

11-NA26

超並列宇宙プラズマ粒子シミュレーションの研究

大村 善治 (研究課題責任者・京都大学)、
三宅洋平 (神戸大学)、小路真史 (宇宙航空研究開発機構)、臼井英之 (神戸大学)、
中島浩 (京都大学)、岩下武史 (京都大学)

概要 Particle-in-Cell (PIC) 方式に基づく宇宙プラズマ粒子シミュレーションの大規模クラスタ型システムにおける効率的な並列計算を実現するため、高度な動的負荷分散技法や並列計算手法の適用を推し進める必要がある。本課題では、シミュレーション全般にわたる負荷分散戦略については、従来と同様に動的負荷分散機構 **OhHelp** を踏襲し、粒子移送や負荷均衡検査等にかかるオーバーヘッドを削減する最適化により、性能のさらなる向上を目指す。本レポートでは前回の中間報告には含まれなかった、1024 プロセス並列までの性能評価結果を報告する。高速化を行ったシミュレーションコードの実応用の一環として、全粒子シミュレーションを行い、衛星周辺で想定される電子スケールの宇宙プラズマ擾乱を数値的に再現することに成功した。また、これらの擾乱がプラズマ中電場観測など衛星ミッションに与える影響について評価を行った。一方で、イオンスケールの現象解析としては、粒子・流体ハイブリッドシミュレーションを行い、太陽風中の特異な局所的磁場構造の再現に成功したのに加え、そうした磁場構造の原因となる素過程であるミラー不安定性の成長メカニズム解明につながる計算結果を得た。

1. 研究の目的と意義

本研究の目的は、Particle-in-Cell (PIC) 方式に基づく宇宙プラズマシミュレーションを対象に、T2K オープンスパコンに代表される大規模クラスタ型システムにおける効率的な並列計算を実現することにある。PIC 粒子シミュレーションは、膨大な数のプラズマ代表粒子と空間格子点上の電磁場の相互作用計算がシミュレーションの大部分を占める。流体モデルとは違って、個々のプラズマ粒子はシミュレーション空間の任意の位置に存在しかつ時間的に移動するため、従来の均等型領域分割方式による MPI 並列では、プロセッサ間の負荷バランスが崩れる。このため PIC シミュレーションの効率的な並列計算は、特に大規模な分散メモリ環境では困難であるとされてきた。しかし Nakashima et al. [2009] により提案された PIC シミュレーション用動的負荷分散技法 **OhHelp** を宇宙プラズマシミュレーションに適用することにより、分散メモリ並列計算機においても優れた並列計算効率が得られることが実証された。

OhHelp は領域を均等分割し、各々の部分領域とそれに含まれる粒子を各々のプロセスに割り当てる。この簡明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問題となるが、**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)。**OhHelp** は前年度までに総粒子数が時間的に変動するモデルでの粒子シミュレーションコードに実装され、その有効性が確認されている。

上述のように **OhHelp** は粒子法と格子法の連成計算における適切な負荷分散戦略を与えるトップ

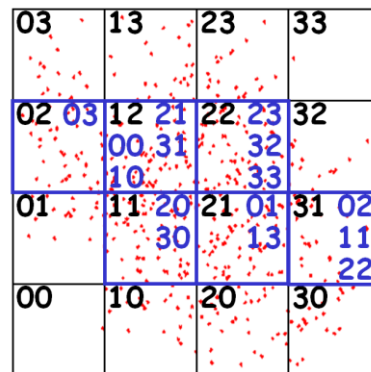


図 1: **OhHelp** アルゴリズムにおける 1 次担当領域 (黒字のプロセス番号) および 2 次担当領域 (青字のプロセス番号) 割り当ての一例。

ダウン型のアプローチと見ることができる。これに対して、適切に分散された計算要素を、いかに効率的に処理していくかというボトムアップ的思想に基づく最適化も同じく重要である。現在は後者の検討段階に入りつつあり、具体的には負荷の大きい電流密度計算のキャッシュチューニングや、粒子移送・負荷均衡検査にかかるオーバーヘッドの削減に向けた検討を進めている。

また今年度は、高速化を行ったコードの実問題への適用も本格化させていく。その課題の一つは、粒子・流体ハイブリッドシミュレーションコードを用いた、マグネトシース中の局所的磁場減少に関する大規模かつ高解像度な 3 次元シミュレーションである。これによりミラーモード不安定性の非線形発展との関連を定量的に明らかにし、磁場減少メカニズムを解明することを目的とする。

