代とともに変形が進行してきた可能性を示している。

更に、より大きな空間スケールの変形を調べるために、複数の海領域にまたがる球面を求めた。アポロ 17 号の軌道（16 周目）直下における高度プロファイルを解析したところ、複数の海領域にまたがる円が一つ描けることが分かった [4]。この円は、海の溶岩噴出時のセレノイドの大まかな形である可能性がある。加えて、この円の中心は現在の重心とは異なることから、重心の移動も示唆された。しかしながら、解析に用いられたのは一周回軌道のみであり、緯度方向の情報が欠落している。そこで我々は、LALT データを用いて解析領域を増やし、海の表面地形に対して（円ではなく）球をフィッティングした。その結果、球の中心は潮汐を考慮しても現在の重心とは一致しないことが分かった。この結果は、海の溶岩噴出後に、非常に大きな空間スケールでの変形があったことを示唆している。

[1] Weill et al., Proc. Lunar Sci. Conf., II, 413-430, 1971.

[2] Goossens et al., AGU Fall Meeting, Abstract P44B-05, 2011.

[3] Hiesinger et al., JGR, 105, 29,239-29,275, 2000.

[4] Brown et al., Proc. Lunar Sci. Conf., V, 3,036-3,048, 1974.

キーワード: 月, 海, セレノイド, ジオイド, 大規模変形

Keywords: Moon, Mare, Selenoid, Geoid, Large-scale deformation

全月球地震波伝播モデリング Global seismic waveform modeling in the whole Moon

豊国 源知^{1*}, 竹中 博士², 石原 吉明³, 趙 大鵬¹

TOYOKUNI, Genti^{1*}, TAKENAKA, Hiroshi², ISHIHARA, Yoshiaki³, ZHAO, Dapeng¹

¹ 東北大学 地震・噴火予知研究観測センター, ² 九州大学, ³ 国立天文台水沢

¹RCPEVE, Tohoku University, ²Kyushu University, ³NAOJ

我々はこれまでに得られている月内部構造モデルを用いて、月の全球地震波伝播モデリングを行った。現在進行している日本の月探査計画 SELENE-2 では、ロボットによる月面への広帯域地震計設置やそのデータによる内部構造探査を検討しており、月の地震波形の特徴を把握する上で、地震波伝播モデリングは有効な手段である。

月の内部構造は、アポロ計画による 1969 年から 1977 年までの 8 年間の月震観測によって、地球以外での天体では唯一、地震学的に求められている。月震観測システム稼働直後には、Nakamura (1983, *JGR*) の 1 次元構造モデルが提案され、現在の標準構造モデルとして広く使用されている。一方、2000 年以降には計算機能力や波形処理方法の向上に伴って、新たな 1 次元構造モデルが提案されている (例えば、Garcia et al., 2011, *PEPI*) ほか、3 次元不均質構造の研究も進められている。Zhao et al. (2008, *Chinese Sci. Bull.*) は、地震波走時トモグラフィーによって深さ 1000km までの速度構造を求め、月の内部は横方向に高度に不均質であることや、速度異常と深発月震の震源分布には相関があることを明らかにした。SELENE-2 計画で高感度・広帯域な地震計が設置されれば、得られた観測波形によってさらに高精度な月内部構造推定が可能となる。

このような構造モデルの進歩が続く中、現在までの知見に基づいた全球月震伝播シミュレーションは、理論面からのアプローチとして一定の意味を持つ。我々はこれまでモーメントテンソル点震源から励起され、現実的な全地球内部構造モデル中を伝播する地震波を精度と効率よくモデリングする手法の開発を行ってきた (例えば、Toyokuni et al., 2005, *GRL*; Toyokuni & Takenaka, 2006, *EPS*)。この手法は球座標系での 3 次元の地震波の支配方程式を、震源と観測点を含む地球の 2 次元断面について差分法で計算するものであり (「球座標系 2.5 次元差分法」)、断面のみに着目するため計算効率が良く、標準地球モデルを使った他手法との比較から精度も保証されている。今回は本手法を月の地震波モデリングに応用した。将来、波形情報を用いて月内部構造を推定する際には、インバージョンで理論波形の繰り返し計算が必要となるため、計算効率の良さは本手法の大きなメリットである。発表では Nakamura (1983, *JGR*) や Garcia et al., (2011, *PEPI*) の球対称構造モデル等によるシミュレーション結果を紹介する。

キーワード: 月, 地震学, 地震波伝播, 理論地震波形, グローバルモデリング, 差分法

Keywords: Moon, seismology, seismic wave propagation, synthetic seismogram, global modeling, finite-difference method (FDM)

SELENE2 測地及び地震観測による月内部構造モデルの改善 Improvement of lunar interior model by SELENE2 geodetic and seismic observations

山田 竜平^{1*}, 松本 晃治¹, 菊池 冬彦¹, 野田寛大¹, 小林 直樹², 佐々木 晶¹

YAMADA, Ryuhei^{1*}, Koji Matsumoto¹, Fuyuhiko Kikuchi¹, Hiroto Noda¹, Naoki Kobayashi², Sho Sasaki¹

¹ 国立天文台 RISE 月探査プロジェクト, ² 宇宙航空研究開発機構 宇宙科学研究所

¹National Astronomical Observatory of Japan RISE project, ²Institute of Space and Astronautical Science/Japan Aerospace Exploration Agency

現在、SELENE-2 月面着陸機ミッションでは地球物理学的な観測手法により月の内部構造を探查する事が計画されている。特に、SELENE-2 では測地観測と地震観測の両方が計画されており、これらは共に月内部物質の弾性的特性や密度を調べる上で有用であるため、両観測のデータを組み合わせて使用する事で内部構造に対してより良い制約を与える事が期待される (e.g., Garcia et al., 2011)。

SELENE-2 の測地観測としては VLBI (Very Long Baseline Interferometry) 観測と LLR (Lunar Laser Ranging) 観測が計画されている。VLBI 観測では着陸機と月周回衛星との両方に電波源を搭載し、各々から発した電波を二つの地上局で観測する (同一ビーム VLBI)。この場合、電波源の一方が月面に固定された基準点となるので、SELENE の時よりも月表側で精密に周回衛星の軌道を決めることができる。この観測で周回衛星の平均高度を比較的高く設定して、低次重力場係数やラプ数 k_2 の精度向上を狙う。LLR 観測では、着陸機にレーザー逆反射板を搭載して地球から発信したレーザーを受光、反射させることで地球-月間の距離を $\sim 1\text{cm}$ の精度で測定する。地球-月間距離の精密な測定からは月の回転運動や潮汐変形といった月の内部構造に依存した運動を検出する事ができ、月内部の弾性特性やコア-マントル境界の扁平率等の情報を得ることができる。この VLBI と LLR の観測結果を組み合わせる事により最終的に慣性モーメントと 2 次の潮汐ラプ数 (h_2, k_2) に対して SELENE で得られた結果よりも 30-70% 程度の誤差の改善を図ることが期待できる。

SELENE-2 の地震観測では広帯域地震計 (VBB (Very Broad Band)) と短周期地震計 (SP (Short-Period)) の 2 種類の地震計が軟着陸機により設置される。SELENE-2 では 1 点観測であり、観測波形のみから独立して震源位置を決定できないため、過去に行われた Apollo 地震探査で震源位置が決定されている深発月震 (e.g., Nakamura et al., 1982) や地上観測から衝突発光を検出して位置決定できる隕石衝突の波形等が観測対象となる。地震観測では、これらのイベントからコアからの反射波やモホ面での屈折変換波等を検出して月のコアサイズや着陸点付近での地殻厚さを精密に決める事が重要な課題となっている。

本研究では、上述した SELENE-2 の測地観測と地震観測で期待される結果を組み合わせることによりこれまでの月内部構造モデルがどの程度改善されるかシミュレーションを行った。このシミュレーションでは測地データとして慣性モーメント、月質量、潮汐ラプ数、地震データとして地震波走時データを用い、線形逆問題を解いて得られる内部構造モデルパラメータの a posteriori errors を評価している。現在までのシミュレーションの結果では、測地データを用いる事で特に地震波が伝搬しにくいマントル深部の S 波構造の決定精度をより大きく改善できる事を示す事ができている。また、コアサイズ、地殻厚さが地震観測で精密に決定できれば、SELENE-2 の測地データより、月地殻、マントル、コアの各平均密度を高精度で決定でき得る予備的な見解を得ている。本発表では、実行した評価結果を報告すると共に、特に SELENE-2 の測地データを利用する事による利点についての議論も行いたい。

キーワード: 月探査, 月内部構造, 重力観測, 月レーザー測距, 地震観測, VLBI

Keywords: Lunar exploration, Lunar interior structure, Gravity observation, Lunar laser ranging, Seismic observation, VLBI

月深部の状態から起源を探る：SELENE-2 測月の戦略 Exploration of lunar deep interior state: Tactics of SELENE-2 selenodesy

佐々木 晶^{1*}, 菊池 冬彦¹, 松本 晃治¹, 花田 英夫¹, 野田 寛大¹, 荒木 博志¹, 國森 裕生², 岩田 隆浩³, 船崎 健一⁴, 谷口 英夫⁴, 大坪 俊通⁵, 山田 竜平¹, 鶴田 誠逸¹, 浅利 一膳¹, 石川 利昭¹, 田澤 誠一¹, 小久保 英一郎¹
SASAKI, Sho^{1*}, KIKUCHI, Fuyuhiko¹, MATSUMOTO, Koji¹, HANADA, Hideo¹, NODA, Hiroto¹, ARAKI, Hiroshi¹, KUNIMORI, Hiroo², IWATA, Takahiro³, Kenichi Funazaki⁴, Hideo Taniguchi⁴, OTSUBO, Toshimichi⁵, YAMADA, Ryuhei¹, Seiitsu Tsuruta¹, Kazuyoshi Asari¹, Toshiaki Ishikawa¹, TAZAWA, Seiichi¹, KOKUBO, Eiichiro¹

¹ 国立天文台, ² 情報通信研究機構, ³ JAXA 宇宙科学研究所, ⁴ 岩手大学工学部, ⁵ 一橋大学

¹National Astronomical Observatory of Japan, ²National Institute of Information and Communications Technology, ³Institute of Space and Astronautical Science, JAXA, ⁴Faculty of Engineering, Iwate University, ⁵Hitotsubashi University

Precise measurements of gravity and rotation of planets are important methods to obtain the information of their internal structure. The Moon with synchronous rotation is tidally deformed by the Earth and irregular motions of the lunar rotation with small amplitude, which is called forced librations, are excited. Moreover free libration would be excited by impacts, fluid core, and orbital resonance. Dissipation of the libration terms of lunar rotation depends on the interior of the Moon, especially the state of the core and lower mantle. Effect of tidal deformation should also appear on gravity. Long-term (longer than a few months) gravity measurements can provide information of the lunar tidal deformation, appearing on lower degree of spherical harmonics function. One important scale of tidal deformation is degree 2 potential Love number k_2 , which could constrain the state of the core (solid or liquid) and viscosity of the lower mantle of the Moon. Liquid core should imply significant amount of sulfur in the core, whereas low-viscosity lower mantle should suggest the presence of water. In effect, the pressure level of lunar lower mantle is compatible with that of terrestrial asthenosphere, where water in silicate greatly reduces the viscosity. Since existence of volatiles would be incompatible with giant impact? initially hot moon hypothesis, the result of our plan might modify the evolution scenario of the Moon. The Moon should have acquired volatiles by accretion of leftovers within the gravitational well of the Earth into the lunar magma ocean.

In SELENE-2 mission, we will have VLBI radio (VRAD) sources both in the lander and the orbiter. Then, using VLBI, we will determine the orbit of the orbiter precisely to have very accurate low degree gravity coefficients, and then k_2 . A preliminary simulation has been conducted under the condition of 2-week arc length, 12-week mission length, 6 hours/day 2-way Doppler observation plus S-band same-beam VLBI observation with the VERA 4 stations. The k_2 uncertainty is evaluated as 10 times the formal error considering the errors in solar radiation pressure modeling and in lander position. Using combined the tracking data of SELENE and other missions the k_2 uncertainty is below 1 % when the orbiter inclination is 90 degree. The Love number k_2 is sensitive to the structure in deep interior. When the size of the core is 350 km in radius, k_2 value changes by about 5 % depending on the state of the core, liquid or solid.

