

jh140002-NA01

超並列宇宙プラズマシミュレーションの研究

白井英之（神戸大学・課題代表者）、中島浩（京都大学）、三宅洋平（神戸大学）
 小路真史（名古屋大学）、加藤雄人（東北大学）、大村善治（京都大学）
 岩下武史（北海道大学）、深沢圭一郎（九州大学）、小林広和（インテル株式会社）

概要 本研究の目的は、Particle-in-Cell 方式に基づく宇宙プラズマ粒子シミュレーションを大規模並列計算機システムへ効率的に実装し、宇宙プラズマ理工学の重要問題に適用することである。今年度は、OhHelp 適用コードのさらなる高度化のため、プラズマ粒子カーネル計算部分の高効率スレッド並列実装の検討を進める。これに加え、昨年度 OhHelp 実装が完了した電子ハイブリッドシミュレーションにより、地球放射線帯の相対論的高エネルギー電子の加速機構を解明する。また科学衛星周辺で予想される電子スケールのプラズマ擾乱、そして非線形イオンプラズマ波動励起過程に関する粒子シミュレーションを実施し、宇宙プラズマ理工学分野における先駆的な研究成果を創出する。

1. 共同研究に関する情報

(1) 共同研究を実施した拠点名

本課題は、神戸大学・京都大学・東北大学・名古屋大学・九州大学の複数の研究者が参加する共同研究であり、京都大学および九州大学の大規模計算資源を利用する。

(2) 共同研究分野：超大規模数値計算系応用分野

(3) 参加研究者の役割分担

表 1 に研究者の役割分担を示す。①宇宙プラズマ理工学分野の中でも粒子モデル (PIC) シミュレーションを専門に扱う研究者と②流体計算の専門家、そして③計算機科学分野研究者・技術者が有機的に協力して行う共同研究体制となっている。

白井英之①	研究統括および全粒子シミュレーションを用いた衛星プラズマ環境解析
中島浩③	プラズマ粒子シミュレーションへの OhHelp 高効率実装サポート
三宅洋平①	EMSES コードの高度化とそれを用いた衛星プラズマ環境数値解析
小路真史①	粒子・流体ハイブリッドコードを用いた非線形イオンプラズマ波動励起シミュレーション
加藤雄人①	電子ハイブリッドコードへの Oh-Help 実装とそれを用いた放射線帯高エネルギー粒子生成数値解析
大村善治①	非線形波動粒子相互作用の理論的アプローチ
岩下武史③	EMSES におけるポアソン方程式並列求解手法の検討
深沢圭一郎②	プラズマ粒子シミュレーション中のステンシル計算の高効率化サポート
小林広和③	プラズマ粒子シミュレーションの XeonPhi 向け高効率実装の検討

表 1: 研究の役割分担

2. 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、大規模並列計算システムへの高効率実装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。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。そこで動的負荷分散技法 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

切に分散された負荷をローカルのプロセッサ上で、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。今年度は、前年度に続いて OhHelp 適用済コードの高効率なスレッド並列実装を進めるとともに、将来普及が予想されるメニーコアアーキテクチャに対応すべく SIMD ベクトル化の検討も開始した。

実問題への応用に関しては、OhHelp 適用済の全粒子シミュレーションコード EMSES により、大規模衛星プラズマ環境シミュレーションを実施する。極限宇宙環境を探索する科学衛星とプラズマ環境間の相互干渉などの問題に取り組む。また理学的な問題として、プラズマ波動の 1 種であるホイッスラーモード・コーラス放射と光速の 99% を超える相対論的高エネルギー電子との相互作用に関する大規模計算機実験を実施し、地球内部磁気圏において高エネルギー粒子が作り出される過程を定量的に明らかにする。

上述の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。

3. 当拠点公募型共同研究として実施した意義

本研究は、アルゴリズム開発、コード開発、大規模シミュレーション実行の全ての段階で、研究代表者をはじめとする複数の大学の計算科学者と同センターの計算機科学者との緊密な連携によって実施されている。このような研究体制の重要性を端的に表す象徴とも言うべき中核技術が動的負荷分散技法 OhHelp である。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を表す好例となっている。

