

将来の月周回・月面観測および開発における帯電環境計測と評価に向けて

三好 由純¹, 三宅 洋平², 原田 裕己³, 西野 真木⁴, 栗田 怜³, 笠原 慧⁵,
臼井 英之², 永松 愛子⁴, 奥村 哲平⁴, 豊田 和弘⁶, 中村 紗都子¹

2024年11月11日受領, 査読を経て2025年1月22日受理

(要旨) 宇宙空間には宇宙放射線として知られる高エネルギー荷電粒子が存在し, これらは銀河宇宙線, 太陽由来の高エネルギー粒子, 地球磁気圏の荷電粒子から成る. 地球とは異なり, 大気や磁場を持たない月は, これらの宇宙放射線に直接さらされるため, 月面活動では宇宙放射線の影響を深く理解し対策を立てることが重要である. 具体的には, 宇宙放射線による宇宙飛行士の健康や電子機器への悪影響, レゴリス帯電による問題などが挙げられる. 本論文では, これに対する理解, そして評価と予測を進めるための今後の観測やシミュレーション, 月宇宙天気研究の方向性ととも, 具体的な対策のロードマップを議論する.

1. 太陽起源放射線および地球磁気圏粒子環境の概要

宇宙空間には, 高エネルギー荷電粒子である宇宙放射線が存在する. 地球周辺の宇宙空間における宇宙放射線の起源は, 銀河宇宙線(GCR), 太陽高エネルギー粒子(SEP), そして地球磁気圏放射線帯の荷電粒子からなる(図1).

典型的には, 銀河宇宙線は数百 MeVから数 GeV, 太陽高エネルギー粒子は数 MeVから数百 MeVのエネルギーを持つ. また, 地球磁気圏の捕捉高エネルギー粒子として, 放射線帯には数百 keVから数 MeV以上のエネルギーを持つ電子, また数十 MeV以上のエネルギーを持つイオンが存在する. さらに, 地球磁気圏プラズマシートには, 数百 eVから数十 keVの電子やイオンが存在する.

月は, その公転運動において, 約20日間を惑星間

空間, 約7日間を地球磁気圏のプラズマシート, 磁気圏シース, 磁気圏尾部ロープ等の領域を通過する. 電子放射線環境に関して, 前者の期間は, 太陽風中の数十 eVから数 keVの電子, また太陽フレアに伴う太陽高エネルギー粒子中の数百 keVから数 MeV以上の電子の影響を強く受ける. 一方, 後者の期間であればプラズマシート中の数百 eVから数十 keVの電子の影響が大きくなる.

月は, 固有の大気や磁場を持たない天体であるため, 地球とは異なり上記の宇宙放射線に直接さらされる環境となる. したがって, 将来の月面活動において, 宇宙放射線の影響を避けることはできず, 空間分布や時間変動の把握と理解, そして変動の予測や放射線に関するリスクアセスメントは最重要課題である.

月面活動における宇宙放射線の影響は, 主に次のようなものがあげられる.

(a) 宇宙飛行士の健康への影響: 月および月周辺において探査・活動を行う宇宙飛行士は, 長期間にわたって宇宙放射線にさらされるため, 特に高エネルギーイオンによる被ばくに関する健康問題が発生する可能性がある.

(b) 衛星や構造物, 電子機器の故障: 宇宙放射線

1.名古屋大学

2.神戸大学

3.京都大学

4.JAXA

5.東京大学

6.九州工業大学

miyoshi@isee.nagoya-u.ac.jp



図1: 月面における宇宙放射線環境.

は、Single Event Upsetなどにより電子機器の誤作動を起こす可能性がある。さらに、深部・表面帯電を引き起こすことで衛星搭載の電子機器を損傷させる可能性がある。また月面のレゴリス帯電を含めて、構造物やローバー等の帯電を引き起こし、有人・無人の活動に様々な影響を及ぼす。

本研究グループ(月面静電気・放射線調査チーム: Lunar Electrostatic & Radiation Investigation Team (LERIT))は、この課題に対して、計測機器の開発やシミュレーションを通して取り組んできている。

本稿では、特に上記の(b)に関連した電子が引き起こす月面での帯電に関して、月面帯電環境に関する概説、さらに今後の観測やシミュレーション研究の方向性について議論していく。

2. 月面静電環境

2.1 帯電現象

固有磁場や大気を有しない月面には、宇宙空間から飛来した宇宙放射線が直接衝突する。月面に衝突したプラズマ粒子は、ごく一部が散乱されるものの、その電荷のほとんどは固体表面に取り込まれ

る。この結果、月面のレゴリスは帯電し、その表面電位は一般に宇宙空間の無限遠の電位とは異なる値をとる[1]。これは月面と宇宙空間の間に静電場が生じることと言い換えることも可能である。これが本稿で議論する月面の帯電現象である。

月面帯電現象は、本質的には固体表面と宇宙プラズマ環境間の電荷輸送過程であり、宇宙空間における人工衛星帯電[2]と同様の物理現象である。月面と宇宙プラズマ環境間の電荷輸送効率、すなわち電流の大きさは、プラズマ環境条件と月面電位の双方に依存する。帯電した月面の近傍に生じる静電場は、周囲のプラズマ荷電粒子をその電荷符号に応じて誘引もしくは排斥する。これは月面に流入する電流量が月面電位の関数となっていることを意味する。環境と月面間の電荷輸送とそれに伴う月面電位の時間変化は、月面に対する正味の電流値が0となる平衡状態に達するまで進行する。帯電平衡状態に至る緩和時間は、太陽風が直接照射する月面昼側で数マイクロ秒と非常に短いため、月面の帯電に言及する際は、一般的にはこの平衡状態の電位値を指す。

月面は月の昼側では正に、夜側では負に帯電することが知られている[1]。この性質をプラズマ中の物

体の帯電の知見から説明すると以下の通りとなる。有限温度プラズマ中の荷電粒子フラックスは、一般に電子がイオンより大きいため、物体表面からの電子放出が無視できる場合、プラズマ中の物体は負に帯電する。これとは対照的に、光電子放出などの電子放出過程が支配的な電流項となる状況では物体は正に帯電する[3]。この一般的な図式は、太陽風や地球磁気圏のプラズマに曝された月に対しても当てはまり、太陽紫外線が照射される月昼側は数V～数十Vの正電位が形成されている[4,5]。この正電位は太陽光照射フラックスが最大となる太陽直下点で最大の値をとり、太陽天頂角が大きくなるにつれて、その電位は低下する。太陽風条件下を想定した過去の見積もりでは、天頂角 80度前後でプラズマ電子電流が光電子電流を上回り、月面電位は負に遷移する[6]。月の夜側は光電効果が作用しないため、月面電位は基本的に負の値を持つ。特に太陽風中における夜側月面電位は、後述するプラズマ航跡の物理と深く関わっており、これまでの観測では-100 Vオーダーの負電位が観測されている[7]。

2.2 月面帯電の非一様性

月面と人工衛星の帯電現象の大きな違いを生む要因の一つに、表面を覆うレゴリスの導電性の低さが挙げられる。人工衛星の設計においては、放電につながる差動帯電を抑制するために良導電性の表面素材が用いられている[8]。これに対して月面を覆うレゴリス粒子の導電率は非常に低いため、概ね絶縁表面と見なすことができる(註1)[9,10]。このため、月面上の電流平衡は各々の地点において成立する。結果として月面電位は、場所により異なる値をとり得る(非一様性)。前節で述べた月の昼夜における月面電位の差異も、この絶縁性に起因している。

