

12-NA08

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（宇宙航空研究開発機構）、加藤雄人（東北大学）、大村善治（京都大学）、
岩下武史（京都大学）、深沢圭一郎（九州大学）

概要 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。本レポートでは京都大学の **Cray XE6** スパコンシステムや「京コンピュータ」を用いた初期性能評価結果を紹介する。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、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し、科学衛星観測でしばしば問題となるスプリアス電界の発生機構を明らかにした。また太陽風中の特異な局所的磁場構造の再現に成功した。さらに今年度より地球放射線帯高エネルギー電子の加速機構に関する数値研究に新たに取り組むこととし、その準備段階として電子ハイブリッドシミュレーションコードへの **OhHelp** 適用を開始した。

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、近年主流となりつつある大規模クラスタ型スパコン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

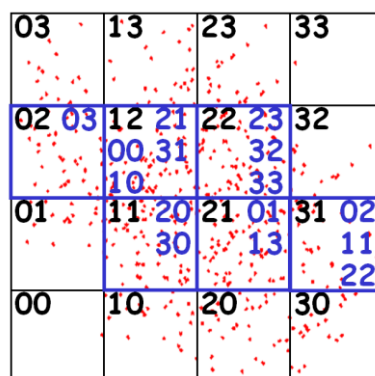


図 1: **OhHelp** アルゴリズムにおける 1 次担当領域（黒字のプロセス番号）および 2 次担当領域（青字のプロセス番号）割り当ての一例。

効率的に処理していくかというボトムアップの思想に基づく最適化も同じく重要である。昨年度から後者の検討を進めており、粒子移送・負荷均衡検査に関するオーバーヘッド削減などにより、実際に 2 倍近くの性能向上を達成している。

また今年度は、実問題への適用も本格化させていく。その課題の一つは、**OhHelp** 適用済の全粒子シミュレーションコード **EMSES** を用いた大規模衛星プラズマ環境シミュレーションである。数 1000 コアオーダーの大規模演算により、科学衛星に搭載される電場観測機器の宇宙プラズマ中特性や衛星からのイオンビーム放出に伴うプラズマ擾乱等、宇宙工学上の問題に取り組む。

本研究のもう一つの目的は、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、地球を取り巻く放射線帯領域において相対論的電子が作り出される過程を定量的に明らかにすることである。基礎過程を再現する独自の **PIC** 粒子コードに **OhHelp** を実装することにより、実際の磁気圏環境下での計算機実験を実施、加速効率や相互作用の時空間スケールを定量的に評価する。

これに加え、**OhHelp** 適用済のハイブリッド粒子シミュレーションコードを用いた、地球磁気圏を覆うマグネトシース中の局所的磁場減少に関する大規模数値解析を行う。今年度は、現実の地球マグネトシースを模擬したモデルを適用することで、地球磁気圏領域毎にミラー不安定性が作る磁場構造の違いやプラズマの分布関数の変化等を明らかにすることを目標とする。

さらに本研究では、上述した 3 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大学名と研究体制

本課題は、神戸大学・京都大学・JAXA・東北大学・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スーパーコンピュータシステムを利用する。より具体的には、京都大学や九州大学のメディア（情報基盤）センターの研究者との共同研究により超並列計算技術を開発し、それを神戸大学・JAXA・東北大学に所属する各研究者が実施する応用問題に適用するという研究体制をとる。

(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先述した **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。

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

I. 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。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

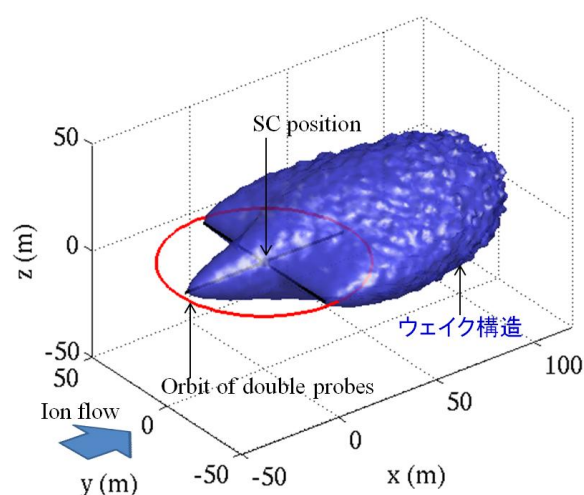


図 2: 衛星下流に形成されるウェイクの 3 次元シミュレーション結果 (イオン密度の等値面図)。

ニズム解明が急がれる。

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ことしばしばある。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～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、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。