4. 前年度までに得られた研究成果の概要

領域分割方式の超並列計算が困難とされてきたプラズマ粒子 PIC シミュレーションに関して、プロセス間の負荷不均衡を回避できる動的負荷分散技法 OhHelp を宇宙プラズマシミュレーションに適用した結果、優れた並列計算効率を得られることが実証された。OhHelp を適用したプラズマ粒子シミュレーションに関しては、その後、プロセス間通信方式について重複領域の導入などさらなる最適化を施し、最新の weak scaling 評価による実証実験では、粒子分布の不均一さに依存して 70~75% の並列効率が、4096 コアにおいても達成されることを確認した。これに加えて高エネルギー電子を粒子、背景の冷たい電子を流体としてモデル化する独自の粒子・流体ハイブリッドシミュレーションコードへの OhHelp 実装が完了し、空間 1 次元のシミュレーションコードに対しても OhHelp 法が有効であることが示された。

応用分野における研究成果としては、プラズマ空間中に人工衛星などの非プラズマ物体を導入できる衛星プラズマ環境シミュレータ EMSES を用いた大規模 3 次元シミュレーション解析により、地球磁気圏の希薄なプラズマ流中におかれた衛星周辺に形成される大規模なウェイク構造を再現した。本共同研究プロジェクトで供される大規模計算資源と高度化された計算アルゴリズムの使用により、科学衛星運用に直接応用可能な定量的データをシミュレーションから得ることが初めて可能となった。当該コードを用いた大規模シミュレーション解析は、太陽コロナ観測衛星とプラズマ間の電磁的相互作用の研究にも適用された。

理学的応用としては、電磁イオンサイクロトロントリガード放射のハイブリッドシミュレーションを行うことにより、宇宙プラズマ空間中のプロトンの分布関数が大きく歪められることが発見された。また、放射線帯での相対論的電子生成機構において重要な役割を果たすと考えられているプラズマ波動・コーラス放射について、その発生過程を再現する計算機実験を実施し、コーラス放射の波動特性が背景磁場強度の空間構造の変化に応

じて大きく変化することを明らかにした。

5. 今年度の研究成果の詳細

(1) 放射線帯電子加速過程の大規模電子ハイブリッドシミュレーション

地球周辺の宇宙空間には、光速の 99 % を超える相対論的高エネルギー粒子が地球を取り巻くように分布しており、放射線帯と呼ばれている。放射線帯の相対論的粒子が、いつ・どこで・どのように放射線帯電子のフラックス量に変動するかを明らかにすることは、宇宙天気分野での最重要課題の一つである。

本研究の目的は OhHelp 適用済の電子ハイブリッドコードを用いた大規模数値解析により、放射線帯電子を作り出す過程で重要な役割を果たすとされるプラズマ波動、ホイッスラーモード・コーラス放射の励起過程を再現し、相対論的高エネルギー電子が生み出される物理過程を定量的に理解することである。

65,536 の格子点を磁力線上に設定し、約 3 億個の計算粒子を配置して、400 万時間ステップの粒子運動並びに電磁界の時間発展を解き進めた。この計算規模は、空間スケールは磁力線方向に 13,000 km、時間スケールは 0.45 秒に対応し、地球放射線帯外帯領域でのコーラス放射励起過程の時空間スケールを再現し得る値となっている。本シミュレーションコードを用いた計算機実験の結果では、磁気赤道領域におけるホイッスラーモード波動の中から、コヒーレントで周波数を時間的に上昇させるコーラス放射が自然発生する様相が再現されている。またこのシミュレーション結果では、励起したコーラス放射との非線形相互作用により、相対論的高エネルギー電子が高効率に加速される様相も再現されている。

今年度は、発生するコーラス放射の波動特性が、高エネルギー電子の初期分布に対してどのように変化するかを究明した。計算機実験の初期条件として与える高エネルギー電子の典型的エネルギーと数密度を様々に変化させて、コーラス放射の発生過程を再現し、コーラス放射発生の有無と、発

生したコーラス放射の強度や周波数スペクトルを比較した。特に、高エネルギー電子が持つ運動エネルギーが、背景磁場に対して平行方向と垂直方向に異方性を持つ場合にプラズマ不安定性が発生するが、異方性の大きさとコーラス放射発生過程との対応は未解明であった。そこで様々な異方性を初期条件として与えた計算機実験を実施して、コーラス放射発生の有無と初期条件との対応関係を調べた。その結果から、コーラス放射が発生する条件での異方性と高エネルギー電子の数密度との対応関係が明らかとなり、コーラス放射の発生条件を定量的に示すデータセットが得られた。

