

# 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

原田 裕己（京都大学大学院理学研究科）

haraday@kugi.kyoto-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

Ravindra Desai（Imperial College London）

ravindra.desai@imperial.ac.uk

担当：惑星電離圏環境における衛星帯電の検討

Zeqi Zhang（Imperial College London）

zeqi.zhang17@imperial.ac.uk

担当：Enceladus 環境における衛星帯電シミュレーション

中園 仁（神戸大学大学院システム情報学研究科）

j-nakazono@stu.kobe-u.ac.jp

担当：月面凹凸の帯電特性の検討

釜江 祥史（神戸大学大学院システム情報学研究科）

yoshifumi.kamae@stu.kobe-u.ac.jp

担当：粒子計算の動的負荷分散の検討

寺田 大樹（神戸大学大学院システム情報学研究科）

terada.taiki@stu.kobe-u.ac.jp

担当：彗星－太陽風相互作用シミュレーション

宮城 紀花（神戸大学大学院システム情報学研究科）

222x222x@stu.kobe-u.ac.jp

担当：月探査モジュール差動帯電緩和技術の検討

早稲田 卓（神戸大学大学院システム情報学研究科）

waseda.suguru@stu.kobe-u.ac.jp

担当：月磁気異常領域静電環境の検討

川村 峻介（神戸大学大学院システム情報学研究科）

kawamura\_shunsuke@stu.kobe-u.ac.jp

担当：プラズマ粒子計算の階層並列実装の検討

酒谷 龍生（神戸大学大学院システム情報学研究科）

ryusei.sakaya@stu.kobe-u.ac.jp

担当：電子層に覆われた物体の電波散乱特性解析

田中 唯逸（神戸大学大学院システム情報学研究科）

yuito.tanaka@stu.kobe-u.ac.jp

担当：磁気圏 MHD－人工衛星帯電連成シミュレーション開発

## 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。

## 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 コードは、均等領域分割方式に基づく MPI 実装を採用している。各プロセスは自身に割り当てられた小領域(1次担当領域)内に含まれるプラズマ粒子と格子点上の電磁界の相互作用計算を担当するとともに、担当領域を飛び出した粒子の移送通信と電磁界の境界通信を MPI 関数によって行う。また本コードでは各プロセスが、本来の担当領域に加えて粒子が密な別の小領域を1つだけ担当し(2次担当領域)、その領域に含まれる粒子・電磁場相互作用計算を分担する OhHelp アルゴリズム [Nakashima et al., 2009] を採用している。これにより、粒子がある小領域に集中するような状況においても、粒子数と格子点数の両方の観点において負荷を均衡化することが可能である。

## 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、2023年度は小型天体環境に関する下記成果を公表した。

- ・荷電粒子層に被覆された構造体による電波多重散乱特性を明らかにした研究[1]
- ・時空間スケールが乖離した地球磁気圏環境変動と人工衛星帯電予測を可能にする連成シミュレーション研究[2]
- ・土星電離圏プラズマ中における特異な帯電特性を数値的に再現し、観測データとの整合的な知見を得た研究[3]
- ・彗星コマ高密度プラズマ環境で生じる中性粒子衝突に伴う二次荷電粒子放出の衛星帯電特性への影響を議論した研究[4]
- ・低軌道衛星の帯電に対する高エネルギー電子降りこみの影響を調査した研究[5]
- ・粒子シミュレーションと線形回帰手法を組み合わせることで、様々なプラズマ環境

下でのプローブ電流特性の推論モデルを構築した研究[6]

下記では成果[3][4]の内容を紹介する。

カッシーニ探査機はグランドフィナーレと呼ばれる最後のミッションにおいて土星電離圏に関する多くの知見を獲得した。高度 3000 km 以下でのラングミュアプローブ測定では光電子放出など通常の電子放出プロセスが有効に機能しない状況であるにも関わらず、探査機は正に帯電することが分かった。この結果は土星電離圏プラズマを構成する負性粒子種が電子ではなく、負の重イオンであることを想定することで説明できる [Zhang et al., 2021] が、数ある可能なシナリオの一つに過ぎない。成果[3]では、土星電離圏環境において粒子環境で優位な割合を占める水分子中性粒子の探査機表面への衝突による二次電子放出という新たな側面に着目し、探査機帯電シミュレーションを実施した。その結果、二次電子電流密度が概ね数 $\mu\text{A}/\text{m}^2$ を超過すると探査機を正に帯電させることが示された (図 1)。この結果は、グランドフィナーレにおけるカッシーニ探査機に対する水分子の衝突率やラングミュアプローブ測定の結果と整合的である。先述の負の重イオンの効果と合わせ、探査機や衛星の帯電そのものが未知の惑星圏プラズマ・中性粒子環境に手がかりを与えるものであることを示唆する結果である。

