

# 小型天体表面・太陽風プラズマ相互作用過程の高並列粒子シミュレーション

三宅洋平<sup>1</sup>、西野真木<sup>2</sup>、臼井英之<sup>1</sup>

1. 神戸大学大学院システム情報学研究科、2. 名古屋大学太陽地球環境研究所

**概要** 九州大学 Fujitsu CX400 を用いた大規模高並列プラズマ粒子シミュレーションにより、人工衛星や月などの「小型天体」表面と太陽風プラズマ間の相互作用を解明する。具体的には、月面に相当する固体表面境界をプラズマ空間内部に設定できる衛星プラズマ環境シミュレーター EMSES を用いて、近年かぐや衛星観測で発見された月縦孔と、太陽風プラズマ・光電子間の相互作用を解析する。これに加えて、独自の動的負荷分散手法 OhHelp を適用した EMSES コードに関して、高効率なマルチスレッディング実装法を探求し、MPI/OpenMP ハイブリッド方式による高効率化を目指す。これらの取り組みを通してプラズマ粒子シミュレーション計算のさらなる高度化に向けた技術的知見を得ることを目標とする。

## 1. 研究の目的と意義

本研究の目的は、九州大学 Fujitsu CX400 を用いた大規模高並列プラズマ粒子シミュレーションにより、人工衛星や月などの「小型天体」表面と太陽風プラズマ間の相互作用を解明することである。人工衛星や月面などの非プラズマ物体周辺のプラズマは境界領域プラズマと呼ばれ、シースや光電子層、電位バリア形成といった著しい空間非一様性を有するため、その全容はいまだに理解されていない。本研究では、近年「かぐや」衛星観測で発見され、将来の着陸探査対象や月面基地建設候補地として注目が集まっている月面上の縦孔に着目する。複雑な形状を有する月固体表面と太陽風プラズマとの電気力学的相互作用を自己無動着に解き進め、縦孔周辺静電環境の 3 次元描像を明らかにする。本研究によって得られた月面周辺でのプラズマ静電環境と、「かぐや」衛星観測による月上空のグローバルなプラズマ電磁環境のつながりを考慮することで、月プラズマ環境を包括的に理解することが可能になると期待される。

これに加えて、数値シミュレーション手法としてのプラズマ粒子 (Particle-In-Cell) 計算の高度化にも取り組む。次節で紹介するように、本課題で用いている衛星プラズマ環境シミュレーター EMSES は領域分割に基づく Flat-MPI 並列化が施されており、分散メモリ型並列計算機による大規模計算が可能である。また単純な領域分割法では粒子の空間的な粗密による負荷不均衡が常に問題となるが、

EMSES にはこれを解決するための動的負荷分散技法 OhHelp が実装されており、これまでに「京」コンピューター、九州大学、京都大学、名古屋大学の大規模並列計算機システム上で高効率の並列計算を行ってきた実績がある。当該シミュレーションコードのさらなる性能向上のために、共有メモリ並列化や SIMD-aware な計算アルゴリズムの開発などアーキテクチャ階層を意識した最適化が必要である。本レポートでは共有メモリレベルにおける高効率マルチスレッド実装法確立に向けた最近の取り組みを紹介する。

## 2. 計算手法の概要

衛星プラズマ環境シミュレーター EMSES は 3 次元電磁粒子シミュレーション法を基本とし、これに固体表面の内部境界の扱いを導入したものとなっている [1]。計算空間は格子によって離散化されており、電磁場と電流/電荷密度場はオイラー量として格子点上に定義される。一方、プラズマ分布関数は連続的な位置座標を取りうる代表粒子によって記述される。そしてこれらの粒子と場の量は Particle-In-Cell と呼ばれる手法により互いに結び付けられる。基礎方程式としては、電磁場発展を記述する Maxwell 式と荷電粒子ダイナミクスを記述する運動方程式が用いられ、これらを相互に解き進めることによりプラズマと電磁場間の相互作用を自己無動着に再現する。