このデータセットは、磁気嵐中に発生するコーラス放射の発生過程を理解する上で非常に重要であり、自己無撞着な計算機実験でなければ得られない学術的価値の極めて高い成果である。国内外の学会・研究会での成果発表を行う他、学術誌への投稿準備中である。

(2) 科学衛星周辺の電磁じょう乱の大規模粒子シミュレーション解析

今後ますますその探査領域が拡大すると予想される将来科学衛星ミッションに向け、太陽近傍や地球放射線帯など極限プラズマ環境中における衛星プラズマ相互作用を精確に把握することが必要不可欠である。当該分野の従来の研究では、衛星周辺の電場変動のみに着目した静電モデル解析が主であったが、今年度は EMSES の特徴である電磁モデル解析により、磁場変動に特に着目した解析を行った。特に電磁モデル解析が効果を発揮するとみられる太陽近傍プラズマ環境を想定し、太陽風プラズマ・光電子・二次電子の各コンポーネントが衛星周辺で作る電流構造と、それが衛星周辺に発生させる磁場じょう乱の様相を定量的に明らかにした。主な成果は次の通りである。

①太陽近傍探査衛星周辺では、太陽風プラズマ電子およびイオンの電流密度に比べて、はるかに高密度である光電子と二次電子による電流密度がドミナントである。この中でも光電子が局所的に最も大きな電流を形成しているが、その分布は衛