The Lunar Laser Ranging (LLR) is the method to measure the distance between the Earth and the Moon using laser beam from the ground. For more than 40 years, LLR produced data on the lunar rotation as well as orbit. Using LLR data, the state of lunar interior is discussed. The dissipation between the solid mantle and a fluid core was discussed. LLR observation has also provided information of moment of inertia and tidal Love number of the Moon.

Instead of conventional corner cube reflector (CCR) array, we plan to have a larger single reflector in SELENE-2. The new reflector should be somewhere in the southern hemisphere on the nearside Moon. With pre-existed reflectors, latitudinal component of lunar libration and its dissipation can be measured precisely. However, among LLR parameters, k_2 and core oblateness is coupled. Once k_2 is determined by VLBI gravity measurement, we can estimate the core oblateness, which would also constrain the core and lower mantle state.

ILOM (In-situ Lunar Orientation Measurement) is an experiment to measure the lunar physical librations on the Moon by a small star-tracking telescope. Since ILOM on the Moon does not use the distance between the Earth and the Moon, the effect of orbital motion is clearly separated from the observed data of lunar rotation. ILOM will observe the lunar physical and free librations with an accuracy of 1 mas.

キーワード: 月, 下部マントル, コア, 重力, 月の回転, 揮発性物質

Keywords: the Moon, lower mantle, core, gravity, lunar rotation, volatiles

次期月探査計画 SELENE-2 の現状と科学搭載機器の開発状況 (2) Present status of next lunar landing mission SELENE-2 (2)

田中 智^{1*}, 三谷 烈史¹, 大嶽 久志¹, 小川 和律¹, 小林 直樹¹, 飯島 祐一¹, 橋本 樹明¹, 星野 健¹, 大槻 真嗣¹, 木村 淳², 倉本 圭², 佐伯 和人³
TANAKA, Satoshi^{1*}, MITANI, Takefumi¹, OTAKE, Hisashi¹, OGAWA, Kazunori¹, KOBAYASHI, Naoki¹, Yu-ichi Iijima¹, Tatsuaki Hashimoto¹, Takeshi Hoshino¹, Masatsugi Otsuki¹, KIMURA, Jun², KURAMOTO, Kiyoshi², SAIKI, Kazuto³

¹ 宇宙航空研究開発機構, ² 惑星科学研究センター / 北海道大学, ³ 大阪大学

¹JAXA, ²CPS/Hokkaido University, ³Osaka University

Japan Aerospace Exploration Agency (JAXA) considers a moon lander SELENE-2 as one of SELENE (Kaguya) follow-on missions. Mission definition of the SELENE-2 was completed in 2007 and Phase-A study has started. Concept design of the spacecraft is now undergoing. We report our up-dated mission status and development of candidate instruments onboard.

The mission status goes nowhere fast since previous report of this meeting. We are planning to take the System Requirements Review board (SRR), which is defined to be an interim review board of the phase-A study, until the second quarter of the fiscal year 2012.

For these years of Phase-A study, we have promoted technological development of the candidate instruments. Since then, our system study checked the feasibility and re-investigated configuration of the candidate instruments. As a result, some instruments were required to be major modification of the basic design and the specification for the severe limitation of the weight budget and the large change in temperature on the Moon.

In order to select the landing site candidates which maximizes the scientific return from the project, "SELENE-2 Landing Site Research Board" was organized in March, 2010 as one of the sub-teams of the SELENE-2 pre-project team. After vital discussion, the research board released an evaluation paper in Yu-seijin, the journal of the Japanese Society of Planetary Science (JSPS) this March.

In the near future, further selection board of the instruments will be held before the SRR. As of now, SELENE-2 mission team is elaborating a realistic proposal from the viewpoints of both technological readiness and severe financial condition.

キーワード: 月, 月着陸, セレーネ 2

Keywords: Moon, lunar exploration, SELENE-2

次期月探査計画セレーネ2のための月面眺望画像分光カメラ (ALIS) 開発状況と科学目的

Advanced Lunar Imaging Spectrometer for the Next Japanese Lunar Mission SELENE-2: Present State and Science Objectives

佐伯 和人^{1*}, 諸田 智克², 大嶽 久志³, 大竹 真紀子³, 杉原 孝充⁴, 本田 親寿⁵

SAIKI, Kazuto^{1*}, MOROTA, Tomokatsu², OTAKE, Hisashi³, OHTAKE, Makiko³, SUGIHARA, Takamitsu⁴, HONDA, Chikatoshi⁵

¹ 大阪大学, ² 名古屋大学, ³ 宇宙航空研究開発機構, ⁴ 海洋研究開発機構, ⁵ 会津大学

¹Osaka Univ., ²Nagoya Univ., ³JAXA, ⁴JAMSTEC, ⁵Univ. Aizu

A future lunar landing mission SELENE-2 is being planned by Japan Aerospace Exploration Agency (JAXA). In the present design, SELENE-2 consists of a lander, a rover, and a communication relay orbiter, but detailed configuration - landing site(s), mission life etc. - is now under investigation. Advanced Lunar Imaging Spectrometer (ALIS) is an imaging spectrometer which we are developing for SELENE-2 lander.

Scientific objectives of ALIS are geological investigation around the landing site by VIS/NIR (Visible and Near Infra-red light) spectroscopy, making of the photometric model of the lunar surface by repeated observation with various photometric conditions, and production of an operation map for the rover to access sampling targets such as ejecta from central peaks. ALIS has been miniaturized in order to reduce weight and electricity consumption. It has a VIS-NIR imaging spectrometer (700-1700 nm with 5 - 10 nm resolution). The spectrometer is composed of an imaging sensor (InGaAs) and a diffraction grating unit. The spectrometers take '1-line spatial resolution' x 'wavelength resolution' image as one shot. Line images are assembled by scanning image on a slit of the spectrometer with rotating ALIS body. We conducted a concept design of new ALIS and computed its thermal model and optical model to confirm its feasibility. The idea of scientific operation also will be presented.

キーワード: 月, リモートセンシング, ハイパースペクトルセンサー, 着陸機

Keywords: the Moon, remote sensing, hyper spectral sensor, lander

SELENE-2 搭載を目指したその場元素分析のためのガンマ線分光計の開発状況 Development of gamma-ray spectrometer for in-situ observations of elemental composition for SELENE-2

三谷 烈史^{1*}, 田中 雅士², 小林 進悟³, 唐牛 謙¹, 長谷部 信行²

MITANI, Takefumi^{1*}, TANAKA, Masashi², KOBAYASHI, Shingo³, KAROUJI, Yuzuru¹, HASEBE, Nobuyuki²

¹ 宇宙航空研究開発機構, ² 早稲田大学, ³ 放射線医学総合研究所

¹Japan Aerospace Exploration Agency, ²Waseda University, ³National Institute of Radiological Sciences

月の起源と進化を理解するためには月表層の物質組成は有用な情報であり、さらに月深部物質の情報が得られると月の三次元的な物質分布を推定することにつながり、月起源に関わる月バルク組成や月初期進化を解明する上で重要なマグマオーシャンとその後の月火山活動のメカニズムに対して制約を与えることができる。月周回衛星 *Kaguya* 搭載のガンマ線分光計による遠隔探査では、月探査史上最高の精度で月全球の表層元素分布データを取得した (e.g. Hasebe et al 2008, Kobayashi et al 2010, Yamashita et al 2010)。しかし、周回軌道からの観測では空間分解能に限界があり、様々な解析手法を駆使したとしても 40km 程度の空間分解能でしか元素定量ができない。今後、月深部物質の情報を獲得するためには、月深部が露出していると考えられている特徴的な地点 (クレータ中央丘、南極エイトケン盆地、溶岩流上) に着陸し、表面のレゴリスや岩石を調査し、周回軌道からの観測では実現不可能な空間スケールでの元素定量を行なうことが重要である。

そこで我々は、月着陸実証を中心とした次期月探査計画 SELENE-2 に搭載するために、ガンマ線分光計 (GRS) の開発を進めている。GRS では、月進化過程で特徴的な挙動をする自然放射性元素 K,Th の量を測定し、表側に広がる Th に富む領域 Procellarum KREEP Terrain (PKT) 地域の形成過程や月の火山活動、バルク組成に対して重要な制約を与えることができると考えている。月を構成する主要元素についても、銀河宇宙線を励起源として利用することにより能動的な励起源を使用しなくても計測でき、岩石の同定ができる。サンプルの切断・研磨の必要が無い点は、計測そのものが容易でリスクが低い点で特徴的である。そのため将来のサンプルリターン時のその場における岩石サンプルの分析・判定に有用であり、SELENE-2 GRS はその技術検証という意味も持つ。

GRS は表面移動探査機 (ローバ) に搭載し常に測定モードを保つことを想定している。ローバで移動しながら着陸点周辺のレゴリスを数メートルの空間分解能で計測し、元素組成を決める。主検出器として LaBr₃ シンチレータ結晶を用いることを検討している。LaBr₃ 検出器は、*Kaguya*-GRS で使用した Ge 半導体検出器には及ばないものの、Apollo、Lunar Prospector、Chang'E-1 に搭載されたガンマ線分光計よりも優れたエネルギー分解能を有し、元素弁別能力や最小検出感度が高い。さらに LaBr₃ は、Ge 検出器よりも小型軽量・低消費電力で温度・放射線・振動環境に対する強い耐性という点で優れている。

我々は、月面の厳しい温度環境下において目標とする元素定量精度を得られることを実証するために、できる限り衛星搭載に近い状態を模擬し、温度試験を進めている。本発表では、サイエンス目標、目標感度について整理し、こうした検出器の開発状況、技術的な実現性の見通しについて報告する。特に LaBr₃ 結晶と光電子増倍管の組み合わせで -30 から 100 °C で実施した試験結果を中心に報告する。

キーワード: SELENE-2, 月探査, ガンマ線分光計

Keywords: SELENE-2, Lunar exploration, gamma-ray spectrometer

SELENE-2 月面設置観測機器のための温度制御機構 (月面サバイバルモジュール) の開発状況

Development status of thermal control unit for lunar surface scientific instruments in SELENE-2 mission

小川 和律^{1*}, 飯島 祐一¹, 坂谷 尚哉¹, 大嶽 久志¹, 田中 智¹

OGAWA, Kazunori^{1*}, Yu-ichi Iijima¹, SAKATANI, Naoya¹, OTAKE, Hisashi¹, TANAKA, Satoshi¹

¹ 宇宙航空研究開発機構

¹ Japan Aerospace Exploration Agency

現在、次期月着陸探査として計画中の SELENE-2 ミッションにおいて月面に設置する科学観測機器のための熱制御装置 (月面サバイバルモジュール) の開発を進めている。

SELENE-2 では、月震計、磁力計、熱流量計、VLBI 電波源の 4 種の観測機器が、月面で越夜を含む長期的観測を実施することを提案している。これらの機器は主に月の内部構造の調査を目的とするもので、地震波速度構造、電気伝導度構造、温度構造、慣性モーメントなどの情報を得て、内部の密度、物理状態、組成、地殻厚、コアの有無などについての制約条件を推定し、月の起源、熱史などの議論を発展させることができる。

月面は粒径が 50 μm 程度の粉体で覆われており、真空のため熱伝導率が極めて低い。このため、地表温度が昼と夜で -200 から 100 程度と大きく変動し、それぞれが 2 週間続く。そのような環境の中で機器を正常に保つには、適切に機器温度を制御する機構 (昼間は熱を効率よく排熱し、かつ夜はなるべく断熱して暖めるという矛盾する機構) が必要となる。開発中の装置は、このような機構を持ち、月面の厳しい温度環境下でなるべく長期間にわたって観測を可能にすることを目的とする。

