

SELENE(かぐや)で観測された嵐の大洋・雨の海の高誘電率領域 High permittivity regions in Oceanus Procelluram and Mare Imbrium found by SELENE (Kaguya)

熊本 篤志^{1*}; 石山 謙¹; 押上 祥子²; 春山 純一³; 後藤 由貴⁴
KUMAMOTO, Atsushi^{1*}; ISHIYAMA, Ken¹; OSHIGAMI, Shoko²; HARUYAMA, Junichi³; GOTO, Yoshitaka⁴

¹ 東北大学大学院理学研究科, ² 国立天文台, ³ 宇宙航空研究開発機構宇宙科学研究所, ⁴ 金沢大学理工学域電子情報学類
¹Tohoku University, ²National Astronomical Observatory of Japan, ³JAXA/ISAS, ⁴Kanazawa University

Introduction: The effective permittivity of the lunar surface material is important for discussion of their composition and porosity. Based on the Maxwell-Garnett mixing model, the bulk density of the lunar surface materials can be derived from their effective permittivity by using the following equation [Fa and Wiczorek, 2012]: ρ [g/m³] = 4.61 ($\epsilon_r - 1$) / ($\epsilon_r + 2$). Bulk density of the lunar surface material depends on the abundances of voids and heavy components such as ilmenite. The dataset obtained by Lunar Radar Sounder (LRS) onboard SELENE (Kaguya) [Ono et al., 2010] enables us to perform global high-resolution mapping of the lunar surface permittivity because the observation was performed from the polar orbiter at an altitude of about 100 km, and in a frequency range around 5 MHz where thermal emissions is negligible. We should note that the echo powers from the lunar surface depends not only on the permittivity but also on the roughness of the lunar surface. As for the roughness, we can use SELENE Digital Terrain Model (DTM) based on Terrain Camera (TC) observation [Haruyama et al., 2008]. We can therefore calculate expected echo powers by applying Kirchhoff Approximation (KA), and compare them with observed echo powers in order to determine the effective permittivity.

Analyses Method: The global distributions of the intensity of the off-nadir surface echo in a frequency range of 4 - 6 MHz in an incident angle range from 10 to 20 degrees were derived from the SELENE/LRS dataset. The median of off-nadir echo intensities were derived in 360 x 180 areas of 1 degree (longitude)x 1 degree (latitude). In addition, we have derived the global distribution of the surface roughness parameters. The RMS height ν can be derived from the SELENE TC/DTM. If we assume the self-affine surface model, the roughness parameters H and s can be obtained by the least square fitting: $\nu = s \Delta x^H$ in a baseline length Δx range from 30 m to 3 km. The off-nadir surface echo power was then calculated by using the radar equation. Assuming KA, the backscattering coefficient in the radar equation can be obtained from the roughness parameters H, s [Bruzzone et al., 2011]. In calculation of the expected echo powers, we have to assume some effective permittivity also. We compared the observed and calculated echo powers with changing effective permittivity assumption, and determined the most plausible effective permittivity.

Results: By applying the analysis method mentioned above, we could obtain the observed and calculated off-nadir surface echo powers. Based on them, we could estimate the effective permittivity of the lunar surface materials. The estimated effective permittivity is 2 - 3 in the highland, 3 - 4 in the maria. In addition, it was found that there areas whose effective permittivity reaching ~5 in the eastern part of Oceanus Procellarum and the western part of Mare Imbrium.

Discussion: By using the estimated effective permittivity of the lunar surface, we can derive the bulk density of the lunar surface materials. The derived bulk density is 1.2 - 1.8 g/cm³ in the highlands, 1.8 - 2.3 g/cm³ in the maria, and approximately 2.6 g/cm³ in the high-permittivity areas in Oceanus Procellarum and Mare Imbrium. The differences of estimated bulk density among the previous studies [Wiczorek et al., 2013; Carrier et al., 1991] and this study could be explained by the depth dependence of the bulk density of the lunar surface soils and rocks. The areas of high permittivity in the eastern part of Oceanus Procellarum and western part of Mare Imbrium coincide with young lava flow units in PKT region. We can consider two possible reasons: (i) The regolith layer is thinner than other mare regions due to short exposure to the meteorite impacts. (ii) The bulk density is higher than other mare regions due to high abundance of the ilmenite.

キーワード: SELENE(Kaguya), 月レーダサウンダ (LRS), 誘電率, 嵐の大洋, 雨の海, デジタル地形モデル (DTM)
Keywords: SELENE(Kaguya), Lunar Radar Sounder (LRS), permittivity, Oceanus Procelluram, Mare Imbrium, Digital terrain model (DTM)

月の最後の海の火成活動と表面地形との関係 Relationship between topography and latest mare volcanism at 2.0 Ga of the moon

加藤 伸祐^{1*}; 諸田 智克¹; 渡邊 誠一郎¹; 山口 靖¹; 大嶽 久志²; 大竹 真紀子²
KATO, Shinsuke^{1*}; MOROTA, Tomokatsu¹; WATANABE, Sei-ichiro¹; YAMAGUCHI, Yasushi¹;
OTAKE, Hisashi²; OHTAKE, Makiko²

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

¹Division of Earth and Planetary Sciences, Graduate School of Science, Nagoya University, ²Japan Aerospace Exploration Agency

月のマグマオーシャンからの固化過程やその後の内部の大規模な構造変化の有無を理解する上で、月の海の玄武岩の組成を調べることは有効である。玄武岩の組成と年代との関係からマントルの水平・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トルの進化モデルを制約できると期待される。

月の海を構成する溶岩流の噴出年代とチタン含有量の関係を調査したこれまでの我々の研究から、約23億年前を境にしてチタン含有量が有意に上昇していることが分かっている。このチタン含有量の違いはマグマソースの違いであると考えられ、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 火成活動は嵐の大洋・雨の海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から、月深部に起源を持つスーパーホットプルームによるものであるという仮説を提唱している。

もしスーパーホットプルームが起こったとすると、それに伴う何らかの地形的な痕跡が残されている可能性がある。そこで地形とセレノイドとの差をとってみると、嵐の大洋・雨の海領域の中心で直径約1000km、高さ500mの円形の台地状の地形が観測された。またこの台地はPhase-2の火成活動の中心地とよく一致している。また、この領域のリッジの成因や走向の解釈は今まではっきりしなかったが、台地状地形の位置と照らしあわせてみると、台地状地形に關係して分布していると解釈できる。このことから台地状地形の成因はPhase-2活動と強く關係していることが示唆される。

このような台地状地形がスーパーホットプルームによって作られ、現在もそれが保存されていると仮定すると、この地形をうまく説明するモデルを構築することでプルームの物理量が推定できるのではないかと考えた。本研究では、プルームの浮力が弾性リソスフェアを押し鉛直上向きに変形するというモデルを考え、Solomon and Head [1979]の手法を用いて、観測された台地状地形プロファイルの台地の端の傾斜をよく説明するプルームの浮力・半径、弾性リソスフェアの厚さを決定した。このとき求められた弾性リソスフェアの厚さは20-30kmであった。

Solomon and Head [1980]では弾性リソスフェアにかかる荷重によってできるたわみを計算し、月の海の地域のたわみを説明する弾性リソスフェアの厚さを定量的に評価した。これによると、Mare Imbriumの下のリソスフェアの弾性リソスフェアの厚さは50-75kmであったとされている。大部分のマグマ噴出はPhase-1火成活動期に起こっていることを考えると、この50-75kmという弾性リソスフェアの厚さは~30億年前のリソスフェアの厚さであると考えられる。一方で、本研究で得られた20-30kmの薄い弾性リソスフェアの厚さはPhase-2火成活動期のものであり、~20億年前にそれ以前よりも温度勾配が一時的に大きくなったことを意味する。これはPhase-2火成活動のマグマが非常に高温であり、リソスフェアの下面の温度が上昇して、弾性リソスフェアの厚さが薄くなったためだと考えられる。Phase-2火成活動のマグマが高温であったことは、そのソースが深部起源とするスーパープルーム仮説と整合的である。

