

jh170005-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（京都大学）、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的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。具体的には、種々のプロセッサ上でシミュレータの性能評価を実施し、プロセス間通信特性やスレッド間負荷バランスがシミュレータ性能に及ぼす影響を検討する。これに加え、月や小惑星などの周辺で予想される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粒子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 年度最終報告書の表 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粒子が所属するセルに依存して参照先が決定されることによる、格子点配列への不規則アクセス、の問題を解決する必要がある。

①について、PIC 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、我々が独自に開発した動的負荷分散技法 OhHelp により、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。

上記 2 点の個別要素技術に加え、それらを組み合わせるハイブリッド並列実装を実現する上で問題となる、粒子ビンのオーバーフローなどの例外的なイベントへの対策も検討した。これらの検討を通して開発したプロトタイプ版プラズマ粒子シミュレータによる Xeon Phi KNC 上での性能評価では、粒子均一なケースにおいて良好なスケールビリティと、Xeon Phi と通常の Xeon プロセッサの理論的な性能差に見合った性能向上が得られた。一方で、粒子分布が極端な不均一なケースでは、

KNC コプロセッサ間の通信性能が原因とみられる性能劣化が顕著となった。今年度は、最新の Xeon Phi アーキテクチャである KNL に対する性能特性の評価と、通信のさらなる最適化も含めた実用コードの開発を進める必要がある。

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・惑星プラズマ・ダスト環境の大規模 3 次元解析である。数 1000 コアオーダーの大規模演算により、プラズマ荷電粒子による天体表面の帯電と、静電気力によって天体上空を浮遊するダスト（微粒子）のダイナミクスを解き明かす。

これと並行して昨年末に打ち上げられたジオスペース探査衛星 ERG による観測と連携したシミュレーション研究を実施する。ホイッスラーモード・コーラス放射などのプラズマ波動の存在に起因する衛星帯電量変動に関する計算機実験解析を実施し、衛星観測データとの比較研究を展開する。

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：JH170003）での活用事例や、OhHelp 情報交換会（2017 年 2 月および 2018 年 3 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 命令発行の阻害要因を排除することに成功した。これらの要素技術を実装して開発されたプロトタイプシミュレーターは、粒子が比較的均一の場合には良好なスケーラビリティと高い実行性能を有することが確認された。

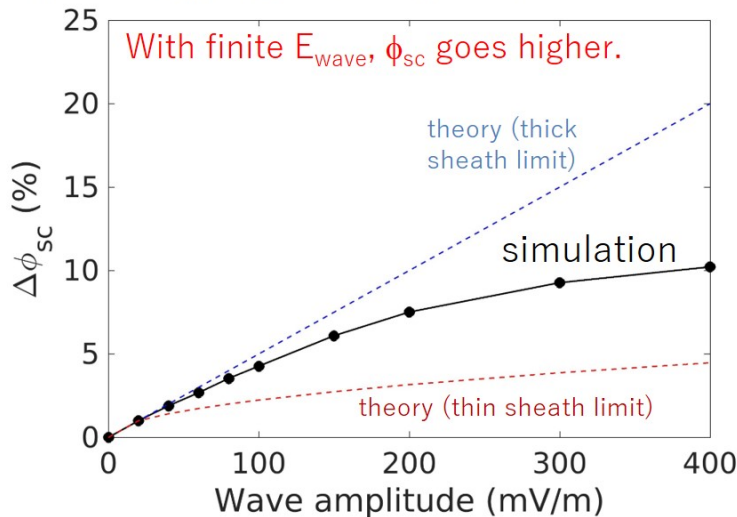
応用分野における成果としては、本共同研究プロジェクトで開発を推進してきた高性能計算技法と、境界要素法に着想を得た高度なモデリング手法の組み合わせにより、これまで困難であった複雑な構造を持つ人工衛星とプラズマの相互作用解析が可能となった。本成果は人工衛星プラズマ相互作用に関する幅広い問題に適用可能であるとして、学術誌の Editors' highlight に選出された。

