

A reconsideration of the lunar wake boundary based on Kaguya observations

*Masaki N Nishino¹, Yoshifumi Saito², Hideo Tsunakawa³, Yuki Harada⁴, Shoichiro Yokota², Futoshi Takahashi⁵, Masaki Matsushima³, Hidetoshi Shibuya⁶, Hisayoshi Shimizu⁷

1. Institute for Space-Earth Environmental Research, Nagoya University, 2. ISAS/JAXA, 3. Tokyo Institute of Technology, 4. Space Science Laboratory, University of California, Berkeley, 5. Kyushu University, 6. Kumamoto University, 7. ERI, University of Tokyo

Refilling of the tenuous lunar wake by solar wind plasma has been one of the fundamental phenomena of planetary plasma sciences. Because a portion of the solar wind electrons has much higher speed than protons, it has been widely accepted that suprathermal electrons precede protons to come into the wake along the interplanetary magnetic field. In this model, ambipolar (inward) electric fields around the wake boundary generated by the charge separation attract the surrounding solar wind protons into the central lunar wake. However, such treatment has implicitly assumed one-dimensional motion of the solar wind plasma along the magnetic field perpendicular to the solar wind flow. Here we propose a new model of the wake boundary close to the Moon, based on Kaguya observations in orbit around the Moon; Solar wind protons come into the lunar wake owing to their gyro motion and large inertia without help of suprathermal electrons, and those protons form positively charged regions and outward electric fields around the wake boundary that should attract surrounding solar wind electrons. This new model well explains electron signatures around the wake boundary detected by Kaguya at ~100 km altitude from the lunar surface.

Keywords: Lunar wake, Solar wind, Electric field, Kaguya (SELENE)

電子反射法を用いた月磁気異常マッピング

Global mapping of the lunar magnetic anomalies by electron reflection method

*加藤 大羽¹、斎藤 義文²、横田 勝一郎²、西野 真木³、綱川 秀夫⁴

*Daiba Kato¹, Yoshifumi Saito², Shoichiro Yokota², Masaki N Nishino³, Hideo Tsunakawa⁴

1. 東京大学大学院理学系研究科地球惑星科学専攻、2. 宇宙航空研究開発機構宇宙科学研究所、3. 名古屋大学宇宙地球環境研究所、4. 東京工業大学大学院理工学研究科地球惑星科学専攻

1. Department of Earth and Planetary Science, The University of Tokyo, 2. Japan Earspace Exploration Agency Institute of Space and Astronautical Science, 3. Institute for Space-Earth Environmental Research, Nagoya University, 4. Department of Earth and Planetary Sciences, Tokyo Institute of Technology

地殻残留磁場は地球、火星、月などに存在することが知られており、様々な天体に普遍的に存在する可能性がある。月は全球的な固有磁場を持たないが、磁気異常と呼ばれる局所的な残留磁化領域を持つ天体である。そのため、月磁気異常によって侵入を妨げられない限り、太陽風は月面に直接衝突する。従って月周辺のプラズマ粒子と月磁気異常領域の相互作用は、月面上のプラズマ環境や月表面の宇宙風化作用などに重要な影響を与える。月磁気異常領域の磁場計測の1つとして、電子反射法による測定が行われてきた。電子反射法とは月周辺電子の磁気ミラー効果を利用して月表面磁場強度を求める方法である。月に到達した電子は、月磁気異常が存在しなければ月面に吸収されるが、存在する場合はピッチ角90度以上の反射電子を衛星上で観測できる。このときのカットオフピッチ角と衛星周辺の磁場を計測することで、磁気異常強度を推定する。電子反射法は衛星高度に依らずに月地表面の磁場強度を測ることができ、比較的弱い磁場強度(<1nT)領域まで測定することができる。

Apolloによっていくつかの月表面地点で電子反射計測が行われ、Lunar Prospectorによって月の全域に渡る月磁気異常磁場の測定が行われた。かぐや衛星の観測データはそれらの衛星観測データよりも高い時間分解能で観測されており、従来よりも詳細な磁場構造の解明ができる。

かぐや衛星に搭載されたプラズマ・磁場観測装置MAP-PACE, LMAG の観測データを用い、月磁気異常によって反射された電子と磁場の同時測定を行った。本発表では、このかぐや衛星観測データを用いて作成した高空間分解能(~8km)での月磁場マップを紹介する。また、解析において月表面と衛星の間の電位差の影響を受け、電子のピッチ角分布にエネルギー依存性が存在する例がいくつか見られた。そこで、この電位差による測定結果への影響について考察する。今回の電子反射法による結果と、磁力計による月磁気異常磁場の比較を行い、月面上空の電子反射のふるまいについても議論する。

キーワード：月、磁気異常、かぐや、電子反射法

Keywords: Moon, Magnetic anomaly, Kaguya, Electron reflection method

月面から放出される炭素、窒素、酸素の2次イオン

Secondary ions of carbon, nitrogen and oxygen from the Moon

*横田 勝一郎¹、斎藤 義文¹、浅村 和史¹、西野 真木²、綱川 秀夫³

*Shoichiro Yokota¹, Yoshifumi Saito¹, Kazushi Asamura¹, Masaki N Nishino², Hideo Tsunakawa³

1. 宇宙航空開発研究機構・宇宙科学研究所、2. 名古屋大学・宇宙地球環境研究所、3. 東京工業大学

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

月は固有磁場や十分な大気が無いので、地球磁気圏滞在中以外は太陽風に常時さらされている。高いエネルギーを持つ太陽風イオンが月面に衝突すると二次イオンが放出されるが、この二次イオンの放出時のエネルギーはほとんどが数eV程度である。しかしながら、周囲の太陽風電場・磁場の影響を直ちに受けて、その向き次第ではピックアップイオンとして宇宙空間に飛び出す。

「かぐや」衛星搭載のMAP(Magnetic field and Plasma experiment)-PACE(Plasma energy Angle and Composition experiment) : プラズマ計測器は月周りで初めて月起源イオンの観測に成功し、質量分別まで行った。「かぐや」は日本の月探査衛星で高度約100kmにおいて2008年から2009年にかけておよそ1.5年間の観測を行った。

MAPはLMAG (Lunar MAGnetometer) : 磁力計とPACEで構成されている。MAP-LMAGは32Hzのサンプリング周期と0.1nTの精度で3次元の磁場計測を行っている。MAP-PACEは2台の電子分析器と2台のイオン分析器で構成されていて、イオン分析器はIEAとIMAからなっている。各分析器は半球の視野を確保していて、それぞれ2台ずつで全方向に対して視野を確保して3次元の速度分布関数を取得する。「かぐや」衛星は3軸制御の探査機であるため、IMAは常に月面を向き月方向から飛来するイオンの質量分析を行い、IEAは外宇宙から太陽風などの月に向かって飛来するイオンを計測する。IMAはこれまで少なくともHe⁺, C⁺, O⁺, Na⁺, K⁺, Ar⁺からなる月から飛来するイオンを観測していた。このような「かぐや」衛星によるイオン観測から月の二次イオンの放出量マップ作成が可能となった。

本発表では、特に分別が簡単な軽いイオン種、C⁺、N⁺、O⁺の2次イオン放出量マップの特徴を提示する。また、「かぐや」衛星の観測から、太陽風による2次イオン計測を使った小型天体表面物質の遠隔での観測に関して議論する。

キーワード : 月、二次イオン、質量分析

Keywords: Moon, Secondary ions, Mass analyses

月周回衛星「かぐや」による地球起源酸素イオンの観測

KAGUYA observation of terrestrial oxygen transported to the Moon

*寺田 健太郎¹、横田 勝一郎²、斎藤 義文²、北村 成寿²、浅村 和史²、西野 真木³

*Kentaro Terada¹, Shoichiro Yokota², Yoshifumi Saito², Naritoshi Kitamura², Kazushi Asamura², Masaki N Nishino³

1. 大阪大学院理学研究科宇宙地球科学専攻、2. 宇宙科学研究所、3. 名古屋大学宇宙地球環境研究所

1. Department of Earth and Space Science, Graduate School of Science, Osaka University, 2. Institute of Space and Astronautical Science, Japan Aerospace Exploration Agency, 3. Institute for Space-Earth Environmental Research, Nagoya University

Oxygen, the most abundant element of Earth and Moon, is a key element to understand the various processes in the Solar system, since it behaves not only as gaseous phase but also as the solid phase (silicates). Here, we report observations from the Japanese spacecraft Kaguya of significant 1-10 keV O⁺ ions only when the Moon was in the Earth's plasma sheet. Considering the valence and energy of observed ions, we conclude that terrestrial oxygen has been transported to the Moon from the Earth's upper atmosphere (at least 2.6×10^4 ions cm⁻² sec⁻¹). This new finding could be a clue to understand the complicated fractionation of oxygen isotopic composition of the very surface of lunar regolith (particularly the provenance of a ¹⁶O-poor component), which has been a big issue in the Earth and Planetary science.

キーワード：地球-月システム、月周回衛星「かぐや」、酸素、地球磁気圏、太陽風、地球風

Keywords: The Earth-Moon system, KAGUYA (SELENE), Oxygen, Magnetosphere, Solar Wind, Earth Wind

10-year summary of the studies based on global subsurface radar sounding of the Moon by SELENE (Kaguya) Lunar Radar Sounder (LRS)

*熊本 篤志¹、山口 靖²、山路 敦³、小林 敬生⁴、押上 祥子⁵、石山 謙⁶、中村 教博⁷、後藤 由貴⁸、春山 純一⁶

*Atsushi Kumamoto¹, Yasushi Yamaguchi², Atsushi Yamaji³, Takao Kobayashi⁴, Shoko Oshigami⁵, Ken Ishiyama⁶, Norihiro Nakamura⁷, Yoshitaka Goto⁸, Junichi Haruyama⁶

1. 東北大学大学院理学研究科地球物理学専攻、2. 名古屋大学大学院環境学研究科地球環境科学専攻、3. 京都大学大学院理学研究科地球惑星科学専攻、4. 韓国地質資源研究院、5. 工学院大学、6. 宇宙航空研究開発機構宇宙科学研究所、7. 東北大学高度教養教育・学生支援機構、8. 金沢大学理工学域電子情報学類

1. Department of Geophysics, Graduate School of Science, Tohoku University, 2. Department of Earth and Environmental Sciences, Graduate School of Environment Studies, Nagoya University, 3. Division of Earth and Planetary Sciences, Graduate School of Science, Kyoto University, 4. Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources, 5. Kogakuin University, 6. Institute of Space and Astronautical Science, Japan Aerospace Exploration Agency, 7. Institute for Excellence in Higher Education, 8. School of Electrical and Computer Engineering, Kanazawa University

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

キーワード : SELENE、LRS、月の火山活動

Keywords: SELENE, LRS, Lunar volcanic activity

月における地下空洞の構造の解析

~月レーダサウンダー(LRS)によって地下空洞の存在が示唆されるのか~

Detection of the Lava Tubes by SELENE(Kaguya) Lunar Radar Sounder

*郭 哲也¹、春山 純一²、三宅 互³、熊本 篤志⁴、石山 謙²、岩田 隆浩²、Crites Sarah²

*Tetsuya Kaku¹, Junichi Haruyama², Wataru Miyake³, Atsushi Kumamoto⁴, Ken Ishiyama², Takahiro Iwata², Sarah Crites²