一方で、台地状地形を現在に保存する機構はまだ分かっていない。台地状地形周辺の下の地殻厚データをみると、パッチ状に地殻厚が厚い領域があることがわかった。このことから、台地状地形の地下はアイソスタシー的になっていると考えられる。しかしながら、詳細に空間分布を見ると地殻が厚い領域は台地の南側に偏っており、短波長での変化が見られることから、台地状地形の形成とは別のプロセスで地殻が厚くなったと考えられる。台地状地形を現在に保存し、地殻の厚みを説明するモデルとして、Phase-2火成活動の終盤におけるシリカリッチなマグマの地殻への付加の効果が挙げられる。本発表では、重力データと地形データとの相関解析も含めた、台地状地形の地下構造についての議論を行うとともに、Phase-2火成活動と台地状地形の關係について考察する。

キーワード: チタン含有量, スーパーホットプルーム, セレノイド, 有効弾性厚, 月マントル, PKT

Keywords: titanium content, super hot plume, selenoid, effective elastic thickness, lunar mantle, the Procellarum KREEP Terrane

月の光条クレータからみた過去30億年間の天体衝突史 Impact history in the last 3 billion years based on the lunar rayed craters

加藤 麻美^{1*}; 諸田 智克¹
KATO, Mami^{1*}; MOROTA, Tomokatu¹

¹ 名古屋大学大学院環境科学研究科

¹ Nagoya University Graduate School of Environmental Studies

月は過去40億年の天体衝突の記録をクレータとして保存しており、それは太陽系内側の小天体の軌道・衝突進化史を知る上で重要な情報である。天体衝突史の理解は、主にアポロとルナの岩石試料の放射年代とサンプル採取地点のクレータ数密度の関係から得られているが、岩石試料は39億年~31億年間に集中しているため、過去30億年間の天体衝突の歴史はよく分かっていない。一方で、月の光条クレータや地球クレータの統計研究などから、ここ数億年間にクレータ生成率が上昇または減少しているという対立した仮説が提案されている。

近年、月探査の成功により高解像度の画像データによる月面の詳細画像が蓄積され、個々のクレータの精密な年代決定が可能となった。そこで、本研究では過去10億年間の衝突頻度の変動を検証する為に、月周回衛星「かぐや」の地形カメラ画像を用いて、先行研究で光条を持つと同定された直径20km以上のクレータ67個を対象に相対年代を決定した。年代決定にはクレータ年代学を用いた。クレータ年代学とは、若い地域ほどクレータが多く、古い地域ほど少ないという考えに基づいて、クレータ数密度からその地域の形成年代を見積もる方法である。クレータ(D ≥ 20 km)の形成年代は、クレータの放出物上にある微小クレータの個数密度を計測することで決定できる。

その結果、サンプルから年代が判明しているCopernicusクレータ(8.1億年)より若いクレータが27個、古いクレータが40個となった。そしてWilhelms et al. [1978]で同定されたEratosthenian(32~8億年前) + Copernican(8.1億年~現在)クレータと本研究で同定されたCopernicanクレータの数密度から、過去32億年間と過去8億年間の平均のクレータ生成率を比較した。若いクレータの個数から過去8.1億年間のクレータ生成率F(D ≥ 10km)は、 $3.77 \times 10^{-6} \text{ (km}^{-2} \text{ y}^{-1}\text{)}$ と見積もられた。一方、過去32億年間のクレータ生成率F(D ≥ 10km)は、 $5.69 \times 10^{-6} \text{ (km}^{-2} \text{ y}^{-1}\text{)}$ と見積もられる。このことから、過去32億年間に比べて過去8億年間の平均クレータ生成率は0.66倍と低いことが明らかとなった。地球-月系に衝突する可能性のある天体は地球近傍小天体と呼ばれ、その主なソースは小惑星帯と考えられている。本研究で得られたクレータ生成率の長期的な減少は小惑星帯からの衝突天体の供給が減少していることを意味しており、小惑星帯における小天体の総数が約30億年かけて減少していることを示唆する。

キーワード: 月, クレータ, クレータ年代学

Keywords: Moon, crater, cratering chronology

ハイパースペクトルリモートセンシングによる特徴的吸収スペクトルを持たない月面領域の観測：侵食された月原始地殻？ Lunar surface areas with featureless reflectance spectra revealed by hyperspectral remote sensing

山本 聡^{1*}; 中村 良介²; 松永 恒雄¹; 小川 佳子³; 石原 吉明⁴; 諸田 智克⁵; 平田 成³; 大竹 真紀子⁴;
廣井 孝弘⁶; 横田 康弘¹; 春山 純一⁴
YAMAMOTO, Satoru^{1*}; NAKAMURA, Ryosuke²; MATSUNAGA, Tsuneo¹; OGAWA, Yoshiko³; ISHIHARA, Yoshiaki⁴;
MOROTA, Tomokatsu⁵; HIRATA, Naru³; OHTAKE, Makiko⁴; HIROI, Takahiro⁶; YOKOTA, Yasuhiro¹;
HARUYAMA, Junichi⁴

¹ 国環研, ² 産総研, ³ 会津大, ⁴ JAXA, ⁵ 名古屋大, ⁶ Brown Univ.

¹ NIES, ² AIST, ³ Univ. of Aizu, ⁴ JAXA, ⁵ Nagoya Univ., ⁶ Brown Univ.

Spectral Profiler (SP) onboard SELENE/Kaguya has obtained continuous spectral reflectance data (hyperspectral data) for about 70 million points (0.5 by 0.5 km footprint) on the Moon in the visible and near-infrared wavelength ranges. Using a data mining approach with all the SP data (SP data mining), we have revealed the global distributions of several-kilometer-wide sites with exposed end members of various minerals on the lunar surface: olivine-rich sites, purest anorthosite (PAN) sites, orthopyroxene-rich sites, clinopyroxene-rich sites, and spinel-rich sites. These results are based on the analysis for the diagnostic absorption bands of $\lambda = 1\mu\text{m}$ and $2\mu\text{m}$ in the continuous reflectance data for the lunar major minerals. On the other hand, it has also been reported that there are several sites on the Moon exhibiting no absorption band for $1\mu\text{m}$ and $2\mu\text{m}$ (hereafter, featureless spectra or FL-spectra). However, it still remains unclear what is the origin for the FL spectra on the Moon. For the interpretations of the origin of the FL spectra, we need to understand the global occurrence trends of FL sites on the Moon. In this study, we conducted the global survey to reveal the global distribution of the FL sites using the SP data mining. From the global distribution data, we will discuss the possible mechanisms and its implications for the lunar primordial crust.

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

かぐや反射スペクトルを用いた月高地地殻の鉱物組成の推定 Mineralogy of the lunar highland crust based on the Kaguya reflectance spectra

大竹 真紀子^{1*}; 山本 聡²; 松永 恒雄²; 小川 佳子³

OHTAKE, Makiko^{1*}; YAMAMOTO, Satoru²; MATSUNAGA, Tsuneo²; OGAWA, Yoshiko³

¹ 宇宙航空研究開発機構, ² 国立環境研究所, ³ 会津大学

¹Japan Aero space Exploration Agency, ²National Institute for Environmental Studies, ³The University of Aizu

Introduction: The composition of the lunar highland crust is among the most important information for understanding the formation mechanism of the lunar highland crust and the composition of the lunar magma ocean. Previously, the composition of the lunar highland crust was estimated mainly based on measurements of the lunar returned samples. Measurements of returned lunar samples and meteorites indicate that the lunar highland crust typically consists of plagioclase and low-Ca pyroxene with minor amounts of other mineral phases. However, it is not clear if the low-Ca pyroxene really is a major mafic silicate component of the highland crust because the returned samples may not be a representative material of the entire highland crust. Therefore, this study investigated the mafic silicate phase and estimated its composition within the highland crust by using remote sensing reflectance spectra of the lunar surface.

