

jh160013-NAH

超並列宇宙プラズマ粒子シミュレーションの研究

三宅洋平（神戸大学・課題代表者）、中島浩（京都大学）、加藤雄人（東北大学）
小路真史（名古屋大学）、臼井英之（神戸大学）、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）、船木裕司（神戸大学）、寸村良樹（神戸大学）

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最新の大規模並列計算機アーキテクチャへ効率的に実装し、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、これまで検討を進めてきた OhHelp 分散メモリ並列・高効率スレッド並列、および SIMD ベクトル化の技術的知見を組み合わせ、メニーコア型クラスタ上での高効率プラズマ粒子計算の実現を目指す。これに加え、月や小惑星などの弱磁場小型天体周辺で予想される電子スケールのプラズマ電磁じょう乱現象、電子ハイブリッドシミュレーションによる、地球および惑星放射線帯の相対論的高エネルギー電子加速現象、の物理機構を大規模シミュレーション解析により解明する。

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・北海道大学・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

参加研究者の役割分担は過年度の体制に、大学院生を加えた構成である。詳細は H26 年度最終報告書、表 1 を参照願いたい。宇宙プラズマ理工学分野の中でも粒子モデルシミュレーションの専門家と流体計算の専門家、そして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。

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、近年主流となりつつあるメニーコア型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。この目標に向け、①不均一な粒子分布に起因する負荷不均衡、②粒子位置座標に依存して決定される格子点配列への不規則アクセス、を解決する必要がある。

①について、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。このとき、分割された小領域間で粒子の粗密が生じると、負荷不均衡が発生し、並列効率を著しく損なう。分散メモリ(プロセス)並列レベルでは、我々が独自に開発・実用化を進めている動的負荷分散技法 OhHelp により、既にこの問題に対処している。

②に関しては、格子点配列へのアクセスパターンが粒子位置に依存して決まる、いわゆる間接アクセスを有したままだと、メニーコアプロセッサが有する SIMD 演算機構を有効活用することができない。この問題に関して、我々は所属セルに応じた厳密な粒子ビンングを行うことで、複数粒子間で間接アクセスを排することを提案した。

メニーコアプロセッサを基盤とする超並列システムへのプラズマ粒子計算の実装に向け、上記 2 点の要素技術が有効であることを個別的に示した。今年度の課題は、これらを組み合わせて実用コードを構築する上で問題となる、ビンオーバーフローなどの変則的なイベントに対する対策を検討することである。

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、月などの天体の固体表面と宇宙プラズマの相互作用現象を再現し、将来の着陸探査計画に貢献可能

な定量データを取得する。またプラズマ波動の 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、高エネルギー粒子生成過程を明らかにする。

上述の課題を遂行することは OhHelp 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、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により、動的負荷分散技法 OhHelp や粒子ビンニング法などの高度な並列処理関連技術を提案・開発するに至っている。実際に OhHelp 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、非数値的な発想を随所に活用しており、計算機科学から計算科学への貢献の代表例となっている。本課題を契機として開発・改良された OhHelp は、他の JHPCN 課題（課題番号：JH160023）での活用事例や、OhHelp 情報交換セミナー（2017 年 2 月、於：核融合科学研究所）の開催など。プラズマ関連分野で拡がりを見せつつあり、このことから当研究課題の継続的実施の意義は大きいと言える。

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が得られることが実証された。また所属セルに応じた厳密な粒子ビンニングの高効率実装法を提案し、その結果として従来の PIC コードで問題となっていたコンパイラによる SIMD 命令発行の障害要因を排するこ

とに成功した。これに加えて高エネルギー電子を粒子、背景電子を流体としてモデル化する独自の粒子・流体ハイブリッドコードへの OhHelp 実装が完了し、その有効性が確認された。

応用分野における成果としては、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、月の縦孔地形周辺のプラズマダイナミクス・電気環境の再現と、その中で帯電ダスト粒子の基本的な振る舞いを明らかにした。

