

小型天体・宇宙プラズマ相互作用過程の 大規模粒子シミュレーション

Particle Simulations on Space Plasma Interactions with Solar System Small Bodies

研究代表者：三宅 洋平（神戸大学計算科学教育センター）

y-miyake@eagle.kobe-u.ac.jp

研究分担者：臼井 英之（神戸大学大学院システム情報学研究科）

h-usui@port.kobe-u.ac.jp

担当：計算機実験モデル・結果の検討

寺田 直樹（東北大学大学院理学研究科）

teradan@pat.gp.tohoku.ac.jp

担当：惑星上層大気の数値モデル検討

原田 裕己（名古屋大学宇宙地球環境研究所）

h.harada.yuki.i6@f.mail.nagoya-u.ac.jp

担当：月プラズマ環境の衛星観測研究

西野 真木（JAXA 宇宙科学研究所）

nishino@stp.isas.jaxa.jp

担当：月プラズマ環境学の創成

Wojciech J. Miloch（オスロ大学・数学自然科学部）

w.j.miloch@fys.uio.no

担当：月面凹凸の帯電特性の検討

中園 仁（神戸大学大学院システム情報学研究科）

nakazono.jin@people.kobe-u.ac.jp

担当：月面凹凸の帯電特性の検討

泉川 侑也（神戸大学大学院システム情報学研究科）

yuya.izumikawa@stu.kobe-u.ac.jp

担当：境界要素法に基づく高精度衛星環境モデリング

村井 佑多（神戸大学大学院システム情報学研究科）

murai.yuta@stu.kobe-u.ac.jp

担当：彗星高密度プラズマ中の衛星帯電現象の検討

酒田 大誠（神戸大学大学院システム情報学研究科）

sakata.aisei@stu.kobe-u.ac.jp

担当：速度分布関数に基づく衛星流入電流評価

中井 俊志（神戸大学大学院システム情報学研究科）

nakai.shunshi@stu.kobe-u.ac.jp

担当：高速多重極展開に基づく多粒子相互作用計算機実験

高橋 昇大（神戸大学大学院システム情報学研究科）

shota.takahashi@stu.kobe-u.ac.jp

担当：小型天体上の帯電粉体ダイナミクスの数値モデル開発

榊原 大和（神戸大学大学院システム情報学研究科）

sakakibara.yamato@stu.kobe-u.ac.jp

担当：小型天体上の帯電粉体ダイナミクスの数値モデル開発

清水 玲都（神戸大学大学院システム情報学研究科）

shimizu.ryoto@stu.kobe-u.ac.jp

担当：微小隕石衝突時の変動月面静電環境の検討

土田 新大 (神戸大学大学院システム情報学研究科)
tsuchida.arata@stu.kobe-u.ac.jp
担当：月の局所磁化領域のプラズマ静電環境の検討
楠部 力希斗 (神戸大学大学院システム情報学研究科)
2165078t@gsuite.kobe-u.ac.jp
担当：惑星上層大気モデルの高性能計算手法開発

研究目的 (Research Objective):

月や小惑星、もしくは人工衛星などの小型天体は、その固体表面が太陽風プラズマと直接に相互作用する。その結果、太陽風プラズマの吸着と光電子や二次電子の放出により表面が帯電し、また地形や形状によりプラズマ流が阻害されるとウェイクが形成される。これらの荷電分離に伴い形成される静電場により、荷電粒子の加速／減速が生じる。本研究の目的は、これまでに申請者が行ってきた Particle-in-Cell に基づく大規模高並列プラズマ粒子シミュレーション研究を発展させ、人工衛星や月などの「小型固体天体」とプラズマ間の相互作用を理解することである。また天体によっては重要となる希薄中性大気の物理過程を考慮するための数値技術開発も推進し、マルチフィジックス性を反映した天体環境シミュレーションの実現を指向する。

計算手法 (Computational Aspects):

