

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（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

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

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

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

榎原 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

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。このうち③の軽量衛星帯電シミュレータの並列化実装については、次項でその詳細を紹介する。

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、2024 年度は小型天体環境に関する下記の成果を得た。

1. 月面上の窪み地形の空間スケールと内部に形成される帯電強度の相関をプラズマ粒子シミュレーションにより精査した。
2. 粒子シミュレーションを用いたプラズマ-物体相互作用解析により、複数プローブ間の干渉作用が測定値に与える影響の大きさと発生条件を明らかにした。
3. 地球磁気圏ダイナミクスと人工衛星帯電現象の連成数値解析における律速処理である

衛星帯電の軽量計算モデルに、時分割計算手法を導入することで、並列計算による高速化を実現した。

以降では上記のうち、成果 3 の内容を紹介する。

太陽活動が極大期を迎える中、宇宙天気予報の一要素技術として宇宙環境変動を反映した衛星帯電予測を短時間で行う必要性が高まっている。我々は地球磁気圏のプラズマ環境を再現する磁気圏グローバル MHD 計算と人工衛星帯電計算を組み合わせた地球磁気圏－人工衛星環境連成解析の開発を進めている [Miyake et al., ICCS, 2023]。連成対象となるモデル間の物理情報の連携により、大規模な宇宙嵐時の顕著な衛星帯電現象の再現に成功している一方で、計算の高効率化の観点で連成モデル間の負荷均衡の観点では課題が残っていた。具体的には磁気圏 MHD 計算は空間領域分割による並列化が実装されているが、帯電計算は並列化未実装である。よって、磁気圏 MHD 計算の高並列実行時には帯電計算の計算速度が律速段階となってしまう。そこで磁気圏 MHD 計算の高並列実行時の実行時間と帯電計算の実行時間のバランスを可能な限りとるため、帯電計算の時間領域分割による並列化(時間方向並列化)を検討し、実装と性能検証を実施した [論文 4]。

因果律に支配される系の時間方向並列化では、まずその時間発展を粗く低計算コストで予測した上で、その修正計算を並列処理する方針が基本的なアプローチである。当該方針に基づき、先行研究で幅広く用いられている Parareal 法 [Lions et al., C.R.Acad. Sci. Paris, 2001] をベースとした時間方向並列を帯電計算へ適用した。当手法では計算対象の時間領域をプロセス数 N 個の部分時間領域に分割し、それぞれの部分時間領域を異なるプロセスが担当することで、並列に時間発展計算を行う。部分時間領域同士は因果律に基づく依存関係があるため、部分時間領域のつなぎ目で解の不整合が現れる。Parareal 法は各時間

