

宇宙飛翔体・極限宇宙プラズマ環境相互作用の 高並列粒子シミュレーション

三宅洋平、臼井英之（神戸大学）

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、地球・太陽間に存在する極限宇宙プラズマ環境と宇宙飛翔体の相互作用過程を解明する。具体的には、太陽探査衛星 Solar Probe Plus が到達予定の太陽コロナ環境に着目し、衛星壁に相当する非プラズマ境界を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、衛星周辺プラズマ擾乱の現象再現と衛星帯電特性の定量評価を行う。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、MPI/OpenMP ハイブリッド方式の導入などさらなる高効率化に向けた検討を開始する。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超並列化に関する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、地球・太陽間に存在する極限宇宙プラズマ環境と宇宙飛翔体の相互作用を定量的に理解することである。宇宙飛翔体とプラズマ間の相互作用は、太陽からの距離や地球磁気圏内の領域毎に全く異なる様相を示す。本研究では、太陽探査衛星 Solar Probe Plus が到達予定の太陽コロナ環境や地球磁気圏中でも極端に希薄なプラズマ領域となっている磁気圏ローブ領域に着目し、飛翔体周辺のプラズマ密度・電位構造や非定常のプラズマじょう乱の様相を明らかにする。またその結果、引き起こされる衛星帯電や観測装置誤差を定量的に評価する。本研究によって得られた結果は、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、ひいては宇宙空間のプラズマ電磁環境の解明にも貢献可能なものである。

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。次節に紹介するように、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、これまでに京都

大学や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性能評価を CX400 上で実施するとともに、新たに OpenMP スレッド並列を含めたハイブリッド並列実装の試みを開始したのでその進捗についても紹介する。

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、これに宇宙飛翔体の金属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。また EMSES は、宇宙飛翔体の金属表面を内部境界として取り込む機能を有しており、帯電などの飛翔体プラズマ相互作用を取り扱うことが可能である。

EMSES の並列化に関しては、基本的には均等領域分割法を踏襲しており、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關す

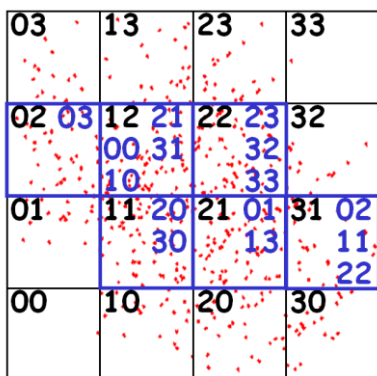


図 1: OhHelp アルゴリズムにおける 1 次担当領域 (黒字のプロセス番号) および 2 次担当領域 (青字のプロセス番号) 割り当ての一例。

る処理を担当する。ただしこの簡明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 EMSES に実装されている動的負荷分散技法 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 (図 1) [2]。これに加えて、申請者らが OhHelp 特有の粒子移送パターンに対して最適な MPI 通信方式を考案した結果、粒子が不均一な状態での高並列計算においても高いスケラビリティを示すことが実証された[3]。

3. 計算コードの高度化および性能評価

EMSES-OhHelp コードの現状把握として、まずは従前の Flat-MPI 並列実装を変更せずに CX400 上で性能評価を行った。プロセス数に比例して全体の領域サイズと粒子数を増加させる Weak Scaling の手法により実施し、CX400 計算ノードの 1 演算コアに 1 プロセスを割り当てた。プロセスあたりの領域サイズを 32^3 の立方体に固定し、最大で 2048 の MPI プロセス数に対して測定を行った。シミュレーション領域中の粒子の分布としては一様分布と極端に不均一な分布を想定した。ここで「極端に不均一」とは、初期状態において全粒子が単一の部分領域に集中しており、時間の経過とともにその粒子群が z 軸方向に移動し