特に月震計は月面との機械的なカップリングが不可欠であるため、月面との断熱が難しく、熱設計が困難を極める。

我々が提案するのは、機器と周囲の地面を山形の多層断熱膜 (MLI) で覆い、内部機器を月面地下の温度安定層と積極的に熱結合させるという手法である。この環境をうまく利用する手法により、昼夜の温度変動を 0 から 40 までの範囲に抑える。

これまで、モジュール内各部の概念検討を終え、それを反映して詳細化した熱モデル計算により、サバイバルモジュールの可能性を示してきた。また要素試作品の試験によって熱モデルの妥当性を検証し、実現性を示してきた。現在は、これらの結果を統合してサバイバルモジュール全体の試作機を製作するため、設計を開始した。これらの状況を報告する。

キーワード: SELENE-2, 熱設計, 越夜, 月面

Keywords: SELENE-2, thermal design, Moon

SELENE-2/VLBI 電波源の開発状況 Recent status of SELENE-2/VLBI instrument

菊池 冬彦^{1*}, 松本 晃治¹, 岩田 隆浩², 花田 英夫¹, 鶴田 誠一¹, 浅利一善¹, 河野裕介³, 山田 竜平¹, 石原 吉明¹, 佐々木 晶¹, 鎌田 俊一⁴, Sander Goossens⁵

KIKUCHI, Fuyuhiko^{1*}, MATSUMOTO, Koji¹, IWATA, Takahiro², HANADA, Hideo¹, Seitu Tsuruta¹, Kazuyoshi Asari¹, Yusuke Kono³, YAMADA, Ryuhei¹, ISHIHARA, Yoshiaki¹, SASAKI, Sho¹, KAMATA, Shunichi⁴, Sander Goossens⁵

¹ 国立天文台 RISE 月探査プロジェクト, ² 宇宙航空研究開発機構 宇宙科学研究本部, ³ 国立天文台水沢 VLBI 観測所, ⁴ 東京大学, ⁵ NASA/GSFC

¹RISE Project, NAOJ, ²ISAS, JAXA, ³Mizusawa VLBI Observatory, ⁴University of Tokyo, ⁵NASA/GSFC

次期月着陸探査計画 SELENE-2 へと提案している VLBI 電波源では、月周回衛星と月面設置機器に VLBI 用電波源を搭載し、同一ビーム VLBI という手法を用いて周回衛星の高精度位置決定・月重力場モデルの改良を行う。本講演では各種の開発課題に関する検討状況について報告する。

キーワード: セレーネ 2, 内部構造, 超長基線電波干渉計

Keywords: selene2, internal structure, VLBI

SELENE-2 月電磁探査装置 (LEMS) によって観測される月の電磁応答 Lunar electromagnetic response to be observed by Lunar ElectroMagnetic Sounder (LEMS) in the SELENE-2 mission

松島 政貴^{1*}, 清水 久芳², 藤 浩明³, 吉村 令慧⁴, 高橋 太¹, 綱川 秀夫¹, 渋谷 秀敏⁵, 松岡 彩子⁶, 小田 啓邦⁷, 飯島 祐一⁶,
小川 和律⁶, 田中 智⁶

MATSUSHIMA, Masaki^{1*}, SHIMIZU, Hisayoshi², TOH, Hiroaki³, YOSHIMURA, Ryokei⁴, TAKAHASHI, Futoshi¹, TSUNAKAWA,
Hideo¹, SHIBUYA, Hidetoshi⁵, MATSUOKA, Ayako⁶, ODA, Hirokuni⁷, IJIMA Yuichi⁶, OGAWA, Kazunori⁶, TANAKA,
Satoshi⁶

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

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

The present status of lunar interior structure is a consequence of the thermal history of the Moon. Therefore information on its internal structure is a key issue to understand the lunar origin and evolution. The electrical conductivity structure, which is independent of the seismic velocity structure, is important to estimate the thermal structure in the lunar interior, since the electrical conductivity of silicates has a strong temperature dependence. Hence, we propose a lunar electromagnetic sounder (LEMS) to estimate the electrical conductivity structure of the Moon.

Temporal variations in the magnetic field of lunar external origin induce eddy currents in the lunar interior, which in turn generates the magnetic field of lunar internal origin. In the SELENE-2 mission, the inducing magnetic field is to be measured by two triaxial fluxgate magnetometers onboard a lunar orbiter, and the induced field as well as the inducing field is to be measured by two triaxial fluxgate magnetometers onboard a lunar lander. We plan to use dual magnetometer technique as mentioned above to avoid strict electromagnetic compatibility requirements like those for the Kaguya spacecraft.

Here we present a current status of the LEMS mission. We also show electromagnetic response of the Moon by assuming electrical conductivity structures of the lunar interior. It turns out that the magnetic field data as obtained in the Apollo mission are insufficient to estimate the electrical conductivity structure for the outermost few hundred kilometers of the Moon because of the low sampling frequency. Estimation of lunar electromagnetic response was attempted by using the magnetic field data obtained by the lunar magnetometer (LMAG) onboard the Kaguya spacecraft. Although the magnetic field data at higher frequencies are available, it is difficult to estimate electromagnetic response only by the lunar orbiter. Thus it is very significant to measure the magnetic field by both a lunar lander and a lunar orbiter in the SELENE-2 mission.

Keywords: electromagnetic sounding, lunar interior, SELENE-2

SELENE-2における月広帯域地震観測について On lunar broadband seismic observation in SELENE-2

小林 直樹^{1*}, 白石 浩章¹, 岡元 太郎², 竹内 希³, 村上 英記⁴, 久家 慶子⁵, 趙 大鵬⁶, 小川 和律¹, 飯島 祐一¹, 鹿熊 英昭⁷, 田中 智¹, 山田 竜平¹⁵, 川村 太一¹, 石原 靖⁸, 荒木 英一郎⁸, 早川 雅彦¹, 白井 慶¹, 藤村 彰夫¹, 山田 功夫⁹, フィリップ・ロニョーン¹⁰, ディビット・ミモウ¹¹, ドメニコ・ジャルジニ¹², アントニ・モケ¹³, ユーリッヒ・クリステンゼン¹⁴, ピーター・ツヴァイフェル¹², デイバー・マンズ¹², ヤン・テン・ピーリック¹², ラファエル・ガルシア¹¹, ジニン・ギャンペインベイン¹¹, セバスチャン・デロウコート¹¹

KOBAYASHI, Naoki^{1*}, SHIRAI, Hiroaki¹, OKAMOTO, Taro², TAKEUCHI, Nozomu³, MURAKAMI, Hideki⁴, KUGE, Keiko⁵, ZHAO, Dapeng⁶, OGAWA, Kazunori¹, Yuichi Iijima¹, KAKUMA, Hideaki⁷, TANAKA, Satoshi¹, YAMADA, Ryuhei¹⁵, KAWAMURA, Taichi¹, ISHIHARA, Yasushi⁸, ARAKI, Eiichiro⁸, HAYAKAWA, Masahiko¹, SHIRAI, Kei¹, FUJIMURA, Akio¹, YAMADA, isao⁹, Philippe Lognonne¹⁰, David Mimoun¹¹, Domenico Giardini¹², Antoine Mocquet¹³, Ulrich Christensen¹⁴, Peter Zweifel¹², Davor Mance¹², Jan ten Pierick¹², Raphael Garcia¹¹, Jeannine Gagnepain-Beyneix¹¹, Sebastien de Raucourt¹¹

¹ 宇宙航空研究開発機構宇宙科学研究所, ² 東京工業大学大学院地球惑星科学専攻, ³ 東京大学地震研究所, ⁴ 高知大学理学部応用理学科, ⁵ 京都大学大学院地球惑星科学専攻地, ⁶ 東北大学地震・噴火予知研究観測センター, ⁷ 財団法人地震予知総合研究振興会, ⁸ 海洋研究開発機構, ⁹ 中部大学, ¹⁰ パリ地球物理学研究所, ¹¹ トゥールーズ大, ¹² チューリッヒ工科大, ¹³ ナンテ大, ¹⁴ マックスプランク研究所, ¹⁵ 国立天文台 RISE 月探査プロジェクト

¹ ISAS/JAXA, ² Dept. Earth and Planet. Sci., Tokyo Tech, ³ ERI, University of Tokyo, ⁴ Dept. Applied Science, Kochi Univ., ⁵ Dept. Geophysics, Kyoto Univ., ⁶ Dept. Geophysics, Tohoku Univ., ⁷ Assoc. Develop. Earthquake Predict., ⁸ JAMSTEC, ⁹ Chubu Univ., ¹⁰ IPGP, ¹¹ University of Toulouse, ¹² ETHZ, ¹³ University of Nantes, ¹⁴ MPI, ¹⁵ NAO Rise project

SELENE2 ミッションは我が国初の月着陸探査である。着陸機に搭載する科学観測機の有力な候補として我々は広帯域地震計を提案している。本発表ではアポロ探査で行われた月震観測を踏まえ広帯域地震観測の必要性和アポロの地震計測の結果に基づき設定した科学目標および地震計の開発状況の進捗を紹介する。

1970年代に行われたアポロ月探査ミッションでは12,14,15,16号の各着陸地点に長周期地震計(3成分)と短周期地震計(1成分)を設置し、一辺が約1000kmの三角形の観測ネットワークを構成して月震観測を行った。観測は1977年9月まで7年以上に亘り月震の活動(発震機構, 時間・空間分布, 頻度分布)に関する情報や深さ約1000kmまでの地殻およびマントル構造の概略を決定するなど多くの成果をもたらした。しかし,(1)ネットワークの規模が1000kmと限られること,(2)最も頻繁に発生する深発月震の振幅は観測感度限界付近であり, 感度幅も0.17Hz程度の非常に狭い帯域での観測であった。感度の限界近くの上長時間に及ぶ散乱コーダにより, 地震波の到達時刻の読み取りには数秒から数十秒以上の誤差が生じている。そのため, 特に深発月震の記録に頼らざるを得ない200km以深の月構造の不確かさは大きい。

SELENE2では着陸機は1機のみであり, それ自体では地震観測網を作ることはできない。そのため, 上記(2)の問題を克服した高感度(アポロの約10倍)な広帯域(0.02-50Hz)地震計を用い, 微弱な月震波形からより多くの情報を引き出すことを試みる。地殻散乱特性の卓越周波数は0.12Hzほどであり, これより長周期で観測すれば内部の不連続面での反射, 変換波が明瞭となるはずである。長周期広帯域波形は月深部構造の解明に役立つであろう。一方, 短周期成分では深発月震のコーナー周波数の決定を目指す。深発月震のコーナー周波数は地球の地震や浅発月震のものに比べ低いことが指摘されているがアポロ地震計の帯域問題のためはっきりしない。コーナー周波数の決定は深発月震の発生領域の物理状態を知る手掛かりにもなる。

こうした高感度広帯域低ノイズ地震計を限られた開発期間で実現するためにLunar-Aで開発された短周期速度型地震計(SP)とExoMars計画の搭載機器として開発が進められた仏のVBB広帯域地震計(LP)をパッケージ化する。更に両者を月面環境に合わせて最適化を行なっている。過酷な月面環境で長期観測を可能にするためのサバイバルモジュールの開発も進めている。温度変化の激しい月面環境においてサバイバルモジュール技術は地震計測の成否の鍵となっている。こうした極端環境での観測に適した地震計測技術は地球環境下での観測にも応用が期待できる。本講演では, 月広帯域地震計(LBBS)の設計, 改良検討について昨年度の報告から進展した点についても紹介する。特に散乱の地震波観測への影響についての数値シミュレーションや欧州側の機器との電氣的・機械的な噛み合わせ試験の結果について報告する。

キーワード: 月, 月震, 内部構造, 広帯域地震計

Keywords: moon, moonquake, internal structure, broadband seismometer

3軸姿勢制御衛星用ペネトレータ分離機構の開発

Development of separation mechanism of lunar penetrator module for installation in a three-axis stabilized satellite

白石 浩章^{1*}, 小林 直樹¹, 早川 雅彦¹, 田中 智¹, 村上 英記², 早川 基¹

SHIRAIISHI, Hiroaki^{1*}, KOBAYASHI, Naoki¹, HAYAKAWA, Masahiko¹, TANAKA, Satoshi¹, MURAKAMI, Hideki², HAYAKAWA, Hajime¹