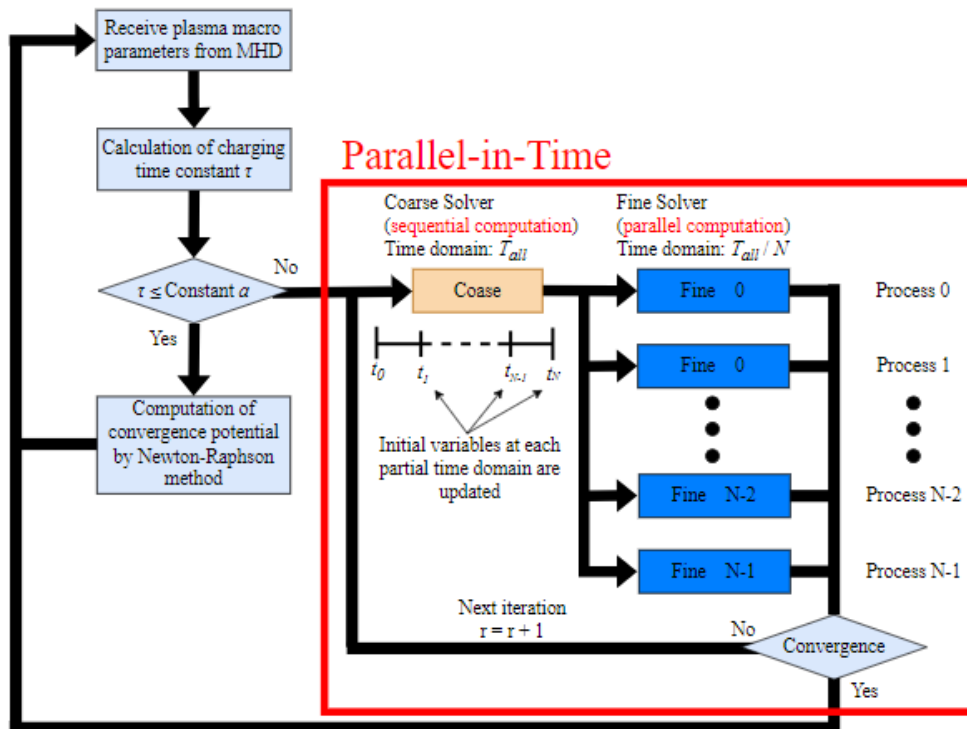


図 1 時間方向並列実装時の衛星帯電計算フロー

領域間の不整合が許容できる程度になるまで反復計算を用いて修正を繰り返す手法である。部分時間領域間の不整合を修正するために時間刻み幅の異なる2種の時間発展計算を行う。一つは、本来計算したい時間刻み幅を用いる細かい積分演算(Fine solver)である。二つ目は、本来計算したいものより大きい時間刻みを用いる粗い積分演算(Coarse solver)である。粗い積分演算は計算コストを抑えつつ、細かい積分演算を近似する役割と部分時間領域間の数値結果の不整合を修正する役割を持つ。

部分時間領域間の数値結果の不整合の修正は、各部分時間領域の初期値を更新しながら電位時間発展計算を反復することによって実施する。修正には、手前の部分時間からFine solverとCoarse solverを解き進めることによってそれぞれ得られる衛星電位値と、一つ前の修正反復におけるCoarse solverに基づく衛星電位値を用い、Newton-Raphson法の考えに基づいて導出した初期値更新式[高見他, 情処研究報告, 2011]を用いる。図1は時間方向並列化を適用した場合の衛星帯電計算フローチャートであり、水流動計算解析に同手法を用いた先行研究を参考にした。各反復においてまず、全時間領域において非並列で粗い積分を行い、各部分時間領域の初期値を更新する。更新された初期値を使用し、部分時間領域毎に各プロセスが細かい積分を並列で計算する。各部分時間領域の境界における数値結果の不整合が許容できる程度になるまでこの2種類の数値計算を繰り返す。

時間方向並列機能を実装した衛星帯電モデルを磁気圏MHDシミュレーションと連成させ、動作検証を実施した。宇宙プラズマ環境としては大規模な地磁気サブストームが発生し、米国Galaxy15衛星の障害発生が報告された2010年4月5日の地球磁気圏環境を想定した。当該環境にGalaxy15とは異なる仮想的な人工衛星が曝されたことを想定し、帯電現象を解析した。AKDKシステムを用い、地球磁気圏グローバルMHD計算に512プロセス、衛星帯電計算に32プロセス、両者の連携を統括する制御プログラムに1プロセスを割り当てて計算を実施した。

図2は地球の蝕に対応する時間帯の衛星構体の電位推移を示したものである。30分ほど継続する蝕の時間帯を通して、衛星構体部が3~4.5 kV程度の負電位に帯電している。当計算結果は、帯電計算に時間方向並列化を適用する前の解と非常に良い一致を示す。実際、並列化実装前後の解の相対誤差を図3に示す。部分時間の接続や解の振る舞いに