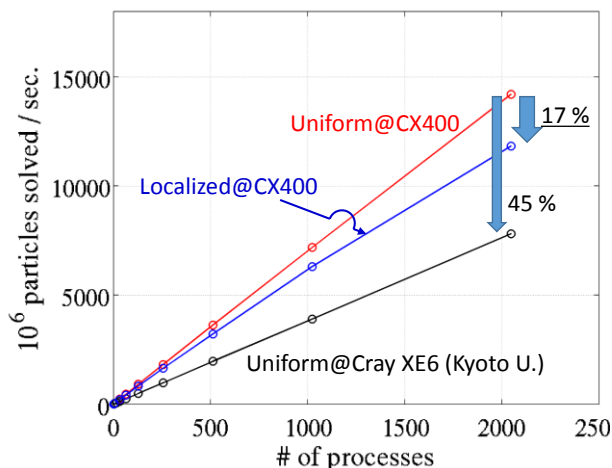


図 2: EMSES-OhHelp コードの Weak Scaling 性能. 1 秒あたりに処理された粒子個数を性能指標として採用している。

ていく条件を示しており、OhHelp の負荷分散機構が効果を発揮する設定である。

図 2 に、前述の 2 種類の粒子分布で測定したシミュレーションコードの性能を示す。参考のために過去に京都大学 Cray XE6 システムにおいて一様粒子分布の条件で測定した性能も掲載する。図より、いずれのケースにおいても、2048 までの並列度において性能は飽和することなく増加していることがわかる。粒子配置を著しく不均一にした場合の性能低下は 17% 程度であった。これに関しては OhHelp がおよそ 15% の負荷不均衡を許容する設定でシミュレーションを実行していること、そして負荷均衡化に関わるオーバーヘッドがさらに加わることを考慮すると妥当な結果である。また京都大学 XE6 システムとの比較では、九州大学 CX400 は 2 倍弱の性能が出ていることが確認できる。これに関してもコアあたりの理論ピーク性能が XE6 において 10 GFlops であるのに対して、CX400 では 22 GFlops であることを考慮すると、妥当な結果だと評価できる。

次に EMSES-OhHelp のハイブリッド並列実装導入に向けた検討として、計算ノード内演算の OpenMP スレッド並列化と、その初期性能評価を開始した。事前の調査により、プラズマ荷電粒子の電流密度計算部分が全計算負荷の 90% 以上を占めることが判明している。

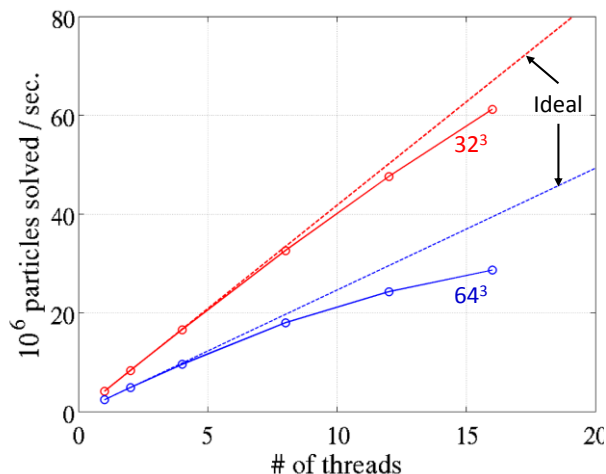


図 3: スレッド並列化された電流計算および速度・位置更新部分の性能. 破線は各々の領域サイズにおける理想直線.

電流密度計算では、おのおのの粒子がつくる電流要素を、それらの位置座標に隣接する格子点に配分する（格子点上の電流値を更新する）形で計算が行われる。このことはシミュレーション中に時々刻々値が変化する粒子位置座標によって決定される格子点上にアクセスが発生することを意味する。このような処理においてスレッド並列化時の整合性を保証する直観的な実装として、電流密度配列をスレッド個数分だけ複製し、各スレッドがアクセスする配列を完全に `private` にする方法がある。これはいわゆる粒子分割の発想に基づいており、並列計算部分の終了時に各スレッドが計算した電流密度データの `Reduction` 操作が必要となる。電流密度計算および速度・位置更新の部分のみを繰り返し行う基礎評価用の縮小版コードを作成し、上述の方針に基づき、粒子配列を走査するループを `OpenMP` で並列化した。

この性能評価においては 1 プロセス実行とし、スレッド並列数を 1~16 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 32^3 もしくは 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 3 に今回実施した `Strong scaling` 方式による性能評価の結果を示す。いずれの領域サイズでもスレッド数の増加に伴って理想直線からのずれ

が見られ、性能が劣化する傾向がみられる。この原因としては並列数が多くなるほど `Reduction` 等のオーバーヘッドの寄与が顕著になるためである。これを裏付ける結果として、領域サイズが 64^3 の場合の方が 32^3 の場合に比べて性能劣化が著しい。

今回の結果を踏まえると、電流密度計算部分の `OpenMP` スレッド並列にはまだ改善の余地があると考えられる。具体的には、領域分割の発想に基づく並列化を階層化してプロセスレベルのみならずスレッドレベルにも導入する方法が考えられ、この点については今後の課題である。