もう一つの研究課題は、昨年度 OhHelp 適用を行った衛星プラズマ環境シミュレーター (EMSES) による衛星周辺プラズマ擾乱の大規模数値解析である。この課題では、結果として得られたプラズマ環境擾乱が実際の人工衛星システムや科学衛星ミッションにどのような影響を及ぼすかという工学的観点も重視して研究を進めていく。

上述した 2 課題を遂行することは OhHelp 手法の有効性の実証という数値アルゴリズム的観点、および、超大規模モデルによる宇宙プラズマ粒子シミュレーションの実現と最先端研究成果の創出という宇宙科学的観点の双方において大きな意義がある。本報告書では、第 3 節において実問題解析によって得られた研究成果とコードの高効率化に向けた取り組みを紹介し、第 4 節で研究課題の今後の展望について報告する。

2. 当拠点公募型共同研究として実施した意義

当課題は超大規模数値計算系応用分野の共同研究として、京都大学 T2K オープンスパコンの 64 ノード分 (1024 コア) を用いて進められた。当計算機システムは各ノードに 4 個の AMD 社製クアドコア Opteron プロセッサを搭載した Fujitsu HX600 クラスタとなっており、当研究課題を遂行

するのに適したシステムである。

また、OhHelp は、粒子と格子という 2 つの異なる並列計算の効率性を同時に達成する一般的手法の一つとして捉えることができ、またそのアルゴリズムは木構造を用いた負荷均衡状況の再帰的なチェックなど、計算機科学的かつ非数値的な発想に基づいている。したがって、非数値的な並列計算アルゴリズムによる並列数値シミュレーションへの貢献ということができ、計算科学と計算機科学の分野間連携の有効性・重要性を示す好例となっている。こうした分野間連携をさらに強固にしていく上で、本課題を共同研究として遂行することの意義は大きい。

3. 研究成果の詳細と当初計画の達成状況

(1) 衛星周辺プラズマ環境擾乱の大規模全粒子シミュレーション

宇宙空間を航行する衛星はプラズマ粒子の衝突により帯電し、周辺のプラズマ密度分布、電位構造を大きく変化させる。またイオンエンジンに代表される電気推進システムは能動的にプラズマ放出することにより、衛星周辺のプラズマ環境にダイナミックな擾乱を引き起こす可能性がある。こうした環境擾乱は人工衛星システムや科学衛星によるプラズマ観測に悪影響を及ぼす可能性があり、数値解析によるメカニズム解明が急がれている。

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 (数～数十 m) が最小単位となるが、衛星構造やその最近傍の密度・電位の空間スケールはこれよりさらに小さくなるものがしばしばある。この衛星近傍空間スケールを解像しつつ、背景宇宙プラズマダイナミクスを追うためには多大な計算資源を要する。具体的には、衛星の微細構造として電界アンテナを進展するためのブームの半径が数 mm 程度であり、また衛星周辺の光電子雲のデバイシールド長は数～数十 cm 程度であることが知られている。一方、本共同研究で提供される計算資源 (メモリ規模～1.8 TB) により最大で一辺 512 グリッド、1 セル辺り 64 個程度の超粒子を組み込んだ 3 次元シミュレーシ

