

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

¹ 宇宙航空研究開発機構, ² 早稲田大学, ³ 放射線医学総合研究所

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

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

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

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

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

キーワード: SELENE-2, 月探査, ガンマ線分光計

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

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

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

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

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

¹ 宇宙航空研究開発機構

¹Japan Aerospace Exploration Agency

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

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

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

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

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

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

キーワード: SELENE-2, 熱設計, 越夜, 月面

Keywords: SELENE-2, thermal design, Moon

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

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

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

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

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

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

キーワード: セレーネ 2, 内部構造, 超長基線電波干渉計

Keywords: selene2, internal structure, VLBI

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

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

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

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

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

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

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

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

Keywords: electromagnetic sounding, lunar interior, SELENE-2

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

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

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

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

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

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

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

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

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

キーワード: 月, 月震, 内部構造, 広帯域地震計

Keywords: moon, moonquake, internal structure, broadband seismometer

3軸姿勢制御衛星用ペネトレータ分離機構の開発

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

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

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

¹ 宇宙航空研究開発機構, ² 高知大学理学部応用理学科

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

キーワード: 月回転, 望遠鏡, 写真天頂筒, 物理ひょう動, 内部構造

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

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

岩田 隆浩^{1*}, 加藤 學¹, 田中 智¹, 岡田 達明¹

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

¹JAXA 宇宙科学研究所

¹ISAS/JAXA

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

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

キーワード: 月, SELENE-3, サンプルリターン

Keywords: Moon, SELENE-3, sample return

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

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

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

¹ 国立天文台

¹National Astronomical Observatory of Japan

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

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

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

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

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

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

野田 寛大^{1*}, 荒木 博志¹, 田澤 誠一¹, 石原 吉明¹

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

¹ 国立天文台

¹National Astronomical Observatory of Japan

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

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

キーワード: かぐや, レーザ高度計, LALT

Keywords: Kaguya, Laser altimeter, LALT

かぐや衛星観測データに基づいた月玄武岩層の誘電率推定

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

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

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

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

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

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

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

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

光学データを用いた晴れの海のHFレーダ反射面の同定と層構造の推定

The layered structure of lunar maria: Identification of the HF-radar reflector in Mare Serenitatis using optical images

押上 祥子^{1*}, 奥野 信也¹, 山口 靖¹, 大竹 真紀子², 春山 純一², 小林 敬生³, 熊本 篤志⁴, 小野 高幸⁴

OSHIGAMI, Shoko^{1*}, OKUNO, Shinya¹, YAMAGUCHI, Yasushi¹, OHTAKE, Makiko², HARUYAMA, Junichi², KOBAYASHI, Takao³, KUMAMOTO, Atsushi⁴, ONO, Takayuki⁴

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

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

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

キーワード: レーダサウンダ, 月の海, 層構造, クレータ内壁

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

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

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

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

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

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

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

キーワード: オリエンターレ盆地, 海の溶岩流

Keywords: Orientale Basin, Mare volcanism

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

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

¹ 会津大学

¹The University of Aizu

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

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

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

キーワード: 蛇行谷, 熱浸食, 数値計算

Keywords: Sinuous rille, thermal erosion, numerical simulation

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

有本 龍三^{1*}, 大竹真紀子², 春山純一², 岩田隆浩²

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

¹ 東京大学, ² 宇宙航空研究開発機構・宇宙科学研究所

¹The University of Tokyo, ²ISAS/JAXA

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

OHTAKE, Makiko^{1*}, TAKEDA, Hiroshi², MATSUNAGA, Tsuneo³, YOKOTA, Yasuhiro³, HARUYAMA, Junichi¹, MOROTA, Tomokatsu⁴, ISHIHARA, Yoshiaki⁵, YAMAMOTO, Satoru³, OGAWA, Yoshiko⁶, HIROI Takahiro⁷, KAROUJI, Yuzuru¹, SAIKI, Kazuto⁸

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

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

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

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

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

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

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

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

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

月 SPA 盆地の地質構造

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

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

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

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

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

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

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

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

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

キーワード: 月, サウスポールエイトケン, 盆地, 地質構造

Japan Geoscience Union Meeting 2012

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

©2012. Japan Geoscience Union. All Rights Reserved.



PPS25-P19

会場:コンベンションホール

時間:5月23日 17:15-18:30

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

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

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

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

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

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

二次クレータ検出のためのクレータの空間分布の評価

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

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

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

¹ 会津大学 コンピュータ理工学部, ² 名古屋大学大学院環境学研究科

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

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

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

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

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

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

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

¹ 東北大学惑星プラズマ・大気研究センター

¹Tohoku Univ. PPARC

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

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

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

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

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

キーワード: 月, 希薄大気, 地域依存性, ナトリウム

Keywords: Moon, Exosphere, Geological dependence, Sodium

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

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

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

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

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

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

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

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

キーワード: 太陽風, 月面, 散乱

Keywords: solar wind, lunar surface, scattering

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

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

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

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

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

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

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

キーワード: 磁気異常, イオン反射, 上流ホイッスラー波

Keywords: magnetic anomaly, reflected ions, upstream whistler waves

プラズマシート電子を用いた月磁気異常の推定

Estimates of lunar crustal magnetic field distributions using plasma sheet electrons

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

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

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

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

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

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

キーワード: 月, 磁気異常, プラズマ, かぐや

Keywords: Moon, magnetic anomaly, plasma, Kaguya