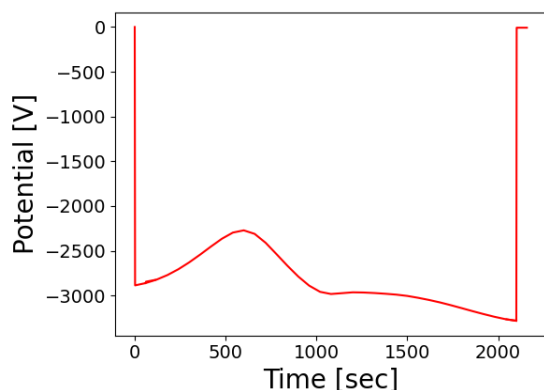


図2 地球の蝕に対応する時間帯における衛星電位のモデル予測値

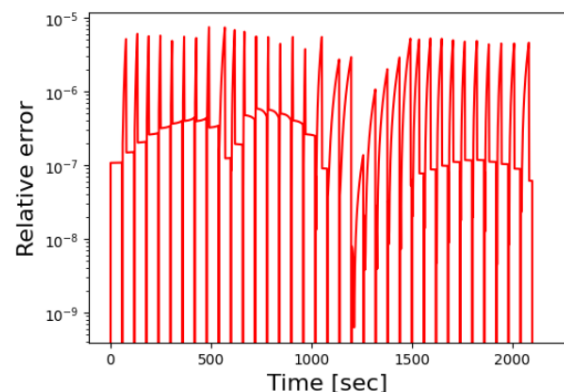


図3 時間方向並列実装前後の衛星電位予測値の相対誤差

応じて誤差は変動するが、その大きさは 10^{-5} 以下に抑えられており、宇宙天気予報で必要とされる衛星帯電評価に照らして十分な精度が確認された。当該計算においては、32 並列実行で平均して 29 倍の速度向上が得られており、時分割に基づく並列実装が有効に機能することが確かめられた。

空間方向に並列度を持たない衛星帯電軽量計算モデルにおいて、時分割に基づく並列化および高速化を達成した。本成果は、リアルタイムの地球磁気圏環境シミュレーションに付加可能な衛星帯電予測モデルの実現可能性を示すものであり、将来の宇宙天気予報システムの高度化への寄与という意味でもその意義は大きい。

公表状況 (Publications) :

(論文)

1. Miyake, Y., J. Nakazono, Y. Miyoshi, Y. Harada, M. N. Nishino, S. Kurita, S. Kasahara, H. Usui, A. Nagamatsu, and S. Nakamura. Micro-scale Electrostatic Structures formed on the Rough Surfaces of the Moon, arXiv, <https://doi.org/10.48550/arXiv.2410.05913>, 2024.
2. Jao, C-S., W. J. Miloch, and Y. Miyake, Collected Current by a Double Langmuir Probe Setup with Plasma Flow, IEEE Transactions on Plasma Science, 52(10), 5222-5233, <https://doi.org/10.1109/tps.2024.3501310>, 2024.
3. Nakazono, J., and Y. Miyake, Size-Dependent Surface Charging of Lunar Cavities exposed to the Solar Wind, J. Geophys. Res., Journal of Geophysical Research, 130(2), <https://doi.org/10.1029/2024JA033490>, 2025.
4. 田中唯逸, 三宅洋平, 南里豪志, 深沢圭一郎, 加藤雄人, 地球磁気圏－人工衛星環境連成解析に向けた衛星帯電計算の時間方向並列化の検討, 研究報告ハイパフォーマンスコンピューティング (HPC) , 2024-HPC-197, 4, pp. 1-8, 2024.

(口頭)

1. Miyake, Y., J. Nakazono, and J. Deca, Anticipated Micro-scale Electrostatic Structures formed on the Rough Lunar Surface exposed to Space Plasma, AGU Annual Meeting, Washington DC, December 2024.
2. Miyake, Y., J. Nakazono, Y. Miyoshi, Y. Harada, M. N. Nishino, S. Kurita, S. Kasahara, S. Nakamura, A. Nagamatsu, and H. Usui, Micro-scale Electrostatic Structures formed on the Rough Surfaces of the Moon, 17th Spacecraft Charging Technology Conference (SCTC), Avignon, June 2024.
3. 三宅洋平, 三好由純, 原田裕己, 西野真木, 栗田怜, 笠原慧, 臼井英之, 永松愛子, 奥村哲平, 豊田和弘, 中村紗都子, 月面静電気・放射線調査チーム(LERIT), 月面帯電環境の計測と評価, 惑星圏シンポジウム 2025, 仙台, March, 2025. (招待講演)