

Solar wind-regolith interaction: High reflection of the solar wind Solar wind-regolith interaction: High reflection of the solar wind

Yoshifumi Futaana^{1*}, Stas Barabash¹, SARA team¹

Yoshifumi Futaana^{1*}, Stas Barabash¹, SARA team¹

¹Swedish Insititute of Space Physics

¹Swedish Insititute of Space Physics

In this talk we will review new findings of the solar wind interaction with Moon and with Phobos based on the recent observations by the SARA instrument on board Chandrayaan-1 and the ASPERA instrument on board Mars Express. We also discuss potential future contributions of the space plasma investigation to lunar sciences.

High backscattered proton flux of the solar wind from the lunar surface was first reported by Saito et al. (2008) from Kaguya's plasma observations. The flux of the backscattered protons was 0.1-1%. The high backscattering was a big surprise because the lunar surface had been believed a complete absorber of the solar wind. Energetic neutral atom (ENA) observations by the CENA (Chandrayaan-1 Energetic Neutral Analyzer) sensor on board Chandrayaan-1 spacecraft consistently provided data of extremely high (~20%) neutral atom flux of the solar wind origin. The observed reflection efficiencies of backscattered particles both in forms of neutral atoms and ions are too high to be explained by theoretical predictions developed in laboratory experiences. On the other hand, the ratio of the backscattered fluxes between the backscattered neutrals and the ions are in the range of the expectation (10-100).

Not only from the Moon's surface, we also have tried to search for the backscattered protons in the Martian moon Phobos for comparison. We found significant proton flux during a flyby of the Mars Express spacecraft close to Phobos (Futaana et al. 2010). After careful removal of noise counts and comparing with the calculated ray tracing of the observed signals, we concluded that the detected signal can be explained by 0.6-10% reflection of the solar wind at the surface of Phobos. This result indicates that the solar wind backscattering is a general feature of the solar wind-regolith interaction in space.

Even though the interaction mechanism is not yet fully known, such high backscattering fluxes of the ENAs and plasma can be used to monitor solar wind proton access to the lunar surface remotely. We also analyzed the CENA data when the spacecraft flew over magnetic structures of crustal origin (called magnetic anomalies). By inverting the ENA flux obtained by CENA in orbit, we obtained a map of the backscattered ENAs (Wieser et al. 2010). The backscattered ENA flux shows a depletion inside the magnetic anomaly with an enhancement around the anomaly. This observation indicates that the magnetic anomaly deflects the solar wind protons, and that the lunar surface inside the lunar magnetic anomaly is partially shielded from the solar wind. Consistently, we found clear correlation between the map of magnetic anomalies and the flux of charged protons, which are deflected by the magnetic anomaly (Lue et al. 2011). More than 50% of the solar wind flux are deflected by the strongest magnetic anomalies. The map also showed that even weak and distinct small magnetic anomaly could deflect the solar wind. The deflection of solar wind by the magnetic anomalies indicates a strong reduction of the solar wind access to the surface in the magnetic anomalies, reducing the space weathering effect at the upper crust of the magnetized regions.

Reference:

Futaana et al., 2010. *J. Geophys. Res.*, doi:10.1029/2010JA015486.

Lue, Futaana, et al. 2011. *Geophys. Res. Lett.*, doi:10.1029/2010GL046215.

Saito et al., 2008. *Geophys. Res. Lett.*, 35, doi: 10.1029/2008GL036077.

Wieser, Barabash, Futaana et al, 2009. *Planet. Space Sci.*, 57, 2132-2134.

Wieser, Barabash, Futaana et al., 2010. *Geophys. Res. Lett.*, 37, doi: 10.1029/2009GL041721.

キーワード: Moon, Phobos, solar wind, regolith, energetic neutral atoms, magnetic anomaly

Keywords: Moon, Phobos, solar wind, regolith, energetic neutral atoms, magnetic anomaly

PPS024-02

会場:103

時間:5月22日 16:45-17:00

「かぐや」搭載MAP-PACEによる地球磁気圏 月相互作用の観測 Interaction between the Moon and the Earth's magnetosphere observed by MAP-PACE on Kaguya

斎藤 義文^{1*}, 横田 勝一郎¹, 西野 真木¹, 山本 忠輝¹, 上村 洸太¹, 綱川 秀夫²

Yoshifumi Saito^{1*}, Shoichiro Yokota¹, Masaki N Nishino¹, Tadateru Yamamoto¹, Kota Uemura¹, Hideo Tsunakawa²

¹宇宙研, ²東工大

¹Institute of Space and Astronautical Sci, ²Tokyo Institute of Technology

月は1ヶ月に3-4日の間地球磁気圏内に滞在する。月にはグローバルな固有磁場も濃い大気もないことから、この間プラズマシートの暖かいプラズマは月表面に直接衝突することができ、一方で月面付近で生成されたプラズマが月周回軌道を飛行する衛星まで到達することもある。かぐや衛星搭載MAP-PACEは、月周辺プラズマの観測を100km高度、50km高度の極軌道、近月点高度10km程度の楕円軌道で行った。月の存在する約60Reの地球磁気圏尾部領域のプラズマは非常に希薄ではあるが、MAP-PACEは、ロープのコールドイオン、プラズモイドに伴うイオンの高速流、プラズマシート-ロープ境界におけるコールドイオンの加速など、地球磁気圏尾部における電子/イオンの特徴的な分布を観測することができた。これまでのMAP-PACEの観測によると、1)月面あるいは月面近傍の月大気起源のイオン [Tanaka et al., GRL 36, L22106, 2009] 2) Gyro-loss 効果によるロープ/プラズマシート電子の特徴的な分布 [Harada et al., GRL, 37, L19202, 2010] 3) プラズマシート中における昼間側月表面の負電位への帯電 4) 月面で反射/散乱されるプラズマシートイオンの速度分散を伴う分布 などのいくつかの地球磁気圏/月相互作用に関わる現象がみついている。1)の月面あるいは月面近傍の月大気起源のイオンについては、月が太陽風中にある場合と地球磁気圏内にある場合の両方で観測される。これらのイオンの質量分析結果を見ると、C⁺, O⁺, Na⁺, K⁺, や Ar⁺などの重いイオンのピークが観測されるため、イオンが月起源であることがわかる。地球磁気圏内では特に月がロープ領域にあって、かぐや衛星が太陽直下に近い領域を通過するときこれらのイオンが明確に観測される。地球磁気圏内では太陽風中と違ってコンベクションによる電場は弱いはずであり、これらのイオンは衛星と月表面との電位差である程度加速されるものと考えられる。ロープ領域で観測されるこれらのイオンは衛星直下の月面位置に依存すると思われる特徴的なエネルギー/時間変化を示す。もしこれらのイオンが衛星と月面の電位差で加速されているとすると、このエネルギー/時間変化は月面の電位分布を反映しているのかもしれない。4)の月面で反射/散乱されるプラズマシートイオンの速度分散を伴う分布については、これも月表面と地球磁気圏との相互作用の例である。暖かいプラズマシートのイオンが月表面と衝突すると、そのうちの一部は月面で反射/散乱される。これらの月面で反射/散乱されたイオンは、早い速度(高いエネルギー)のイオンが先に観測されて、遅い速度(低いエネルギー)のイオンが後から観測されるという速度分散を伴った分布を示すことがある。この速度分散を伴ったイオン分布は月表面の非一様な帯電を反映しているのかもしれない。以上のように月が地球磁気圏内に存在する時に起こる現象が少しずつに解明されようとしている。これらの現象を理解すれば、非磁化天体と磁気圏との間の相互作用について普遍的な理解を得ることができるものと期待できる。

キーワード: 月, プラズマ, 外圏大気, 磁気圏

Keywords: moon, plasma, exosphere, magnetosphere

PPS024-03

会場:103

時間:5月22日 17:00-17:15

Kaguya 衛星で観測された月周辺の狭帯域ホイッスラー波の特性 Properties of monochromatic whistler waves near the Moon detected by Kaguya

津川 靖基^{1*}, 寺田 直樹¹, 加藤 雄人¹, 小野 高幸¹, 綱川 秀夫², 高橋 太², 渋谷 秀敏³, 清水 久芳⁴, 松島 政貴²
Yasunori Tsugawa^{1*}, Naoki Terada¹, Yuto Katoh¹, Takayuki Ono¹, Hideo Tsunakawa², Futoshi Takahashi², Hidetoshi Shibuya³,
Hisayoshi Shimizu⁴, Masaki Matsushima²

¹ 東北大学大学院理学研究科, ² 東京工業大学大学院理工学研究科, ³ 熊本大学大学院自然科学研究科, ⁴ 東京大学地震研究所

¹Tohoku University, ²Tokyo Institute of Technology, ³Kumamoto University, ⁴University of Tokyo

We study monochromatic whistler waves near the Moon observed by LMAG aboard the Kaguya spacecraft. The waves were mostly left-hand polarized in the spacecraft frame and observed as narrowband magnetic fluctuations with frequencies close to 1 Hz. Although the monochromatic whistler waves near the Moon were also observed by Lunar Prospector [Halekas et al., 2006], the spectral formation mechanism and the generation process of the waves have not been fully understood.

In the present study, we perform statistical analyses to reveal the properties of the monochromatic whistler waves near the Moon. The results indicate that the intense waves are generated by the solar wind interaction with lunar magnetic anomalies. High occurrence rates of the waves are found in the range of the solar zenith angle (SZA) from 40 ° to 90 ° with remarkable north-south and dawn-dusk asymmetries in the SSE coordinate. Similar asymmetries are found in the selenographical distributions as well. We explain these asymmetries by the localization of magnetic anomalies and the effects of SZA dependencies. Plasma wave theory predicts that the occurrence, intensity, and frequency of the waves are determined by the wave vector direction, magnetic field direction, and solar wind parameters. From the investigation of these parameter spaces we reveal that the properties of the waves can be explained by the Doppler shifted whistler-mode waves propagating against the solar wind.

Moreover, based on the results of the statistical analyses, we compare the properties of the observed waves quantitatively with those of upstream whistler waves from planetary bow shocks reported in previous studies. While we find different properties possibly caused by the differences of the distance from the source region, we discuss the similarities among them suggesting important clues in understanding the generation process of the monochromatic whistler waves near the Moon.

キーワード: ホイッスラーモード, イオン反射, 磁気異常

Keywords: whistler-mode, narrowband, magnetic anomaly, reflected ion

PPS024-04

会場:103

時間:5月22日 17:15-17:30

地球磁気圏内における月周辺プラズマ波動現象のかぐや衛星データによる研究 Study on the plasma waves around the Moon in the Earth's magnetosphere via KAGUYA spacecraft observations

片山 由美子^{1*}, 小嶋 浩嗣¹, 斎藤 義文², 笠原 禎也³, 杉山 肇¹, 大村 善治¹, 小野 高幸⁴, 横田 勝一郎², 西野 真木², 網川 秀夫⁵
Yumiko Katayama^{1*}, Hirotsugu Kojima¹, Yoshifumi Saito², Yoshiya Kasahara³, Hajime Sugiyama¹, Yoshiharu Omura¹, Takayuki Ono⁴, Shoichiro Yokota², Masaki N Nishino², Hideo Tsunakawa⁵

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

¹RISH, Kyoto University, ²ISAS, JAXA, ³Kanazawa University, ⁴Tohoku University, ⁵Tokyo Institute of Technology

The moon is essentially unmagnetized. However, recent spacecraft observation revealed the existence of the localized magnetic field which is the so-called magnetic anomaly. Furthermore, the body of the moon is the dielectric. The charging of its surface strongly depends on the surrounding space plasma and the sunlit conditions. KAGUYA spacecraft has investigated the electromagnetic environment around the moon since its launch in 2007. In the present paper, we focused on plasma wave phenomena around the moon during its stay inside the geomagnetic tail region based on plasma wave data observed by the KAGUYA spacecraft.

We surveyed plasma wave activities and examined the difference of plasma wave features in the different plasma regimes in the geomagnetic tail regions considering the sunlit condition for the moon. The KAGUYA plasma wave data showed the generation of the Electric Cyclotron Harmonics (ECH) over the magnetic anomaly in the nightside, as well as that of the Langmuir waves in the earthside of the moon. We also analyzed the particle data obtained by PACE (Particle Angle and Composition Experiment). The PACE data showed the existence of the electron loss cone distribution with the low energy electron beam. By comparing the plasma wave data with the electron data, we found the good correlation of the ECH waves with the electron loss cone velocity distribution. In order to understand the generation mechanism of ECH waves, we calculate the linear growth rate by solving the kinetic plasma dispersion relation. Our linear analyses showed that the electron loss cone distribution with the low energy electron beam destabilize the ECH waves. Based on the spacecraft observations and linear analyses, we succeeded in establishing the generation model of the ECH waves in the view point of the moon-magnetosphere interaction.

キーワード: 宇宙電磁環境, 宇宙プラズマ, プラズマ波動, 磁気圏尾部, 月周回衛星かぐや (SELENE)

Keywords: Space electromagnetic environment, Space plasma, Plasma wave, Geomagnetic tail region, KAGUYA spacecraft (SELENE)

PPS024-05

会場:103

時間:5月22日 17:30-17:45

かぐや月レーダサウンダによる月地下構造・木星ヘクトメータ波の観測 Observations of the lunar subsurface structures and Jovian hectometric radiation by the Kaguya Lunar Radar Sounder

熊本 篤志^{1*}, 小野 高幸¹, 山口 靖², 山路 敦³, 小林 敬生⁴, 押上 祥子², 笠原 禎也⁵

Atsushi Kumamoto^{1*}, Takayuki Ono¹, Yasushi Yamaguchi², Atsushi Yamaji³, Takao Kobayashi⁴, Shoko Oshigami², Yoshiya Kasahara⁵

¹ 東北大学, ² 名古屋大学, ³ 京都大学, ⁴ 上海天文台, ⁵ 金沢大学

¹Tohoku Univ., ²Nagoya Univ., ³Kyoto Univ., ⁴SHAO, ⁵Kanazawa Univ.

The Lunar Radar Sounder (LRS) onboard the Kaguya (SELENE) spacecraft [Ono et al., 2000; 2008; Kasahara et al., 2008; Ono et al., 2010] successfully obtained 2363-hours worth of radar sounder data and 6570-hours worth of natural plasma wave data in the nominal operation period from October 29, 2007 to September 10, 2008 and 2390-hours worth of natural plasma wave data in the extended operation period until June 10, 2009.

It was found by the LRS observation that there are distinct subsurface reflectors with a depth of several hundred meters below the surface of the nearside maria. The reflectors are inferred to be paleoregolith layers covered by the basalt layers [Ono et al., 2009]. In several maria, the lava flow units have been identified based on the Clementine multispectral data [Heather et al., 2002; Hiesinger et al., 2003]. By analyzing Clementine multispectral image around the impact crater, Weider et al. [2010] estimated the thickness of lava flow units, and pointed out that the estimated thickness coincided with that reported by LRS. Kaguya multi-band imager (MI) [Ohtake et al., 2008] obtained multispectral images around the impact crater with higher resolution. The comparison between MI and LRS data will be important to determine the electric permittivity of the surface material, which is needed to derive the actual depth of the paleoregolith layers, and the evolution of the lava flow flux from LRS data.

Based on the analyses of LRS data, Oshigami et al [2009] reported that the subsurface echoes are found only in 10% of the western nearside maria such as Mare Humorum, Mare Imbrium, and Oceanus Procellarum. Pommerol et al. [2010] also suggested that detectability of the subsurface echoes depend on abundance of TiO₂ and FeO in the surface material, which was obtained based on Clementine multispectral image data. Kobayashi et al. [2009] proposed the estimation method of the thickness of the surface regolith layer by the apparent difference of altitudes measured by laser altimeter (LALT) [Araki et al., 2008] and LRS. It enables us to obtain the thickness of the surface regolith with several m, which is much less than the range resolution of LRS, or 75m.

In order to take advantage of lunar global subsurface radar soundings performed by the Kaguya spacecraft, we have to establish the analysis methods of radar sounder data obtained not only in nearside maria but also in farside highland regions and polar regions. We have two ideas of analysis methods: (a) Echo simulation based on the surface topographic data obtained by LALT and Terrain Camera (TC) [Haruyama et al., 2008], and (b) synthetic aperture radar (SAR) analyses [Kobayashi and Ono, 2002a; 2002b; 2006; 2007].

