

Co-rotating Interaction Regions に伴って観測される月起源重イオン

斎藤 義文 [1]; 横田 勝一郎 [1]; 西野 真木 [2]; 綱川 秀夫 [3]
[1] 宇宙研; [2] 名大 STE 研; [3] 東工大・理・地惑

Moon originating heavy ions associated with Co-rotating Interaction Regions

Yoshifumi Saito[1]; Shoichiro Yokota[1]; Masaki N Nishino[2]; Hideo Tsunakawa[3]
[1] ISAS; [2] STEL, Nagoya University; [3] Dept. Earth Planet. Sci., Tokyo TECH

Interaction between the solar wind and a solar system object varies largely according to the object's properties, such as the existence of a global intrinsic magnetic field and/or thick atmosphere. It is well known that the Moon has neither global intrinsic magnetic field nor thick atmosphere. Different from the Earth's case where the intrinsic global magnetic field prevents the solar wind from penetrating into the magnetosphere, solar wind directly impacts the lunar surface. On the other hand, the ions generated or reflected/scattered at the lunar surface are accelerated by the solar wind convection electric field and are detected by ion detectors on the spacecraft orbiting around the Moon. MAP-PACE on Kaguya made observations of low energy charged particles around the Moon at a circular lunar polar orbit of 100km altitude for about 1 year, at ~50km-altitude for about 2months, and some orbits had further lower perilune altitude of ~10km during the last 4 months. Besides the solar wind, MAP-PACE-IMA (Moon looking ion analyzer) found four clearly distinguishable ion populations on the dayside of the Moon. 1) Solar wind protons reflected/backscattered at the lunar surface, 2) solar wind protons reflected by magnetic anomalies on the lunar surface, 3) reflected/backscattered protons picked-up by the solar wind, and 4) ions originating from the lunar surface/lunar exosphere. One of the dayside plasma populations 4) consisted of heavy ions such as C⁺, O⁺, Na⁺, and K⁺. These heavy ions were accelerated by the solar wind convection electric field and detected by the ion energy mass spectrometer MAP-PACE-IMA on Kaguya. Since the gyro-radius of these heavy ions was much larger than the Moon, the energy of these ions detected at 100km altitude was in most cases lower than the incident solar wind ion energy. Recently, two special examples were found where the energy of the heavy ions was higher than the incident solar wind ion energy. These high-energy heavy ions were observed on the dayside of the Moon when CIR (Corotating Interaction Region) passed the Moon. The high-energy heavy ions were observed for several hours with the highest heavy ion flux observed when the solar wind pressure increased due to the passage of the CIR. The mass spectrum of the heavy ions observed associated with CIR showed H⁺, He⁺⁺, He⁺, C⁺, N⁺, O⁺, Na⁺/Mg⁺, Al⁺/Si⁺, P⁺/S⁺, K⁺/Ar⁺, Ti⁺/Fe⁺. Although many observational features of the alkali ions around the Moon show that the major generation mechanism of the lunar alkali ion is photon-stimulated desorption, existence of the high-energy non-alkali heavy ions associated with CIR indicates that the contribution of the solar wind sputtering becomes important when the solar wind pressure is high.

The newly obtained knowledge about the solar wind-Moon interaction by Kaguya must contribute to the understanding of the plasma environment around non-magnetized solar system objects.

衛星観測磁場データを用いた磁気異常ソース構造の推定

横山 貴史 [1]; 高橋 太 [2]; 綱川 秀夫 [3]

[1] 東工大・理・地惑; [2] 九大・理・地惑; [3] 東工大・理・地惑

Estimation on source structure of the lunar magnetic anomalies

Takashi Yokoyama[1]; Futoshi Takahashi[2]; Hideo Tsunakawa[3]

[1] Dept. Earth Planet. Sci., Tokyo Tech; [2] Kyushu Univ.; [3] Dept. Earth Planet. Sci., Tokyo TECH

