

## 研究課題別中間評価結果

1. 研究課題名：惑星間航行システム開発に向けたマルチスケール粒子シミュレーション

2. 研究代表者：白井 英之（神戸大学大学院工学研究科 教授）

### 3. 研究概要

惑星間宇宙航行システムとして宇宙航空研究開発機構（JAXA）で提案されている磁気プラズマセイル（MPS）では、宇宙機の周辺に人工的なダイポール磁場による小規模磁気圏を作り、それをプラズマ噴射によって広範囲に展開させて太陽風を受け止めることにより衛星が推力を得る。本研究では、この MPS 原理検証および推力評価をプラズマ粒子シミュレーションで行うとともに、局所高解像度シミュレーション実現のためにマルチスケール粒子シミュレーション手法の基盤構築を行っている。

MPS 解析では、プラズマ流－人工磁気圏の相互作用解析のために実施されている JAXA 真空チャンバー実験と連携し、ハイブリッド粒子シミュレーションによる磁気圏形成、推力評価を行っている。また、衛星からのプラズマ噴射によるダイポール磁場構造展開解析も粒子シミュレーションを行い、電場や電流の詳細解析による磁場展開プロセスの定量理解を深めている。またマルチスケール粒子法開発では、適応型細分化格子（AMR）や Nested-grid を従来のプラズマ粒子法に導入し局所高解像度シミュレーションの実現を目指している。AMR 粒子コードは基本ルーチン開発がほぼ終わり、現在その調整とプロトモデル作成を行っている。今年度から並列チューニングを理化学研究所の協力のもとで開始し、開発ルーチンの並列化適応解析を行っている。

### 4. 中間評価結果

#### 4-1. 研究の進捗状況及び研究成果の現状

本研究は、適応メッシュ法（AMR）とプラズマ粒子シミュレーションを組み合わせたシミュレーション手法を開発し、それを宇宙航行システムに適用しようとするものである。

当初の研究計画から見た進捗状況や達成度等に関しては、現在までのところは、プラズマ粒子法における AMR の実装に成功し、また FTT（Fully Threaded Tree）法の並列化適応解析と並列手法検討などの実装も新たな研究項目として追加され、手法の開発及び実験による検証共、計画通り順調に進んでいる。

新たな方向性や方針変更等、当初計画では想定されていなかった新たな展開が生じたかに関しては、ペタコンへのチューニングにおいて、FTT（Fully Threaded Tree）構造の並列化についての目途を得ており、望ましい展開となっている。

成果の科学的・技術的インパクト、国内外からの類似研究と比較したレベルや重要度という点に関しては、粒子シミュレーションとしては、現状ではまだインパクトがやや弱く、標準的であると考えられるが、新方式（FTT 構造の並列化）での高度並列化には多いに期待が持てる。惑星科学や磁気圏物理学などに対して理学的、科学的インパクトはあると考えられる。本研究で精力的に開発を進めている階層型非一様格子システムに PIC 粒子法を融合させるマルチスケールプラズマ粒子シミュレーション手法が確立すれば、空間格子を階層化し、局所的に空間分解能を動的に上げた粒子シミュレーションが可能となり、計算機資源の節約と演算の高速化が期待できる。これは、従来のプラズマ粒子シミュレーションのブレイクスルーとなるものであり、その基盤確立は数値手法の観点からみて非常にインパクトがあるものとなる。本研究は、粒子シミュレーションによってプラズマ運動論効果を考慮することにより、イオンの有限ラーマ効果が MPS の推進原理や性能に与える影響をより定量的に理解して、実際のシステム設計に役立つ基礎データを取得するという点で、これまでの MPS 研究とは一線を画すと考えられる。

研究実施体制については、JAXA 実験グループなどとの連携がよくとられており、体制に関しては問題なく、代表者も良くリーダーシップを発揮している。

研究費の執行については、人件費が主で、妥当である。実験チームが含まれていることから、予想外の費用が発生することが想定される。今後の予算の執行については注意する必要がある。