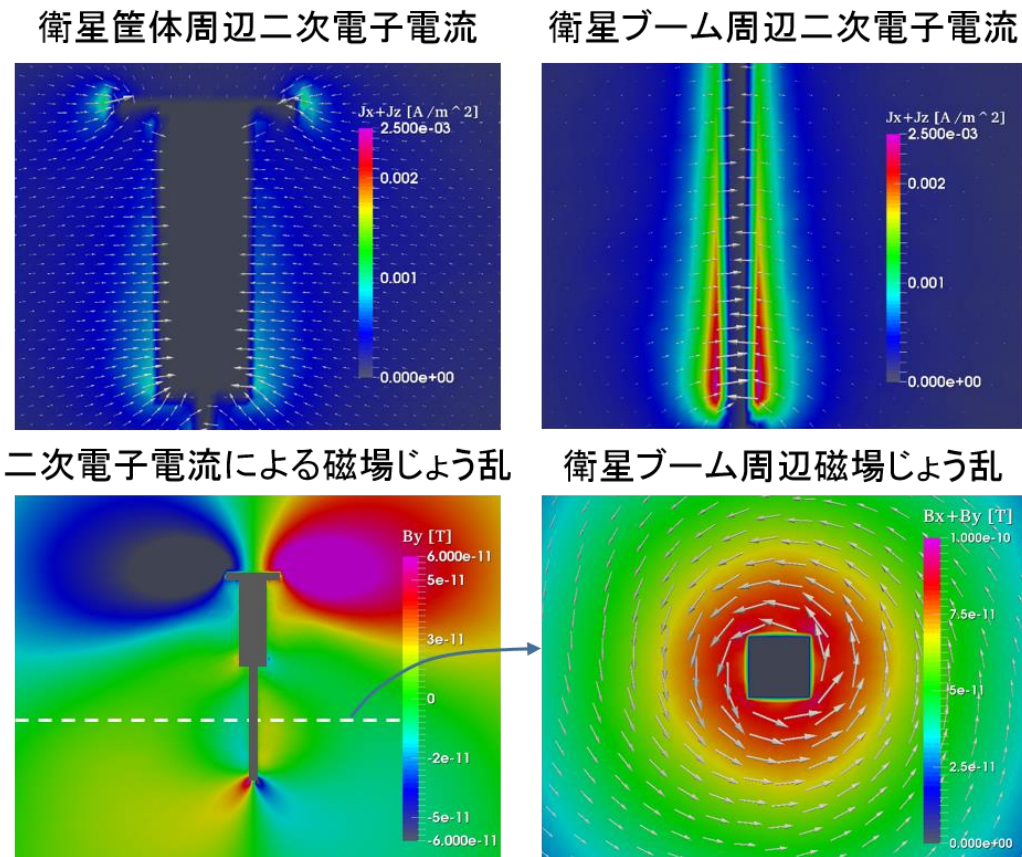


図 1: 科学衛星周辺の磁場じょう乱に着目した大規模粒子シミュレーション

星熱シールド周辺に集中している。これに対して、二次電子電流は衛星全体を取り囲むように万遍なく分布していることが分かった。②上記の電流による磁場じょう乱としては、光電子電流がシールド周辺に作る太陽側から見て時計回りの磁場が最も支配的であり、その強度は数 nT である。一方で、二次電子電流は衛星後方のブーム付近にも環状磁場を形成する (図 1)。その強度はシールド付近で観測されたものより約 1 桁小さいが、磁場計測器がブームに設置されることを考慮すると、注目に値する結果である。③プラズマ粒子シミュレーション解析に加えて、与えられた電流分布に対してビオ・サバル式を解くことにより、静磁場解析も実施した。その結果、上述の磁場じょう乱は、衛星から発生する電磁波動に伴う変動磁場ではなく、プラズマの定常電流による静磁場としておおむね理解できることが確認された。

これまで人類が経験したことのない極限的なプラズマ環境における衛星プラズマ相互作用を解明

したという点で学術的な意義は大きい。また、将来衛星探査計画の設計や運用に適用できる知見であるという実用的な観点からも意義深い結果である。

(3) 地球内部磁気圏における非線形イオンプラズマ波動励起メカニズム解明に関する大規模ハイブリッドシミュレーション

大規模ジョブによる複数のパラメータランにより、地球磁場の勾配による電磁イオンサイクロトロン (EMIC) 波動放射現象の違いを調べた。背景磁場勾配が急になるほど放射波動のスペクトルのコヒーレンシーが高くなることを理論とシミュレーションの両方から示した。

さらに、非線形波動粒子相互作用が内部磁気圏の相対論的電子に与える影響を調べるために、リアルスケール電子テスト粒子シミュレーションモデルを開発した。パラメータランによって得られた様々な EMIC トリガード放射の波形をテスト粒

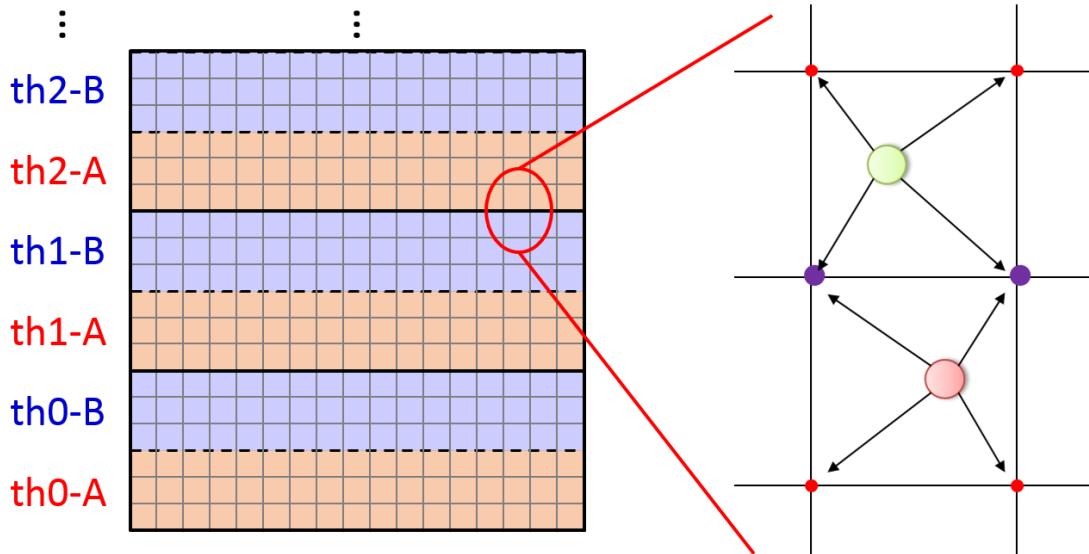


図 2: 色付けによる境界上格子点アクセス競合の回避

子モデルに入力し、従来の準線形理論で示唆される以上の電子散乱が起きることを示した。空間中に放射領域が広がるため、とある時間において広い周波数の EMIC が存在しており、数 100 keV から数 MeV に至るまで、幅広いエネルギーの電子が同時に散乱されることを示した。また、コヒーレンシーの異なる EMIC 波で、相対論的電子の散乱の時間スケールが異なることを示した。本成果は、現在論文投稿準備中である。