Method: We used reflectance spectra acquired by the Kaguya Spectral Profiler (SP), which has a spectral coverage of 500 to 2600 nm in 300 bands and a spatial resolution of 500 x 500 m. Among the global SP data, all of the 570 purest anorthosite (PAN) [1] spectra identified and reported by [2] were analyzed by using the modified Gaussian model (MGM) [3]. Several MGM parameters, a number of fitted peak and peak parameters (center wavelength, width, and strength) of each peak at the starting point were tried, and the results were cross evaluated. The compositions of silicate mafic minerals were estimated by comparing the peak fit results and the known correlation between absorption center wavelength and mineral composition.

Results: Most (93%) of peak, which corresponds to the mafic silicate phase, has a center wavelength shorter than 980 nm, suggesting that these mafic silicates in the PAN rocks are low-Ca pyroxene (65% are shorter than 950 nm). Note that the low-Ca pyroxene in this study implies pyroxene having less than a 0.2 molar ratio of Ca/(Ca+Mg+Fe) smaller than 0.2. Data points having a center wavelength shorter than 980 nm had a strong absorption band and were not a product of weak ambiguous absorption spectra. Six percent of the data have center wavelengths between 980 nm and 1040 nm, which correspond to the high-Ca pyroxene composition. The remaining 1% of the data with longer center wavelengths around 1050 nm possibly corresponds to olivine or glass. No apparent phase difference (low-Ca and high-Ca pyroxene difference) is observed between the nearside and the farside.

Discussion: Our results indicate that the majority of the PAN layer in the lunar highland crust globally consists of anorthite and small amounts of low-Ca pyroxene, the major mafic silicate component, rather than high-Ca pyroxene or olivine. This result is consistent with the previous work based on measurements of the lunar material from the lunar surface mixing layer with limited global coverage and confirms the homogeneous modal abundance within the lunar highland crust. The short center wavelengths of the PAN rocks at Jackson crater, which located at the farside highland suggest relatively higher Mg# (Mg/(Mg + Fe) in mole per cent) (around 70) in this region than the near side. This evidence is in good agreement with previous work [4], which suggests the presence of magnesian anorthosite in the farside highland.

References: [1] Ohtake, M. et al. (2009) *Nature*, 461, 236-240. [2] Yamamoto, S. et al. (2012) *Geophys. Res. Lett.*, 39, L13201. [3] Sunshine, J. et al. (1990) *J. Geophys. Res.* 95, 6955-6966. [4] Ohtake, M. et al. (2012) *Nature GeoSci.* 5, 384-388.

キーワード: かぐや, 月, 地殻, 反射スペクトル

Keywords: Kaguya, Moon, crust, reflectance spectra

月表面反射スペクトルの教師なし分類と月地質 (1) Unsupervised Classification of the Moon's Surface Reflectance Spectra and Geological Significance (1)

石原 吉明^{1*}; 晴山 慎²; 大竹 真紀子¹
ISHIHARA, Yoshiaki^{1*}; HAREYAMA, Makoto²; OHTAKE, Makiko¹

¹ 宇宙航空研究開発機構, ² 聖マリアンナ医科大学
¹JAXA, ²St. Marianna Univ. of Med.

Great successes of recent lunar missions provide vast amount of varieties of remote sensing data. Analysis of those new data provide some new key evidences, such as pure-plagioclase rocks (e.g., Ohtake et al., 2009) and olivine rich rocks (e.g., Yamamoto et al., 2010), for studying solidification process of the Lunar Magma Ocean (LMO) and following lunar evolutions. Those key evidences require us to reconsider the LMO solidification process. One approach to study this problem is requiring following step, reconstruction of compositions and structures for primitive crust by removing influences of volcanisms, impact cratering, and other geological effects. For reconstructing primitive crust, we have to generate a global geological map covers recent findings, so we started a project to build a new lunar geological map to reconstruct structures and composition of the lunar primitive crust. Because of huge volume of recent data set, fully manual classify by expert researchers is not realistic, and then, we have been trying to use some data mining methods for basic unit candidate estimation.

In this study, we show some classification results of SELENE Multiband Imager (MI) data and Spectral Profiler (SP) data applied data mining methods, and compare them with a fully manual classification result for a limited area. Our classification procedure consists of two steps; Independent Component Analysis (ICA) and Iterative Self-Organizing Data Analysis (ISO-DATA). Detail strategy of our procedure is presented by Hareyama et al. in this meeting.

Our procedure generally works well. The classification results in mare region indicate that could detect some types of mare basalt flows. Especially high-Ti basalt in Oceanus Procellarum and the Mare Tranquillitatis are clearly identified. Ejecta deposits of fresh ray craters are also clearly identified. In addition, we compare classification results our procedure around the Aristarchus region with that of fully manual classification result by a researcher (M.O.). These two agrees each other generally. Then, we consider our procedure capture the lunar geological context and useful for the first step of building lunar geological map.

キーワード: 月, 地質図, 教師なし分類

Keywords: Moon, Geological Map, Unsupervised Classification

月面における炭素含有物の衝突過程形成の研究 Study of carbon-bearing materials formed by impact process on the Moon

三浦 保範^{1*}
MIURA, Yasunori^{1*}

¹ 客員 (国内外大学)
¹ Visiting Univ.(In & Out)

はじめに:

太陽系(地球型惑星天体)において、大気ガスや海水を持つ惑星と月などの大気圏を持たない天体での揮発性炭素を含有する物質を統一的に研究することが必要である。最近筆者は、大気や海水天体の有無とそれらの炭素含有物質からの統一的な観点から研究を行っている [1-4]。本件では、炭素含有物の衝突過程形成を、大気圏を持たない天体(月・小惑星・水星)において、特に月面について報告する [3]。

月の揮発性元素:

微細なダスト粒子から合体成長して天体サイズになる過程で、揮発性元素は月にも一般的に残存する。しかし月は火星惑星サイズに近いが、特異な衝突散逸過程で揮発性物質が生成時に残存できなかったと考えられる [1-3]。

炭酸ガス大気生成の問題点:

水蒸気は冷却すると常温液体相になる。しかし炭酸ガス大気は冷却しても常温でも気体状態であるため、高温大気を実験を行い [2,3]、何かに取り込まない限りそのままであることが分かる。その意味で、火星や金星の炭酸ガスも液体相の存在(既存)が前提になると、全球的海水圏の形成は困難となる [3]。したがって月は、内部に炭素含有揮発物が残存している天体である [3]。

月面の炭素含有物質の形成:

月は大気圏を持たない天体なので、直接に月面に炭素物質が大気圏と地表衝突による二段炭素ガス形成ができないため、分離炭素粒子の高圧系の二段階成長ができにくい [3]。内部に局在する(初生的と大気惑星破片起源の)微量炭素含有物が継続的隕石衝突で粗大化が表層内部で可能である。月面の炭素含有物は、衝撃波過程が関与した炭素含有物(ガラス、炭素、炭化物、炭酸塩など)であるが微量局在したものを成長することが今後可能である [1-3]。

月面の海水圏の問題:

大気圏のある惑星(火星・金星)で海水圏を形成することは全球的に一般的に困難であるが、方法論的には二過程が起これば可能である [3]。それに比べて、大気圏の無い月面(水星、小惑星)での海水圏形成は全球的には更にもっと困難であるが、効果的な方法(天然と人工的)で大気圏をまず形成できた場合は将来的に可能な提案ができる [3]。

まとめ:

- 1) 月などの天体に大気圏や海水圏を形成することを、炭素含有物質作成法の実験成果から考察した。
- 2) 炭酸ガス大気は、高温状態でも減少または低温化することが、室内実験可能である。
- 3) 月面では分離した炭素含有粒子がガラス、炭素、炭化物、炭酸塩などに含まれ、隕石衝突の継続でマクロ成長が可能である。

参考文献: [1] Miura Y. (2011): LPSC 42(2011), #2817.