¹ 宇宙航空研究開発機構, ² 高知大学理学部応用理学科

¹Japan Aerospace Exploration Agency, ²Department of Applied Science, Faculty of Science, Kochi University

月内部構造探査用に開発されたペネトレータモジュールは地震計、熱流量計などの科学観測機器を搭載したペネトレータ本体のほか、月周回速度成分をキャンセルする軌道離脱モータと月面への垂直貫入のために90度姿勢変更するラムライン制御システムから構成されている。ペネトレータを月や惑星などの表面に投下設置するためにはクルージング中には周回衛星に把持され、天体の周回軌道から放出・分離するための機構が必要となる。特に、月のような大気のない天体ではペネトレータモジュールの形状中心軸と長手方向の重心軸のズレ、重心位置・慣性能率の調整量のほか、周回衛星搭載時の取り付けアライメント誤差、軌道離脱モータの推力軸誤差と分離直後のティップオフ量が突入時の貫入迎角に大きな影響を与えることが分かっている。垂直貫入からのズレを表す貫入迎角の大小はペネトレータの潜り込み深さ、停止姿勢角および貫入衝撃モード(せん断力、曲げ荷重)に直結し、ひいてはペネトレータの科学観測の成果と通信運用への影響が懸念されるパラメータである。旧LUNAR-Aプロジェクトでは120rpmまで高速スピニングした周回衛星からfrisbee状に分離する方式を採用した機構を開発済みであるが、ペネトレータシステムの搭載機会を増やす意味でも3軸姿勢制御型の衛星に適用できる分離機構の開発が必須である。また、スピン衛星用の分離方式では地上でのフルサイズのペネトレータモジュールを用いたEnd-to-End試験を実施することが困難であることが指摘されていたことから、新規に開発する3軸姿勢制御搭載用の分離機構については具体的な地上検証方法もあらかじめ検討しておく必要がある。ロシアが2010年代に計画するLUNA-GLOB月探査シリーズで使用される衛星は3軸姿勢制御型であり、我々の開発したペネトレータモジュールとほぼ同一仕様のまま搭載する際の重要な技術課題として挙げられていた。2007年以降の検討会議ではロシア側からMars96プロジェクトで採用された火星ペネトレータ用をベースにした分離機構が提案されたが、LUNAR-A型ペネトレータモジュールとのインターフェース条件を解析等で検討したところ、要求する機能・性能を満足していないことが予想された。そのため、複数の分離方式案についてトレードオフスタディーと地上試験の検証方法について日本側独自の検討を行っているところである。本発表では分離機構の検討経緯と2011年度から開始している要素モデルによる検証計画の概要と試験結果について報告を行う予定である。

キーワード: ペネトレータ, 分離機構, 3軸姿勢制御衛星, 月探査, 内部構造

Keywords: penetrator, separation mechanism, 3-axis stabilized satellite, lunar exploration, internal structure

月の回転観測のための月面小型デジタル望遠鏡の開発 Development of a Small Digital Telescope for Observations of Lunar Rotation

花田 英夫^{1*}, 鶴田誠逸¹, 荒木 博志¹, 浅利一善¹, 田澤 誠一¹, 野田 寛大¹, 石原 吉明¹, 松本 晃治¹, 佐々木 晶¹, 船崎健一², 佐藤 淳², 谷口英夫², 加藤大雅², 菊池 護², 村田孝平², 伊藤陽介², 千葉皓太², 若松宏史², 郷田直輝³, 矢野太平³, 丹羽佳人³, 山田良透⁴, 國森 裕生⁵, PETROVA, Natalia⁶, GUSEV, Alexander⁶, PING, Jinsong⁷, 岩田隆浩⁸, 日置 幸介⁹
HANADA, Hideo^{1*}, TSURUTA Seiitsu¹, ARAKI, Hiroshi¹, ASARI Kazuyoshi¹, TAZAWA, Seiichi¹, NODA, Hiroto¹, ISHIHARA, Yoshiaki¹, MATSUMOTO, Koji¹, SASAKI, Sho¹, FUNAZAKI Kenichi², SATOH Atsushi², TANIGUCHI Hideo², KATO Hiromasa², KIKUCHI Mamoru², MURATA Kohei², ITO Yosuke², CHIBA Kouta², WAKAMATSU Hiroshi², GOUDA Naoteru³, YANO Taihei³, NIWA Yoshito³, YAMADA Yoshiyuki⁴, KUNIMORI, Hiroo⁵, PETROVA, Natalia⁶, GUSEV, Alexander⁶, PING, Jinsong⁷, IWATA Takahiro⁸, HEKI, Kosuke⁹

¹ 国立天文台 RISE, ² 岩手大学工学部, ³ 国立天文台 JASMINE, ⁴ 京都大学理学部, ⁵ 情報通信研究機構, ⁶ カザン大学, ⁷ 上海天文台, ⁸ 宇宙航空研究開発機構・宇宙科学研究所, ⁹ 北海道大学理学研究院

¹RISE/NAOJ, ²Iwate Univ., ³JASMINE/NAOJ, ⁴Kyoto Univ., ⁵NICT, ⁶Kazan Univ., ⁷Shanghai Astronomical Observatory, ⁸ISAS/JAXA, ⁹Hokkaido Univ.

月面天測望遠鏡 (ILOM: In-situ Lunar Orientation Measurements) 計画は、月の回転を 1 ミリ秒角以下の精度で観測して、月の中心核の状態を調べることを目標とし、「かぐや」に続く次期月探査計画の中で実現するために技術開発を続けている。この望遠鏡は、PZT (写真天頂筒) 型の特別な小型のデジタル望遠鏡で、すでに BBM (ブレッドボードモデル) を開発し、月の環境下での光学性能や駆動性能を知るためにいくつかの実験をした。

月面で精密観測を行う場合に最も重大な問題の一つである、大きな温度変化の影響を避けるために 2 つの方法を提案する。一つは回折レンズを用いることで、もう一つは、温度変化による星像分布のずれをモデルで補正することです。回折レンズを導入することによって、1 ミリ秒角の観測を行うために許される温度条件が約 1 桁緩和され、5 度の温度変化まで許されることを、光線追跡法によって示した。もう一つの方法については、温度の一次関数のモデルによって、一様な温度変化に対して CCD 上で 0.03nm、または 10 マイクロ秒角以下の精度で近似することに成功した。

姿勢制御システムは、鏡筒を 0.006 度 (約 20 秒角) の誤差に保つことができ、この角度誤差の範囲では、PZT の補償機能によって 1 ミリ秒角の精度には影響しない。月面環境での駆動機構の性能を調べるために真空試験を段階的に真空度を上げながら何回か行っているが、これまでのところ深刻な問題は発生していない。

また、星像中心位置決定精度に影響を与える可能性がある光学的な要素、たとえば、焦点ずれ、ゴースト、迷光、散乱光、不要次数光、水銀面の振動の影響についても、光線追跡法による解析と実験によって調べているが、まだ実験中である水銀面の振動の影響を除いて、他の影響はすべて 1mas より十分小さいことを示した。

キーワード: 月回転, 望遠鏡, 写真天頂筒, 物理ひょう動, 内部構造

Keywords: Lunar rotation, telescope, PZT, physical libration, internal structure

次期月計画サンプルリターンシステムの概念検討 A study of future lunar exploration system for sample return

岩田 隆浩^{1*}, 加藤 學¹, 田中 智¹, 岡田 達明¹

IWATA, Takahiro^{1*}, KATO, Manabu¹, TANAKA, Satoshi¹, OKADA, Tatsuaki¹

¹JAXA 宇宙科学研究所

¹ISAS/JAXA

次期月探査計画検討ワーキンググループでは、運用を終了した「かぐや」とプリプロジェクトとして検討が進められている SELENE-2 での技術開発実績、科学成果を踏まえ、さらに続く月探査（仮称：SELENE-3）の方向性を検討している。この中で、特にサンプルリターン、内部構造探査、月面環境利用の必要性が高いと判断し、これを実現させるために必要な技術獲得を主テーマとした。続いて、これらを含む衛星システムとして、特に我が国の太陽系探査において初の経験となる、月サンプルを保持して地球に帰還するシステムの検討を行った。

月のサンプルリターンにおいては、科学探査や利用調査の目的にとって適切な試料を回収・選別し、地球に持ち帰って高精度な分析に供すると同時に、月への自由自在な往復探査技術を習得する。本研究では、様々な着陸点を想定した場合に、帰還機を中心とした探査機システムの構成・リソースがどのような姿となり、またミッションに制約を与えるかを比較検討した。具体的には、探査地点として月の表の低緯度、裏の低緯度、極域を候補地として与え、かつ、1箇所の場合と複数のランダーによる複数箇所との比較も行った。また、サンプル採取範囲として、ランダーに搭載したアームの届く約 1m の範囲と、ローバが越夜しないで捜査・帰還できる約 100m の範囲の場合とを比較検討した。打上げロケットとしては、H-IIA204 および H-IIB を候補とし、軌道投入から月面難着陸までのシステムとして SELENE-2 を、再突入力カプセルおよびカプセル内のサンプル・サブシステムとしては「はやぶさ」をベースとした。帰還軌道には、月周回軌道を経て地球遷移軌道に変換する場合と直接地球遷移軌道に投入する場合があります、その得失は着陸点の緯度にも依存することが明らかになった。本検討による、宇宙機（着陸機、帰還機、周回機）の機器構成、リソース（質量、電力）、ミッションプロファイル、主要イベント、運用シーケンスについて示す。特に、月からの離陸システム、月から離陸する機体と月周回機のランデブードッキング、帰還機の誘導制御について、技術的成立性を論じる。

キーワード: 月, SELENE-3, サンプルリターン

Keywords: Moon, SELENE-3, sample return

KAGUYA-LALTの月地形データ検証 - LRO-LOLA との比較 - Evaluation of the lunar laser topographic data by KAGUYA-LALT - comparison with LRO-LOLA -

荒木 博志^{1*}, 田澤 誠一¹, 石原 吉明¹, 野田 寛大¹, 佐々木 晶¹

ARAKI, Hiroshi^{1*}, TAZAWA, Seiichi¹, ISHIHARA, Yoshiaki¹, NODA, Hiroto¹, SASAKI, Sho¹

¹ 国立天文台

¹National Astronomical Observatory of Japan

「かぐや」月周回衛星(2007-2009)搭載のレーザ高度計 LALT は、約 2206 万点の月面測距データを取得し、そこから選択された約 1034 万点の地形データを使った全球及び極域(北緯・南緯それぞれ 79°以上)のグリッドデータが作製され、2009 年 11 月 1 日から一般公開されている。2012 年 1 月 19 日からは「かぐや」主衛星軌道の改定などに基づく ver.2 を公開している。

全球グリッドデータの分解能は 1/16 (赤道域で 1.895km)、極域グリッドデータの分解能は緯度方向に 1/128 (0.237km)、経度方向 1/32 (0.947km) であるが、直径 10km 程度のクレータなど、地形のラフネスが大きいところはレーザのリターン率が悪いのでデータが乏しく、小クレータがドーム状に表現されることもある(Korokhin et al., 2010)。これはコンピュータによる自動地形補間でグリッドを作製する限り必ず付きまとう問題である。そのため我々は、LALT データを Lunar Reconnaissance Orbiter (LRO) 搭載のレーザ高度計 (LOLA) のデータと比較し、LALT グリッドデータの地形再現性について評価を行っている。両者を比較することでそれぞれの準拠する月固定座標系 (Mean Earth / Polar Axis Lunar reference system) の差異についても評価できるので、合せて結果を公表する予定である。

Korokhin et al., 2010, Removal of topographic effects from lunar images using Kaguya (LALT) and Earth-based observations, Planet. Space Sci., 58, 1298-1306.