LRS was operated not only for the subsurface radar sounding but also for the passive radio wave observation. Through the operation period from October 2007 to September 2008, we could detect numerous events of auroral kilometric radiation (AKR), 39 events of type III solar radio bursts, and 7 events of Jovian hectometric (HOM) radiation with resolution of 2 sec or 0.1 sec. Fine structures were found in the spectrogram of Jovian HOM. The drift rate of the emissions was about 20 kHz/sec, which suggests the source motion with a velocity of 300 km/s. It is known that planetary radio emissions often shows narrow-band with a frequency drift, e. g. Jovian S-burst, and striated auroral kilometric radiation (AKR). Some previous studies explained that they are caused by kinetic Alfvén waves and ion holes with ion acoustic velocity, which can modify the electron velocity distribution at the radio emission source. The velocity of 300 kHz derived from HOM observed by the Kaguya was however a little smaller than Alfvén velocity (3000 km/s) and much less than ion acoustic velocity (15 km/s).

キーワード: かぐや (SELENE), 月レーダサウンダ (LRS), パレオレゴリス, 合成開口レーダ (SAR), 木星ヘクトメータ波 (HOM)

Keywords: Kaguya (SELENE), Lunar Radar Sounder (LRS), Paleoregolith, Synthetic aperture radar (SAR), Jovian hectometric radiation (HOM)

PPS024-06

会場:103

時間:5月22日 17:45-18:00

月磁気異常の広域および全球マッピング

Regional and global mapping of surface vector fields of the lunar magnetic anomalies

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

Hideo Tsunakawa¹, Futoshi Takahashi^{1*}, Hisayoshi Shimizu², Hidetoshi Shibuya³, Masaki Matsushima¹

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

¹Dpt. E.P.S., Tokyo Inst. Tech., ²E.R.I., Tokyo Univ., ³Dpt. Geosci., Kumamoto Univ.

The lunar magnetic anomalies give key information about the evolution of the lunar interior, in particular, a possible dynamo of the early Moon. There are two main problems of the origin of the lunar magnetic anomalies, the ambient field and the magnetization acquisition process. Based on the Apollo and Lunar Prospector observations, the basin-forming impact model was proposed to explain that several strong anomalies are located near antipodes of large impact basins [1]. However recent study of the Kaguya observations indicates that there are relatively weak magnetic anomalies almost over the Moon, suggesting an ancient global magnetic field such as an early lunar dynamo [2]. This possibility is supported by a numerical dynamo simulation assuming a dichotomy of the thermal condition at the lunar core-mantle boundary [3] and by the results from reanalysis of the previous dataset [4]. Thus the origin of the magnetic field recorded by the lunar magnetic anomalies should be reexamined although the basin-forming impact model has been believed so far.

For the study of the magnetization acquisition process, more detailed maps of the lunar magnetic anomalies are needed when compared with the geological and topographical data. Therefore we have developed a new method for mapping surface vector fields of the lunar magnetic anomaly field using the magnetic field observations by a satellite magnetometer (see Poster by Tsunakawa et al. at JpGU Meeting 2011). The surface vector mapping method has been applied to the Kaguya and Lunar Prospector datasets of low altitudes. We will report the results of regional and global mapping of the surface vector fields and discuss possible processes of the lunar magnetic anomalies.

References: [1] Lin, R.P. et al. (1988) *Icarus*, 74, 529-541. [2] Tsunakawa, H. et al. (2010) *SSR*, 154, 219-251. [3] Takahashi, F. and Tsunakawa, H. (2009) *GRL*, 36, doi:10.1029/2009GL041221. [4] Hood, L.L. (2010) *Icarus*, doi:10.1016/j.icarus.2010.08.012

キーワード: 月, 磁場, 磁気異常, かぐや

Keywords: Moon, Magnetic field, Magnetic anomaly, Kaguya

PPS024-07

会場:103

時間:5月22日 18:00-18:15

月の岩石の含水量と水素同位体の起源

ORIGIN OF LUNAR WATER AND EVIDENCE FOR A WET MOON FROM D/H AND WATER IN LUNAR APATITES.

伊藤 正一^{1*}, James Greenwood², 坂本 直哉¹, P. Warren³, M. Dyar⁴, 坂本 尚義¹

Shoichi Itoh^{1*}, James Greenwood², Naoya Sakamoto¹, P. Warren³, M. Dyar⁴, Hisayoshi Yurimoto¹

¹ 北海道大学理学研究院自然史科学部門, ²Dept. Earth. Sci., Wesleyan Univ., ³Earth Space Sci., UCLA, ⁴Astronomy, Mount Holyoke College

¹Natural History Sci., Hokudai, ²Dept. Earth. Sci., Wesleyan Univ., ³Earth Space Sci., UCLA, ⁴Astronomy, Mount Holyoke College

Introduction: We have recently reported the first D/H measurements of lunar water from ion microprobe measurements of D/H in apatite from Apollo rock samples. A recent study of Cl isotopes in lunar materials has cast doubt on the estimates of lunar mantle water derived from apatite OH contents, and has called for a dry Moon during lunar petrogenesis. Here we report new measurements of water and D/H in lunar apatite from 12039,43 measured using the Hokudai ion microscope. Results: In this study, we have measured D/H and 1H/18O in eight apatite grains from 12039,43, bringing our total to thirteen apatite grains in 12039. The combination of plentiful and large apatite grains in coarse-grained pigeonite basalt 12039 have allowed us to make multiple measurements of D/H and H₂O (presumably OH) in individual apatite grains from multiple thin-sections. We find that the water contents of individual apatite grains are homogeneous, but vary among different grains. Only one grain in 12039,43 was large enough for multiple spots, and dD values for those two spots were identical (dD=+765 ±42permil and +765 ±34permil). Discussion: D/H of the Moon. The mean and standard deviation of dD analyses of mare basalts 10044, 12039, and 75055 are +681 ±132permil (n=27). The mean and standard deviation of dD of 12039,43 are +698 ±61permil (n=9). This is almost identical to the mean dD of 12039,42 (mean dD=+689 ±180permil (n=13)), but with much less variability. Clearly the data are dominated by 12039, but the mean dD of 10044 is similarly elevated relative to Earth (10044: mean dD=+606 ±30permil (n=4)), as is the lone analysis of 75055 (dD=+735 ±36permil). That the D/H of these 3 mare basalts from different landing sites should be so similar argues that the mare source region is also similarly elevated in D/H. Other possibilities to explain the similarity in D/H of these 3 samples are likely untenable, but are considered below. The dD of two analyses of an intrusive highlands alkali anorthosite clast (14305,303) are also elevated relative to Earth (dD=+238 ±72permil; +341 ±53permil), but less so than those of mare basalts 10044, 12039, and 75055. An important point of an elevated D/H for this intrusive sample is that it would seem to argue against late-stage assimilation of regolith material (derived from comets or asteroids) by the extrusive mare lavas to explain the elevated D/H of the Moon. Origin of lunar water. If the D/H of water in lunar apatite is not formed by the processes of degassing, diffusion, or dehydration, then the D/H of lunar apatite may serve as a constraint for the nature of the late-accretionary population of material. If so, the only solar-system materials with D/H similar to that of mare basalt apatite would be bulk carbonaceous chondrites or comets. D/H of water from carbonaceous chondrites is similar to the D/H of water in the Earth mantle, suggesting cometary material as a source of water to the Moon.

キーワード: 月, アポロ, 水, SIMS

Keywords: lunar, apollo, water, SIMS

PPS024-08

会場:103

時間:5月22日 18:15-18:30

月の炭素含有物と磁性変化などへの応用 Lunar carbon-bearing materials applied to magnetic changes

三浦 保範^{1*}

Yasunori Miura^{1*}

¹ 山口大学

¹ Yamaguchi University

本研究は次のようにまとめられる。

- 1) 高温時に形成される軽元素の炭素含有物の考えによって未解明の月の磁性・火山ガスが説明できる。
- 2) 新たに軽元素を含む物質を月や火星などで探査することで、月や火星等の磁性鉱物の消滅、新動的現象（動的生成過程と火山性ガス上昇など）に応用できる。
- 3) 軽元素（炭素など）を含むことにより鉄ニッケルがあっても非磁性を示す鉱物が形成され、磁性が消滅生成する動的な過程を新たに考える。この考えは、月の微弱磁性をアポロ報告試料の解析確認し、月試料のその場 ASEM 観察とコア物質が固化したと考えられる隕鉄内部のナノ観察から残存する鉄、炭素、炭化物、炭酸塩物質のその場 A E S M 分析測定などから確認できる。
- 4) アポロ月面試料で磁性測定された試料の軽元素の含有量を解析し、一部鉄と炭素に比例関係が見られる。鉄炭酸塩による磁性消失と高圧による磁性鉄酸化物の生成等の変化プロセスで月面の弱磁場や磁場不規則分布が説明できる。また本モデルから月面の弱い磁場や裏側の磁場の不規則分布などが説明可能である。
- 5) 月の火山性ガスの発生は、鉄と炭素の反応時に発生した軽元素ガスが上昇し、磁性変化や火山性ガス（非火山性パイプ、泥火山など）が発生したものである。この考えは、火星などでも発展的に適用できる。地球にも見られる現象であるが多様な現象と重複している。

キーワード: 月, 炭素含有物, 磁性変化, 磁性鉱物, シデライト, 磁鉄鉱

Keywords: The Moon, carbon-bearing materials, magnetic change, magnetic minerals, siderite, magnetite

PPS024-09

会場:103

時間:5月23日 08:30-08:45

月隕石中のシリカの高圧多形と月表面の衝突現象

High Pressure Polymorphs of Silica in shocked lunar meteorites and impact events in lunar surface

大谷 栄治^{1*}, 小澤 信¹, 宮原 正明¹, 金子 詳平¹, 伊藤嘉紀¹, 三河内 岳², 木村 眞³, 荒井 朋子⁴, 佐藤和久¹, 平賀賢二¹
Eiji Ohtani^{1*}, Shin Ozawa¹, Masaaki Miyahara¹, Shohei Kaneko¹, Yoshinori Ito¹, Takashi Mikouchi², Makoto Kimura³,
Tomoko Arai⁴, K. Sato¹, K. Hiraga¹

¹ 東北大学, ² 東京大学, ³ 茨城大学, ⁴ 千葉工業大学

¹Tohoku University, ²University of Tokyo, ³Ibaraki University, ⁴Chima Institute of Technology

Microcrystals of coesite and stishovite were discovered as inclusions in amorphous silica grains in shocked melt pockets of a lunar meteorite Asuka-881757 by micro-Raman spectrometry, scanning electron microscopy (SEM), electron back-scatter diffraction (EBSD), and transmission electron microscopy (TEM). These high pressure polymorphs of SiO₂ in amorphous silica indicate that the meteorite experienced an equilibrium shock-pressure of at least 8-30 GPa. Secondary quartz grains are also observed in separate amorphous silica grains in the meteorite. The estimated age reported by the ³⁹Ar/⁴⁰Ar chronology indicates that the source basalt of this meteorite was impacted at 3800 Ma ago, time of Lunar Cataclysm, i.e., the heavy bombardment in the lunar surface. Observation of coesite and stishovite formed in the lunar breccias suggests that high pressure impact metamorphism and formation of high pressure minerals are common phenomena in brecciated lunar surface altered by the heavy meteoritic bombardment. We also confirmed existence of a post-stishovite polymorph, seiferite alpha-PbO₂ type structure, in a different lunar meteorite, NWA4734, by X-ray diffraction using synchrotron radiation at BL10XU of SPring-8. Although this phase was previously suggested in the same meteorite only based on the cathode luminescence (CL) spectrum, it was never confirmed since there is no reference of seiferite in CL spectra. The present X-ray diffraction measurements confirmed existence of seiferite in this meteorite. The lattice parameter of this phase was consistent with that reported from a Martian meteorite (ElGoresy et al., 2008). The condition of the shock event in this lunar meteorite was more intense compared to Asuka-881757 lunar meteorite.

Keywords: High pressure, Polymorph, Silica, Lunar meteorite, Lunar Cataclysm, Asuka-881757

PPS024-10

会場:103

時間:5月23日 08:45-09:00

月の衝突盆地の層序と月初期の衝突史 Ages of impact basins and early impact history of the Moon

諸田 智克^{1*}, 春山 純一¹, 大竹 真紀子¹, 松永 恒雄², 山本 聡², 石原 吉明³, 本田 親寿⁴, 小林 進悟¹, 横田 康弘², 古本 宗充⁵, 武田 弘⁶

Tomokatsu Morota^{1*}, Junichi Haruyama¹, Makiko Ohtake¹, Tsuneo Matsunaga², Satoru Yamamoto², Yoshiaki Ishihara³, Chikatoshi Honda⁴, Shingo Kobayashi¹, Yasuhiro Yokota², Muneyoshi Furumoto⁵, Hiroshi Takeda⁶

¹ 宇宙研, ² 国環研, ³ 国立天文台, ⁴ 会津大学, ⁵ 名古屋大学, ⁶ 東京大学

¹ ISAS/JAXA, ² NIES, ³ NAOJ, ⁴ University of Aizu, ⁵ Nagoya University, ⁶ University of Tokyo

月では40個以上の巨大衝突でできた衝突盆地の存在が確認されており、それらは全て38億年以前に形成されたと考えられている。衝突盆地の年代と層序の正確な理解は、月初期の衝突史の解明と、月表層構造の地質進化履歴をひも解く上で重要である。本研究では、かぐや地形カメラで得られた画像データを用いて主に月裏側にある衝突盆地の相対年代を調べた。その結果に基づいて、衝突盆地の形成史について議論する。

キーワード: 月, かぐや, 衝突盆地, クレーター年代学, 後期重爆撃期

Keywords: Moon, Kaguya, impact basin, cratering chronology, late heavy bombardment, lunar cataclysm

PPS024-11

会場:103

時間:5月23日 09:00-09:15

月に形成したクレーターの光条消失時間について Optical maturity of crater ray materials on the Moon

鈴木静香¹, 本田親寿^{1*}, 平田成¹, 諸田智克², 出村裕英¹, 大竹真紀子², 春山純一², 松永恒雄³, 浅田智朗¹
Shizuka Suzuki¹, Chikatoshi Honda^{1*}, Naru Hirata¹, Tomokatsu Morota², Hirohide Demura¹, Makiko Ohtake², Junichi Haruyama²,
Tsuneo Matsunaga³, Noriaki Asada¹

¹ 会津大学, ² 宇宙航空研究開発機構, ³ 国立環境研究所

¹University of Aizu, ²JAXA, ³NIES

Fresh lunar impact craters have rays which are bright features radially expanding from host craters. It has been suggested that the rays are erased by space weathering that modify surface materials by exposure to solar wind and micrometeorite bombardments, and by impact gardening that mixes surface materials and subsurface materials by meteorite bombardments (Wilhelms, 1987). Werner and Medvedev (2010) surveyed lunar rayed craters with Clementine UVVIS images and showed that retention time of the rays of craters larger than 5 km in diameter is 750 Myr.

The purpose of this research is to investigate the retention time of rays around smaller lunar craters with high-resolution multiband images from Kaguya/MI (Multiband Imager). In our research, we surveyed rayed craters using OMAT (Optical Maturity) parameter developed by Lucey et al. (2000). The OMAT parameter is the optical index representing the degree of space weathering, which is derived from multiband images. Crater rays are not only bright, but also have larger OMAT value than the background. We surveyed craters from 300 m to 10 km in diameter in lunar highland with MI and TC images, and measured the OMAT profiles each crater. The craters the OMAT value at the crater rim is clearly higher than background OMAT value are detected as rayed craters. We described the size-frequency distribution of the detected craters. The craters larger than 1 km in diameter are plotted above the 1 Ga isochron. However, the distribution cannot be fitted by a single isochron. This suggests that the ray retention time is significantly longer than 1 Ga.

PPS024-12

会場:103

時間:5月23日 09:15-09:30

アポロ長周期一短周期地震計を用いた月震波シグナルの ”広帯域 ” スペクトル解析 Combining the LP and SP Apollo Seismic Data to Explore ”Broad” Band Seismology on the Moon

川村 太一^{1*}, 小林 直樹², 田中 智²
Taichi Kawamura^{1*}, Naoki Kobayashi², Satoshi Tanaka²

¹ 東京大学, ² 宇宙科学研究本部
¹The University of Tokyo, ²ISAS/JAXA

Seismic data from Apollo missions is still one of the most important data set to investigate the structure and the state inside the Moon. On the other hand the data set suffer from constraints such as the number of seismic stations and their network location, and the sensitivity of the instruments. Our understanding of spectral feature of the lunar seismic events is limited to narrow frequency range because of the limitation of the instrument. Apollo missions had short period(SP) and long period(LP) seismometer and each seismometer covered about 1-10 Hz and 0.1-1 Hz respectively. In most of the previous studies, these data were treated independently and spectral features are discussed in limited band width. In this study we try to identify the spectral features from both LP and SP seismometer. From the two observations, we estimate the continuous spectrum that cover both of the LP and SP frequency range. By studying the spectral feature with broader frequency range, we can identify their characteristics more in detail compared to using just one observation.

