

jh130023-NA15

超並列宇宙プラズマ粒子シミュレーションの研究

臼井英之（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）

概要 本研究の目的は、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を大規模並列計算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。現在は、OhHelp 適用済のプラズマ粒子シミュレーションコードのさらなる高度化に取り組んでいる。具体的には、近年のスーパーコンピュータで要求される階層的並列化に向け、プラズマ粒子カーネル計算部分の高効率なスレッド並列実装方法について検討を行う。また本年度は独自の物理モデルに基づくプラズマ粒子シミュレーション手法である電子ハイブリッドコードへの OhHelp 適用もほぼ完了した。これに加えて実問題への適用事例として、科学衛星周辺で想定される電子スケールのプラズマじょう乱、地球放射線帯の相対論的高エネルギー電子の加速機構、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の最新研究結果を報告する。

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、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。流体モデルとは異なり、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。

このように 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負荷を、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。今年度は特に OhHelp 適用済コードのハイブリッド並列実装について検討を行った。

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。数 1000 コアオーダーの大規模演算により、太陽近傍を始めとする極限宇宙プラズマ中に置かれた科学衛星と周辺環境間の相互干渉など、宇宙理工学上の問題に取り組む。

また理学的な問題として、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や、非線形イオンプラズマ波動励起過程、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。この目的のため、基礎過程を再現する独自の PIC 粒子コードへの

OhHelp 実装をほぼ完了し、性能評価を行った。

上述した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を紹介し、第 4 節でコードの高効率化に向けた取り組みと当課題の達成状況について報告する。

2. 当拠点公募型共同研究として実施した意義

(1) 共同研究を実施した拠点名および役割分担

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、大規模計算機資源として、京都および九州大学の大規模計算資源を利用する。各研究者の役割分担は表 1 に示すとおりである。

このように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が有機的に協力して行う共同研究体制となっている。

(2) 共同研究分野

超大規模数値計算系応用分野

(3) 当公募型共同研究ならではの事項など

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

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

表 1: 研究の役割分担

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。

3. 研究成果の詳細と当初計画の達成状況

(1) 研究成果の詳細について

A. 太陽近傍プラズマ環境と科学衛星システムの相互干渉に関する大規模全粒子シミュレーション

近年、科学衛星による宇宙プラズマ探査対象の拡がりに伴い、衛星システムと周辺プラズマの相互干渉もこれまでに経験しなかったような様相を見せる可能性がある。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。

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、この電子デバイスケールが極端に小さくなる。この衛星近傍の微細スケールを解像しつつ、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、衛星表面に形成される高密度の光電子および二次電子層のデバイシールド長は数 cm 程度である一方、背景の太陽コロナプラズマ中