月面帯電状態の非一様性を生み出す主要因は、第一には光電効果を生む要因である太陽光照射の有無であり、第二には月面上の各地点に対してプラズマ粒子がどのようにアクセスしやすいかを指し示す「近接性(accessibility)」の差である。一つ目の

太陽光照射条件に関して、様々な空間サイズの月面凹凸は各部に日向と日陰を作り出し、隣接する正帯電と負帯電領域を形成する。二つ目の近接性の差は、月面やその凹凸でプラズマの流れが阻害されることによって生じる。その代表例として、障害物(今回の場合は月)による太陽風イオン流の阻害は航跡(wake)を形成する。その内部はイオンが欠乏し、電子密度が相対的に卓越した領域となる。すなわち月の夜側や日陰部の表面には、イオンが極端に届きにくい(近接しにくい)。この航跡は、全球スケールでは月の夜側(月そのものによる陰影)[11]、地形スケールでは月極域のクレーター内部に形成されること[12,13]が既に指摘されているが、原理上は月縦孔の内部[14]や、ボルダー[15]、月面の凹凸[16]、さらには人工構造物の陰などにも広く存在する。

次に電子の流れの阻害について考える。電子は太陽風中であっても熱的な運動が主であり、また磁場の作用により旋回運動を行っているため、月面や構造物による阻害の効果は複雑である[17]。一般的には四方を固体壁で囲まれた半閉空間内で電子は速やかに壁に捕捉され、深い孔や窪みの底には到達しにくい傾向がある[18]、しかし多様な表面形状による阻害の効果と、その結果として形作られる月面帯電分布については未解明の部分が多く、詳細な検討がなされるべき課題である。

また、荷電粒子の近接性を検討する上で、月の地殻磁場も重要な要素である。一般に電子の旋回半径はイオンのそれに比べて非常に小さい。このため、宇宙空間から磁気異常など、比較的高強度の地殻磁場領域に降り注ぐ電子は、磁氣的に遮蔽されて月面に到達しにくいのに対し、イオンは、その軌道が偏向するものの、相対的に月面に届きやすい状況にある。このように電子・イオンに対し、差動的に作用する遮蔽効果により、磁気異常直下の月面帯電状況は、非磁化領域とは大きく異なることが示唆されている[19,20]。

ここまで月面帯電の非一様性が生じる要因について見てきたが、非一様性を緩和する作用についても触れておく。月表層の沿面電流は、月面上の電位差を緩和する効果を持つ。月沿面電流を形成する要因として、光電子や二次電子を始めとする月面放出電子が挙げられる。正に帯電した月昼側表面から放出

註1: ただし月レゴリス粒子が絶縁性表面と見なせるかどうかは、周囲のプラズマ荷電粒子密度との関係性によって判断されるべきである。例えばレゴリス粒子の隙間には荷電粒子が届きにくいいため、レゴリス表面の導電電流が相対的に無視できない状況となる。

された放出電子の大部分は、月面上の上向き電場により直ちに下方に引き戻され、月面に再吸収される。しかし、月面上に電位差が存在した場合、放出電子はわずかに沿面方向にも移動し、放出地点とは異なる地点で再吸収される。これは、月面上の2点間に電流ブリッジが形成されることと等価である。多数の放出電子により電流ブリッジが形成されることで、電位差を緩和するような正味の沿面電流が形成されることになる。こうした電流層は固体天体上の電子シース内で形成されるため、天体から十分に離れた上空から見た場合には、月面の等価導電率に置き換えて評価することが妥当となる[21]。

上記に述べた非一様性は、帯電物理上の興味に留まらず、それ自身が実際上の重要性を持つ。異なる地点に電位差が生じる際に、その間には静電場が生じる。宇宙機の障害につながる放電現象や、月面上の帯電レゴリスを直接駆動し得るのは、この静電場である。すなわち表面が帯電していることそのものではなく、「非一様に帯電していること」こそが、様々な問題を引き起こすと考えられる。帯電の非一様性もしくは電位差が問題の根本であるという事実は、人工衛星の帯電制御設計の分野では広く認識されていることである[8]が、月の帯電環境を議論する際にも改めて確認しておく必要がある。

2.3 月面電位の観測結果

月面と周辺プラズマ間の、あるいは月面上二地点間の電位差をプローブ等により直接計測した観測は、著者らの知る限り、これまで行われていない。一方、静電場により加減速される荷電粒子の特性を利用し、月面上および周回軌道からの粒子計測から、月面電位を間接的に推定する手法が複数提案され、実際の観測に適用されてきた。これまで用いられてきた月面電位推定手法と主な観測結果を以下に列挙する。

2.3(1) 月面光電子の月面上観測による正の月面電位推定:

アポロ14号によって月面に設置された荷電粒子計測器CPLEEは、月が地球磁気圏尾部内に位置する時に、最大200 eVまでの下向き電子フラックスを観測した[22]。これらの電子は、皆既月食時には完全

に消失したことから、太陽放射が生成源である、すなわち光電子であることが示唆され、さらに計測器の設置状況と計測された電子フラックスの等方性から、正の月面電位によって引き戻された月面起源の光電子を観測したと結論付けられた[23]。この解釈が正しければ、月が地球磁気圏尾部ローブに位置する場合には、昼側月面が+200 Vに帯電することを意味する。これは単純な電流平衡から予測される電位(通常は高々+数10 V程度[1])よりも一桁程度大きい。[24]はアポロ14号地点の地殻起源の磁場(CPLEE設置地点で75 nT程度と推測)によって、入射イオンと入射電子が電荷分離して形成される追加の電位構造を考慮することで、+100 V超の大きな電位差を説明できると提唱した。また、月が地球磁気圏のプラズマシートに入った際には、数百eV程度の高エネルギー電子の流入に伴って月面電位が減少する事例も観測されている[22,23]。

2.3(2) 月希薄電離圏イオンの月面上観測による月面電位推定:

アポロ14・15号によって月面に設置されたイオン計測器SIDEは、太陽風または地球磁気圏のマグネトシース中、月昼側において約+10 V、昼夜境界付近で-10 Vから-100 Vの月面電位を計測した[4,7,25]。磁気圏尾部中の月昼側においても、+10 V以上の月面電位が観測された[5]。SIDEによる月面電位の測定原理は、以下の通りである。SIDEは月面に接地された電極と45 cmの高さに位置するイオン分析器開口部グリッドの間に電圧を印加・掃引する。ここで月面電位と開口部印加電圧の和が負となる場合、周辺の月希薄電離圏から熱的重イオンが加速されて開口部に誘引される。開口部から測器内に引き込まれたイオンをエネルギー分析して検出することで、印加電圧と検出されたイオンのエネルギーから月面電位を推定する、という手法である。例えば、開口部グリッドの印加電圧が-27 Vの時に17 eVのイオンが検出された場合には、月面電位は+10 Vであると推定できる。ただし、ここで推定されているのは高さ45 cmの開口部位置のプラズマに対する月面電位であって、より高高度の電位構造(例えば、月地殻磁場による電荷分離電場)は含まれていないことに注意が必要である[24]。SIDEデータは近年になって再び解