キーワード: 月, 地震, 月震
Keywords: Moon, Earthquake, Moonquake

PPS024-13

会場:103

時間:5月23日 09:30-09:45

かぐや月全球重力場モデルにもとづく盆地内部構造の相関解析 Lunar internal structure estimated from local admittance between gravity and topography

並木 則行^{1*}

Noriyuki Namiki^{1*}

¹ 千葉工業大学 惑星探査研究センター

¹PERC/Chitech

日本の月探査機「かぐや」はリレー衛星による 4-way ドップラ観測により、月裏側の重力場観測を行い、世界で初めて月の全球重力場モデルを完成させた。新しい重力場モデルは、月の表側と裏側では盆地の補償メカニズムが大きく異なっていることを明らかにし、月の熱史に重要な制約条件を与える可能性を示している。我々は「かぐや」の観測結果から、盆地の補償メカニズムが定性的に Type I, II, primary mascon 盆地に分類されることを提唱している [Namiki et al., 2009]。この仮説を定量的に検証し、明瞭な重力異常が認められる月盆地と高地地殻について、「かぐや」の最新重力場モデルを用いて局所地形と重力場の相関解析を行う。この結果をもとに地殻密度、モホ面深度分布、表面に噴火あるいは地下に貫入した溶岩の寄与、を推定する。

本研究では、ウェーブレット解析を応用した球面調和関数の局所化 [e. g., Simons et al., 1997; Wieczorek and Simons, 2005] により月重力モデルと地形モデルの相関解析を行う。その目的は遠方での密度異常の影響を除去することであり、月盆地のように解析対象の空間スケールが惑星半径と同程度で曲率を無視できない対象に特に有用である。球面調和関数のウェーブレット解析については、金星の地形と重力のアドミッタンスの計算のためにすでに開発され [Simons et al., 1997]、火星に応用されている [McGovern et al., 2002]。月盆には、地形・重力を局所化することで、波長によらない盆地の軸対称性が明確になり、密度異常のモデル化が容易になる。この解析手法を用いる対象は「かぐや」の重力異常図で明瞭な特徴を示している盆地を選んでいる。

本研究では最新の月全球重力場モデルを使用し、表側盆地と裏側盆地の比較、特に Namiki et al. [2009] の提唱する分類 Type I, II 盆地と primary mascon 盆地の補償メカニズムの違いを明らかにする。また、ウェーブレット変換の窓関数についても検討を加える。ウェーブレット変換自体は数学的処理だが、実際には窓関数の適・不適が解析結果と、その解釈に大きく影響する。Simons et al. [1997] ではもっとも単純な窓関数、Boxcar 関数型の窓（いわゆるメキシカンハット型窓）を利用している。Simons et al. [1997] の窓関数は簡素で利用しやすい反面、広い波長域の情報をたたみ込んでしまうという欠点が指摘されている。そこで、天文学分野で利用されている 3 次の B-spline 窓関数 [Starck et al., 2006] を用いている。これは等方的なガウシアン関数の近似型窓関数であり、収束が早いという特徴を持っている。また、Simons et al. [1997] では窓関数の空間的サイズと波数サイズを規定する係数、 f_S 、を 2 に固定しているが、本研究では解析対象域の空間半径に応じて 2-5 の範囲で可変とした。

この手法をまず極域と表側、裏側の高地に適用したところ、球面調和関数の次数が 10-40 次までの長・中波長域では線形的にアドミッタンスが増加し、40 次以上の短波長域ではアドミッタンスがほぼ一定になる。これは、長波長の地形はエアリーアイソスタシーによって支えられているが、短波長の地形はリソスフェアの弾性が支えていることを示している。短波長のアドミッタンスから推定される地殻密度はアポロサンプルから推定される標準的な密度 2800 kg/m^3 と矛盾しない。

Type I 盆地のアドミッタンスは、幅の広い山型をしている。アドミッタンスのピーク波長は盆地中央に認められる重力異常の幅に一致している。一方 Type II 盆地のアドミッタンスは二つのピークを有しているようである。波長の長い側のピークは幅が狭く、高い。Type I 盆地との相違は、重力異常の鋭さに起因していると解釈される。最後に、primary mascon 盆地は Type II 盆地同様の幅が狭いピークを示すが、その中心次数は Type II 盆地よりも長波長側に移動している。また、アドミッタンスは全体として 0 mGal/km に近づいており、primary mascon 盆地がアイソスタシーに近いことを示唆する。

キーワード: 月重力, かぐや

Keywords: lunar gravity, Kaguya

月周回衛星「かぐや」のデータを用いた衝突盆地の特徴量の決定

A determination of characteristics of impact basins from data of the Japanese lunar explorer "Kaguya"

猿渡 有希¹, 石原 吉明^{2*}, 諸田 智克³, 澤田 明宏¹, 平松 良浩¹

Yuki Saruwatari¹, Yoshiaki Ishihara^{2*}, Tomokatsu Morota³, Akihiro Sawada¹, Yoshihiro Hiramatsu¹

¹ 金沢大学, ² 国立天文台, ³ 宇宙航空研究開発機構・宇宙科学研究所

¹Kanazawa Univ., ²NAOJ, ³ISAS/JAXA

1. はじめに

月の衝突盆地を形成した巨大衝突は、月の表層や内部構造進化に多大な影響を及ぼしたと考えられている。一方で、衝突盆地の形成過程はよくわかっていない。そのため、月に存在する衝突盆地の正確な特徴量（リング中心位置、リングサイズ、リングの高さ等）を決定し、衝突盆地の構造を理解することは重要である。

これまでの衝突盆地の中心位置やリング径決定は、主として写真データや地形データを基にした visual inspection によっており、定量性・客観性に問題があった。本研究では、球関数モデルに基づく定量的・客観的な計測手法を新たに提案する。また、新手法を月周回衛星「かぐや」により得られた最新の測月データ（月形状・重力場モデル）に適用し、月の衝突盆地の特徴量の決定を試みた。

2. 解析データ・方法

天体衝突で形成される衝突盆地は極端な斜め衝突の場合を除き、軸対称の凹構造もしくはリング構造であることが期待される。すなわち、衝突盆地の中心が北極に位置する場合、衝突盆地の大局的な構造は、衝突盆地のサイズに対応する次数およびそれ以下の次数の球関数のゾーナル項（位数 $m=0$ の項）の足し合わせのみで表される。この性質から衝突盆地の中心位置は、

1. 衝突盆地の仮想中心を北極とするように球関数モデルを回転
2. 衝突盆地の外側の構造の影響を取り除くため盆地を含むキャップ型に局在化
3. ゾーナル成分の寄与率を計算

の3ステップの演算を多数の仮想中心に対して行うことで、ゾーナル成分が最も卓越する位置として客観的・定量的に衝突盆地の中心を決定可能である。

本研究では上記の新手法を、月の衝突盆地に適用し、中心位置を決定するとともに、リングサイズ・リング高さの計測を行った。また、多重リングをもつ衝突盆地については、いくつかの次数においてゾーナル成分が卓越するため、それぞれについて中心を決定した。使用したデータは、「かぐや」搭載 LALT によって得られた月形状球関数モデルおよび 1/16 度グリッド地形データである。

盆地中心位置については緯度・経度とも 0.1 度刻みで仮想中心を変化させ、最もゾーナル成分の卓越する位置を求めた。リングサイズ決定の際には、月形状係数の低次の項のみを用いて地形図を作成し、衝突盆地の地形断面図から地形の勾配が 0 になる位置を抽出し、さらに、月全球地形 1/16 度グリッドデータを用いて作成した地形図と照らし合わせ、衝突盆地のリング構造を正しく表していると考えられる点のみを選択した。リングサイズはそれらの中心からの距離を平均して求めた。リングの高さは、リングの平均標高と中心位置の標高の差として算出した。

3. 結果

25 個の衝突盆地について解析を行った。リングの形状が楕円形や多角形の衝突盆地は球面調和関数を用いての中心位置決定はできなかった。多重リングを持ついくつかの衝突盆地はリングによって中心位置が異なり、最大 92 km のリング中心位置のズレが見られた。リングサイズ決定を行った結果、外側のリングとその内側のリングの直径はベキ乗の関係にあることが確認できた。また、リングの直径とリングの高さもベキ乗の関係にあり、これらのことからリングの形成メカニズムには規則性があることが考えられる。

キーワード: 衝突盆地, 月, 球関数, かぐや

Keywords: Impact Basin, the Moon, Spherical Harmonics, SELENE (Kaguya)

かぐや (SELENE) 測月データによる南極エイトケン盆地の構造 Structure of South-Pole Aitken Basin of the Moon from KAGUYA (SELENE) Selenodesy

佐々木 晶^{1*}, 石原 吉明¹, Goossens Sander¹, 松本 晃治¹, 荒木 博志¹, 花田 英夫¹, 菊池 冬彦¹, 野田 寛大¹, 並木 則行², 岩田 隆浩³, 大竹 真紀子³

Sho Sasaki^{1*}, Yoshiaki Ishihara¹, Sander Goossens¹, Koji Matsumoto¹, Hiroshi Araki¹, Hideo Hanada¹, Fuyuhiko Kikuchi¹, Hiroto Noda¹, Noriyuki Namiki², Takahiro Iwata³, Makiko Ohtake³

¹ 国立天文台 R I S E 月探査プロジェクト, ² 千葉工業大学惑星探査センター, ³ 宇宙航空研究開発機構宇宙科学研究所
¹National Astronomical Observatory, ²Chiba Institute of Technology, ³ISAS/JAXA

Figure Overprinted impact basins in SPA investigated here.

KAGUYA(SELENE) obtained the first precise gravity field of the lunar farside (Namiki et al., 2009) using 4-way Doppler tracking with relay satellite. Multi-frequency differential VLBI observation of two subsatellites improved the accuracy of gravity. A gravity field model SGM100h was obtained from one-year tracking data (Matsumoto et al., 2010) and the model was refined into SGM100i using VLBI data (Goossens et al., 2011). With topography data (Araki et al., 2009), Bouguer gravity anomaly, Moho depth, and crustal thickness are estimated (Ishihara et al., 2009).

The South Pole-Aitken basin (hereafter SPA) is the largest and deepest impact basin in the solar system. It has abundant superimposed craters. Garrick-Bethell and Zuber (2009) (GZ09) showed that SPA is characterized by an ellipse with axes 2400 by 2050 km with the center at 53S - 191E. Here, we analyze the structure of SPA using KAGUYA selenodesy data. The direction of an ellipse denoting the depression is similar to that of GZ09. The region with the thinnest crust is offset southward from the center of SPA. Moho depth at the central region of SPA is around 30km (25km in crustal thickness) and shallower to the southward. This may be explained by the oblique impact hypothesis.

Our crustal thickness is affected by the assumed anorthosite crustal density 2800 kg/m³. KAGUYA MI showed evidence of anorthosite in SPA (Ohtake et al., 2009). But spectral data of central peaks of craters inside SPA suggested the presence of px-rich impact melt sheet (Nakamura et al., 2009). Then, higher crustal density would result in larger crustal thickness.

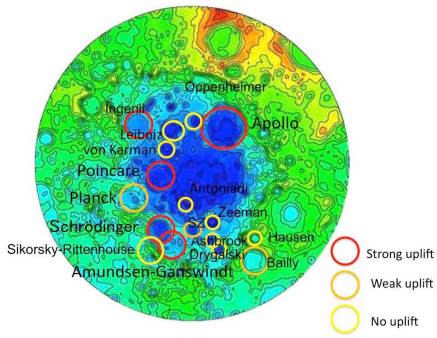
Since Bouguer anomaly is relatively flat in SPA, surface morphologies could be elastically supported. However, there are overprinted small impact basins with gravity anomaly. We analyzed interior structure of small basins in and around SPA (Figure). We interpret that a positive gravity anomaly at the basin corresponds to a Moho uplift. There is a distinct mantle plug beneath Apollo. Just around the rim of SPA, obscure circular structure Amundsen-Ganswindt has a distinct Moho uplift, suggesting a buried impact structure. A distinct Moho uplift beneath Schrodinger corresponds to the presence of olivine at the central peak rings there (Yamamoto et al., 2010). In comparison between adjacent Poincare and Planck, older, less distinct Poincare shows stronger gravity anomaly. The observed anomaly corresponds to Type 2 like anomaly (Namiki et al., 2009), where a significant uplift at the center is probably due to overcompensation just after the impact. Basin structures in the central SPA show little gravity anomaly. Although it might be due to lower spatial resolution, there are several possibilities such as less density difference between crust and mantle and rapid relaxation of the uplift.

We use localized representation of gravity potential according to the Han (2008) where Slepian functions were used to estimate the gravity field over certain areas of the Moon. Then, we express the gravitational potential with localized spherical harmonics functions. We include data in a spherical cap area with a radius of 40 degree from the SPA center. This area is fully covered by 4-way Doppler tracking of KAGUYA. We obtained gravity adjustment about -70 to 50mGal in preliminary analysis (Goossens et al., in prep.). The revised gravity field would improve crustal thickness with slightly higher resolutions.

References:

- Araki, H. et al., (2009) *Science* 323, 897,
- Garrick-Bethell and Zuber (2009) *Icarus* 204, 399, Goossens, S. et al. (2010), *J. Geodesy*, in press,
- Han, S.-C. (2008) *JGR* 113, E11012,
- Ishihara, Y. et al. (2009) *GRL*, 36, L19202,
- Matsumoto, K. et al. (2010) *JGR* 115, E06007,
- Nakamura, R. et al. (2009) *GRL* 36, L22202,

Namiki, N. et al. (2009) Science, 323, 900,
Ohtake, M. et al. (2009) Nature 461, 237,
Yamamoto, S. et al. (2010) Nature Geoscience 3, 533



キーワード: 月, 重力, 地殻, 南極エイトケン盆地, クレーター, 衝突
Keywords: Moon, gravity, crust, South Pole Aitken Basin, crater, impact

衝突盆地の緩和から制約された月裏側地殻中の放射性元素濃度 Concentrations of radioactive elements in the lunar crust constrained from relaxation of impact basins

鎌田 俊一^{1*}, 杉田 精司², 阿部 豊¹, 石原 吉明³, 原田 雄司⁴, 並木 則行⁵, 岩田 隆浩⁶, 花田 英夫³, 荒木 博志³
Shunichi Kamata^{1*}, Seiji Sugita², Yutaka Abe¹, Yoshiaki Ishihara³, Yuji Harada⁴, Noriyuki Namiki⁵, Takahiro Iwata⁶, Hideo Hanada³, Hiroshi Araki³

¹ 東大・理・地惑, ² 東大・新領域・複雑理工, ³ 国立天文台 RISE 月探査プロジェクト, ⁴ 上海天文台, ⁵ 千葉工大惑星探査研究センター, ⁶ 宇宙航空研究開発機構宇宙科学研究本部

¹Earth & Planet. Sci., Univ. of Tokyo, ²Comp. Sci. & Eng., Univ. of Tokyo, ³RISE project, NAOJ, ⁴Shanghai Astronomical Observatory, ⁵PERC, Chitech, ⁶ISAS/JAXA

長寿命放射性核種 (^{232}Th , ^{238}U , ^{235}U , ^{40}K) の壊変熱は、長期熱進化における最も重要な熱源である。そのため、月地殻における放射性元素濃度は、数十億年に渡る月の熱進化に対し、最も重要な影響を与える量の一つである。また、放射性元素は不適合元素であり、液相に濃集するため、月マグマオーシャンの固化過程を反映している可能性もある。このような月の初期熱進化を理解するためには、海の火山活動の影響が小さい月裏側の詳細な研究が必要がある。

月裏側は裏側高地地域 (FHT) と南極 - エイトケン盆地地域 (SPAT) に区分されており、SPAT と比較して、FHT は放射性元素に欠乏している [e.g., 1]。また、レーザー高度計データと重力場データの解析から、FHT における地殻厚は ~70 km、SPAT においては ~30 km と見積もられている [2]。これらの観測結果から、月の地殻に関して、(1) FHT 地殻は SPAT 地殻よりも放射性元素に欠乏しているモデルと、(2) SPAT 地殻は FHT の下部地殻を代表しているモデル [3] の、二つが考えられる。これらのモデルでは、FHT 地殻に含まれる放射性元素の量が大きく異なる。そのため、月裏側の熱進化を理解するためには、FHT 地殻深部の放射性元素の濃度を制約することが重要である。