今年度は、上述の大規模計算機実験により、代表的な衛星周辺プラズマ環境擾乱であるプラズマウェイク形成や、それに伴うスプリアス電場発生メカニズムの解明につながる知見を得た。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、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。

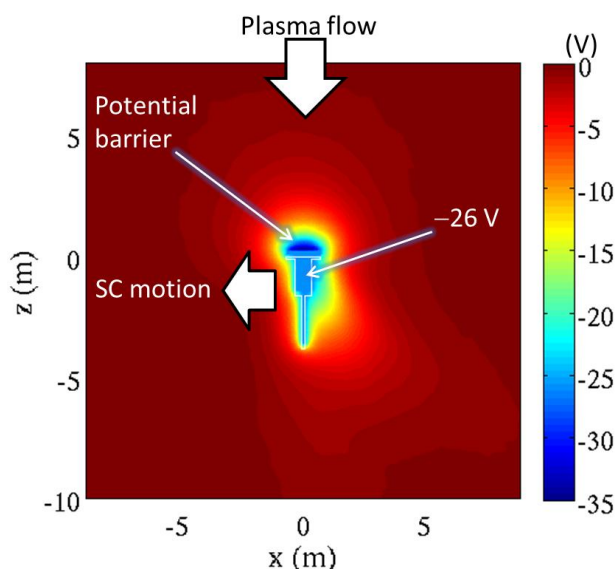


図 3: 太陽コロナ中人工衛星周辺の電位構造。

図 2 は地球磁気ローブや極風中に相当するプラズマ環境下でのウェイク構造のシミュレーション結果である。この結果は 512×512×128 の空間グリッド、 3×10^9 個以上の超粒子を扱うシミュレーションを、京都大学 Cray XE6 スパコン 64 ノード分を用いて実施することにより得られた。図はイオン密度が背景プラズマの 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。この結果より、衛星本体だけではなく非常に細いブーム金属がイオン流を散乱する効果が、ウェイク形成にとって非常に重要であることが判明した。またその原因としてブーム金属が光電子放出により大きく正に帯電していることが原因であることを見出した。さらにはこのウェイクに起因して衛星周辺に発生するスプリアス電場を計算機実験中で再現することにも成功し、実際の衛星観測との良い一致を見た。このことは今後、大規模数値解析を多数回行うことにより、未知のスプリアス電場波形の発生過程を同定することが可能となることを示すものである。

次に前回の中間報告以降に本格的に開始した太陽近傍環境における人工衛星・プラズマ相互作用の初期解析結果を紹介する。現在 NASA を中心に太陽コロナの直接衛星観測を目指す Solar Probe Plus 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。そこでこれまで蓄積してきた超並列プラズマ粒子シミュレーション技術を応用し、当該問題に取り組むことにした。

図 3 は、Solar Probe Plus の衛星形状を模擬し、太陽から 590 万 km のコロナ環境で想定される太陽風プラズマ流中に配置した際の空間電位分布のシミュレーション結果である。計算結果より衛星は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る。しかし、太陽近傍では非常に強力な太陽放射により大量の光電子が衛星表面から放出されるため、衛星表面における電荷流入バランスに基づく簡易評価では衛星は正に帯電すると予想され、シミュレーション結果とは異なる。この原因としては衛星上面付近に存在する超高密度の光電子雲とそれに伴って形成される負の電位バリアの影響であると考えられる。すなわち衛星表面から放出された大量の光電子のほとんどは空間電荷効果により衛星表面に押し戻されてしまうため、正味の光電子放出電流としては小さくなり、結果として衛星が負に帯電していると説明できる。