6. 今年度の進捗状況と今後の展望

全粒子プラズマシミュレーションコード EMSES は、先述の OhHelp 法の適用により、領域分割に基づくノード間並列において高い並列性能を実証してきた(平成 22~25 年度報告書参照)。今年度は当該コードに対して、ノード内並列やベクトル化も考慮した階層的最適化を推進するため、プラズマ粒子計算負荷の 95%以上を占める電流計算部分に着目し、スレッド並列化や SIMD ベクトル化を高効率に実現する方法を探求した。

(1) ノード内並列 (OpenMP スレッド並列) 実装

電流計算では、各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)。電流密度配列に対す

るメモリアクセスパターンはシミュレーション実施時に粒子軌道に依存して決定されるため、データ競合回避するマルチスレッド実装が必要となる。これまでに、次の 3 種類の実装を検討した。

・ 粒子分割法

本手法では、電流計算のための粒子ループを単純に"\$omp do"文で並列化する。ただし上述したアクセス競合を回避するために、電流配列 J のコピー J_t をスレッド個数分作成し、各スレッドは private な配列 J_t の上で電流計算を行う。最後に各スレッドが計算した J_t の総和をとることで求めたい電流値配列 J を求める。

粒子分割法は、 10^1 オーダーのマルチスレッド実装で従来から良く使われている手法である。実装が非常に簡便である反面、 J_t のために必要なメモリがスレッド数に比例して増加する点や、 J_t の総和計算にかかるオーバーヘッドがデメリットとしてあげられる。

・ 領域分割法 1: のりしろを利用する方法

前項で述べた粒子分割における短所を解消する手段として、領域分割的な発想をスレッド並列レベルにも適用することが考えられる。すなわち 1 プロセスが担当する計算領域を、さらに細かいスレッド個数分のブロックに分割する。各粒子について、その所属ブロックに応じてラベル付けを行

い、そのラベルをキーとして粒子ソートを実施する。その上で各スレッドが互いに異なるブロックに所属する粒子を担当することで、電流計算におけるアクセス競合を避けることができる。

より詳細には、上述の方法では、ブロック同士が接する境界上の格子点では、複数のスレッドが更新を行う可能性があり、アクセス競合は完全には回避されていない。そこで境界上のみ、隣接スレッドのいずれか一方が別の作業領域（のりしろ）上で計算を行うことにより、この問題を回避する。

・ 領域分割法 2: 色付けを利用する方法

領域分割法において、ブロック間境界におけるアクセス競合を回避する別の方法として、マルチカラー (Multicolor: MC) オーダリングを利用することが挙げられる。最も単純な 1 次元領域分割の場合は、隣接するブロックが異なる色（例えば図 2 のように赤と紫）を持つよう、2 色で色付けをすればよい。第 1 段階で赤に色付けされたブロック上で複数スレッドが同時に電流計算を行い、一旦スレッド間の同期をとる。次に第 2 段階として紫で色付けされたブロック上で並列に電流計算を行う。これにより、並列で処理するブロックは互いに接することはないため、境界におけるアクセス競合を解消することが可能となる。

中間報告以降、上述の 3 種類の実装によって並列化された小型版プラズマ粒子シミュレータに関して、改めて性能評価を行った。特に色付けに基づく領域分割実装の性能評価は今回が初めての報告となる。評価には、京都大学学術情報メディアセンターのスーパーコンピュータ「Cray XC30 with MIC (以下 XC30/MIC)」を用いた。シミュレーションは分散メモリ並列を伴わない 1 プロセス実行とし、使用コア数を 1-60 の間で変えるとともに、1 コアに割り当てるスレッド数 HT を 1-4 のいずれかに設定した。シミュレーション領域は上述の粒子並列実装については、27,000 格子点から成る計算空間内にマクロ荷電粒子を 1.4×10^6 個、2 種類の領域分割実装に関しては、36,000 格子点の空間内に 3.6×10^6 個の粒子を有す