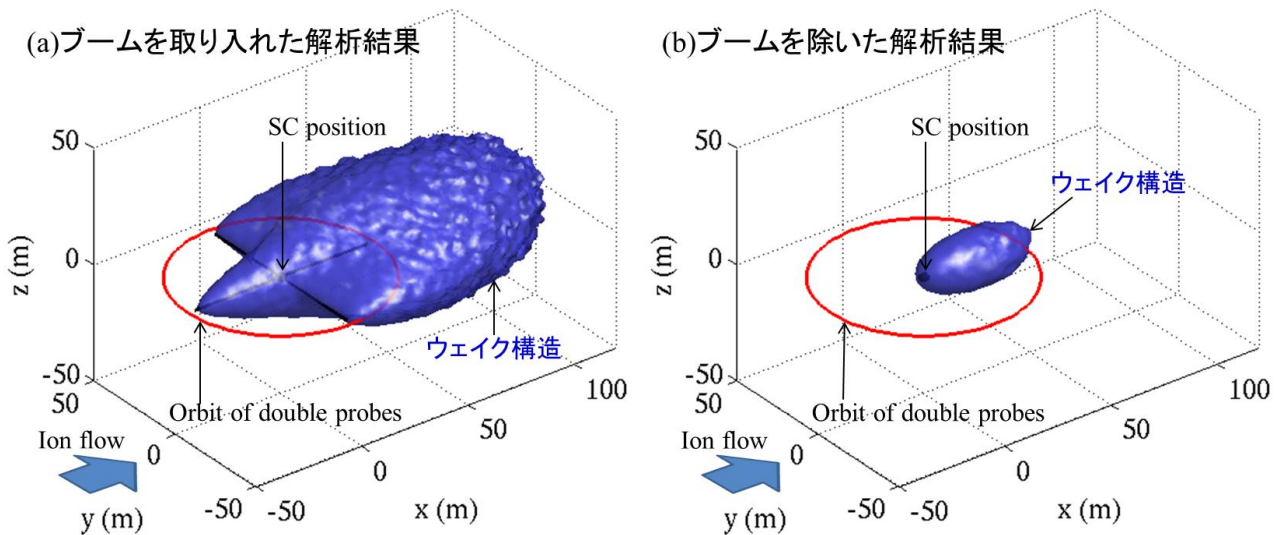


図 2: 衛星下流に形成されるウェイク（イオン低密度）領域の 3 次元シミュレーション結果.

ンが可能であると見込まれる。このことから、ブーム形状を直接取り込むのはなお困難だが、光電子雲の空間スケールを解像可能なシミュレーション解析が実現すると期待される。

初めに科学衛星観測に悪影響を及ぼすことで知られている衛星ウェイクに関するシミュレーション解析を紹介する。衛星ウェイクは、衛星から見てプラズマが相対速度を持つ場合に衛星後方に形成されるプラズマ構造であり、一般的にはイオン密度が低下し、それに伴い負電位領域が形成される。この負電位領域中に電場センサーが存在するときに電場が測定される。これは衛星観測本来の目的である自然の電場ではなく、衛星自身と周辺プラズマの相互作用によって発生したものであるため、スプリアス（不要）電界と呼ばれている。実際の科学衛星ミッションでも確認されており、正確な電場観測を行う上での障害の一つである。

衛星周辺のウェイクの 3 次元詳細構造を解析するため、 $512 \times 512 \times 128$ の空間グリッド、 3×10^9 個以上の超粒子を扱う大規模シミュレーションを、HX600 クラスタ 64 ノード分を用いて実施した。図 2 は衛星電位が +35 V 程度まで達することがある地球極風中のプラズマ環境を模擬したシミュレーション結果である。図はイオン密度が周辺プラズマの 1/2 となる点の集合からなる等値面図であり、衛星の周りを取り囲む様にイオン低密度領域

すなわちウェイクが形成されている。

特徴的なのは衛星本体のみならずブーム金属の後方にもウェイクの特徴が見られることである。この結果は、ブーム半径（半径数 mm 程度）はプラズマデバイ長（数～十数 m）に比べて非常に小さいため、ウェイク形成にはほとんど寄与しないとする従前の予想を覆すものである。解析の結果、これはブームが +35 V まで正に帯電していることにより、プラズマにとっての実効的なブーム径が実際より大きく見えるためであることが明らかとなった。こうした効果は、ウェイクに起因するスプリアス電界の強度を増幅させる可能性があるため、衛星観測では細心の注意を払う必要がある（研究成果リスト(2)-3）。

次に衛星周辺の高密度光電子雲に関するシミュレーションを紹介する。衛星表面は通常太陽光に晒されているため、光電効果により電子が放出され、衛星周辺に濃い電子雲を形成する。図 3 に、電場センサーを搭載した衛星周辺の光電子密度分布（図中央）と光電子雲に起因してセンサーに測定された電界値（右図）のシミュレーション解析結果を示す。太陽光の照射角度 θ に依存して、有限のスプリアス（不要）電界値がセンサーによって測定されている。本数値解析では、光電子が衛星とセンサーをつなぐブームと呼ばれる金属棒に沿ってセンサー部に到達することにより、このスプ