There are many magnetic anomalies on the moon, although the moon has no global magnetic field at present. Several models have been proposed for the origin of the lunar magnetic anomalies. According to the basin-forming impact model (e.g. Lin et al., 1988; Hood et al., 2001; Halekas et al., 2001; Hood and Artemieva, 2008), basin ejecta due to the impact are scattered and accumulate at the antipode of the basin to result in acquisition of shock remanent magnetization (SRM) under a transient magnetic field of the interplanetary magnetic field or the lunar dynamo field. On the other hand, the recent studies have indicated lineation patterns of the lunar magnetic anomalies and their sources of dike intrusions (e.g. Purucker et al., 2012; Tsunakawa et al., 2014). In this model, magnetization would have been acquired as thermoremanent magnetization (TRM) under the lunar dynamo field. Thus the analysis on the lunar magnetic anomalies could give crucial information on the ancient lunar dynamo and magmatic event. Assuming the configuration of magnetic anomaly source such as a dipole, a disk or a prism, magnetization direction could be estimated to examine the lunar dynamo (e.g. Nicholas et al., 2007; Hood, 2011; Takahashi et al., 2014; Arkani-Hamed and Boutin, 2014). In the present study, we have modeled several magnetic anomalies with uniformly magnetized prism(s), in which three dimensional position, size, horizontal direction and magnetization are parameterized. The observation data by Lunar Prospector and Kaguya at the low altitude have been used in the analysis. The appropriate number of prism is determined with AIC (Akaike, 1973). The results suggest that sources of magnetic anomalies may be subsurface materials like dike and sill intrusions rather than surface materials such as impact ejecta. We will also discuss vertical structures of intrusion-like bodies using multi-prism model concerning depth.

月には現在グローバルな磁場は存在しないが、アポロ計画による月リターンサンプルの岩石磁気測定やその後のルナプロスペクタ、かぐやによる極軌道観測から磁気異常が多数存在することが知られている。月磁気異常は地殻中の岩石がもつ残留磁化に起因し、磁化ソース物体や残留磁化の獲得メカニズムについてはこれまでいくつかのモデルが提案されている。代表的なものとして、巨大衝突盆地の形成時に飛び散った放出物が盆地の対蹠点や盆地から放射状に分堆積し衝突残留磁化を獲得したとする Basin-forming impact モデルがある (e.g. Lin et al., 1988; Hood et al., 2001; Halekas et al., 2001; Hood and Artemieva, 2008)。最近の説としては、線状磁気異常について、地殻に貫入したマグマが岩脈を形成し当時の月ダイナモ磁場を熱残留磁化として記録したとするモデルがある (e.g. Purucker et al., 2012; Tsunakawa et al., 2014)。これら 2 つの説に代表されるようにソースの深さ分布や形状、磁化を推定することは非常に重要である。

Basin-forming impact モデルの場合、磁気異常ソースは表面付近に分布していると考えられる。一方岩脈モデルの場合は水平方向に細長く深さ方向に厚いソースが推測される。先行研究において磁気異常のソースモデルとしてダイポールによるモデル化が行われ、月地殻内部に磁気異常ソースがあることを示唆している (e.g. Nicholas et al., 2007)。しかし、ダイポールは点状ソースであるためソースの形状や明確な情報が得られない。またプリズムモデルによる近似も行われているが、磁化方位を調べることが主眼であったため、磁化物体の構造分布について詳しく検討されていない (Takahashi et al., 2014)。また円板モデルではソースを表面に固定しているか、上面を表面に置いてあり深さ方向の自由度がない (e.g. Hood, 2011)。そこで本研究では、一様に磁化したプリズムを複数個置き磁気異常をモデル化し、統計学的に最も妥当な構造を推定した。本研究のプリズムモデルではソースの位置、磁化の大きさ・方位に加え、ソースの形状、上面・下面の深さもパラメータとして取り扱うため、表面付近のソース、地殻内部のソースも可能である。

これまでに解析を行った地域は、月表側で 6 地域 (Reiner Gamma, Rima Sirsalis, Descartes, Airy, Abel, Crisium)、月裏側で 3 地域 (Hayford, Moscoviense, Mendel-Rydberg) の計 9 地域である。解析にはルナプロスペクタ及びかぐやの低高度観測のうち、月の夜側あるいは地球磁気圏尾部内におけるデータを個別にあるいは合わせて解析した。9 地域のモデル結果から磁気異常ソースについて以下の特徴が得られた。(1) 水平方向の縦横比が 2 以上で幅が数 km の細長いソースが多い。(2) 深さ方向のサイズが 5km 以上のソースが多く得られた。(3) 表面から深くに分布し深さ方向に 1~2 km の薄いソースが分布する地域もある。これらの結果から、月の磁気異常のソースとして放出物のような隕石衝突に関わる物質よりも岩脈や岩床のような火成活動に関連する月内部起源の物質の方が妥当であると考えられる。またいくつかの地域について、1 つの磁気異常に対して深さの異なる複数のプリズムを置くことにより、より詳細な磁気異常ソースの構造についても検討した。その結果、ストック状のソースとシル状のソースなども見られ、貫入構造について新たな情報を得られる可能性がある。

今後は、South Pole-Aitken 盆地付近の複雑な磁気異常についても解析を行い、月磁気異常の起源について更なる考察を行う予定である。

Ion scale magnetospheres of small magnetized celestial bodies

Masao Nakamura[1]

[1] Dept. of Aerospace Eng., Osaka Prefect. Univ.