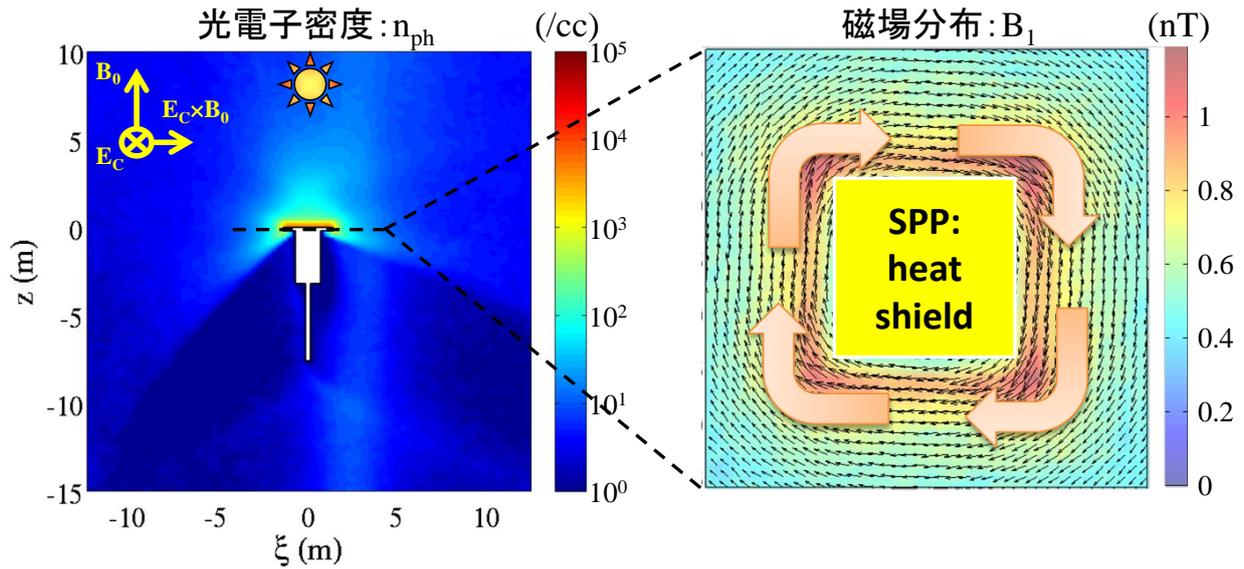


図 1: 太陽探査衛星 Solar Probe Plus と太陽コロナ間の相互干渉に関する大規模シミュレーション

の電子ラーマ半径はおよそ 10 m 程度である。一方、本共同研究で提供される計算資源（メモリ規模～8 TB）により最大で一辺 512 グリッド、1 セル辺り 256 個程度の超粒子を組み込んだ 3 次元シミュレーションが可能であると見込まれる。このことから、衛星近傍ローカルプラズマと背景プラズマ環境の相互干渉過程を実スケールで解像可能なシミュレーションが実現すると期待される。

図 1 は、EMSES コードによって得られた SPP 衛星周辺の光電子分布と熱シールド付近の磁場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。

衛星日照面から放出される高密度光電子は、図 1 より衛星軸 (z 軸) を中心に左右で非対称な分布をもっていることがわかる。これは背景プラズマフロー方向が背景磁場方向 (z 軸) から傾いていることに起因する対流電場が紙面垂直方向に存在するためである。光電子はこの対流電場と背景磁場による $E \times B$ ドリフトにより図中 ξ 軸正方向へと流れるため、左右で非対称な分布となる。このような非対称性は二次電子分布にも見られ、これにより数 100 mV/m のスプリアス電場が衛星周辺で発生することがわかった。また衛星表面から大量に放出される光電子・二次電子電流により衛星周

辺の磁場強度も変化することが確認された。ただしこの磁場変化は数 nT のオーダーであり、背景磁場強度 (数 μT) と比較すると十分に小さく影響は少ない。スプリアス電場に関しては科学衛星観測計画に相応の影響を及ぼす可能性があるため、今後はプローブ部分を含めたより現実的な数値モデルを駆使した定量解析を行う予定である。

B. 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。電子の放射線帯は、地球半径の 1.5 倍から 2 倍までの内帯と、地球半径の 3.5 倍から静止軌道まで分布する外帯とで構成されるが、特に外帯は、地球周辺の宇宙環境で最大の変動現象である磁気嵐において、一度消失した後、再び形成されるというダイナミックな変動を示すことが明らかとなっている。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が変動するかを明らかにすることは、宇宙環境・宇宙天気の研究分野での最重要課題の一つとされている。