キーワード: 月地形, 比較, レーザ高度計, グリッド, LALT, LOLA

Keywords: Lunar topography, Comparison, Laser altimeter, grid, LALT, LOLA

かぐや搭載 LALT の測距エラーについて On the range measurement error of LALT aboard KAGUYA

野田 寛大^{1*}, 荒木 博志¹, 田澤 誠一¹, 石原 吉明¹

NODA, Hiroto^{1*}, ARAKI, Hiroshi¹, TAZAWA, Seiichi¹, ISHIHARA, Yoshiaki¹

¹ 国立天文台

¹National Astronomical Observatory of Japan

The Laser Altimeter (LALT) aboard lunar explorer KAGUYA (SELENE), which was launched in September 2007 and operated until June 2009, measured the distance between the satellite and the lunar surface, and achieved the first accurate lunar topographic map including polar regions (Araki et al 2009). Originally it was designed so that range measurements could be done for slope terrain with 30 degrees from 100 km orbit with the laser energy of 100 mJ. However, decrease of the laser energy down to 70 mJ occurred in the beginning of the nominal mission phase. In addition, due to a sudden decrease in the laser energy on 14, April 2008, the observation was suspended for a while, and intermittent observation was carried out until the end of the nominal mission phase (October 2008) for the investigation. In the nominal mission period, range measurement sometimes failed in the slope regions because the light bounced on the surface was not detected with sufficient intensity. In this report we investigate such situation by using laser energy telemetry, distance between the satellite and the lunar surface, slope, and reflectance of the surface.

references: Araki et al. (2009) Science 323, 897-900.

キーワード: かぐや, レーザ高度計, LALT

Keywords: Kaguya, Laser altimeter, LALT

かぐや衛星観測データに基づいた月玄武岩層の誘電率推定

Estimation of the permittivity of the lunar basalt layer based on the Kaguya observation data

石山 謙^{1*}, 熊本 篤志¹, 小野 高幸¹, 山口 靖², 春山 純一³, 大竹 真紀子³, 加藤 雄人¹, 寺田 直樹¹, 押上 祥子²

ISHIYAMA, Ken^{1*}, KUMAMOTO, Atsushi¹, ONO, Takayuki¹, YAMAGUCHI, Yasushi², HARUYAMA, Junichi³, OHTAKE, Makiko³, KATO, Yuto¹, TERADA, Naoki¹, OSHIGAMI, Shoko²

¹ 東北大学, ² 名古屋大学, ³ 宇宙航空研究開発機構/宇宙科学研究本部

¹Tohoku University, ²Nagoya University, ³JAXA/ISAS

かぐや衛星に搭載された Lunar Radar Sounder (LRS) は、複数の月の海で地下エコーを発見した [Ono et al., 2009]。LRS で検出された地下エコーの深さ (T) は、 $T=(c/(E_r^{0.5}))t/2$ で計算され、数百メートル前後のものが多い。c は真空中の光の速さ、t は表面エコーからの地下エコーの遅延時間、 E_r は地下層の比誘電率である。月の表面から採取された玄武岩試料の比誘電率範囲は、4-11 である [e.g., Carrier et al., 1991]。これらの値は、溶岩流の厚みの粗い見積もりとして使用されるが、厳密な溶岩流の厚みを求めるために、我々はより信頼できる玄武岩層の誘電率を調べる必要がある。このため、合成開口処理した LRS データ [Kobayashi et al., 2011]、TC データ [Haruyama et al., 2008] および MI データ [Ohtake et al., 2008] を使用し、湿りの海の Unit 85 [Hackwill et al., 2006]、スミスの海の Unit Sy1 [Hiesinger et al., 2010]、晴れの海の S13 [Hiesinger et al., 2000] において、誘電率推定を我々は行った。比誘電率は、 $E_r=(ct/(2T))^2$ で計算した [Ono and Oya, 2000]。

T を求めるため、Weider et al. [2010] と同様に、衝突クレーターまわりのイジェクタに注目した。隕石が月面に衝突し、月表層とは異なる組成 (TiO_2 や FeO [wt.%]) の地下層を掘り返した場合、クレーター周辺に形成されたイジェクタは表層の組成とは異なる。我々は、MI データより月表層とイジェクタ組成の比較を行い、表層組成とは異なる組成を示したイジェクタをもつクレーター (以後、ハロー有りクレーター) と、表層組成と同じ組成を示したイジェクタをもつクレーター (以後、ハロー無しクレーター) の判別を各溶岩 Unit 内で行った。また、TC データより、これらのクレーターの深さを調べ、ハロー有りクレーターとハロー無しクレーターの深さの組み合わせにより、それらのクレーター位置付近における層境界の深さの範囲を決定した。その際、地下構造の不均一性を考慮するため、できる限りハロー有りクレーターとハロー無しクレーターは近い位置にある必要がある。本研究では、ハロー有りクレーターの中心から 6km 以内の一番深いハロー無しクレーターを選んだ。一方、 $ct/2$ を求めるため、合成開口処理を行った LRS データを使用した。その LRS データの空間分解能は、軌道方向に 600m、軌道の垂直方向に 5km である [Kobayashi et al., 2011]。本研究では、各クレーター中心から 2.5km 以内の軌道データを使用し、連続した地下エコーが確認された場合のみ、 $ct/2$ が決定した。もし、高地物質をイジェクタに多く含むクレーターならば、一番深い地下エコーの深さは高地と海の境界を反映していると考え、一番深い地下エコーの深さを採用し、誘電率の計算を行った。また、イジェクタに高地物質を多く含まないクレーターならば、一番浅い地下エコーの深さは溶岩流と溶岩流の境界を反映していると考え、一番浅い地下エコーの深さを採用し、誘電率の計算を行った。イジェクタは掘られた層の混合により形成されていると考えられているため [e.g., Weider et al., 2010]、本研究では、もし高地物質がイジェクタに含まれるのであれば、イジェクタは高地と海における TiO_2 や FeO 量の中間の量を示すと仮定し、イジェクタの高地物質の存在の有無を組成量から判断した。

結果として、Unit 85 と Sy1 では、大まかに高地と海の中間組成を示したクレーターが発見され、Unit S13 では発見されなかった。よって、Unit 85 と Sy1 では一番深い地下エコー、Unit S13 では一番浅い地下エコーを使用し、比誘電率を計算した。各 Unit における比誘電率は、Unit 85 で 3.3-6.0、Unit Sy1 で 3.0-5.7、Unit S13 で 1.7-5.8 となった。これらの範囲は、考えられる比誘電率の上限値と下限値の範囲である。また、経験的に比誘電率は、 $E_r=(1.93 \pm 0.17)^p$ として表現され、バルク密度 (ρ) の関数である [Olhoeft and Strangway, 1975]。推定したバルク密度は Unit 85 で 1.8-2.7 g/cm^3 、Unit Sy1 で 1.7-2.6 g/cm^3 、Unit S13 で 0.8-2.7 g/cm^3 である。アポロ計画で採取された玄武岩粒子 (空隙のない玄武岩) の平均密度は、 $>3.32 g/cm^3$ である [Carrier et al., 1991]。よって、今回推定された誘電率の最大値でさえ、それよりも低い。この原因として考えられる要因は、溶岩の組成、溶岩中の気泡や亀裂、溶岩チューブなどの空隙、地下の低密度のレゴリス層の存在などが挙げられる。以上の観測および推定結果から可能な月の地下の状態を考える。例えば、低い誘電率が空隙だけに起因する場合、空隙率 (n) は $n=1-p/3.32$ として計算できるとすれば、各 Unit における推定した空隙率の下限値は約 18-20% である。したがって、本研究の結果は、少なくとも、その程度の空隙が月の地下数百メートル以内に存在する必要性を示唆することになる。

光学データを用いた晴れの海のHFレーダ反射面の同定と層構造の推定 The layered structure of lunar maria: Identification of the HF-radar reflector in Mare Serenitatis using optical images

押上 祥子^{1*}, 奥野 信也¹, 山口 靖¹, 大竹 真紀子², 春山 純一², 小林 敬生³, 熊本 篤志⁴, 小野 高幸⁴
OSHIGAMI, Shoko^{1*}, OKUNO, Shinya¹, YAMAGUCHI, Yasushi¹, OHTAKE, Makiko², HARUYAMA, Junichi², KOBAYASHI, Takao³, KUMAMOTO, Atsushi⁴, ONO, Takayuki⁴

¹ 名古屋大学, ² 宇宙科学研究所, ³ 韓国地質資源研究院, ⁴ 東北大学

¹Nagoya University, ²JAXA/ISAS, ³Korean Institute of Geoscience and Mineral Resources, ⁴Tohoku University

Comparison of the Lunar Radar Sounder (LRS) data to the Multiband Imager (MI) data is performed to identify the subsurface reflectors in Mare Serenitatis. The LRS is FM-CW radar (4-6 MHz) and the 2 MHz bandwidth leads to the range resolution of 75 m in a vacuum vacuum, whereas the sampling interval in the flight direction is about 75 m when an altitude of the spacecraft with polar orbit is nominal (100 km). Horizontally continuous reflectors were clearly detected by LRS in limited areas that consist of about 9% of the whole maria. The typical depth of the reflectors is estimated to be a few hundred meters. Layered structures of mare basalts are also discernible on some crater walls in the MI data of the visible bands (VIS). The VIS range has 9 wavelengths of 415, 750, 900, 950, and 1000 nm, and their spatial resolution is 20 m/pixel at a nominal altitude. The stratigraphies around Bessel and Bessel-H craters in Mare Serenitatis are examined in this paper. It was revealed that the subsurface reflectors lie on the boundaries between basalt units with different chemical compositions. In addition, model calculations using the simplified radar equation indicate that the subsurface reflectors are not compositional interfaces but layer boundaries with a high-porosity contrast. These results suggest that the detected reflectors in Mare Serenitatis are regolith accumulated during so long hiatus of mare volcanisms enough for chemical composition of magma to change, not instantaneously. Therefore combination of the LRS and MI data has a potential to reveal characteristics of a series of magmatism forming each lithostratigraphic unit in Mare Serenitatis and other maria.

キーワード: レーダサウンダ, 月の海, 層構造, クレータ内壁

Keywords: radar sounder, lunar maria, layered structure, crater wall

オリエンターレ盆地における 20 億年前の溶岩流噴出 Young Mare Volcanism in the Orientale Region Contemporary with 2 Ga PKT Peak Period

長 勇一郎^{1*}, 諸田 智克², 春山 純一³, 平田 成⁴, 保井 みなみ⁵, 杉田 精司⁶

CHO, Yuichiro^{1*}, MOROTA, Tomokatsu², HARUYAMA, Junichi³, HIRATA, Naru⁴, YASUI, Minami⁵, SUGITA, Seiji⁶

¹ 東京大学地球惑星科学専攻, ² 名古屋大学大学院環境学研究科, ³ 宇宙航空研究開発機構/宇宙科学研究本部, ⁴ 会津大学コンピュータ理工学部, ⁵ 神戸大学自然科学系先端融合研究環重点研究部, ⁶ 東京大学大学院新領域創成科学研究科複雑理工学専攻

¹Department of Earth and Planetary Science, University of Tokyo, ²Graduate School of Environmental Studies, Nagoya University, ³Japan Aerospace Exploration Agency/Institute of Space and Astronautical Science, ⁴Department of Computer Science and Engineering, Univ. of Aizu, ⁵Organization of Advanced Science and Technology, Kobe University, ⁶Department of Complexity Science and Engineering, University of Tokyo

The crater retention ages of the mare deposits within the Orientale multi-ring impact basin are investigated using 10 m resolution images obtained by Selenological and Engineering Explorer (SELENE, nicknamed Kaguya) spacecraft, in order to constrain the volcanic history of the Moon around the nearside-farside boundary. Precise crater-counting analyses reveal that mare deposits in the Orientale region are much younger than previously thought: ~2.8 Ga mare basalt in the eastern part of Mare Orientale and ~1.7-2.2 Ga mare deposits in Lacus Veris and Lacus Autumni, maria along the northeastern rings of the basin. These results indicate that the central and peripheral regions of the Orientale basin experienced volcanic activities ~1 and ~1.8 billion years after the basin-formation impact, respectively. The dominance of uniform surface age across the mare deposits in the peripheral regions strongly suggests that these volcanic eruptions are contemporary with the elevated volcanic activity episode proposed for the Procellarum KREEP Terrane (PKT) region on the lunar nearside at around ~2 Ga and that this activity peak is much more widespread than previously estimated.