The interactions between high speed plasma flows and magnetized celestial bodies generate various magnetospheres. In this study, the ion scale magnetospheres of small magnetized objects with a magnetic dipole moment in the solar wind are investigated by a three-dimensional hybrid simulation, which treats the ions as kinetic super particles via particle-in-cell method and the electrons as a massless fluid. The ion scale magnetospheres are that their sizes are not less than a few and not more than a hundred times ion gyroradius of the solar wind proton in the magnetic field strength at the subsolar magnetopause boundary. Their macroscopic structures look similar to magnetohydrodynamics scale ones. However, the structures of their bow shock, dayside sheath and magnetopause boundary layer are comparable to the ion kinetic scale and mutually influence each other through ion kinetic effects. We will discuss the plasma convections, current flows, and field structures in various solar wind conditions.

太陽風プラズマと月面磁気異常の相互作用に関する3次元全粒子シミュレーション

梅澤 美佐子 [1]; 臼井 英之 [2]; 三宅 洋平 [3]; 西野 真木 [4]

[1] 神戸大・システム情報; [2] 神戸大・システム情報; [3] 神戸大学; [4] 名大 STE 研

Full Particle-In-Cell 3D simulation on the interactions between the solar wind and a lunar magnetic anomaly

Misako Umezawa[1]; Hideyuki Usui[2]; Yohei Miyake[3]; Masaki N Nishino[4]

[1] System Informatics, Kobe Univ.; [2] System informatics, Kobe Univ.; [3] Kobe Univ.; [4] STEL, Nagoya University

<http://www.lab.kobe-u.ac.jp/csi-usui/index.html>

The objective of this research is to explain the response of solar wind plasma to magnetic anomalies which is found on the lunar surface. We used the Full Particle-In-Cell simulation that treats both electrons and ions as particles. We will discuss the case of magnetic anomaly found in Reiner Gamma with the 3D plasma particle simulations.

What we found by previous 2D plasma simulations is that some of solar wind ions do not reach the lunar surface because of reflection by the local magnetic field. To simulate more realistic situation, we performed 3D plasma particle simulations using plasma simulation code EMSES.

The magnetic anomaly we focus on consists of one magnetic dipole. We define the size of magnetic anomaly L as the distance between the dipole center and a position where the solar wind pressure balance the magnetic pressure. In the lunar magnetic anomaly is that L is much larger than electron Larmor radius and smaller than that of ions. In such a meso-scale dipole field, solar wind ions and electrons react to magnetic field differently because of the finite Larmor radius effect. As a result, charge separations occurs and electrostatic field is locally created. Ions which can be assumed unmagnetized in this scale are also influenced by this electrostatic field. We focus on the dependence of the formation of a magnetosphere on L in terms of the distribution of plasma particle density, the velocity distribution and the current structure. Moreover, we will discuss the interactions between magnetic dipole and solar wind with and without the lunar surface.

本研究の目的は、月面で発見された磁気異常に対する太陽風プラズマ応答を運動論的観点から解明することである。本研究では、電子、イオンとともに粒子として扱う全粒子モデルを用い、月面の Reiner Gamma 領域での磁気異常と太陽風との相互作用に関する3次元シミュレーションを実行した。

これまで取り組んできた2次元プラズマ粒子シミュレーションによる研究では、イオンジャイロ半径がダイポール磁場領域よりも大きいにも関わらず、磁気異常に入射した太陽風が局所磁場によって反射され、月面に到達できない現象を確認することができた。一方で、観測データと比較検討するには、2次元から3次元にモデルを拡張する必要性があり、本研究では、3次元プラズマ粒子シミュレーションコード EMSES を用いた解析を行った。

我々が対象としている磁気異常は、基本、1つの磁気ダイポールからなり、その中心から磁気圧と太陽風圧力がバランスする点までの距離を磁気異常の代表長とする。月面磁気異常の特徴の1つとして、その代表長が電子のジャイロ半径よりも十分大きく、一方でイオンのジャイロ半径よりは小さいことが挙げられる。このメソスケール磁場の場合、有限ラーマ半径効果の違いにより、太陽風電子とイオンの磁場に対する応答が違ふ。このため、局所的に電荷分離を起こし、静電界が発生すると考えられる。メソスケール磁場中では、イオンの磁化が弱いにも関わらず、この静電場によって、イオンの挙動は影響を受けると考えられる。本研究では、ダイポール磁場代表長に対するイオンジャイロ半径の大きさが、磁気圏形成において、どのように影響するかという点に着目し、プラズマ粒子の密度分布や、速度分布、電流構造についての解析を行った。また、月面の有無によって、ダイポール磁場への太陽風応答がどのように変化するかについても議論する。