1. 東海大学工学部航空宇宙学科航空宇宙学専攻、2. 宇宙航空研究開発機構/宇宙科学研究本部、3. 東海大学工学部、4. 東北大学大学院理学研究科地球物理学専攻

1. Department of Aeronautics and Aerospace School of Engineering, Tokai University, 2. JAXA/ISAS, 3. Toaki University, 4. Department of Geophysics, Graduate School of Science, Tohoku University

月に存在する地下空洞は、人や機器を小惑星や放射線から保護することができ、空洞内の温度が一定であると考えられることから、基地建設地として候補に挙げられている。近年、縦孔がSELENEに搭載された地形カメラの月面画像データより発見された。その縦孔の下には地下空洞が広がっている可能性がある。しかし、縦孔の付近の月面下に、実際に地下空洞が存在するかどうかは確かめられていなかった。

我々はSELENEに搭載された月レーダサウンダー(LRS)による地下空洞の探索を行った。我々は、はじめに嵐の大洋のリルAのマリウスヒルズの縦孔付近で観測されたLRSの反射波データを探索し、反射波強度の急激な落ち込みの後に反射ピークが出現する特徴的なエコーパターンを発見した。このエコーパターンは地下空洞の存在を指し示している可能性がある。次に、我々はマリウスヒルズの縦孔の周辺(北緯13~15度、東経-58.25~55.75度)に調査範囲を広げた。すると、マリウスヒルズの縦孔付近の地点のエコーパターンと似ている反射波がいくつかの場所で発見された。我々はリルAとそのリルの延長線上に位置する4地点で特徴的な反射波パターンを確認した。これらの4地点は、GRAILの重力場データから、低質量密度の地質が分布する細長い領域に対応していることが判明した。

以上の結果から、本研究で発見されたエコーパターンが地下空洞の存在と対応しており、マリウスヒルズの縦孔の近傍には地下空洞が存在することが示唆される。

キーワード：月レーダサウンダー、地下空洞、マリウスヒルズの縦孔、SELENE

Keywords: Lunar Radar Sounder, Lava tubes, Marius Hills Hole, SELENE

Composition of olivine-bearing rocks and their estimated origin

*大竹 真紀子¹、山本 聡²、石原 吉明¹、中村 良介³、松永 恒雄²

*Makiko Ohtake¹, Satoru Yamamoto², Yoshiaki Ishihara¹, Ryosuke Nakamura³, Tsuneo Matsunaga²

1. 宇宙航空研究開発機構 宇宙科学研究所、2. 国立環境研究所、3. 産業総合研究所

1. Institute of Space and Astronautical Science, Japan Aerospace Exploration Agency, 2. National Institute for Environmental Studies, 3. National Institute of Advanced Industrial Science and Technology

Introduction: Remote sensing data obtained by the SELENE (Kaguya) Spectral Profiler (SP) found exposures with olivine-rich spectral features, globally distributed on the lunar surface[1], and it was suggested that they are possibly originated from the mantle.

Previous studies of returned lunar samples and the lunar magma ocean differentiation model indicate that olivine-rich rocks have the following three major origins: 1) mantle material, 2) volcanic material with olivine-rich composition, and 3) crustal material including rocks intruding into the crust (troctortite) [2]. Though most of the olivine exposures identified in [1] were located near basin rings, the origins of individual olivine sites may not be the same. Furthermore, no mantle material and only a small number of olivine-rich mare materials are available in the lunar sample collection. Therefore, understanding the origin of individual olivine exposures and advancing our knowledge about the distribution and composition of the three types of olivine-rich materials are important for understanding the composition and evolution of the lunar interior.

To address these issues, we geologically and morphologically investigated all of the identified olivine exposures in detail to assess the origin of each site in this study.

Methods: All of the 70 million latest calibrated reflectance spectra obtained by Kaguya SP [3] were used to re-identify olivine-rich exposures on the lunar surface by finding diagnostic absorption features of olivine around 1050 nm as described in [1]. Data of the Kaguya Multiband imager (MI) [4], Lunar Reconnaissance Orbiter Camera (LROC) [5], and SLDEM2013 (digital elevation model generated using the Kaguya Terrain Camera [6], MI, and Lunar Orbiter Laser Altimeter aboard LRO) of each of the identified olivine sites were used to evaluate reflectance, space weathering, geologic context, distribution and size of the exposures, composition, surface texture, and local slopes.

Results: About 150 SP reflectance spectra were re-identified as having unambiguous olivine-rich absorption features. Locations of the spectra were grouped into 50 sites located within the same latitude and longitude. We also evaluated the origin of all grouped sites. Note that we identified the clearest olivine-rich spectra among SP datasets, therefore olivine-rich material with less clear spectra may be present at other areas. We categorized their origins as likely mantle, volcanic, crustal, and “unclear” . About 60% of the sites are estimated to be mantle origin, and 5% are volcanic, 30% are crustal, and 5% are of unclear origin respectively. Mantle origin sites surround large basins whereas volcanic origin sites are within mare, and crustal origin sites are either surround or far from large basins.

Discussion: Though the percentage of each origin is not necessarily proportional to the volumes (surface area) of each category, at least there are many olivine sites of mantle origin around Crisium, Imbrium, and Nectaris. Estimation of excavation depth of these basins indicates it is likely they reach the mantle, which is consistent with the estimation of mantle origin for these olivine sites. We also identified volcanic olivine-rich sites, which have not been reported previously.

References: [1] Yamamoto et al. (2010), *Nature GeoSci.* 3, 533-536. [2] Shearer et al. (2015), *Meteorit. Planet. Sci.*, 50, 1449-1467. [3] Matsunaga et al. (2008), *Geophys. Res. Lett.*, 35, L23201. [4] Ohtake et al. (2009), *Nature* 461, 236-240. [5] Robinson et. al. (2010), *Space Sci. Rev.*, 150, 81-124. [6] Haruyama et

al. (2009), *Science*, 323, 905-908.

キーワード : 月、マントル、かぐや

Keywords: Moon, mantle, Kaguya

High resolution lunar mineral maps using Kaguya Multiband Imager data

*Paul G Lucey¹, Myriam Lemelin², Makiko Ohtake³, Sarah Crites³, Satoru Yamamoto⁴

1. Hawaii Inst Geophys & Planetol, 2. York University, 3. Japan Aerospace Exploration Agency, 4. National Institute for Environmental Studies

We determined the abundance of olivine, low-calcium pyroxene, clinopyroxene and plagioclase for the entire lunar surface at ~80 m/pixel (512 ppd) using 1°x1° mosaics of the Multiband Imager reflectance data [1,2] corrected for the shading effects of topography (MAP level 02 [2]) and Hapke's radiative transfer equations. We constructed a spectral lookup table of the reflectance spectra of 6601 mixtures of olivine, low-calcium pyroxene, clinopyroxene and plagioclase, at 7 amounts of submicroscopic iron (SMFe), an Mg# (Mg/Mg+Fe) of 65, and a grain size of 17 microns. We also modeled the reflectance spectra of these mixtures for a grain size of 200 μm for plagioclase to account for the band depth observed in the Multiband Imager data [4], for a total of 92,414 spectra. We compared the modeled spectra that contained ±2 wt% FeO of a given pixel [5], and assigned the composition to the best spectral match (in terms of correlation and absolute difference in continuum removed reflectance). We then validated the mineral abundances we obtained with global elemental maps from Lunar Prospector [6]. We also produced global maps of FeO using the algorithm of Lemelin et al. [5], and global maps of OMAT based on the algorithm of Lucey et al. [7].

The mineral maps obtained using the Multiband Imager data shows some notable differences with the mineral maps obtained using Clementine data [1]. The Multiband Imager data suggests there is much more low-calcium pyroxene than what Clementine suggested, and that low-calcium pyroxene is by far the dominant mafic mineral found in the South Pole-Aitken basin. The data also suggests that Mare Serenitatis contains much more olivine than Mare Tranquilitatis, in agreement with Mare Serenitatis having excavated mantle material [8]. The highest olivine abundances (~25 wt.%) are found in the Procellarum KREEP Terrane. High abundances (~50 wt.%) of low-calcium pyroxene and clinopyroxene are also found in the Procellarum KREEP Terrane and in Mare Tranquilitatis. Plagioclase abundances are very high in the Feldspathic Highland Terrane, but mature surface should be analyzed with caution. Indeed, there is currently a mineral identification for every pixel in the Multiband imager data. However, mature surfaces exhibit subdued absorption bands, which can lead to an overestimation in plagioclase abundances, even though we included the presence of SMFe in our modeling. Therefore, the mineral maps presented herein should be interpreted with the aid of the OMAT map. Also, we provide global mineral maps for the complete range of latitudes, but the Multiband Image data has been better calibrated within 50° in latitude [5], therefore caution should be taken when interpreting regions at higher latitudes.

References: [1] Kodama S, Ohtake M, Yokota Y, Iwasaki A, Haruyama J, Matsunaga T, Nakamura R, Demura H, Hirata N, Sugihara T, Yamamoto Y. Space science reviews. 2010 Jul 1;154(1-4):79-102. [2] Ohtake, M. et al. (2008) EPS, 60, 257-264. [3] Haruyama, J. et al. (2008) EPS, 60, 243-255. [4] Ohtake, M. et al. (2009) Nature, 461, 236-241. [5] Lemelin, M. et al. (2015) JGR, 120, 869-887. [6] Prettyman et al. 2006. [7] Lucey, P.G. et al. (2000) JGR, 105(E8), 20,377-20,386. [8] Miljkovic, K. et al. (2015) EPSL, 409, 243-251.

Keywords: Lunar, Mineral, map

Abundance and characteristics of impact melt on lunar crater central peaks

*Sarah Crites¹, Makiko Ohtake¹, Paul Lucey², Junichi Haruyama¹, Myriam Lemelin³

1. Japan Aerospace Exploration Agency, Institute of Space and Astronautical Science (JAXA/ISAS), Japan, 2. Hawaii Institute of Geophysics and Planetology, University of Hawaii at Manoa, USA, 3. Department of Earth and Space Science and Engineering, Lassonde School of Engineering, York University, Canada.

The Moon's crust has been penetrated and modified by impact craters of all sizes over its history, ranging from micron-sized pits to basins thousands of kilometers in diameter. These craters provide a valuable three-dimensional view of the lunar crust by exposing material from depth, making material from throughout the crustal column and perhaps even the lunar mantle accessible to remote sensing observations. However, the same cratering processes that expose subsurface material also act to obscure the true local composition by contributing to extensive mixing of the surface at all scales and by producing impact melt, even on the steep slopes of central peak craters (e.g. Ohtake et al., 2009, Dhingra et al., 2016)

Taking two central peak craters (Jackson and Tycho), we isolate impact melt regions on and off the central peaks using the geologic maps of Dhingra et al. (2016) and analyze their spectral, compositional, and physical properties utilizing datasets from the Kaguya Multiband Imager (MI) and Terrain Camera (TC), the LROC Narrow Angle Camera (NAC), and the Diviner Lunar Radiometer.