#### 4-2. 今後の研究に向けて

今後の研究の進め方については、AMR 粒子プラズマ法でしかできない、粒子不安定性に起因する磁気乱流の高精度シミュレーションを、まずやってみせる必要がある。大規模並列化にめどを得たようなので、このコードでしかできない物理現象のシミュレーションをするため、問題設定のチューニングをする必要がある。理化学研究所の協力によるソフトウェアの並列化チューニングがどの程度の成果を生じるか注目したい。特に、メッシュの作成、粒子の移動に伴う場の更新、それによるポインターの更新など、演算以外のところで大きなオーバーヘッドを伴う可能性があるため、超大規模並列システムで効率よい実行が出来るよう十分な検討とチューニングを行うことを望む。MPS の原理検証等をシミュレーションで行うことを目的としていることから、実験による検証についても、十分に実施されることを望む。この場合、実験精度よりもシミュレーションのほうが精度が良い、或いは実験では出来ないことから、逆にシミュレーション精度を見極めること(実際との誤差の範囲)が重要である。これにより実際のシステム開発に、より有効にシミュレーション結果が利用できることとなろう。新しい研究分野を開拓している状況であることから、研究の方向性、実施体制、研究費等について、不断に見直しを行い、柔軟に変更して実施することを望む。各グループが個別の視点で研究を行っている印象が若干だが見受けられるので、最終的にどのように統合されていくのかについて意を注ぐ必要がある。またマルチスケールの視点の強化が必要である。チーム内での相互理解のみならず、関連する研究コミュニティとの連携や情報共有を適切に実施することが重要である。論文発表及び国際会議招待講演が少ないので、一層の努力が望まれる。

今後見込まれる成果、戦略目標に向けての貢献、成果の社会的なインパクトの見直しについては、プラズマセルシミュレーションによる実現性検討が可能になり、JAXA の期待に応えること、リコネクションを含む、プラズマ物理の基本問題を解くことが期待される。実験と理論のすり合わせを一層十分に行うことで社会的なインパクトを得る事が可能になる。宇宙推進という夢のあるテーマが本マルチ領域に含まれていることに価値があり、社会的な関心も持たれると感じる。また、粒子の特徴的スケールがダイナミックに空間的・時間的に変動する巨視的問題に対処する必要十分な情報を担保する新奇なアルゴリズムの一つとして、この研究チームが取り上げる AMR-PIC 法に期待している。AMR-PIC 法の汎用化により、プラズマプロセスや核融合などへの応用も期待できる。

#### 4-3. 総合的評価

本研究は、適応メッシュ法 (AMR) と粒子シミュレーションを組み合わせたシミュレーション手法を開発し、それを宇宙航行システムに適用しようとするものである。現在までのところ、プラズマ粒子法における AMR の実装に成功し、また FTT (Fully Threaded Tree) 法の並列化適応解析と並列手法検討などの実装も新たな研究項目として追加され、手法の開発及び実験による検証共、計画通り順調に進んでいると評価できる。

現時点での主な成果は、①実験では、実験自身が宇宙空間には無い影響が含まれ、実験が宇宙空間の状況を再現していないことが確かめられたこと、②シミュレーション手法の基本部分がほぼ完成に近づいていること、③大規模計算のための分析結果が出つつあること、などであり、今後大きな研究成果が出るが見込まれる。

本研究で精力的に開発を進めている階層型非一様格子システムに PIC 粒子法を融合させるマルチスケールプラズマ粒子シミュレーション手法が確立すれば、空間格子を階層化し、局所的に空間分解能を動的に上げた

粒子シミュレーションが可能となり、計算機資源の節約と演算の高速化ができる。これは、従来のプラズマ粒子シミュレーションのブレイクスルーとなるものであり、その基盤確立は数値手法の観点からみて非常にインパクトがあるものとなる。本手法の確立を期待している。

最後に、社会的に理解されやすい夢のあるテーマなので、既存手法の改良に留まらない次世代スパコン上での発展を期待する。