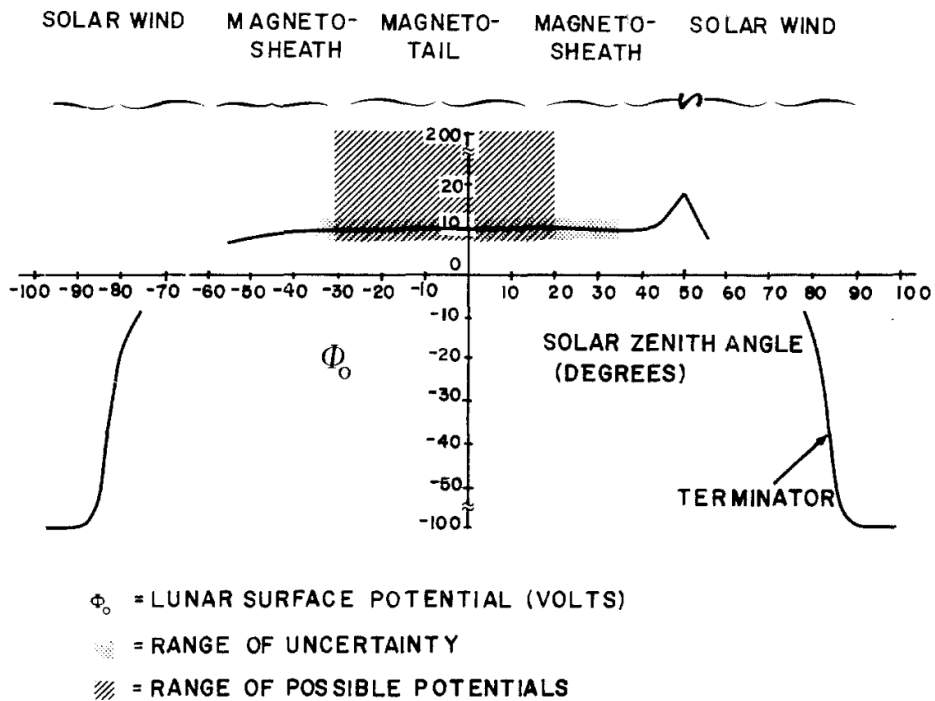


Fig. 5. The measured lunar surface potential, ϕ_0 , as a function of solar zenith angle.

図2: アポロ着陸地点で計測された月面電位の太陽天頂角依存性(Freeman and Ibrahim (1975) [5] 図5より引用)。

析され、地球フォアショック通過時の月面電位変化や、地球磁気圏尾部の昼側月面上空における非単調電位高度分布が見出された[26,27]。

2.3(3) 反射電子および上昇電子ビームの周回機観測による負の月面電位推定:

ルナ・プロスペクター、かぐや、THEMIS-ARTEMISといった月周回機によって、(a)エネルギー依存した電子欠損分布および(b)磁力線に沿って上昇する狭エネルギー帯の電子ビームが観測された[17,28-38]。これらの観測は、負の月面電位によって(a)低エネルギーの入射電子が静電的に反射される効果と(b)月面から放出された数eV程度の冷たい二次電子・光電子が上向きに加速される効果で説明される[28]。特筆すべきは、地球磁気圏尾部中においては、単純な電流平衡を考えると正の電位が予想される昼側月面からも、負の月面電位を示す上昇電子ビームが観測されていることであり、これは昼側

月面上空で非単調な電位高度分布が形成されているためであると解釈されている[29,31,33,35,36]。また、太陽高エネルギー粒子(SEP)や地球フォアショックの逆流イオン到来時の月面電位変化が報告されており[30-32,38]、月面電位の大きな変動性を示している。

2.3(4) 上向き加速・反射イオンの周回機観測による正の月面電位推定:

かぐや、およびTHEMIS-ARTEMISによる月周回軌道からのイオン観測では、地球磁気圏尾部ローブ中で、正の昼側月面電位によって加速または反射された月起源重イオン[39-42]および地球磁気圏イオン[43]が検出された。取得されたイオンのエネルギー・ピッチ角分布を解析することで、+数10 Vから+100 V程度の月面電位が推定された。

2.3(5) 月面散乱高速中性粒子の周回機観測によ

表1: 異なる状況下で観測された月面電位.

月の背景プラズマ環境・ 月面の日照条件	観測された典型的な月面電位 (変動範囲)	参考文献
太陽風・昼側	+10 V程度 (0 V から +150 V)	Freeman et al. (1973) [4], Freeman and Ibrahim (1975) [5], Collier et al. (2011) [26], Futaana et al. (2013) [19], Vorburget et al. (2016) [46]
太陽風・ 夜側 (昼夜境界を含む)	-100 V程度 (-数100 V から 0 V)	Lindeman et al. (1973) [25], Freeman and Ibrahim (1975) [5], Benson (1977) [7], Halekas et al. (2002 [28], 2008 [31]), Nishino et al. (2017) [38]
太陽風 (SEPイベント時)・ 夜側	-1 kV程度 (-4.5 kV から -500 V)	Halekas et al. (2007 [30], 2008 [31], 2009 [32])
地球磁気圏尾部ロープ・昼側	+数10 V程度 (-60 V から +200 V)	Reasoner and Burke (1972 [22], 1973 [23]), Burke et al. (1975) [24], Freeman and Ibrahim (1975) [5], Tanaka et al. (2009) [39], Halekas et al. (2011) [33], Poppe et al. (2012 [36], 2013 [42]), Harada et al. (2013 [40], 2017 [43])
地球磁気圏尾部ロープ・夜側	-100 V程度 (-150 V から -数10 V)	Halekas et al. (2008) [31], Harada et al. (2012) [17], Saito et al. (2014) [37]
地球磁気圏尾部 プラズマシート・昼側	+数10 V程度 (-1 kV から +80 V)	Reasoner and Burke (1972 [22], 1973 [23]), Burke et al. (1975) [24], Freeman and Ibrahim (1975) [5], Halekas et al. (2005 [29], 2011 [33], 2012 [34]), Poppe et al. (2011 [35], 2012 [36]), Harada et al. (2012) [17], Collier et al. (2017) [27]
地球磁気圏尾部 プラズマシート・夜側	-1 kV程度 (-2 kV から -数100 V)	Halekas et al. (2005 [29], 2008 [31]), Harada et al. (2012) [17], Saito et al. (2014) [37]

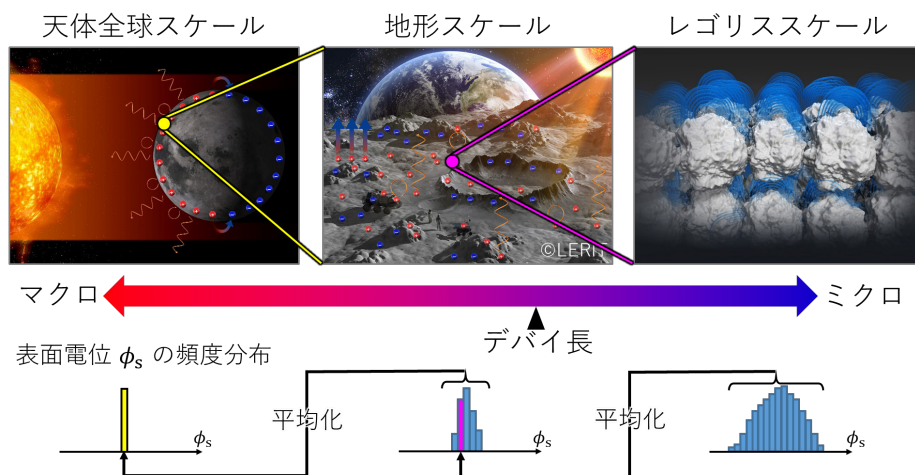


図3: 月面の帯電構造に見られる空間階層性.