Consistent with previous work (Ohtake et al., 2009; Kuriyama et al., 2012), we find that the regions of Jackson's central peak identified as impact melt are compositionally distinct, with higher iron (avg. FeO 5%) and lower modeled plagioclase content (avg. plagioclase 79%) than the rest of the very plagioclase-rich central peak (avg. FeO 2%, avg. plagioclase 90%). This indicates that for central peaks like Jackson with substantial impact melt, it is important to exclude melt from compositional analyses to understand the true local composition. However, the impact melts mapped on Tycho's central peak are not substantially different in iron content than the average central peak (both average 6% FeO).

While detailed geologic maps based on high resolution imagery such as Kaguya Terrain Camera or LROC Narrow Angle Camera are an effective tool for eliminating potentially contaminated regions of central peaks, this approach is time consuming and subjective. For large-scale surveys, a quantitative metric for narrowing data to areas less affected by mixing and contamination is needed in order to ensure only the most reliable spectra are interpreted. We investigated three possible discriminators (LOLA/TC slope, Diviner rock abundance, optical maturity) for identifying fresh and uncontaminated surfaces, and find that rock abundance may be a promising metric.

The rock abundance of the impact melt deposits on Jackson's central peak is very low, with average rock fractions near 0.03, in contrast to the rest of the central peak, which has an average rock abundance of 0.056. The rock abundance distributions for the melt regions both on and off the central peak are also skewed strongly to the right, with skewness values greater than 1, whereas the average central peak and mapped boulder regions have skewness values below 1. The slopes and optical maturity values for the impact melt units vary, and do not appear to provide a diagnostic measure of the presence of melt.

While our analysis suggests that rock abundance is an effective discriminator of impact melt, at least for

Jackson crater, it may only be applicable to central peak craters within a certain age range, as older craters have much lower rock abundances, and regolith development throughout the central peak might mask the anomalously rock-free signature of melts. Efforts are underway to map impact melt on older central peaks and compare melt rock abundance distributions with average central peak values for these more weathered craters.

Ohtake, M. et al. (2009) *Nature*, 461, 236-241. Kuriyama, Y. et al. (2012) *LPSC 43rd*, Abstract #1395.
Dhingra, D. et al. (2016) *Icarus*, 000, 1-14.

Keywords: Moon, Impact Processes, Central Peaks, Spectroscopy, Kaguya, Lunar Reconnaissance Orbiter

月反射吸収スペクトルの全球分類地図と月地殻形成に関する考察 Global classification map of lunar absorption spectra and new impression of lunar crust formation.

*晴山 慎¹、石原 吉明²、出村 裕英³、平田 成³、本田 親寿³、鎌田 俊一⁴、唐牛 譲⁵、木村 淳⁶、諸田 智克⁷、長岡 央⁸、中村 良介⁹、山本 聡¹⁰、横田 康弘¹¹、大竹 真紀子²

*Makoto Hareyama¹, Yoshiaki Ishihara², Hirohide Demura³, Naru Hirata³, Chikatoshi Honda³, Shunichi Kamata⁴, Yuzuru Karouji⁵, Jun Kimura⁶, Tomokatsu Morota⁷, Hiroshi Nagaoka⁸, Ryosuke Nakamura⁹, Satoru Yamamoto¹⁰, Yasuhiro Yokota¹¹, Makiko Ohtake²

1. 聖マリアンナ医科大学、2. 宇宙航空研究開発機構、3. 会津大学、4. 北海道大学、5. 首都大学東京、6. 大阪大学、7. 名古屋大学、8. 早稲田大学、9. 産業技術総合研究所、10. 国立環境研究所、11. 高知大学

1. St. Marianna University School of Medicine, 2. Japan Aerospace Exploration Agency, 3. The University of Aizu, 4. Hokkaido University, 5. Tokyo Metropolitan University, 6. Osaka University, 7. Nagoya University, 8. Waseda University, 9. National Institute of Advanced Science and Technology, 10. National Institute for Environmental Study, 11. Kochi University

This report presents the global classification map of lunar absorption spectra by unsupervised classification methods and new impression of lunar crust formation based on the map.

Geologic map is an important tool to understand formation process of lands. Many Moon's geologic maps has been made by many researchers based on their own criteria. Therefore we are hard to compare different sites on the Moon far from each other.

In order to solve such problem, the study of making global geologic map of the Moon has been started 3 years ago, and we made the global classification map of lunar absorption spectra based on hyper spectrum data of Spectral Profiler/Kaguya. Since this map was produced by both K-means and ISODATA of unsupervised classification methods under unified criteria for whole Moon, we can easily compare a region with others far from there.

The entire Moon was divided into 66 classes of lunar absorption spectra. The entire Moon was divided into 66 classes of lunar absorption spectra by unsupervised classification methods and those were categorized as 5 regional groups based on major corresponding location, which were Mare (M) group, Highland (H) group, South Pole-Aitken (S) group, Boundary between groups of M/S and H (B) group and Ejecta from fresh highland craters (E) group.

Some local class distributions showed good agreement with past those such as Aristarchus region, Orientale region, SPA region and highland region. Also, it was found that some area of B group covered cryptomaria and some spectrum classes corresponded to craters itself in maria and highland region. Furthermore, some new impressions of the lunar crust formation related to cryptomaria and/or layer structure of subsurface were found through comparison of different sites far from each other based on the presenting global map.

キーワード：月、地質図、地殻形成

Keywords: Moon, geologic map, crust formation

月のマグマ噴出量から制約される噴出プロセスとマグマ生成量の表／裏二分性

Near-Far Asymmetry of Magma Production and Conditions of Magma Eruption of the Moon: Constraints from Mare Volumes within the Impact Basins

田口 雅子¹、*諸田 智克¹、加藤 伸祐¹

Masako Taguchi¹, *Tomokatsu Morota¹, Shinsuke Kato¹

1. 名古屋大学大学院環境学研究科

1. Graduate School of Environmental Studies, Nagoya University

月では39億年以上前に起こった衝突盆地の形成によってつくられた低地を、マンツルの部分溶融によって生成したマグマが埋めることで、海と呼ばれる地形が形成された。月の海の火成活動は裏側に比べて表側で活発であったことが知られており、マグマ噴出量の比較から、表側に比べて裏側ではマグマ生成量が少なく、1/3~1/10程度であったという議論がなされてきた。しかし、裏側の海のマグマ噴出量の見積もりは一部の領域に限られており、表側と裏側のマグマ噴出量の違いに関する理解は不十分である。また、マグマのリキダス密度は地殻の密度よりも大きいので、マグマ噴出量はマグマ生成量だけでなく、地殻厚にも強く依存すると考えられる。しかし、これまで各盆地内のマグマ噴出量と地殻厚の関係について、定量的な調査は行われてこなかった。そこで本研究では、マグマ生成量の表／裏二分性を制約するため、(1)主に月裏側の未調査の海でマグマ噴出量を推定する、(2)マグマ噴出量と地殻厚の関係を定量的に明らかにし、マグマの上昇・噴出過程に制約を与える、ことを目的とする。マグマ噴出量については、「かぐや」の地形カメラ、マルチバンドイメージャ、数値地形モデルのデータを用いて、本研究で新たに6つの海で決定し、その他12ヶ所の海では先行研究での推定値を用いた。この際、海の溶岩流の厚みはその上に存在するクレータの直径-リム高さ比、および掘削深さによって推定され、求められた溶岩流の厚みに海領域の表面積をかけることで、マグマ噴出量を算出した。また地殻厚については、GRAIL重力場データから推定した地殻厚モデルを用い、月の主要な衝突盆地において、盆地内の地殻厚分布を調査した。

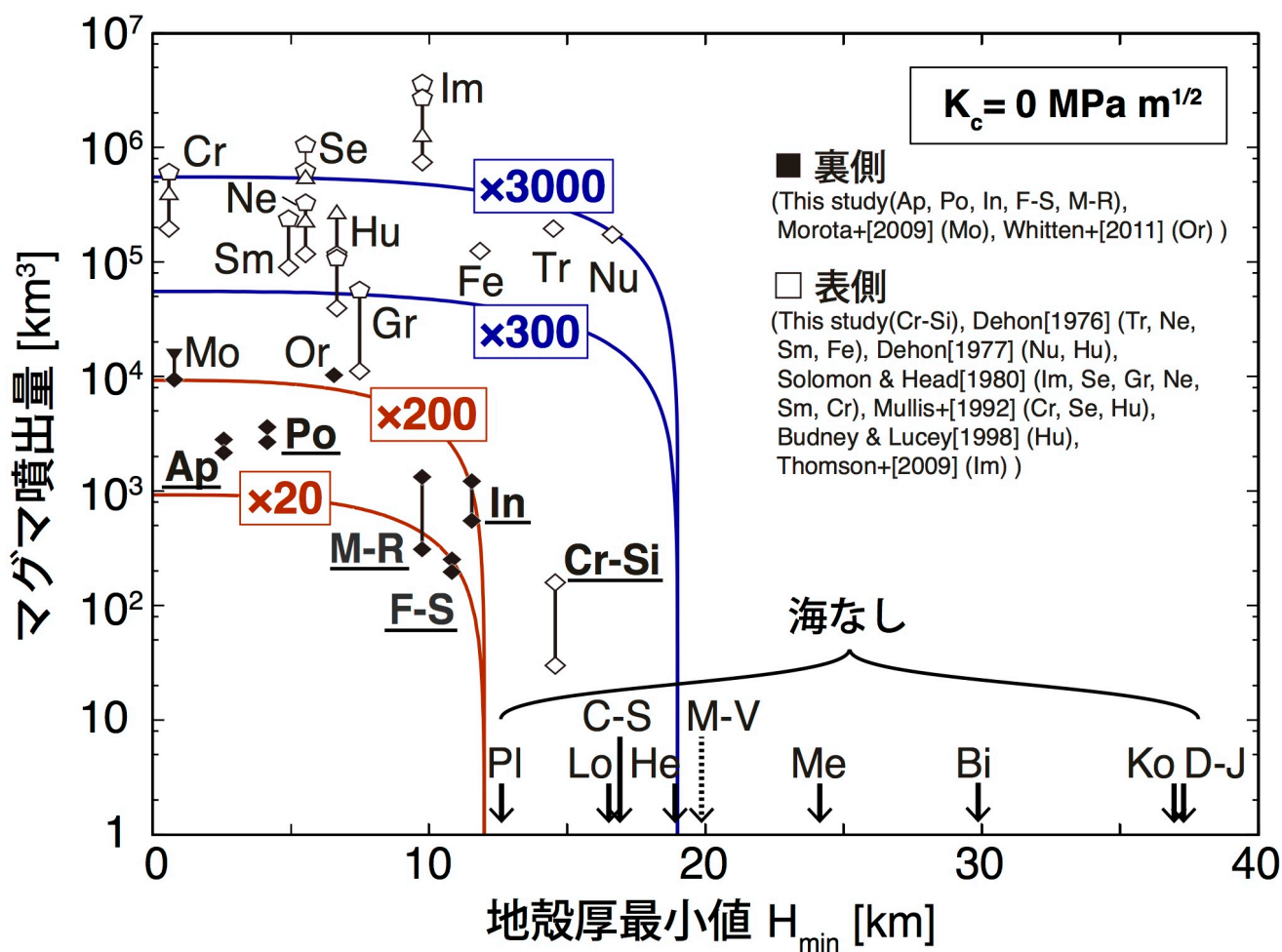
各盆地で地殻厚と海の分布を比較したところ、主なマグマ噴出は最も地殻が薄い盆地中心部で起こっていることがわかった。そこで、各盆地において地殻が最も薄い領域の地殻厚（地殻厚最小値 H_{min} ）とマグマ噴出量を比較したところ、 H_{min} が小さい盆地でのみマグマ噴出が起きていることから、 H_{min} がマグマが噴出できるかを決める主要因であったことがわかった。その上で噴出量の分布を見てみると、以下の特徴が見られた。(a)裏側では H_{min} ~12 km、表側では H_{min} ~18-20 kmにマグマ噴出境界が存在する、(b)マグマが噴出している盆地では地殻厚と噴出量の間には明瞭な相関はなく、フラットな分布をもつ、(c)同程度の H_{min} をもつ盆地でも、表側に比べて裏側ではマグマ噴出量が~100倍程度小さい。先行研究では少数の盆地のマグマ噴出量の推定から、表裏の不均質は3-10倍程度と見積もられてきたが、本研究による網羅的な調査により、マグマ噴出量の不均質はより大きかったことが示された。