キーワード: オリエンターレ盆地, 海の溶岩流

Keywords: Orientale Basin, Mare volcanism

地面傾斜の時間進化を考慮した溶岩流の熱浸食モデルについて Numerical thermal erosion model of lava flow coupling with evolution of ground slope

本田 親寿^{1*}, 清野卓¹, 平田成¹
HONDA, Chikatoshi^{1*}, Suguru Seino¹, Naru Hirata¹

¹ 会津大学

¹The University of Aizu

Schroter's Valley is one of the largest sinuous rilles on the Moon, a meandering negative-relief feature. The Schroter's Valley is located on the Aristarchus Plateau (305 ~ 313°E, 22 ~ 30°N), which is supposed to be an uplifted mare terrain. The rille appears as a singular sinuous rille as meandering primary rille including a more meandering inner rille. Typical sinuous rilles are 20 to 40 km in length and less than 1 km in width (Schubert et al., 1970), however, the primary rille of Schroter's Valley has been reported to be 125 km in length, up to 4.5 km in width, and 400 m in depth (Gornitz, 1973), and inner rille which is originated from the cobra-head of primary rille is reported to be ~170 km in length, 640 m of average width, and 95 m in depth (Garry et al., 2008).

The origin of sinuous rille is poorly understood. Previous researches have supposed that sinuous rilles are related to the basaltic lava flow. In past research, Honda and Fujimura (2005) developed numerical model of the sinuous rille formation of lunar lava flow. In this model, cooling rate of lava temperature as a function of distance from the lava source was calculated for estimation of thermal erosion velocity. The variation of chemistry of lava, physical properties such as density and viscosity during solidification of lava flow are incorporated in this model. They considered the effect of shifting from turbulent flow in initial phase to laminar flow in the last stage in their model. This model assumes that the ground slope maintain constant with time. However, the slope of floor of lava flow is changing with time, an erosion velocity of lava flow decreases along the downstream of lava flow following the lava temperature decreasing along the downstream.

In this study, we constructed the numerical thermal erosion model of lava flow coupling with evolution of ground slope. By using this numerical model, more large volume of lava flow is needed to originate the Schroter's Valley, because the slope of ground becomes shallower than initial one with time. If the maximum volume of eruptive volume on the Moon (Head et al., 2000) constrains the formation of Schroter's Valley, the eruptive temperature and thickness of lava flow which originate the rille are more than 1600 °C and 30 ~ 40 m, respectively.

キーワード: 蛇行谷, 熱浸食, 数値計算

Keywords: Sinuous rille, thermal erosion, numerical simulation

かぐや/SELENE搭載のSpectral Profilerのデータを用いた月面反射スペクトルの吸収帯特徴の抽出とその可視化ツールの開発 Detection and Visualization of the Absorption Features of the Reflectance Spectra on the Moon based on Data from Spectra

林 佑樹^{1*}, 小川 佳子¹, 松永 恒雄², 中村 良介³, 横田 康弘², 山本 聡², 廣井 美邦⁴, 大竹 真紀子⁵, 春山 純一⁵, 寺園 淳也¹
HAYASHI, Yuki^{1*}, OGAWA, Yoshiko¹, MATSUNAGA, Tsuneo², NAKAMURA, Ryosuke³, YOKOTA, Yasuhiro², YAMAMOTO, Satoru², HIROI, Yoshikuni⁴, OHTAKE, Makiko⁵, HARUYAMA, Junichi⁵, TERAZONO, Junya¹

¹ 会津大 CAIST / ARC-Space, ² 国環研, ³ 産総研, ⁴ ブラウン大, ⁵ ISAS / JAXA

¹CAIST/ARC-Space, Univ. of Aizu, ²NIES, ³AIST, ⁴Brown Univ., ⁵ISAS/JAXA

日本の月周回衛星かぐやに搭載されたスペクトルプロファイラ (SP) は 0.5-2.6 μm の可視-近赤外波長領域で、月表面のスペクトルを全球で隈無く観測した。一般的に反射スペクトルは鉱物情報を含んでおり、SP のスペクトルを解析することにより月面鉱物の情報を得ることができる。

月面反射スペクトルを解析する手法にはいくつかあるが、その中でも Modified Gaussian Model (MGM: Sunshine et al.[1990]) が最もよく使われる手法である。MGM は反射スペクトルを吸収帯ごとに分解し、特徴量を定量化するモデルであり、分解した吸収帯の特徴を既知の鉱物スペクトルの吸収特徴と比較することにより、観測された鉱物を同定することが可能となる。

しかし MGM には問題がある。まずは大量処理に向いていないということである。オリジナルの MGM ツールは一つのスペクトルデータ毎に処理を行い、結果を評価しながらチューニングを行うため、SP データのように大量のデータ (計 10^7 スペクトル) に適用するには処理に膨大な時間を要してしまう。もう一つは MGM の結果が視覚的に分かりづらく、実際の観測点と対応づけて見ることができないという点である。

本研究ではこの二つの問題点に着目した。従来の MGM ツールを大量自動処理できるようにカスタマイズし、さらに MGM の結果を視覚的に分かりやすくするための可視化ツールを開発した。MGM のカスタマイズは新しいプログラムを追加し、SP データを順に読み込ませることで大量自動処理を実現した。また、結果で出力されるものをパラメータごとにまとめたものをファイルに保持するプログラムも付け加えた。可視化に使用する画像はかぐや搭載の Multiband Imager (MI) の同時観測画像 (SP 観測時と同時に撮られた画像) を用いた。MGM の結果 (例えば分解された吸収帯の中心波長や深さ) の値に応じた、RGB カラーを割当て月画像上に表示した SP 観測点に重ね合わせた。

講演では月の swirl 地域を対象に、観測された約 10000 個の SP データに MGM を適用し、スペクトルを分解し、吸収帯の特徴量を抽出した結果と、その可視化の結果について報告する。

キーワード: スペクトルプロファイラ / かぐや, 可視-近赤外スペクトル, 月, 吸収帯特徴量, 修正ガウシアンモデル, 可視化
Keywords: Spectral Profiler/Kaguya, visible-near infrared spectrum, Moon, feature of absorption band, Modified Gaussian Model, Visualization

月表層火砕性粒子の化学組成と結晶度の推定 Composition and Crystallinity of Dark Mantle Deposits on the Moon

有本 龍三^{1*}, 大竹真紀子², 春山純一², 岩田隆浩²

ARIMOTO, Tatsumi^{1*}, Makiko Ohtake², Junichi Haruyama², Takahiro Iwata²

¹ 東京大学, ² 宇宙航空研究開発機構・宇宙科学研究所

¹The University of Tokyo, ²ISAS/JAXA

The lunar mantle makes up 90% of the lunar volume. Therefore, it is important to determine the mantle composition in order to understand the lunar bulk composition including information about origin and evolution of the Moon. However, the composition of the lunar mantle remains unclear.

Pyroclastic beads are a direct clue to lunar mantle composition. These very low-albedo beads on the lunar surface are Fe-bearing volcanic glass or partially crystallized spheres. The color variation of volcanic glass corresponds to its composition, in the order of higher TiO₂ content (e.g., orange glass, yellow glass, green glass). It is believed that if the erupted magma is quenched slowly, the magma of intermediate to high TiO₂ content can be small crystallized ilmenite grains and generate black beads, instead of generating orange and yellow glass. Thus, the TiO₂ content of the beads and the quenching speed of the erupted magma correlate with the colors and crystallinities of the pyroclastic beads. Chemical studies of pyroclastic beads acquired by Apollo missions indicate that the beads were formed from erupted magma from deeper (300 to 400km) in the mantle than basaltic magma. It is also assumed that the beads retain the original composition of the magma.

Dark Mantle Deposits (DMDs) are one of the darkest and smoothest areas on the Moon and are believed to contain pyroclastic beads, as were found in the Taurus-Littrow region near Apollo 17 site. However, detailed spectral analysis of the DMDs is lacking because of the limited wavelength coverage and spatial resolution of the previous remote-sensing data.

This study focused on DMDs on the Aristarchus Plateau and used spectral data obtained by the Multiband Imager (MI) on the SELENOlogical and ENgineering Explorer (SELENE). We chose this region because DMDs on the Aristarchus Plateau are the largest regional DMDs and because volcanic activity has lasted longer there than in other areas up to the Eratosthenian in this region. Previous studies reported that the crystallinity of this region is the lowest of all DMDs and that its composition is orange glass, indicating high TiO₂ content.

This study re-evaluates composition and crystallinity of this region in more detail, using data with wider spectral coverage. The MI is a high-resolution (20m x 20m per pixel) spectral imager with both visible and near-infrared coverages at spectral 9 bands. Using MI spectral data, we can distinguish minerals and glass from the absorption features after removing the continuum.

In order to select locations representing DMDs suitable for checking their compositions, we mapped the Aristarchus Plateau area using the reflectance data at 750nm and then selected locations where reflectance is lower than 5.5%. We also produced an MI color-composite mosaic based on differences in absorption features, in order to distinguish pyroclastic beads from the surrounding mare. We then estimated the TiO₂ content of pyroclastic beads by comparing the wavelength of the absorption center in the MI data with that of the laboratory-measured data of Apollo pyroclastic beads from the RELAB database. By comparing the spectra of different mixing ratios of glass (orange, yellow) and black beads from Apollo samples as endmembers, we estimated the crystallinity (estimated content of black beads) of the DMD.

The derived wavelength of the absorption center of the DMD spectra was 1050nm, which is similar to that of yellow glass. Thus, the pyroclastic beads of the DMD are assumed to be yellow glass, which has inter-mediate TiO₂ content. Our results suggest that the crystallinity of the pyroclastic beads was 20%, and 40 to 50% of this region comprised materials ejected by the Aristarchus crater.

The result of low crystallinity of the beads possibly shows that only small volatile materials were contained in the magma source in this region because magma with higher volatile content cools more slowly and is likely to have higher crystal content.

キーワード: 火砕性粒子, アリスタルコス, ダークマントルデポジット, 月, 化学組成, 結晶度

Keywords: Dark Mantle Deposit, pyroclastic beads, Aristarchus plateau, Moon, composition, crystallinity

かぐや分光データを用いた月高地地殻の鉱物量比とMg#の深さ方向変化 Vertical trend of modal mineralogy and Mg# of the lunar highland crust estimated from Kaguya spectral data

大竹 真紀子^{1*}, 武田 弘², 松永 恒雄³, 横田 康弘³, 春山 純一¹, 諸田 智克⁴, 石原 吉明⁵, 山本 聡³, 小川 佳子⁶, 廣井孝弘⁷, 唐牛 譲¹, 佐伯 和人⁸

OHTAKE, Makiko^{1*}, TAKEDA, Hiroshi², MATSUNAGA, Tsuneco³, YOKOTA, Yasuhiro³, HARUYAMA, Junichi¹, MOROTA, Tomokatsu⁴, ISHIHARA, Yoshiaki⁵, YAMAMOTO, Satoru³, OGAWA, Yoshiko⁶, HIROI Takahiro⁷, KAROUJI, Yuzuru¹, SAIKI, Kazuto⁸

¹ 宇宙航空研究開発機構, ² 千葉工大, ³ 国立環境研究所, ⁴ 名古屋大, ⁵ 国立天文台, ⁶ 会津大, ⁷ ブラウン大, ⁸ 大阪大
¹JAXA, ²Chiba Institute of Technology, ³NIES, ⁴Nagoya University, ⁵National Observatory Japan, ⁶The University of Aizu, ⁷Brown University, ⁸Osaka University