理学的応用としては、地球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

宇宙空間は電離気体であるプラズマで満たされており、このプラズマが人工衛星に衝突することで、衛星は帯電する。最終的な帯電値は衛星に流入する荷電粒子フラックスによって決定されるが、太陽風のじょう乱により地球周辺のプラズマ環境が大きく変動するのに伴い、異常な衛星帯電が発生することが知られている。衛星帯電を正確に予

(a) 波動電界強度に対する衛星電位変動量



(b) 衛星周辺の電位構造

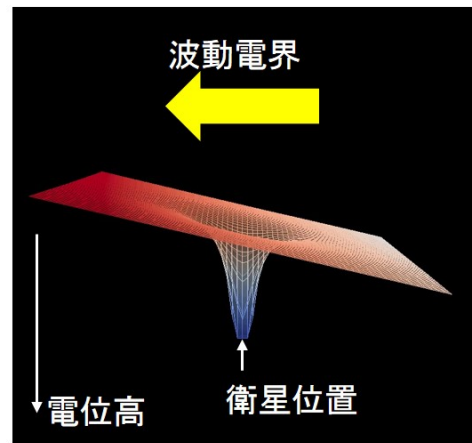


図 1：時間変動する波動電界下での衛星帯電現象. (a) 波動電界強度に対する基準衛星電位からの変動量. (b) 特定の位相における衛星周辺の電位構造. 電子に対するポテンシャル井戸を表現するため、電位の正負を反転して表示している.

測し、未然に対策を講じることは、地球電磁気環境の変動を予測する宇宙天気予報における重要な社会的意義の一つである。特に大規模プラズマ粒子シミュレーションを活用することにより、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と、衛星障害の原因となりうる衛星帯電現象の間の物理的相関を明らかにすることは急務である。現在までに、地球磁気圏に生起するプラズマ波動現象が衛星帯電現象に及ぼす影響を、3次元の大規模プラズマ粒子シミュレーション解析により高精度にモデル化することに成功した。具体的な研究成果は以下の通りである。

地球放射線帯は光速の 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り、そこで励起するプラズマ波動であるホイッスラーモード・コーラス放射が高エネルギー粒子の生成に深くかかわっていることが知られている。この放射線帯における最近の衛星観測ではコーラス波動の検出と同時刻に衛星電位の変動も確認されており、プラズマ波動が粒子加速のみならず衛星帯電現象にも大きく影響を及ぼすことを示唆している。この詳細な物理機構を解明するために、OhHelp 適用済の衛星環境シミュレータ EMSES により当該現象を再現した。

対象とするプラズマ波動の波長空間スケールは、

一般的に人工衛星近傍のプラズマじょう乱スケールに対して十分に大きい。これは、衛星ローカル視点からは、空間的にはほぼ一様で、時間的に変動する交番電磁界として捉えることが可能であることを示している。そこで波動電界をモデル化した空間一様な交番電界を外部から印加することで、プラズマ波動現象が衛星帯電に及ぼす影響を評価した。波動電界は右回りの円偏波とし、周波数は 3.5 kHz、強度は 100~400 mV/m の範囲で変化させた。その結果、図 1 (a) に示すように、波動電界が存在することにより、衛星電位が通常より上昇することを確認し、またその上昇幅は電界強度に依存して大きくなることが判明した。次に衛星周辺の電位構造を調査したところ、図 1(b) にしめすように、衛星からの光電子流出を制限している電位壁の片側が電位勾配 (=電界) の影響で、実質的に低くなっている。これにより衛星からの正味の光電子放出電流が増加したことが衛星電位上昇の原因であることが、実証された。

また高周波シースの理論を応用することで、本現象の理論的なモデル化も開始している。結果として、衛星周辺の光電子シース厚みが衛星サイズに比して大きい場合(Thick sheath limit)と小さい場合(Thin sheath limit)のそれぞれのケースにおいて、波動電界強度が数 100 mV/m までの衛星電