月の地殻やマントルは、温度に強く依存した流動則に従う。そのため、月形成後、初期 10 億年以内に形成したと考えられる、月の衝突盆地と呼ばれる巨大クレーターの長期粘性変形は、月初期における上部の温度構造を反映すると考えられる [4]。月周回衛星「かぐや」による重力場計測の結果、裏側の衝突盆地の多くはアイソスタシーを回復していないことが分かった [5]。この観測結果は、衝突盆地形成時におけるモホ (地殻下端) の温度が、従来考えられていたよりも低かったことを示している [5]。本研究の目的は、測地学的観測の結果と調和的な放射性元素の濃度を、熱進化計算と粘弾性体計算によって制約することである。

本研究では、熱進化計算と粘弾性計算を独立に行った。熱進化計算においては、熱源として放射壊変熱のみを考えた一次元熱伝導方程式を解いた。初期条件 (4.5 Ga) として、ソリダスで与えられる温度構造を与えた。粘弾性変形において、熱進化計算で求めた温度構造を逐次反映させるため、我々が近年開発した時間発展型計算スキームを用いた [6]。本手法は球面調和展開を用いるスペクトル法である。パラメータは地殻中の放射性元素の濃度、地殻厚、球面調和次数、盆地形成時とし、表面荷重とモホ荷重のそれぞれの場合における、表面地形とモホ起伏の時間発展を求めた。

得られた結果と、「かぐや」地形データと地殻厚モデル [2] を比較し、月裏側衝突盆地の初期の表面とモホの地形を推定した。再現された初期地形において、地殻厚は負にならないという制約条件を課し、初期表面熱流量を制約した。その結果、FHT のほぼ中心にある Freundlich-Sharonov (周辺地殻厚 ~67 km) の初期熱流量 $< 33 \text{ mW/m}^2$ が必要であることが分かった。Freundlich-Sharonov よりも新しいとされる Nectaris の形成年代は 4.14-3.84 Ga と推定されている [7]。熱進化計算と比較したところ、3.84 Ga 以前に上記熱流量となるためには、 $\text{Th} < 0.5 \text{ ppm}$ が必要であることが分かった。これは、SPAT の表面で観測された Th 濃度よりもかなり小さい。したがって、SPAT 地殻は FHT 地殻の下部とは異なり、放射性元素の濃度は水平方向に不均一であることを示唆している。これは、水平不均一な月マグマオーシャンの固化過程を支持する結果である。

参考文献: [1] Jolliff et al. (2000) *JGR*, **105**, 4197. [2] Ishihara Y. et al. (2009) *GRL*, **36**, doi:10.1029/2009GL039708. [3] Wieczorek M. et al. (2006) *Rev. Min. Geochem.*, **60**, 221. [4] Solomon et al. (1982) *JGR*, **87**, 3975. [5] Namiki N. et al. (2009) *Science*, **323**, 900. [6] Kamata S. et al. (2009) *Proc. 42th ISAS Lunar Planet. Symp.*, 38. [7] Stoffler et al. (2006) *Rev. Min. Geochem.*, **60**, 519.

キーワード: かぐや, 粘弾性, 衝突盆地

Keywords: KAGUYA, Viscoelasticity, Impact basin

PPS024-17

会場:103

時間:5月23日 10:45-11:00

月裏側のトリウム分布に関する考察 Study of the distribution of thorium on the lunar farside

小林 進悟^{1*}, 唐牛讓², 諸田智克¹, 武田弘³, 長谷部信行², 晴山慎¹, 小林正規⁴, 柴村英道⁵, 石原吉明⁶
Shingo Kobayashi^{1*}, Yuzuru Karouji², Tomokatsu Morota¹, Hiroshi Takeda³, Nobuyuki Hasebe², Makoto Hareyama¹, Masanori Kobayashi⁴, Eido Shibamura⁵, Yoshiaki Ishihara⁶

¹ 宇宙科学研究所, ² 早稲田大学, ³ 東京大学, ⁴ 千葉工業大学, ⁵ 埼玉県立大学, ⁶ 国立天文台
¹JAXA/ISAS, ²Waseda University, ³The University of Tokyo, ⁴Chiba Institute of Technology, ⁵Saitama Prefectural University, ⁶NAOJ

The abundance and the distribution of thorium on the lunar farside are important to investigate the lunar magma ocean and the influence of the Imbrium thorium-rich ejecta on the farside. The low thorium abundance on the lunar farside, typically less than 1 ppm, resulted in weak gamma-ray fluxes and thus it becomes relatively difficult to obtain the thorium map on the lunar farside by gamma-ray remote sensing method. We have analyzed the thorium distribution on the lunar farside by using Kaguya gamma-ray spectrometer (KGRS) that has the highest sensitivity among lunar gamma-ray spectrometers to date. In the presentation, we will mention the characteristics of thorium distribution on the lunar farside.

キーワード: ガンマ線分光計, かぐや, セレーネ, トリウム, 月裏側
Keywords: gamma-ray spectrometer, Kaguya, SELENE, Thorium, lunar farside

PPS024-18

会場:103

時間:5月23日 11:00-11:15

「かぐや」搭載ガンマ線分光計による月表層の鉄とチタンの分布調査 Examination for Iron and Titanium Distributions on the Moon Observed by Kaguya Gamma-Ray Spectrometer

唐牛 譲^{1*}, 小林 進悟², 晴山 慎², 山下 直之³, 柴村 英道⁴, 小林 正規⁵, 荒井 朋子⁵, 武田 弘⁶, 早津 佳那子¹, 長岡 央¹, 町田 二郎¹, 藤林 ゆかり¹, 長谷部 信行¹

Yuzuru Karouji^{1*}, Shingo Kobayashi², Makoto Hareyama², Naoyuki Yamashita³, Eido Shibamura⁴, Masanori Kobayashi⁵, Tomoko Arai⁵, Hiroshi Takeda⁶, Kanako Hayatsu¹, Hiroshi Nagaoka¹, Jiro Machida¹, Yukari Fujibayashi¹, Nobuyuki Hasebe¹

¹ 早大理工研, ²JAXA, ³IRAP, ⁴ 埼玉県大, ⁵ 千葉工大, ⁶ 東大

¹RISE, Waseda University, ²JAXA, ³IRAP, ⁴Saitama Prefectural University, ⁵Chiba Institute of Technology, ⁶University of Tokyo

The Kaguya Gamma-Ray Spectrometer (KGRS) was designed with a high-energy resolution to determine the lunar subsurface composition by observing gamma rays emitted from the Moon [1]. The absolute concentration maps of radioactive elements such as potassium, thorium and uranium were reported by successive KGRS data analysis [2, 3]. Preliminary results of iron and titanium maps have already been reported [e.g. 4]. Here, we report the progress made along the last year.

The iron and titanium maps were made by procedures similar to those in Lawrence et al. [5]. These maps are in good agreement with the Lunar Prospector maps reported by Prettyman et al. [6]. The relative concentration of iron in maria becomes lower in the order corresponding to Procellarum, Imbrium, Serenitatis, Fecunditatis, Nubium, Tranquillitatis, Crisium, South Pole-Aitken Terrane, Australe and Smythii. The titanium distribution is slightly different from that of iron. The titanium signature of Mare Tranquillitatis is higher than that of Procellarum and Imbrium. And, the relative concentrations of titanium in maria Fecunditatis, Crisium, South Pole-Aitken Terrane, Australe and Smythii are as low as that of highland regions.

[1] Hasebe et al., *Earth, Planets, and Space*, 60, 299-312 (2008).

[2] Kobayashi et al., *Space Science Reviews*, 154, 193-218 (2010).

[3] Yamashita et al., *Geophys. Res. Lett.* 37, L10201 (2010).

[4] Karouji et al., *Japan Geoscience Union Meeting*, PPS003-09 (2010).

[5] Lawrence et al., *J. Geophys. Res.*, 107, 5130 (2002).

[6] Prettyman et al., *J. Geophys. Res.*, 111, E12007 (2006).

キーワード: かぐや, ガンマ線分光計, 月, 元素分布地図, 鉄, チタン

Keywords: Kaguya, GRS, Moon, Elemental map, Iron, Titanium

PPS024-19

会場:103

時間:5月23日 11:15-11:30

かぐや (SELENE) 搭載 Multi-band Imager データを用いた FeO・TiO₂ 量推定法の検討 Validation of method for estimating abundance of FeO and TiO₂ using Kaguya (SELENE) Multi-band Imager data

白井 嵐^{1*}, 押上 祥子¹, 山口 靖¹, 大竹 真紀子², 並木 則行³, 唐牛 謙⁴

arashi shirai^{1*}, Shoko Oshigami¹, Yasushi Yamaguchi¹, Makiko Ohtake², Noriyuki Namiki³, Yuzuru Karouji⁴

¹ 名古屋大学大学院環境学研究科, ² 宇宙航空研究開発機構宇宙科学研究本部, ³ 千葉工業大学 惑星探査研究センター, ⁴ 早稲田大学理工学術院総合研究所

¹Department of Earth and Environmental Sc, ²Department of Planetary Science, Institutu, ³Planetary Exploration Research Center Ch, ⁴Research Institute for Science and Engin

月表面の元素の存在量と割合を知ることは月の形成過程を理解するのに重要な役割を果たす。岩石を構成する鉱物は太陽光の特定の波長域を吸収し、それ以外の光を反射する。特に、かんらん石 (olivine), 単斜輝石 (clinopyroxene), 斜方輝石 (orthopyroxene) といった有色鉱物は、それらの鉱物中に存在する Fe²⁺ が可視近赤外領域の光を吸収することで、反射スペクトルに吸収帯を生じる。月においても反射スペクトルの特徴から鉱物の特定が試みられている。月表面では微小隕石衝突、宇宙線放射といった宇宙風化作用の影響で反射スペクトルの傾きや吸収帯の深さの変化、反射率の低下が起こる。この風化作用の進行度を成熟度という。この事について隕石や月岩石のサンプル等を用いて研究が行われ、風化の影響を除去して FeO・TiO₂ の存在量を推定する方法が開発された [e.g., Lucey et al. 1998, 2000]。この手法は FeO 量に関しては鉱物中の鉄含有量が増えると 950 nm の反射率 (R₉₅₀) と 750 nm の反射率 (R₇₅₀) の観測バンドの比 (R₉₅₀/R₇₅₀) と R₇₅₀ が低下し、風化が起こると R₉₅₀/R₇₅₀ が高くなり、R₇₅₀ は低下するという実験結果に基づいている。また、TiO₂ 量に関しては、R₇₅₀ に対する 415 nm の反射率 (R₄₁₅) 比と R₇₅₀ の関係から導かれている。

しかし、この方法には様々な問題点が指摘されている。Lucey et al. [1998] は風化が進行すると大部分の鉱物の R₉₅₀/R₇₅₀ vs R₇₅₀ のプロットがある値 (optimized origin) に近づいていくことを前提にしているが、月の海での風化の傾向は放射状よりも平行の傾向を示すのではないかとされている [Staid and Pieters 2000]。Wilcox et al. [2005] は、クレメンタインの分光データを用いて 6 つの海で約 10,000 のクレーターのデータから新たに R₉₅₀/R₇₅₀ vs R₇₅₀ のプロットを新たに作成した。そしてこのプロット中に示される FeO 量、成熟度の変化傾向から、より精度良く両者を分離、推定することのできるアルゴリズムを導いた。しかし TiO₂ 量については特に述べられていなかった。そこで本研究ではかぐやの Multi-band imager (MI) データを使い、Humorum をテストサイトとして Wilcox et al. [2005] に基づいて Lucey et al. [1998] が提示した手法の検証と地質解析を行う。

キーワード: マルチバンドイメージャ, 湿りの海

Keywords: Multi band Imager, Mare Humorum

PPS024-20

会場:103

時間:5月23日 11:30-11:45

かぐや (SELENE) 分光データを用いた月高地地殻の水平・垂直組成の推定 Compositional estimation of the lunar highland crust derived by the SELENE spectral data

大竹 真紀子^{1*}, 松永 恒雄², 武田 弘³, 横田 康弘², 山本 聡², 諸田 智克¹, 小川 佳子⁴, 廣井 孝弘⁶, 中村 良介⁵, 春山 純一¹
Makiko Ohtake^{1*}, Tsuneo Matsunaga², Hiroshi Takeda³, Yasuhiro Yokota², Satoru Yamamoto², Tomokatsu Morota¹, Yoshiko Ogawa⁴, Takahiro Hiroi⁶, Ryosuke Nakamura⁵, Junichi Haruyama¹

¹ 宇宙航空研究開発機構, ² 国立環境研究所, ³ 千葉工大, ⁴ 会津大, ⁵ 産業技術総合研究所, ⁶ ブラウン大
¹JAXA, ²NIES, ³Chiba Institute of Technology, ⁴The University of Aizu, ⁵AIIST, ⁶Brown University

月周回衛星かぐや (SELENE) に搭載されたマルチバンドイメージャ (Multiband Imager; MI) データを用いて、我々は月高地の上部地殻には従来の研究から推定されている値 (pl=82 ~ 92vol.%) よりも斜長石に富んだ、ほぼ純粋な斜長岩 (pl=98 ~ 100vol.% で Purest Anorthosite ; PAN と呼ぶ) が普遍的に存在し、上部地殻は少なくとも部分的にこのような組成であることを報告した [1]。このような純粋な斜長岩からなる地殻が形成されるには、非常に効率的なマグマからの斜長石結晶分離が必要であり、従来の月マグマオーシャンからの斜長石浮揚による地殻形成モデルの詳細化が必要となっている。そのため、このような PAN 組成地殻の水平・垂直組成をより詳細に調べ、把握し、新しいモデルと比較することが今後の月地殻進化過程を考える上で非常に重要である。

本研究では、かぐや搭載スペクトルプロファイラ (Spectral profiler; SP) データおよび MI データを用い、純粋な斜長岩である PAN が月全球のどこに分布するのか、さらにその組成 (PAN 岩石中に微量含まれるマフィック鉱物の量) が高地地殻中で水平・垂直方向にどのように変化するのかを調べる。

解析手法は、SP の全データ中から、斜長石に特徴的な 1250nm 付近の吸収深さが最大となるスペクトル (ほぼ純粋な斜長岩のスペクトル) を選定し、それら選定されたスペクトルの吸収中心波長や吸収深さ、斜長石とマフィック鉱物に起因する吸収深さの比を求めることで鉱物量比および鉱物化学組成を推定する。一方、水平位置を各選定データの緯度・経度情報から求め、また同じ領域を観測した MI データを用いて該当スペクトルを示す露頭が存在する場所 (全てクレータの内壁やイジェクタに相当する) のクレータ直径から、各掘削深度を推定することで地殻中の垂直位置を調べた。

結果、月全球の高地領域に普遍的に分布する PAN 岩石中において、微量存在する輝石ないしカンラン石の量は月表面の混合層以深の地殻中 30km 程度の深さに至るまで、深さとともに減少する傾向にあることが明らかとなった。また、それぞれの深さにおける PAN 岩石中のマフィック鉱物の量は 3.5 から 7vol.% 程度 (これら値は月面 500m における平均値として求められる、最大推定値) であると推定される。

上記結果は、最近になり再検討され始めたマグマオーシャンからの斜長石の浮揚による地殻形成モデル [2] において予測される地殻中の鉱物量比変化と調和的である。

[1] M. Ohtake et al., Nature, 461, doi:10.1038 (2009).

[2] E.M. Parmentier and Y. Liang, Lunar Planet. Sci. Conf. 41st, 1824 (2010).