観測されたマグマ噴出量と地殻厚最小値 H_{min} の間の特徴的な関係(a)、(b)を説明するために、深部におけるダイアピルの浮力を駆動力とする地殻内のダイク成長モデルを考える。この際、ダイクの成長はダイク先端の応力拡大係数を用いて評価する。まず地殻厚と噴出量の間によると、シャープな噴出境界があり、かつマグマが噴出している盆地において地殻厚とマグマ噴出量に相関が見えないことから、表側と裏側それぞれでダイアピルには典型的なサイズがあり、同程度の大きさのダイアピルが上昇してきたと考えられる。ここで、噴出可能な地殻厚（裏側：12 km、表側：19 km）を制約条件として、上昇してくるダイアピルの半径を見積もったところ、裏側では2.2-3.3 km、表側では3.4-4.4 kmであった。それらの体積は数百 km^3 のオーダーであり、月の海南西部の溶岩流地形から推定されている1回あたりの噴出量と整合的である。また、表側と裏側のダイアピル体積比は2-4倍であった。一方、観測された噴出量の比は~100倍であり、これはダイアピルサイズの違い

だけでは説明できない。したがって、表側では裏側よりも噴出回数が多かったと考えられ、観測されたマグマ噴出量との比較から、それぞれの噴出回数は裏側では10-200回、表側では200-3000回であり、その比は4-8倍と見積もられた。噴出回数はダイアピルが上昇してきた回数と考えると、これにダイアピル体積を掛けることで、マグマの生成量を見積もることができる。その結果、表側では km^3 、裏側では km^3 と見積もられ、表裏比は15~20倍と見積もられる。

キーワード：月、海の火成活動、二分性、玄武岩、地殻厚

Keywords: Moon, Mare volcanism, Lunar dichotomy, Mare basalt, Crustal thickness



月の後期火成活動の玄武岩組成の特徴

Characteristics of mineral compositions of lunar late mare volcanism revealed from Kaguya data

*加藤 伸祐¹、諸田 智克¹、山口 靖¹、渡邊 誠一郎¹、大嶽 久志²、大竹 真紀子²、二村 徳宏³

*Shinsuke Kato¹, Tomokatsu Morota¹, Yasushi Yamaguchi¹, Sei-ichiro WATANABE¹, Hisashi Otake², Makiko Ohtake², Tokuhiro Nimura³

1. 名古屋大学大学院環境学研究科地球環境科学専攻、2. 宇宙航空研究開発機構、3. 日本スペースガード協会

1. Nagoya University Graduate School of Environmental Studies, 2. Japan Aerospace Exploration Agency, 3. Japan Spaceguard Association

月のマグマオーシャンからの固化過程やその後のマンツルの熱進化過程を理解するためには、月の火成活動史を復元することが重要である。月の海の玄武岩の組成と年代との関係を調査することによってマンツルの水平・鉛直方向の組成に関する情報が得られる可能性があり、それによって月マンツルの熱進化モデルを制約できると期待される。先行研究におけるクレーターカウンティングによって決定された月の海の玄武岩の年代から、海の火成活動にはセカンドピークが存在したことが明らかになった。セカンドピークを構成している玄武岩の噴出活動は主に月の表側の熱源元素が多く濃集しているProcellarum KREEP Terrane (PKT)に集中している。このセカンドピークを引き起こした原因とそのマグマソースを解明することは、月の熱進化史に重要な制約を与えられると考えられる。

我々はこれまでの研究で、月の海を構成する溶岩流の噴出年代とチタン含有量の関係を調査してきた。その結果として、約23億年前を境にしてチタン含有量が有意に上昇したことが明らかになった。このチタン含有量の違いはマグマソースの違いであると考えられるため、23億年前以前を「Phase-1火成活動」、23億年前以後を「Phase-2火成活動」と呼ぶこととする。そして、Phase-2火成活動はPKTの一部の領域で短期間に集中して起きていること、選択的に高いチタン含有量であること、セカンドピークの年代とよく一致することから、月マンツル内に存在したチタンリッチなマンツル部分が約23億年付近で再熔融し玄武岩を噴出させたことによる活動であるという仮説を提唱している。

我々はさらに、火成活動のソースの変化を示す証拠が地形に残されていないか検証するためにPKTにおいて標高を計算した。その結果、PKTの中心で直径約1000km、高さ500mの円形の台地状の地形が観測された。またこの台地はPhase-2の火成活動の中心に位置しており、台地状地形の成因はPhase-2活動と関係していることが示唆される。

そこで我々はPKT中心領域に着目し、同領域の火成活動史を復元することで、Phase-2火成活動のマグマソースと発生メカニズムを明らかにすることを目的とする。本研究ではまず、かぐやマルチバンドイメージャ(MI)と地形カメラ(TC)の画像データ、標高データ(DTM)を用いて、PKT中心領域の地質図を作成した。地質図の作成には、地形のラフネス・MIの特定の波長の吸収深さ・MIの8バンドのデータの主成分解析結果を用いて、高地と海の境界・玄武岩ユニット同士の境界を判断した。次に、この地質図を用いてPhase-1とPhase-2の玄武岩ユニットの鉱物量比を求める。リモートセンシングデータで天体表面の岩石の鉱物組成を調査するためには、連続スペクトルデータを用いることが有効である。鉱物はそれぞれの結晶構造を反映した特徴的なスペクトルの吸収帯を持っており、月面の反射スペクトルには様々な鉱物などの混合の影響により複雑な吸収帯が存在する。複雑な吸収スペクトルを個別の鉱物の吸収帯に分離する方法の1つとして修正ガウス関数モデル(MGM)(Sunshine et al., 1990)が一般的に使用されている。しかし、MGMでは複数の鉱物の吸収帯をそれぞれ複数のガウス関数で表現するため、フィッティングパラメータが多くなり、安定した解が得られないという問題があった。二村(博士論文, 2008)では月の主要鉱物であるカンラン石、高Ca輝石、低Ca輝石、斜長石の反射スペクトルの吸収帯の特徴を少数のパラメータで定式化し、MGMに組み込むことで変数を大幅に減らす方法が考案され、小惑星の構成鉱物の推定に適用されている。本研究では、新たに鉱物サンプルを増やしてこの手法の校正式を再決定し、月の海の反射スペクトルに対して適用する。我々は現在までに、地質図の

作成範囲をPhase-2火成活動の玄武岩ユニットをおよそ全て網羅するような領域に拡張し、Phase-1, Phase-2, Tranquillitatisの反射スペクトルの解析を行い、海の玄武岩の鉱物量比や元素組成の違いを検証した。その結果、Phase-2の溶岩流が台地状地形の上部から流れ出ているように見えること、それらPhase-2の玄武岩の鉱物量比がPhase-1や静かの海の高チタン玄武岩とも異なることが分かってきた。本発表では、上記の新たに作成したマップとスペクトルの解析結果について発表する。

キーワード：月、火成活動、鉱物組成、スペクトル

Keywords: Moon, volcanism, mineral composition, spectrum

Re-evaluation of deep moonquake source parameters and implication for thermal condition of deep lunar interior.

*川村 太一¹、ロニョーネ フィリップ²、西川 泰弘^{2,4}、田中 智³

*Taichi Kawamura¹, Philippe Lognonné², Yasuhiro Nishikawa^{2,4}, Satoshi Tanaka³

1. 国立天文台、2. パリ地球物理研究所、3. 宇宙科学研究所、4. 東京大学

1. National Astronomical Observatory of Japan, 2. Institut de Physique du Globe de Paris, 3. ISAS/JAXA, 4. University of Tokyo

While deep moonquakes are seismic events commonly observed on the Moon, their source mechanism is still unexplained. The two main issues are poorly constrained source parameters and incompatibilities between the thermal profiles suggested by many studies and need for brittle properties at these depths. In this study, we reinvestigated the deep moonquake data and uncover the atypical feature of deep moonquake that completely differs from those of the Earth. We first improve the estimation of source parameters through spectral analyses using virtual “new” broadband seismic records made by combining those of the Apollo long and short period seismometers. We use the broader frequency band of the combined spectra to estimate corner frequencies and DC values of spectra, which are important parameters that constrain the source mechanism. We use the spectral features to estimate seismic moments and stress drops from 3 deep moonquake source regions. Secondly, we show that the large strain rate from tides makes the use the new sets of source parameter and re-evaluate brittle-ductile transition temperature at deep moonquake source regions. We finally take the temperature as an additional constraint and estimate the temperature profile that is compatible with deep moonquake occurrence and other geophysical observations such as surface heat flow measurements and geodetic observations.

