

# 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

小嶋 浩嗣（京都大学生存圏研究所）

kojima.hirotsugu.6m@kyoto-u.ac.jp

担当：宇宙プラズマ中電界アンテナ特性の検討

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

岡村 美穂（神戸大学大学院システム情報学研究科）

okamura.miho@stu.kobe-u.ac.jp

担当：低軌道衛星近傍の電子密度構造のシミュレーション

中澤 和也（神戸大学大学院システム情報学研究科）

nakazawa.kazuya@stu.kobe-u.ac.jp

担当：宇宙プラズマ連成シミュレーションの基礎開発

室賀 健太（神戸大学大学院システム情報学研究科）

muroga.kenta@stu.kobe-u.ac.jp

担当：ダストウェイク構造のシミュレーション

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

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

## **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。

上記と関連して、次世代の宇宙電波計測や応用に向け、荷電粒子や宇宙物体が漂う宇宙空間での電波伝搬特性を定量的に把握する必要がある。今年度は、宇宙空間における電波応用の一例として、ダストや物体などの微小物体のレーダー波探知技術につながり得る数値実験を推進した。先進的なアルゴリズムに基づく数値シミュレーション技術を活用することで、宇宙空間特有の電波散乱特性の解明を目指した。

### 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。

物体による電波散乱現象は、古くから数多くの数値解析手法が考案され、実用化されてきたが、これらのほとんどは電界に関して横成分(電磁成分)のみを対象とした解析である。これに対して宇宙プラズマ層に覆われた宇宙物体の電波散乱問題を理論的に正しく解析するためには、電波反射時に物体表面に励起される表面電流や、その電流から電荷連続式を満たすように決定される表面電荷分布を考慮し、電界の縦成分と横成分の両者を矛盾なく時間更新できる新たな数値手法を構築する必要がある。

一般的なFDTD法において完全導体を再現する際には、物体表面における電界ベクトルの接線成分がゼロである条件を課す手法が用いられる。本数値解析においても、修正アンペール則による電界更新時に同様の処理を行うが、このとき導体表面電流が生じることにより、上述の完全導体条件を維持するものと考え、物体表面の一部にプラズマ電荷が蓄積すると一般的にはその物体は等電位条件を満たさない。完全導体を模擬するためには等電位条件を満たすように表面電荷を再配置する必要がある。これは上述で求めた完全導体条件を維持する表面電流を用い、電荷の連続式に従って導体表面グリッドにおける電荷密度を時間的に更新することにより実現した。

### 研究成果 (Accomplishments) :

固体表面からの電子放出過程や宇宙空間中の高速移動に伴い、周囲に高密度の電子層を伴う導電性微小物体によるレーダー波散乱現象の基礎検討を実施した。まず物体からの電子放出過程を計算し、数値空間内に配置した物体周辺に電子層形成過程を模擬した。物体から電子が放出されると、放出個数に応じた逆符号の電荷(今回の場合は正電荷)が物体に蓄積し、帯電する。帯電した物体が周囲に形成する静電ポテンシャル井戸により、放出電子の低エネルギー成分が物体表面に向かって引き戻されて再収集される。これにより、物体から流出する正味の電荷量は時間を追うごとに減少し、

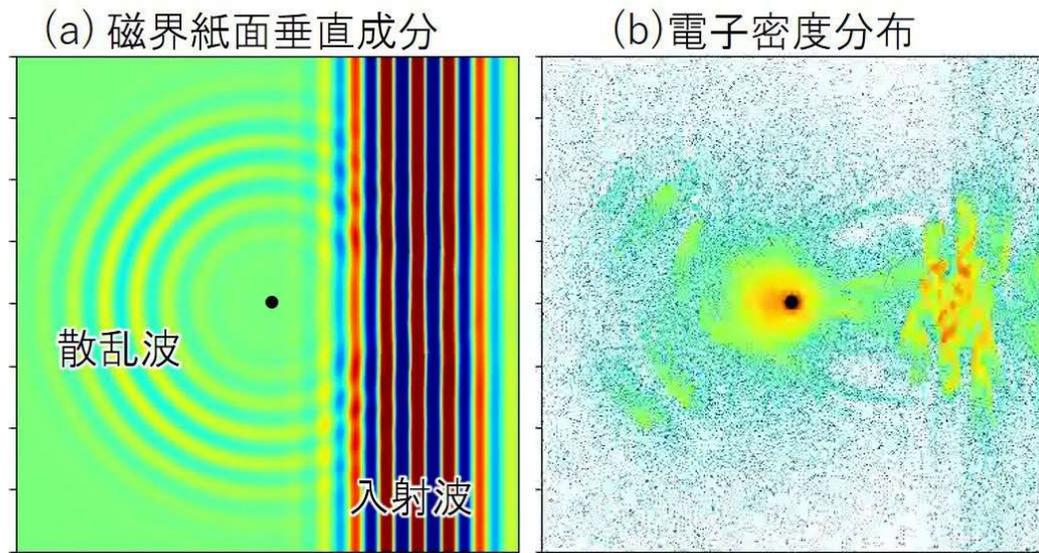


図 1 電子層を伴うデブリによる(a)電磁波散乱と(b)電子密度分布. 入射波による電子密度構造の変形と電子の引き剥がしが確認された.