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により、宇宙プラズマ中のプロトン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・コーラス放射の発生過程を再現する計算機実験を実施し、そ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) 地球放射線帯高エネルギー粒子を生成するコーラス放射波動の発生条件に関するパラメータサーベイ研究

放射線帯は光速の 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いる領域である。放射線帯の相対論的粒子のフラックス量が、いつ・どこで・どのよう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。今年度は、高エネルギー電子がどのような速度分布を持つときにコーラス放射が発生するかを、広範なパラメータ範囲でサーベイする計算を実施した（図 1）。地球磁気圏の赤道領域に存在する数千～数十万電子

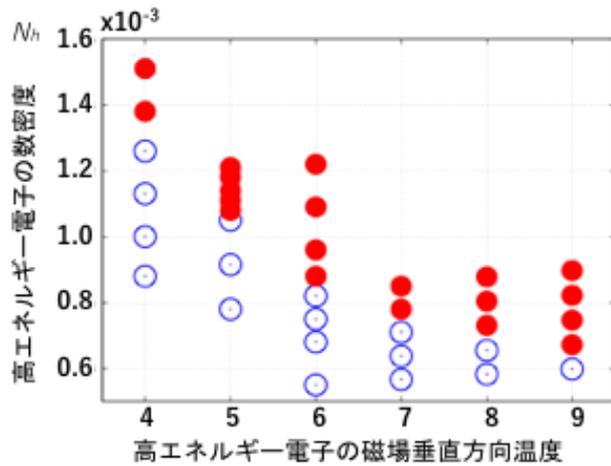


図 1: コーラス放射発生条件のサーベイ計算結果。赤印がコーラス放射の発生が確認されたパラメータを示す。

ボルト（数～数十 keV）の運動エネルギーを持つ電子がコーラス放射を発生する過程でエネルギー源となっている。このコーラス放射の発生条件を定量的に明らかにするには、広範なパラメータ範囲をサーベイすることが必要となるが、一つのパラメータでの計算には 256 コアを用いて約 2 日間が必要であり、一定の計算機資源が必要であった。この点、本研究課題では OhHelp を実装した電子ハイブリッドコードを用いることにより、256 コアでの計算では計算性能が 50%、1024 コアでの計算では 100%の性能向上が得られたことを活かして、効率的にサーベイ計算を実施することができた。その結果、高エネルギー電子の運動エネルギーと数密度が異なる約 40 例の計算結果から、運動エネルギーが高くなるほどコーラス放射発生に必要な数密度は小さくなること、また、コーラス放射の発生に必要な具体的数値を定量的に示すことに成功した。以上の成果は、第 35 回 JSST シンポジウムで速報され、当シンポジウムの優秀論文賞に選出されている。さらにはその詳細を別の学術論文誌に投稿済みである。

(2) 人工衛星詳細構造を考慮した衛星帯電現象解析数値ツールの確立

太陽嵐や磁気嵐など宇宙環境のダイナミックな変動による人類の社会インフラへの影響を正確に予測するため、太陽地球圏環境予報システ

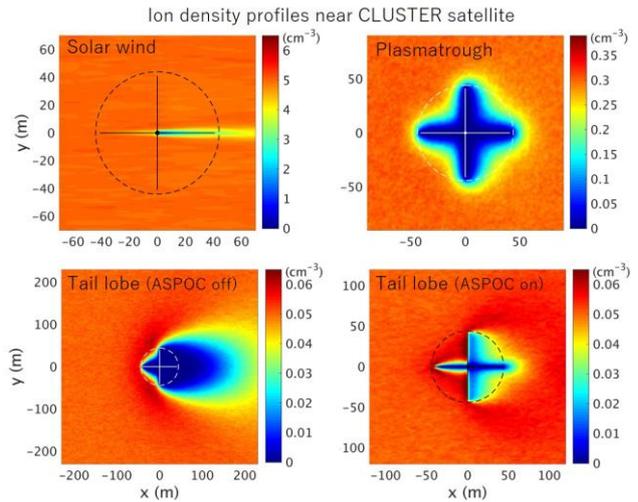


図 2: IBE 法を適用した衛星プラズマ環境シミュレータ EMSES による、様々な宇宙環境パラメータ中での衛星ウェイクの計算例。

ムの開発が急ピッチで進められている。その要素技術として、衛星障害の原因となりうる衛星帯電現象と、太陽活動度によりダイナミックに変動するプラズマ環境の間の相関の、定量的評価手法を早期に確立する必要がある。

