

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

西野 真木（JAXA 宇宙科学研究所）

nishino@stp.isas.jaxa.jp

担当：月プラズマ相互作用の検討

寺田 直樹（東北大学大学院理学研究科）

teradan@pat.gp.tohoku.ac.jp

担当：惑星大気圏の検討

田邊 正樹（東北大学大学院理学研究科）

tanabe@pat.gp.tohoku.ac.jp

担当：フォボスの表面帯電シミュレーション

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

高木 淳也（神戸大学大学院システム情報学研究科）

junya.takagi@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

中園 仁（神戸大学大学院システム情報学研究科）

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

担当：月面凹凸の帯電特性の検討

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：月表層光電子輸送現象の検討

釜江 祥史（神戸大学大学院システム情報学研究科）

kamae.yoshifumi@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

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

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。

小型天体などの固体物体と宇宙プラズマの相互作用は、従来は表面のごく近傍の荷電分離領域の物理にその力点が置かれてきた。しかし特定のプラズマ条件下では、その影響はデバイ長を大きく超えた長距離にわたって波及しうる。その条件の一例として、プラズマが固体物体に対して相対速度を持つ状況が挙げられる。今年度は、プラズマ流中の固体微粒子を題材として、固体物体に起因するプラズマじょう乱の構造的特徴を調査した。

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) :

プラズマ流中に配置した固体微粒子の後方に形成される航跡構造に着目した3次元もしくは2次元の大規模計算機実験解析を実施した。微粒子のサイズはプラズマデバイ長の1/10と設定した。プラズマ電子とイオンのフラックスの差異に起因して、微粒子は典型的には負に帯電する。通常、その平衡電位はプラズマ条件により自動的に決定されるが、本研究では微粒子の帯電量も可変パラメータであるとして数値実験を行った。得られた主な結果は下記のとおりである。

- ① 流れを持つプラズマ中では、非磁化、磁化の両方の状況において、特定の振動パターンを有する静的電位構造(航跡)が微粒子後方に認められた。これはプラズマ流

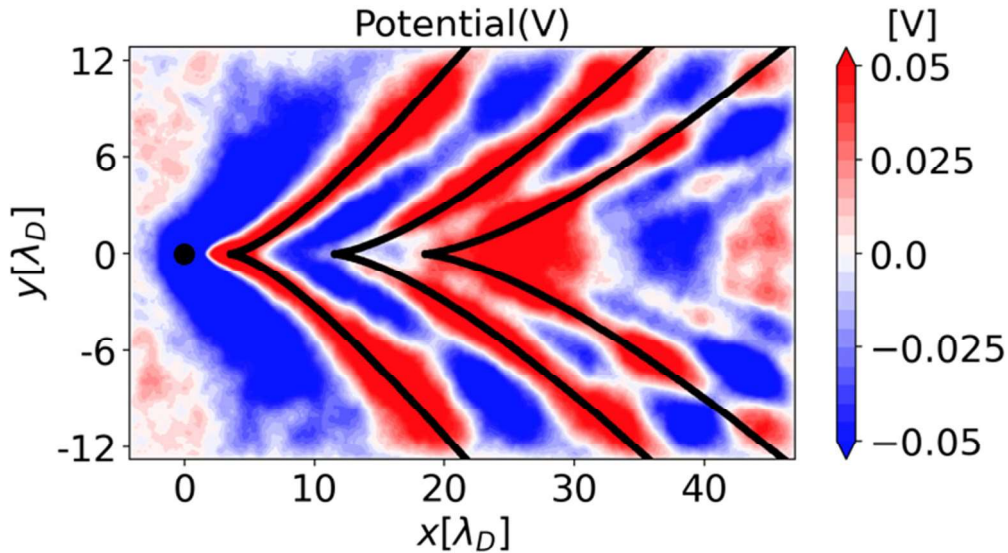


図 1. 非磁化プラズマ流に配置した帯電固体微粒子後方に形成される電位振動（航跡）構造. 黒線はイオン音波の分散特性から推定した電位振動の等位相面（の断面）を示す.