月周回衛星かぐや (SELENE) および他衛星によって取得された分光データや 線分光計データ等の解析により、月高地地殻の組成に関する新しい情報が得られつつある一方で、斜長岩の形成過程を知る上で役立つマフィック鉱物の量や、斜長岩が親マグマから結晶化した時点でのマグマの分化程度を知る上で重要なパラメータである、斜長岩に含まれるマフィック鉱物のMg# (モル比での $Mg/(Mg+Fe) \times 100$) に関する情報が不足している。我々はこれまでに、かぐや搭載スペクトルプロファイラ (Spectral profiler; SP) データを用い、月高地地殻における斜長岩に含まれるマフィック鉱物の量およびそれらマフィック鉱物のMg#の推定を行った [1]。その結果、マフィック鉱物の含有量およびそれらマフィック鉱物のMg#の両方に表裏二分性が見られ、これは月の表と裏側の地殻がマグマオーシャンからの異なる分化段階において形成されたことを示唆するものである。

本研究では、さらにこれらパラメータの高地地殻内での深さ方向変化を把握することを目的とした。これらパラメータの深さ方向変化を知ることにより、表裏二分性を持つ高地地殻の形成過程をより詳細に推定することができると考えられる。解析手法は、あらかじめモデル計算による反射スペクトルを斜長岩に含まれるマフィック鉱物、宇宙風化度、Mg#等の条件を変えて作成し、これらモデルスペクトルを用いてマフィック鉱物量およびMg#を推定する関係式を作成する。一方、SPデータを入力として月面の緯度・経度毎の平均反射スペクトルを求め、これらにマフィック鉱物量およびMg#を推定する関係式を適用することで、各緯度・経度におけるマフィック鉱物の量とMg#を推定する。これらマップを用いて 1) さまざまな大きさの盆地における盆地半径と盆地イジェクタ (盆地外かつ2半径以内領域と定義) の平均マフィック鉱物量およびMg#の関連、2) 各盆地における盆地リムからの距離とマフィック鉱物量およびMg#の関連 (盆地リムに近いほど地殻深部からの掘削物質となる法則を利用) を求めた。

解析の結果、マフィック鉱物の量は地殻深部ほど表層より少なく、またMg#は地殻深部でより高くなる傾向が見られた。今回解析した盆地による掘削深度は最高で50km程度に達すると推定され、下部地殻に相当することから、今回得られたマフィック鉱物量の深さ方向変化は、月下部地殻が深部ほどマフィック鉱物に富むとする従来の研究結果 [2][3] とは異なる結果である。またMg#も、単純なマグマオーシャンからの斜長石浮揚による地殻成長の場合に想定される深さ方向変化とは逆の傾向を示しており、今回得られた観測結果の解釈には、従来結果の再評価を含めて今後詳細な検討が必要である。

[1] M. Ohtake et al., LPSC, #1977 (2011).

[2] P. Spudis et al., Proc. Lunar Sci. Conf. 5th, 197-210 (1984).

[3] S. Tompkins and C. M. Pieters, Meteoritics & Planetary Sci., 34, 25-41 (1999).

キーワード: 月, かぐや, 高地地殻, マグネシウムナンバー, 分光データ

Keywords: Moon, Kaguya, highland crust, Mg#, spectral data

月 SPA 盆地の地質構造

GEOLOGICAL STRUCTURE OF THE LUNAR SOUTH POLE-AITKEN BASIN BASED ON DATA DERIVED FROM SELENE MULTIBAND IMAGER

上本 季更^{6*}, 大竹 真紀子¹, 春山 純一¹, 松永 恒雄², 山本 聡², 中村 良介³, 横田 康弘², 諸田 智克⁴, 小林 進悟⁵, 岩田 隆浩¹

UEMOTO, Kisara^{6*}, OHTAKE, Makiko¹, HARUYAMA, Junichi¹, MATSUNAGA, Tsuneo², YAMAMOTO, Satoru², NAKAMURA, Ryosuke³, YOKOTA, Yasuhiro², MOROTA, Tomokatsu⁴, KOBAYASHI, Shingo⁵, IWATA, Takahiro¹

¹ 宇宙航空研究開発機構, ² 国立環境研究所, ³ 産業総合研究所, ⁴ 名古屋大学, ⁵ 放射線医学総合研究所, ⁶ 東京大学

¹JAXA, ²NIES, ³AIST, ⁴The University of Nagoya, ⁵NIRS, ⁶The University of Tokyo

背景: 月裏側の South Pole-Aitken 盆地 (SPA 盆地) は、直径約 2500km (e.g. Spudis, 1994) と言われる太陽系最大の衝突盆地である。同盆地は巨大隕石衝突により形成され、その内側では月内部物質であるマントル物質が露出していると考えられている。そのため、同盆地の形成過程や掘削規模を推定し、内部物質露出領域を推測することは、月内部の元素・鉱物組成を把握することにつながると考えられる。衝突の中心部においては、掘削深度が大きいいため、表層の斜長石に富む地殻はすべて外へ飛散している可能性が高い (eg. Spudis, 1994) とされてきたが、最近の研究では、盆地の衝突の中心付近にも地殻物質の存在が示唆されている (e.g. Pieters et al. 2001)。そのため、過去の研究で「衝突の中心付近では地殻はすべて剥ぎ取られた」とされていた結果に対して検証が必要である。一方、盆地の掘削深度や衝撃の速度、衝突方向等を把握するために、衝突の熱や圧力によって盆地の中心部で生成される impact melt pool の存在についても、その有無や領域、形状を把握する必要がある。本研究では斜長石の他、輝石、かんらん石などの SPA 盆地内部の鉱物学的な分布を解析し、盆地形成の際できる多重リングなどの地形的特徴を考慮、巨大隕石衝突によって地殻が剥ぎ取られた領域や impact melt pool が生成された領域を推測することで、SPA 盆地の地質構造を推定することを目的とした。

手法: 本研究では、研究手段として月周回衛星「かぐや」搭載のマルチバンドイメージャ (MI) による可視・近赤外分光観測データを用い、SPA 盆地内部のクレーターおよびその周辺の反射スペクトル解析を行うことで、鉱物に特徴的な吸収を観察、それぞれ、吸収中心 950nm を赤、1050nm を緑、1250nm を青とし、鉱物種毎に色分けした図 (RGB 図) を作成した。解析した地域は、SPA 盆地ほぼ全域である。また、本研究で着目した地殻物質である斜長岩の同定方法は、波長 1250nm に特徴的なスペクトルの吸収をもつという斜長石の特徴を利用し、波長 1050nm 地点と 1550nm 地点の反射スペクトルを直線で結んだ時、波長 1250nm 地点でスペクトルがその直線よりも深く吸収がみられるものを斜長岩とした。地形情報は先行研究の Hiesinger et al. (2004) でクレメンタインの標高データより推定された SPA 盆地のリングを基に、鉱物データと同じく「かぐや」搭載の LALT データから標高図を作成した。これらを照らし合わせ、鉱物の分布と地形的特徴の相互関係を考察し、それに基づき地質断面図を作成した。

結果: 盆地内 20 箇所斜長岩がみられ、また、地形情報では、盆地内に多重リング構造が確認された。この結果と鉱物分布結果を照らし合わせたところ、外側のリングより外部に 16 箇所、外側リングから内側リングにかけて 4 箇所斜長岩が存在したのに対し、いちばん内側のリングの内部においては斜長岩はみられなかった。また、SPA 盆地全域に対して反射スペクトル解析をし、鉱物分布を推定した結果、外側は比較的斜長石に富む物質が存在し、中間は Ca に富む輝石や富まない輝石、斜長石等、様々な種類の岩石が存在、最も内側のリングの内部 (約直径 610km) は、Ca に富む輝石が一様に存在するという特徴がみられた。また、最も内側のリングの内部領域においては、その外側と比較し、地形が滑らかであった。

考察: 外側のリングにおいて斜長岩が多く分布し、鉱物分布が地形情報ともよく合致することから、このリングの内側が隕石衝突により崩れた領域であると推定でき、このリングを excavation cavity と推定できる。また、このリングより内側において見つかった 4 箇所の斜長岩については、外側のリングから最も内側のリングの間はさまざまな鉱物が斑状に分布していることや、最近の衝突盆地の衝突過程の数値シミュレーション (Stewart, 2011) から、もとの地殻物質が再落下したものであるという可能性が高い。また、最も内側のリングの内部は、組成が均一であるということと、リングの外側に比べ地形が滑らかであるということから、SPA 盆地ができた際に熱や圧力で生成された impact melt pool の領域と考えられ、SPA 盆地の impact melt の組成は Ca に富む輝石である (長軸直径約 610km の楕円領域) と考えられる。この組成が impact melt の分化によるものであるのか、掘削された深度その場所における地殻の組成を反映するものなのかについては、まだ解明されていない。そのため、この領域に後からできた衝突クレーターの中央丘や壁面の鉱物を調べる等の手法で詳細に調査していく必要がある。また、この impact melt pool 領域 (直径約 610km) は、過去の論文 (e.g. Lucey et al. 2000) によるクレータースケールリング則の impact melt 領域計算 (直径約 700km) と比較するとほぼ一致しており、これまでのクレータースケールリング則が SPA 盆地規模の巨大衝突盆地にも応用できる可能性がある。

キーワード: 月, サウスポールエイトケン, 盆地, 地質構造

Japan Geoscience Union Meeting 2012

(May 20-25 2012 at Makuhari, Chiba, Japan)

©2012. Japan Geoscience Union. All Rights Reserved.



PPS25-P19

会場:コンベンションホール

時間:5月23日 17:15-18:30

Keywords: moon, South Pole-Aitken, basin, geological structure

月表側地殻の岩相変化 Lithological variations in the Nearside of the Moon

杉原 孝充^{1*}, 大竹真紀子², 春山純一², 松永恒雄³, 横田康弘³, 本田親寿⁴, 諸田智克⁵, 小川佳子⁴
SUGIHARA, Takamitsu^{1*}, Makiko Ohtake², Junichi Haruyama², Tsuneo Matsunaga³, Yasuhiro Yokota³, Chikatoshi Honda⁴,
Tomokatsu Morota⁵, Yoshiko Ogawa⁴

¹ 独立行政法人海洋研究開発機構, ² 独立行政法人宇宙航空研究開発機構, ³ 国立環境研究所, ⁴ 会津大学, ⁵ 名古屋大学
¹JAMSTEC, ²JAXA, ³NIES, ⁴Aizu Univ., ⁵Nagoya Univ.

Procellarum KREEP Terrane (PKT) that is characterized by high-Th concentration has been recognized to be one of important crustal constituents. However spatial distribution of the PKT materials has not been precisely understood since most of the PKT area is covered by maria. High-Th concentration area in the PKT shows complex irregular shape and apparently seen as main constituents of Imbrium basin rims. Therefore origin of the high-Th area in the PKT have been considered to result from Imbrium forming impact. However the highest Th concentration is observed in Fra Mauro area where includes the Apollo 14 landing site but not in the Imbrium basin rims and interior of the Imbrium basin though some high-Th spots in Imbrium basin are observed in some small craters (e.g., Aristillus). Mineralogical and petrological characteristics of some regions in the PKT are investigated to make sure distribution of the Th-rich PKT materials. In this presentation, variations of petrological characteristics in and around the PKT are compared and addressed issue on distribution of the PKT materials.

キーワード: 月, 地殻, マグマオーシャン, かぐや, リモートセンシング, Procellarum KREEP Terrane
Keywords: The Moon, Crust, Magma ocean, Kaguya, Remote-sensing, Procellarum KREEP Terrane

二次クレータ検出のためのクレータの空間分布の評価

Evaluation of spatial distribution of craters on lunar surface for detection of secondary craters.

木下 達生^{1*}, 本田 親寿¹, 平田 成¹, 諸田 智克², 出村 裕英¹, 浅田 智朗¹

KINOSHITA, Tatsuo^{1*}, HONDA, Chikatoshi¹, HIRATA, Naru¹, MOROTA, Tomokatsu², DEMURA, Hirohide¹, ASADA, Noriaki¹

¹ 会津大学 コンピュータ理工学部, ² 名古屋大学大学院環境学研究科

¹Department of Computer Science and Engineering, University of Aizu, ²Graduate School of Environmental Studies, Nagoya University

Secondary craters are impact craters formed by ejecta that were thrown out of a primary crater. Secondary craters give a biased spatial distribution of craters. Researchers extract craters excluding a surface that contains secondary craters from lunar image based on his or her subjective views.