月ウェイク中でタイプIIプロトン侵入に伴って観測されたELF波動の発生機構について

中川 朋子 [1]; KAGUYA/MAP/LMAG Team 綱川 秀夫 [2]; 斎藤 義文 [3]
[1] 東北工大・工・情報通信; [2] -; [3] 宇宙研

Generation mechanism of ELF waves in the deepest wake associated with the type-II entry protons

Tomoko Nakagawa[1]; Tsunakawa Hideo KAGUYA/MAP/LMAG Team[2]; Yoshifumi Saito[3]
[1] Tohoku Inst. Tech.; [2] -; [3] ISAS

<http://www.ice.tohtech.ac.jp/~nakagawa/>

Magnetic fluctuations in the ELF range were observed by MAP-LMAG magnetometer onboard Kaguya in the deepest wake behind the moon associated with the type-II entry protons (Nishino et al., 2009). Most of the waves were detected on the magnetic field lines which were not connected with the lunar surface, along which the solar wind electrons were injected into the wake. Since a large cross-field velocity difference is expected between the type-II protons and the solar wind electrons injected along the magnetic field, it seems that some cross-field current driven instability such as the lower-hybrid two-stream instability is responsible for the generation of the waves.

月には地球のような大規模な磁場がないため、直接月面に衝突した太陽風プラズマはほとんどが月面で吸収され、下流にウェイクが形成されるが、かくや衛星観測によって一部のプロトンが月面及び月面の局所磁場で反射し、さらにその一部が太陽風磁場の周りをラーマー運動することによってウェイク中に到達することが発見され、タイプIIエントリープロトンと名付けられている (Nishino et al., 2009)。

このタイプIIプロトン侵入に伴って、月の真裏のウェイク中心部で1-8Hz程度の周波数範囲のELF波動がかくや衛星の磁場観測によって観測された。このELF波は磁場強度の変動を伴っており、圧縮性の波であることがわかる。明確な周波数のピークは見られていない。ELF波の観測される時間はタイプIIプロトンの継続時間より短く、衛星が月面と磁力線でつながっている時は観測されにくく(例外は15例中2例)、磁力線が月面から離れると同時にELF波が現れた例が5例あった。

磁力線が月面から離れると同時に0.1keV程度の電子が増えており、このELF波の励起にはプロトンだけでなく電子の存在が必要であることが示唆される。これらの電子は、タイプIIプロトンによる電場によって流入しており、磁力線が月面(負に帯電している)に接触するとその流入が阻害されると考えられる。タイプIIプロトンは太陽風磁場を横切る成分を持つのに対し、電子は太陽風磁場に沿って流入してくるため、プロトンと電子の間には磁場を横切るような相対速度があり、これがエネルギー源となって、変形二流体不安定などの機構によってELF波を励起していると考えられる。

月の縦孔周辺のプラズマ環境に関する粒子シミュレーション

三宅 洋平 [1]; 西野 真木 [2]
[1] 神戸大学; [2] 名大 STE 研

Particle-in-cell simulations on the plasma environment near lunar vertical holes

Yohei Miyake[1]; Masaki N Nishino[2]
[1] Kobe Univ.; [2] STEL, Nagoya University

The lunar explorer KAGUYA has discovered vertical holes in the Marius Hills, Mare Tranquillitatis, and Mare Ingenii of the Moon. The diameter and depth of the holes are both in a range of 50 through 100 m, which is comparable to or greater than the Debye lengths of the solar wind plasma and the photoelectron layer near the lunar surface. The holes are thus expected to create characteristic plasma and electrostatic environment around it. It is of practical importance to assess such a distinctive environment, reminding that it is planned to explore the lunar holes and caverns associating to the holes in near future.

In the present study, we apply our particle-in-cell simulation techniques, which have been used to study spacecraft-plasma interactions, to assessment of plasma environment around the lunar vertical holes. We have a three-dimensional computational domain including a simplified lunar hole structure and introduce a solar wind plasma inflow to the lunar surface. We also simulate the photoelectron emission from the lunar surface by taking into account the presence or absence of sunlight illumination, and its incident angle. We will report our preliminary simulation results on the spatial profiles of charge density and electric potential, and the solar wind plasma / photoelectron dynamics as a result of plasma interactions with the lunar surface. We plan to extend our research to study of dust dynamics around the lunar hole environment.

