

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

¹Graduate School of Science, Tohoku University, ²Korea 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

月表面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・ベー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, ベーズン, 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、マグマ的最終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