The purpose of this research is to develop an algorithm for evaluating spatial distribution of craters on lunar images. The algorithm applies to ideal spatial distribution of craters and real spatial distribution of craters, and evaluates whether a non-random portion in real area by comparing a single-linkage hierarchical clustering parameter.

We demonstrated for two regions on Mare Crisium. As a result of visual inspection, one region contains a lot of clustered secondary craters, and another region contains few clustered secondary craters. The clustered secondary craters could be evaluated non-random spatial distribution of craters quantitatively by our clustering analysis.

Keywords: moon, secondary crater, spatial distribution, clustering analysis

Haleakala40cm 望遠鏡による月 Na 希薄大気生成の月面地域依存性の観測 Observation of surface locality on the Moon for production of lunar sodium exosphere with a 40cm telescope at Haleakala

鈴木 大志^{1*}, 岡野 章一¹, 鍵谷 将人¹, 三澤 浩昭¹
SUZUKI, Taishi^{1*}, Shoichi Okano¹, Masato Kagitani¹, Hiroaki Misawa¹

¹ 東北大学惑星プラズマ・大気研究センター

¹Tohoku Univ. PPARC

月には表面気圧が地球のおよそ 10^{-17} の非常に希薄な完全無衝突大気が存在する。過去の研究により、月外圏大気の構成物質として He、Ar、Na、K、H、O が存在することが分かっている。このうち Na と K はそれらの大きな共鳴散乱断面積により比較的容易に地上観測が可能であり、これらの共鳴散乱発光をトレーサーとした月希薄大気の観測が過去数々行われている。

水星は、月と類似の外圏大気を持っている。水星外圏大気の生成には地域依存性がみられ、その原因として水星表面の地質の違いが考えられている (e.g. Sprague et al., 1998)。さらに、月周回衛星かぐやにより観測された Na 大気密度の変動 (Kagitani et al., 2010) から、月面からの Na 大気放出量に地域依存性が見られることが示唆されている。月の地質は海と高地では異なり、海のほうがより多くの Na を含んだ岩石から成ることが知られている。その一方、月の高地は隕石衝突によってできており、地中の Na を大気に放出しやすい環境にある。このことから、我々は月 Na 大気生成には地域依存性があると考え、観測的検証を試みた。

我々は、この月昼面の地域依存性による月ナトリウム外圏大気の変動について、月の下弦側の縁の北緯 20 度の点 (高地) と南緯 20 度の点 (海) の 2 か所で観測を行った。観測にはマウイ島ハレアカラ山頂の東北大学 40cm シュミット・カセグレン望遠鏡と高分散エシェル分光器を用い、2011 年 7 月 18 日から 25 日まで連続的に行った。今回はその結果および今後行う予定である追加観測について発表を行う。

Sprague et al., 1998, *Icarus*, 135, 60-68, Mercury: sodium atmospheric enhancements, radar bright spots, and visible surface features.

Kagitani et al., 2010, *Planetary and Space Science*, 58, 1660-1664, Variation in lunar sodium exosphere measured from lunar orbiter SELENE (Kaguya)

キーワード: 月, 希薄大気, 地域依存性, ナトリウム

Keywords: Moon, Exosphere, Geological dependence, Sodium

太陽風プロトン月面散乱における散乱角依存性の研究 Angular dependence of the solar wind protons scattered at the lunar surface

上村 洸太^{1*}, 斎藤 義文², 西野 真木², 横田 勝一郎², 浅村 和史², 綱川 秀夫³

UEMURA, Kota^{1*}, SAITO, Yoshifumi², NISHINO, Masaki N.², YOKOTA, Shoichiro², ASAMURA, Kazushi², TSUNAKAWA, Hideo³

¹ 東大・理・地球惑星, ² 宇宙航空研究開発機構宇宙科学研究所, ³ 東工大・理・地惑

¹Earth and Planetary Sci., Tokyo Univ., ²ISAS/JAXA, ³Earth Planet. Sci., Tokyo TECH

月は地球のようなグローバルな磁場や濃密な大気を持たない為、太陽風は月面に直接入射する。月周辺の低エネルギー電子分布に関しては過去にアポロ計画、ルナブロスペクターに代表される衛星による観測が行われており比較的よく理解されている。しかし月周辺の低エネルギーイオンに関する観測は過去殆ど行われていない。その為、月面衝突後の太陽風イオンの振る舞いは観測に基づいた理解はされていない。月面と太陽風イオンとの相互作用を議論するときは、室内実験等の知見から太陽風イオンは月面に殆ど吸収されるとして月面衝突後の振る舞いは十分議論されてこなかった。

これまでの「かぐや」衛星搭載 MAP-PACE-IMA の観測により、新たに月面で散乱された太陽風イオンが観測された。観測された散乱イオンは質量分析の結果殆どがプロトンであり、太陽風フラックスの 0.1% ~ 1% が衛星高度まで到達する。また散乱プロトンは、月面での相互作用を介して太陽風プロトンの 50% 程度のエネルギーを持つことが明かとなった。先行研究によって衛星高度での月面散乱イオンの特徴は判明したものの、月面における散乱角などの散乱特性に関する理解はされていない。

本研究では、月面における太陽風の散乱特性を理解するため、MAP-PACE-IMA が高角度分解能モードで運用されていたときの観測データを利用し、太陽風の月面への入射角と散乱プロトンの月面からの出射角との関係、及び入射角ごとの出射角とエネルギーとの関係を調べた。その結果、散乱プロトンは全入射角において月面への太陽風の入射ベクトルに対して 180 度反対方向に出射し、その方向を中心軸としてコーン状に散乱していることが分かった。散乱プロトンの持つエネルギーは、中心軸にエネルギーの下限値の最小があり、コーンの縁に近づくほど下限値が大きくなっていることが分かった。この散乱特性は過去の室内実験等から予想されるものとは全く異なるものである。そこで散乱特性解明のためモデル数値計算を行った。モデル数値計算の結果から月面の微視的なレゴリス面を考慮すれば太陽風プロトンの月面散乱現象は理解可能であることを示した。

キーワード: 太陽風, 月面, 散乱

Keywords: solar wind, lunar surface, scattering

Kaguya 衛星によって月地殻磁気異常付近で観測された広帯域ホイッスラーモード波動

Broadband whistler-mode waves detected by Kaguya near the lunar crustal magnetic anomalies

津川 靖基^{1*}, 寺田 直樹¹, 加藤 雄人¹, 小野 高幸¹, 綱川 秀夫², 高橋 太², 渋谷 秀敏³, 清水 久芳⁴, 松島 政貴¹
TSUGAWA, Yasunori^{1*}, TERADA, Naoki¹, KATOH, Yuto¹, ONO, Takayuki¹, TSUNAKAWA, Hideo², TAKAHASHI, Futoshi², SHIBUYA, Hidetoshi³, SHIMIZU, Hisayoshi⁴, MATSUSHIMA, Masaki¹

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

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

Broadband magnetic waves with frequency range of 0.03-10 Hz in the spacecraft frame were observed by Kaguya near the Moon [Nakagawa et al., 2011]. The waves were not propagating parallel to the ambient magnetic field direction and had a compressional component. There was neither peak frequency nor preferred polarization. Nakagawa et al. [2011] identified them as whistler-mode waves because of their large group velocity compared with the solar wind velocity as well as the observed frequency range. Although the generation mechanisms of the waves were suggested to be associated with ions reflected by the Moon, precise process has not been clarified yet.

Recently we have revealed the statistical properties of narrowband whistler-mode waves near the Moon [Tsugawa et al., 2011]. There would be a link in the generation mechanism of narrowband and broadband whistler-mode waves. In the present study, we perform statistical analyses to reveal the properties of the broadband whistler-mode waves near the Moon. The results reveal that the waves are mostly observed just near the lunar crustal magnetic anomalies in dayside. It suggests that most of the waves are generated by the solar wind interaction with the magnetic anomalies. Furthermore, we investigate the velocity distributions and fluxes of reflected ions by the magnetic anomalies and lunar surface. We also discuss other possible generation mechanisms of the waves based on the measured plasma parameters around the Moon.

キーワード: 磁気異常, イオン反射, 上流ホイッスラー波

Keywords: magnetic anomaly, reflected ions, upstream whistler waves

プラズマシート電子を用いた月磁気異常の推定

Estimates of lunar crustal magnetic field distributions using plasma sheet electrons

原田 裕己^{1*}, 町田 忍¹, 斎藤 義文², 横田 勝一郎², 浅村 和史², 西野 真木², 綱川 秀夫³, 渋谷 秀敏⁴, 高橋 太³, 松島 政貴³, 清水 久芳⁵

HARADA, Yuki^{1*}, MACHIDA, Shinobu¹, SAITO, Yoshifumi², YOKOTA, Shoichiro², ASAMURA, Kazushi², NISHINO, Masaki N.², TSUNAKAWA, Hideo³, SHIBUYA, Hidetoshi⁴, TAKAHASHI, Futoshi³, MATSUSHIMA, Masaki³, SHIMIZU, Hisayoshi⁵

¹ 京都大学, ² 宇宙研, ³ 東工大, ⁴ 熊本大学, ⁵ 東京大学地震研究所

¹Kyoto Univ., ²ISAS/JAXA, ³Tokyo Inst. Tech., ⁴Kumamoto Univ., ⁵ERI, Univ. of Tokyo

月には地殻起源の磁場が存在しており、地球の場合と同じように磁気異常と呼ばれている。月の磁気異常はアポロ着陸地点における月面での磁力計や、月周回衛星に搭載された磁力計、電子の磁気ミラー効果を利用した電子反射法などを用いて計測が行われてきた。月磁気異常の空間スケールは数 km 以下から数 100 km まで様々であることが知られているが、衛星搭載の磁力計では衛星高度によって検出できる磁気異常の空間スケールが制限され、電子反射法では電子ジャイロ直径よりも小さな空間スケールをもつ磁気異常の月面磁場強度を過小評価してしまう。そのため、月周回衛星では磁気異常の短波長成分を正確に観測することが難しい。一方、着陸地点での磁力計による観測は月面での磁場を正確に計測することができるものの、観測地点の数は非常に限られている。磁気異常の起源については現在も議論が続いており、短波長成分が磁気異常の起源について重要な情報を含んでいる可能性もある。

本研究では、月が地球のプラズマシート内に位置する時にかぐや衛星によって取得された、電子の高角度分解能の速度分布関数から、月磁気異常の短波長成分に関する新たな情報を引き出すことを試みた。かぐや衛星が低高度（10-30 km 程度）で飛行する際に得られた電子速度分布関数を調べてみると、一様磁場を仮定した場合の粒子の逆軌道計算では本来 1 ジャイロ周期以内に月面に衝突してしまう速度領域であっても、1 keV 以上の比較的高エネルギーの電子が観測されることがある。これは月面の局所的な磁気異常によって電子が非断熱に散乱されていることを示唆している。電子を散乱させる磁気異常の鉛直空間スケールが衛星高度に比べて非常に小さいと仮定すると、観測された電子速度分布を、粒子軌道計算を介して月面での磁気異常の水平分布に焼き直すことができる。つまり、電子がローレンツ力によって軌道を曲げられ、月面に鉛直上向きの速度成分をもつかどうかは月地殻磁場の月面に平行な成分に依存するので、観測された電子を逆追跡して求めた電子の月面での出射速度から、月面に平行な磁場成分の大きさとその磁場構造の水平スケールの積の最小値を求めることができる。この方法では、一つの電子速度分布関数から磁気異常の水平分布に関する情報を得ることができるので、かぐや衛星によって得られた高角度分解能の電子速度分布関数を用いて、周回衛星搭載の磁力計による観測では検出できないような小規模な磁気異常の構造を浮かび上がらせることができる可能性がある。

キーワード: 月, 磁気異常, プラズマ, かぐや

Keywords: Moon, magnetic anomaly, plasma, Kaguya