キーワード: かぐや, 月探査, 高地地殻, マグマオーシャン

Keywords: SELENE, lunar exploration, highland crust, magma ocean

PPS024-21

会場:103

時間:5月23日 11:45-12:00

月地殻形成モデルにおける変形しうる多孔質媒体中の対流現象 Modes of convective flow through deformable porous media, implication for lunar crust formation

Mishra Binaya Kumar^{1*}

Binaya Kumar Mishra^{1*}

¹ 松岡 弘明

¹ Matsuoka Hiroaki

Modes of convective flow through deformable porous media, implication for lunar crust formation Existence of pure anorthite crust on the Moon as revealed by KAGUYA mission(Ohtake et al, Science 2010) indicates not only intensive floatation of plagioclase in the lunar magma ocean but further completion of compaction from the state of crystal mush. The time scale of this compaction process should control chemical composition of the anorthositic crust. The initial state of floating anorthosite aggregates is expected to be a kind of random close packing of crystals, which means melt phase should be included at about 30% vol. in the case of homogeneous grain size. During this stage fluid migration through crystal aggregate occurs extensively. Although this process has been conventionally modeled as fluid flow through porous media and convection in permeable flow and the time scale of fluid migration is estimated based on porous flow model, an important difference exists between rigid frame model and the lunar protocrust. In the lunar case porous frame which is constructed of plagioclase crystals should be deformable and it is slowly compacting so that the interstitial melt is finally squeezed out. Motivated by this difference we focus on the significance of deformability of porous frame in the convective flow through porous media. In this presentation we report on laboratory experiments which compare style of convective fluid flow in porous media between deformable frame and rigid one. As the rigid case glass beads are used for the porous frame whose grain size is 0.4mm to 3mm. To check density difference between solid and liquid(aqueous solutions) styrene beads(0.5-2 mm in diameter) are also used. As the deformable case soft gel such as agar and hydrogel is used. To see the difference in flow style we have conducted thermal convection experiments by using localized heat source at the base of experimental tank. Since the porous media is not transparent enough to allow optical inspection of fluid flow such as PIV we measured temperature at several points around the heater in vertical and horizontal directions. We observed localization of high temperature above the heater, which reflects convective flow induced by localized heat source. In the case of deformable frame not only the fluid but solid grains also exhibit slow migration in consistent with the convective flow. This induces rearrangement of particles, which should enhance effective compaction and efficient squeeze-out of melt phase.

Keywords: Convective flow in a fluid in a porous medium

Japan Geoscience Union Meeting 2011

(May 22-27 2011 at Makuhari, Chiba, Japan)

©2011. Japan Geoscience Union. All Rights Reserved.



PPS024-22

会場:103

時間:5月23日 12:00-12:15

Procerallum KREEP Terrainの構成物質 Crustal materials in Procerallum KREEP Terrain

杉原 孝充^{1*}, 大竹真紀子², 春山純一², 松永恒雄³, 横田康弘³, 諸田智克², 本田親寿⁴, 小川佳子⁴
Takamitsu Sugihara^{1*}, Makiko Ohtake², Junichi Haruyama², Tsuneo Matsunaga³, Yasuhiro Yokota³, Tomokatsu Morota²,
Chikatoshi Honda⁴, Yoshiko Ogawa⁴

¹ 海洋研究開発機構, ² 宇宙航空研究開発機構, ³ 国立環境研究所, ⁴ 会津大

¹JAMSTEC, ²JAXA, ³NIES, ⁴Aizu University

Aristillus crater は Mare Imbrium 内に位置するクレータであり、顕著に PKT の特徴を示してくれている。本講演では、かぐや搭載の MI/LISM のデータを用いて、PKT の地殻物質とその空間分布について議論する。

キーワード: 月, かぐや, 地殻, 初期進化, PKT, 分化

Keywords: Moon, Kaguya, crust, early differentiation, PKT, differentiation

PPS024-23

会場:103

時間:5月23日 12:15-12:30

月のトロクトライト地殻の産状と成因 Occurrence and origin of lunar troctolitic crust

荒井 朋子^{1*}, 廣井孝弘², 佐々木 晶³, 松井孝典¹
Tomoko Arai^{1*}, Takahiro Hiroi², Sho Sasaki³, Takafumi Matsui¹

¹ 千葉工業大学, ² ブラウン大学, ³ 国立天文台

¹Chiba Institute of Technology, ²Brown University, ³National Astronomical Observatory Japan

月地殻の鉱物分布は、月マグマオーシャンの組成や結晶化過程を理解する重要な手掛かりである。月の斜長岩質地殻には、少量の低カルシウム輝石やかんらん石が存在する。アポロ試料の鉱物分析やリモートセンシングデータ解析から、低カルシウム輝石がかんらん石より存在度が高いと考えられている。しかし、これまでに80個近く回収されている斜長石に富む月隕石には、斜長石とかんらん石からなる岩石片が多く見つかった。さらに、斜長石とかんらん石からなる岩石片は、全岩組成の微量元素濃度や微量元素の担い手となるリン酸塩鉱物やジルコンなどの鉱物存在度に関わらず、月隕石に普遍的に存在することがわかってきた。従って、月地殻中のかんらん石と低カルシウム輝石の分布についての従来の見解が修正されつつあるとともに、月マグマオーシャン組成や結晶化過程について再考察が必要になっている。

最近の月隕石の鉱物分析の結果、かんらん石の二次的分解または溶融により、低カルシウム輝石が生成することがわかってきた。斜長石に富むインパクトメルト角レキ岩では、岩石片は主に斜長石とかんらん石から成り、輝石は稀(2-3vol%)であるのに対し、インパクトメルトマトリクスでは低カルシウム輝石の存在度が高くなっている(10vol%)。これは、かんらん石と低カルシウム輝石が反応関係にあるため、メルトとかんらん石が反応して低カルシウム輝石が生成したことによる。また、斜長石とかんらん石からなる岩石片の一部には、かんらん石の周りにコロナ上に低カルシウム輝石が分布する組織やかんらん石を置き換えて低カルシウム輝石が成長する組織が見られる。これらも、かんらん石と低カルシウム輝石の反応関係によるもので、化学反応が完結すれば、かんらん石は低カルシウム輝石に置き換わってしまう。以上のことは、斜長石とかんらん石が共通の母マグマから結晶化したのに対し、低カルシウム輝石は二次的生成物であり、斜長石とかんらん石とは起源が異なることを示している。従って、地殻岩石がマグマオーシャン起源だとすると、かんらん石と斜長石はマグマオーシャンの結晶化産物であるが、低カルシウム輝石は違うことになる。

「かぐや」スペクトルプロファイラ(SP)の連続分光データやマルチバンドイメージャ(MI)を用いた最新研究結果から、かんらん石が巨大衝突クレータのクレータリングや中央丘に限定して分布することが明らかになった。かんらん石は輝石と比べ吸収係数が低いため、反射スペクトルにおける吸収が輝石に対して小さく、輝石とかんらん石が混在する場合、かんらん石の検知は容易ではない。従って、SPデータで特定されたかんらん石分布は、輝石に比べ圧倒的にかんらん石の存在度が高い地域と考えてよい。一般的に、クレータ底に比べ、クレータリングや中央丘は加熱・溶融を免れ、岩盤が機械的に破碎したものが隆起したと考えられる。つまり、かんらん石は、地殻が加熱・溶融などの熱的変成の影響の無いあるいは少ない地域でのみ存在することになる。このことは、上記のかんらん石と低カルシウム輝石との反応関係から説明される、月隕石中のかんらん石と低カルシウム輝石の産状と整合的である。現状、「かぐや」による遠隔探査で確認されたかんらん石の分布は、特定地域に限定され、その頻度は低カルシウム輝石に比べ低い。しかし、斜長石に富む月隕石中にかんらん石が普遍的に存在すること、かんらん石が熱変成に伴う化学反応により低カルシウム輝石に変化すること、そして分光学的にかんらん石が輝石に比べて検知されにくいことを考慮すると、マグマオーシャンから結晶化した月の原始地殻には、遠隔分光探査で検知されたものよりはるかに多いかんらん石が存在していた可能性が高い。さらに微量元素濃度に関わらず、斜長石に富む月隕石に一般的にかんらん石が存在することは、月全球地殻にかんらん石が分布していることを示唆している。

斜長石 かんらん石 シリカの仮想的三成分相図によると、かんらん石と斜長石の双方に飽和したマグマオーシャンの組成は、普通コンドライト(Al_2O_3 =約2.7wt%)よりもはるかに高いアルミニウム濃度を持つ必要がある。かんらん石と斜長石に飽和するためには、地球初生マントル相当の Al_2O_3 =約8wt%が必要である。トロクトライト岩石片には少量のスピネルが含まれることから、それら三種の鉱物が飽和する場合を考えると、さらに高い濃度アルミニウム(Al_2O_3 =11-13wt%)が必要になる。本講演は、かぐやデータ解析と月隕石中のトロクトライトの鉱物組成及び分光分析結果に基づき、月地殻中のトロクトライトの産状と起源を議論する。

キーワード: 月, 地殻, トロクトライト, マグマオーシャン

Keywords: Moon, Crust, Troctolite, Magma Ocean

PPS024-24

会場:103

時間:5月23日 12:30-12:45

地殻形成条件から制約する月マグマオーシャン中のFeO量とAl₂O₃量 Constraints on FeO and refractory element contents of lunar Magma Ocean from conditions of crust formation

酒井 理紗^{1*}, 久城 育夫¹, 永原 裕子¹, 小澤 一仁¹, 橘 省吾¹
Risa Sakai^{1*}, Ikuo Kushiro¹, Hiroko Nagahara¹, Kazuhito Ozawa¹, Shogo Tachibana¹

¹ 東大・理・地球惑星

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

The lunar highland crust is composed of purely anorthosite with tens of kilometers thick, and would be formed by the crystallization and flotation of anorthite from a global lunar magma ocean (LMO). The chemical composition, depth, and the actual differentiation mechanisms of LMO are still debated, although there are many previous studies. The FeO and refractory element (Al₂O₃ and CaO) contents of LMO are especially important due to the strong influence on the composition and the physical properties of the melt, and the amount of anorthite and other minerals crystallized in the cooling LMO. The purpose of this study is to constrain on the FeO and refractory element contents of the initial LMO consistent with the conditions of lunar crust formation.

At first, we assumed the bulk composition of the initial LMO varying FeO and refractory element contents and the differentiation mode varying the efficiency of crystal separation. Then we determined the composition of the LMO at the anorthite appearance by thermo dynamical calculations with MELTS/pMELTS. Finally, it is evaluated whether these results satisfy the following conditions: (1) the amount of crystallized anorthite enough to form the crust with the average thickness (~45 km), (2) the observed pyroxene composition of lunar highland crust, and (3) anorthite flotation in turbulent LMO at time of the anorthite appearance.

In present study, the compositional range considered was the FeO content by 0.5-2.5 times of BSE and the refractory element (Al₂O₃ and CaO) contents by 1.0-2.5 times of BSE. The mass balance evaluation of the amount of crystallized anorthite concluded that the crust with current thickness of the Moon could be formed from the FeO-enrichment of <2.3x and refractory element-enrichment of <2.0x composition. The mineralogical evaluation on pyroxene concluded that, if the refractory element contents are low (~1.0x), the extremely FeO-rich (>1.5x) initial composition does not reproduce pyroxene of which composition is consistent with that of lunar crustal samples. The fluid dynamic evaluation of anorthite flotation in turbulent LMO concluded that an anorthite crystal could float and separate in the initial composition with FeO-enrichment (>1.5x) due to the high density and the low viscosity of melt, regardless of the refractory element contents and the differentiation mode.

The present study shows the important conclusion that the FeO content of the initial LMO was comparable or higher than the BSE. This conclusion suggested the several possibilities: (1) the impactor object for the giant impact event of the Earth and Moon system originally had higher FeO content than BSE and/or (2) the oxygen fugacity of the LMO was higher than BSE for some reasons. More rigorous model with the detailed consideration on physics and chemistry of magma ocean processes of the cooling LMO based on the present study may give implication for the origin and evolution of the Moon.

キーワード: 月バルク組成, マグマオーシャン, 斜長岩質地殻, 分化過程, マグマ物性, ピストンシリンダー実験

Keywords: bulk composition of Moon, lunar magma ocean, anorthosite crust, differentiation, physical properties of magma, piston-cylinder experiments

シリケート反射分光データのベイズ推定法を用いた新しい解析法 A new analysis method for the reflectance spectra of silicates using Bayesian estimation

杉田 精司^{1*}, 永田 賢二¹, 廣井孝弘², 坪井伸子¹, 岡田真人¹
Seiji Sugita^{1*}, Kenji Nagata¹, Takahiro Hiroi², Nobuko Tsuboi¹, Masato Okada¹

¹ 東京大学, ² ブラウン大学

¹University of Tokyo, ²Brown University

Introduction: Visible and near infrared (VNIR) reflectance spectroscopy is a very powerful tool to observe planetary surfaces remotely and has revealed a wide variety of information on planetary surfaces [e.g., 1]. Because silicates often exhibit overlapped absorption bands in the VNIR range, they are often deconvolved into multiple simple bands for quantitative analyses.

Conventional MGM Algorithm: One simple approach would be to search for the optimum combination of simple bands that minimize the difference between observed and synthetic spectra by trying every possible parameter set. However, a direct search is usually impractical because it requires an astronomical number of trials. Thus, a more efficient mathematical method is necessary. In previous studies, the steepest descent method has been used frequently to resolve this problem, but this method is not necessarily good at finding the global minimum of a complex function with many local minima. Depending on the initial choice of parameters, an obtained result may be just a local minimum. Furthermore, this mathematical procedure needs to know how many model parameters (e.g., the number of Gaussians for MGM) should be used before the analysis. Generally, a fitting with more Gaussians will lead to a smaller error, but the complexity of the synthetics may become too large (e.g., over fitting).

New MGM Algorithm: In order to resolve these problems, we derived a new MGM algorithm using a Bayesian estimation approach, the exchange Monte Carlo (EMC) method, and the annealing method in this study. The mathematical details and numerical validation of the algorithm used in this study are given by [2,3].

Validation Analyses: In order to examine the validity and applicability of the new MGM algorithm proposed in this study, we conducted actual spectral deconvolution analyses using a series of reflectance spectra, olivine powder samples with different Mg/(Mg+Fe) ratios (mg#) and olivine-pyroxene mixtures with different mixing ratios

The results of our new MGM method indicate that the optimum number of Gaussian bands to reproduce the complex absorption band around 1 micron predicted is three for the reflectance spectra of all the olivine samples. This optimum number is the same as the number estimated empirically by [4]. Furthermore, the trends of the central wavelengths of individual bands, band widths and the relative intensities of the three individual bands as functions of mg# are very similar to the results by a conventional MGM [4]. These agreements support that the results of these MGM analyses are not specific to particular datasets or analytical methods but reflect the intrinsic optical properties of olivine.

Though not all Gaussians are detected, most of the deconvolved Gaussians are close to one of the Gaussians of the end-member samples. This will allow us to identify the mineral components within such mixtures. In particular, the bands around 1.2 and 1.03 micron in the mixtures of olivine can be detected when its mixing ratio is as low as 25%.

Conclusion: The above results along with the intrinsic properties of the new algorithm (e.g., little dependence on initial parameter value selection and the capability of finding the optimum number of Gaussians) suggest that method would be appropriate for automated analyses and greatly expand the applicability of MGM greatly, particularly for large volume of spectral datasets obtained for Moon.

References: [1] Pieters, C.M. and P.A.J. Englert (1993) Remote geochemical analysis: Elemental and mineralogical composition; [2] Nagata, K. et al. (2011) Neural Networks, submitted. [3] Sugita, S. et al. (2011) JGR, to be submitted. [4] Sunshine, J.M. and C.M. Pieters (1998) JGR, 103, 13,675.

キーワード: 反射分光法, リモートセンシング, ベイズ推定法, 月, 修正ガウス法

Keywords: Reflectance spectroscopy, Remote sensing, Bayesian estimation, Moon, Modified Gaussian method

PPS024-26

会場:103

時間:5月23日 14:30-14:45

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

田中 智^{1*}, 三谷 烈史¹, 大嶽 久志¹, 木村 淳², 小川 和律¹, 小林 直樹¹, 飯島 祐一¹

Satoshi Tanaka^{1*}, Takefumi Mitani¹, Hisashi Otake¹, Jun Kimura², Kazunori Ogawa¹, Naoki Kobayashi¹, Yu-ichi Iijima¹

¹ 宇宙航空研究開発機構, ² 惑星科学研究センター/北海道大学

¹JAXA, ²CPS/Hokaido Univ.

SELENE-II lunar landing mission is one of the series of the Japanese lunar exploration program of the next two decades. A pre-project team has established in 2007(Phase-A) and the launch is scheduled in the mid-2010s. We report our up-dated status of the science aspects.

The main progress, so far, is significant advance of technological development of the candidate instruments. Especially, we obtained a clear vision of the thermal design of each instrument under sever temperature condition on the Moon. At present, six instruments out of 12 candidates were selected as "prior instruments" judging from both technical readiness and science significance. In addition, several instruments for future utilization and for outreach use have been also developed progressively.