[2] Miura Y. et. al. (1996) Antarctic Meteorites XX1(Tokyo), 107-110.

[3] Miura Y. (2015): LPSC2016 (LPI), #1811, #1666.

[4] Miura Y. (2009): Patent application.

キーワード: 月, 炭素含有物, 衝突, 揮発性, 実験, 大気・水圏

Keywords: The Moon, Carbon-bearing materials, Impacts, Volatiles, Experiment, Global air and water

太陽風-レゴリス相互作用：月とフォボスにおける観測の比較 Solar wind-regolith interaction in space: Observations at Moon and Phobos

二穴 喜文^{1*}
FUTAANA, Yoshifumi^{1*}

¹ スウェーデン国立宇宙物理研究所
¹ Swedish Institute of Space Physics

「太陽風陽子がレゴリスに衝突する際に反射される現象は、どの天体でも見られる一般的なものなのか」という疑問に答えるべく、月探査衛星および火星探査衛星搭載イオン質量分析器のデータ解析結果を用い、月とフォボスの比較天体学的見地から議論を行なう。

太陽風陽子のレゴリスからの反射という現象は、日本の月探査衛星 Kaguya 搭載のプラズマ粒子計測器 MAP/PACE によって始めて報告された。その後、いくつかの独立な観測（例えば月探査衛星 Chandrayaan-1 搭載の高速中性粒子・プラズマ粒子計測器 SARA）によっても確認されている。本講演ではまずはじめにこれまでに報告されている月表面からの反射プラズマの特徴についてレビューを行なう。

続いて、冒頭の疑問を詳細に議論するため、火星の月、フォボス近傍でのイオン分布関数を調べた結果について報告する。欧州の火星探査機 Mars Express がフォボスに接近した際に取得した、同機搭載イオン質量分析器 ASPERA-3/IMA のデータをサーベイしたところ、あるフライバイ時（最接近距離は約 60km）に太陽風や衝撃波近傍の陽子では説明できない分布関数を持った陽子成分を検出した。これが月近傍で報告されている反射陽子と非常に近い特徴を持っていることや、軌道追跡の結果などを総合して、我々はこれをフォボス表面における太陽風の反射陽子である可能性が高いと結論づけた。本研究は、月以外のレゴリス表面からも反射イオンが観測されたという最初の例を提示したもので、レゴリスからの太陽風反射という現象はどの天体においても起こりうる一般的現象であることを示唆する。

キーワード: 太陽風, プロトン反射, レゴリス, 月, フォボス
Keywords: solar wind, proton reflection, regolith, Moon, Phobos, backscattering

小型ペネトレータによる月内部構造探査と将来への展望 Exploration of the lunar internal structure using a small-sized penetrator and its perspective

山田 竜平^{1*}; 石原 吉明²; 小林 直樹²; 村上 英記³; 後藤 健²; 白石 浩章²; 田中 智²; 早川 雅彦²
YAMADA, Ryuhei^{1*}; ISHIHARA, Yoshiaki²; KOBAYASHI, Naoki²; MURAKAMI, Hideki³; GOTO, Ken²;
SHIRAIISHI, Hiroaki²; TANAKA, Satoshi²; HAYAKAWA, Masahiko²

¹ 国立天文台 RISE 月惑星探査検討室, ² 宇宙航空研究開発機構, ³ 高知大学

¹National Astronomical Observatory of Japan / RISE Project, ²Japan Aerospace Exploration Agency, ³Kochi University

これまで、月の内部構造は Apollo での地震探査、かぐや、GRAIL での重力場探査、またレーザー測距等の測地観測によりその情報が得られてきた。しかし、現状のデータのみからでは月マントル深部や、中心核について十分な制約を与えず、月深部の物質構造や温度構造については未だ不明確な状態である。また、月の地殻厚さやその構造に関しても、いまだ不確実性を残している。月深部や地殻の構造を明らかにするには、地震計によりその領域を伝播した地震波を高精度で観測する事が必要不可欠である。LUNAR-A ミッションで開発されたハードランディングプローブであるペネトレータには高感度の地震計が搭載されており、月面で新しい地震観測を実現するための有効なツールとして利用できる。

このペネトレータの月面での技術実証、観測実証を行うために、2014年2月にイプシロン3号機に搭載する小型科学衛星へのペネトレータ1本の搭載を提案した (Approach ミッション)。この提案では、隕石の衝突発光を地上で観測することで、隕石衝突イベントの位置決定を高精度で行い、その走時データから地殻厚さを決定する事と、現在の月震イベントの活動度をアポロ当時と比較して検証することを月震観測の目的としていた。また、月高地地域での初の熱流量観測も重要なテーマであった。しかしながら、ペネトレータ1本における観測成立の可能性が十分でなかったために、提案自体は非採択となった。

そこで、我々は現在、小型ペネトレータを開発して、小型衛星に2基搭載することで観測の冗長性を確立することを検討している。小型ペネトレータでは LUNAR-A で確立した耐衝撃性技術を継承しつつ、2/3 サイズにペネトレータを縮小する事を目指している。本発表では、まず、現在までに検討したペネトレータ小型化の方針と、観測への影響について報告する。その上で、小型ペネトレータ2本を用いて、月震観測、熱量観測によって、どのような科学成果が得られるか検討した結果について述べる。更に、小型ペネトレータでの観測実証の後に、ペネトレータを利用した月地震観測によって、どのように月の進化や起源についてアプローチしていくか議論する予定である。

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

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

月着陸探査に向けた能動型蛍光 X 線分光計の開発状況 Present status of the active X-ray spectrometer development for future lunar landing mission

長岡 央^{1*}; 長谷部 信行¹; 草野 広樹¹; 内藤 雅之¹; 柴村 英道¹; 天野 嘉春¹; 太田 亨¹;

Fagan Timothy¹

NAGAOKA, Hiroshi^{1*}; HASEBE, Nobuyuki¹; KUSANO, Hiroki¹; NAITO, Masayuki¹; SHIBAMURA, Eido¹;

AMANO, Yoshiharu¹; OHTA, Tohru¹; FAGAN, Timothy¹

¹ 早稲田大学

¹ Waseda University

The Active X-ray Spectrometer (AXS) consisting of an active X-ray generator and a silicon drift detector (SDD) has been developed for future lunar landing missions. The AXS can determine the elemental composition of rock samples by X-Ray Fluorescence spectroscopy which provides the geochemical data of rock samples. The AXS has each outstanding features as excellent energy resolution, compact and light weight, low power consumption, and no high voltage power supply and no radioisotopes. The X-ray generator is made of some pyroelectric crystals, peltier device and thin metal target. The instrument of the AXS and the present status of its development are presented and discussed.