初期解析結果で判明したように、太陽近傍という極限環境では、衛星プラズマ相互作用も地球周辺の宇宙空間とは異なる様相を示すため、今後さらに詳細な解析が必要である。特筆すべき点として、当該解析はスイスに本部を置く International Space Science Institute (ISSI) における共同研究課題として欧米の研究者チームとの連携のもとで進められているが、JHPCN の枠組みで提供される大規模計算資源を活用したシミュレーション解析結果は其中で中心的な役割を果たしている。

II. 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は、静止軌道上に位置する実用衛星の異常を引き起こす要因となることが知られるなど、宇宙空間での人類活動に影響を及ぼすことから、いつ・どこで・どのように放射線帯電子のフラックス量の変動するかを明らかにすることが、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。

本研究課題は、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を目的としている。

本共同研究では、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（図 4 下）。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（図 4 上）。本共同研究では、大規模計算機資源を有効に活用して、シミュレーション空間中の磁場強度の空間勾配や、高エネルギー電子の初期速度分布の変化が、励起されるコーラス放射の周波数スペクトルに及ぼす影響を評価して、コーラス放射発生の物理プロセスを定量的に明らかにすることが期待される。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

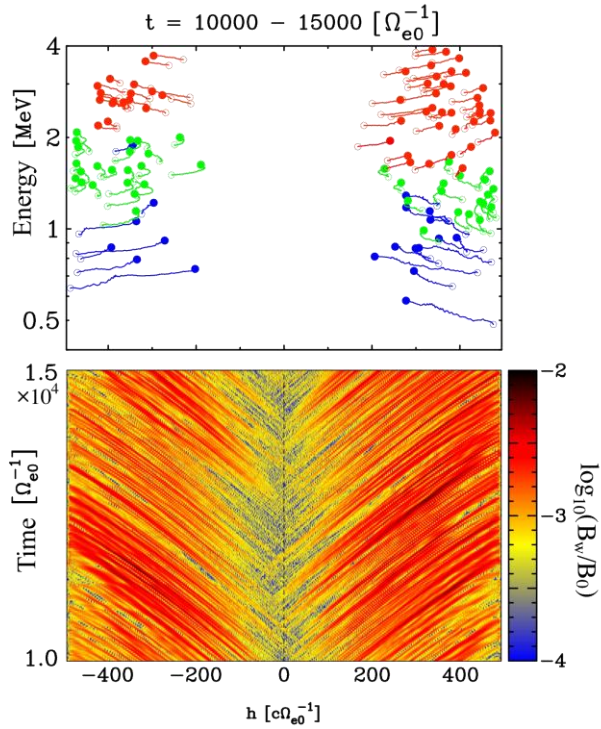


図 4: コーラス放射により加速された電子の軌道（上）と、磁気赤道 ($h=0$) で生成されたコーラス放射が南北両半球に向かって伝搬する様子（下）。

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。この成果は学術論文として米国地球物理学連合の *Journal of Geophysical Research* 誌に投稿済みである。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。

III. 地球磁気圏を覆うマグネトシース中の局所的磁場減少の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

地球マグネトシース領域において多く観測され

る、ミラーモード磁場構造の緩やかな非線形発展の結果、磁気ピーク、磁気ホールと呼ばれる、磁場の大きさが背景に比べて急峻に大きくなる、または小さくなる現象がそれぞれ形成されると考えられている。近年のマグネトシースにおける衛星観測で注目されているこれら磁気ピーク、磁気ホールとミラー不安定性の関係について解析を行った。非線形段階におけるミラーモード磁場構造の合体を詳細に調べるために、2次元、3次元の開放境界モデルにおけるシミュレーションを行った。同時に励起される電磁イオンサイクロトロン波は伝搬し、外に出ていくため、開放境界モデルにおいて、ミラーモード磁場構造の詳細解析が可能となる。それぞれのモデルを比較した結果、2次元モデルにおいて磁気ホールが、3次元モデルにおいては磁気ピークが、それぞれミラー不安定性の非線形発展を経て得られた。いずれの構造も背景磁場に対して平行方向に長く、特に3次元モデルでは、葉巻状の磁気ピーク構造が確認された。また、初期のイオンベータ値に関するパラメータ解析を行った結果、高ベータ条件において2次元、3次元ともに磁気ピーク構造が現れた。高いベータ値で磁気ピーク構造が現れやすくなるこの傾向は、観測と一致する。高いベータ値の場合、ミラー不安定性のしきい値よりも離れてシミュレーションを行うため、より大きな振幅の波動が励起される。このとき、平行方向に電場が発生し、これによって粒子が加熱されるために、磁場にそって粒子群が移動しやすくなる。これらの粒子群が合体するのに伴い、磁場構造も合体していくため、磁気ピーク構造が形成される。3次元モデルでは、粒子の運動の自由度が2次元モデルよりも多いために粒子群の合体が促進され、2次元モデルで磁気ホールが出来るパラメータにおいても、磁気ピークが卓越する。また、磁場構造外部の磁場が小さい領域で粒子はトラップされ、磁気ピーク構造を支え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事例ということができる。