る月面電位推定:

月周回機チャンドラヤーン1号に搭載された高速中性粒子(Energetic Neutral Atom, ENA)計測器CENAは、太陽風プロトンが昼側月面で中性化して散乱した中性水素原子を観測した[44]。月面散乱ENAの特性エネルギーは、入射太陽風速度と線形関係にあることが見出され[45]、この関係を用いて月周回ENA観測から月面に照射された時点での太陽風速度を推定することで、月面電位による太陽

風プロトンの速度変化の遠隔計測・イメージングが可能になることが提案されている[19]。この手法により、磁気異常領域において太陽風の減速が観測され、+135 Vの月面電位が推定された[19]ほか、太陽天頂角増加に伴う昼側月面電位の減少も示唆されている[46]。

上記の観測から、昼夜面の差といった全球的な月面電位分布、月の磁場(磁気異常)に関連する電位空間構造、月の背景プラズマ環境変動(太陽風、地球

表2: 空間スケール毎の月面帯電非一様性に関する理解の現状.

大 太陽風デバイ長 小 空間 スケール 			
	全球	地形	石、砂礫、レゴリス
昼側	※平均描像 弱正帯電 ($+10^0 \sim 10^1$ V) 電界強度： a few V/m	※日陰の形成 日向：弱正帯電 ($+10^0 \sim 10^1$ V) 日陰：負帯電 ($-10^1 \sim 10^2$ V) 電界強度： $\sim 10^0 \sim 10^1$ V/m	※日陰・近接性差*の形成 ※電位の大きさの上限について は諸説有・共通認識未達 電位差： $\sim 10^3$ V (参考値) ※正負間の距離僅少のため、 全般に強電界 電界強度： $\sim 10^5$ V/m (参考値)
夜側 (wake)	負帯電 -10^2 V -10^3 V (rare)	地表面形状による電位差は昼側に比べて緩和される 電子速度分布異方性に関連した電位差が生じる可能性	
日陰 境界	大域的な電場	大域電場構造に埋め込まれた局所電場の存在	

磁気圏プラズマ)に起因する月面電位の時間変化, 太陽高エネルギー粒子(SEP)イベント時の極端帯電といった, 月面電位の空間・時間変化に関する大局的な描像が得られた. 図2にアポロ月面観測の結果を, 表1に, それ以降の周回機観測を含めた結果を示す.

2.4 現状の課題

ここまでに見てきたように, 帯電状態の非一様性が生じる空間スケールは, 月の昼夜といった全球スケールだけではなく, クレーターなどの地形スケール, さらにはボルダーや石, 月の砂礫スケールに至るまで, 非常に多岐にわたる. このような空間階層を有する月面帯電の概念を模式的に表したものを図3に示す. また帯電状況の非一様性に関する理解の現状を空間スケール毎に整理したものを表2に示す. 全球スケールすなわち昼夜に応じて見られる電位差は, 「滑らかな平板」の表面帯電現象の範疇である. これはあくまでも空間的に平均化された描像であり, 局所磁化領域や地形・岩石・砂礫のスケールにフォーカスしていくと, それらが形作る不規則な凹凸表面形状に応じた帯電状態の多様性が姿を現すと考えられる.

しかし, 月面上・月周回軌道からの粒子観測によ

る, 従来の月面電位推定手法では, このような多様性を有する月面電位分布の測定に対して, 原理上あるいは実際上の限界が存在する. 例えば, アポロ着陸地点の観測では測器設置地点(最大でも数点)の情報しか得られていない. 周回機からの荷電粒子計測を利用した月面電位遠隔計測では, 原理的な空間分解能が粒子のジャイロ直径によって規定される. 典型的に用いられる200 eV電子のジャイロ直径半径は10 nTの磁場中で6 km程度となり, これよりも小さな空間スケールの月面電位の不均質性は計測することができない. したがって, 数km以下の小空間スケールの月面電位の非一様分布についての情報は, 観測からはほとんど得られていないのが現状である.

一方, 月に存在する局所磁化領域である磁気異常の上空ではプラズマ加熱・反射などの現象が生起する. これらの現象は, その直下の月面に対するプラズマ入射特性ひいては帯電状況に直接的な影響を及ぼす[19]とともに, 理学的見地からも興味深い. 磁気異常による太陽風の反射は, かぐや軌道よりも低い高度(20 km以下)で起きており, この高度を観測することが, 現象を理解するためには重要である. 月周回による観測の場合, 月の重力異常のために, 近

月点高度が数kmの周回衛星はすぐに軌道が変化して月面に衝突してしまうものと予想される。将来的には、磁気異常の上空で、超小型衛星による多数回の観測(寿命としては短い磁気異常領域上空のみを狙った観測)をおこなうことで、磁気異常と宇宙プラズマの相互作用について格段に理解が深まることが期待され、さらに、宇宙プラズマが磁気異常領域の月面に与える影響も明らかになる。

以上をふまえ、月面静電環境のリスク評価に向けて、月面上での非一様電位分布の把握・特徴付けが、解決すべき喫緊の課題である。また本稿では割愛するが、そうした帯電状況が宇宙プラズマ環境の時間的変動に対してどのように応答するか、という観点も重要である。課題の解決のために重要となる観測は、(a)月面における非一様な電位分布の直接計測、(b)月面上で非等方な速度分布を持ち、多様な表面形状と相まって非一様表面電位を駆動すると予測される数百eVからkeV帯電子の直接計測、そして(c)電子の異方性に影響を及ぼす磁場の計測である。

3. 月面帯電計測・評価方法の検討状況

3.1 月面粒子フラックス

宇宙空間における電子の計測は古くから行われており、数百eVからkeVにかけては静電分析器が、また数keV以上のエネルギーについては固体検出器が用いられてきた。いずれも、入射電子ひとつひとつのエネルギーと到来方向を計測し、電子のフラックス、すなわちエネルギースペクトルの取得を可能とする。日本では、いずれのタイプの計測器についても豊富な開発実績がある(例えば、あけぼの、GEOTAIL、れいめい、かぐや、あらせ、みお、など)。さらに、月面への応用、特に可搬性の向上・多地点測定の実現に向け、さらなる小型化(電子回路のASIC(特定用途向け集積回路)化など)の取り組みも、本LERITグループによって進行中である。

今後、これらの計測器を月面の活動領域の広域に展開する、さらにより効率的にグローバルなカバレッジを確保するために月周回軌道に投入する、といった実際の観測へと展開していくことが重要となる。

3.2 月面電位と電場

2.4節で示した通り、荷電粒子の計測から間接的に推定される電位は、荷電粒子のジャイロ半径程度のスケールで空間平均された値である。したがって、より小さい空間スケールの電位構造を明らかにするために、月面での電位の直接計測が不可欠となる。月面での電位直接計測に向け、①測定原理の選定、と②月面での可用性を考慮した設計、の両面から検討が必要である。

測定原理としては、我が国が宇宙空間における電位・電場計測において用いてきた手法を月面環境に応用するアプローチが想起される。宇宙空間での当該計測は1970年代から行われてきており、科学衛星に搭載された電界プローブを用いた方法(プローブ法) [47-52]が主流である。プローブ法による電場計測は、対象環境に展開された一対のプローブによって、衛星の電位を基準としたプラズマの電位を測定することにより空間内の2点間の電位差を求める。この電位差とプローブの間隔から、電場を求める。電界プローブは主に、数mから数十mのワイヤーの先端に球形のプローブが搭載されたものが用いられ、衛星のスピンを利用して形状を保持する設計となっている。日本では、ワイヤーを用いた電界プローブによる電位・電場計測に関する豊富な実績がある(例えば、あけぼの、GEOTAIL、あらせ、みお、など)。プローブ法では、空間電場を求める以外にも、衛星自体の帯電を見積もることができるメリットがある。宇宙空間プラズマ中での電場計測では、プローブに対して所定の電流を加えることで、プローブ電位をプラズマ基準電位付近に維持する運用がなされる。このときのプローブ電位とプラズマ基準電位の差は、衛星電位値に比べて十分に小さいことが多いため、実質的に衛星とプローブ間の電位差を衛星電位とみなすことができる。