キーワード: 蛍光 X 線分析, 能動型蛍光 X 線分光計, 月着陸探査, 元素分析

Keywords: X-ray fluorescence spectroscopy, active X-ray spectrometer, lunar landing mission, elemental analysis

次期月惑星着陸探査計画に向けた蛍光 X 線分析法の検討 — 試料の表面粗さと特性 X 線強度比の関係 —
Study on X-ray Fluorescence for Future Lunar Landing Mission - Surface Roughness and Ratios of Characteristic X-ray -

内藤 雅之^{1*}; 長谷部 信行¹; 長岡 央¹; 草野 広樹¹; 桑古 昌輝¹; 大山 裕輝¹; 柴村 英道¹;
天野 嘉春¹; 太田 亨¹; Matias Lopes Jose A.²
NAITO, Masayuki^{1*}; HASEBE, Nobuyuki¹; NAGAOKA, Hiroshi¹; KUSANO, Hiroki¹; KUWAKO, Masaki¹;
OYAMA, Yuki¹; SHIBAMURA, Eido¹; AMANO, Yoshiharu¹; OHTA, Toru¹; MATIAS LOPES, Jose A.²

¹ 早稲田大学, ²University of Coimbra

¹Waseda University, ²University of Coimbra

月表層の元素濃度分布を知ることは、月の起源と進化を解明する上で重要である。日本の月惑星探査としては、2007年9月にかぐや (SELENE) が打ち上げられ、搭載されたガンマ線分光計によって、月表層の元素分布が調査されてきた。これまで得られた月全球の情報を基に、更に詳細な局所的な情報を得るため、次なる探査計画として着陸機と探査車による計画が期待されている [1]。探査車による着陸地点周辺の元素分析には蛍光 X 線分析 (XRF) が適している。

XRF は、実験室系でよく用いられる X 線を励起源とした分析手法である。実験室系では、よく表面研磨された試料を X 線管を用いて励起し、元素分析が行われる。一方で、実際の惑星表面は微小隕石や太陽風、銀河宇宙線などによって風化が進んでいる。そのため、元素分析の前に風化した表面を研磨機によって削り取る。そこで本研究では、試料表面の粗さが、測定される特性 X 線の強度比にどのような影響を与えるかについて、実験・シミュレーションの両方を用いて検討を行った [2, 3]。

実験では、2種類の粉末標準試料 (JGb-1, JP-1) を融解凝固させ、一様で粒子の大きさと多孔性を無視できる均質な組成をもつガラス状の試料を作成した。それらを粗さの異なる砥石を用いて表面研磨し、X 線管を用いて励起させ、試料から放出される特性 X 線を測定した。

シミュレーションでは、PENELLOPE(ver. 2008) を使用し、試料の組成と励起源については実験と同条件のものを用いた。表面の凹凸をパラメーターとして試料表面の粗さを再現し、試料表面が平坦な場合と合わせてシミュレーションを行い、実験結果と比較した。

本発表では、これらの実験とシミュレーションの結果をもとに、惑星探査で蛍光 X 線分析を行ううえで必要な研磨の度合いについて報告する。

[1] T. Hashimoto et al., 2011, Acta Astronautica 68, 1386-1391. [2] H. Kusano et al., 2013, Proc. SPIE 8852, 88520B. [3] M. Naito et al., Nucl. Instrum. Methods Phys. A, to be published.

キーワード: 月試料, 蛍光 X 線分析, 能動型 X 線分光計, 表面粗さ

Keywords: Lunar sample, X-ray fluorescence, Active X-ray Spectrometer, Surface roughness

遠隔操作時の時間遅れ問題を解決する SIFT を用いた過去から未来へのビジュアルトラッキング
Visual Tracking using SIFT to Solve Time-Delay Problem in Remote Operation

西山 裕之^{1*}; 清水 創太²; 長岡 央¹; 長谷部 信行²

NISHIYAMA, Hiroyuki^{1*}; SHIMIZU, Sota²; NAGAOKA, Hiroshi¹; HASEBE, Nobuyuki²

¹ 早稲田大学応用物理学科, ² 早稲田大学理工学術院総合研究所

¹Dept. of Applied Physics, Waseda University, ²ARISE, Waseda University

This paper proposes and describes a method to solve a time-delay problem when a direction of a camera in the wide angle fovea vision system (WAFVS) equipped on a lunar exploring rover is controlled remotely from the ground control station on the earth. That is, we need to control the camera view direction accurately in order to obtain visible ray band images of a target in detail using WAFVS, but the time-delay often causes WAFVS to fail to capture the target in the central field of view of the input image when the rover is moving around. The authors achieve correct camera view direction control by applying SIFT operator to track a target candidate from past images to future images stored temporarily in the computer on the rover. Experimental results show this implementation is successfully done and indicate how to apply WAFVS for this task.

キーワード: 探査ローバー, 遠隔操縦, ビジュアルトラッキング, シフト, 広角中心窩センサ, 時間遅れ

Keywords: Exploring Rover, Remote Operation, Visual Tracking, SIFT, Wide Angle Fovea Sensor, Time Delay

月のマントル対流の三次元球殻モデリング Toward a 3D spherical modeling of lunar mantle convection

小河 正基^{1*}; 柳澤 孝寿²; 亀山 真典³

OGAWA, Masaki^{1*}; YANAGISAWA, Takatoshi²; KAMEYAMA, Masanori³

¹ 東京大学大学院総合文化研究科, ² 海洋研究開発機構, ³ 愛媛大学地球深部ダイナミクス研究センター

¹Graduate School of Arts and Sciences, Univ. of Tokyo, ²Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology, ³Geodynamic Research Center, Univ. of Ehime

Earlier two-dimensional models of coupled magmatism-mantle convection system raise two issues concerning the evolution of the lunar mantle. One is to understand why lunar magmatism continuously occurs with a characteristic time of several hundred million years. When the Rayleigh number of the lunar mantle Ra exceeds the critical value for the onset of thermal convection R_c , earlier two-dimensional models suggest that a positive feedback, called the magmatism-mantle upwelling (MMU) feedback, operates to make magmatism episodic and vigorous; magmatism occurs continuously and mildly as observed on the Moon only when $Ra < R_c$. Another issue is to understand why mare magmatism continued until as recent as about a billion years ago. Magmatism extracts heat producing elements (HPEs) and earlier two-dimensional models predicts that lunar magmatism should have waned much earlier because of this HPEs extraction. A possible solution to this issue is that the lunar mantle contains a reservoir that is enriched in HPEs and compositionally dense at depth. The nature of thermal convection in a basally heated mantle with a small core, however, has not been investigated enough to resolve these issues. To estimate R_c and to understand the nature of thermal convection in the lunar mantle, we are carrying out a linear perturbation analyses and numerical simulation of thermal convection in a spherical shell with a small core.

キーワード: 月, マントル進化, 3次元球殻, マントル対流, 数値シミュレーション

Keywords: the Moon, mantle evolution, 3D spherical shell, mantle convection, numerical simulation

小さいコアを持つ球殻マントルでの対流パターン：粘性の温度依存性の影響 Flow patterns in spherical mantles with small size of core; the effect of temperature dependent viscosity

柳澤 孝寿^{1*}; 小河 正基²; 亀山 真典³

YANAGISAWA, Takatoshi^{1*}; OGAWA, Masaki²; KAMEYAMA, Masanori³

¹ 海洋研究開発機構, ² 東京大学大学院総合文化研究科, ³ 愛媛大学地球深部ダイナミクス研究センター

¹Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology, ²Graduate School of Arts and Sciences, Univ. of Tokyo, ³Geodynamic Research Center, Univ. of Ehime

Clarifying the effects of three-dimensional spherical geometry on mantle convection is a major issue of mantle dynamics in terrestrial planets. We study in detail the nature of thermal convection of a variable viscosity fluid in the basally heated spherical mantle of small planets with a small core, keeping in mind the application of our numerical models to the Moon. Spherical geometry affects mantle convection mildly when the ratio of the core-radius to the planetary radius r_{CMB} takes an Earth-like value of 0.55, while it is thought to affect strongly when r_{CMB} is small like Moon around 0.2. Here, we investigate the flow pattern systematically for r_{CMB} from 0.1 to 0.6 with small to large viscosity dependence on temperature. We first estimate the critical Rayleigh number Rc for the onset of convective motion at various r_{CMB} and the magnitude of temperature-dependence of viscosity by a linear perturbation analysis. Then, we study the convective flow pattern of thermal convection above Rc by numerical simulation. The result of our simulation is in good agreement with the linear analysis. The nature of convective flow pattern considerably changes as r_{CMB} smaller than about 0.4. The flow pattern has smaller number of up- and down-wellings. We established regime diagrams of convection pattern in relation to the Rayleigh number and the temperature dependence of viscosity, for various value of r_{CMB} . Stronger temperature dependence of viscosity is necessary for realizing the stagnant-lid regime of convection for smaller r_{CMB} . It is due to the relatively smaller volume of high temperature region near the CMB. The horizontally averaged temperature at mid mantle remains low despite the strong temperature variation of viscosity when r_{CMB} is small.

