

小型天体・太陽風プラズマ相互作用過程の 超並列粒子シミュレーション

代表者氏名： 三宅 洋平（神戸大学計算科学教育センター）

共同研究者： 西野 真木、梅田 隆行（名古屋大学）

白川 遼、白井 英之（神戸大学）

本研究は、名古屋大学 FX100 を用いた大規模高並列プラズマシミュレーションにより、月や小惑星などの「小型天体」と太陽風プラズマ間の相互作用を定量的に理解することを目的とする。本研究で用いる粒子シミュレーションは、並列プロセス間の動的負荷分散処理や、マルチカラスケジューリングを用いたアクセス競合回避に基づく共有メモリ並列化、そしてカーネル処理である速度・電流ルーチンの SIMD 最適化実装など、次世代の階層型計算機アーキテクチャを見据えたプログラム最適化を精力的に進めてきた。これまでに階層毎個別の最適化手法を組み合わせた分散／共有メモリ並列・SIMD ハイブリッド実装をほぼ完了し、主要な計算カーネルで期待通りの性能が確認された。一方で、動的負荷分散に必要となる MPI 集団通信処理の最適化はやや難航しており、数値アルゴリズムそのものの見直しも必要な状況となっていた。R01 年度はプラズマ粒子シミュレーションに必要な電磁界ソルバーに半陰解法を導入することにより、従来の陽解法に比べて大きな時間刻み幅を設定可能なプログラムに改良した。これにより、問題に応じて約 10 倍の高速化ゲインを得ることに成功した。

これと並行して大規模な 3 次元プラズマ物理シミュレーションにより以下の成果を得た。宇宙空間を満たす電離気体であるプラズマが、人工衛星や固体天体と接触する界面では、プラズマの本来持つ電荷中性条件が破れ、静電的な乱れが卓越する。この固体プラズマ境界層の物理は、人工衛星の帯電や、宇宙環境計測の誤差要因、などの観点で過去から研究が盛んに行われてきた。一方で、こうしたじょう乱の拡がりや、せいぜいプラズマの最小特性長であるデバイ長（典型的な電離圏環境では数 cm）程度であまりに小さいため、宇宙空間物理学の側面からは、その重要性が過小評価されてきた側面がある。本研究では、極域電離圏特有の強力な地磁気が電子の輸送方向を一方向に制限することで、人工衛星の表面で発生した乱れが高い指向性をもって、長距離に渡って伝播することを初めて数値シミュレーションにより突きとめたこの予測結果をオスロ大学が保持している極域衛星観測データベースと照らし合わせることにより、磁場効果による静電的な乱れが、人工衛星表面から数 100 デバイ長以上離れた領域に波及することを実証した。（<https://eos.org/research-spotlights/electron-wings-can-interfere-with-spacecraft-measurements>）。この知見は、人工衛星のみならず、月などの非磁化固体天体周辺のプラズマ環境にも応用可能である。