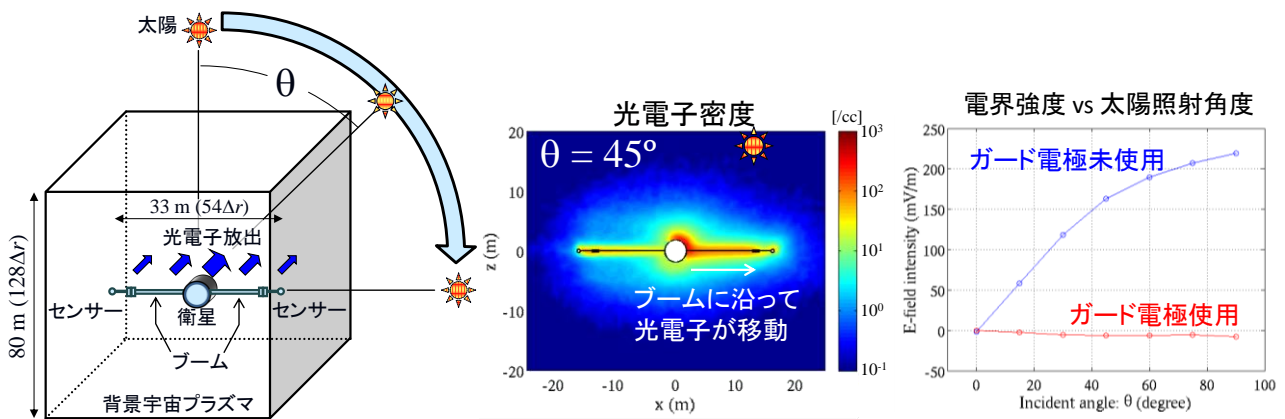


図 3: 衛星周辺光電子環境とそれに起因する不要電界発生のシミュレーション結果。

リアス電界が引き起こされていることが見出された。この結果を踏まえ、光電子を跳ね返すガード電極のboom先端部への設置をシミュレーションで模擬したところ、スプリアス電界が 1 桁程度抑制された。今回のシミュレーション結果はこうした工夫の有効性を実証し、観測機器設計上の指針を与えるという意味で意義深いものとなった（研究成果リスト(1)-3）。

上記のような大規模数値解析を地球周辺宇宙空間の様々な領域に対して行うことにより、解析的には取り扱いが困難な衛星環境を定量評価することが可能である。実際に衛星観測データ研究者との情報交換も開始しており、科学衛星観測データの較正や観測機器設計にシミュレーション結果をフィードバックすることが期待されている。

(2) 太陽風中の特異な局所的磁場構造のメカニズム解明に関する 3 次元大規模ハイブリッドシミュレーション

地球近傍の宇宙空間では、太陽から放出される高速のプラズマ流である太陽風と地球固有の磁場との相互作用により、地球磁気圏と呼ばれる領域が形成されている。太陽風は惑星間空間磁場を伴って吹いているため、地球磁場との間に様々な相互作用を引き起こし、複雑な地球磁気圏構造を形成する。このような物理現象過程を解明することは、宇宙科学的な視点はもとより人類の宇宙環境利用の観点からも重要である。

近年、太陽風に満たされた惑星間空間から地球

磁気圏への遷移領域であるマグネトシースにおいて、非常に特異な磁場構造が複数の科学衛星により観測されている。その磁場構造は、局所的に背景磁場レベルから数十%大きくなる、もしくは小さくなっており、それぞれ **magnetic peak**、**magnetic dip** 等と呼ばれている。我々は 3 次元大規模ハイブリッドシミュレーションをこの領域に適用することにより、こうした特異な磁場構造の再現に成功した。

本共同研究で行った最大規模の計算は、512³ の格子点をもつ 3 次元空間中に、およそ 80 億個の計算粒子を配置したモデルであり、およそ 1.5 TB の主記憶容量を必要とする。これは従来の同格子点数での計算に比べて、粒子数を 4 倍にしたものに相当する。粒子シミュレーションにおいて粒子数の少なさは数値的なノイズの原因となる。特に従来は計算初期段階での数値的な擾乱により、詳細な物理過程の解析が困難であったが、本大規模計算によりそれが可能になると強く期待される。