キーワード: 月, 3次元球殻, マントル対流, コアサイズ, 対流パターン

Keywords: Moon, 3D spherical shell, mantle convection, size of the core, flow pattern

マグマオーシャン結晶分化による月斜長岩の形成 Formation of anorthosite on the Moon through magma ocean fractional crystallization

新井 達之^{1*}; 土屋 卓久²; 丸山 茂徳³
ARAI, Tatsuyuki^{1*}; TSUCHIYA, Taku²; MARUYAMA, Shigenori³

¹ 東京工業大学大学院地球惑星科学専攻, ² 愛媛大学地球深部ダイナミクス研究センター, ³ 東京工業大学地球生命研究所
¹Department of Earth and Planetary Sciences, Tokyo Institute of Technology, ²Geodynamics Research Center, Ehime University,
³Earth-Life Science Institute, Tokyo Institute of Technology

Geological records of the moon have a potential to reveal early evolution of the earth. 4.4Ga anorthosite on the Moon formed as by fractional crystallization of the lunar magma ocean (LMO). It has been generally accepted that the lunar bulk composition is enriched in FeO compared with the bulk silicate earth, which is critical to make large plagioclase/melt density difference enough to form the anorthosite. However, the bulk moon composition likely has the same composition of the earth, which is supported by isotopic similarities for the two bodies and recent giant impact modeling. In this study, critical condition of fractional crystallization of plagioclase is assessed for the BSE composition by taking into account crystal/melt density difference, viscosity of melt, crystal size, and Rayleigh number of the magma ocean. This study modeled solidification process of the LMO and calculated change of melt composition by use of MELTS/pMELTS. Density and viscosity of melt were calculated by use of first-principles simulations.

Results of thermodynamic calculations indicate that melt is basaltic ($Mg\# = 0.59$) when plagioclase starts to crystallize. Viscosity of the basaltic melt ranges 20 - 10 Pa s whereas density ranges 2.60 - 2.71 g/cc for 0 - 1 GPa where plagioclase crystallizes. Comparison between critical crystal diameter calculated from the viscosity and density and crystal diameter of plagioclase (5 - 18mm) of anorthosite suggests that crystal fraction of magma, $\varphi = 0.55$ is required to make convection of magma ocean moderate enough that plagioclase could separate from the melt. Results of critical crystal diameter for olivine/pyroxene indicate that the crystallized mafic minerals would also be entrained in the viscous basaltic melt until $\varphi = 0.55$ is attained. In that case, large amount of mafic minerals are entrained in the magma along with plagioclase, which is enough to account for the $\varphi = 0.55$ in the magma. For the melt composition when crystal fraction $\varphi = 0.55$ is attained, the basaltic melt is enriched in FeO enough that plagioclase could float to the surface of the moon. Application of the discussion to the terrestrial magma ocean has insight into the surface evolution of the Hadean Earth, which would be related to the evolution of life.

キーワード: 月, 斜長岩, マグマオーシャン, メルト密度粘性, 冥王代地球
Keywords: Moon, Anorthosite, Magma ocean, Density and viscosity of melt, Hadean Earth

高圧における鉄ニッケル炭素系の相関係を用いた月の核の構造 High pressure phase relationships of the Fe-Ni-C system and its implications to the lunar core structure

岸本 俊八^{1*}; 浦川 啓¹
KISHIMOTO, Shumpachi^{1*}; URAKAWA, Satoru¹

¹ 岡山大学大学院自然科学研究科

¹ Graduate school of natural science and technology, Okayama University

アポロの地震波データの再解析から月の内部構造モデルが再検討されている。Weber 等 (2011) は金属核の構造を Fe-S メルトの相関係と弾性データに基づいて推定し、核は最大 6wt% の硫黄を含むとしている。ジャイアントインパクトによる月の形成からは揮発性の高い元素の存在度は限られてくることが予想されるが、月の核に炭素を含む場合を検討した。本研究では、月の核の圧力に相当する 5 GPa で Fe-Ni-C 系の相関係に関する実験的研究を行い、月の核の構造を考察した。

高温高圧実験はマルチアンビル装置を用いて行った。Fe-C 系は 5 GPa において Fe と Fe₃C の共融系となり共融温度は 1425 ± 25 K であった。共融点の炭素含有量は 18 at% で、メルトの炭素含有量がこの値より小さければ冷却に伴い γ-Fe が固相として析出する。γ-Fe は共融温度で最大値 8 at% の炭素を固溶する。このような溶融関係は Ni の添加によって変化しなかった。また中間化合物 (Fe,Ni)₃C と (Fe,Ni)₇C₃ は鉄に富む領域で安定であり、(Fe,Ni)₃C は Ni を最大 10 at% 固溶するのに対して (Fe,Ni)₇C₃ は Ni をほとんど固溶しない。

Weber 等 (2011) は月震の再解析結果に特徴的な二つの反射面がみられたことから、月の核は二層構造であると提案した。本研究では彼らの地震波の解析結果に基づいて、核に含まれる軽元素が炭素だけである場合の構造について考察した。Fe-C 系の溶融関係より月の核は炭素に富んだ流体の外核と固体の内核の二層構造であり、核の炭素含有量は最大で 8 at% と推定される。また、核が硫黄を軽元素として含むモデルと比べて、月の内核と外核の密度差は非常に小さくなる。

キーワード: 高圧, 月の核, Fe-Ni-C 系, 相関係

Keywords: high pressure, lunar core, Fe-Ni-C system, phase relationships

月縦孔周辺のプラズマ・ダスト環境に関する粒子シミュレーション Particle simulations on plasma and dust environment near lunar vertical holes

三宅 洋平^{1*}; Nishino Masaki^{N²}
MIYAKE, Yohei^{1*}; NISHINO, Masaki^{n²}

¹ 神戸大学大学院システム情報学研究科, ² 名古屋大学太陽地球環境研究所

¹Graduate School of System Informatics, Kobe University, ²The Solar-Terrestrial Environment Laboratory, Nagoya University

「かぐや」衛星による地形カメラ観測により、月面に特徴的な縦孔構造が発見されている。縦孔のサイズは直径、深さともに、50~100 m に及び、通常のクレーターに比べ大きな深さ/直径比を持つため、その周辺では特異なプラズマ静電環境が形成されていると予想される。このような縦孔構造や地下空洞を直接探査する UZUME 計画が立案されている中、将来のローバー探査への影響を知る上でも縦孔周辺プラズマおよび帯電ダスト環境を事前評価することは重要である。

本研究では、これまで人工衛星・プラズマ相互作用の研究に幅広く用いられてきたプラズマ粒子シミュレーション技術を応用し、月面昼側にある月縦孔周辺プラズマ環境の定量評価を行う。具体的には縦孔構造を模した月面を含む3次元計算空間内に上空から太陽風プラズマが様々な角度で入射する状況を想定する。また月面からは太陽光照射の有無や、その入射角度を考慮した光電子放出を模擬する。本発表では、このシミュレーションによって得られた縦孔周辺の地表帯電特性とその太陽風パラメータに対する応答、そして得られた静電環境中での帯電ダストの挙動についての初期結果を紹介する。

キーワード: 月, 縦孔, 宇宙プラズマ, 月面帯電, ダスト, 粒子シミュレーション

Keywords: Moon, vertical hole, space plasma, lunar surface charging, dust grain, PIC simulation

月面磁気異常上空における太陽風応答の3次元全粒子シミュレーション Full Particle-In-Cell 3D simulation on the solar wind response to a lunar magnetic anomaly