(2) 当初計画の達成状況について

OhHelp 適用粒子シミュレーションコードの実問題への適用に加えて、コードのさらなる高効率化も当該プロジェクトの重点課題の一つである。本年度は、京都大学の新スパコンシステム上での詳細な性能評価を行い、その分析結果を HPC 分野の国際会議へ投稿した。こうした取り組みは京コンピュータなど、より大規模な並列計算環境へのプラズマ粒子シミュレーションのステップアップの足掛かりとなるものである。また本年度より新たに開始された放射線帯電子加速過程の研究に用いる電子ハイブリッド粒子シミュレーションについて、逐次性能チューニングと OhHelp 適用に向けた取り組みを開始した。

OhHelp 適用済の全粒子シミュレーションコードに関しては、①粒子ソーティングによる電流計算ルーチンの参照局所性改善、および②重複領域導入によるプロセス間粒子移送と OhHelp 負荷均衡検査オーバーヘッドの低減、という 2 つの観点からチューニングを行った。これらの概念の詳細は前年度の最終報告書を参照されたい。前年度までの実装では、常に全重複領域を電磁場計算や電流の All-Reduce 通信の対象としていたが、今年度はこの方式を見直し、その瞬間の粒子の存在域に相当する重複領域部分のみを上記処理の対象とするなどの比較的マイナーな最適化を施した。また重複領域導入コードにおいても、新たな粒子の発生や粒子消滅といった状況に対応できるように機能を拡張した。

上述のチューニングの効果および今後の最適化に向けた指針を得るため、京都大学 Cray XE6 スパコンシステムを最大 128 ノード (4096 コア) 使

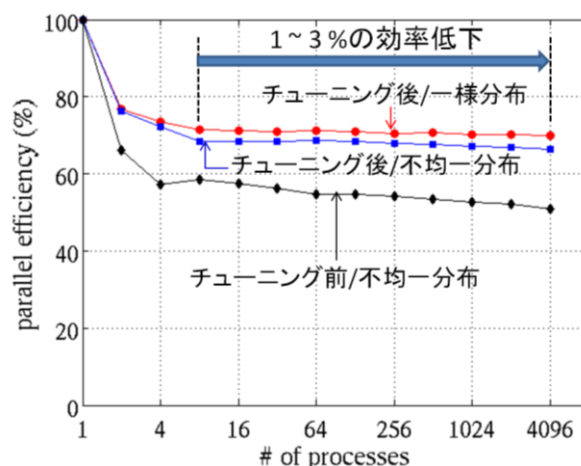


図 5: 改良前後のコードの並列効率. ここで並列効率は[(各プロセス数での性能)/(逐次性能 × プロセス数)]で定義される。

用した並列性能評価を行った。性能評価は Flat MPI で並列化されている当該コードに対して、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 の手法により行った。プロセスあたりの領域サイズを 32^3 の立方体に固定し、 $P = 2^p$ (ただし $p = 0 \sim 12$, 最大で 4096) 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 5 に、前述の 2 点のチューニング前後のシミュレーションコードの性能を並列効率の指標で示す。ただしチューニング前のコードは不均一なケースのみ、チューニング後のコードは両方のケースの結果を掲載している。図よりチューニングにより、プロセス数増加に伴う並列効率低下が有効に抑えられていることがわかる。またチューニング後のコードで、粒子配置を著しく不均一にした場合の性能低下は 5 % 強程度に抑えられており、OhHelp の動的負荷分散機構が有効に機能していることが確認された。