図 4 は、ハイブリッドシミュレーションにより再現された特異磁場構造の一例である。この例では葉巻状の 3 次元構造を持った **magnetic peak** が確認された。このような構造は、衛星観測により実際のマグネトシースでも観測されている。これとは別に、空間的な非一様性が 2 次元方向のみに存在する（残り 1 方向に関しては非一様性の空間スケールが十分に大きいような）状況を想定し、2 次元ハイブリッドシミュレーションを行ったところイオンベータと呼ばれるプラズマのパラメータ

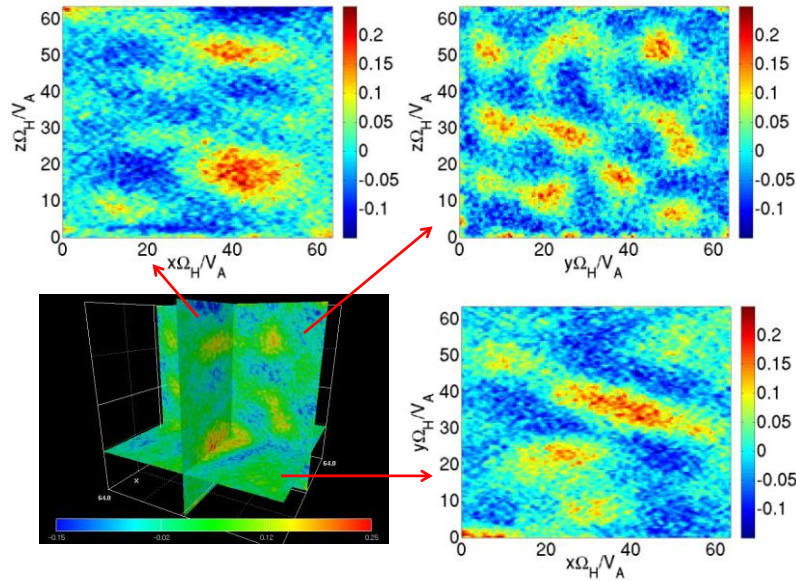


図 4: 3次元モデルにおける、背景磁場並行成分に現れる magnetic peak 構造. 左下のパネルは、各方向の断面を合わせたものを示し、周りのパネルは断面図を示す.

の値に依存して、magnetic dip もしくは magnetic peak が形成されることが確認された。この結果も、観測による統計的な解析結果と一致する。

さらに、我々はこれらの特異な磁場構造が、プロトンの非等方的な速度分布が原因となって起こるミラー不安定性と呼ばれる現象の卓越によって形成されることを明らかにした。以上の結果からマグネトシースにおいて、空間的に 2 次元的な(背景磁場に対して垂直な一方向が、ミラーモード磁場構造の波長に比べて無視できるような)構造となっていて、かつ低ベータのイオンが存在する領域でのみ、magnetic dip が形成されることがわかった。magnetic dip の形成過程において、粒子は磁場構造内にトラップされる必要がある。従って、低イオンベータという、粒子の温度が低い条件において、多くの粒子が磁場構造内に閉じ込められやすくなっている場合に、magnetic dip が卓越することが明らかとなった。この磁場構造内において、粒子の速度分布関数は内部での磁気ミラー運動によって特異な形状を取る。一方で magnetic peak は、高温のため、もしくは空間 3 次元性によって(空間の運動の自由度が増えたことによって) magnetic dip 内に閉じ込められない粒子が多数存在するために崩壊した magnetic dip の残りとし

て現れることが明らかとなった。本解析では上述のように衛星で観測されているような磁場構造をシミュレーションで再現するのみにとどまらず、その原因となる素過程を詳細に解析することで磁場構造の形成メカニズムの解明に成功した。

今回の一連の研究成果は、高度な並列計算技術によって初めて可能になる大規模かつ高精細なシミュレーションを複数回行うことにより、従来では謎とされていた物理過程の解明に実際に貢献した実例ということができる。

(3) OhHelp 適用粒子シミュレーションコードのさらなる高効率化に向けた取り組み

前年度までに OhHelp アルゴリズムに基づく負荷分散戦略と、OhHelp 用に最適化されたノード間データ通信機能を提供する OhHelp ライブラリ付属 API 関数の利用により、1024 並列まで良好なスケーラビリティが得られることが確認された。これを踏まえ、今年度はキャッシュチューニングに基づく逐次実行性能の向上と、隣接プロセス間の重複領域導入による粒子移送およびそのためのスケジューリングの実行回数低減に取り組んだ。