4. シミュレーション成果例

現在 NASA を中心に太陽コロナの「その場」観測を目指す `Solar Probe Plus` 衛星計画が進行中であるが、人類未踏の領域である太陽近傍環境における衛星プラズマ相互作用の実態は未解決である。そこでこれまで開発を進めてきた大規模プラズマ粒子シミュレーション技術を当該問題に適用した。通常、宇宙プラズマダイナミクスの空間スケールとしては電子デバイ長が最小単位となるが、衛星近傍の高密度プラズマ領域では、この電子デバイススケールが数 `cm` と極端に小さくなる。この衛星近傍の微細スケールを解像しつつ、最低でも数 `m`~数 `10 m` 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多大な計算資源を要する。具体的には $384 \times 384 \times 768$ 格子点、 1.4×10^{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 4 は、`EMSES` コードによって得られた `SPP` 衛星周辺の空間電位分布のシミュレーション結果である。計算結果より衛星の定常電位は -20.5 V となり、背景プラズマと比較して負に帯電していることが確認された。またシミュレーション結果の詳細解析により、衛星表面に存在する超高密度の光電子および二次電子層が負の電位バリアを形成しており、それにより衛星表面から一旦放出された大量の光電子や二次電

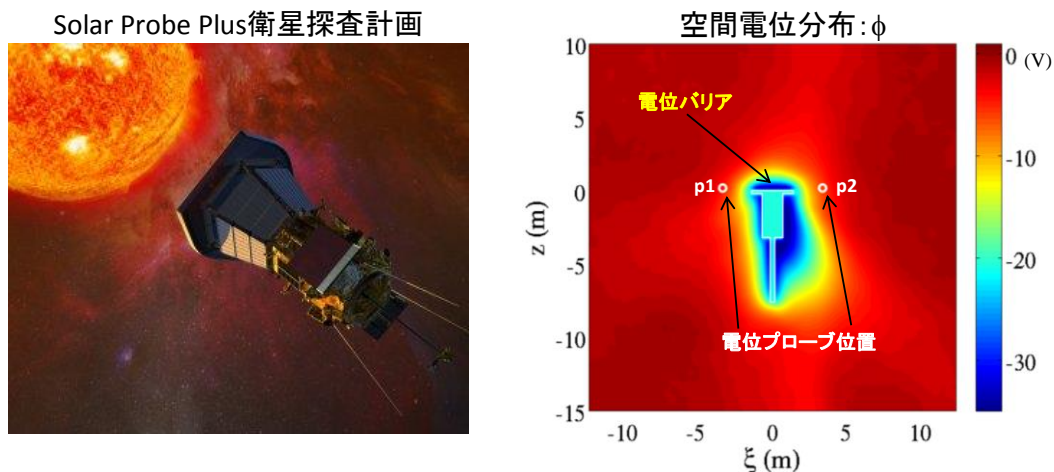


図 4: 科学衛星と太陽コロナプラズマの相互干渉に関する大規模計算機実験

子のほとんどが衛星表面に押し戻されてしまうことが判明した。衛星から光電子が放出される条件下では、一般的に衛星は正に帯電すると理解されているが、今回、逆に負に帯電するという知見が得られたことは、太陽近傍環境での衛星帯電の特異性として注目すべき結果である。

この結果に加え、衛星上部の太陽放射シールド面から放出される光電子大電流により、衛星周辺の磁場強度が変化することも確認された。これは、電磁的相互作用を自己無動着に考慮した EMSES シミュレーションならではの結果であり、従来の衛星プラズマ相互作用数値研究ではこの観点からの解析はほとんどなされていなかったため、その意義は大きい。

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、太陽近傍等の極限プラズマ環境と科学衛星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、通常とは異なる衛星帯電の極性や光電子電流によるローカル磁場変動など、極限環境特有の衛星プラズマ相互作用を確認した。この結果は学術的な意義のみならず、将来に計画される衛星探査ミッションで予想される衛星プラズマ環境じょう乱を定量的に予測するものとして実用的価値がある。報告書では太陽近傍衛星に関する研究事例を紹介したが、地球磁気圏探査衛星に関して

も同様の研究を実施し、亜音速プラズマ中で発生するスプリアス電場形成メカニズムについての研究成果を発表予定である。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、既に導入済であったプラズマ粒子シミュレーション用動的負荷分散技法 OhHelp が CX400 環境でも有効であることを確認した他、さらなる計算コードの高度化を目指してハイブリッド並列実装の検討を開始した。現在までに得られているスレッド並列性能結果は必ずしも十分なものではないが、今回の課題実施がプラズマ粒子シミュレーションの超並列化に向けた足がかりとなるに間違いない。

6. 文献

(1) 当該プロジェクトによる研究成果

Marchand, R., Y. Miyake, H. Usui, et al., Cross-comparison of Spacecraft-environment Interaction Model Predictions Applied to Solar Probe Plus near Perihelion, submitted.

(2) 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.