次に図 6 にルーチン毎の実行時間のブレイクダ

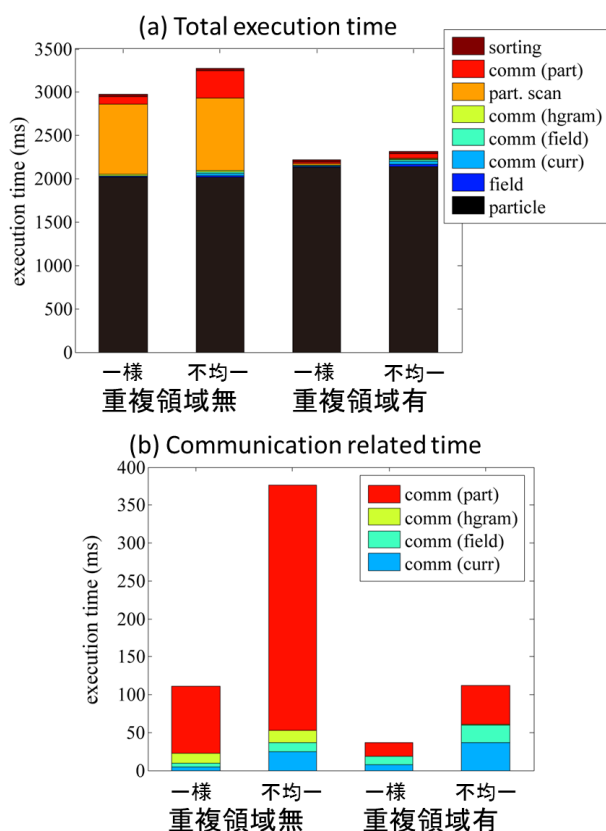


図 6: 計算ルーチン毎の実行時間分析.

ウン解析を行った結果を示す。図 6(a)はすべてのルーチンについて、図 6(b)は MPI 通信に関連するルーチンのみについてプロットしたものである。またチューニングの効果を確認するため、重複領域導入の有無による実行時間の違いを比較している。この結果から、重複領域導入により粒子配列走査 (particle scan) と粒子移送通信 (comm (part)) にかかる時間が大幅に減少していることが確認された。特に粒子移送通信のコストは不均一な粒子配置のケースにおける性能低下の主要因となっていたため、この部分のコストが低減されたことはメリットが大きいと判断できる。

現在「京コンピュータ」上でも、現状のままのコードで性能評価を進めているところであり、一様な粒子配置では暫定的な結果として 16384 コア (2048 ノード) 実行において、90 %以上の並列効率を達成している。一方、OhHelp が力を発揮する不均一な粒子配置のケースでは、1000 プロセス並列以上でスケーラビリティが徐々に悪化する現象がみられている。現在、重複領域導入によりコストが増加している電流の総和計算が一因では

ないかと推測しているが、確定的な診断のためにはさらなる分析が必要である。

放射線帯電子加速過程の研究に使用する電子ハイブリッドコードについては、現状で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」に基づき、Flat MPI で並列化されている。また位置座標に基づく粒子配列のソーティングにより参照局所性の改善に取り組んでいるほか、キャッシュミスマ率がなるべく少なくなるような粒子および電磁場配列のマージ法を検討した。また、前回の中間報告以降、各サブルーチンでのコンパイルリストから、最適化の余地が残されている箇所を洗い出した。その結果、電流密度を求める場合などに、対象とする粒子が開放境界の内側か外側かを判断する IF 文条件分岐後の演算において、最適化が十分でない箇所が残されていることがわかり、コードの書き換えにより最適化の促進を図った。