実際の人工衛星の帯電過程と、それが衛星運用に及ぼす影響を正確に PIC 法に基づく数値シミュレーションにより評価するには、衛星に搭載された種々の測器を含めた詳細な数値モデルが必要である。しかし例えば科学衛星に搭載される電場プローブなどの観測装置の詳細形状を取り込むのは、プラズマじょう乱現象との空間スケール差のため、JHPCN 共同研究課題で提供される大規模計算資源をもってしても非常に困難である。そこでこれまでの研究で得られた技術的知見を集積し、境界要素法とプラズマ粒子計算手法を組み合わせることで上述の問題を解決できることを示し、Immersed Boundary Element 法として確立した。

本アプローチは、複雑な構造を持つ人工衛星とプラズマの相互作用に関連する幅広い問題に適用できることが認められ、Radio Science 誌の Editors highlight に選出された (<http://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/hub/article/10.1002/2016RS006095/editor-highlight>)。高度な数値モデリング手法と大規模計算資源の活用技術の組み合わせにより、顕著な成果を得た実例となった。

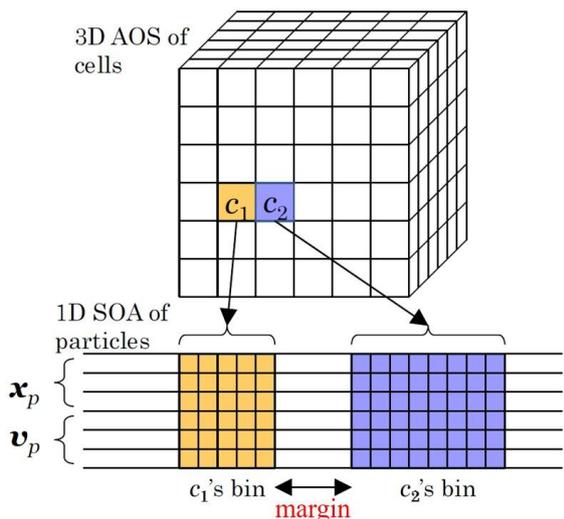


図 3:前年度に変更した粒子データ構造.

6. 今年度の進捗状況と今後の展望

前年度までに、PIC シミュレーションカーネル計算の SIMD ベクトル化促進のため、所属セルに応じた厳密な粒子ビンングを提案した。これらの技術を実用化するには、セル内粒子の増大による粒子ビンのオーバーフローなどに対する対策を適切に行う必要がある。今年度は、そうした例外的な処理の実装を行ったが、その説明の便宜上、粒子ビンング法の採用に伴う、粒子データ構造の変更（前年度実施）に関しても簡単に記述する。

(1) 粒子データ構造の変更(前年度)

まず粒子のデータ構造に関して、従来の構造体配列 (Structure of Array: SoA) から配列構造体 (Array of Structure: AoS) へ変更した。この目的は、複数粒子の同一座標成分がメモリ上で連続して並ぶようにすることにある。これにより、複数粒子間の SIMD ベクトル処理が実現される。

また従来のように複数粒子のデータを粒子配列上に前から順に詰めて配置するのではなく、同一所属セルの粒子毎に固めて配置することとし、所属セルが異なる粒子群の間には適当な数のマージン (空き領域) を設けることとした。これにより、前年度の報告書で紹介したオンザフライ方式に基づく粒子ビンングの採用が可能となる。