粒子シミュレーションのようにメモリバウンダなアプリケーションの逐次実行性能を向上させる

には、キャッシュメモリのヒット率を向上しメインメモリへのアクセスによる性能劣化を軽減する必要がある。ただし、粒子シミュレーションの主要ルーチンである電流密度・速度更新計算においては、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番地にアクセスが発生するため、メモリアクセスパターンは一定ではない。従って、統計的な意味で参照の局所性を向上させる方法を考える。

この目的のために常套的に用いられる手法として、粒子位置座標に基づく粒子配列のソーティングがある。ここでは最も簡便な実装で粒子ソートの効果を確認することにした。具体的には、Fortran の 3 次元配列のメモリ上での配置が Column major であることを考慮し、粒子位置の z 座標を基準に昇順にソートする。なおソートには C 言語の標準ライブラリで提供されているクイックソートルーチンを使用する。

京都大学 T2K オープンスパコン上の 1CPU コアを用いて逐次実行を行い、キャッシュミス率の計測を行うことで粒子ソートの効果を確認した。計算モデルは 5.6×10^6 個の粒子を一辺 32 グリッドの 3 次元空間上に一様に配置したものである。また粒子は初期状態においてマクスウェル分布に従う速度成分を有しており、シミュレーション中にランダムな運動を行う。このモデルにおいて粒子ソートの有無によるキャッシュミス率の変化に着目する。なおソートは 500 タイムステップに 1 回の頻度で実行した。粒子ソートの効果により、L2、L3 キャッシュミス率がそれぞれ 1.5 % \rightarrow 0.15 %、1.2 % \rightarrow 0.20 % に低減することが確認された。ソート直後以外のタイムステップでは、ランダムな熱運動により粒子の z 座標の昇順は完全には保たれないが、1 タイムステップに粒子が移動する距離は一般的には空間グリッド幅より十分に小さいため、ソート後しばらくの間はその効果が持続する。このため、平均的に見ると参照の局所性が向上したものと考えられる。

次に、OhHelp 適用コードの計算手順の見直しにより、計算コストの削減を試みた。現状では、

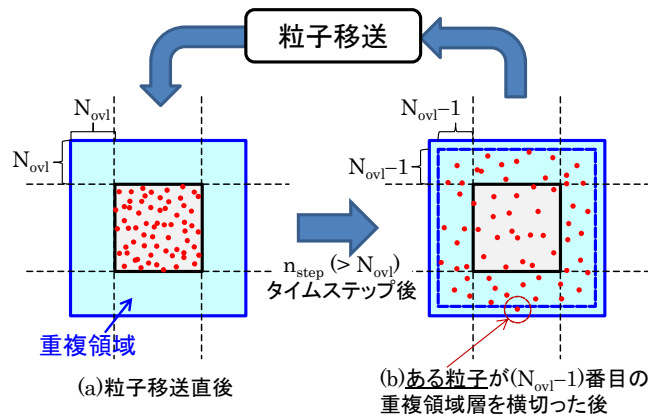


図 5: 重複領域導入による粒子移送回数の低減.

粒子が移動する度に、プロセス境界を横切った粒子をモニターし、負荷均衡が保たれるように粒子移送スケジューリングを行う。また同時に、あるプロセスが担当していた粒子が他のプロセス領域に移動することによって生じる粒子配列の空き番地を埋めるため、粒子配列のパッキングを行う。これらには、大域通信や粒子配列の走査が含まれており、その作業は条件次第では粒子シミュレーション本来の演算コストに対して無視できないオーバーヘッドとなり得る。そこで粒子移送を毎タイムステップ行わず、数ステップに一度だけ行うように変更することで性能向上を図る。

具体的には各プロセスがプロセス境界の外側に N_{ovl} セル分の層から成る重複領域を持つ。そしてある粒子が $(N_{ovl} - 1)$ 番目の層の外側境界を横切った時のみ、重複領域の粒子をまとめて移送する。移送後は粒子がプロセス境界の内部のみに分布することになるので、再び粒子が移動し、 $(N_{ovl} - 1)$ 番目の層の外側境界を横切るまでの間は粒子移送を行わなくても良いことになる。