位変動を良く説明できる定式化を得た(図 1 破線)。

実際の宇宙プラズマ空間には、周波数、伝搬特性、偏波が異なる多様なプラズマ波動モードが存在する。これらの波動特性に対する衛星電位の依存性を定量化するために、波動条件を変更した多数回のプラズマ粒子シミュレーションによりパラメータ解析を実施した。まず、背景磁場に平行な波動電界成分を持つケースにおいて、衛星電位の上昇幅が大きくなることが確認され、光電子加速の磁場-波動電界角に対する依存性が反映された結果となった。また磁場に垂直な偏波面をもつ場合においては、右回り円偏波、かつ波動振動数が電子サイクロトロン周波数と一致する条件下で、特異的に顕著な衛星電位上昇が認められた。衛星近傍に存在する光電子の速度分布解析に基づき、この特異な電位上昇がサイクロトロン共鳴に伴う光電子加熱と、それに起因する衛星正電流の増大が原因であることを明らかにした。

このような時間変化する系における特殊な衛星帯電現象は、系の振動周期が衛星帯電に関わる特性時間と特定の関係にあるときに顕著になると予想される。今後、そのような時間スケールに関する検討を行うことで、さらに広範な宇宙天気現象に対する衛星電位応答の包括的な理解につなげていく計画である。

6. 今年度の進捗状況と今後の展望

(1) 種々のプロセッサにおける提案手法の性能評価と特性分析(上半期)

これまでに開発した要素技術を組み込んだプロトタイプシミュレーターによる、京都大学 Cray XC30 の Intel Xeon Phi 5120D (KNC) 上での性能評価では、粒子均一なケースで良好なスケーラビリティを確認したものの、粒子分布が不均一なケースでは顕著な性能劣化が確認された(前年度最終報告書を参照)。この性能劣化の主要因として MPI 通信性能の不足があげられたが、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。そこで最新の Xeon Phi アーキテクチャである KNL を

含めた複数の種類のプロセッサ上で性能特性を調査することとした。

今回調査したプロセッサは、Xeon Phi KNC に加え、Xeon Phi KNL、Xeon (Haswell)、AMD Opteron (Abu Dhabi) である。使用ノード数は最大で 64 であり、Weak scaling 方式で並列性能を取得する。利用した Xeon Phi プロセッサは物理コアを 60~68 個有しており、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るが、本性能評価では平均的に最も効率の良い組み合わせでの比較とした。

図 2(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「ノードあたりの計算性能」である。すなわち並列効率が 100%の場合に、図中ではフラットな性能特性となる。図中の P と H の値は、各ノード内に P プロセスを起動し、ハイパースレッディングの数を H としたことを表しており、このときプロセスあたりのコア数は(ノード内総使用コア数)/P×H となる。今回は、平均して最も良好な性能が得た P と H の構成における性能を表示した。Xeon Phi 上のプラズマ粒子計算ではメモリ空間が共有されている全コアをスレッド並列に用いることは、必ずしも高性能につながらない。

図 2(a)から、従来のマルチコア型のプロセッサでは非常に良好な並列効率が実現されていることがわかるとともに、2 種類のメニーコアシステムではノード数の増加に対して、漸減的な性能低下が認められる。この性能特性の差は、演算性能に対する MPI 通信性能の比が関係しており、メニーコアシステムは高い演算性能を有するために、相対的に通信性能が低く見えることが並列性能の低下につながっていると考えられる。この仮説は粒子が不均一である図 2(b)で、より顕著にメニーコアシステム上での性能低下が認められることとも整合している。すなわち、粒子が不均一なケースでは、通常のプロセス小領域境界間での粒子・電磁場情報の交換に加え、1 次/2 次領域の電流密度場の All-Reduce 処理、ある小領域の主担当プロセ