ここで所属セルが異なる粒子群の間のマージン

の数は、各セルに存在する粒子数の増減に従って変化し、あるセルに粒子が集中する状況においては、それまでのセル毎の格納可能個数に対してオーバーフローを引き起こすことが想定され、その際の例外処理としてオーバーフローが発生したセル用のバッファ長を増加させる処理を行う。

(2) 粒子ビンのサイズ変更(上半期)

粒子ビンのサイズ変更に関する最低限の条件は、あるセルに集中した粒子を格納できるようにすることであるが、実際には将来のオーバーフローの可能性をできる限り低減するような工夫が必要である。これは粒子ビンのバッファ長変更は、粒子ビンのシフト、すなわち大規模なデータ移動を伴うため、それ自体が高コストであるという理由による。ここでは、オーバーフローの頻度をなるべく抑えるための、粒子ビンサイズの決定方法について検討した結果を報告する。

あるセル c に所属する粒子を格納するための粒子ビンのサイズを $B(c) = |\pi(c)| + g(c)$ と表現する。ここで $\pi(c)$ はセル c に所属する粒子の集合、 $g(c)$ は上述したマージンのサイズである。 $g(c)$ はさらに、各セルに最低限割り当てられる g_f と、 $|\pi(c)|$ に依存して決定される $g_v(c)$ の和、すなわち $g(c) = g_v(c) + g_f$ と表わされる。ここで当該計算プロセス n が有するトータルの粒子バッファ長を N_{array} 、実際にプロセスが保持している粒子数を N_n とすると、 $N_{array} - N_n - |C_n|g_f = M_n$ が、全セルの g_v 用に残されたバッファ数である。 $(C_n$ はセル c の集合である。) これをどのように各セルに振り分けるかがポイントとなる。

M_n の振り分けに関して、もっとも自然な考え方は、各セルの粒子数 $|\pi(c)|$ に比例したバッファ数を $g_v(c)$ に与える、すなわち $g_v(c) = (|\pi(c)|/N_n) M_n$ とすることである。しかしこの簡便な方法では、プロセス間の粒子移送と組み合わせる場合に以下のような問題が生じる。すなわちプロセス間境界に位置する Haloセルは、他のプロセスとの粒子のやり取りに伴って高い頻度で粒子数の増減を繰り返すため、上述の方針ではオーバーフローが

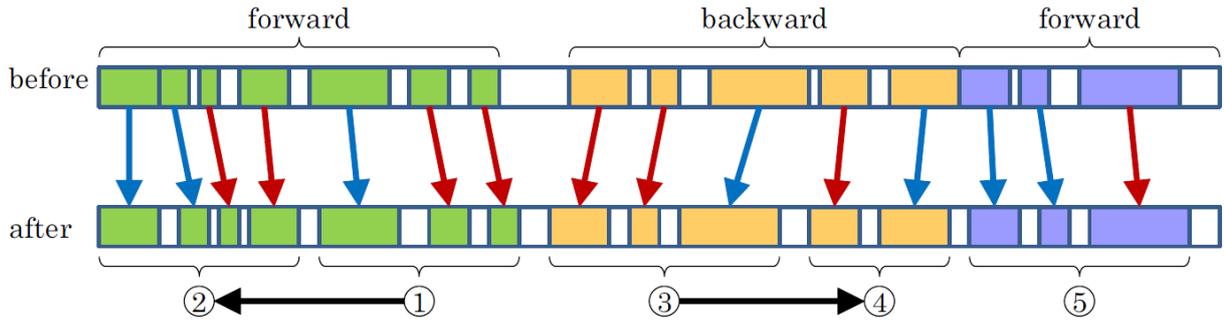


図 4: 粒子ビンのシフト処理の概要。シフト方向に応じて、粒子ビンを「forward」と「backward」のいずれかのシーケンスでグルーピングする。各シーケンス内を①～⑤の順序でマルチスレッド処理する。矢印の色はシフト処理を担当するスレッドの区別を表す。