が超音速の場合のみならず、亜音速の場合にも形成されることが判明した。また電位の振動パターンの等位相面の構造的特徴は空間の次元性（3次元もしくは2次元）に依らないことも確認した。

- ② プラズマ流の固体微粒子後方の電位構造と、船舶が水面を進行する際に後方に形成されるケルヴィン波との類似性に着目し、プラズマ媒質中の波動の分散特性から電位振動パターンの等位相面の構造を理解することを試みた。その結果、非磁化プラズマ条件においては、等位相面の拡がり角や有限イオン温度効果による振動消失領域がイオン音波モードの分散特性を良く表していることが確認された（図 1）。
- ③ 次に磁力線の流れの方向と垂直に設定した磁化プラズマ中での航跡構造を計算機実験解析で再現した。この場合、航跡の空間スケールに対応する波数領域ではイオンサイクロトロン高調波に伴う複数の波動ブランチが存在するため、分散特性と航跡構造の関連は自明ではない。そこで数値的に求めた各波動ブランチの分散特性との対応関係を調査したところ、得られた航跡構造は低域混成波動の分散特性を比較的良く反映していることを示唆する結果を得た。また一連の取り組みの中で磁化プラズマ中では、非磁化プラズマ中に比べて航跡構造がより長距離に伸展する傾向があることも確認された。航跡構造を規定する波動モードの減衰率の差異に関連した結果と考えられる。

非磁化もしくは磁化条件のプラズマ流中に配置した帯電固体微粒子後方に形成される静的な電位振動パターン（航跡）の特徴を、大規模な粒子モデルプラズマ運動論シミュレーションで調査した。磁化条件では、非磁化の場合に比べて航跡は後方により長距離に伸展する傾向が認められ、微粒子周囲のポテンシャル場を媒介にした微粒子間相互作用を検討する上で重要な知見である。また本数値実験では微粒子の持つ静

電ポテンシャルは電子の熱運動エネルギーと同程度としたが、微粒子の帯電量を大きくしていくと、微粒子周辺の電位構造に急激な変化が認められるしきい値が認められた。これはプラズマ流と帯電微粒子の相互作用が、線形応答から非線形応答に遷移したことを示唆する結果であり、関連研究ではソリトン解等の存在が議論されている[3]。今後はこのような観点からも研究を推進する計画である。

公表状況 (Publications) :

(論文)

1. Nakazono, J., and Y. Miyake, Unconventional Surface Charging within Deep Cavities on Airless Planetary Bodies: Particle-in-Cell Plasma Simulations, J. Geophys. Res.: Planets, to appear.
2. Miyake, Y., J. Takagi, and N. Kaya, Simulation Study on Radio Wave Scattering by Small Objects covered with a Charged Particle Layer, Proc. 33rd International Symposium on Space Technology and Science, 2022-r-22p, 2022.

(口頭)

1. Nakazono, J., and Y. Miyake, Numerical Simulations on Solar-Wind-Driven Surface Charging within Deep Cavities on the Moon, AGU Fall Meeting 2023, Chicago, 2022 年 12 月.
2. Miyake, Y., K. Kawaguchi, K. Nakazawa, Y. Sunada, K. Fukazawa, T. Nanri, and Y. Katoh, Development of the Space-Weather-Aware Satellite Charging Analysis Platform Based on the Numerical Code Coupling Framework, AGU Fall Meeting 2023, Chicago, 2022 年 12 月.
3. 三宅洋平, 人類の活動の場としての月面環境～月ダストに関わる学理を中心に～, 第 16 回生存圏フォーラム特別講演会「宇宙で持続可能性を考える」, 宇治, 2022 年 11 月 (招待講演) .
4. 三宅洋平, 中園仁, 月面近傍プラズマ・静電気環境研究の最近の動向と今後の展望, 地球電磁気・地球惑星圏学会第 152 回総会・講演会, 相模原, 2022 年 11 月.
5. 三宅洋平, 中澤和也, 砂田洋平, 南里豪志, 深沢圭一郎, 加藤雄人, コード結合フレームワーク CoToCoA による磁気圏 MHD-人工衛星帯電連成シミュレーションの実現, 研究報告ハイパフォーマンスコンピューティング (HPC), 2022-HPC-185(23), pp.1-8, 2022 (査読無し) .
6. Takagi, J., Y. Miyake, H. Usui, and N. Kaya, Analysis of Radio Wave Scattering by Metal Objects Covered by Plasma, 2022 URSI-Japan Radio Science Meeting (URSI-JRSM 2022), 東京, 2022 年 9 月.