

宇宙プラズマ―天体固体表面相互作用に起因する帯電現象に ついての計算機シミュレーション

Computer simulations on electrostatic charging originating from direct interactions between
space plasma and the planetary solid surface

研究代表者：栗田 怜（生存圏研究所）

研究分担者：小嶋浩嗣（生存圏研究所）

担当：帯電現象・計測手法検討

臼井英之（神戸大学大学院システム情報科学研究科）

担当：帯電現象・計測手法検討

三宅洋平（神戸大学大学院システム情報科学研究科）

担当：シミュレーションコード開発

谷口泰斗（京都大学大学院工学研究科電気工学専攻）

担当：帯電現象のシミュレーション解析

研究目的 (Research Objective):

宇宙空間におかれた物体は、周辺のプラズマの影響を受けて帯電することが広く知られている。この帯電状態は、衛星の安全な運用の観点から観測や理論計算・数値シミュレーションが行われてきており、太陽光照射や周囲のプラズマの状態に応じて、多様な帯電状態を取りうるということがわかっている。また、大気をもたず、宇宙プラズマと表面が直接接触しあう月や小天体に関しても同様に帯電現象が発生することが知られている。人工衛星と月・小天体の帯電で異なる点は、衛星が導体で覆われ、等電位となるように工夫されている一方、月や小天体の表面は誘電体であるため、帯電状態が一樣とならない点にある。局所帯電によって、固体表面にはその形状などに伴い複雑な電場構造が形成されることが予想される。近年、米国を中心として月周辺の宇宙空間および、月面の利用計画が進行しており、近い将来に、月を周回する宇宙ステーションの建造に加えて、月面基地の建設が計画されている。人類が設置する物体と月面で活動する人類自身による帯電・電場構造が考えられるため、人類到達後の月面周辺の帯電環境・電場構造は、より複雑なものとなることが想像される。この帯電と電場構造が、人類活動に与える影響に関しては未知数であり、人類が月に到達し、長期にわたる活動を行うに先立って、月周辺ならびに月面の帯電環境・電場構造に関する知見を得ることは重要な意味をもつ。また、この帯電環境・電場構造をいかにモニターするかも課題であり、計測手法の検討を行う必要がある。小天体周辺に関しても、将来ランダーやローバーなどを運用する場合に、小天体の帯電状態が機器の運用に影響を及ぼす可能性があると考えられ、月と小天体に共通する、宇宙プラズマと天体固体表面の相互作用の結果として発生する帯電現象を理解することは重要な研究課題である。月や小天体表面近傍での直接観測の機会が非常に限られた現在においては、計算機シミュレーションを用いた手法が研究課題を明らかにするうえで有用である。

本研究課題においては、月や小天体周辺におけるプラズマの環境に対して、固体表面の電位や、固体表面近傍に存在する物体の帯電の状態と、帯電に伴う電場構造について明らかにすることを目的とする。神戸大学が中心となって開発をおこなっている、プラズマと物体の間の相互作用を加味することができる、全粒子型 3 次元電磁粒子コード EMSES を用いた数値実験を用いて、固体表面周辺の帯電環境と電場構造に関する知見を蓄積することを目指す。また、EMSES から得られた帯電環境や電場構造を観測するために必要な観測技術に関して、数値実験の結果から検討を進め、観測機器開発への知見を得る。

計算手法 (Computational Aspects):

本課題においては、EMSES を用いて、プラズマ中におかれた導体や、月面を模擬した絶縁体の帯電の状態を様々な条件を仮定して数値シミュレーションをおこなった。そこで、数値シミュレーションの計算コストの低減を図るために、EMSES を空間 2 次元でを使用することとした。空間 2 次元での数値シミュレーションにより、3 次元での数値シミュレーション結果と大きな差異が生まれることが懸念されたが、プラズマ中におかれた導体の帯電、また、月面の帯電状態を計算する数値シミュレーション結果を空間 2 次元の場合と 3 次元の場合で比較したが、大きな差異がなく、帯電に関わる物理過程に影響を及ぼさないことが明らかとなっている。

月面近傍における電位環境を空間 2 次元の数値シミュレーションにより模擬して、ラングミュアプローブを模擬した導体を空間内に設置し、導体の電位を境界に対して変化させることで、ラングミュア特性を取得し、空間電位を取得できるかを検討した。