一方、月面においては、宇宙空間プラズマ中とは異なる環境下での計測となることから、観測手法には工夫が必要となる。例えば、月面の場合、月面周辺の空間電位と、プローブを展開している筐体の電位の大小関係が自明ではなく、宇宙空間プラズマのような仮定をもとに、筐体の電位を推定できるかは明らかではない。これは、プローブ法のみでは、月面の空間電位の局所性を理解するために必要となる基準電

位を決定することが難しいことを意味する。基準となる電位を決めるためには、これまで述べてきた荷電粒子を用いて電位を推定する方法が適用できると考えられ、電位の直接計測には、電界プローブシステムのみではなく、荷電粒子計測器との協調が必要である。また、プローブ間の電位差から計算される電場に関しては、基準電位の問題は影響を及ぼさないと想像されるが、月面周辺のプラズマ環境下において、プローブ法で電場を計測できるかに関しては、数値実験を用いた検討により確認を進める必要がある。

月面に電界センサーを展開する場合には、スピンを利用するのではなく、自立できるセンサーが必要となり、現在、本LERITグループでは月面で利用可能な自立式センサーに関しての検討・開発を進めている。また、衛星に搭載されてきた受信器のアナログ部分はA4用紙サイズ程度の大きさであるが、ASIC技術を用いることにより、アナログ部を5mm角のチップに収めるなど、超小型化を実現してきている。受信器部分を小型化することにより装置全体の小型化を実現することができ、月面での可搬性の向上や月面での複数点測定の実現につながるものが期待される。

3.3 地上設備での帯電計測

月面における「その場」電位・電場観測技術が未確立である現状では、地上の真空チャンバー内に月面静電環境を模擬し、表層の物理過程を詳細に調べることが有効である。月面での帯電は電子やプロトンなどの太陽風プラズマに起因する荷電粒子と、太陽光の入射による光電子が要因となって発生する。さらに帯電して浮遊するレゴリスも考慮に入れる必要がある。月での実用を想定した電位計測や帯電対策技術の開発に先立ち、月面帯電環境を模擬した地上試験環境下での機能検証を早急に開始すべきである。ただし、そのためには月面の帯電環境を真空チャンバー内に再現し、電位計測や帯電対策技術を試験検証する技法そのものの検討とベンチマークを実施する必要がある。

真空チャンバー内で電位計測器等の供試体を帯電させるソースとして、電子源(10keV程度までの電子)と紫外線ランプを用いた検討が複数の機関で進められている。その一例として[53]の検討では、月の

表面を模擬するために真空チャンバー内にはレゴリスを敷き、レゴリス表面にも電子や紫外線が照射できるような試験系が示されている。実際の月環境において帯電に影響を及ぼす要因は多岐にわたるが、地上試験においては研究の目的、各物理要因の重要度、および装置開発や運用のコストを考慮して、漸次的に試験系を高度化するのが現実的である。例えば帯電現象に対する試験装置や帯電対策技術の検証が目的であれば、帯電が発生する環境を作りさえすれば良いので、試験系立ち上げ時に月面帯電に寄与する電流要素である電子、プロトン、光電子、二次電子の全てを考慮する必要はなく、不足している要素については、後述する数値モデリング・シミュレーションとの連携によって適宜補完することが有効であると考えられる。

通常、人工衛星の場合は、部品の交換が不可能なのでライフタイム相当の時間で動作保証ができるよう加速試験を行っている。月面の帯電試験方法において、特に帯電対策技術に関しては、長期にわたるレゴリスの影響を実験可能な時間スケール(数時間)で模擬する加速試験が必要であり、そのための照射条件の検討が進められている。特に電子の特性(エネルギーやフラックス)や紫外線の照射間隔や照射時間をパラメータとして最適な試験方法の見極めが肝要である。ある期間中に供試体に蓄積されるレゴリスの量は、3.4章で述べられる数値モデリングによって明確化されることが期待される。なお、どの程度の時間スケール(数日規模、あるいは数か月規模)に相当する加速試験を行えばよいのかは、月面帯電環境に関係する複数の物理過程の時間スケールオーダーの議論を踏まえた検討が必要である。

3.4 数値モデリング

宇宙プラズマ中の物体の表面帯電の研究においては数値シミュレーションアプローチが重要な役割を果たしてきた。特に人工衛星帯電の数値評価においては、複雑な3次元構造や高電圧配置を考慮するために粒子モデル(Particle-in-Cell法)に基づく数値技術の開発が大きく進展した[54]。これは物体周辺の荷電粒子挙動および電荷分布の変化と、それに関連づけられた静電場の発展を、時間領域で解き進めるものであり、複雑な3次元形状を有する物体

表面への電荷蓄積過程を高忠実に再現する上で強力な手法である。粒子シミュレーションは、その原理上、月面上の電荷蓄積と表層静電場の予測評価にも適用可能である。過去には、1次元計算に基づく月昼側光電子シースに関連した非単調空間電位構造の評価[55]や、多次元計算によるクレーター、縦孔、ボルダー、月着陸探査モジュールなどの表面トポロジに依存した表面帯電・静電場環境の数値研究[16,56-58]が実施されている。当手法は1次元モデルでは理論解との良い一致が認められ、さらにより一般的な多次元体系へも適用可能であるため、月面帯電の非一様性に着眼した数値シミュレーション研究においても中核手法と位置づけられる。

また、粒子シミュレーションは月表面の帯電状態だけではなく、上空の静電構造とプラズマ空間分布の数値解を与える。この点は、月周回軌道上観測や地上試験を用いた月帯電・ダスト環境との連携の観点から特に重要である。例えば、多数回の数値シミュレーション実験により、月上空と月面の静電プラズマ環境を互に関連付け、月周回軌道上観測に基づく月面帯電推定の高度化に貢献することが可能である。また、粒子シミュレーションによって得られた静電構造を背景場として用いた帯電ダスト軌道解析を、地上試験の結果と関連付ける試みも推進されるべきである。このように将来の数値シミュレーション研究には、観測や実験など異なる研究アプローチにより得られる断片的な知見を互に関連付け、月静電環境の体系的知識に統合する役割が求められる。

一方、月周回・月面帯電計測に向けた予備評価の観点においては、解決すべき技術課題も存在する。その一つは広範な空間スケール階層に対応した数値手法の拡張である。粒子シミュレーションは基礎となる支配物理モデルの特性上、プラズマデバイ長スケールの現象再現に効果を発揮する。しかし、月は天体自体の空間サイズがデバイ長(太陽風中で10 m オーダー)よりはるかに大きいため、月自体のプラズマ流遮蔽の結果であるプラズマ航跡や、磁気異常と宇宙プラズマの相互作用など、イオンスケールの現象が、月面に降り注ぐプラズマ条件を左右する状況が生じる。一般に帯電研究に用いられる(電子を粒子として記述する)全粒子計算モデルでは当該空間スケールを現実的な計算条件下でカバーするのは困難

である。また、これとは逆に月面レゴリス層が形成するcm未満の凹凸はサブデバイスケールに相当し、原理上は計算格子を細かく設定した全粒子モデルを用いて計算可能であるものの、計算コストの増大により実際上は適用困難である。