多発することになってしまう。

これを回避するため次のように $g_v(c)$ を決定する。まず、あるセルでオーバーフローが起こった時点で、各セルのマージン数に応じてセルの集合 C_n を $C_n^+ = \{c \mid |\pi(c)| > B(c) - g_f\}$ と $C_n^- = \{c \mid |\pi(c)| < B(c) - g_f\}$ の2つの部分集合にわけける。まず C_n^+ に属するセル c に関しては $g_v(c) = (|\pi(c)|/N_n) M_n$ により、 g_v を決定する。一方で C_n^- に属するセル c については次の式で $g_v(c)$ を決定することとする。

$$g_v(c) = \frac{R(c)}{\sum_{c \in C_n^-} R(c)} \cdot \frac{\sum_{c \in C_n^-} |\pi(c)|}{N_n} \cdot M_n$$

ここで $R(c) = B(c) - g_f - |\pi(c)|$ である。これにより、粒子ビンのサイズ変更をする時点で粒子数が少ないセルであっても、数ステップ前に粒子数が多ければ十分な数の $g_v(c)$ を与えることが可能となり、オーバーフローの多発を抑制できる。

(3) 粒子ビンのシフト処理の実装(上半期)

粒子ビンのサイズが決まれば、それに従い、ビンのシフト処理を実施する。最も簡単な実装は、全粒子を別のバッファに一度退避させ、元の粒子バッファに書き戻す方法であるが、これには巨大な待避用バッファ領域が必要となる上、2度の粒子走査を含む実装となり、得策とは言えない。

そこで元の粒子バッファ内でシフトが完結するように次のような実装を提案する。本手法では図 4 に示すように、各粒子ビンをそのシフトの方向に応じてグルーピングすることから始める。図 5

から明らかなように、前向きにシフトするグループについては後ろ側のビンから、後ろ向きにシフトするグループについては前側のビンから、それぞれ逐次的に処理することにより、他の粒子ビンを上書きすることなく安全にシフトできることが明らかである。

ここではさらに、前向きと後ろ向きのそれぞれのシーケンス内のシフト操作をマルチスレッド処理する方策を考える。上述したように、各シーケンス内では、ある一方向から逐次的にビン进行处理することが基本であるため、複数スレッドでの並列処理を行うためには、待避用バッファの利用は必須となる。ただしこの場合の待避用バッファはスレッド毎に例えば数千個の粒子相当分で十分であり、冒頭に述べた全粒子用の待避バッファと比較すると十分に小さい。

具体的な手順は以下の通りである。ここでは、図 4 中の緑色で示された forward のシーケンスを例にとり、2 スレッドでの並列処理を念頭に説明する。まず、スレッド毎の待避用バッファに粒子を格納できる限界の数まで、右側から粒子ビンをスレッドに割り当てる。図 5 では①で示されたビンの割り当て（矢印の色はスレッドの区別を表す）が、初回の割り当てとなる。これらのビンに含まれる粒子について、一度バッファに退避させ、シフト後の位置へ書き戻す作業をスレッド毎に並列的に行う。ここで一旦スレッド間の同期をとり、次は図中の②のような割り当てで同様の作業を行

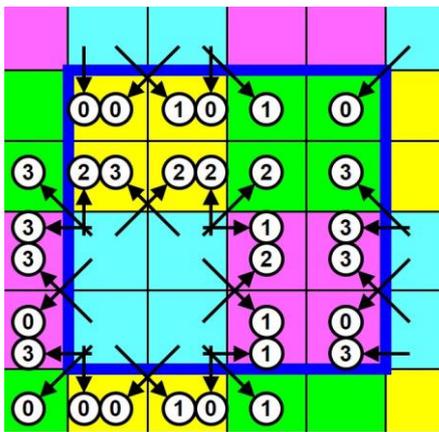


図 5:オーバーフロー粒子の移動方向に応じた、Sub-coloring された 4 つの小容量バッファへの格納パターン。図中の粒子の他、同色内で移動する粒子は①のバッファに格納する。