Making an excellent science scenario (objectives) under restricted condition is also an important issue. In order to do this, the science review board by the ISAS space science committee members was established in September 2009, and the review board has been almost finished and highly valued to promote the lunar science.

The science achievement is obviously dependent on the landing site. The landing site selection has been aggressively discussed by the "Landing Site Selection Working Team", which was established in May 2010. The first draft of the result will be reported by the end of March 2011.

As of now, SELENE-II mission team is elaborating a "realistic" proposal from the viewpoints of both technological readiness and severe financial condition. We also introduce our strategy and perspectives to overcome these difficult problems to be solved.

キーワード: 月, 月探査, 着陸機, SELENE-2, 科学搭載機器

Keywords: Moon, landing mission, lunar exploration, SELENE-2, science instruments

SELENE-2における月広帯域地震観測：新しい月科学に向けて SELENE-2 Lunar BroadBand Seismometer: A key instrument to open a new window of lunar science

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

Naoki Kobayashi^{1*}, Hiroaki Shiraishi¹, Nozomu Takeuchi², Hideki Murakami³, Taro Okamoto⁴, Keiko Kuge⁵, Dapeng Zhao⁶, Kazunori Ogawa¹, Yuichi Iijima¹, Hideaki Kakuma⁷, Satoshi Tanaka¹, Ryuhei Yamada¹, Taichi Kawamura¹, Yasushi Ishihara⁸, Eiichiro Araki⁸, Masahiko Hayakawa¹, Kei Shirai¹, Akio Fujimura¹, isao yamada⁹, Philippe Lognonne¹⁰, David Mimoun¹¹, Domenico Giardini¹², Antoine Mocquet¹³, Ulrich Christensen¹⁴, Peter Zweifel¹², Davor Mance¹², Jan ten Pierick¹², Raphael Garcia¹¹, Jeannine Gagnepain-Beyneix¹⁰, Sebastien de Raucourt¹⁰

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

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

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

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

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

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

キーワード: 月震, 広帯域地震計, コア, 地殻, 月探査, 内部構造

Keywords: moonquake, broadband seismometer, core, crust, lunar exploration, internal structure

PPS024-28

会場:103

時間:5月23日 15:00-15:15

SELENE-2/VLBI ミッションで探る月深部構造 SELENE-2/VLBI mission for study of lunar deep internal structure

松本 晃治^{1*}, 菊池 冬彦¹, Goossens Sander¹, 鎌田 俊一², 岩田 隆浩³, 花田 英夫¹, 石原 吉明¹, 佐々木 晶¹
Koji Matsumoto^{1*}, Fuyuhiko Kikuchi¹, Sander Goossens¹, Shunichi Kamata², Takahiro Iwata³, Hideo Hanada¹, Yoshiaki Ishihara¹, Sho Sasaki¹

¹ 国立天文台 RISE 月探査プロジェクト, ² 東京大学大学院理学系研究科, ³ 宇宙航空研究開発機構宇宙科学研究所
¹RISE Project, National Astronomical Obs., ²The University of Tokyo, ³ISAS/JAXA

VLBI (Very Long Baseline Interferometry) radio sources were on board the SELENE two sub-satellites, Rstar and Vstar. The radio waves from the radio sources (called VRAD) were received at multiple ground stations which forms a type of tracking data, i.e. delay in arrival times of the wave of a radio source at two different stations forming a baseline carries information about the angular position of the radio source. Differential VLBI data between Rstar and Vstar, when both the radio sources were within the beam width of the ground antennas, were of particular importance because they are highly accurate with atmospheric and ionospheric disturbances almost cancelled out by the simultaneous observation. Such tracking data, i.e. "same-beam differential VLBI data" were used to develop an improved lunar gravity field model SGM100i [1].

The Japanese future lunar mission SELENE-2 will carry both a lander and an orbiter. We propose to put the VRAD-type radio sources to these spacecraft in order to accurately estimate lunar potential Love number k_2 and low-degree gravity coefficients through precision orbit determination of the orbiter with respect to the lander by using the same-beam VLBI tracking technique. We also propose a new type of observation called inverse VLBI [2] in order to further improve the k_2 estimate. The same-beam VLBI observation is only possible when the separation angle between the two radio sources is smaller than the beam width of the ground antennas. The relatively large shape of Rstar's orbit (100 km x 2400 km) did not allow the same-beam observation all the time, but the situation can be improved by adequately setting the orbit. For example, the Vstar-like orbit (100 km x 800 km) will almost always keep the separation angle smaller than the S-band beam width of domestic VERA stations since one of the radio sources is fixed on the near-side lunar surface.

A preliminary simulation study has been conducted under the condition of 2-week arc length, 12-week mission length, 6 hours/day 2-way Doppler observation plus S-band same-beam VLBI observation with the 4 VERA stations. The k_2 uncertainty is evaluated as 10 times the formal error considering the errors in solar radiation pressure modeling and in lander position. The results show that, when combined with the historical tracking data including SELENE and when the orbiter inclination was 90 degrees, the k_2 uncertainty is below 1 percent.

The potential Love number k_2 , together with displacement Love number h_2 , lunar mass, and lunar moment of inertia can constrain lunar interior properties such as radial profiles for density and shear modulus. The size and state of the core (liquid or solid) are of particular interest. The Love number h_2 is obtained from lunar laser ranging (LLR) data, the mass is obtained from satellite tracking data, and moment of inertia is obtained from combination of LLR-based estimates of dynamical flattening and satellite-based 2nd degree gravity coefficients. Lunar Broad Band Seismometer (LBBS) will detect layer boundaries. We will discuss how well the internal properties can be inferred from the above-mentioned four parameters which will be improved by SELENE-2. We will also discuss the possible synergy of combining VLBI, LLR and LBBS data.

References: [1] Goossens et al., Journal of Geodesy, in press. [2] Kawano et al., Journal of Geodetic Society of Japan, 45, 181-203, 1999.

キーワード: 月, SELENE-2, VLBI, 人工衛星追跡, 重力場, 潮汐ラブ数

Keywords: Moon, SELENE-2, VLBI, artificial satellite tracking, gravity field, tidal Love number

SELENE2での月レーザ測距 Lunar Laser Ranging Experiment in SELENE2

野田 寛大^{1*}, 國森 裕生², 荒木 博志¹, 大坪 俊通³, 片山 真人¹, 佐々木 晶¹, 田澤 誠一¹, 鶴田 誠逸¹, 花田 英夫¹
Hiroto Noda^{1*}, Hiroo Kunimori², Hiroshi Araki¹, Toshimichi Otsubo³, Masato Katayama¹, Sho Sasaki¹, Seiichi Tazawa¹,
Seiitsu Tsuruta¹, Hideo Hanada¹

¹ 国立天文台, ² 情報通信研究機構, ³ 一橋大学

¹NAOJ, ²NICT, ³Hitotsubashi University

We present the development status of Lunar Laser Ranging experiment proposed to SELENE-2 landing mission. The Lunar Laser Ranging (hereafter referred to as LLR) measures the distance between laser link stations on the Earth and retroreflectors on the Moon, by detecting the time of flight of photons of high-powered laser from the ground laser stations. Since the Earth-Moon distance contains information of lunar orbit, lunar solid tides, and lunar rotation, we can estimate the inner structure of the Moon through rotation and tide. The ranges have been obtained since 1970's, when the Apollo and Luna mission put five retroreflectors on the Moon (Apollo 11, 14, 15, Lunakhod 1 and 2). The Lunakhod 1 had been lost for decades, but the LRO mission found it and the Apache Point Observatory in New Mexico, U.S.A., successfully ranged it on March 2010.

The retroreflector arrays of Apollo missions contain 100 (Apollo 11 and 14) or 300 (Apollo 15) prism-type corner cube retroreflectors with diameter of 3.8 cm, mainly due to the thermal design. Because of the tilt of the retroreflector arrays from the Earth direction due to the optical libration, the returned laser pulse is broadened, causing the main range error of more than 1.5 cm per photon ([1]). Therefore the sub-cm accuracy is achieved only by the statistical manner, namely by accumulating photons within about less than 20 minutes to make one range (normal point). We propose a large single retroreflector of hollow-type so that a single shot accuracy could become sub-cm. Otsubo et al ([2]) showed that a retroreflector of 20cm diameter with appropriate dihedral angle reflects photons of 1.5 fold of Apollo 11. Moreover, optimization of three dihedral angles can result in more photons ([3]). Since the accuracy of 0.1 arcseconds is needed as the dihedral angle, the fabrication precision and the thermal stability is under study. Also, a new retroreflector in the southern hemisphere of the Moon will enlarge the retroreflector network on the Moon for better estimation of the lunar rotation and tides.

We plan to range the Moon from a Japanese ground station. Currently only two laser link stations in the United States and France range the Moon. However, because these telescopes are used as astronomical or satellite laser ranging facilities as well, the amount of LLR data are limited. Therefore new ground stations are needed to obtain more LLR range data for better estimation of the internal structure of the Moon. The 1.5 m telescope at NICT-Koganei, which is dedicated to satellite laser ranging, will be upgraded so that it can transmit high-powered laser with relatively longer pulse width (nanosecond) for the detection of returns from the Moon within several years. Within longer time span, we also plan to build a new laser station in a place like Okayama where the best seeing is available in Japan and to develop the adaptive optics for uplink laser ([4]).

[1] Murphy et al., 2008, PAPS, vol 120, pp. 20-37. [2] Otsubo et al., 2010, Adv. Space Res., vol 45, pp 733-740. [3] Otsubo, Geod. Soc. of Japan, 2010 Fall Meeting. [4] Kunimori, Geod. Soc. of Japan, 2010 Fall Meeting.

キーワード: 月, 測月学, 月探査, SELENE2, LLR

Keywords: Moon, selenodesy, lunar exploration, SELENE2, LLR

PPS024-30

会場:103

時間:5月23日 15:30-15:45

SELENE-2 月電磁探査装置 (LEMS) の検討状況

A current status of Lunar ElectroMagnetic Sounder (LEMS) proposed in the SELENE-2 mission

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

Masaki Matsushima^{1*}, Hisayoshi Shimizu², Hiroaki TOH³, Ryokei Yoshimura⁴, Futoshi Takahashi¹, Hideo Tsunakawa¹, Hidetoshi Shibuya⁵, Ayako Matsuoka⁶, Hirokuni Oda⁷, Yuichi Iijima⁶, Kazunori Ogawa⁶, Satoshi Tanaka⁶

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

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

Information of the internal structure of the Moon is a key issue to understand the lunar origin and evolution. Heat-flux, seismic, and magnetic field measurements made in the Apollo mission enabled us to estimate a thermal structure, an elastic structure, and an electric structure of the lunar interior, respectively. The electrical conductivity structure, which is independent of the elastic structure, is therefore important to give a crucial constraint on the lunar origin and evolution. Because of the low sampling frequency at which magnetic field data were obtained in the Apollo mission, estimates of the electrical conductivity contain significant ambiguity, larger than two orders of magnitude, for the outermost few hundred kilometers of the Moon. It is necessary to carry out electromagnetic sounding of the Moon at higher frequencies than before to accurately probe the shallow lunar interior.

In the SELENE-2 mission, we propose a lunar electromagnetic sounder (LEMS) to estimate the electrical conductivity structure of the Moon. Temporal variations in the magnetic field of lunar external origin induce eddy currents in the lunar interior, which in turn generates the magnetic field of lunar internal origin. We measure the primary magnetic field by two triaxial fluxgate magnetometers onboard a lunar orbiter and the primary plus secondary fields by two triaxial fluxgate magnetometers onboard a lunar survival module, which is a thermal control system for long-time scientific measurements under a temperature condition being variable in a very wide range at the lunar surface. Dual magnetometer technique is to be utilized to avoid strict electromagnetic compatibility requirements like those for the Kaguya spacecraft. Here we present a current status of the LEMS mission, such as its design, its development, and some results of feasibility studies on the lunar electromagnetic sounding.

Keywords: SELENE-2, electromagnetic sounding, lunar interior

PPS024-31

会場:103

時間:5月23日 15:45-16:00

SELENE-2 における月表層の熱流量観測計画 Lunar Surface Heat Flow Measurement in SELENE-2 Mission

田中 智¹, 木村 淳², 小川 和律^{1*}, 宮原 ひろ子³, 小林 泰三⁴, Tilman Spohn⁵, Matthias Grott⁵, Tim van Zoest⁵, Axel Hagermann⁶
Satoshi Tanaka¹, Jun Kimura², Kazunori Ogawa^{1*}, Hiroko Miyahara³, Taizo Kobayashi⁴, Tilman Spohn⁵, Matthias Grott⁵, Tim van Zoest⁵, Axel Hagermann⁶

¹ 宇宙航空研究開発機構, ² 北海道大学, ³ 宇宙線研究所, ⁴ 九州大学, ⁵ ドイツ航空宇宙センター, ⁶ オープン大学

¹Japan Aerospace Exploration Agency, ²Hokkaido University, ³Institute for Cosmic Ray Research, ⁴Kyushu University, ⁵Deutsches Zentrum für Luft und Raumfahrt, ⁶Open University

熱流量計測は、惑星の温度状態や内部で発生した熱エネルギー量を推定するための最も直接的な方法のひとつである。月の地殻熱流量値は内部に含まれる放射性元素量 (U や Th のような難揮発性放射性元素) に大きく依存しているため、それらの量や分布は熱史の推定における強い制約条件を与えるほか、元素量に基づいて月全体の材料物質を推定することにもつながる。また月全体の組成に対する難揮発性元素の量は巨大衝突説の検証に関しても不可欠な情報である。月熱流量は Apollo 15, 17 で観測が実施されているが、この値は地下構造の影響、長期間の太陽光入射量の影響を受けていると考えられている (Saito et al., 2007)。従って月熱流量観測値やそこから推定された平均値は根底から見直す必要があり、Apollo ミッションで取得されたデータだけではもはや推定に限界がある。ここで提案する熱流量観測は決して Apollo ミッションからの精度向上や検証といういわゆる「二番煎じ」ではなく、世界で初めて信頼性の高い熱流量観測を達成する科学価値を有していると考えられる。

また深度方向の温度プロファイルの取得は、過去数百年間の太陽放射の歴史を決定できる「唯一」の方法である。月は地球のように気候変動を受けないので太陽放射の影響のみを反映しており、気候モデルの検証および気候予測に欠かせない重要なデータとなる。特に西暦 1600-1700 年にかけて生じた太陽活動低下期の太陽総放射量の解明が期待される。

これらの科学的意義を背景に、表面地殻熱流量観測装置 (HFP) は月表層に観測プローブを埋設し、温度勾配および熱伝導率を直接計測することにより着陸地点の地殻熱流量をその場観測する。観測装置はこれまでに DLR (Deutsches Zentrum für Luft und Raumfahrt) が開発を行ってきた惑星熱流量探査プローブ HP³ (Heat flow and Physical Properties Package) を考えている。本探査プローブはこの前身型である Mokle が Beagle2 に搭載された実績を持ち、また HP³ も現在 ESA で開発が進められている EXO-MARS への搭載が検討され、PDR 審査を通過した実績を有していることなど、現段階においてすでに完成度の高い機器である (なお現在は、EXO-MARS への搭載はミッションの縮小などの事情により見送られた)。

キーワード: 熱流量, 月探査, SELENE-2

Keywords: heat flow, lunar exploration, SELENE-2

PPS024-32

会場:103

時間:5月23日 16:00-16:15

SELENE2 周回機搭載月ダストモニター LDM Lunar Dust Monitor for the orbiter of the next Japanese lunar mission SELENE2.

小林 正規^{1*}, 大橋 英雄², 佐々木 晶³, 柴田 裕実⁴, 岩井岳夫⁵, 藤井雅之⁶, 野上 謙一⁷, 木村 宏⁸, 中村 真季⁵, 平井 隆之⁹
Masanori Kobayashi^{1*}, Hideo Ohashi², Sho Sasaki³, Hiromi Shibata⁴, Takeo Iwai⁵, Masayuki Fujii⁶, Ken-ichi Nogami⁷, Hiroshi Kimura⁸, Maki H. Nakamura⁵, Takayuki Hirai⁹

¹ 千葉工業大学惑星探査研究センター, ² 東京海洋大学, ³ 国立天文台, ⁴ 京都大学, ⁵ 東京大学, ⁶ 早稲田大学, ⁷ 獨協医科大学, ⁸ 惑星科学研究センター, ⁹ 総合研究大学院大学宇宙科学専攻

¹PERC/Chitech, ²Tokyo Univ. Marine Sci. & Tech., ³NAOJ, ⁴Kyoto Univ., ⁵Univ. of Tokyo, ⁶Waseda University, ⁷Dokkyo Med. Univ., ⁸CPS, ⁹Dpt. Space&Astrm. Sci., GUAS

Lunar Dust Monitor (LDM) is proposed to be onboard the orbiter of the next Japanese lunar mission SELENE2, which is planned to launch in mid 2010s. LDM has a large sensitive area for a quantitative study of the cometic dusts observed in lunar orbit according to its concept design.