キーワード：月科学、地震学、惑星科学

Keywords: Lunar Science, Seismology, Planetary Science

LROの成果を加えたアポロ人工インパクトの月震データの解析による月地殻厚さの再決定

Re-determination of lunar crustal thickness around the Apollo landing site by analyzing Apollo artificial impacts' seismic data combined with LRO' s products

*小野寺 圭祐^{1,2}、田中 智²、川村 太一³、石原 吉明²

*Keisuke Onodera^{1,2}, Satoshi Tanaka², Taichi Kawamura³, Yoshiaki Ishihara²

1. 総合研究大学院大学、2. 宇宙航空研究開発機構/宇宙科学研究所、3. 国立天文台

1. SOKENDAI (The Graduate University for Advanced Studies), 2. JAXA/ISAS, 3. NAOJ

It has been about 50 years since the seismometers were deployed on the Moon in the Apollo missions. Since then, some topics have been studied by analyzing the lunar seismic data. For example, core size, composition of the Moon, velocity structure of the lunar interior and so on. The lunar internal structure gives us important information about origin and evolution of the Moon. For instance, we can estimate bulk abundance of Al from lunar crustal thickness and it gives constraints for the lunar formation. In the previous lunar seismic analyses, the artificial impacts were often used to constrain the lunar crustal thickness because of known source locations and impact times from the tracking of the impactors. Five S-IVB rocket boosters and four Lunar Module impacts were deliberately impacted on the surface of the Moon to generate the seismic waves. All of them were succeeded to track except for Apollo 16 S-IVB booster. Loss of radio contact between the Apollo 16 S-IVB left large uncertainties on the location of the impact. However, the precise source locations of the five S-IVB impacts were updated with Lunar Reconnaissance Orbiter(LRO) image data recently. The updated locations resulted in change in the reference source locations for the travel time analysis with these artificial impacts. Especially, as for Apollo 16 S-IVB, we found that its impact site estimated in Apollo era was different from the precise one by about 30 km. In this study, we re-analyzed artificial impacts' seismic data using the precise source locations to determine more accurately the crustal thickness of the Moon. We will present the crustal thickness around the Apollo landing site and discuss the effect of local structure that might affect the travel time analyses. We will also discuss implications for future lunar seismic exploration for better understandings of lunar crustal structure.

キーワード：月、アポロ月震データ、月内部構造探査、LRO

Keywords: Moon, Apollo lunar seismic data, Lunar interior exploration, LRO

玄武岩質月隕石NWA 773グループの研究とその起源地域推定

Studies for the source region of lunar basaltic brecciated meteorites, Northwest Africa 773 group on the geochemical, mineralogical and petrological analyses

*長岡 央¹、Fagan Timothy¹、鹿山 雅裕²、長谷部 信行¹、唐牛 讓³、海老原 充³、大竹 真紀子⁴

*Hiroshi Nagaoka¹, Timothy Fagan¹, Masahiro KAYAMA², Nobuyuki Hasebe¹, Yuzuru Karouji³, Mitsuru Ebihara³, Makiko Ohtake⁴

1. 早稲田大学、2. 東北大学、3. 首都大学東京、4. 宇宙航空研究開発機構

1. Waseda University, 2. Tohoku University, 3. Tokyo Metropolitan University, 4. Japan Aerospace Exploration Agency

Lunar meteorites originate from craters that are randomly distributed on the surface and thereby provide valuable information on geochemistry, mineralogy, and petrology of the source regions that are not obtained from the Apollo and Lunar mission samples. The recent-improved remote sensing data (e.g., Kaguya, LRO, Chandrayaan-1) are very powerful tool to interpret their source regions. Identification of the source region of lunar meteorite could be almost equivalent to the sample return from that region. Lunar meteorites, Northwest Africa (NWA) 773 clan consist of a group of paired meteorites with different lithologies (NWA 773, 2727, 2977, 3160, 3333, 6950, and more). Some of them contain olivine cumulate gabbro (OC) as lithic clasts in a basaltic breccia, while NWA 2977 and NWA 6950 entirely consist of OC. Furthermore, NWA 773 clan contains a variety of clasts other than OC: olivine phyric basalt, pyroxene phyric basalt, pyroxene gabbro, ferroan symplectite, alkali-rich phase ferroan rocks, and silicic rock. Such a variable lithological types indicated the complex igneous petrogenesis and subsequent brecciation of the source region of NWA 773 clan. In this work, the geochemical, mineralogical and petrological characteristics of their source region were discussed by comparing the lunar sample and Kaguya observational data.

Lunar meteorites, Northwest Africa 773 clan were investigated with geochemical, mineralogical and petrological microanalyses: 1) the bulk chemical compositions were obtained by neutron-induced prompt gamma-ray analysis (PGA) and instrumental neutron activation analysis (INAA) in the Japan Atomic Energy Agency; 2) mineralogical and petrological data of NWA 773 clan were investigated by Scanning Electron Microscope (SEM) and Electron Probe Micro-Analyzer (EPMA) at Waseda Univ., visible and near-infrared reflectance spectra obtained by a JASCO reflectance spectrometer at JAXA; 3), where their radiogenic ages were discussed by references of several literatures.

Rare Earth Element (REE) compositions from NWA 773 breccia have similar KREEP-enriched patterns of their light-REE-enriched and heavy-REE-depleted patterns, and negative Eu anomaly. The NWA 773 clan breccias show the wide range REE values among each portion of NWA 773 clan breccias ($La = 40 - 170 \times Cl$ chondrite), which probably reflects variable abundances of KREEP-rich clasts in the breccia. In fact, we observed an evolved igneous clast (high-silica) in NWA 2727 breccias. Silica-rich rocks (e.g., felsite, granite) from the Apollo missions are highly enriched in incompatible elements (REE, K, Th).

NWA 773 clan represents the following characteristics: 1) the included igneous clasts derived from basaltic to rhyolitic magma composition on the Moon, 2) NWA 773 clan breccias represent high-Th (max $5.15 \mu g/g$), -FeO ($>15wt\%$), and very-low-Ti ($<1wt\%$) composition, 3) the included OC lithologies represent one of youngest crystallization ages (3 Ga) among lunar samples. The first suggests that the silica-rich rocks in NWA 773 clan could be associated with putative silicic volcanism observed by the recent remote sensing data. The above features of NWA 773 clan were permitted in Procellarum KREEP Terrane (PKT), as putative silicic volcanism mostly occurs in PKT. NWA 773 clan allows us knowledge of

complex igneous activities in PKT. Furthermore, the source region of NWA 773 clan will be narrowed down within PKT region by comparing with the following data: 1) bulk FeO, CaO, TiO₂, K, Th contents of NWA 773 clan breccia vs. elemental distribution maps obtained by Kaguya gamma-ray spectrometer; 2) visible and near-infrared reflectance spectra of NWA 773 clan vs. reflectance spectra obtained by Kaguya spectral profiler, 3) the crystallization ages of NWA 773 clasts vs. the eruption ages obtained by Kaguya Terrain Camera. As described here, the source regions can be well interpreted on the basis of the combination of data from lunar meteorite and remote sensing observations.

キーワード：隕石、KREEP、火山活動

Keywords: meteorite, KREEP, volcanism

Moganite in lunar meteorite, Northwest Africa 773 clan: Trace of H₂O Ice in the Moon's Subsurface

*鹿山 雅裕^{1,2}、富岡 尚敬³、大谷 栄治¹、瀬戸 雄介⁴、長岡 央⁵、Götze Jens⁶、三宅 亮⁷、小澤 信¹、関根 利守^{8,9}、宮原 正明⁸、留岡 和重⁴、松本 恵⁴、庄田 直起⁴、平尾 直久¹⁰

*Masahiro KAYAMA^{1,2}, Naotaka Tomioka³, Eiji Ohtani¹, Yusuke Seto⁴, Hiroshi Nagaoka⁵, Jens Götze⁶, Akira Miyake⁷, Shin Ozawa¹, Toshimori Sekine^{8,9}, Masaaki Miyahara⁸, Kazushige Tomeoka⁴, Megumi Matsumoto⁴, Naoki Shoda⁴, Naohisa Hirao¹⁰

1. 東北大学大学院理学研究科地学専攻、2. 東北大学学際科学フロンティア研究所新領域創成研究部、3. 海洋研究開発機構高知コア研究所、4. 神戸大学大学院理学研究科惑星学専攻、5. 早稲田大学先進理工学部、6. TU Bergakademie Freiberg, Institut für Mineralogie、7. 京都大学大学院理学研究科地球惑星学専攻地質学鉱物学教室、8. 広島大学大学院理学研究科地球惑星システム学専攻、9. Center for High Pressure Science and Technology Advanced Research、10. 高輝度光科学研究センター

1. Department of Earth and Planetary Material Sciences, Faculty of Science, Tohoku University, 2. Creative Interdisciplinary Research Division, Frontier Research Institute for Interdisciplinary Sciences, Tohoku University, 3. Kochi Institute for Core Sample Research, Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology, 4. Department of Planetology, Graduate School of Science, Kobe University, 5. Research Institute for Science and Engineering, Waseda University, 6. TU Bergakademie Freiberg, Institut für Mineralogie, 7. Department of Geology and Mineralogy, Graduate School of Science, Kyoto University, 8. Department of Earth and Planetary Systems Science, Graduate School of Science, Hiroshima University, 9. Center for High Pressure Science and Technology Advanced Research, 10. Japan Synchrotron Radiation Research Institute

Lunar water locally concentrates as a result of the migration of H₂O molecules on the sunlit surface towards the colder regions. The molecular water is subsequently cold-trapped as ice on the permanently shadowed regions, the poles and theoretically Moon's subsurface. Although a few trace of subsurface H₂O has been observed by remote sensing spectrometers (e.g., LCROSS), it has not been reported in the Apollo and Luna samples and lunar meteorites yet. In this study, lunar meteorites, the Northwest Africa (NWA) 773 clan, were investigated and thereby moganite, a monoclinic SiO₂ phase precipitated from alkaline fluids, was discovered by various microanalyses. A formation process of this lunar moganite was also interpreted to evaluate origin of the Moon's subsurface H₂O.

Lunar meteorites of the NWA 773 clan were selected for Raman spectroscopy, electron microscopies and synchrotron X-ray diffraction (SR-XRD). The KREEP-like NWA 773 clan commonly consists of gabbroic and/or basaltic clasts.

Silica occurred as anhedral micrograins between the constituent minerals in the lunar meteorite. Raman spectra of the silica micrograins exhibited pronounced peaks at 128, 141, 217 and 503 cm⁻¹, which corresponded to those of moganite. Coesite Raman peaks were also identified together with the moganite signature. Raman intensity mapping revealed that the silica micrograins contain abundant moganite in its core, surrounded by coesite. SR-XRD of several silica micrograins also confirmed moganite and coesite. Transmission electron microscopy clarified that the silica micrograins consist of nanocrystalline particles with an average radius of 4.5 nm. Most of the SiO₂ nanoparticles were identified as moganite by selected area electron diffraction (SAED) patterns. Moganite was accompanied by small amounts of coesite, according to SAED analyses of the SiO₂ nanoparticles.

Moganite-bearing silica micrograins in the NWA 773 clan precipitated from lunar alkaline fluids rather than terrestrial weathering for the following reasons: (1) Occurrence only in a part of the NWA 773 clan. (2) Moganite surrounded by the coesite rim. (3) High moganite content contradicting reduced content to <20 wt% under dry desert condition over terrestrial age.