う。これを繰り返すことで、forward のシーケンスを終了した後は、次に黄色で示された backward のシーケンスを今後は左側のビンから順に同様に処理していく。これを繰り返すことで、粒子ビンのシフトを完了する。

上記の実装の特徴として、粒子のコピー作業は容易に SIMD 化可能であることに加え、各スレッドはせいぜい待避バッファサイズ程度の範囲内で、待避と書き戻しを行うため、参照局所性も良いものとなっている。もちろん(2)に述べたように、シフト処理の頻度はできる限り低減する必要があるが、その例外的な処理による 1 回あたりのオーバーヘッドを低減する意味で本実装が役立つ。

(4) オーバーフロー粒子のバッファ処理(下半期)

前出の(2)で述べたような粒子ビンサイズ変更により、緩やかな粒子数変動をある程度予測し、ビンシフトの頻度を低減することが可能である。しかし、濃い粒子の塊が一定速度で系内を移動するような状況では、通過経路上に存在するセルは急激な粒子数変動を経験することとなり、頻繁な粒子ビンシフト処理が避けられない。このような急激な粒子数変動に対処するため、各スレッドがオーバーフロー粒子を保持する小容量バッファ（以下、OVL バッファ）を持つことを提案する。このときバッファ中の粒子はそれほど多くないことを想定し、SIMD-unaware に処理することを許

すと厳密な粒子ソーティングが不要となる。一方、OVL バッファ中の粒子も以下の Sub-coloring の方法を用いることでマルチスレッド処理は可能である。すなわち、各スレッド領域はマルチスレッド処理のため既に色分けが施されている（例えば H26 の最終報告書を参照）が、粒子移動前後の所属セルへの電流足しこみを考慮すると、各色の中をさらに 4 色(①~④)に色分けする Sub-coloring が必要である。ここでは詳細な説明は避けるが、図 5 に示すように、移動方向に応じて各粒子を①から④の適切なバッファに格納することでスレッド間競合を避けることが可能である。

なお、OVL バッファ中の粒子処理は SIMD 最適化が適用されないため、ある一定の数以上にバッファ内粒子が増加する場合には、(2)のビンシフトを実施して根本的にオーバーフローを解消することとしている。

(5) 提案手法の性能評価と分析(下半期)

これまでに述べたいくつかの要素技術を組み込んだプロトタイプシミュレーターを作成し、京都大学 Cray XC30 の Intel Xeon Phi 5120D (KNC) 上で性能評価を実施した。利用したノード数は最大で 32 であり、Weak scaling 方式で並列性能を取得する。当該プロセッサは物理コアを 60 有しており、ハイパースレッディング機構を利用すると各コアあたり 1~4 のスレッドを動作可能である。各ノードの 60 コアを如何にプロセスとスレッドに分配するかは大きな自由度があり、本性能評価では最も効率の良い組み合わせを見出すことも目的の一つである。

図 6(a)は粒子が均一分布を有するときの使用ノード数に対する性能向上率である。図中の「ideal」は並列効率 100%のときの参考値、「P=12,H=2」が本プロトタイプシミュレーターで実際に計測した性能値である。ここで「P=12,H=2」は各ノード内に 12 プロセスを起動し、ハイパースレッディング H の数を 2 としたことを表している。このときのプロセスあたりのスレッド数は $60/P \times H = 10$ となる。これが平均的に最も良い性能を示した構成