3次元 Particle-in-Cell シミュレーション手法に、人工衛星や宇宙塵などの固体境界の数値的取り扱いを追加した EMSES シミュレーションコード [Miyake and Usui, 2009] を用いる。本手法では、計算空間上で連続的な位置座標を持つ多数のプラズマ荷電粒子と、空間中で離散的に定義された静電場の間で必要な情報を交換しながら、相互に解き進めることによって、プラズマの挙動と静電環境の時間発展を自己無動着に解き進める。EMSES において固体表面を有する構造体は、プラズマ粒子を捕捉する内部境界として扱われる。課題遂行に用いた EMSES コードには、均等領域分割方式に基づく並列化と OhHelp アルゴリズム [Nakashima et al., 2009] に基づく動的負荷分散機構を実装しており、AKDK システムのような分散メモリ型並列計算システムで高効率な計算が可能になっている。

当課題では上述の EMSES の他に、①モンテカルロ直接法 (DSMC) に基づく惑星上層大気シミュレータ、②個別要素法 (DEM) に基づく粉体挙動シミュレータ、③衛星電位時間発展方程式法に基づく軽量衛星帯電シミュレータ、など複数の数値モデルを駆使して、研究を推進している。

研究成果 (Accomplishments) :

AKDK システムを用いた大規模シミュレーション研究により、2025 年度は小型天体環境に関する下記の成果を得た。

1. 太陽風の速度条件と、月面上の窪み地形の内部に形成される帯電強度の相関をプラズ

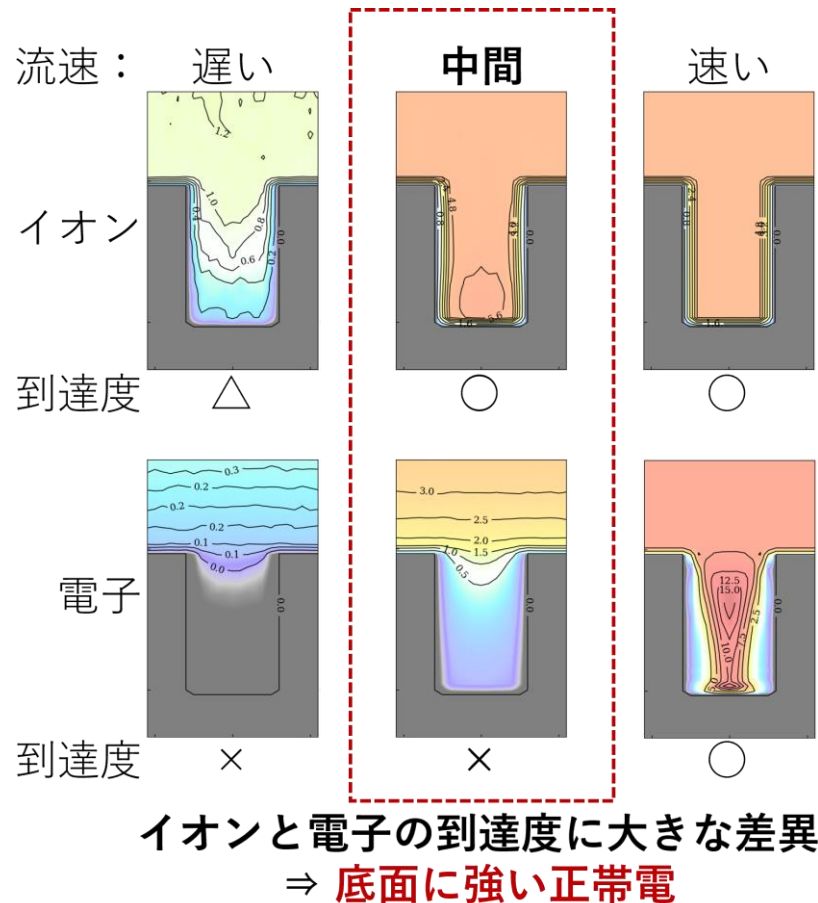


図 1. 太陽風流速に依存した荷電粒子の底面到達度中間の速度条件ではイオンが底面に到達するが、電子はなお到達しにくい。

マ粒子シミュレーションにより明らかにした。

2. 固体天体の表層を覆う帯電レゴリス微粒子の運動原理を解明するため、付着力や誘電泳動力を考慮した個別要素法シミュレータを開発した。
3. 月への微小隕石衝突に伴う高密度プラズマ生成過程をシミュレートし、空間電荷起源の動的静電場が上空への逃避電子のエネルギースペクトルの低エネルギーシフトを引き起こす基本的メカニズムを提唱した。

以降では上記のうち、成果 1 の内容を紹介する。

月面静電気環境の予測と評価は、宇宙活動の長期化、さらには月面における人間社会の形成に伴って顕現化する新たな環境科学課題である。代表者らは起伏に富んだ月面において広く存在すると考えられる窪んだ地形の内部に蓄えられる静電気量を、スーパーコンピュータを用いた物理シミュレーションで検証した。月は地球の周りを公転する期間の 7 割で太陽風プラズマに曝される。この太陽風プラズマを構成するイオンと電子の通常時の運動状態は、イオンが直進性を持つ一方で、電子は四方八方に飛び交って(多方向性)おり、互いに大きく異なる。ただしこれらの粒子運動の直進性と多方向性の度合いは、太陽活動や太陽風の状態(特に速度)に応じて、様々に変わりうる。今回の研究では、100 回を超える計算機シミュレーションをスーパーコンピュータ上で実施することで、様々な太陽風速度条件