かぐや衛星による地形カメラ観測により、月のマリウス丘、静の海、賢者の海に、特徴的な縦孔構造が発見されている。縦孔のサイズは直径、深さともに、50~100 mに及び、太陽風プラズマや月表層光電子層のデバイ長と同程度あるいは十分に大きいため、その周辺では特異なプラズマ静電環境が形成されていると予想される。このような縦孔構造や地下空洞を直接探査するUZUME計画が立案されている中、将来のローバー探査への影響を知る上でも縦孔周辺プラズマ環境を事前評価することは重要である。

本研究では、これまで人工衛星・プラズマ相互作用の研究に幅広く用いられてきたプラズマ粒子シミュレーション技術を応用し、月縦孔周辺プラズマ環境の定量評価を行う。具体的には縦孔構造を模した月面を含む3次元計算空間内に上空から太陽風プラズマが様々な角度で入射する状況を想定する。また月面からは太陽光照射の有無や、その入射角度を考慮した光電子放出を模擬する。本発表では、このシミュレーションによって得られた月面周辺の電荷密度や電位の空間分布や太陽風プラズマ・光電子のダイナミクスの初期結果を紹介する。将来的には、当該シミュレーションで得られた静電および電磁環境を利用して、縦孔周辺ダスト挙動の研究に展開していきたいと考えている。

電離圏観測ロケットウェイク近傍のプラズマ波動擾乱に関する比較研究

遠藤 研 [1]; 熊本 篤志 [2]; 加藤 雄人 [1]
[1] 東北大・理・地球物理; [2] 東北大・理・地球物理

Comparison study of plasma wave disturbances around wakes of ionospheric sounding rockets

Ken Endo[1]; Atsushi Kumamoto[2]; Yuto Katoh[1]
[1] Dept. Geophys., Grad. Sch. Sci., Tohoku Univ.; [2] Dept. Geophys, Tohoku Univ.

When a body moves in plasma at supersonic velocity, a rarefied plasma region called 'plasma wake' is formed behind the body. Wakes can develop behind a solar system body immersed in solar-wind plasma as well as behind spacecraft such as satellites and ionospheric sounding rockets.

Plasma waves around the rocket wake have been suggested by the observational results from previous rocket experiments, while there are also several studies which reported plasma waves around the wakes of a satellite and of the moon. In the S-520-26 rocket experiments, carried out in Japan at dawn of January 12, 2012, three kinds of plasma waves, which show different spin-phase dependence, were identified (hereafter denoted Group-A, B, and C). We concluded that they are electrostatic electron cyclotron harmonic (ESCH) waves or upper hybrid resonance (UHR) mode waves (Group-A waves), and whistler mode waves (Group-B and Group-C waves). The Group-A and Group-B waves were observed intensively when the dipole antenna pointed in the parallel and vertical direction, respectively, relative to the motion vector of the rocket. Meanwhile, the Group-C waves were found at spin-phase angles different from them. The difference of spin-phase dependence among the three kinds of plasma waves suggests that the plasma waves are generated inhomogeneously around the wake of the rocket.

In order to clarify if the above characteristics obtained in the S-520-26 rocket experiment are universal or specific, we now analyze wave data from the S-520-23 rocket experiment, which was performed in Japan at dusk of September 2, 2007. The apexes of the two rocket trajectories are nearly the same; they are 298 km and 279 km in the S-520-26 and S-520-23 rocket experiments, respectively. The f_p/f_{ce} ratios of the ambient plasma, however, are different; they are 2.2 and 4.7 at the apexes in the former and latter case, respectively. Here, f_p is the plasma frequency and f_{ce} is the electron cyclotron frequency.

As a result, it is found that Group-A waves were also observed in the S-520-23 rocket experiment and that the frequency range is 3.4-4.5 MHz ($3.1f_{ce}$ - $4.1f_{ce}$) at around the apex. The wave frequencies are higher than those obtained at the apex of the S-520-26 rocket trajectory, which are from 1.6 MHz ($1.4f_{ce}$) to 2.4 MHz ($2.2f_{ce}$). This result suggests that there is a good correlation between the frequency range of Group-A waves and the plasma frequency. In addition, the intensity of the Group-A waves varies with rocket spin also in the S-520-23 rocket experiment. Waves changing their intensity periodically can be found in a frequency range below the electron cyclotron frequency. However, their structures in the spectrogram are different from those of the Group-B and Group-C waves observed in the S-520-26 rocket experiment; the waves obtained in the S-520-23 rocket experiment consist of several narrow-band emissions, while those measured in the S-520-26 rocket are broad-band emissions.

In this presentation, we show the observational results of plasma waves from the S-520-26 and S-520-23 rocket experiments, comparing their characteristics with each other. In addition, we clarify the similarities and differences in their wave modes and in their spin-phase dependence, and discuss the generation mechanisms of the observed plasma waves.