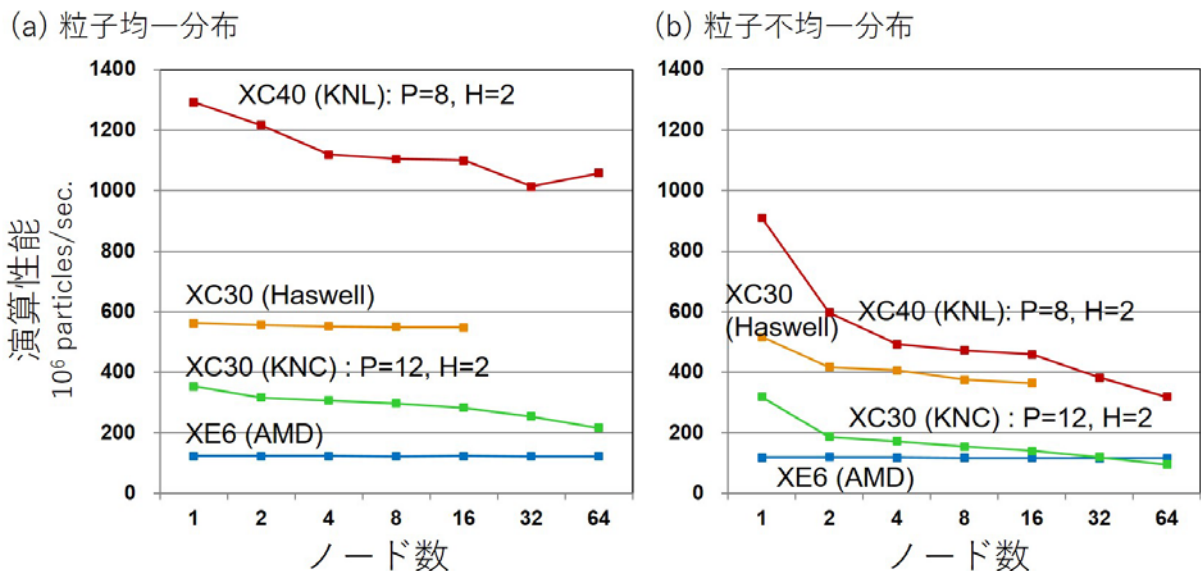


図 2: 提案した MPI-OpenMP-SIMD のハイブリッド並列実装に基づくプロトタイプシミュレーターの性能. 京都大学 Cray XC40 (Intel Xeon Phi KNL 7250)、XC30 (Xeon Phi KNC 5120D)、XC30 (Xeon Haswell E5-2695/v3)、XE6 (AMD Opteron)を最大 64 ノードまで利用して評価した. (b)の「粒子不均一」は全体の 1/4 の領域のみに粒子が分布する状況を示す. ここで、P: ノード内 MPI プロセス数、C=(使用総コア数)/P: プロセスあたりコア数、H: ハイパースレッディング、T=C×H: スレッド数、である. ただし KNL では 1 ノードあたり 64 コアのみを計算に使用した.

スと helper プロセスの間の粒子移送、各プロセスの担当粒子数ヒストグラムのグローバル通信を行う必要があり、通信性能に対する圧迫が大きくなっていることを反映しているとみられる。

上記を細かく調査するため、図 3 に演算・通信処理ごとの実行時間の分析結果を示す。図から明らかのように、PIC カーネル計算以外の処理時間が全体の実行時間のおよそ 60%を占めている。これはこれまでに提案してきた SIMD 最適化技法により、カーネル計算部分の処理性能が大幅に向上（処理時間が減少）したことを反映している。図 3 によると、KNL では電流密度の All-Reduce 計算に特に多くの実行時間が費やされている。

以上のようにメニーコアシステムでは、MPI 通信性能に関わる部分が性能のボトルネックになることが判明した。これは各ノード内の全コアをスレッド並列に用いることが有効でないことも関連している。例えば KNL において、P=8 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<8 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していないことが考えられ、逆に P>8 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られる。

(2) プラズマ電流密度縮約処理にかかるプロセス間通信方式の検討 (下半期)

前節の性能特性分析に基づき、中間報告以降はプロセス間通信方式の見直しを実施した。特に図 3 において大きな割合を占めていた電流密度 All-Reduce 処理を再検討する。