中性粒子衝突に伴う二次荷電粒子放出による衛星帯電様態への作用は、彗星コマ高密度プラズマ環境でも重要であることが成果[4]の研究から明らかになった (図 2)。彗星プラズマ環境を対象とした帯電研究では、二次イオン放出の役割についても検討を実施した。二次イオンは熱速度が小さいため、衛星表面付近に滞留する傾向があり、高密度の正電荷領域を形成する。このようにして形成された二次イオン雲は、衛星の直近に電位バリアを形成し、二次イオン・二次電子・光電子・彗星起源背景電子の挙動に影響を及ぼすことを明らかにした。これまで衛星帯電解析で見過ごされてきた当該電流成分を考慮した帯電現象理解に向けた 2024 年度の継続研究計画の動機付けとなっている。

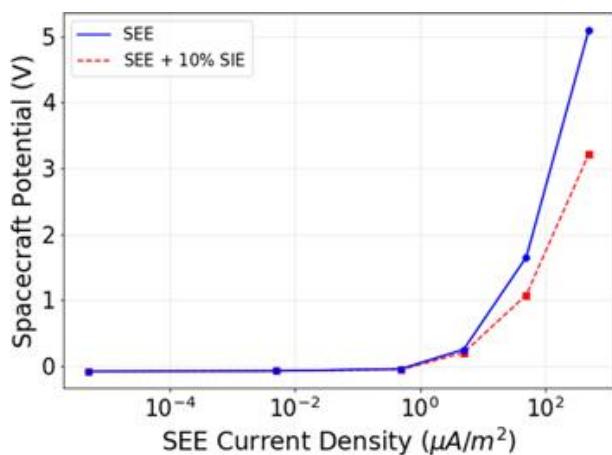


図 1. 中性粒子衝突に伴う二次電子放出量とカッシーニ探査機表面電位の関係 [3].

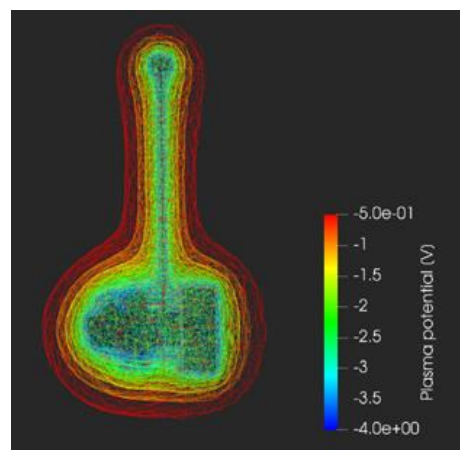


図 2. 彗星高密度プラズマにおける Comet Interceptor 衛星周辺の等電位面構造[4].

## 公表状況 (Publications) :

### (論文)

1. Miyake, Y., and J. Takagi. Particle Simulations of Radio Wave Scattering by Small Objects covered with a Charged Particle Layer, *Journal of Evolving Space Activities*, 1, 50, <https://doi.org/10.57350/jesa.50>, 2023.
2. Miyake, Y., Y. Sunada, Y. Tanaka, K. Nakazawa, T. Nanri, K. Fukazawa, Y. Katoh, Implementation of Coupled Numerical Analysis of Magnetospheric Dynamics and Spacecraft Charging Phenomena via Code-To-Code Adapter (CoToCoA) Framework, *Computational Science - ICCS 2023 Lecture Notes in Computer Science*, 14074, 438-452, [https://doi.org/10.1007/978-3-031-36021-3\\_46](https://doi.org/10.1007/978-3-031-36021-3_46), 2023.
3. Zhang, Z., R. T. Desai, O. Shebanits, F. L. Johansson, Y. Miyake, and H. Usui, Simulating Secondary Electron and Ion Emission from the Cassini Spacecraft in Saturn's Ionosphere, *The Planetary Science Journal*, 4(6), 105, <https://doi.org/10.3847/psj/acd844>, 2023.
4. Bergman, S., Y. Miyake, S. Kasahara, F. L. Johansson, and P. Henri, Spacecraft Charging Simulations of Probe B1 of Comet Interceptor during the Cometary Flyby, *The Astrophysical Journal*, 959, 138, <https://doi.org/10.3847/1538-4357/ad0ce5>, 2023.
5. Bertrand-Delgado, R., R.T. Desai, F. Zorto-Aguilera, Z. Zhang, Y. Miyake, Spacecraft Charging of the Morazán MRZ-SAT Satellite in Low Earth Orbit: Initial Results on the Influence of Energetic Electron Anisotropy on Differential Charging, *Proceedings of 74th International Astronautical Congress (IAC)*, IAC-23-B4.IP.6, <https://doi.org/10.48550/arXiv.2310.11803>, 2023.
6. Brask, S.M., R. Mishra, G. Holen, Y. Miyake, H. Usui, W. J. Miloch, Spherical Langmuir Probes in Magnetized Plasma. A Model based on Particle-in-Cell Simulations, *Physics of Plasmas*, 31(2), 023506, <https://doi.org/10.1063/5.0177775>, 2024.

### (口頭)

1. Miyake, Y., Role of Numerical Studies in the Electrostatics of the Moon, 8th MMX/SSG-SST meeting, Online, April 2023 (Invited).
2. Miyake, Y., Numerical Study of Surface Charging Process on Airless Planetary Bodies, LuPIN-1: Lunar Plasma Interdisciplinary Network, Bjorkliden, September 2023 (Invited).