当課題を克服するには、月近傍の巨視スケールプラズマ環境をカバーできるハイブリッド法やマクロ全粒子法などの数値アルゴリズムを整備するとともに、それらと従来の帯電数値解析手法を連結するスケール間結合モデルの構築が必要である。また、デバイ長未満の小スケール凹凸に対しては、人工衛星帯電の定常状態解析で用いられる粒子追跡法などの収束加速法を月面環境用に再構成し、計算効率を向上させる必要性がある。

数値研究における他の課題は、月面上の岩石やレゴリス層が織りなす表面形状の自由度が非常に高く、その結果として生じうる帯電状態も千差万別である点である。この無数の帯電状態を数値シミュレーション実験の繰り返しのみで再現するのは非現実的である。この問題を克服するには、決定論的なシミュレーションに加えてデータサイエンスを援用することが必要になると考えられる。例えば特徴的な入力条件に対する粒子シミュレーション計算結果を学習データとみなし、機械学習に基づく代理モデルを構築することで、多様な月面形態に対する帯電状態を高速に推定する技術などが求められる。

4. 今後の展望と提言

4.1 人類活動領域としての月面

地球表面では、太陽風のプラズマ粒子(プロトンと電子)は、磁気圏と大気によってほぼ遮蔽される。しかし、月は地球とは違い、それらを遮るものが何もないため、常時直接的に晒される。宇宙放射線の中でも特に高エネルギー粒子は、被ばくという形で人体に直接影響を及ぼす。一方、比較的低エネルギーの太陽風プラズマや地球磁気圏に存在するプラズマ粒子の月面への降り込みは、月面や月周辺の静電的な環境に大きく影響を及ぼし、その結果として月面は帯電する。人類は今後、月面帯電状況の中で、月面で様々な活動を展開するために様々なインフラストラクチャを設置運用していくことになるが、この月面帯

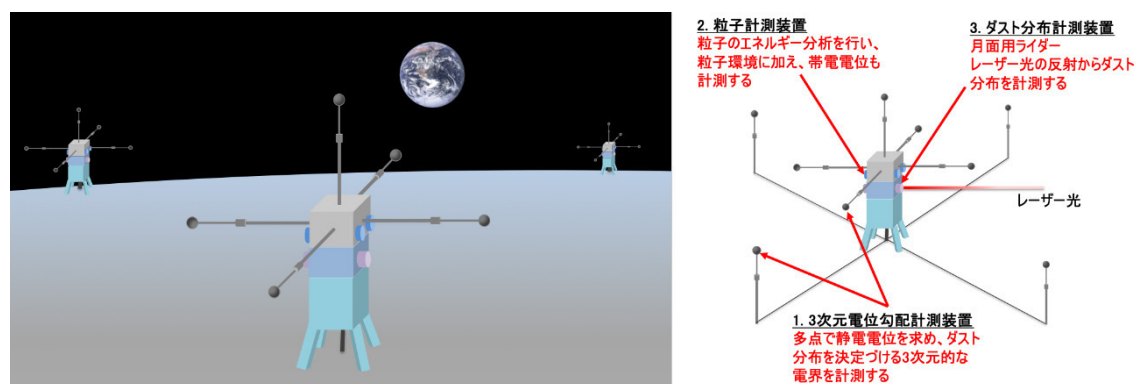


図4: (左)月面の環境をモニターする百草箱の設置例(右)百草箱に搭載される観測装置の一例。

電がそれらにどのような影響を及ぼすのは、まだわかっていない。宇宙空間中での人工衛星の帯電現象に関してはこれまで多くの研究がなされており、衛星での帯電や放電現象を低減、回避する手法や技術の開発が精力的になされてきた。これにより、近年では帯電による人工衛星障害は低減していると言われている。しかし、これらの手法や技術を、月面に接触したインフラや月面での人類活動における帯電リスク回避にそのまま適応できるのかどうかは不明である。月面での人類活動において何よりも重要なのは安全の確保であり、それを保証する上でも、月上空の静電環境を含めた月面帯電の定量的なアセスメントと帯電に起因するリスクの回避手法および技術開発は必須である。このようなアセスメントやリスク回避のための方策がない状態では、月面での人類活動、利用における安全・安心の確保は、大きな困難を有している。

4.2 月面宇宙天気予報のための月面環境モニタ百草箱(月面アメダス)設置による月面多点宇宙環境モニター

月面の環境は、その地点の地形や地質だけでなく周囲の宇宙プラズマ、高エネルギー宇宙線、流星物質の衝突によって時間的に大きく変化する。また、月は自転しているため、日照や太陽風入射の向きは時間的に変動する。この時間的な変動は、まさに地上の天気の変化そのものであり、地上での天気予報や地球圏での宇宙天気予報のように、人類が月面での活動を安全におこなうためには、月面の各地点での

環境を定常的に計測し、さらには予測していく月面宇宙天気、月面宇宙天気予報が必須である。

そこで、本LERITグループでは、月面の宇宙環境を定常的にモニターする百草箱(パッケージ化された観測装置)を月面の多くの地点に設置し、同時多点ネットワーク観測とデータ同化に基づく精密予測(月面アメダス)をおこなうことを提案する(図4)。現在、計測量として想定しているのは、宇宙放射線、電磁場、帯電、ダスト、周辺温度環境である。

なお、この月面百草箱は、電源や通信を共通化することによって、様々な計測機器のハウジングインフラとしての機能を有する。そのため、他の様々な計測機器、たとえば地震計(月震計)なども搭載し、総合環境計測プラットフォームとして発展できる可能性がある。

また、将来の月面での多点観測に用いる観測パッケージは、宇宙飛行士の船外活動での運搬時も想定して、小型・可搬・省電力を実現する必要がある。さらに、技術的には越夜・越昼や通信網の課題が挙げられる。

現在、これらの技術的課題の克服に向けた基礎研究が、本LERITグループでも行われており、将来の量産化さらには低コストでの月面環境の観測の実現に向けた活動を行っている。ここで開発した省電力、小型の観測装置群は、将来小天体(小惑星や彗星)などの深宇宙探査機にも搭載することで、広く太陽系の環境計測に展開できる可能性も有する。



図5: 帯電環境研究のフレームワーク確立に向けたロードマップ。

4.3 帯電基準策定の重要性

月面帯電の評価については、月面帯電環境ならびに設置するインフラの多様性のために、帯電軽減や回避のための手法や技術の開発はテラーメードで行う必要がある。

地球とは全く違う月面環境において、地球上のインフラ設備を、そのままの基準では運用できない。また、頻繁に現地に赴いて修理や交換ができない月面でのインフラ運用では、長期間にわたるメンテナンスフリーが求められるため、地上利用よりも格段に高い耐久性基準を適応する必要がある。この際に、科学的な見地にもとづいた基準を、各インフラに対して設定することが設置側としては求められる。

インフラの設置場所、運用方法、耐久性、環境対策などの基準を決めるにあたり、月面環境、特に地上では考慮してこなかった静電的な環境や帯電状況についてできるだけ正確なデータを取得することが重要である。

地上の天気置き換えると、いつ、どこに、どれぐらいの気温、雨量、風速があり、それらがどれぐらいの時間スケールで変動または持続するのかを把握

した上で、そこに設置するインフラの大きさや素材、耐久性、場所、運用方法などの指針、基準値を決める。同じことを月面設置インフラについても行う必要があり、地上の温度や雨量、風速などの基礎データに相当するのが、月面での太陽風プラズマを含む放射線粒子の流量や電位・電界、磁場のデータである。それらの基礎データをベースに、地上実験や数値シミュレーションを融合して構築された包括的月面帯電評価フレームワークおよびそれによって構築される月面帯電データベースを最大限に利用し、月面に設置される各インフラにどのような帯電現象が生じるかを定量的に把握する。得られる具体的な帯電現象のデータに基づきインフラの設置形態や運用方法、帯電回避方法に関する基準値を設定し、それに基づいたインフラ開発や月面運用等を検討することが重要となる。