本課題では、電子ハイブリッドコードを用いた大規模計算機実験により、放射線帯電子を作り出

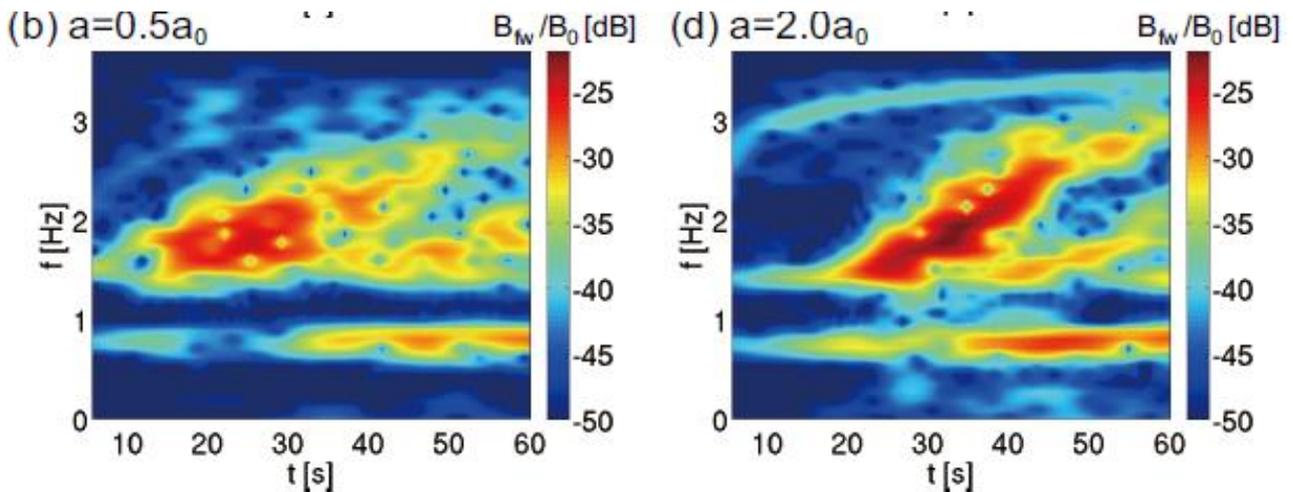


図 2: EMIC トリガード放射に関する大規模シミュレーション. EMIC 波のスペクトル: (a)磁場勾配が弱いとき、(b)磁場勾配が強いとき

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。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た。また、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た。

本年度に実施された計算機実験から、高エネルギー電子の初期分布が同じ条件でも、背景磁場強度の空間勾配を変えることにより、コーラス放射の励起条件が大きく変化する様相が明らかとなった。実際の放射線帯領域において、背景磁場の空間勾配は、磁気嵐などの擾乱時に大きく変化することが明らかとなっている。本研究により得られた計算機実験の結果は、磁気嵐中に発生するコー

ラス放射の発生過程と、その周波数スペクトルを特徴づけるパラメータとして、磁場強度の空間勾配が重要な鍵の一つとなることを示している。今後の計算結果の詳細な解析により、コーラス放射の励起過程の詳細ならびにコーラス放射による放射線帯電子加速過程について、新たな知見が得られると期待される。

C. 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

地球内部磁気圏において、イオンの温度異方性によって、イオンのサイクロトロン周波数・慣性長スケールの電磁イオンサイクロトロン(EMIC)波、特に内部磁気圏衛星観測によって明らかとなった EMIC トリガード放射と呼ばれる、周波数上昇を伴った非線形放射現象が重要である。本研究では、EMIC トリガード放射の発生メカニズムを大規模シミュレーションによって明らかにした。

イオンスケールの運動論現象を取り扱え、かつ衛星観測と比較が容易なリアルスケール・ハイブリッドコードシミュレーションによって、EMIC トリガード放射と高エネルギーイオンとの非線形波動粒子相互作用の解析を行った。内部磁気圏において、磁気嵐時に強く生じるイオンの温度異方性によって自発的に発生する EMIC トリガード放

射を、磁気赤道付近の 1 次元リアルスケールシミュレーションによって再現したところ、衛星観測や地上観測で見られる、間欠的な波形を持った波動が磁気赤道周辺で励起された。波動励起に重要な、波動電場、磁場のそれぞれの方向の共鳴電流がシミュレーション中で交互に現れている様子を示し、それぞれが波動の非線形成長、周波数上昇を支えていることを明らかにした。

さらに、大規模ジョブによるパラメータランにより、地球磁場の勾配による EMIC 波動放射現象の違いを明らかにし、背景磁場勾配と、放射波動のスペクトルのコヒーレンシーとの関係を示した(図 2)。また、それぞれの波動放射と高エネルギー粒子との相互作用を解析することで、極域に振り込まれ、オーロラの一因となる降下粒子の時定数が、コヒーレンシーが低いほうが早くなること、及び高いコヒーレンシーを持つ波動が励起された場合、内部磁気圏において高エネルギープロトン粒子が強く加速されていることを示した。

本解析では上述のように、衛星で観測されているようなプラズマ波動現象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 EMIC トリガード放射の発生メカニズムの解明に成功した。今回の研究成果は、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える。