Dust particles around the Moon include interplanetary dusts, beta meteoroids, the interstellar dust, and possibly lunar dust that originated from the subsurface materials of the Moon. However there has been no quantitative observation data that shows their percentage. It has been said that tens of thousands of tons of the dust particles per a year flow into the Moon. Some of them have impact velocities enough to vaporize the lunar soil. The vaporization of ferrous surface silicate soils forms nanophase metallic iron particles glassy coat, which causes the space weathering of the lunar surface. Thus, the dust particle is an important component from the viewpoint of the Moon evolution.

LDM has performance following features: (1) LDM can observe the dust particle with quite the same orbital speed as the earth thanks to the observation on the lunar orbit, (2) LDM can prevent the solar wind plasma from inflowing to the detector inside owing to a reflector, and consequently, the generation of background noises and spurious signals can be suppressed, and (3) because the speeds of incident dust particles are measured with TOF using two grids inside the LDM sensor box, the speed can be measured with a high accuracy of 10% even for such low-speed particles as ones that is hardly detected by past impact ionization detectors. If the proposal is accepted, LDM will observe hundreds of dust particles in lunar orbit for nominal mission life of one year. Using the observation data, the origin can be identified according to their trajectories (eccentricity and tilt angle), masses and so on.

In this paper, we summarize the significance of cosmic dust observation at 1 AU and report predicted results of the LDM.

キーワード: 宇宙塵, 月軌道, その場観測, SELENE2, 惑星塵, 衝突電離型宇宙塵検出器

Keywords: Cosmic dust, Lunar orbit, in-situ observation, SELENE2, Interplanetary dust, Impact ionization dust detector

SELENE-2 ミッションに提案中のマクロ分光カメラで目指す月高地地殻探査の目的と観測機器仕様 Scientific goals and instrument specification of a proposed macro imager for the SELENE-2 mission

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

Makiko Ohtake^{1*}, Chikatoshi Honda², Kazuto Saiki³, Takamitsu Sugihara⁴, Tomokatsu Morota¹, Hisashi Otake¹

¹ 宇宙航空研究開発機構, ² 会津大, ³ 大阪大, ⁴ 海洋研

¹JAXA, ²The University of Aizu, ³Osaka Univ., ⁴JAMSTEC

月周回衛星かぐや (SELENE) で得られた成果をもとに、次に行う月探査として月面に着陸する SELENE-2 ミッションを検討しており、我々のグループでは、この SELENE-2 ミッションでクレータ中央丘の近くに着陸して行く高地地殻の探査を提案している。

かぐやに搭載されたマルチバンドイメージャ (Multiband Imager; MI) データを用いて、月上部地殻には従来の研究から推定されている値 (pl=82 ~ 92vol.%) よりも斜長石に富んだ、ほぼ純粋な斜長岩 (pl=98 ~ 100vol.% で Purest Anorthosite; PAN と呼ぶ) が普遍的に存在し、上部地殻が少なくとも部分的にこのような組成であることが解った [1]。一方、このような純粋な斜長岩からなる地殻を形成するためには、従来マグマオーシャンからの斜長石の浮揚で考えられていたよりも非常に効率のよいマグマからの結晶分離が必要であることから、浮揚メカニズムの詳細を含めて高地地殻の形成過程を理解することが月科学にとっての重要な研究テーマとなっている。月高地地殻の形成過程を知ることは、月科学にとってだけでなく他の固体天体での地殻成長を考える上でも直接的また基礎的な情報となる。具体的には、最近の高地地殻形成過程モデル [2] では深さ方向に斜長岩中に含まれる微量なマフィック鉱物が減少する傾向を持つことが推定されており、このモデルから推定される鉱物量比や粒子サイズと実際に中央丘に露出する地殻物質の鉱物量比や粒子サイズを比較し、また斜長石とマフィック鉱物の配置や境界形状等岩石組織を観察することにより地殻形成過程 (斜長岩成長過程、条件) の理解につながる。さらに、マグマオーシャンから直接固化したと考えられる地殻中の斜長石の粒子サイズ [3] や斜長石とマフィック鉱物の化学組成 (Mg#等) を調べることにより、斜長石が形成された時点でのマグマオーシャンの組成を推定することができる。

前述の目的を達成するために、我々は月表面にある混合層 (隕石衝突などにより岩石が破碎・混合を受けた層) の物質ではない、本当の意味でマグマオーシャンから直接固化した高地地殻物質が岩体として露出していると考えられるクレータの中央丘付近に着陸し、中央丘の物質を観測することを提案している。また、観測岩石の鉱物量比や鉱物組成、結晶の粒子サイズや配置等の岩石組織を観測するために、岩石表面を研磨した上で空間分解能の高い (20micron/pixel) マルチバンドの分光観測 (750-1500 nm の波長範囲を 8 つのバンドで観測する) が必須であり、このような観測を行うための岩石研磨部とマクロ分光カメラからなる観測機器の搭載を提案している。

[1] M. Ohtake et al., Nature, 461, doi:10.1038 (2009)

[2] E.M. Parmentier and Y. Liang, Lunar Planet. Sci. Conf. 41st, 1824 (2010)

[3] R. Sakai et al., 遊星人, 12, 82-88 (2010)

キーワード: SELENE-2, マクロ分光カメラ, 高地地殻, マグマオーシャン

Keywords: SELENE-2, macro imager, highland crust, magma ocean

Japan Geoscience Union Meeting 2011

(May 22-27 2011 at Makuhari, Chiba, Japan)

©2011. Japan Geoscience Union. All Rights Reserved.



PPS024-34

会場:103

時間:5月23日 16:45-17:00

SELENE-2 搭載 Lunar Multiband Camera System (LMUCS) の開発と科学目標 Development and scientific objectives of Lunar Multiband Camera System (LMUCS)

杉原 孝充^{1*}, 大嶽久志², 佐伯和人³, 諸田智克², 大竹真紀子², 本田親寿⁴

Takamitsu Sugihara^{1*}, Hisashi Otake², Kazuto Saiki³, Tomokatsu Morota², Makiko Ohtake², Chikatoshi honda⁴

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

¹JAMSTEC, ²JAXA, ³Osaka University, ⁴Aizu University

Lunar Multiband Camera System (LMUCS) は月表面探査 SELENE-2 に搭載することを目標に開発されている。LMUCS はローバ上にマスト、水平-垂直ジンバルを介して搭載し、フィルタホイールによって観測波長を変えて、月面岩石の可視近赤外域の分光観測を行う。本講演では、LMUCS の科学目標と概念検討の結果を報告する。

キーワード: 月, 表面探査, 地殻, ローバ, SELENE-2, ランダ

Keywords: Moon, surface exploration, crust, rover, SELENE-2, Lander

SELENE-2 でめざすガンマ線・中性子線分光計による月面元素分析 Elemental analysis of the lunar surface rocks and regolith by Gamma-ray/Neutron Spectrometer (GNS) for SELENE-2

小林 進悟^{1*}, 三谷 烈史¹, 唐牛 譲², 荒井 朋子³, 武田 弘⁴, 飯島 祐一¹, 長谷部 信行²

Shingo Kobayashi^{1*}, Takefumi Mitani¹, Yuzuru Karouji², Tomoko Arai³, Hiroshi Takeda⁴, Yuichi Iijima¹, Nobuyuki Hasebe²

¹ 宇宙科学研究所, ² 早稲田大学, ³ 千葉工業大学, ⁴ 東京大学

¹JAXA/ISAS, ²Waseda University, ³Chiba Institute of Technology, ⁴The University of Tokyo

We have proposed a gamma-ray/neutron spectrometer system (GNS) to analyze elemental abundance of the lunar surface rocks and regolith for SELENE-2 mission. The GNS primarily analyzes K, Th and U abundances of the lunar surface and also can measure Fe and possibly other major elements. In the presentation, we will summarize the scientific objectives and the design and the current status of GNS. The significance of the GNS mission is briefly mentioned here.

K, Th and U are distinctive elements in geochemistry because of their moderately volatility or refractory, incompatibility and radioactivity. Thus, the abundance of K, Th and U in the lunar crust and mantle is the key to address the important issues related to the origin and evolution of the Moon, such as bulk lunar chemistry, crystallization of lunar magma ocean, volcanic activity etc [J.J. Gillis et al. JGR 2004, S. Kobayashi et al., Abstract for 42th LPSC (2011) 1721]. In addition, K, Th and U are symbolic elements on the Moon because it represents the lunar dichotomy (See attached figure, Th map obtained by Kaguya gamma-ray spectrometer) the western hemisphere of the nearside called Procellarum KREEP Terrain (PKT) is considerably enriched in Th, whereas the other region, Feldspathic Highland Terrain (FHT) is extremely depleted in it [B.L. Jolliff et al. JGR (2000)]. It is important to know where and how much K, Th and U are concentrated on the Moon

The gamma-ray remote sensing has the limitation of the spatial resolution, which seems to be currently at best 40 km by applying an image deconvolution analysis [e.g. D.J. Lawrence et al. GRL (2008)]. Thus, we still have not known the abundance and the distribution of K, Th and U within small, but geologically distinctive regions, such as crater floors (~ dozens of km), central peaks (~ several km) and domes (~ dozens of km), even though we have lunar samples of Apollo and Luna mission, lunar meteorites and enormous remote sensing data. Further the local variation of K, Th and U abundances on FHT where we have never explored by landing mission is also unknown. The investigation of a local geology by the GNS would yield meaningful and new scientific data

The local geology is important now that we have the global K, Th and U map at our hands. Our scientific objectives, although they depend on the landing site of SELENE-2 that has not determined currently, are as follows:

(1) To investigate the elemental abundance of K, Th and U of the deep crust of PKT by exploring a crater with high/low Th feature within PKT to restrict the models of the lunar thermal history, the formation of PKT and the bulk chemistry of the Moon [S. Kobayashi et al., Abstract for 42th LPSC (2011) 1721, Y. Karouji, Proposal documents for SELENE2 landing site (2010) #21, #22].

(2) To know the lower limit of Th abundance and elemental abundance of major elements (e.g. Mg#) of rocks and regolith on the lunar surface within FHT to limit the model of the lunar magma ocean [H. Takeda et al. in this session].

(3) To understand comprehensively the variety of lunar volcanism by exploring silicic, nonmare, volcanic constructs, such as Hansteen Alpha, where K, Th and U are considered to be highly concentrated [T. Arai, Proposal documents for SELENE2 landing site (2010) #34].

キーワード: ガンマ線分光計, 中性子線分光計, セレーネ 2

Keywords: gamma-ray spectrometer, neutron spectrometer, SELENE2

PPS024-36

会場:103

時間:5月23日 17:15-17:30

SELENE-2の着陸場所推薦 Landing site recommendation for SELENE-2

佐伯 和人^{1*}, 荒井 朋子², 荒木 博志³, 石原 吉明³, 大竹 真紀子⁴, 唐牛 譲⁵, 小林 直樹⁴, 杉原 孝充⁶, 春山 純一⁴, 本田 親寿⁷

Kazuto Saiki^{1*}, Tomoko Arai², Hiroshi Araki³, Yoshiaki Ishihara³, Makiko Ohtake⁴, Yuzuru Karouji⁵, Naoki Kobayashi⁴, Takamitsu Sugihara⁶, Junichi Haruyama⁴, Chikatoshi Honda⁷

¹ 大阪大学, ² 千葉工業大学, ³ 国立天文台, ⁴ 宇宙航空研究開発機構, ⁵ 早稲田大学, ⁶ 海洋研究開発機構, ⁷ 会津大学

¹Osaka Univ., ²Chiba Inst. Tech., ³National Astronomical Obs. of Japan, ⁴Japan Aerospace Exploration Agency, ⁵Waseda Univ., ⁶Japan Agency Marine-Earth Sci. Tech., ⁷Univ. Aizu

日本の次期月着陸探査計画 SELENE-2 が、2010 年台半ばの打ち上げを目指して計画されている。SELENE-2 の科学的成果を最大にする着陸候補地点を選ぶために、2010 年 3 月に月着陸候補地点検討会議が SELENE-2 プリプロジェクトのサブチームとして発足した。本検討会議では、月惑星科学における第一級の課題解決のため、SELENE-2 探査が目指す科学目標を明確に設定し、目標達成のためにはどの地点に着陸し、どのような戦略で観測を行うべきかについて議論・提案する。2010 年 6 月に日本惑星科学会、日本鉱物科学会、日本地球化学会、日本地震学会、日本測地学会の会員をはじめ、広く月科学に関心のある地球惑星科学コミュニティの研究者に呼びかけ、21 グループから、35 件の科学テーマと約 70 箇所の着陸地点の提案が寄せられた。これらの提案を基に科学目的の重要性、技術的実現可能性を考慮しつつ議論を進め、今日もっとも優先すべきサイエンスを実行するための、複数の着陸候補地と探査計画案を作成した。本講演では、探査計画案とその選択根拠を説明する。

キーワード: 月, 月探査, 着陸機, 着陸場所, SELENE-2, ローバー

Keywords: moon, Moon exploration, lander, landing site, SELENE-2, rover

月高地斜長岩の多様性と月裏側高地の表側延長地域の探査

Diversity of anorthositic highland crusts and exploration of the northern region of the Bailly basin

武田 弘^{1*}, 小林進悟², 春山 純一², 唐牛謙³, 山口 亮⁴, 大竹 真紀子², 廣井 孝弘⁵, 諸田智克², 長岡央³

Hiroshi Takeda^{1*}, Shingo Kobayashi², Juniti Haruyama², Yuzuru Karouji³, Akira Yamaguchi⁴, Makiko Ohtake², Takahiro Hiroi⁵, Tomokatsu Morota², Hiroshi Nagaoka³

¹ 東京大学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 早稲田大学理工学研究所, ⁴ 国立極地研究所, ⁵ ブラウン大学地質学研究室

¹ Univ. of Tokyo, Graduate School of Sci., ² JAXA/ISAS, ³ Waseda Univ., Res. Inst. for Sci. & Engrn., ⁴ National Inst. of Polar Research, ⁵ Brown Univ., Dept. Geol. Sci.