4.4 月面帯電評価フレームワークに向けたロードマップ

以上の月面帯電計測に向けた現状や将来の展望をふまえ、本LERITグループでは、今後の月面帯

電評価に関するフレームワーク構築に向けたロードマップを検討した(図5)。

3章の帯電計測・評価方法の項で述べたように、太陽活動や地球磁気圏によって変動する月での宇宙放射線環境と、それによって影響を受ける月面静電環境について、月周回衛星、超小型衛星、ゲートウェイや、4.2で紹介した月面多点観測(月面百葉箱)を用いて月上空から月面に至る各高度においてプラズマ粒子、電位・電場、磁場の物理量を多面的に計測する。

一方、観測によって得られる月面への粒子フラックスデータを元に、粒子モデルの数値シミュレーションを行い、月面形状非一様(クレータ、縦孔)、日向-日陰境界、磁場による電子異方性下など多様な環境における月面帯電状況を評価する。特に、レゴリスからクレーターに至る様々なスケールでの帯電現象において、それらのスケール間の階層的な相互作用を考慮しながら月面帯電を評価する。

また、観測によって得られる月面環境データを同化した高度な数値シミュレーションを行い月面帯電評価の精度向上をはかるとともに、月面での帯電分布モデリングを行う。

月面レゴリス帯電に関しては、3.3章で述べたように擬似月環境を用いた地上実験を実施し、帯電レゴリスの宇宙服やインフラへの付着を評価するための基礎データを取得する。

以上のように、観測データ解析、数値モデリング、地上実験を有機的に組み合わせることにより、最終的には包括的な月面帯電評価ができるフレームワークを構築する。そして、様々な月環境における月面帯電状況を定量的に把握できるデータベースを構築し、2030年以降に本格化する月面での人類活動における帯電リスク評価の際の重要な基盤とする。

5. まとめ

本原稿では、月面における帯電研究の現状についてまとめるとともに、今後の月探査・開発における帯電環境把握の重要性、月宇宙天気、宇宙天気予報を推進し、さらに月面の帯電環境を把握し、基準構築に資するフレームワーク開発のためのロードマップを議論した。

地球とは全く異なる環境である月面において、帯

電環境は、月面構造物や稼働物、さらには有人活動に深刻な影響を及ぼす可能性が高く、月面多点における現況の把握、帯電環境に関するアセスメント、さらに予測研究が重要となる。

将来的には、月面百葉箱として紹介した月面における多点無人観測プラットフォームによって、帯電環境だけでなく様々な宇宙環境を月の各点でモニター・収集し、月面における宇宙天気・環境マップを発信し、共通インフラとして活用していく仕組みが必要となる。そのために計測装置の省電力、小型化などの基礎開発を進め、実装していくことも重要である。

謝辞

査読いただいた東北工業大学中川朋子教授に感謝いたします。

参考文献

- [1] Manka, R. H., 1973, *Astrophys. Space Sci.* 37, 347.
- [2] Garrett, H. B., 1981, *Rev. Geophys.* 19(4), 577.
- [3] Whipple, E. C., 1981, *Rep. Prog. Phys.* 44, 1197.
- [4] Freeman Jr., J. W. et al., 1973, *J. Geophys. Res.* 78(22), 4560.
- [5] Freeman, J. W. and Ibrahim, M., 1975, *The Moon* 14, 103.
- [6] Stubbs, T. J. et al., 2014, *Planet. Space Sci.* 90, 10.
- [7] Benson, J., 1977, *J. Geophys. Res.* 82 (13), 1917.
- [8] Garrett, H. B. and Whittlesey, A. C., 2012, *Guide to Mitigating Spacecraft Charging Effects* (Hoboken: Wiley).
- [9] Schwerer, F. C. et al., 1974, *Proc. Lunar Sci. Conf.* 5th 3, 2673.
- [10] Olhoeft, G. R. et al., 1974, *J. Geophys. Res.* 79(11), 1599.
- [11] Clack, D. et al., 2014, *Geophys. Res. Lett.* 31, L06812.
- [12] Farrell, W. M. et al, 2010, *J. Geophys. Res.* 115(E3), E03004.
- [13] Zimmerman, M. I. et al., 2011, *Geophys. Res.*

- Lett. 38, L19202.
- [14] Miyake, Y. and Nishino, M. N., 2015, *Icarus* 260, 301.
- [15] Zimmerman, M. I. et al., 2013, *Icarus* 226, 992.
- [16] Poppe, A. R. et al., 2012, *Icarus* 221(1), 135.
- [17] Harada, Y. et al., 2012, *J. Geophys. Res.* 117, A07220.
- [18] Nakazono, J. and Miyake, Y., 2023, *J. Geophys. Res.* 128, e2022JE007589.
- [19] Futaana, Y. et al., 2013, *Geophys. Res. Lett.* 40, 262.
- [20] Zimmerman, M. I. et al., 2015, *J. Geophys. Res.* 120, 1893.
- [21] Grard, R. J., 1997, *Planet. Space Sci.* 45(1), 67.
- [22] Reasoner, D. L. and Burke, W. J., 1972, *J. Geophys. Res.* 77(34), 6671.
- [23] Reasoner, D. L. and Burke, W. J., 1973, *Astrophys. Space Sci.* 37, 369.
- [24] Burke, W. J. et al., 1975, *Proc. Lunar Sci. Conf.* 6th 3, 2985.
- [25] Lindeman, R. et al., 1973, *Proc. Lunar Sci. Conf.* 4, 2889.
- [26] Collier, M. R. et al., 2011, *Planet. Space Sci.* 59(14), 1727.
- [27] Collier, M. R. et al., 2017, *Geophys. Res. Lett.* 44(1), 79.
- [28] Halekas, J. S. et al., 2002, *Geophys. Res. Lett.* 29, 1435.
- [29] Halekas, J. S. et al., 2005, *Geophys. Res. Lett.* 32, L09102.
- [30] Halekas, J. S. et al., 2007, *Geophys. Res. Lett.* 34, L02111.
- [31] Halekas, J. S. et al., 2008, *J. Geophys. Res.* 113, A09102.
- [32] Halekas, J. S. et al., 2009, *J. Geophys. Res.* 114, A05110.
- [33] Halekas, J. S. et al., 2011, *J. Geophys. Res.* 116, A07103.
- [34] Halekas, J. S. et al., 2012, *J. Geophys. Res.* 117, A05101.
- [35] Poppe, A. et al., 2011, *Geophys. Res. Lett.* 38, L02103.
- [36] Poppe, A. R. et al., 2012, *Geophys. Res. Lett.* 39, L01102.
- [37] Saito, Y. et al., 2014, *Adv. Space Res.* 54(10), 1985.
- [38] Nishino, M. N. et al., 2017, *Icarus* 293, 45.
- [39] Tanaka, T. et al., 2009, *Geophys. Res. Lett.* 36, L22106.
- [40] Harada, Y. et al., 2013, *J. Geophys. Res.* 118(6), 3042.
- [41] Poppe, A. R. et al., 2012, *Geophys. Res. Lett.* 39, L17104.
- [42] Poppe, A. R. et al., 2013, *J. Geophys. Res.* 118(5), 1135.
- [43] Harada, Y. et al., 2017, *Geophys. Res. Lett.* 44(11), 5276.
- [44] Wieser, M. et al., 2009, *Planet. Space Sci.* 57(14-15), 2132.
- [45] Futaana, Y. et al., 2012, *J. Geophys. Res.* 117, E05005.
- [46] Vorburger, A. et al., 2016, *Geophys. Res. Lett.* 43(20), 10,586.
- [47] Mozer, F. S. and Bruston, P., 1967, *J. Geophys. Res.* 72, 1109.
- [48] Fahleson, U. V. et al., 1970, *Planet. Space Sci.* 18(11), 1551.
- [49] Fahleson, U., 1967, *Space Sci. Rev.* 7, 238.
- [50] Mozer, F. S., 1973, *Space Sci. Rev.* 14, 272.
- [51] Pedersen, A. et al., 1984, *Space Sci. Rev.* 37, 269.
- [52] Tsuruda, K. et al., 1994, *J. Geomag. Geoelectr.* 46, 693.
- [53] Orger, N. C. et al., 2019, *Adv. Space Res.* 63, 3270.
- [54] Mandell, M. J. et al., 2006, *IEEE Trans. Plasma Sci.* 34, 2084.
- [55] Poppe, A. et al., 2010, *J. Geophys. Res.* 115, A08106.
- [56] Dyadechkin, S. et al., 2015, *J. Geophys. Res. Space Physics* 120, 1589.
- [57] Daoru, H. et al., 2016, *J. Comput. Phys.* 321, 965.
- [58] Piquette, M. et al., 2017, *Icarus* 291, 65.