プラズマ中を超音速で運動する物体の後方にはウェイクと呼ばれるプラズマの希薄な領域が形成される。ウェイクは観測ロケットや人工衛星など飛翔体の後方に生じる他、太陽風プラズマと天体の相互作用によっても作られることが知られている。

人工衛星や月のウェイク近傍ではプラズマ波動の観測例があるが、ロケットのウェイク近傍でもプラズマ波動の励起を示唆する結果が近年のロケット観測により得られている。2012年1月12日の明け方に鹿児島で行われたS-520-26ロケット実験では、スピン位相角依存性の相違から3種類のプラズマ波動が確認されている(それぞれGroup A, B, Cと呼ぶ)。観測された波動は、その周波数から、静電的電子サイクロトロン高調波(ESCH)及びUHRモード波動(Group-A)、ホイッスラーモード波動(Group-B, C)であると結論された。Group-A, Bの波動は、ダイポールアンテナがロケットの進行方向に対しそれぞれおよそ平行、垂直な向きに向いた時に強く観測されていたのに対し、Group-Cの波動はそれらとは別の限られたスピン位相角で観測されていた。これらの波動がそれぞれ異なるスピン位相角依存性をもつことは、プラズマ波動がロケット周囲に空間非一様に励起・成長していたことを示唆している。

我々は、これらのS-520-26ロケット実験の結果の普遍性・特異性を明らかにするため、2007年9月2日の夕刻に鹿児島で行われたS-520-23ロケット実験の波動観測結果に対してもS-520-26と同様の解析を行い、その結果の対比を行った。S-520-26、S-520-23ロケットの到達高度はそれぞれ298 km、279 kmと類似しているが、最高点付近における背景プラズマの f_p/f_{ce} はそれぞれ $f_p/f_{ce}=2.2$ 、 $f_p/f_{ce}=4.7$ と大きく異なっている。ここで、 f_p はプラズマ周波数、 f_{ce} は電子サイクロトロン周波数である。

解析の結果、S-520-23ロケット実験でもGroup-Aの波動が観測されており、その周波数帯は最高点付近で3.4-4.5 MHz ($3.1f_{ce}$ - $4.1f_{ce}$)であることが分かった。これはS-520-26ロケット実験において最高点付近で観測されたGroup-Aの波動の周波数帯1.6-2.4 MHz ($1.4f_{ce}$ - $2.2f_{ce}$)を上回っている。このことは、Group-Aの波動の周波数が、その場のプラズマ周波

数に相関して変化することを示唆している。また、S-520-23 ロケット実験でも、この波動の強度はスピンの依存すると考えられる周期的変動を示している。同様に強度変動を示す波動は、電子サイクロトロン周波数以下でも観測されている。しかし、それらはS-520-26 ロケット実験で観測された Group-B、C の波動とはスペクトル構造が異なり、より狭帯域かつ複数の周波数からなる波動である。

本発表では、S-520-26 及び S-520-23 ロケット実験で観測されたプラズマ波動の特徴を比較しながら示し、波動のモードやスピン位相角依存性について共通点ならびに相違点を明らかにするとともに、それらの波動励起過程について議論する。

地球磁気圏内における月アルカリ大気の変動

横田 勝一郎 [1]; 齋藤 義文 [1]; 西野 真木 [2]; 綱川 秀夫 [3]
[1] 宇宙研; [2] 名大 STE 研; [3] 東工大・理・地惑

Lunar alkali exosphere in the Earth's magnetosphere

Shoichiro Yokota[1]; Yoshifumi Saito[1]; Masaki N Nishino[2]; Hideo Tsunakawa[3]
[1] ISAS; [2] STEL, Nagoya University; [3] Dept. Earth Planet. Sci., Tokyo TECH

The Moon has no global intrinsic magnetic field and only has a very thin atmosphere called surface-bounded exosphere. Some ground-based measurements have revealed the structure of the lunar exosphere since the discovery. The alkali components such as Na or K have especially been observed to understand the generation process and the transport mechanisms.

KAGUYA is a Japanese lunar orbiter which was launched on 14 September 2007 in Japan. MAP is one of the scientific instruments onboard KAGUYA. MAP consists of LMAG (Lunar MAGnetometer) and PACE. PACE consists of two electron sensors and two ion sensors. One of the ion sensors is equipped with a mass analyzer. KAGUYA observation as well as the previous ground-based measurements and laboratory experiments have confirmed that the alkali exospheric components are produced by ion-induced desorption (sputtering), photon-stimulated desorption (PSD), meteorite-induced vaporization and/or thermal desorption from the surface. It is suggested that the dominant source mechanism is PSD and that the solar wind is not indispensable. Moreover, the KAGUYA observation shows the dependence on the solar zenith angle and the dawn-dusk asymmetry of the lunar exosphere.