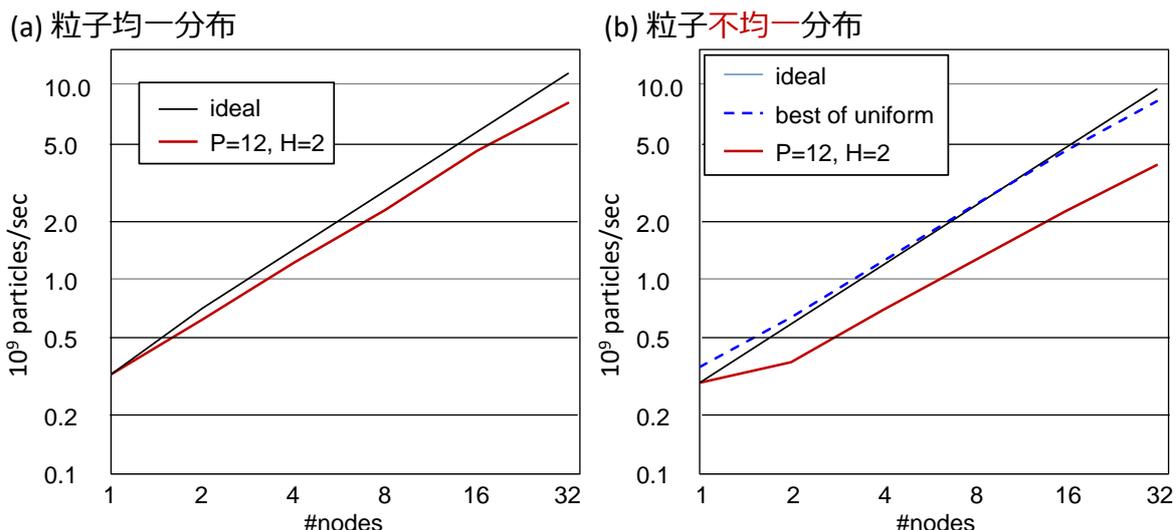


図 6:提案した MPI-OpenMP-SIMD のハイブリッド並列実装に基づくプロトタイプ版 EMSES プラズマ粒子シミュレータの性能. 京都大学 Cray XC30 の Intel Xeon Phi 5120D (KNC)を 32 ノードまで利用して評価した. (b)の「粒子不均一」は全体の 1/4 の領域のみに粒子が分布する状況を示す. ここで、P: ノード内 MPI プロセス数、C=60/P: プロセスあたりコア数、H: ハイパースレディング、T=C×H: スレッド数、である.

であり、物理的にはメモリ空間が共有されている 60 コアを全てスレッド並列に用いることが性能向上に結び付かない実態が浮かび上がった。

図 6(a)から性能は使用ノード数に応じておおむね線形に増加してことが見て取れる。H が 4 でなく、2 の時の方が高性能な理由としては、ハイパースレディングで動作するスレッドがキャッシュメモリを共有しており、H=4 などでは各スレッドが実質的に利用できるキャッシュサイズが不足するためと考えられる。また P=12 が最適となる理由については、各プロセス内で単一のスレッドが MPI 通信を担当していることと関係している。すなわち P<12 では、ノード間通信に関与するコア数が少なくなり、ノードが本来持つバンド幅を充足をしていないことが考えられ、逆に P>12 では、プロセス数の増加によりノード内の通信量そのものが増大し、メモリバンド幅を浪費していることが、それぞれ性能低下の原因になると考えている。

次に粒子分布が不均一なケースとして、全空間の 1/4 の領域のみに粒子が分布する状況を設定し、同様の性能測定を行った。その結果を図 6(b)に示す。参考のため、均一分布での性能グラフを青色

の点線で示している。このときのノード数 N に対する性能はおおよそ N に比例する形になり、均一分布の場合との性能差を見ても、想定以上の性能劣化が生じる、という結果になった。この原因について調査を進めており、ここでは詳細を省くが、OhHelp を用いた分散メモリ並列時に必須となる 1 次領域と 2 時領域の電流の All-reduce 処理が全体の計算時間の 25%以上を占めていることが判明している。すなわち MPI 通信性能の不足が主な原因という結論であるが、これは KNC のノード間通信が必ずホストプロセッサを経由して行われることと関係が深いと推測できる。