著者紹介

三好 由純

名古屋大学宇宙地球環境研究所統合データサイエンスセンター センター長・教授、東北大学大学院理学研究科博士課程修了、博士(理学)、日本学術振興会特別研究員(PD)、米国ニューハンプシャー大学客員研究員、名古屋大学太陽地球環境研究所助教、准教授、名古屋大学宇宙地球環境研究所准教授を経て、2018年4月より現職。専門は宇宙空間物理学、宇宙天気、太陽圏システム科学、日本地球惑星科学連合宇宙惑星科学セクションバイスプレジデントや、国際太陽地球系科学委員会(SCOSTEP)国際理事等をつとめる。

三宅 洋平

神戸大学大学院システム情報学研究科・准教授、京都大学大学院工学研究科博士後期課程修了、博士(工学)、京都大学学術情報メディアセンター特定助教、神戸大学大学院システム情報学研究科助教、神戸大学計算科学教育センター助教、准教授を経て、2022年4月より現職。専門は計算宇宙プラズマ理工学、地球電磁気・地球惑星圏学会などに所属。京大大学生存圏フォーラム運営委員を務める。

原田 裕己

京都大学大学院理学研究科助教、京都大学大学院理学研究科地球惑星科学専攻博士課程修了、博士(理学)、名古屋大学太陽地球環境研究所協力研究員、カリフォルニア大学バークレー校ポスドク研究員、アイオワ大学研究員を経て、2018年4月より現職。専門は惑星プラズマ物理学、地球電磁気・地球惑星圏学会などに所属。地球電磁気・地球惑星圏学会運営委員を務める。

西野 真木

宇宙航空研究開発機構宇宙科学研究所SLIMプロジェクトチーム主任研究開発員、東京大学大学院理学系研究科地球惑星科学専攻博士後期課程修了、博士(理学)、宇宙科学研究所研究員、東京工業大学

研究員、名古屋大学特任講師、東京大学研究員などを経て、2023年4月より現職。専門は月面環境学および惑星磁気圏電離圏プラズマ科学、日本惑星科学会、地球電磁気・地球惑星圏学会、日本地球惑星科学連合に所属。

栗田 怜

京大大学生存圏研究所准教授、東北大学大学院理学研究科地球物理学専攻博士課程修了、博士(理学)、日本学術振興会特別研究員(PD)として名古屋大学太陽地球環境研究所、名古屋大学宇宙地球環境研究所研究員、ERGサイエンスセンター特任助教を経て、2020年3月より現職。専門は宇宙プラズマ物理学、地球電磁気・地球惑星圏学会などに所属。

笠原 慧

東京大学 大学院理学系研究科 准教授、東京大学大学院理学系研究科 地球惑星科学専攻 博士課程修了、博士(理学)、JAXAプロジェクト研究員、JAXA宇宙科学研究所 助教を経て、2016年9月より現職。専門は、その場観測をベースとした太陽系科学、日本惑星科学会、地球電磁気・地球惑星圏学会に所属。

永松 愛子

宇宙航空研究開発機構(JAXA) 宇宙探査イノベーションハブ 参事・研究領域リーダー、総合研究大学院大学高エネルギー加速器科学研究科博士後期課程 修了、博士(工学)、高エネルギー加速器研究機構放射線科学センター 客員教授、理化学研究所 仁科加速器科学研究センター宇宙放射線研究室客員研究員、JAXA有人宇宙技術部門有人宇宙技術センター技術領域主幹、広報部報道・メディア課長、研究開発部門 第一研究ユニット 研究領域主幹を経て、2023年7月より現職。専門は宇宙放射線計測・遮蔽防護技術、遺伝子工学、ライフサイエンス宇宙実験技術開発、2020年より、月近傍拠点Gatewayを含むArtemis計画の、宇宙放射線計測および宇宙天

気専門技術分野の日本側POC(Point of Contact・JAXAプログラムサイエンティスト)として国際調整を担当。応用物理学会代議員、文部科学省科学技術・学術政策研究所 専門調査員等を務める。

臼井 英之

神戸大学大学院システム情報学研究科教授。京都大学大学院工学研究科博士後期課程修了。博士(工学)。京都大学超高層電波研究センター助手、助教授、米国カリフォルニア大学バークレー校 在外研究員、京都大学宙空電波科学研究センター、京都大学生存圏研究所准教授、神戸大学大学院工学研究科教授を経て、2010年4月より現職。専門は計算宇宙プラズマ理工学、地球電磁気・地球惑星圏学会、米国地球物理学会連合などに所属。

奥村 哲平

宇宙航空研究開発機構(JAXA)研究開発部門 主任研究開発員。九州工業大学大学院工学研究科博士後期課程修了。博士(工学)。専門は宇宙機の帯電放電、宇宙用電源。JAXA帯電・放電設計共通技術文書ワーキンググループ(WG1)リーダー、太陽電池パネル品質保証ハンドブックワーキンググループ(WG8)委員などを務める。

豊田 和弘

九州工業大学 大学院工学研究院 宇宙システム工学研究系・教授。東京大学大学院工学系研究科航空宇宙工学専攻博士後期課程修了。博士(工学)。九州工業大学講師、千葉大学工学部都市環境システム学科・助手、フランス国立航空宇宙研究所・特別研究員、九州工業大学宇宙環境技術研究センター・助教授、准教授、九州工業大学大学院工学研究院・准教授を経て2022年4月より現職。専門は宇宙機の帯電放電、電気推進機。日本航空宇宙学会、アメリカ航空宇宙学会などに所属。SC14 国際標準検討委員会/環境分科会(WG4)委員、JAXA帯電・放電設計共通技術文書ワーキンググループ(WG1)委員などを務める。

中村 紗都子

京都大学大学院理学研究科を修了。博士(理学)。京都大学生存圏研究所特任助教、名古屋大学宇宙地

球環境研究所特任助教等を経て、名古屋大学宇宙地球環境研究所特任准教授。専門は、宇宙プラズマ物理学、宇宙天気。LERITチームでの活動に加え、今後のわが国の宇宙空間物理学、宇宙天気研究を牽引する若手研究者として活躍が期待されていましたが、2023年に急逝されました。