EMSES の分散メモリ並列は、均等領域分割に

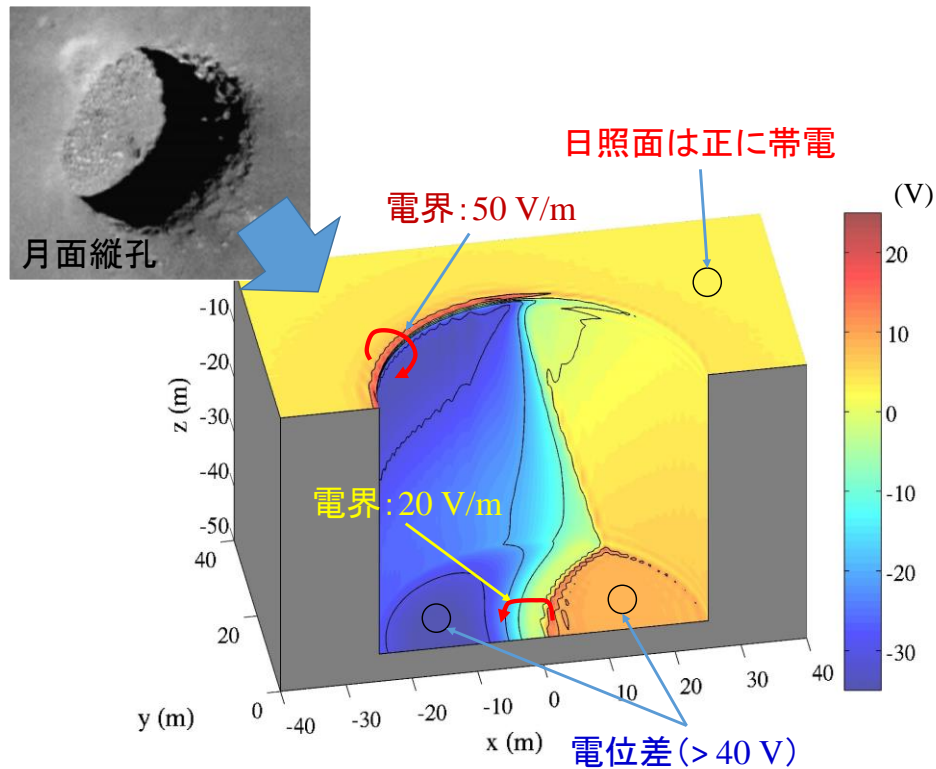


図 1: かぐや衛星によって発見された月縦孔表面の電位分布に関する大規模シミュレーション。

に基づいており、各 MPI プロセスは分割された各部分領域とそこに含まれる粒子に関する処理を担当する。しかしこの単純な領域分割法のみでは粒子の空間的な粗密による負荷不均衡が問題となる。そこで OhHelp では、一つのプロセスを除く全てのプロセスが本来の担当 (1 次担当領域) とは別の部分領域を一つだけ担当し (2 次担当領域)、その領域に含まれる粒子の一部分について電磁場との相互作用計算を行うことで、この問題を解決している [2]。これに加えて、OhHelp 特有の粒子移送パターンを考慮して低コストな MPI 通信方式を考案し、さらなる最適化を行った [3]。前年度の同プロジェクトでは、CX400 を用いた 2048 プロセスまでの並列実行で良好なスケーラビリティが得られることを確認済みである。

### 3. シミュレーション成果

「かぐや」衛星による地形カメラ観測により、月のマリウス丘、静の海、賢者の海に、特徴的な縦孔構造が発見されている。縦孔のサイズは直径、深さともに、50~100 m に及び、太陽風

プラズマや月表層光電子層のデバイ長と同程度あるいは十分に大きいため、その周辺では特異なプラズマ静電環境が形成されていると予想される。このような縦孔構造や地下空洞を直接探査する UZUME 計画が立案されている中、将来のローバー探査への影響を知る上でも縦孔周辺プラズマ環境を事前評価することは重要である。

本研究では、縦孔構造を模した月面を含む 3 次元計算空間内に上空から太陽風プラズマが様々な角度で入射する状況を想定する。また月面からは太陽光照射の有無や、その入射角度を考慮した光電子放出を模擬する。この月面近傍の光電子層の特徴的空間スケールを解像しつつ、上空 1 km までの広がりを持つ背景宇宙プラズマダイナミクスを 3 次元計算で追うためには、九州大学 CX400 システムで提供されるような大規模な計算資源を要する。具体的には  $416 \times 416 \times 2048$  格子点、 $2.5 \times 10^{10}$  超粒子数の計算を実施するため CX400 の 128 ノード分を利用して計算を行った。