粒子分割法に基づく並列化では、全領域にわたる電流密度の総和計算が性能のボトルネックとなり、高並列数での効率低下は免れない。放射線帯電子加速の粒子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、粒子に加えて電磁場の計算も分割する領域分割法を導入し、さらに OhHelp 法を導入することが有効であると予想される。これにより、さらに大規模な電子加速過程の数値研究が実施可能になると期待される。

最後に、課題全体の達成状況について述べる。OhHelp 実装済の衛星プラズマ環境シミュレーター EMSES を用いた研究では、衛星周辺の光電子・ウェイク環境に関する極めて定量的な知見が得られ始めており、科学衛星観測ミッションとの連携も進みつつある。こうした結果は、実際に計算科学分野と計先科学分野の共同研究による成果として、学術論文誌に発表されている。一方、理学的な課題については、新たに放射線帯粒子加速機構の研究を開始した。こうした新たな取り組みは、それぞれに特徴の異なる様々なプラズマ粒子シミュレーションコードに対する OhHelp の適用

性評価という側面も持つ。実際の OhHelp 適用にあたっては、元のコードと OhHelp 法との間の親和性や OhHelp 法の最適な実装方法を見極めるために、演算と通信コストのバランスなど当該コードの特性を事前に良く吟味することが必要である。今回新たに使用を開始した電子ハイブリッドシミュレーション手法に対する予備評価により、OhHelp 適用がその高性能化に有効であるとの感触を得た。現在当該コードへの OhHelp 実装に向け、作業者ミーティングを行うなど、精力的に活動中であるが、コードが実際に動作し始めるのは次年度以降に持ち越される見込みであることなどを踏まえ、課題全体の達成度は 75 % であると自己評価する。

4. 今後の展望

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のはもちろんのこと、その過程で得られた並列化・負荷分散・最適化に関する新たな知見を HPC 分野の国際会議で公表していく予定である。実際に応用分野では衛星ウェイク環境に関する大規模シミュレーション論文、HPC 分野では重複領域導入を含めた OhHelp 適用粒子コードのさらなる高効率化に関する論文を、計算科学者と計算機科学者の共同で発表しつつある。また、JHPCN での活動を足掛かりに「京コンピュータ」などより大規模な並列計算環境へのプラズマ粒子シミュレーションの適応を進めていきたい。

5. 研究成果リスト

(1) 学術論文

1. Miyake, Y., H. Usui, H. Kojima, and H. Nakashima, Plasma Particle Simulations on Stray Photoelectron Current Flows Around a Spacecraft, *J. Geophys. Res.*, Vol. 117, A09210, 2012.
2. Shoji, M., Y. Omura, and L.-C. Lee, Multidimensional Nonlinear Mirror-Mode

Structures in the Earth's Magnetosheath, *J. Geophys. Res.*, Vol. 117, A08208, 2012.

3. Shoji, M. and Y. Omura, Precipitation of Highly Energetic Protons by Helium Branch Electromagnetic Ion Cyclotron Triggered Emissions, *J. Geophys. Res.* 117, A12210, 2012.

(2) 国際会議プロシーディングス

1. Miyake, Y., H. Usui, and H. Nakashima, Development of a Scalable PIC Simulator and Its Application to Spacecraft-Plasma Interaction Problems, *Proc. JSST 2012*, OS6-8, pp. 262—267, 2012.
2. Miyake, Y. and H. Nakashima, Low-Cost Load Balancing for Parallel Particle-In-Cell Simulations with Thick Overlapping Layers, *ISPA 2013*, accepted.

(3) 国際会議発表

1. Shoji, M., Y. Omura, and L.-C. Lee, Multi Dimensional Nonlinear Mirror-mode Structures in the Earth's Magnetosheath, AOGS - AGU (WPGM) Joint Assembly 2012.
2. Miyake, Y., and H. Nakashima, Scalable Parallelization of Full - PIC Plasma Simulations with the OhHelp Load Balancer, US-Japan JIFT Workshop 2012.
3. 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, AOGS-AGU (WPGM) Joint Assembly 2012.

(4) 国内会議発表

1. 三宅洋平, 中島浩, プラズマ粒子シミュレーション向け動的負荷分散技法 OhHelp の現状と将来展望, STE シミュレーション研究会, 2012.