A formation process for lunar moganite can be explained as follows. A host gabbroic and basaltic rock of

the NWA 773 crystallised within the Procellarum KREEP Terrene (PKT). Subsequently, carbonaceous-chondrite collisions occurred on the surface of the PKT, followed by ejection of the host rock due to the impact events. The alkaline water delivered by the carbonaceous chondrite was captured as a fluid during the brecciation on the impact basin. Below the freezing point, this fluid got cold-trapped as H₂O ice in the subsurface. Simultaneously, the moganite-rich silica micrograins precipitated from the captured alkaline fluid on the sunlit surface. The NWA 773 clan was launched from the PKT by the latest impact event, thus producing transformations to coesite from moganite.

キーワード：月隕石、月、地下水、氷

Keywords: Lunar meteorite, Moon, Subsurface water, H₂O ice

月の起源と進化

Origin and evolution of Moon

*丸山 茂徳¹

*Shigenori Maruyama¹

1. 東京工業大学地球生命研究所

1. Earth-Life Science Institute, Tokyo Institute of Technology

本講演では、月の歴史に関する新しいモデルを提案する。これは、近年行われてきた月の岩石における年代学の総まとめと、特にABEL Bombardmentモデル、リソロジー、マントルトモグラフィー、小惑星の衝突といった研究成果を地殻の厚さと表層のクレーター分布を組み合わせることによって可能になった。この新たなモデルの核にあるのは、ABELモデルである。ABELモデルは地球の二段階形成理論を説明したものであり、(1) 還元的な地球-月系が4.53Gaに誕生し、(2) その後、4.37-4.20Gaの間にABEL Bombardmentによって大気・海洋成分が二次的に地球-月系にもたらされた、とするものである。

ABEL Bombardmentにおいて、小惑星の衝突は月の表側に選択的に起き、その摩擦熱はマントル深部にも達した。約4.37Gaの最大規模の隕石衝突はマントルを経由して月の裏側のエイトケンにも影響を及ぼし、また、揮発性物質を供給したことにより加水マントルの粘性を下げる役割を果たした。隕石衝突から2億年経過するころには、リバウンド効果によって、マントルが深部から表層に持ち上がりクレーター内部で一連の玄武岩噴出が起きた。このようなリバウンドは表側でのみみられる現象で、裏側ではほとんど起きなかった。

ここで新しく提案する月の歴史の主要なイベントは月の7つに集約される。(1) 地球-月系を作ったジャイアントインパクト、(2) マグマオーシャンの形成と固化、(3) 4.37-4.20Gaに起きたABEL Bombardmentによる水成分の二次的付加、(4) プロセラルム地域にみられるようなマントルリバウンドによる玄武岩の噴出、(5) 強力な磁場の発生、(6) コペルニクス代の隕石爆撃、(7) 月震を伴うガスの噴出。

キーワード : ABELモデル、月の地質、大気海洋成分の二次的付加

Keywords: ABEL Model, Geology of Moon, secondary accretion of volatiles

The heterogeneities in Lunar interior: Role of High Titanium materials

*大谷 栄治¹、五十嵐 愛子¹、坂巻 竜也¹、趙 大鵬²

*Eiji Ohtani¹, Mako Igarashi¹, Tatsuya Sakamaki¹, Dapeng Zhao²

1. 東北大学大学院理学研究科地学専攻、2. 東北大学大学院理学研究科附属地震・噴火予知研究観測センター

1. Department of Earth and Planetary Materials Science, Graduate School of Science, Tohoku University, 2.

Department of Geophysics, Graduate School of Science

Tomographic images of the lunar mantle have been reported by Zhao et al. (1) using the Apollo seismic data. They reported existence of P and S-wave anomalies in the lunar mantle which could relate also to the epicenters of the deep moonquakes. There is a possibility that the cause of the lunar P and S-wave anomalies is completely different from that of the Earth's mantle. In the Earth, slow seismic anomalies are the signature of hot plumes ascending in the Earth's mantle. On the other hand, the seismic anomalies in lunar mantle may be caused by compositional heterogeneities. Elkins-Tanton et al. (2) presented a model of solidification of the lunar magma ocean. In their model, titanium rich cumulates were formed in the later stage of its solidification, and gravitational overturn occurred in the early Moon. This overturn provided titanium rich regions in the lunar deep interior. Some of these materials might have stagnated and could have produced chemical heterogeneities in the lunar mantle. Titanium enriched materials are denser and slower in seismic wave velocity compared to that of the normal lunar mantle, which causes slow seismic velocity anomalies. Previous measurements of density and sound velocity of Ti-rich materials and magmas (3) indicate clearly that the Ti-rich materials which are remnant of the early overturn can cause slow velocity anomalies. Igarashi et al. (4) measured the solidus temperature of the Ti enriched materials at around 3-5 GPa corresponding to the base of lunar mantle, and showed the solidus temperature is lower than the lunar geotherm, i.e., the partial melting occurs in the lunar lower mantle generating dense magmas at the depths (3). Thus, the molten high Ti melts can cause high attenuation and slow seismic velocity regions at the base of the lunar mantle. More precise seismic tomography studies of the moon and mineral physics studies of the lunar materials are essential to clarify the heterogeneities of the lunar mantle in the future lunar exploration. It is very important to separate the chemical and thermal heterogeneities in the lunar mantle and to compare the difference from those of the Earth's mantle.

References: (1) Zhao et al. (2008), *Chinese Sci. Bulletin*, 53, 3897-3907, Zhao et al. (2012), *Global Planetary Change*, 90-91, 29-36, (2) Elkins-Tanton et al. (2011), *EPSL*, 304, 326-336 (3) Sakamaki et al. (2010), *EPSL*, 299(3), 285-289, (4) Igarashi et al. (This meeting abstract)

キーワード：トモグラフィ、高チタン物質、月のマグマオーシャン、不均質性、月マントル

Keywords: Tomography, High titanium material, Lunar magma ocean, Heterogeneity, lunar mantle

月の自由コア章動の観測可能性

Possible observation of free core nutation of the moon

*花田 英夫¹、大江 昌嗣²、ペトローバ ナターリア³、グセフ アレクサンダー³

*Hideo Hanada¹, Masatsugu Ooe², Natalia Petrova³, Alexander Gusev³

1. 国立天文台RISE月惑星探査検討室、2. 奥州宇宙遊学館、3. カザン連邦大学

1. RISE Project, National Astronomical Observatory, 2. Oshu Space and Astronautical Museum, 3. Kazan Federal University

地球には流体核があり、流体であるので、その外側のマントルとは別の回転軸で回転をすることができ、何らかの原因で、流体核の形状軸と回転軸の方向がずれると、流体核とマントルの境界面（CMB）に働く力の分布が形状軸に対して非対称になり、偶力が発生する。この偶力によって、マントルと流体核の回転軸がお互いのまわりを自転と逆の向きにゆっくりと回りだすが、自由コア章動（FCN）と呼ばれる。地球の場合、この周期は約460恒星日であるが、地球上の回転系で見ると、 $1-1/460$ （回転/恒星日）の角速度で、ほぼ1恒星日周期となる。1恒星日周期付近には、1日周期の潮汐の成分が多数あり、これらはFCNと共鳴を起こし、震幅が増幅され、流体核共鳴と呼ばれている。

さて、月にも流体核があるかどうかは、過去の内部磁場の有無、熱史に制約を与えることができ重量な問題であるが、未だよくわかっていない。過去の月レーザ測距の観測データの解析から内部でのエネルギー消散を示唆したもの、潮汐加熱の影響を理論的に計算し内部の部分熔融を示唆した等の研究はあるが、直接的な観測はない。流体核の存在を示す一つの方法はFCNを観測することである。FCNの周期がわかれば流体核の大きさやCMBの扁平率等がわかる。ここでは、FCNが観測可能かどうかを考えてみる。

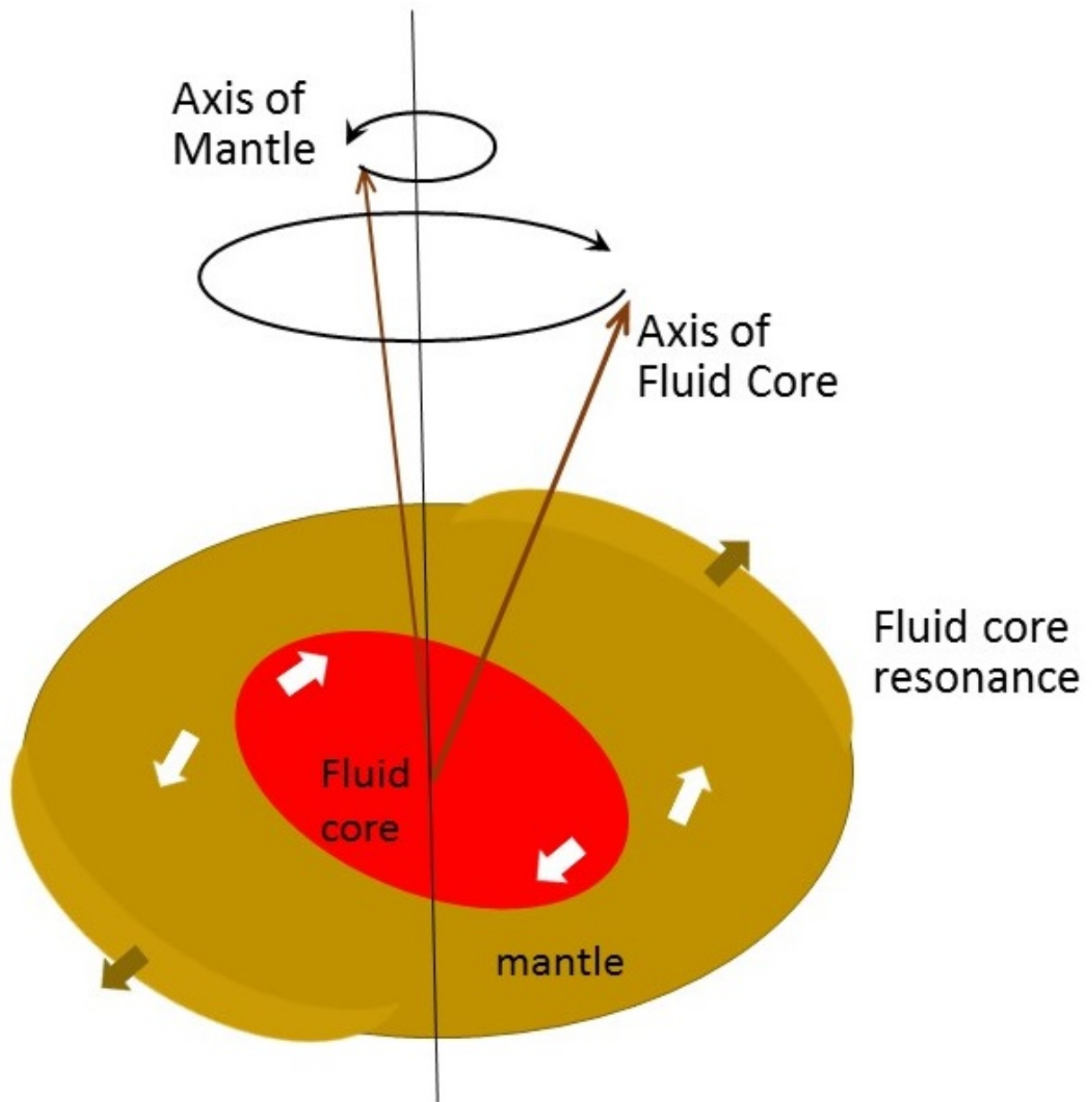
月の自由コア章動の周期は、数10年～約200年と月の内部構造モデルによって幅があり、振幅は約16秒角以下と見積もられている。これを天文観測で観測することは、周期が非常に長いのでかなり困難が予想されるが、地球で観測されたように、自由コア章動との共鳴によって潮汐の振幅が増幅される効果を観測する方が少し現実的である。月の平均自転速度を Ω 、自由コア章動を円運動と仮定してその空間に対する角速度を n とすると、月の上では相対的に、 $\Omega - n$ と観測され、自由コア章動の周期を200年とすると、月の上では、 $0.0366 - 1/(200 \times 365) = 0.03660099 - 0.00001370 = 0.03658729$ （27.331日）となる。