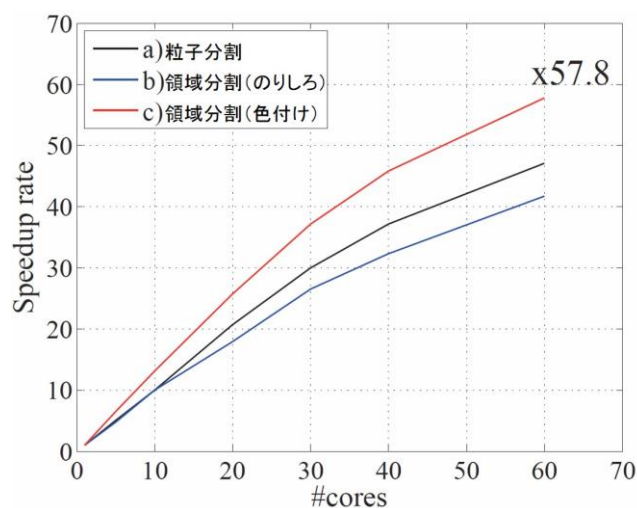


図 3: Xeon Phi コプロセッサ上でのマルチスレッディング実装シミュレータの並列性能

の設定とした。簡単のため、粒子配置は初期において、空間内に一様かつランダムであるものとした。

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。横軸はコア数であり、縦軸はそれぞれの実装の 1 コア実行速度に対する速度加速率である。またこの図では、HT=1-4 のうち最も高速であった結果のみを示しており、粒子分割実装については HT=1、領域分割実装については HT=2 であった。まず最も単純な実装である粒子分割法については、 J_t のゼロクリアと総和計算によるコストによる性能の飽和が予想されたが、図 3 では他に比べて顕著な飽和傾向は見られなかった。これは粒子数に対する空間格子点数が小さいことと、HT=1 により最大スレッド数が 60 と比較的小さいことが奏功したと考えられる。中間報告では HT=4 の設定で粒子分割実装の性能評価を行い、著しい性能飽和が見られたが、単純な粒子分割においてはむしろ 1 スレッド/1 コアの設定の方が高性能であるが明らかになった。ただしこれは Xeon Phi 本来の性能を引き出す設定にはなっていないことに注意が必要である。次ののりしろを用いる領域分割実装については、性能の飽和としては許容できないレベルではないものの、60 コア実行での速度向上率は 3 種類の実装の中で最低となった。これは計算空間中に占めるのりしろ領域の割合が、並列度とともに増加し、分岐処理

やのりしろと電流配列の足し合わせに関わるオーバーヘッドが増大するためである。

今回の評価で最も良い速度向上率を記録したのは、色付けに基づく領域分割による実装であった。60 コア実行で、57.8 倍の速度向上率が得られており、10-40 コア実行ではスーパーリニアの速度向上を示している。これはスレッド数の増加とともに、ブロックのサイズが小さくなるため、電磁場参照、電流計算の際のキャッシュ利用効率が増加するためと考えられる。一方、現状の 1 次元の領域分割では、高スレッド並列時に分割方向に長い計算空間を取る必要がある。これは実問題への適用を考えると、実用的ではない面がある。これは多次元領域分割と多色の色付けにより解決できるが、それに伴って増加するスレッド同期回数の問題も含めて、次年度の課題とする。

(2) SIMD ベクトル化実装（中間報告以降の成果）

プラズマ粒子計算を Xeon Phi に代表される MIC アーキテクチャに効率的に実装するためには、電流計算・速度位置更新部分の SIMD 演算対応が必須である。この目的のために京都大学学術情報メディアセンターが実施する「プログラム高度化支援」に申請を行い、インテル株式会社の小林宏和氏の協力を得て検討を行った。

電流計算を行うための粒子ループは、現状のコードでは電流計算の他に速度・位置更新や境界条件処理を含む長大なループとなっている。Xeon Phi 上では基本的には、Intel Compiler による自動ベクトル化の機能を利用することになるが、当該粒子ループの内部が複雑であるのでベクトル化の対象とはなっていなかった。そこでループ内の処理を、ベクトル化の可否によって仕分けし、一部の処理のみをベクトル化する最適化を実施した。具体的には、速度更新計算における格子点上電磁場値の参照など、ベクトル化が可能（かつ高コスト）な部分を、ループ長が 8 である inner loop 構造とし、"\$DEC SIMD" 指示行を指定することでベクトル化が可能になる。

これらの部分ベクトル化の効果により、

XC30/MIC 上の 1 コプロセッサを用いた性能評価において、1.35 倍の性能向上を実現した。一方で、今年度の検討において、現状のプログラム構造のままではベクトル化の難しい箇所も判明した。その代表的なものが、格子点上電流値の更新部分であり、スレッド並列時にも問題となった、粒子位置に依存したランダムなメモリアクセスパターンがベクトル化阻害要因であることが判明した。この問題を解決するためには、電流計算部分のプログラム構造の大幅な改変が必要である。具体的には、次の 2 つの対策をとればよいと考えられる。