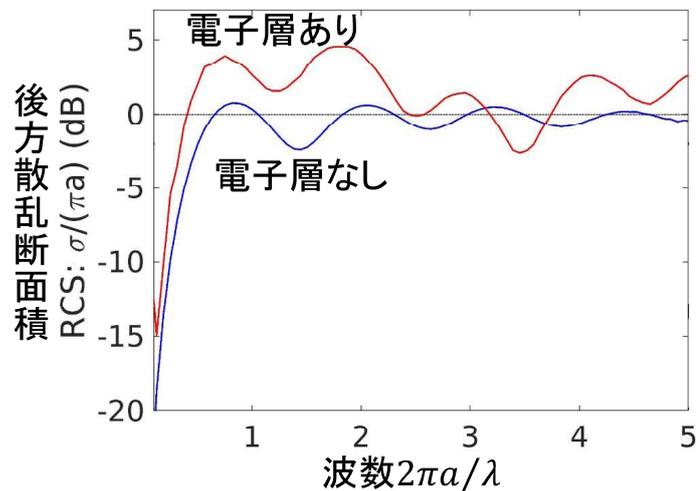


図 2 提案数値手法に基づくレーダー散乱断面積の解析結果. 電子層による断面積変化を確認した.

物体電位は一定値に飽和していく。最終的には、帯電した物体が周囲に形成する電界と、なだらかな密度勾配を持つ電子層の圧力勾配力のバランスにより安定した電子層構造が形成された。

次にこれに対してレーダー波を模擬した平面波を入射した。導電性の物体表面と電子層双方からの散乱電磁波を数値的に捉えることに成功した (図 1a)。また入射波到来方向に設定した観測点において捉えた散乱電磁波について周波数解析を実施し、電子層の被覆を含めた物体のレーダー散乱断面積を算出し、真空中においた場合の断面積と比較を実施した (図 2)。その結果、再現された電子層条件において、低周波帯域の後方散乱電波の強度が数 dB~10 dB 程度増大することが認められ、物体を取り巻く電子層により電波散乱特性、特に後方散乱断面積が変化することを実証する結果となった。

前項で示された散乱断面積変化の要因となっている物理機構を時間領域の数値シミュレーションデータの詳細解析により調査した。その結果、①入射電磁波の電界成分によって励振された電子群が検知対象物周辺にダイポール型の電流構造を形成し、②その電流によりアンテナと類似の原理により再放射された電磁波が検知対象物自体による散乱波と重畳することにより、③周波数に依存した散乱断面積変化が生じていることを明らかにした。これに加えて、入射波の強度に応じて、物体周辺の電子層の振動や引きはがしが発生することも確認された (図 1b)。これは、電子層の持つ非線形特性が電波散乱特性に影響を及ぼすことを強く示唆する結果である。

2021 年度は上述の課題以外に、月面の非一様帯電現象、宇宙プラズマ流と帯電ダストの相互作用による航跡形成の研究トピックで成果が得られた。これらについては、稿を改めて報告したい。

## 公表状況 (Publications) :

### (論文)

1. 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, submitted.
2. Zhang, Z., R. T. Desai, Y. Miyake, H. Usui, and O. Shebanits, Particle-In-Cell Simulations of the Cassini Spacecraft during the Grand Finale, Monthly Notices of the Royal Astronomical Societ, Vol.504, pp.964-973, 2021.

### (口頭)

1. 三宅 洋平, 中島 浩, 木倉 佳祐, 寸村 良樹, 佐伯 拓哉, 溜島 輝, A Decade of Effort in HPC toward Efficient Plasma Particle Simulations, 核融合科学研究所一般共同研究「先端的コンピュータ技術の利活用」シミュレーション技法に関する研究会 (第3回 OhHelp 情報交換会), オンライン, 2022年1月.
2. Miyake, Y., A Decade of Effort in HPC toward Realistic Scale Spacecraft-Environment Interaction Simulations, 8th International Workshop on Large-scale HPC Application Modernization, Online, Keynote talk, November 2021.
3. 中園 仁, 三宅 洋平, 臼井 英之, 太陽風プラズマによる月面帯電現象の表面形状への依存性, 地球電磁気・地球惑星圏学会第150回総会及び講演会, オンライン, 2021年11月.
4. 三宅 洋平, 宇宙におけるプラズマ-固体境界層の理工学研究, 宇宙地球惑星科学若手会夏の学校, 2021年9月.
5. 三宅 洋平, 高木 淳也, 臼井 英之, 荷電粒子層に覆われた物体の電波散乱特性に関する数値シミュレーション, 日本地球惑星科学連合2021年大会, オンライン, 2021年6月.
6. 中園 仁, 三宅 洋平, 臼井 英之, 月面空洞の表面帯電特性に関するプラズマ粒子シミュレーション, 日本地球惑星科学連合2021年大会, オンライン, 2021年6月.