27.3日付近に月の潮汐の成分が多数あるので、FCNの共鳴によって振幅が増幅される可能性がある。潮汐ばかりでなく、原動力が同じである月の回転変動（強制秤動）についても、潮汐と同じ周期成分があるので、共鳴の可能性がある。1000年以上に拡張した月の暦DE421の解析からその検出可能性が指摘されている（Rambaux&Williams, 2010）。しかし、月には、FCN以外にも、歳差（約24年周期）、地球のチャンドラ極運動に相当する極運動（約75年）、自由秤動（経度方向2.9年、緯度方向約100年）等の自由モードがあり（Gusev他、2016）これらの周期との共鳴も考えられ、複雑な応答が予想される。

ここでは、それらの共鳴の効果について推定するとともに、月表面での歪や重力潮汐の観測によってFCNの存在を示す可能性について検討する。

キーワード：月の内部構造、自由コア章動、流体核共鳴、月の潮汐

Keywords: Lunar interior, Free core nutation, Free core resonance, Lunar tides



機械学習法による深発月震の分類と月の科学と探査への応用

Classification of deep moonquakes using machine learning technique and application of it to lunar science and exploration

*山田 竜平¹、加藤 広大²、菊池 栞²、山本 幸生³、廣田 雅春⁴、横山 昌平⁵、石川 博²

*Ryuhei Yamada¹, Kodai Kato², Shiori Kikuchi², Yukio Yamamoto³, Masaharu Hirota⁴, Shohei Yokoyama⁵, Hiroshi Ishikawa²

1. 会津大学 先端情報科学研究センター、2. 首都大学東京、3. 宇宙航空研究開発機構、4. 大分工業高等専門学校、5. 静岡大学

1. The University of Aizu, Research Center for Advanced Information Science and Technology, 2. Tokyo Metropolitan University, 3. Japan Aerospace Exploration Agency, 4. National Institute of Technology, Oita College, 5. Shizuoka University

1969-1977年の間に行われたNASAのアポロ月地震探査において、アポロ12,14,15,16号の4観測点で多数の月地震が観測された。中でも、月深部およそ700-1200kmの間で発生する深発月震は最も数多く（約7000個）観測されたイベントであり、これまで106個の震源位置が同定されている。月の深部構造に関する知見はこのような震源位置が同定された深発月震の走時解析から得られてきた(e.g., Lognonné et al.,2003, Matsumoto et al.,2015)。特に、深発月震は月内部に働く潮汐応力に關与して同一震源で繰り返し発生しており、同一震源の波形は類似している事が分かっている (Nakamura et al., 1982)。そして、これまで多くの深発月震イベントがこの波形の類似性を利用して震源同定が行われてきた(e.g., Nakamura,2003)。その一方で、発見されている月震の約20%が未だ未分類であり数百個以上の深発月震イベントの震源が決められていない。これは、従来の波形の類似性を用いた震源同定は主に時系列波形のみを用いていたため(e.g., Nakamura,2003, Bulow et al.,2005)、震源を分類するのに十分に有効な特徴量を抽出できなかった可能性がある。そこで、我々は教師有り機械学習法を使用して、深発月震の震源分類に有効な特徴量を見出し、新たな基準を用いての震源分類について研究した。

本研究では、Apollo12号で観測された深発月震で特に活動的な震源で発生したイベントを分類に用いた。まず、我々は代表的な教師有り機械学習法の一つであるSupport Vector Machine (SVM)を使用して、震源を分類する特徴量として時系列波形のみでなく、周波数成分でパワースペクトル密度(PSD)を与えてその有効性を確かめた。その結果、P波到達時刻から15分間のデータのPSDが最も震源分類に有効である事を示せた (Goto et al., 2013, 加藤等, 2016)。また、代表的な5つの機械学習法を使用して、深発月震の震源分類に有効な手法を調べた結果、Neural Networkが最も有効である事が確かめられた (菊池等, 2016)。一方で、月震波形は一般に非常に振幅が小さく、また強い散乱を受けているため、特徴量の抽出が容易でないイベントも多い。深発月震は主に地球-太陽-月の位置関係（潮汐応力）に關与して発生する事が分かっている(e.g., Lammleign,1977)。そこで、我々は震源分類の特徴量で波形を使用しないものとして、月震の発震時刻における月と他の惑星間の位置関係について調べた。その結果、いくつかの深発月震源を切り分けるのに地球と月間のある特定方向における相対位置と速度が重要である事が分かった (加藤等, 2017)。

このような新しい特徴量、震源分類の方法はこれまで未分類であった深発月震イベントの震源同定に使用可能である事が示されている (菊池等,2017)。現在、位置が分かっている深発月震源の大部分は月の表側であり、裏側での深発月震源はわずかにしか発見されていない。一方、(Nakamura,2005)では、裏側起源と推定される月震イベントが1-2の観測点で検出されている事を述べている。もし、我々の手法を用いて未分類深発月震がこれらと同一震源である事が分かり、観測点数を増やせば、走時解析から新たな裏側深発月震を発見できる可能性がある。この場合、これまで未知であった月裏側の月震活動度や裏側内部構造などについて新たな制約を与えられ、月の二分性に関して重要な知見を得る事が期待できる。また、震源分類の新しい特徴量を用いて7年間の連続観測データから新たな深発月震を多数発見できれば、月震の発生周期と発生メカニズムに

関して新たな情報を得る事も期待できる。加えて、SELENE-2 (Tanaka et al., 2008)やApproach (山田等, 2016)で代表される将来の月地震探査では1-2点の観測点に限られており、走時データのみから深発月震の震源位置を独立に決定するのが困難である。この際、月震発生時の月と惑星の位置関係から震源の同定が可能となれば、少数観測点でも将来探査で新たな走時データを得る事ができるようになる。本発表では上述した機械学習法による深発月震の分類結果を紹介すると共に、この手法の将来の月科学、探査への応用を報告する予定である。

キーワード：深発月震、機械学習法、月震波形解析、月内部構造、月探査

Keywords: Deep moonquake, Machine learning technique, Analysis of moonquake waveform, Lunar interior structure, Lunar exploration

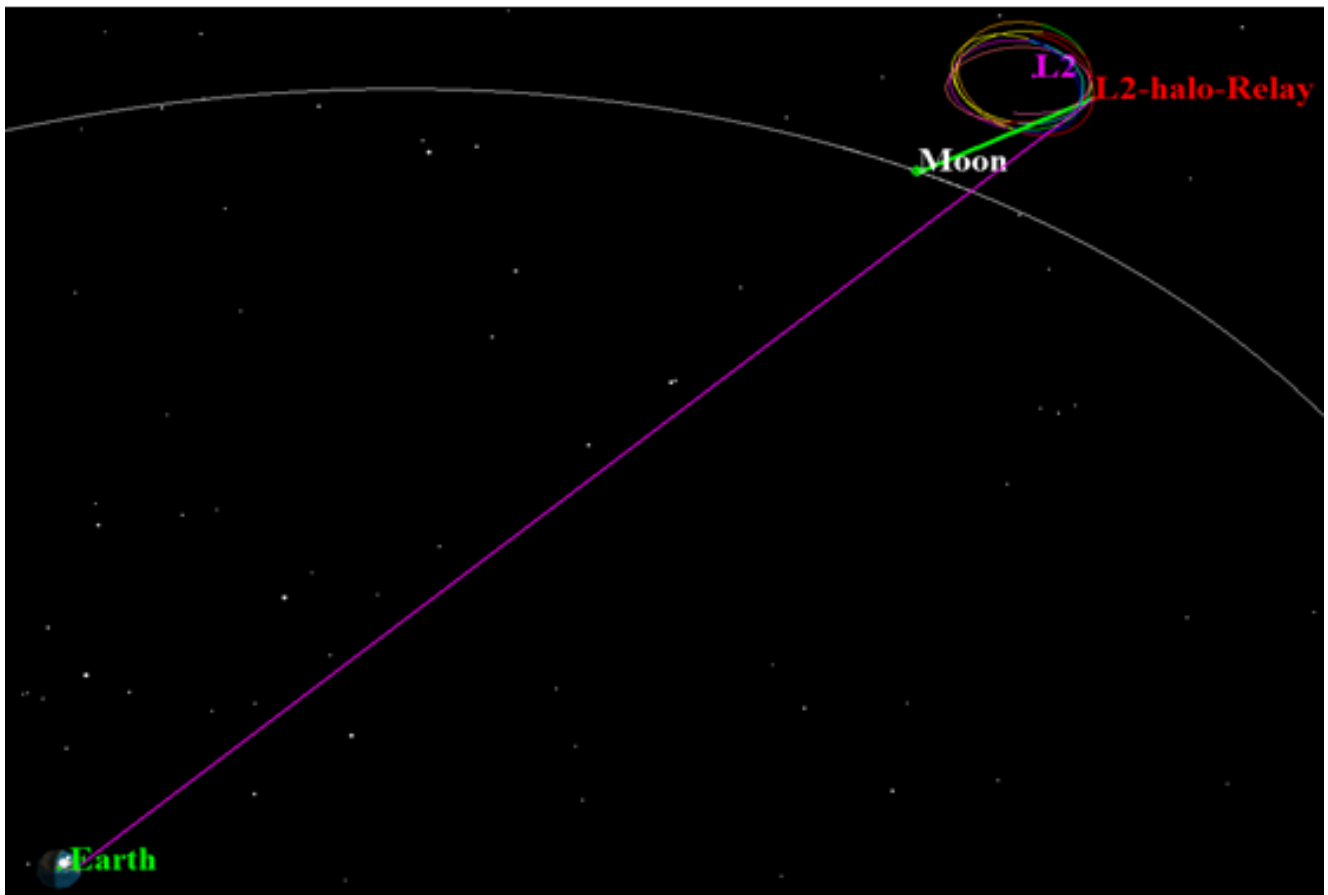
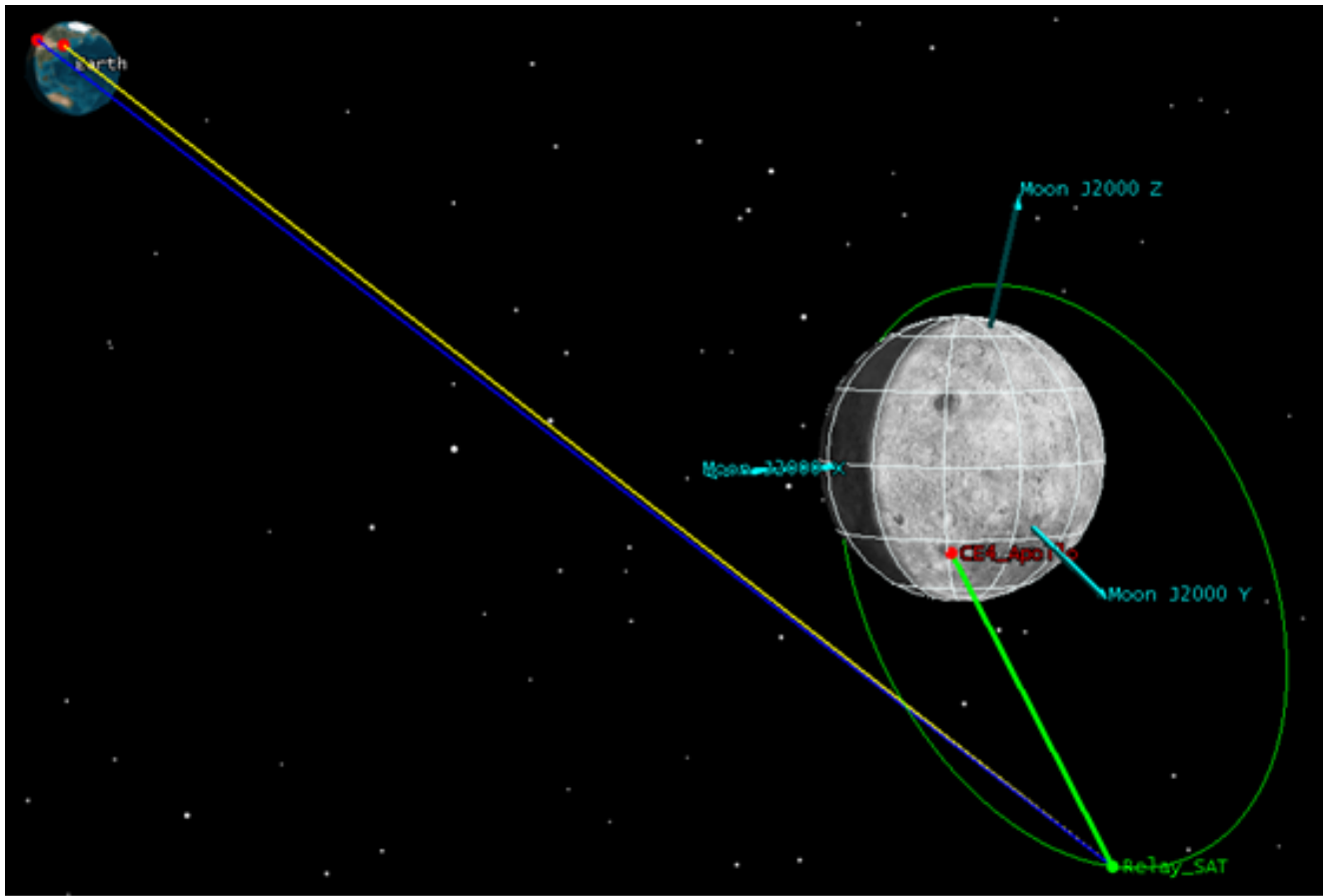
A simulation study of Lunar Farside Lander positioning with a Four-way Lander-Orbiter Relay Tracking Mode