Although the ions from the Moon are detected by KAGUYA in the Earth's lobe region, the number of the ion gradually decreases to 50%. After the Moon goes out of the Earth's magnetosphere, the number recovers to nearly the same value as before coming into the Earth's magnetosphere. The observation results suggest that the solar wind ions support the emission of the exospheric particles from the lunar soil. The solar wind supporting mechanism is called solar wind gardening effect. Here we show the variation of the number of the ions from the Moon especially when passing through the Earth's magnetosphere and discuss the solar wind gardening effect.

月は大規模な磁場や厚い大気有しない天体であるが、地表面を境界とするアルカリの外気圏を保持することが知られている。これまで主に地上からの光学観測によってその構造などが明らかにされてきた。特に地上観測から観測しやすいナトリウムやカリウムが盛んに観測されていて、その生成や消失機構が議論されてきた。日本の月探査衛星「かぐや」は2007年9月に打ち上げられ、以後およそ一年半にわたって月周回軌道上で科学観測を行った。その中の一つの観測器MAPは磁力計LMAGとプラズマ計測器PACEで構成されていて、うちPACEにはイオン種を同定する質量分析器IMAが含まれている。IMAも月周回軌道上でアルカリ粒子を観測し、月外気圏の構造や生成・消失機構について有益な観測データを得てきた。「かぐや」による観測は地上観測の結果を支持する観測データを得ると同時に、月外気圏の朝夕非対称という新たな特徴も発見した。

「かぐや」の観測は月が地球磁気圏にある時も継続的に行われていて、月外気圏が地球磁気圏内でも存在することを確実なものとした。この結果は月外気圏生成に対して太陽風よりも太陽光の貢献が大きいことを示している。今回の我々の解析では、月が地球磁気圏を通過する際に月外気圏の度は次第に減少し、地球磁気圏を脱出した際は急に侵入前の量に戻ることを明らかにした。この結果は、太陽風も月アルカリ大気の生成に対して補助的な役割をしていることを示している。本発表ではこれら「かぐや」の観測結果を示すとともに、月生成機構に対する太陽風の寄与について議論する。

Electrons on closed field lines of lunar crustal fields in the solar wind wake

Masaki N Nishino[1]; Yoshifumi Saito[2]; Hideo Tsunakawa[3]; Futoshi Takahashi[4]; Masaki Fujimoto[5]; Shoichiro Yokota[2]; Yuki Harada[6]; Masaki Matsushima[7]; Hidetoshi Shibuya[8]; Hisayoshi Shimizu[9]

[1] STEL, Nagoya University; [2] ISAS; [3] Dept. Earth Planet. Sci., Tokyo TECH; [4] Kyushu Univ.; [5] ISAS, JAXA; [6] Dept. of Geophys., Kyoto Univ.; [7] Dept Earth & Planetary Sciences, Tokyo Tech; [8] Dep't Earth & Env., Kumamoto Univ.; [9] ERI, University of Tokyo

Plasma signature around crustal magnetic fields is one of the most important topics of the lunar plasma sciences. Although recent spacecraft measurements are revealing solar-wind interaction with the lunar crustal fields on the dayside, plasma signatures around crustal fields on the night side have not been fully studied yet. Here we show evidence of plasma trapping on the closed field lines of the lunar crustal fields in the solar-wind wake, using SELENE (Kaguya) plasma and magnetic field data obtained at 14-15 km altitude from the lunar surface. In contrast to expectation on plasma cavity formation at the strong crustal fields, electron flux is enhanced over Crisium Antipode (CA) anomaly which is one of the strongest lunar crustal fields. The enhanced electron fluxes over the CA anomaly are characterised by (1) occasional bi-directional field-aligned beams in the lower energy range (< 150 eV) and (2) a medium energy component (150-300 eV) that has a double loss-cone distribution that represents bounce motion between the two footprints of the crustal magnetic fields. The low-energy electrons on the closed field lines may come from the lunar night side surface, while supply mechanism of medium-energy electrons on the closed field line remains to be solved. We also report that a density cavity in the wake is observed not above the strongest magnetic field but in its vicinity.

月周辺で観測される広帯域磁場擾乱の観測条件と生成過程について

津川 靖基 [1]; 加藤 雄人 [1]; 寺田 直樹 [2]; 綱川 秀夫 [3]; 高橋 太 [4]; 渋谷 秀敏 [5]; 清水 久芳 [6]; 松島 政貴 [7]; 齋藤 義文 [8]; 横田 勝一郎 [8]; 西野 真木 [9]

[1] 東北大・理・地球物理; [2] 東北大・理・地物; [3] 東工大・理・地惑; [4] 九大・理・地惑; [5] 熊大・自然・地球; [6] 東大・地震研; [7] 東工大・地惑; [8] 宇宙研; [9] 名大 STE 研

Conditions to observe broadband magnetic fluctuations near the Moon and their generation processes