月の裏側にある大きな盆地は月初期にできて以後、モスクワ海などを除き表側のように溶岩により満たされること無く、古い地形が未だに残っている。この月裏側について、「かぐや」の得た大きな成果である重力分布図、地形カメラ(TC)、レーザ光度計(LALT)による地形図、ガンマ線分光計(GRS)によるトリウム分布図、地殻の厚さの分布図より、月最初期の地殻について考察した[1]。月最初期にマグマ大洋から浮上した斜長石は不混和元素(トリウム)の含有量が最も少ないはずであり、初期から末期まで集積した斜長岩地殻はもっとも厚くなることが期待される。さらに近年発見された新たな月起源隕石によってもたらされた情報として、トリウムの最も少なくアポロ試料の斜長岩よりよりマグネシウムに富む月隕石[2]が砂漠、南極で発見されたことがある。またマルチバンドイメージャ(MI)、スペクトルプロファイラ(SP)よりアポロ試料の斜長岩より、より斜長石の多い岩石が分布していることが報告された[3]。GRSによりトリウムの最も少ない地域が発見され[4]、その地域の地殻がもっとも厚い地域であり、形成されて以後あまり変化を受けてない、月最初期の地殻が残っている可能性が高いと考えられる。デリクレ-ジャクソン・ベーズンの南で月の最も高い高地が「かぐや」で発見されたが、この付近は地殻がもっとも厚くトリウムの最も少ない地域である。しかし、月の起源と進化について、最近「かぐや」によって明らかにされた事実と、アポロ月試料によって長年の間推定されていたモデル[5,1]には一部に矛盾が見られる。月最初期の斜長岩を裏側から回収することは、「かぐや月探査」の成果をさらに発展させ、月の二分性の解明につながる可能性がある。このような地域の探査とサンプルリターンは月科学を大きく発展させ、アポロ計画や「かぐや月探査」で、人類がまだ石を手にしたことの無い地域、「未踏の地域の月の石」を初めて持ち帰ることにつながり、国民の理解を得られる探査となるであろう。

月裏側高地には地殻の最も厚い所がありトリウムの最も少ない地域で、原始地殻が残っている可能性のある所であっても、そのような探査の実施はまだ先のことである。裏側に行けないのであれば、このような地殻が表側に延びている所を探査することを検討した。表側でトリウムの最も少ない地域はバイイ(Bailly)・ベーズンの北で、ズッキュウス(Zucchius)からパングレ(Pingre)クレーターに至る地域である。地形カメラ(TC)で得られたこの地域の地形[6]は、裏側のデリクレ-ジャクソン・ベーズン(直径480km)とよく似ている。バイイ・ベーズンは直径300kmで少し小さいが、その中にはデリクレ-ジャクソン・ベーズンと同じくクレーターが多い。このベーズンの中にクレーターが多いことはトリウム分布と共に、表に着陸しながら裏のベーズンを探査することにもなる。パングレ・クレーター(緯度-58.59, 経度-73.15)はこのベーズンの北にある直径88kmのクレーターで、中央丘はないがよりトリウムが低く、ズッキュウスにも近いので着陸地点となりうる。チコはアポロ試料でよく調べられた鉄に富む斜長岩地域であるが、パングレ・クレーターはトリウムの最も少ないことより、よりマグネシウムに富む月最古の地殻が残っている可能性が高い。この探査ではトリウムの少ないアポロ斜長岩(FAN)より鉄の少ない岩石がある地域であることを確認するため、着陸地点の各岩相におけるTh、K、Feの濃度の定量値を、ガンマ線・中性子分光計(GNS)で得る。メートルスケールで定量するレゴリス・岩石についてもGNSを用いて測定する。よりマグネシウムに富む斜長岩はMgナンバーは70-78であり、FANはより低い70-50の値を持つ。80より高い岩石はスピネル・トロクトライトやグラニュライトの可能性が高い。

必要な機器としては、GNSの他、画像分光カメラ(ALIS、LMUCS、LUMI)、熱流量観測計(HFP)、地形カメラがある。PKT領域から十分離れた地域における表側高地の熱流量値を測定することも提案されているので、トリウムの少なく地殻が厚いバイイ・ベーズン北部は適当である。地殻の厚さとトリウム量との関係を検証するには、地殻の厚さを広帯域地震計(LBBS)で測定する必要がある。Mgナンバーを決めるのはMg、Fe、Al、Si等をX線分光計やLIBSで測る。

バイイ地域は表にありながら裏の特徴をも示すので、月の未知の情報を与えてくれる。既にアポロ14号が着陸したKREEPの多い地域、中央丘を持つチコやコペルニカスなどのクレーターは新鮮ではあるが鉄を多く含む斜長岩地域であり、アポロ計画に続き多くのデータが集められている。

参考文献(英文要旨参照)。

キーワード: 月, 裏側, ベーソン, 月隕石, 斜長石, 地殻

Keywords: Lunar farside, basin, lunar meteorites, Plagioclase, Anorthosite, Bailly Basin

月の縦孔構造 ~ 将来月着陸探査候補地点として ~ Lunar hole-structures as candidates of future lunar landing projects

春山 純一^{1*}, 白尾 元理², 小林 憲三³, 横堀 伸一⁴, 岩田 隆浩¹, 諸田 智克¹, 小林 進悟¹, 斎藤 義文¹, 西野 真木¹, 橋本 博文¹, 山下 雅道¹, 川勝 康弘¹

Junichi Haruyama^{1*}, Motomaro Shirao², Kensei Kobayashi³, Shin-ichi Yokobori⁴, Takahiro Iwata¹, Tomokatsu Morota¹, Shingo Kobayashi¹, Yoshifumi Saito¹, Masaki N Nishino¹, Hirofumi Hashimoto¹, Masamichi Yamashita¹, Yasuhiro Kawakatsu¹

¹ 宇宙航空研究開発機構, ² 惑星地質研究所, ³ 横浜国立大学, ⁴ 東京薬科大学

¹Japan Aerospace Exploration Agency, ²Institute of Planetary Geology, ³Yokohama National University, ⁴Tokyo Univ. of Pharmacy and Life Science

明らかに通常の衝突クレータとは異なる縦孔構造が月や火星に見つかっている。月の場合、直径、深さともに数10m以上に及ぶものが3つ見つかっている。これらは、地下の溶岩チューブにつながる天窓なのだろうか。この未知の構造を調べることを将来の月着陸探査の一つとして提案したい。

<サイエンスの目的・重要性>

縦孔の中は、そもそも、リモートセンシングでは分からない「未知の領域」である。

それが、地球の溶岩チューブの天窓相当のものなのか、火星のそれと同種のものなのか、或いは全く異なる形成メカニズムによって作られたものなのかを調べることは、比較惑星学的にも重要である。更に、縦孔探査は、様々な科学的課題の解明につながると考えられる。

溶岩形態学とその利用：縦孔が溶岩チューブの天窓であれば、溶岩チューブによる溶岩運搬作用・溶岩地形形成といった火成活動の中心的課題の研究の進展が期待される。溶岩チューブがないとすれば、他の成因、たとえば断層活動、マグマ貫入による地形形成などの研究進展が期待される。

クレータ形成メカニズム：地下に空間の有る場合のクレータ形成メカニズム解明に関する情報を得る。

火成活動の変遷と熱史：縦孔構造の壁はすぐれた露頭となっている。縦孔のあるマリウスヒルや静の海は、火成学的にも重要な地域であるが、その領域の火山活動の履歴（噴出量、噴出物質の変遷、噴出間隔など）の情報が、これらの露頭調査でわかる。溶岩チューブが存在すれば、チューブ内に溶岩流の、溶岩の流れの履歴（回数、間隔、冷却率・温度・粘性）などの情報を得ることが出来る。

マントル物質の特定：溶岩チューブが存在し、その中に捕獲岩を得ることでマントル物質特定につながる情報が期待される。

その他：縦孔内壁、底、溶岩チューブに水素・水酸基・水を調べることで、太陽風と月表面の相互作用・太陽風活動の変遷・月ダイナモ磁場の過去の存在に関わる情報を得ることになる。また孔底では、明暗境界における電磁気学的現象やダスト輸送現象の情報が得られる。さらに、将来の火星の孔探査のLessonsとなる。溶岩チューブ内の新鮮な岩体に水が存在すれば、それは月固有の水である。

<科学的利用可能性の調査>

月の縦孔は、他月面表面に比べ、放射線被爆或いは隕石衝突の影響を受けにくく、また温度変動が少ない場所が存在する可能性が高く、将来の月基地候補である。

更に、縦孔の底に存在すると推察される月の溶岩チューブは、以下の点で将来の月基地の有力な候補である。

- 天井の存在により、放射線、隕石衝突、高速衝突飛散物の影響が皆無、安定な温度、広い空間、無塵、平らな床面、高い密閉性

月基地の用途としては以下のようなものが考えられる

- 科学観測機器（たとえば、月震計、熱流量計、素粒子観測等々）（天文台などの）科学観測データ処理装置の設置場所

- 科学を含む月面探査拠点

- 宇宙飛行士の火星等地球から遠く離れた場所へ探査をしに行く前の作業訓練基地

- 月・地球外サンプルの科学的解析基地（月は地球に近い、重力がある、という利点をもつ）

基地の建設は、将来の月・惑星科学を多いに推進することにつながる。

< 探査のシナリオ >

縦孔構造という未知の領域を調べることについては、次の三つの段階に分けて考える。

「縦孔付近（縦孔から 1km 程度）はどうなっているのか？」

「縦孔縁はどうなっているか、壁にどのような層構造は見られるのか？」

「縦孔の底はどうなっているのか溶岩チューブは有るのか？」

科学的な興味と重要性、技術的なフィージビリティをふまえ、今後探査のシナリオを詳細化していく段階である。

キーワード: 月, 孔, 溶岩チューブ, セレーネ, かぐや, たんさ

Keywords: Moon, hole, lava tube, SELENE, Kaguya, exploration

将来の月地震探査における月地殻構造調査 Investigation of lunar crustal structure in future lunar seismic experiments

山田 竜平^{1*}, ラファエルガルシア², フィリップロニョーネ³, マチュールフェューブル⁴, マリーカルベ², デイビットバラト²

Ryuhei Yamada^{1*}, Raphael Garcia², Philippe Lognonne³, Matthieu Lefevvre⁴, Marie Calvet², Davit Baratoux²

¹ 宇宙航空研究開発機構, ² トゥールーズ大学, ³ パリ地球物理学研究所, ⁴ ナント大学

¹ Japane Aerospace Exploration Agency, ² University of Toulouse, ³ Institute de Physique du Globe de Paris, ⁴ University of Nantes

月の地殻の内部構造やその厚さを知ることは、月形成時の分化過程や物質分布を理解するうえで、大きな制約を与える。最新のかぐやの重力場データの解析は月には全球に渡って、地殻内部とその厚さに水平方向の不均質が存在している事をより明確に示唆している (e.g., Namiki et al., 2009, Ishihara et al., 2009)。一方で、地震観測により地殻-マントル境界、地殻内を伝搬してきた波を検出することで得られる情報は、地殻内の物質分布に関する制約と重力場データから全球の地殻厚さを推定するうえでの高精度な較正点を与えてくれる。現在、日本、米国、欧州等では新しい高性能の広帯域地震計を月面に設置し、アポロミッション以来の地震探査を行う事が検討されている。この広帯域地震計は、月面でアポロの地震計よりも明瞭に地震波フェーズを捉えられるよう設計されており、新しい月地震観測データにより、より高精度での地殻構造の決定と、かぐやデータと合わせて、より明瞭な地殻厚さ分布の推定が行えるようになる事が期待されている。

本研究では、これら将来の月地震探査において使用予定の広帯域地震計により、どの程度の数の地震イベントの検出ができ、それらの観測データを用いて地殻厚さと地殻内速度構造をアポロの結果と比較して、どの程度の精度で決定可能かを評価した。アポロの地震データ解析では、地殻構造を調べるのに、主に月表面での人工地震データや隕石衝突データが使用されていた。そこで、本研究では隕石のマスフラックスを基に作られた隕石衝突イベントリストを用いて、広帯域地震計により隕石衝突をどの程度同定可能かを評価した。また、現在、地上からの月面での衝突発光の観測により隕石衝突の位置と発生時刻を決定し、その波を捉えた地震計データから地殻構造を調べる事が提案されている。この場合、例え1点観測点であっても、地震データのインバージョンから地殻に関する情報を得る事は可能である。本研究では、天体歴を用いて一年間で地上観測可能な隕石衝突イベントの数と、その中で地震計により検出可能なイベントの数の見積もりも行っている。

一方で、地震計で検出可能な隕石衝突の数と、それらの観測データを用いて決定される内部構造の決定精度は設置される地震計の位置、ネットワークの配置に大きく依存する。そこで、本研究では、(Yamada et al., 2010) により開発された Optimized network design 法により、少数の観測点 (1-3 点) で最も少ない誤差で隕石衝突位置と地殻内速度構造、厚さを決定できる地震計配置を選んだ。本発表では、主にその最適地震計配置により検出可能な衝突イベントの数と、決定可能な内部構造の精度とを報告する予定である。また、本発表では、導出した結果と過去の探査結果に基づき、どこに地震計を設置すれば地殻構造に対して科学的に興味深い結果が得られるか、その提案も合わせて行いたい。

キーワード: 月探査, 月地殻, 地震観測, 隕石衝突, 衝突光観測, 地震計ネットワーク設計

Keywords: Lunar exploration, Lunar crust, Seismic observation, Meteoroid impact, Detection of impact flash, Design of seismic network

PPS024-40

会場:103

時間:5月23日 18:15-18:30

ペネトレータの技術開発の成果と将来月探査計画への適用 Technical readiness of lunar penetrator and its application to future lunar exploration

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

Hiroaki Shiraishi^{1*}, Satoshi Tanaka¹, Naoki Kobayashi¹, Hideki Murakami², Akio Fujimura¹, Hajime Hayakawa¹

¹ 宇宙航空研究開発機構宇宙科学研究所, ² 高知大学

¹ ISAS/JAXA, ² Kochi University

1990年に開始された旧 LUNAR-A 計画は、「ペネトレータ」と呼ばれる硬着陸型貫入プローブを月面の表裏に設置し、内部に搭載した地震計と熱流量計により月内部の構造を調べる月内部構造探査を目的としたミッションであった。月探査用ペネトレータは、全長約 76cm、最大直径約 14cm、重量約 14kg の槍型の観測プローブである。その最先端はチタン合金製、主構体は炭素繊維強化プラスチック (CFRP) 製であり、後端に配されたアンテナ部はガラス繊維強化プラスチック (GFRP) 製でアンテナ素子が GFRP 成型部に埋め込まれている。構体内部には、科学観測機器として地震計 2 成分と熱流量計のほか、加速度計・傾斜計・地震計シンバル機構・計測回路・データ処理回路・UHF 系通信機器・塩化チオニルリチウム電池が搭載される。また、月面に秒速約 300m/sec の高速度で突入する際の貫入衝撃からこれらの搭載機器を保護するために可動部分を除く空隙を高強度エポキシ樹脂とガラスマイクロバルーンを混合したポッティング剤で充填モールドしている。これまで射出貫入試験を主体とした搭載機器と耐衝撃性実装技術の開発が行われてきたが、ペネトレータに関わる技術的問題の発生により不具合対策と改修作業を 2010 年度まで継続してきたところである。

2004 年 1 月に宇宙科学研究所本部 (ISAS) における「技術評価委員会」、同年 7 月の科学衛星独立評価チームによる「プロジェクト総点検」、同年 11 月に宇宙航空研究開発機構 (JAXA) 経営企画部による「ペネトレータ開発に関する技術確認会」がそれぞれ実施され、主として技術的側面からの評価が行われた。また、同年 8 月から 9 月にかけて外部の専門家による「計画検討委員会」が実施され、計画遂行や経営的側面からの評価が行われた。これらの各評価委員会からの主要な提言をまとめると、

(1) LUNAR-A 計画の科学目標はいまだにその重要性を低下させていることはなく、将来の固体惑星探査においてもペネトレータ技術の確立は世界に先駆けた重要な探査手段を提供することができる。

(2) ペネトレータ開発の主要課題である搭載機器の耐衝撃性確立については目処がつつつつあるが、一部の機器に要対策事項が存在していることから衛星開発を一時中断し、「ペネトレータ技術の完成」を優先して開発研究を継続すべきである。

との勧告が行われた。そのため、ペネトレータについてはさらなる改良を加えることで信頼性・ロバスト性を向上させた機能確認モデルおよび実機相当モデルを製作して、実フライト時よりも過酷な QT(認定試験) 条件での貫入試験を 2005 年以降、計 4 回シリーズにわたって行ってきた。最終的には、2010 年 8 月から 9 月にかけて実施した熱構造モデルに対する射出貫入試験と低温熱応力試験の結果によって月探査用ペネトレータに対する技術確立に一応の目途をつけるに至った。また、現行ペネトレータに関する残存課題の克服と平行して、(a) 開発技術の継承、(b) 信頼性向上、(c) 製造期間の短縮化・低コスト化、などを目的としたペネトレータ技術の開発課題を設定し、その一部については部分要素モデルを試作しての熱応力試験や貫入試験によって検証を重ねてきたところである。2004 年以降の詳しい経緯については、文部科学省宇宙開発委員会推進部会への報告書 (平成 19 年 1 月) を参照されたい。

LUNAR-A 計画自体は 2007 年に中止となったが、これまで開発してきたペネトレータ技術を月惑星探査ミッションにおいて飛翔実証すべく、SELENE 後継機での利用や国際協力の枠組みでの搭載可能性について模索を続けてきた。その中で最も具体的な検討を行ってきたのが、ロシアが 2010 年代に予定している月探査シリーズ「Luna-Glob」計画への適用である。当初の検討案では、LUNAR-A ミッション用とほぼ同一仕様のペネトレータ 4 機をロシア側が担当する周回衛星に搭載することを想定しており、軟着陸機を含めた長期ネットワーク観測によって月内部構造の解明に大きな貢献が期待できるものと考えられた。2007 年以降、ロシア側との間で開発分担や最も重要なインターフェース部分となる周回衛星 - ペネトレータ間の通信システムおよび新規開発要素となる切り離し機構を中心に技術検討を重ねてきた経緯についても報告する。