(2) 当初計画の達成状況について

まず、初めに当課題の申請段階に設定した研究計画の達成度を項目ごとに示す。

A. OhHelp 適用済プラズマ粒子コードへのハイブリッド並列実装導入の検討 : 70%

→最も基本的なスレッド並列方式を実装し、1 ノードでの性能評価を実施した。

B. 独自の物理モデルに基づく新しいプラズマ粒子コード(電子ハイブリッドコード)への OhHelp 実装 : 95%

→OhHelp 実装を完了し、従来の粒子分割並列方式を上回る並列計算効率を確認した。

C. 最適化コードを用いたプラズマ理工学シミュレーション研究 : 90%

→衛星プラズマ相互作用、および非線形イオンプラズマ波動励起メカニズムに関して、顕著な研究成果が得られ、学術論文として発表した。

D. 上記を考慮した総合評価 : 85%

次に項目毎に詳細な進捗状況を紹介する。

A. OhHelp 適用済プラズマ粒子コードへのハイブリッド並列実装導入の検討

プラズマ粒子計算負荷の 95%以上を占める電流密度計算および速度・位置更新部分に着目し、スレッド並列化を高効率に実現する方法について検討を行った。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。また速度更新においても、各粒子位置の隣接格子点の電磁場を参照し、粒子に作用する電磁力を求める。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。このように電流密度配列に対するメモリアクセスパターンをシミュレーション実施前に把握することは困難であるため、スレッド並列化時のデータ整合性に注意を要する。

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。これは粒子分割に基づくプロセス並列化法と類似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。最も `Naïve` な実装であり、スレッド数に比例する作業配列が必要となる等のデメリットもあるが、数あるスレッド並列手法の中のリファレンスケースとしてこの方式を実装し、性能評価を行った。

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

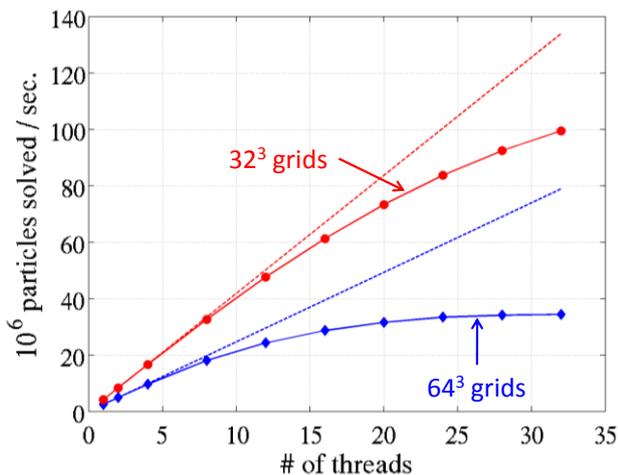


図 3: スレッド並列化された電流計算および速度・位置更新部分の性能. 破線は各々の領域サイズにおける理想直線.

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。

評価は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 1~32 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。また簡単のため、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。性能評価は京都大学 Cray XE6 の 1 ノードを用いて実施した。

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 Reduction 等のオーバーヘッドの寄与が顕著になり、性能が飽和する傾向にある。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。図 4 には、今回の基本的なスレッド並列方式を用いた場合、ハイブリッド並列実装によるメリットがどの程度得られるかを示した。図の横軸は、1 ノード (32 コア) 内でのプロセス数とスレッド数の組み合わせを表し、右側ほど 1 プロセスあたりのスレッド数が多くなる。この結果より、従来の Flat MPI、もしくは 1 プロセスあたり 2 スレッドのみを起動する場合が良好な結果となった。これは元々プロセス並

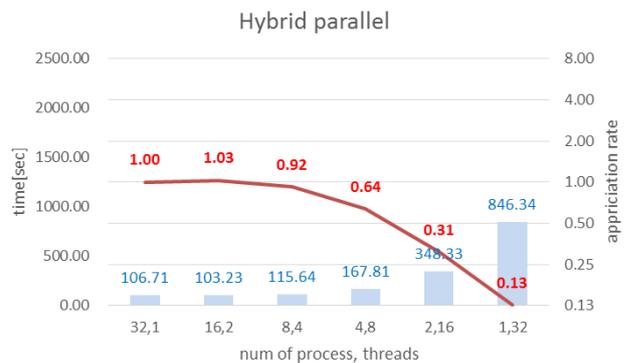


図 4: (Naïve なスレッド並列方式に基づく) ハイブリッド並列実装コードの性能. Cray XE6 の 1 ノード (32 コア) 内でプロセス数とスレッド数の組み合わせを変えて、計算時間 (棒グラフ) と性能 (折れ線グラフ) を測定した。

列によるスケラビリティが良好なことから、スレッド並列方式が Naïve であることが理由である。ハイブリッド並列実装のメリットを引き出すためには、今回試した粒子分割的な発想ではなく、領域分割的な発想をスレッドレベルにも適用する必要があると考えられる。