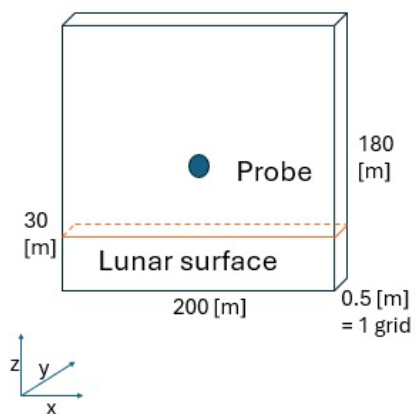


図 1. 数値シミュレーションのセットアップ

研究成果 (Accomplishments) :

月面近傍での帯電現象とその観測手法を検討するために、月がその軌道上で長時間にわたって存在する、太陽風プラズマの条件下での月面近傍の帯電を数値シミュレーションにより再現した。ここで、太陽光照射による光電子放出の有無を考慮したため、2つのパターンの電位分布が得られている(図1 青線)。光電子放出が存在しない場合においては、月面の電位が負となり、上空に向かうに従ってゼロへと近づいていく。光電子放出が存在する場合には、月面が正に帯電する一方、月面からわずかに上空においては負の空間電位となり、その後、ゼロへと近づいていく様子が見られる。これは、月面から放出された光電子が月面からわずかに上空に存在することにより形成さ

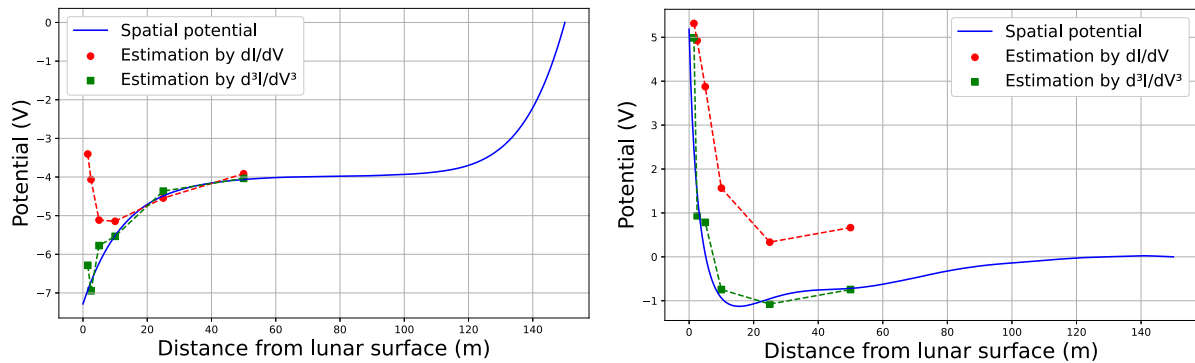


図 2. EMSES で得られた月面近傍の電位分布（青線）と、ラングミュア特性から得られた空間電位の推定結果。左側が太陽風中・光電子放出なしの条件化で、右側が太陽風中・光電子放出ありの条件下での数値シミュレーション結果。赤点が従来手法である I-V 特性の一次微分を用いており、緑点は本研究で導入した三次微分で得られた結果。

れる電位構造と考えられる。

これらの条件下において、導体の電位を掃引することでラングミュア特性を取得し、その I-V 特性から空間電位を推定した結果が図 1 に赤点で示してある。ラングミュア特性から空間電位を推定する際には、I-V 特性の一次微分を計算し、その値が最大となる電位を空間電位とする。一次微分を用いた場合、空間電位の推定が正しくない高度が存在していることがわかる。一方、I-V 特性の三次微分から、電流の増加率がもっとも大きいと考えられる部分を推定した結果が緑点で示してあり、月面近傍の空間電位を良い一致を示すことがわかった。月面近傍では、ラングミュアプローブのサイズに対してデバイ長が大きく、一般に I-V 特性から空間電位を推定できると考えられている状況とは異なっている。このような状況下においては、三次微分が一次微分のなかに含まれる細かい変化に対して鋭敏に反応することから、より空間電位を推定することに長けていると考えられる。

今後は、ラングミュア特性によって空間電位を推定できる物理的根拠をより明らかにし、月面近傍の空間電位を計測する手法を確立していくことを目指す。

公表状況（Publications）：

（ポスター）

1. 谷口泰斗、栗田怜 他、月面近傍におけるラングミュアプローブ特性の数値実験、日本地球惑星科学連合 2025 年大会、千葉、2025 年 5 月
2. 谷口泰斗、栗田怜 他、月面近傍における電位・電場計測に関する数値シミュレーション、地球電磁気・地球惑星圏学会 2025 年秋季大会、神戸、2025 年 11 月

（口頭）

1. 谷口泰斗、栗田怜 他、月面近傍における電位計測に関する数値シミュレーション、

2025 年度 KDK シンポジウム、オンライン、2026 年 3 月