図 1 は、EMSES コードによって得られた月

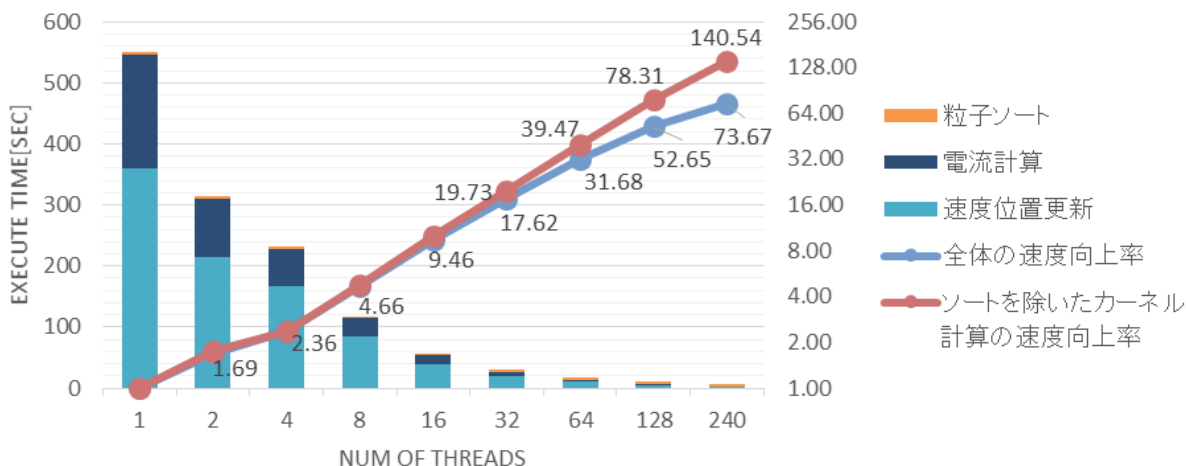


図 2: 領域分割に基づくマルチスレッド実装コードの並列性能評価

縦孔周辺の表面電位分布のシミュレーション結果例である。計算結果より、太陽光照射（光電子放出）や太陽風イオン流照射の有無が原因となり、日向と日陰では表面電位は大きく異なることが確認された。またこの電位差に伴って日向一日陰境界では、数 10 V/m の電界が発生した。その強度は通常のクレーターで想定される電界強度より 1 桁大きく、月面着陸調査のための探査機設計において考慮すべき点である。

これに加えて今回のシミュレーションで新たに得られた知見として、同じ日向という条件下でも、縦孔の外部と内部では表面電位が異なることが判明した。縦孔周辺のプラズマダイナミクスを詳細に解析することにより、この電位差は縦孔底部と外部に到達する太陽風プラズマ電子フラックスの違いと、縦孔の側壁から放出される光電子の底部への流れ込みによって説明されることを見出した。この結果は、月縦孔内部のプラズマ静電環境の特異性を示すものとして注目すべき結果である[4]。

#### 4. 計算コードの高度化および性能評価

OhHelp 適用済プラズマ粒子コードのハイブリッド並列実装に向けた検討として、計算負荷の大部分を占める電流計算に着目し、スレッド並列化を高効率に実現する方法を探求した。電流計算では、各粒子がつくる電流値を、それらの位置座標に隣接する格子点に加算していく。電流密度配列

に対するアクセスパターンは未知数である粒子位置に依存するため、マルチスレッド実装時のアクセス競合に注意を要する。

アクセス競合を回避する方法としては、粒子群をそれらが所属する領域に応じてグループ分けし、各スレッドが互いに異なる領域に属する粒子の電流計算を担当すればよい。これは領域分割の発想に基づいており、前年度に検討した粒子分割実装に対して、スレッド個数分の `private` 電流配列が不要になるというメリットがある。ただし、領域分割法においても、小領域の境界付近ではアクセス競合が発生しうするため、それを回避するための緩衝領域が必要となる。なお、緩衝領域を要しない別の実装として、色付けを用いる方法があり、これについても現在検討を進めているがその性能評価は今後の課題とする。また領域分割法では粒子ソーティングが必須であるが、これについては分布数え上げソートを利用した。