B. 独自の物理モデルに基づく新しいプラズマ粒子コード (電子ハイブリッドコード) への OhHelp 実装

放射線帯電子加速の電子ハイブリッドシミュレーションでは、通常赤道付近に多数の粒子が偏在し、相当の粒子数不均一が生じるため、OhHelp による動的負荷分散が有効であると見込まれる。従来は計算粒子を各プロセスに等分して割り当て、電磁場の計算は各プロセスで冗長に行う「粒子分割法」で並列化を行っていたが、当課題において電子ハイブリッドコードへの OhHelp 適用に取り組み、その実装をほぼ完了した。

当該コードと既存の OhHelp 実装済 3 次元コード (EMSES) とのプログラム構造上の主な違いは、1 次元コードであることと、新たに流体場を取り扱うために格子データの種類が多いことである。特に、1 次元の粒子シミュレーションは 3 次元の場合に比べて 1 格子あたりの粒子数が多いため (格子点データの Reduction 演算によるオーバ

一ヘッドが相対的に小さく見えるため)、OhHelp に基づく領域分割法が、従来の粒子分割法に対して常に優位性を発揮できるかは、必ずしも明らかではなかった。そこで OhHelp を適用した電子ハイブリッドコードについて、Cray XE6 システム上で性能評価を行った。

Flat MPI 並列を用いて最大 4096 コアまでの Weak scaling による性能評価を行った。シミュレーション設定として、1 コアあたり 256 グリッドの空間長と 2^{15} 個 (32768 個) の粒子を用いた。境界条件は周期境界とし、粒子の初期空間分布としては、シミュレーション空間中に一様に分布する場合と、1 コア分となる 256 グリッドの小領域に全ての粒子が集中している場合それぞれについて性能評価を実施した。図 5 に評価結果を示す。比較のため、従来用いていた粒子分割法での性能評価結果も示す。

まず従来の粒子分割法では、2048 以上の並列度で性能の飽和傾向が確認された。これは粒子分割法で必要となる全格子点電流データの Reduction 演算のオーバーヘッドによるものである。また本本式では粒子が集中している場合の方が高い性能を示しているが、これは粒子の局在により電流密度配列に対する参照局所性が高まったためと考えられる。参考までに粒子分割による 3 次元粒子シミュレーションでは数 10 プロセスから性能飽和がみられていたが、1 次元モデルでは先述した理由より、1000 並列程度まではスケールすることがわかる。

この結果に対し、OhHelp を適用したコードでは 4096 並列度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。また、粒子が局所的に分布する場合と、一様に分布する場合とで、遜色の無い性能が得られており、OhHelp による負荷均衡の効果が得られている事が確認された。この結果により、1 次元モデルの粒子シミュレーションの場合でも OhHelp の手法が有効であり、その優位性は特に数 1000 並列以上で顕著になることが示唆された。逆の見方をすると、格子点あたりの粒子数が多い 1 次元粒子シミュレーションであ

シミュレータ性能 (1 sec.あたりの処理粒子数)

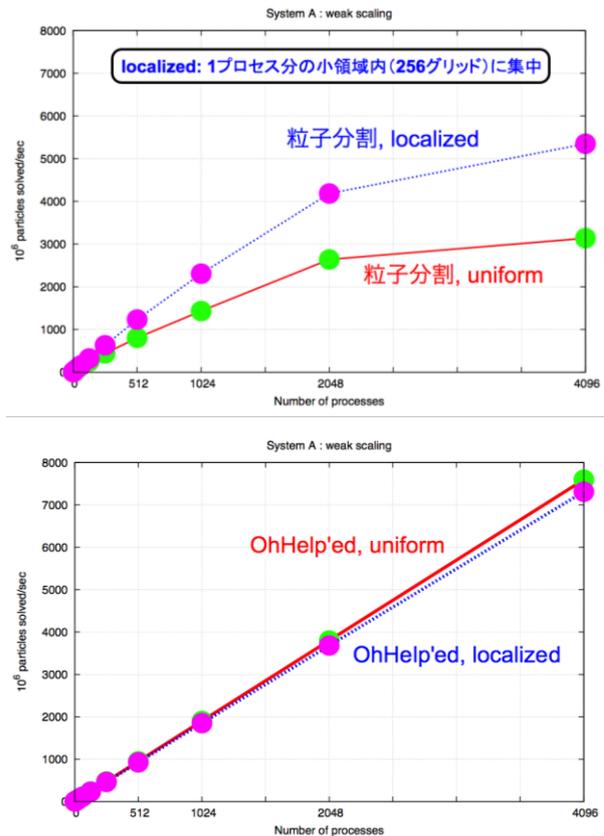


図 5: (上) 粒子分割法と (下) OhHelp 法を用いた電子ハイブリッドコードの性能評価結果。

れば、1000 並列度程度までは、より簡便な粒子分割を用いることも現実的であるといえる。こうした知見は OhHelp 適用を検討している他のプラズマ粒子シミュレーション研究者にとっても有益である。