この手法により性能が向上すると予測する根拠は次の 2 つである。一つは、粒子配列の走査や大域通信等に、移送される粒子個数のみならず、移送の回数に比例する作業コストが含まれていることである。このコストは明らかに粒子移送回数の制限により削減可能である。二つ目は、シミュレーション全タイムステップ中に移送される粒子の述べ個数自体も、粒子移送を数ステップに 1 回のみとする方が少なくなる点である。これは例えば、

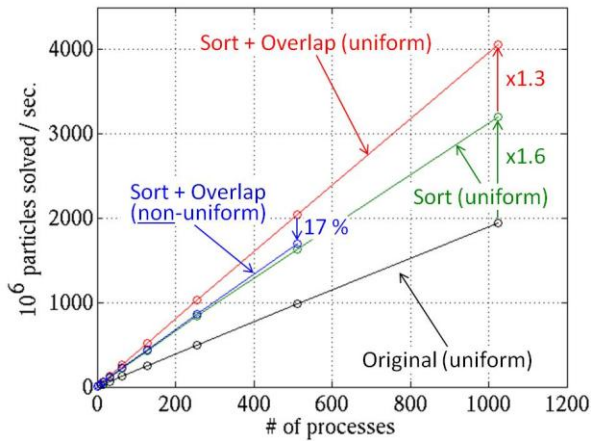


図 6: 改良前後のコードの性能.

磁力線の周りを旋回運動する粒子が、プロセス境界を何度もまたぎながら往復する状況を考えることによって理解できる。

一方で、この手法の導入に起因するオーバーヘッドも存在する。あるプロセス領域に付属する重複領域での電流密度を正しく求めるためには、隣のプロセスで求めた電流密度値との和を計算する必要がある。隣接プロセスの重複領域の重なり度合いを考慮すると(2Novl + 1)の幅の領域にわたって境界通信を行う必要があり、これに伴って通信コストが増大する。また各プロセスの重複領域も含めて電磁場更新や 1 次/2 次担当領域間電流総和計算を行う必要があることも、オーバーヘッド増加の一因となる。このオーバーヘッドと前述の有効性はトレードオフの関係にあり、Novl = 2 のときに、最高性能が得られることが判明した。

これまでに述べた 2 種類のチューニングを踏まえ、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 の手法により性能評価を行い、粒子ソートと重複領域導入による効果を確認する。ただし当性能評価の実施時には、本研究課題における京都大学 T2K システムの大規模ジョブ実行期間が終了していたため、別途名古屋大学の HX600 クラスタを使用して性能を取得した。プロセスあたりの領域サイズを 32^3 の立方体に固定し、 $P = 2^p$ ($p = 0 \sim 10$ 、不均一な粒子配置の場合のみ $p = 0 \sim 9$) の MPI プロセス数に対して測定を行った。改良前とソートのみ導入後のコードでは均一な粒子配置、重複領域導入後のコ

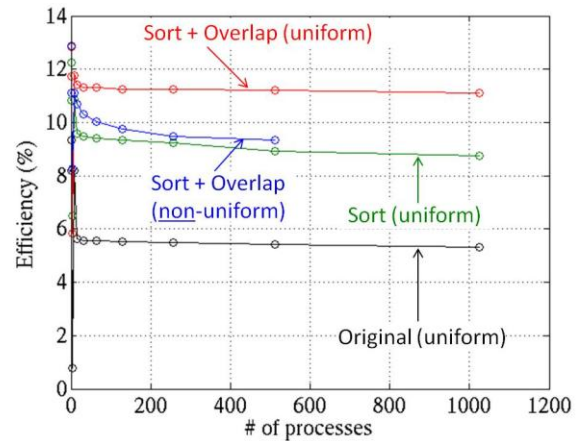


図 7: 改良前後のコードの実効効率.

ードでは粒子が均一なケースと極端に不均一なケースを評価対象にした。ここで「極端に不均一」としたのは、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、シミュレーションの経過とともにそれらの粒子が 1 方向に移動していくような設定のことである。簡単のため、外部境界を周期境界条件とし、導体やそれに伴う粒子消失・注入が無いモデルとした。