白井 英之^{1*}; 梅澤 美佐子¹; 三宅 洋平¹; Nishino Masaki N²; 芦田 康将³
USUI, Hideyuki^{1*}; UMEZAWA, Misako¹; MIYAKE, Yohei¹; NISHINO, Masaki n²; ASHIDA, Yasumasa³

¹ 神戸大学大学院システム情報学研究所, ² 名古屋大学太陽地球環境研究所, ³ 京都大学 生存圏研究所
¹Graduate school of system informatics, ²STELAB Nagoya University, ³RISH Kyoto University

これまで我々は、宇宙プラズマの運動論的効果を考慮した3次元プラズマ粒子シミュレーションにより太陽風と小型局所ダイポール磁場との相互作用について研究を行ってきており、本講演では、月面ライナーガンマ磁気異常上空における太陽風プラズマ応答に関するシミュレーション結果を報告する。ライナーガンマ磁気異常の磁場構造は、その中心と太陽風動圧の釣り合い点との距離が太陽風イオンの慣性長よりも小さくかつ電子ジャイロ半径よりは十分大きい、いわゆるメソスケール規模を持つ。地球規模のダイポール場と違い、メソスケール磁場の場合、磁場に対する電子とイオンのダイナミクスの違いが磁気圏形成やそれに関連するプラズマ現象に大きく影響すると予想される。すなわち、磁場を媒介した電子とイオンのスケールカップリングが重要となる。

これまでのシミュレーション結果では、イオンラーマ半径より小さい磁場構造においてもメソスケールの磁気圏が形成されることがわかっている。太陽風動圧と磁場の釣り合い点近傍において、ラーマ半径の大きいイオンと磁化された電子との間で電荷分離が生じ、その結果生じる、磁気異常上空での局所電場により、本来このスケールでは非磁化とみなされるイオン流も大きく影響を受けることを明らかにした。また、そこを中心にダイポール磁場が圧縮される点、および、その磁場圧縮領域で電子のドリフト運動による境界層電流が流れその領域の厚さは電子のラーマ半径程度である点も粒子シミュレーションにより明らかにした。特に磁気圏前面境界層ではイオンと電子の動きに大きな違いがあり、その3次元構造を詳細に解析する。ライナーガンマ磁気異常では、太陽風に対してダイポール磁場がほぼ垂直に位置するため、領域上空でのプラズマおよび磁場密度の増加がみられるが、惑星間空間磁場 (IMF) の方向が磁気圏形成にどのような影響を与えるかについても考察を行いたい。また磁気圏形成に伴い太陽風イオンがライナーガンマ領域内の月面にほとんど達しない可能性も示唆された。これらの現象について月面上空でのプラズマダイナミクスや電界構造を考慮しつつ議論する。

キーワード: 磁気異常, Reiner Gamma, メソスケールダイポール磁場, 太陽風応答, プラズマ粒子シミュレーション
Keywords: Magnetic anomaly, Reiner Gamma, Meso-scale magnetic dipole, Solar wind response, Plasma particle simulation

かぐや衛星による地球磁気圏ローブ中の月周辺のイオンサイクロトロン波の観測 Ion cyclotron waves observed by Kaguya/LMAG around the moon in the Earth's magnetosphere

中川 朋子^{1*}; 綱川 秀夫²
NAKAGAWA, Tomoko^{1*}; TSUNAKAWA, Hideo²

¹ 東北工業大学工学部情報通信工学科, ² 東京工業大学大学院理工学研究科地球惑星科学専攻
¹Information and Communication Engineering, Tohoku Institute of Technology, ²Department of Earth and Planetary Sciences, Tokyo Institute of Technology

太陽風と月の相互作用によってさまざまな低周波の磁場変動が月の周りに発生することが知られるようになってきたが、月が地球磁気圏のローブ中にある時にも、月面上で、約10秒周期の磁場変動が観測されていたことがわかっている。これは1970年代のアポロ15, 16号ミッションで月面上に設置された磁力計(LSM)によって得られたデータを解析し直して発見された狭帯域の波で、背景磁場に垂直な変動成分が卓越しており、イオンサイクロトロン波と考えられている(Chi et al., PSS, 2013)。その励起機構として、月面での吸収によりプラズマの温度異方性が高まってサイクロトロン不安定を起こしたというシナリオと、ピックアップイオンのサイクロトロン共鳴というシナリオが示唆されているが、詳細は未解明である。

この発見は月面上に固定された2つの磁力計によって行われたため、どのような位置、どのような背景磁場のもとで観測されるのかという情報が少ない。そこで本研究では、月面からの高度100kmの軌道上を周回していたかぐや衛星の磁場観測を用いて同様の現象を調査した。その結果、プロトンサイクロトロン周波数(0.1Hz)に近い周波数の波が、月の昼側(地球側)でも、夜側(磁気圏尾部側)でも、昼夜境界上空でも観測され、月面上に固定した座標で見ても様々な場所で観測されていること、また、磁力線が月面と探査機をつないでいるときも、そうでないときも観測されていることがわかった。月面上での観測結果と異なり、背景磁場に平行な方向の変動成分も大きく、斜め伝搬であることが多かった。この波は月面とプラズマの相互作用を考えるうえで新しい知見をもたらしてくれると期待される。

キーワード: イオンサイクロトロン波, かぐや衛星, 月, サイクロトロン周波数, 磁場変動, 地球磁気圏
Keywords: ion cyclotron wave, Kaguya, LMAG, moon, cyclotron frequency, lobe

月磁気異常上空における太陽風プロトンとアルファ粒子の観測 Observation of the solar wind protons and alpha particles over lunar magnetic anomalies

加藤 大羽^{1*}; 斎藤 義文²; Nishino Masaki N³; 横田 勝一郎²; 綱川 秀夫⁴
KATO, Daiba^{1*}; SAITO, Yoshifumi²; NISHINO, Masaki n³; YOKOTA, Shoichiro²; TSUNAKAWA, Hideo⁴

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 名古屋大学太陽地球環境研究所, ⁴ 東京工業大学大学院理工学研究科地球惑星科学専攻

¹Department of Earth and Planetary Science, The University of Tokyo, ²Institute of Space and Astronautical Science, Japan Aerospace Exploration Agency, ³Solar-Terrestrial Environment Laboratory, Nagoya University, ⁴Department of Earth and Planetary Sciences, Tokyo Institute of Technology

月には厚い大気も大局的な固有磁場も存在しないため、月面は太陽風の影響を直接受ける。しかしながら、月面には局所的に磁気異常と呼ばれる磁場の強い領域が存在し、月表面の強い磁気異常の存在によって、太陽風は月面に衝突することを妨げられる。太陽風と月磁気異常の相互作用に関する研究は、月表面の磁気異常領域が発見された1960年代以降、人工衛星による観測や計算機シミュレーション、実験室の再現実験などで研究が行われている。磁気異常は太陽風や月周辺プラズマの挙動と密接に関連するため、磁気異常上空におけるプラズマ環境の解析は重要な意味を持つ。

通常、月へ飛来してくる太陽風イオンの主成分はプロトンであり、次いでアルファ粒子が数%程度含まれている。

月の磁気異常領域上空では、太陽風イオンの数十%程度が磁場によって反射されることが知られている。しかし、月磁気異常による太陽風イオンの反射について、イオンを種類別に分類しての議論はこれまで行われていない。太陽風イオンは主成分のプロトンの割合が9割であることから、磁気異常と太陽風イオンの相互関係についてのこれまでの知見は、プロトンの振る舞いに大きく依存した結果であると言える。すなわち、プロトン以外の太陽風イオンでは既存の研究結果と一致する振る舞いをしていないかは不明である。特にアルファ粒子は、入射太陽風イオン中に存在することは明確に確認できるが、プロトンとは異なり、反射イオンを観測した場合には明確には存在の確認がなされていない。したがって、プロトンだけでなくアルファ粒子についてもその有無を含めて解析を行うことは、月磁気異常上空におけるプラズマ構造のより詳細な理解へとつながることが期待できる。