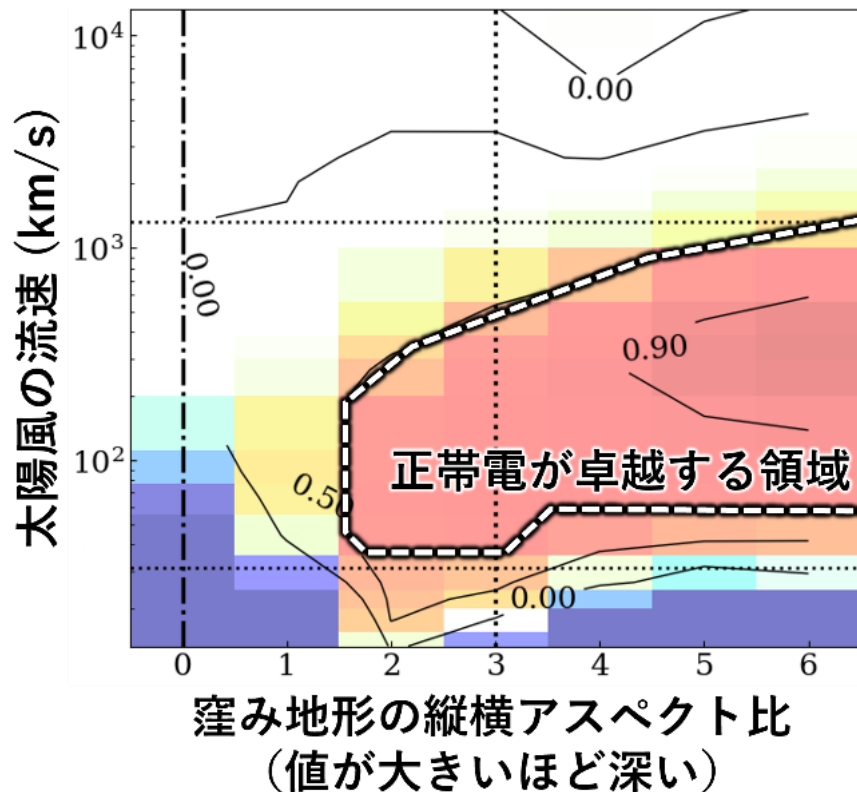


図 2. 太陽風流速に依存した荷電粒子の底面到達度中間の速度条件ではイオンが底面に到達するが、電子はなお到達しにくい。

に対する窪み地形底部の蓄積静電気量を調査した。

その結果、太陽風速度が非常に①「遅い条件」と非常に②「速い条件」では、顕著な静電気の蓄積は見られず、その③「中間の速度条件」においてのみ、窪み地形底部に顕著な正電荷の蓄積が認められた。これは①の「遅い条件」ではイオンと電子の両者が窪みの内部に侵入できないのに対し、③の「中間の速度条件」ではイオンのみが窪みの内部に侵入できることに起因している(図1)。なお②の「速い条件」では、イオンと電子の両者が窪みの内部に侵入できるため、お互いが電荷を打ち消し合うことで底部の電荷蓄積は抑制されることも示された。平均的な太陽風パラメータとされる 400 km/s の流速、10 eV のプラズマ温度は、今回分類した 3 つの条件の中では、③「中間の速度条件」に対応する(図 2)。当該条件では、プラズマデバイ長(およそ 10 m)未満の小さな開口部を有する窪みの底部において、最大で +700 V の電圧に達する可能性も示されている。

月に普遍的に存在する窪み地形底部の特異な帯電事象を示した一連の研究結果は、月面を滑面とみなす従来の帯電物理描像の刷新を促すとともに、太陽活動の変動やそれに伴う宇宙プラズマ動態と、月面静電気環境のつながりを理解する上での重要な一歩となる。人類が今後月面で展開・運用する探査機器やインフラに対する静電気環境リスク評価や、月での持続的な人類活動に不可欠な「月面静電気ハザードマップ」の構築に役立つことが期待される。なお本研究成果は 10 月 7 日付けで神戸大学からプレスリリースされた。

今後は自然状態における月面電気環境の理解をさらに深化させるとともに、探査機器の

運用によって生じる能動電圧が月本来の荷電粒子環境と如何に相互作用するかに焦点を当て、月面探査時の静電気環境の予測評価を試みる計画である。

公表状況 (Publications) :

(論文)

1. Nakazono, J., and Y. Miyake, Size-Dependent Surface Charging of Lunar Cavities exposed to the Solar Wind, J. Geophys. Res.: Space Physics, 130, e2024JA033490, doi: 10.1029/2024JA033490, 2025.