実装法による性能の際は高スレッド並列時に顕著になると予想されるため、別途 Intel Xeon Phi を搭載したシステムで評価を実施した。領域分割を行わない 1 プロセス実行とし、スレッド並列数を 1~240 の間で変化させてシミュレーター性能を測定した。シミュレーション領域は  $64^3$  格子点からなる立方体の 3 次元空間とし、その中に電子  $2^{24}$ 、イオン  $2^{24}$  の合計  $2^{25}$ （およそ 3400 万）の粒子をランダムに配置した。

図 2 に今回実施した Strong scaling 方式による

性能評価の結果を示す。前年度に行った粒子分割方式では数 10 スレッド数で顕著な性能の飽和がみられたが、今回実装した領域分割方式ではそのような傾向はみられない。電流計算と速度位置更新の部分のみに着目すると、8 スレッドと 240 スレッドにおける並列効率はそれぞれ 60% と 59% であり、その間ではほとんど劣化していないことから、良好なスケーラビリティが得られていることがわかる。一方、領域分割実装のために必要となるソーティングを含めて考えると 240 スレッドでの並列効率は 31% と劣化する。現状ではソート部分は並列化されておらず、また毎ステップ実施しているため、高スレッド実行でそのコストの影響が顕著になっている。

本年度の検討により、プラズマ粒子計算カーネル部分のスレッド並列化について、良好なスケーラビリティを実現する道筋が見えた。懸案のソーティングのコストに関しては、並列ソートに関する先行研究を調査していく予定である。

## 5. 今後の展望

先端的計算科学研究プロジェクトによる九州大学 CX400 計算機資源を活用して、科学衛星の月探査により発見された縦孔と太陽風プラズマの電磁的相互作用に関する大規模粒子シミュレーション解析を実施した。その結果、太陽光や太陽風プラズマの照射の条件が異なる日向と日陰、もしくは縦孔外部と内部の間で月面帯電量が大きく異なることが確認された。この電位差に起因するローカル電界は月表面付近に存在する帯電微粒子（ダスト）のダイナミクスにも大きな影響を及ぼすことが予想される。月面付近のダストは探査機の故障や人間の健康被害を引き起こすなど、将来に計画される無人もしくは有人の月面探査に大きな問題に浮上する可能性が指摘されている。本シミュレーション解析に続いて、縦孔電磁環境下でのダスト挙動解析を行うことにより、そういった悪影響が定量的に予測できれば大きな実用的価値がある。報告書では月と太陽風プラズマに関する研究事例を紹介したが、太陽探査衛星などの人工衛星と宇

宙プラズマの相互作用に関しても同様の研究を継続しており、将来の衛星計画にフィードバック可能な定量的知見が得られつつある[5]。こうした結果は、科学衛星による宇宙環境計測の信頼性を担保する上で重要な知見であり、宇宙空間の電磁環境の解明にも大いに役立つと期待される。

また計算科学的観点からは、OhHelp 技法により既に分散メモリ並列に対応した EMSES シミュレーターについて、さらなる計算コードの高度化を目指して高効率マルチスレッド実装の検討を行った。プラズマ粒子シミュレーション特有の演算フローとデータアクセスパターンを考慮した複数の実装を試すことにより、CX400 に搭載されるマルチコアプロセッサのみならず Xeon Phi に代表されるメニーコアプロセッサにおいてもスケール可能な並列化手法を見出した。H27 年度の同プロジェクトでは、これらの実装を Xeon Phi を搭載する HA8000 システム上で性能評価する予定である。

## 6. 文献

### (1) 参考文献

- [1] Miyake and Usui, Phys, Plasmas, 16, 062904, 2009.
- [2] Nakashima et al., Proc. 23rd ICS, 90-99, 2009.
- [3] Miyake and Nakashima, Proc. 11th IEEE ISPA, 2013.

### (2) 当該プロジェクトによる研究成果

- [4] Miyake, Y. and M. N. Nishino, Electrostatic environment near lunar vertical hole: 3D plasma particle simulations, submitted.
- [5] Marchand, R., Y. Miyake, H. Usui, et al., Cross-comparison of Spacecraft-environment Interaction Model Predictions Applied to Solar Probe Plus near Perihelion, Phys, Plasmas, 21, 062901, 2014.