Yasunori Tsugawa[1]; Yuto Katoh[1]; Naoki Terada[2]; Hideo Tsunakawa[3]; Futoshi Takahashi[4]; Hidetoshi Shibuya[5]; Hisayoshi Shimizu[6]; Masaki Matsushima[7]; Yoshifumi Saito[8]; Shoichiro Yokota[8]; Masaki N Nishino[9]

[1] Dept. Geophys., Grad. Sch. Sci., Tohoku Univ.; [2] Dept. Geophys., Grad. Sch. Sci., Tohoku Univ.; [3] Dept. Earth Planet. Sci., Tokyo TECH; [4] Kyushu Univ.; [5] Dep't Earth & Env., Kumamoto Univ.; [6] ERI, University of Tokyo; [7] Dept Earth & Planetary Sciences, Tokyo Tech; [8] ISAS; [9] STEL, Nagoya University

Broadband magnetic fluctuations in the frequency range up to ~ 10 Hz have been reported near the Moon. Halekas et al. [2008] pointed out a close association of the waves with electron energization near the Moon. Nakagawa et al. [2011] suggested that they are whistler-mode waves associated with scattered protons in various directions from the lunar surface. Tsugawa et al. [2012] performed statistical analyses, which indicate a clear correlation between the intense waves and the lunar crustal magnetic anomalies. However, their generation processes have not been clarified yet.

In the present study, we investigate the conditions to observe the waves, such as the solar wind parameters, ambient magnetic field direction, and velocity distributions of particles reflected from the Moon, using dataset of MAP-Kaguya in order to reveal the generation processes. The results indicate that the essential conditions to observe the waves are the connection between the Kaguya and the lunar surface by the magnetic field as well as the presence of ions considerably reflected from the Moon. The latter condition is satisfied mostly above the magnetic anomalies in a typical solar wind condition and also above unmagnetized surface under the fast and dense solar wind condition. Since the ions have no preferred direction to the magnetic field at Kaguya's position and the electrons are isotropically energized, the waves possibly propagate from altitudes lower than Kaguya's position along the magnetic field and energize the electrons. We suggest that the perpendicular component of the relative velocity between reflected ions and electrons with respect to the ambient magnetic field line drives an instability generating whistler-mode waves in the frequency range around the lower hybrid resonance frequency, which is relevant to the regime of the modified two stream instability.

かぐやLRSを用いた月表層の誘電率と電気伝導度の推定

本郷 圭悟 [1]; 藤 浩明 [2]; 熊本 篤志 [3]

[1] 京大・理; [2] 京都大学・大学院・理学・地磁気センター; [3] 東北大・理・地球物理

Estimation of the permittivity and the electrical conductivity of lunar surface from LRS data

Keigo Hongo[1]; Hiroaki Toh[2]; Atsushi Kumamoto[3]

[1] Kyoto Univ; [2] DACGSM, Kyoto Univ.; [3] Dept. Geophys, Tohoku Univ.

Lunar Radar Sounder (LRS) onboard the SELENE (KAGUYA) spacecraft is a frequency modulated continuous wave (FMCW) radar with carrier frequencies from 4 to 6 MHz and its purpose is exploring lunar subsurface structures. LRS succeeded in global sounder observations and detection of subsurface reflectors in some maria.

In order to understand the evolution of the moon, it is important to investigate lunar subsurface structures. The phase velocity of the electromagnetic wave in each medium is necessary to convert delay time of the echo into actual distance. If the subsurface permeability is equal to that in the vacuum, the phase velocity is determined by the permittivity. In the past, the permittivity was estimated from lunar sample rocks of Apollo or ALSE (Apollo Lunar Sounder Experiment) data.

On the otherhand, the electrical conductivity is useful to know the composition of the Moon. It is important for the future exploration of the satellite to establish the method of calculating the permittivity and the electrical conductivity from sounder observation data.

Loss tangent is a ratio of the conduction current to the displacement current. If loss tangent is small enough, the permittivity and the electrical conductivity inside the Moon can be estimated by comparing amplitudes and phases of the source pulses and the received echoes. However, observed data is mixed with local signal to compress the source pulse. Therefore, it is necessary to restore the original waveforms from the recorded echoes.

In order to calculate expected echoes, we assume horizontally stratified Moon and simulate the wave propagation beneath the Moon's surface. The subsurface model has the permittivity and the conductivity as parameters, and the number of subsurface layers is determined by considering existing radargrams of the LRS data. Both permittivity and conductivity are determined by comparing the calculated echoes and the restored waveforms from the observed data.

The lunar surface topography influences the simulation as well. The received echoes are originated not only from the nadir direction but also from off-nadir direction. The surface topography can cause complicated wave scattering. Therefore, lateral reflections have to be considered as the surface becomes rougher.