2. Nakazono, J., Y. Miyake, and W. J. Miloch, Electrostatic Charging of Lunar Cavities Governed by the Flow-to-Thermal Speed Ratio: 3D PIC Simulations and a Free-Fall Model, Journal of Geophysical Research: Space Physics, 130, e2025JA034302, doi: 10.1029/2025JA034302, 2025.
3. Ahmad, N., H. Usui, Y. Miyake, S. Supriadi, H. Fakhurroja, A. H. Syaeful, and H. Bangkit, Case Studies of Ion Focusing in the Downstream Region of a Modeled Low Earth Orbit Spacecraft, Earth and Planetary Physics, 10, 1-8, doi: 10.26464/epp2026008, 2025.
4. Kohara, K., Y. Miyake, T. Morishita, F. Cipriani, and M. Adachi, Photoelectric Effect for Electrostatic Dust Mitigation in Lunar Exploration, Acta Astronautica, 241, 85-96, 10.1016/j.actaastro.2025.12.054, 2025.

(口頭)

1. Miyake, Y., Physical Processes in a Space Plasma-Solid Boundary Layer: a Numerical Research Approach and its Application to ‘Lunar Electrostatics’, LASP Science Seminar, Boulder, January 2026. (招待講演)
2. Nakazono, J., Y. Miyake, and W. J. Miloch, Ion-driven Charging on Lunar Surface Cavities Dependent on Solar Wind Conditions: Parametric Study via the PIC Approach, AGU Annual Meeting, New Orleans, December 2025.
3. Miyake, Y., Computer Simulations on Long-Range Influences of Space Plasma Interactions with Airless Planetary Bodies, AP-RASC, Sydney, August 2025.