当該処理は、ある小領域に含まれる粒子の計算を複数のプロセスで分担することから発生する。すなわち各計算粒子が生成する電流要素の総和である電流場によって電磁場が更新されるため、複数のプロセスが分担して計算した部分電流場を最終的に足し合わせる必要がある。この際に発生する All-Reduce 通信には以下の特徴がある。

1. All-Reduce の対象となるデータは小領域内

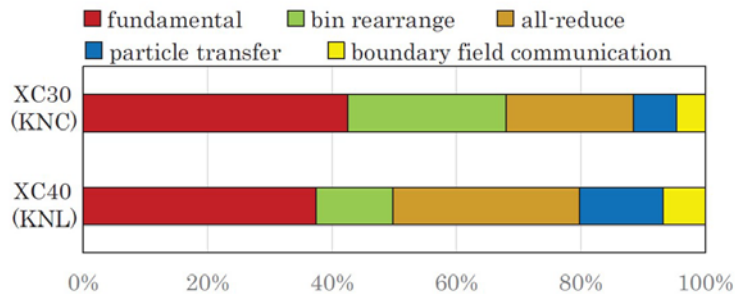


図 3：プロトタイプシミュレーターの演算・通信処理ごとの実行時間。「fundamental」、「bin rearrange」、「all-reduce」、「particle transfer」、「boundary field communication」はそれぞれ PIC カーネル計算、電流密度場の総和計算、粒子移送、電磁場境界通信を表す。16 ノード、粒子不均一分布における実行時間である。

の格子点上電流値に相当し、典型的には数 MB のオーダーである。

2. 当該集団通信のコミュニケータは小領域を分担する（総プロセス数との比較において）比較的小規模のプロセス集合から構成される。そのプロセス数は（たとえ総プロセス数が 2^n である場合でも）一般的には 2 のべき乗にはならない。
3. あるプロセスに着目すると、当該プロセスは 2 つの小領域の All-Reduce 処理に関与する。これは OhHelp アルゴリズムにおいて、各プロセスは 1 次/2 次領域を担当することによるものである。

上記の性質により、今回対象となるプロセス間通信はデータ量が比較的大きく、かつ関与するプロセス間が少ない、「多数回の」All-Reduce 通信であることが導かれる。通常の MPI 通信呼び出しにおいては、データサイズやその他の条件に応じて、種々の通信アルゴリズムから適当なものが自動的に選択されるが、上記のようなデータ量：大、かつプロセス数：小の All-Reduce 通信の多数回呼び出しは一般的ではないため、必ずしも最適なアルゴリズムが選択されているとは限らない。この部分に最適化の余地がある。また先述の 3 の性質により、それぞれの小領域の All-Reduce 通信の間には依存性が生じることがわかる。このとき各小領域の All-Reduce 通信を順に行うと効率が悪いいため、通信のまとまりを red-black に分類し、2 段階の All-Reduce 通信を実施している。実際には、非

同期の MPI 通信関数を用いることで、これを (red-black 間は排他的だが) 1 段階で実施可能であり、この点が 2 つめの最適化可能箇所となる。

次に All-Reduce 通信のアルゴリズムについて検討する。ここでは教科書的な記述は最小限にとどめるが、All-Reduce 通信は、①Reduce&Bcast 方式、②Butterfly 方式、③Recursive Halving/Doubling 方式、④Ring 方式、などいくつかのアルゴリズムが提案されている。このうち②と③については、関与するプロセス数が 2 のべき乗でないとき実装が複雑化し、効率も低下する。本研究で対象とする通信は先述したように、小領域を担当するプロセス数は 2 のべき乗ではないことの方が一般的であるため、今回の初期検討の候補からは除外する。

上述の検討に基づき、プラズマ粒子シミュレーションの電流総和計算を想定した複数の All-Reduce 実装を作成し、その通信性能特性を比較することとした。今回、検討した構成は以下のとおりである。

1. All-Reduce アルゴリズムについて：MPI 通信ライブラリにより自動的に選択された方式 (Native)、Reduce&Bcast 方式、および Ring 方式
2. 複数回の All-Reduce の排他処理：同期通信を用いた 2 段階方式 (2P)、非同期通信を用いた 1 段階方式 (1P)、1 段階かつ部分的な計算・通信のオーバーラップ (LH)