*Mao Ye¹, Fei Li^{1,2}, Jianguo Yan¹, Weifeng Hao², Weitong Jin¹, Xuan Yang¹, Shengkai Zhang²

1. State Key Laboratory of Information Engineering in Surveying, Mapping and Remote Sensing, Wuhan University, 2. Chinese Antarctic Center of Surveying and Mapping, Wuhan University

The in-situ exploration of lunar farside is still an international blank until now. The reason is the synchronous rotation of the moon, which results in the unachievable between the lunar farside lander and earth tracking station. The traditional direct tracking mode, such as two-way range/range rate, VLBI delay/delay rate, will be ineffective for the farside lander tracking, therefore it is essential to relay the signal using a relay satellite. In this paper, we firstly give the updated mathematical formulas and the partials for the Four-way Lunar-Orbiter relay tracking measurement. Then, based on the independent precise orbit determination software system WUDOGS, the precise positioning of the lunar farside lander is studied with simulated tracking data. The results show that: with 0.1 mm/s measurement level, the positioning precision of the farside lander could reach the maximum of centimeter level using a circumlunar relay satellite (Fig. 1 a); while for the L2 halo relay satellite (Fig. 1 b), its accuracy could reach about 10 meters level. The conclusion could provide an important reference for the future lunar farside landing mission, especially for Chinese lunar exploration mission Chang' E-4.

Keywords: lunar farside, lander positioning, precise orbit determination, four-way relay tracking, Chang' E-4



SLIM搭載をめざしたマルチバンドカメラの設計と開発

Design and development of Multi-band Camera proposed for SLIM mission

*佐伯 和人¹、白石 浩章²、本田 親寿³、大竹 真紀子²、SLIM MBC team

*Kazuto Saiki¹, Hiroaki Shiraishi², Chikatoshi Honda³, Makiko Ohtake², SLIM MBC team

1. 大阪大学大学院理学研究科、2. 宇宙航空研究開発機構宇宙科学研究所、3. 会津大学

1. Graduate School of Science, Osaka University, 2. Japan Aerospace Exploration Agency, Institute of Space and Astronautical Science, 3. The University of Aizu

小型月着陸実証機 (SLIM)計画がJAXAにより計画されている。SLIMは重力天体への軟着陸に関する様々な技術を実証するための着陸機である。鍵となる技術は精密航法制御アルゴリズム、画像認識航法、衝撃吸収脚などである。SLIM計画を実行することにより、天体着陸技術に関して「降りやすいところに降りる」着陸から、「降りたいところに降りる」着陸へのパラダイムシフトが起こると期待される。このパラダイムシフトを起こすためには数々の革新的な技術が必要であり、そのため初号機は小型の実証機とすることが合理的である。我々は、このSLIMの着陸機に搭載する、マルチバンドカメラ (MBC)を提案している。MBCは小型の可視・近赤外カメラで、InGaAsのイメージングセンサーと、10バンドのバンドパスフィルターを持つホイール、そして、パンやチルトをするための可動ミラーからなる。MBCの科学目的は、着陸機周辺の岩石の造岩鉱物の同定と岩石組織の観察である。MBCの設計と、開発の現状、科学観測の工夫について発表する。

キーワード：月、SLIM、リモートセンシング

Keywords: the moon, SLIM, remote sensing

SSERVI: Merging Science and Human Exploration

*Gregory Schmidt¹, Kristina Gibbs¹

1. NASA Solar System Exploration Research Virtual Institute

NASA's Solar System Exploration Research Virtual Institute (SSERVI) represents a close collaboration between science, technology and exploration, and was created to enable a deeper understanding of the Moon and other airless bodies. SSERVI is supported jointly by NASA's Science Mission Directorate and Human Exploration and Operations Mission Directorate. The institute currently focuses on the scientific aspects of exploration as they pertain to the Moon, Near Earth Asteroids (NEAs) and the moons of Mars, but the institute goals may expand, depending on NASA's needs, in the future. The nine initial teams, selected in late 2013 and funded from 2014-2019, have expertise across the broad spectrum of lunar, NEA, and Martian moon sciences. Their research includes various aspects of the surface, interior, exosphere, near-space environments, and dynamics of these bodies.

NASA anticipates additional team selections in early 2017 with a further Cooperative Agreement Notice (CAN) likely to be released in 2017. Calls for proposals are issued every 2-3 years to allow overlap between generations of institute teams, but the intent for each team is to provide a stable base of funding for a five-year period. SSERVI's mission includes acting as a bridge between several groups, joining together researchers from: 1) scientific and exploration communities, 2) multiple disciplines across a wide range of planetary sciences, and 3) domestic and international communities and partnerships.

The SSERVI central office is located at NASA Ames Research Center in Mountain View, CA. The administrative staff at the central office forms the organizational hub for the domestic and international teams and enables the virtual collaborative environment. Interactions with geographically dispersed teams across the U.S., and global partners, occur easily and frequently in a collaborative virtual environment. This talk will consist of an overview of SSERVI's mission and the current US teams.

Keywords: Solar System, Virtual Institute, Lunar, NEA, Martian Moons

NASA' S SOLAR SYSTEM EXPLORATION RESEARCH VIRTUAL INSTITUTE: BUILDING COLLABORATION THROUGH INTERNATIONAL PARTNERSHIPS

*Kristina Gibbs¹, Gregory Schmidt¹

1. NASA Solar System Exploration Research Virtual Institute

Abstract

The NASA Solar System Exploration Research Virtual Institute (SSERVI) is a virtual institute focused on research at the intersection of science and exploration, training the next generation of lunar scientists, and community development. As part of the SSERVI mission, we act as a hub for opportunities that engage the larger scientific and exploration communities in order to form new interdisciplinary, research-focused collaborations.

This talk will describe the international partner research efforts and how we are engaging the international science and exploration communities through workshops, conferences, online seminars and classes, student exchange programs and internships.

Introduction

NASA' s Solar System Exploration Research Virtual Institute (SSERVI) represents a close collaboration between science, technology and exploration that will enable deeper understanding of the Moon and other airless bodies as we move further out of low-Earth orbit. The Institute is centered on the scientific aspects of exploration as they pertain to the Moon, Near Earth Asteroids (NEAs) and the moons of Mars. The Institute focuses on interdisciplinary, exploration-related science centered around all airless bodies targeted as potential human destinations. Areas of study reported here will represent the broad spectrum of lunar, NEA, and Martian moon sciences encompassing investigations of the surface, interior, exosphere, and near-space environments as well as science uniquely enabled from these bodies.

We will provide a detailed look at research being conducted by our ten international partners. In addition, we will discuss the process for developing international partnerships with NASA.

Summary and Conclusions

As the Institute' s teams continue their proposed research, new opportunities for both domestic and international partnerships are being generated that are producing exciting new results and generating new ideas for scientific and exploration endeavors. SSERVI enhances the widening knowledgebase of planetary research by acting as a bridge between several different groups and bringing together researchers from: 1) scientific and exploration communities, 2) multiple disciplines across the full range of planetary sciences, and 3) domestic and international communities and partnerships.

Acknowledgements

The authors would like to thank the hard work and dedication of all SSERVI Team members and International partners that work diligently to create an innovative and collaborative Institute.

Keywords: NASA International Partnerships, SSERVI, Virtual Institute