1. 粒子の所属セルをキーとした、厳密なソーティングを行うことで、電流書き込みを行う格子点を SIMD 演算適用対象の 8 つの粒子の間で共通化する。
2. 上記がコンパイラにとって明らかになるよう、電磁場や電流の参照書き込みにスカラー変数を用いる。

この方針に基づくコード改良と性能評価は、次年度に行う予定である。

(3) 研究計画の達成度に関する自己評価：90 %

大規模数値計算に関する成果としては、前年度までに、OhHelp を実装した粒子-流体ハイブリッドプラズマシミュレーションコードによる、放射線帯電子加速過程解析を実現した。またメニーコアアーキテクチャを見据えた計算コードの階層的最適化については、スレッド並列化の重点的な検討および性能評価を実施したことに加え、SIMD ベクトル化促進に向けた初期検討と問題点の洗い出しを行った。これらの成果から、当初の計画がおおむね達成されたと考える。

(4) 今後の展望

年度を通した検討により、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。

また将来のメニーコアプロセッサの普及を見据

え、カーネル計算の SIMD ベクトル化の検討を行った。Xeon Phi 上の Intel Compiler によるプラズマ粒子計算の SIMD 化の傾向と性能特性が明らかになった。今後、より SIMD ベクトル化を促進するためには、電流計算の最内ループのプログラムおよびデータ構造の大幅な改変が必要となる。また、OhHelp によるノード間並列、今年度重点的に検討を行ったノード内並列、SIMD ベクトル化、の各階層の最適実装間の整合性に注意しつつ、全体として超並列演算に対応したプラズマ粒子シミュレーション法を確立するための検討が必要である。この点について重点的に取り組んでいく予定である。

高度化された計算コードによる大規模シミュレーションを、引き続き宇宙プラズマ工学の重要問題に適用していく。特に今後は、日本で計画される宇宙探査ミッションと密接に関連した形で課題を遂行する。具体的には、ジオスペース探査衛星 ERG によって計画される地球放射線帯における衛星観測研究に先行する形で、相対論的高エネルギー粒子生成過程に関する数値解析を実施する。また小型月着陸実験機 SLIM の着陸候補地としても着目されている「月縦孔」周辺のプラズマ電磁環境のシミュレーション研究に新たに取り組む予定である。

7. 研究成果リスト

(1) 学術論文

1. 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.
2. Katoh, Y., A simulation study of the propagation of whistler-mode chorus in the Earth's inner magnetosphere, *Earth Planets Space*, 66, 6, 2014.
3. Shoji, M., and Y. Omura, Spectrum characteristics of electromagnetic ion cyclotron triggered emissions and

associated energetic proton dynamics, *J. Geophys. Res.*, 119, 3480-3489, 2014.

(2) 国際会議プロシーディングス

該当なし

(3) 国際会議発表

1. Miyake, Y., Large-Scale Particle Simulations on Space Plasma Interaction with Scientific Spacecraft, *Plasma Conference 2014, Niigata*, 2014. (招待講演)
2. Miyake, Y., and H. Usui, Electro-magnetic plasma particle simulations on Solar Probe Plus spacecraft interaction with near-Sun plasma environment, *COSPAR, Moscow, Russia*, 2014.
3. Katoh, Y., Plasma wave emissions and particle acceleration in planetary magnetospheres, *2014 URSI-Japan Radio Science Meeting, Tokyo*, 2014. (招待講演)

(4) 国内会議発表

1. 三宅洋平, 人工衛星・宇宙プラズマ相互作用の大規模粒子シミュレーション研究, 日本航空宇宙学会関西支部航空懇談会, 神戸, 2014. (招待講演)
2. 臼井英之, 三宅洋平, 粒子シミュレーションによる宇宙機近傍のプラズマ電磁擾乱の研究, 日本地球惑星科学連合大会, 幕張, 2014. (招待講演)
3. 加藤雄人, 三宅洋平, 中島浩, 臼井英之, 大村善治, 動的負荷分散技法 OhHelp を適用した電子ハイブリッドコードの性能評価, 日本地球惑星科学連合大会, 幕張, 2014.
4. 三宅洋平, Development of Scalable Plasma Particle Simulator with OhHelp Dynamic Load Balancer, *Annual Meeting on Advanced Computing System and Infrastructure, Tsukuba*, 2015. (招待講演)

(5) その他 (特許, プレス発表, 著書等)

該当なし