上述の構成の組み合わせにより、8 種類の All-

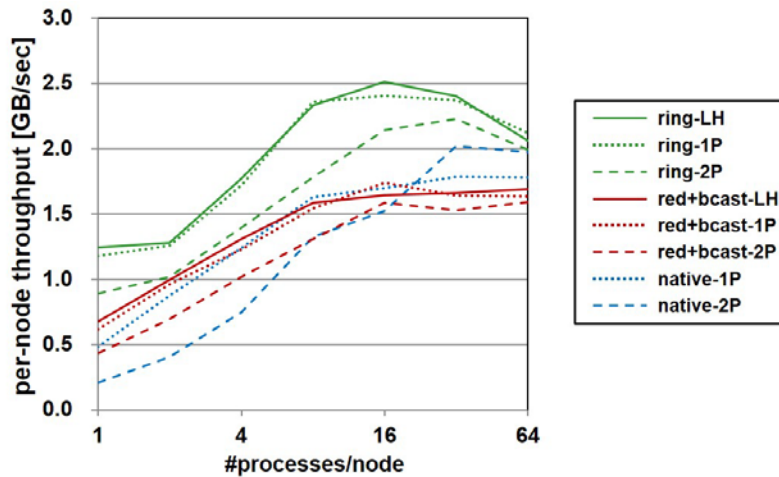


図 4：プラズマ電流密度 All-Reduce 通信処理の複数の実装による通信性能の比較。

Reduce 実装を作成し、1 スレッドあたり 81KB のデータを通信する実験を、京都大学 Cray XC40 with MIC システム 16 ノードを用いて実施した。ここで各 All-Reduce 通信に関与するプロセス数は 4 もしくは 5 とした。また、ノード内において 64 物理コアを使用するものとし、プロセス数 P とスレッド数 T の積は 64 に固定している。ノード内のプロセス数 P をパラメータとして、性能測定を実施した。その結果を図 4 に示す。

図 4 から明らかなように、MPI ライブラリに依拠する Native 方式と比べて、あからさまに Ring 方式で実装した場合は、より良好な通信スループットが得られている。比較的小さな 2 分割帯域幅しか要求しない Ring 方式の特徴が、今回の「データ量が比較的大きく、かつ関与するプロセス間が少ない、多数回の All-Reduce 通信」パターンに適合したと考えられる。また、当初の期待通り、非同期の MPI 通信関数を用いた 1 段階方式の実装を選択することでも、若干性能が向上した。

結果として、今回新たに実装した「Ring かつ LH (1 段階)」により、従来（「Native かつ 2P」）に比べて最大 1.8 倍の通信性能向上を実現することができた。特にノードあたり 16 プロセスを用いた場合の通信スループットは、今回用いた計算システムの物理的なノード間リンク性能をほぼ充当するものとなっている。なお今回の性能測定は、プラズマ粒子シミュレーションの電流総和計算を想

定した疑似データを用いた評価である。今後、実際のプラズマ粒子計算で現れる通信データおよび通信パターンで、今回提案された通信方式の有効性を確認する必要がある。

(3) 進捗の自己点検と今後の展望

今年度は、昨年度までに提案した「MPI-OpenMP-SIMD のハイブリッド並列実装」のための要素技術を実証するためのプロトタイプシミュレーターの性能評価を進めた。その結果、特にメニーコアシステムにおける MPI 通信特性が明らかになり、プラズマ電流密度の縮約処理が新たな性能ボトルネック要因として浮上した。この新たな課題を解決すべく、通信データサイズやプロセス数などの諸条件を考慮した通信方式の検討を開始した。結果として、当該通信処理の高効率化、ひいてはシミュレータ全体の性能向上につながる感触を得た。