図 6 に、改良前後のシミュレーションコードの性能を示す。図より 1024 並列での実行において、粒子ソートの導入により、1.6 倍の性能向上が確認された。またこれに加えて重複領域も導入することにより、全体として改良前から $1.6 \times 1.3 \sim 2.1$ 倍の性能向上を得ることができた。また重複領域導入後のコードで、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。上記に加え、富士通プロファイラを用いて測定したメインループの実効効率の測定結果を図 7 に示す。ここでは名古屋大学 HX600 クラスタの 1 計算コアあたりの理論ピーク演算性能 10 GFlops から算出した各並列数でのピーク性能に対する実際の演算性能の比を実効効率としている。図より、改良前のコードでは実効効率は 5.5% 前後であったのに対し、改良後は粒子が均一なケースで 11% に到達することができた。粒子配置が極端に不均一な場合は 10% に到達していないが、多くの実問題における不均一の度合いは今回のテストモデルより大幅に緩和されることを勘案すると、おおよそ 10% 前後の実効効率で実問題の解析が可能であると推測

される。ただし、不均一なケースで並列数増加に伴う若干の効率低下がみられる点については、原因と対策の検討が必要である。

以上の取り組みにより、粒子ソートと重複領域の導入により、OhHelp 導入プラズマ粒子シミュレーションのさらなる性能向上が実現された。ただし現状ではいずれの取り組みについても、性能向上効果の外観を掴むために非常に簡略化された実装方法を用いているため、キャッシュサイズをより定量的に考慮したソート手法や重複領域導入に伴うオーバーヘッドの削減法など今後より厳密な検討を行う必要がある。

4. 今後の展望

最後に、本研究課題の今後の展望について述べる。これまでに OhHelp 実装済の衛星プラズマ環境シミュレーター (EMSES) を科学衛星搭載観測機器と宇宙プラズマ間の相互作用の実問題に適用し、着実に研究成果が生まれつつある。これに加え、前年度とは異なる視点からチューニングを行うことにより、OhHelp 適用粒子シミュレーションコードのさらなる性能向上が期待できる結果が得られた。一方で、提案したチューニング手法の実装上の最適化や並列ポアソンソルバーの性能評価が、今後の課題として残っていることから、当初目標の達成度は 85 % と自己評価する。

今後の課題遂行の方針としては、OhHelp の適用によって初めて可能となる大規模数値解析結果を応用分野の論文誌に発表していくことを目標としたい。具体的には、太陽風中の特異な局所的磁場構造の 3 次元大規模数値解析に関しては、現実の宇宙環境で見られる非一様な背景磁場の影響を数値解析の中に取り入れることにより、magnetic dip 等の特異な磁場構造と地球固有磁場の内側への高温の太陽風プロトンの輸送過程との関連を明らかにする。衛星プラズマ環境シミュレーションに関しては、より現実の衛星ミッションに即した宇宙飛行体・プラズマパラメータモデルを導入することにより、衛星観測データの較正や衛星搭載機器設計に応用可能な知見を得ることを目指す。

5. 研究成果リスト

(1) 学術論文

1. Shoji, M., Y. Omura, and L. C. Lee, Three-dimensional Nonlinear Mirror-mode Structures in the Earth's Magnetosheath, submitted to *J. Geophys. Res.* (投稿中)
2. Miyake, Y., H. Usui, and H. Kojima, Effects of the Guard Electrode on the Photoelectron Distribution Around an Electric Field Sensor, *J. Geophys. Res.*, Vol. 116, A05211, 2011.
3. Miyake, Y., H. Usui, H. Kojima, and H. Nakashima, Plasma Particle Simulations on Stray Photoelectron Current Flows Around a Spacecraft, submitted to *J. Geophys. Res.* (投稿中)

(2) 国際会議発表

1. Y. Miyake, H. Usui, and H. Kojima, Plasma Particle Simulations on Electric Antenna and Spacecraft Environment, XXXth URSI GASS, Istanbul, Turkey, 2011 (Invited).
2. Y. Miyake, and H. Nakashima, A scalable load-balancing algorithm for massively-parallel plasma particle simulations, US-Japan JIFT Workshop 2011, Toki, Japan, 2011 (Invited).
3. Y. Miyake, and H. Usui, Particle Simulations of Wake Effects on Electric Field Measurements in Multi-species Cold Ion Flows, 12th Spacecraft Charging Technology Conference, Kitakyushu, Japan, 2012.

(3) 国内会議発表

1. 三宅洋平、白井英之、小嶋浩嗣、衛星帯電環境下におけるダブルプローブ電場観測に関するプラズマ粒子シミュレーション, 第 8 回宇宙環境シンポジウム、東京、2011.