(6) 進捗状況の自己評価と今後の展望

今年度は、昨年度までに提案した「粒子ビンングに基づく SIMD-aware な PIC カーネル実装」において問題となる、粒子ビンのオーバーフローに対する検討を中心に行い、できる限り低コストの対処法を提案した (IPDPS 2017 において発表予定)。そして提案手法を組み合わせ MPI-OpenMP-SIMD のハイブリッド並列実装としたプロトタイプコードを作成し、京都大学で提供されるメニューコア型クラスタ上で初期性能評価を実施した。

また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により、地球等の放射線帯におけるプラズマ波動コーラス放射の発生条件を定量的に明らかにした。さらには、本課題で開発された高性能計算技術と高度な物理モデリングの組み合わせにより、複雑な形状を有する人工衛星の帯電現象を詳細に解析する手法を確立した。

これらの実績と当初の研究計画を比較し、本年度の達成度を 90% と自己評価する。

性能評価の結果としては、粒子均一分布の際にはおおむね予想通りの性能が得られたが、粒子が不均一なケースでは予想を上回る性能劣化が確認された。この結果を踏まえ、今後は次に示す課題に取り組むことを予定している。

- A) 京都大学 Cray XC40 (KNL) での性能分析. 特に MPI 通信性能に関して KNC との比較.
- B) 電流の All-Reduce 通信実装の改良. 不必要な同期処理の排除による並行通信処理の実現.
- C) ノード内の粒子不均一分布およびスレッド間負荷バランスへの影響の評価.
- D) データ I/O を含めたプロダクションラン用 Manycore-Aware PIC コードの開発.
- E) Simulation kernel 部分とそれ以外分離およびライブラリ化の検討.

7. 研究成果リスト

(1) 学術論文

1. Miyake, Y. and H. Usui, Particle-in-Cell Modeling of Spacecraft-plasma Interaction Effects on Double-probe Electric Field Measurements, *Radio Science*, 51, 1905-1922. *selected as Editors' Highlight in *Radio Science*, 4 Nov. 2016.
2. Usui, H., Y. Miyake, T. Matsubara, M. Nishino, and J. Wang, Electron Dynamics in the Mini-Magnetosphere above a Lunar Magnetic Anomaly, *J. Geophys. Res.*, 122(2), 1555-1571, 2017.

(2) 国際会議プロシーディングス

3. Katoh, Y., Y. Omura, Y. Miyake, H.

Nakashima, H. Usui, and K. Fukazawa, Electron Hybrid Code Simulations with OhHelp Load Balancer for the Study of Relativistic Electron Acceleration in Planetary Magnetospheres, Proc. 2016 JSST International Conference on Simulation Technology. *Outstanding Presentation Award Winner

4. Nakashima, H., Y. Summura, K. Kikura, and Y. Miyake, Large Scale Manycore-Aware PIC Simulation with Efficient Particle Binning, Proc. IPDPS 2017, accepted for publication.

(3) 国際会議発表

5. Miyake, Y., Full Particle Simulations on Plasma and Dust Environment near Lunar Vertical Holes, USC-Kobe Joint Research Kick-off Symposium, Kobe, 2016. (招待講演)
6. Katoh, Y., and K. Fukazawa, Electron-Hybrid and MHD Simulations of Whistler-Mode Chorus in Planetary Magnetospheres, AOGS, Beijing, 2016.

(4) 国内会議発表

7. 三宅洋平, 西野真木, 月面近傍プラズマ環境における帯電ダスト挙動に関する粒子シミュレーション, 日本地球惑星科学連合大会, 幕張, 2016.
8. 加藤雄人, 深沢圭一郎, 惑星磁気圏におけるコーラス放射発生過程の計算機実験, 日本地球惑星科学連合大会, 幕張, 2016.
9. 小路真史, 大村善治, 高エネルギープラズマと EMIC トリガード放射の相互作用のシミュレーション, 日本地球惑星科学連合大会, 幕張, 2016.
10. 三宅洋平, 西野真木, 月縦孔・地下空洞周辺の電気環境に関する数値シミュレーション, 宇宙科学連合後援会, 函館, 2016.

(5) その他 (特許, プレス発表, 著書等)

該当なし