これらの実績と当初の研究計画を比較し、今年度の達成度を 80% と自己評価する。この進捗状況を踏まえ、今後は次に示す課題に取り組むことを予定している。

1. 今回提案された All-Reduce 通信方式の現実のプラズマ粒子計算への適用と性能評価。
2. 当該通信処理中に内在する 1 対 1 通信部分のマルチスレッド実行の検討。
3. 電流密度縮約通信高効率化の観点に基づく OhHelp : helper 割当アルゴリズムの再検討。

7. 研究成果リスト

(1) 学術論文

1. Usui, H., Y. Miyake, T. Matsubara, M.N. Nishino, and J. Wang, Electron Dynamics in the Mini-Magnetosphere above a Lunar Magnetic Anomaly, *J. Geophys. Res.*, 122, 1555–1571, 2017.
2. Darian, D., S. Marholm, J.J.P. Paulsson, Y. Miyake, H. Usui, M. Mortensen, and W.J. Miloch, Numerical Simulations of a Sounding Rocket in Ionospheric Plasma: Effects of Magnetic Field on the Wake Formation and Rocket Potential, *J. Geophys. Res.*, 122, doi:10.1002/2017JA024284, 2017.
3. Katoh, Y., Y. Omura, Y. Miyake, H. Usui, and H. Nakashima, Dependence of Generation of Whistler Mode Chorus Emissions on the Temperature Anisotropy and Density of Energetic Electrons in the Earth's Inner Magnetosphere. *J. Geophys. Res.*, 123, 1165–1177, 2018.

(2) 国際会議プロシーディングス

4. Miyake, Y., Y. Funaki, M.N. Nishino, and H. Usui, Particle Simulations of Electric and Dust Environment near the Lunar Vertical Hole, Proc. 8th International Conference on the Physics of Dusty Plasmas, 1925, 020001, 2018.
5. Nakashima, H., Y. Summura, K. Kikura, and Y. Miyake, Large Scale Manycore-Aware PIC Simulation with Efficient Particle Binning, Proc. IPDPS, 202–212, 2017.

(3) 国際会議発表

6. Miyake, Y., T. Kiriya, Y. Katoh, and H. Usui, Numerical Modeling of Spacecraft Potential Modulations due to Time-Varying Plasma Wave Fields, 32nd URSI GASS, Montreal, 2017.

7. Shoji, M., and Y. Omura, Non-linear Generation Mechanism of EMIC Falling Tone Emissions, 32nd URSI GASS, Montreal, 2017.

8. Miyake, Y., and M.N. Nishino, Effects of Electrostatic Environment on Charged Dust Transport near Lunar Holes, AGU Fall Meeting, New Orleans, 2018.

(4) 国内会議発表

9. 三宅洋平, 桐山武士, 加藤雄人, 臼井英之, プラズマ波動電界による人工衛星電位変動現象の数値モデリング, 日本地球惑星科学連合大会, 幕張, 2017.
10. 三宅洋平, 宇宙環境変動を考慮した衛星帯電シミュレーション研究の現状と展望, 地球電磁気・地球惑星圏学会第 142 回総会および講演会, 宇治, 2017. (招待講演)
11. 三宅洋平, 西野真木, UZUME 計画: 月縦孔・地下空洞周辺のプラズマ・ダスト輸送に対する静電気環境の影響, 宇宙科学連合後援会, 新潟, 2017.
12. 三宅洋平, 加藤雄人, 深沢圭一郎, 臼井英之, 地球磁気圏・衛星環境の超並列シミュレーションに向けた高性能プラズマ計算コードの開発, ポスト「京」萌芽的課題・計算惑星アプリケーション開発状況共有ワークショップ, 神戸, 2017.
13. 寸村良樹, 佐伯拓哉, 三宅洋平, 中島浩, メニーコア型クラスタ向け高効率プラズマ粒子シミュレータの開発, 平成 29 年度 RISH 電波科学計算機実験(KDK)シンポジウム, 宇治, 2018.
14. 三宅洋平, 寸村良樹, 佐伯拓哉, メニーコア型スパコン向け実用プラズマ粒子シミュレータ開発の進捗状況, 第 2 回 OhHelp 情報交換会, 多治見, 2018.

(5) その他 (特許, プレス発表, 著書等)

該当なし