C. 高度化されたシミュレーションコードを用いたプラズマ工学シミュレーション研究

研究成果の学術的な詳細については 3 節で述べたとおりである。これらの研究成果は主に地球物理分野やプラズマ物理分野の学術誌で発表されており、その内のいくつかは応用分野と計算機科学分野の研究者の共著論文となっている。

4. 今後の展望

当研究の継続課題が、2014 年度 HPCI-JHPCN 課題として採択されている。2014 年度は、ランダムに近いアクセスパターンを持つプラズマ粒子カ

一ネル計算のスレッド並列実装について、領域分割的発想に基づく並列化方式を検討し、実装・性能評価を行う。またこの過程で新たな試みとして MIC アーキテクチャマシンへの実装にも取り掛かる予定である。実問題への応用に関しては、2013 年度に OhHelp 適用が完了した電子ハイブリッドコードを用いて、地球放射線環境により近いパラメータを用いた大規模シミュレーションを実施する。現実のコラス放射励起過程ならびに放射線帯電子加速過程が、より定量的な観点から明らかになることが期待される。

5. 研究成果リスト

(1) 学術論文

1. Miyake, Y., C. M. Cully, H. Usui, and H. Nakashima, Plasma Particle Simulations of Wake Formation behind a Spacecraft with Thin Wire Booms, *J. Geophys. Res.*, 118, 5681-5604, 2013.
2. Shoji, M., and Y. Omura, Triggering Process of Electromagnetic Ion Cyclotron Rising Tone Emissions in the Inner Magnetosphere, *J. Geophys. Res.*, 118, 5553-5561, 2013.
3. Shoji, M., and Y. Omura, Spectrum characteristics of electromagnetic ion cyclotron triggered emissions and associated energetic proton dynamics, *J. Geophys. Res.*, in press.
4. Katoh, Y., and Y. Omura, Effect of the Background Magnetic Field Inhomogeneity on Generation Processes of Whistler-mode Chorus and Hiss-like Broadband Emissions, *J. Geophys. Res.*, 118, 4189-4198, 2013.
5. 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) 国際会議プロシーディングス

1. Miyake, Y. and H. Nakashima, Low-Cost Load Balancing for Parallel Particle-In-Cell Simulations with Thick Overlapping Layers, *Proc. ISPA (TrustCom)*, 1107-1114, 2013.

(3) 国際会議発表

1. Miyake, Y., Particle Simulations of Electromagnetic Environment around Scientific Spacecraft, ISSS-11, Taiwan, R.O.C., July, 2013. (招待講演)
2. Miyake, Y., Full Particle Simulations on Space Plasma Interactions with Scientific Satellite, AP-RASC 2013, Sep., 2013. (招待講演)
3. Shoji, M., Triggering Process of Electromagnetic Ion Cyclotron Rising Tone Emissions in the Inner Magnetosphere, ISSS-11, Taiwan, R.O.C., July, 2013. (招待講演)
4. Katoh, Y. and Y. Omura, Electron hybrid simulation of nonlinear wave growth of whistler-mode chorus emissions in the equatorial region of the Earth's inner magnetosphere, ISSS-11, Taiwan, R.O.C., July, 2013. (招待講演)
5. Katoh, Y. and Y. Omura, Effect of the Magnetic Field Inhomogeneity on the Generation Process of Whistler-mode Chorus Emissions, AOGS 2013, Brisbane, Australia, June, 2013.

(4) 国内会議発表

1. 三宅洋平, 浦部宏晃, 臼井英之, ISSI 衛星プラズマ相互作用研究チーム, 太陽探査衛星・プラズマ間相互作用に関する国際共同研究, JPGU 2013 年大会, 千葉, 5 月, 2013.
2. 加藤雄人, 大村善治, Electron Hybrid Simulations of Whistler-mode Chorus Emissions with Real Parameters in the Earth's Inner Magnetosphere, JPGU 2013 年大会, 千葉, 5 月, 2013.