本研究では、月探査衛星「かぐや」に搭載された低エネルギーイオン質量分析器MAP-PACE-IMAによって観測されたデータを用い、磁気異常上空で反射されたイオンについて質量分析データの解析を行った。解析の結果、磁気異常領域上空において、磁気異常によって反射されたプロトンとアルファ粒子は異なる分布を示すことが明らかとなった。磁気異常によって反射されるイオンは多くの場合、運動エネルギーを少し失って加熱されるが、プロトンと比べてアルファ粒子は運動エネルギーの減少量が大きいことが分かった。またアルファ粒子の入射粒子フラックス強度に対する反射粒子フラックス強度の比率は、プロトンの入射粒子フラックス強度に対する反射粒子フラックス強度の比率に比べても小さいことが明らかとなった。従来の解析で反射されたアルファ粒子の確認が困難であったのは、1) 強い減速により観測されるE/q (E: 運動エネルギー, q: 電荷) が入射太陽風アルファ粒子と反射アルファ粒子で大きく変化すること、2) 反射されたアルファ粒子のフラックス強度が小さいことが原因と結論づけられる。これらの結果は、月磁気異常による太陽風イオンの反射が理想的な磁気ミラー反射ではなく、非断熱的变化を伴った反射であることを示している。

キーワード: 月, プラズマ, 太陽風, 磁気異常
Keywords: Moon, plasma, solar wind, magnetic anomaly

月形成初期における全球膨張：線状重力異常の地形的特徴からの制約 Early global expansion of the Moon: constraints from topographic characteristics on linear gravity anomalies

澤田 なつ季^{1*}; 諸田 智克¹; 加藤 伸祐¹; 石原 吉明²; 平松 良浩³
SAWADA, Natsuki^{1*}; MOROTA, Tomokatsu¹; KATO, Shinsuke¹; ISHIHARA, Yoshiaki²;
HIRAMATSU, Yoshihiro³

¹ 名古屋大学環境学研究科, ² 宇宙航空研究開発機構, ³ 金沢大学自然科学研究科

¹Nagoya University Graduate School of Environmental studies, ²Japan Aerospace Exploration Agency, ³Kanazawa University Graduate School of Natural Science and Technology

アポロが持ち帰った岩石試料の分析に基づく、月はマグマオーシャンの状態から始まり、その後マントル再溶融による火成活動があったと考えられている。熱史の数値計算によると、マントル再溶融による熱膨張が原因で、マグマオーシャン固化から数億年で月半径の増加がピークになるという報告がある [Solomon and Head, 1979]。しかし、月の表面地形はその後の天体衝突によって大きく変化しているため、全球膨張の地形的な痕跡は見つかっておらず、全球膨張のタイミングや程度は観測的に制約されていない。一方で、Andrew-Hanna et al. [2013] は GRAIL の高解像度重力データの解析により大規模な線状重力異常 (以下、LGA) を発見した。彼らはその成因が月歴史初期の全球膨張によるマグマの貫入であると推定している。

我々は LGA に着目して、月初期の全球膨張とマグマ貫入説の検証を行ってきた。20 箇所の LGA を研究対象として、LGA 周辺の地形学的解析に基づいて、大多数の LGA (20 ケ所中 18 ケ所) は谷のような構造を示すことを明らかにした [澤田ほか、2014]。このことから LGA 上の地形は月形成初期の全球膨張に起因する伸張場で形成されたと考えられる。

さらに全球膨張のタイミングを制約するために、惑星の表面年代を決定する方法として有効なクレータ年代学を用いて、LGA の形成年代を推定した。解析に用いた地形データは約 0.001° 間隔の LOLA のグリッドデータ [<http://imbrium.mit.edu/LOLA.html>] LOLA_GDR (LRO-L-LOLA-4-GDR-V1.0) である。LGA 上から垂直方向 50km 以内におけるクレータ数密度に Neukum [1983] の年代モデルを適用し、表面年代を決定した。その結果、LGA 上の年代は 4.1 Ga にピークを持ち、4.3~3.9 Ga の範囲内にあることが明らかになった。この年代は隕石試料やアポロが持ち帰った最古の玄武岩試料の絶対年代 (4.3~4.1 Ga) [e.g., Terada et al., 2007] とおおよそ一致する。

以上の結果に基づき月半径変化量の時間履歴の復元を試みた。その際、全球膨張によって形成された伸張地形は LGA として全て見つかっていると仮定した。全球膨張によって形成された LGA 上の地形を二つの正断層から成る簡易的な谷構造とし、断層傾斜角を変化させ、月半径変化量を計算した。その結果、見積もられる月半径変化量は最大 2.5km 以下になることが明らかになり、月熱史モデルによる推定値 [Zhang et al., 2014] と矛盾しないことが分かった。

キーワード: 線状重力異常, 全球膨張, 伸張応力, 地形, 年代学

Keywords: linear gravity anomaly, early global expansion, tensile stress, topography, crater chronology

月の磁気異常とダイナモ, 極移動 Magnetic anomalies, dynamo and true polar wander of the Moon

高橋 太^{1*}; 綱川 秀夫²; 清水 久芳³; 渋谷 秀敏⁴; 松島 政貴²
TAKAHASHI, Futoshi^{1*}; TSUNAKAWA, Hideo²; SHIMIZU, Hisayoshi³; SHIBUYA, Hidetoshi⁴;
MATSUSHIMA, Masaki²

¹九州大学理学研究院地球惑星科学部門, ²東京工業大学大学院理工学研究科地球惑星科学専攻, ³東京大学地震研究所, ⁴熊本大学大学院自然科学研究科

¹Department of Earth and Planetary Sciences, Kyushu University, ²Department of Earth and Planetary Sciences, Tokyo Institute of Technology, ³Earthquake Research Institute, University of Tokyo, ⁴Department of Earth and Environmental Sciences, Kumamoto University

Applying the latest advanced paleomagnetic technique to the Apollo samples, it is now well established that the Moon once had an ancient core dynamo operated from 4.2 to 3.56 billion years ago, or even younger age. Because these results are based on paleointensity retrieved from unoriented samples, any directional information cannot be obtained. Instead, we focus on the magnetic anomalies on the Moon. Since the magnetization of the lunar crust in the magnetic anomalies could be records of an early core dynamo of the Moon, the magnetic anomalies may yield directional information of the lunar paleomagnetic field. Here we present results of our global survey of magnetic anomalies on the lunar surface using magnetometer data acquired by the Lunar Prospector and Kaguya spacecraft. Using an iterative inversion method, we extract magnetization vectors from well-isolated magnetic anomalies and derive the positions of paleomagnetic poles. We find two distinct clusters of the resultant paleomagnetic poles: one near the present rotation axis and the other at mid-latitude (Takahashi et al., 2014). The result is consistent with a dipole-dominated lunar magnetic field generated by a core dynamo that was reversing the polarity. It is also implied that the Moon experienced a polar wander event. Additional inversion results for well-isolated central magnetic anomalies based on the surface vector mapping method (Tsunakawa et al., 2014) suggest existence of the third cluster of the lunar magnetic pole.

References

Takahashi, F., H. Tsunakawa, H. Shimizu, H. Shibuya, and M. Matsushima (2014), Reorientation of the early lunar pole, *Nature Geosci.*, **7**, 409-412, doi:10.1038/ngeo2150.

Tsunakawa, H., H. Shibuya, F. Takahashi, H. Shimizu, and M. Matsushima (2014), Regional mapping of the lunar magnetic anomalies at the surface: Method and its application to strong and weak magnetic anomaly regions, *Icarus*, **228**, 35-53, doi:10.1016/j.icarus.2013.09.026.

キーワード: 磁気異常, ダイナモ, コア, 極移動

Keywords: magnetic anomaly, dynamo, core, polar wander