

jh150004-NA03

超並列宇宙プラズマ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）、木倉佳祐（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、今後さらなる普及が予想されるメニーコアプロセッサの効率的利用のため、プラズマ粒子カーネル計算部分の SIMD 最適化手法の検討を進める。これに加え、OhHelp 実装済の全粒子プラズマシミュレーションにより、「月」に見られる日照一日陰境界付近のプラズマダイナミクスと表面帯電特性を解明する。また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・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前年度の体制に、大学院生の木倉氏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 (PIC) シミュレーションを専門に扱う研究者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、次世代の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。この目標に向けて解決すべき点は、①不均一な粒子分布に起因する負荷不均衡、および②粒子位置座標に依存して決定される格子点配列へのランダムアクセス、である。

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。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。このため、旧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。そこで計算機科学分野と応用分野双方の研究者により共同開発した、動的負荷分散技法 OhHelp の適用により、この問題を解決することに成功した。

②は、PIC カーネル計算の共有メモリ並列化時にメモリアクセス競合を引き起こしうる。したがってこれを回避するために適切なスケジューリングが必要となる。また、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、コンパイル時に SIMD 演算命令が発行されない。このため、本報告書で検討するように、コード最内ループのプログラム構造やデータ構造を大幅に改変することが必要となる。

メニーコアプロセッサを基盤とする将来の超並列システムにプラズマ粒子計算を高効率に実装するため、上記 2 点を同時に解決するコードを開発することが、当課題の大きな目標である。

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

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 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、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。また PIC のカーネル計算部分について、マルチカラー法を用いたマルチスレッド計算技法を提案し、Xeon Phi 上で 10^2 並列度まで良好なスケーラビリティが維持されることが確認された。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、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。また当該コードを用いた大規模シミュレーション解析は、太陽近傍環境探査衛星と太陽コロナ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

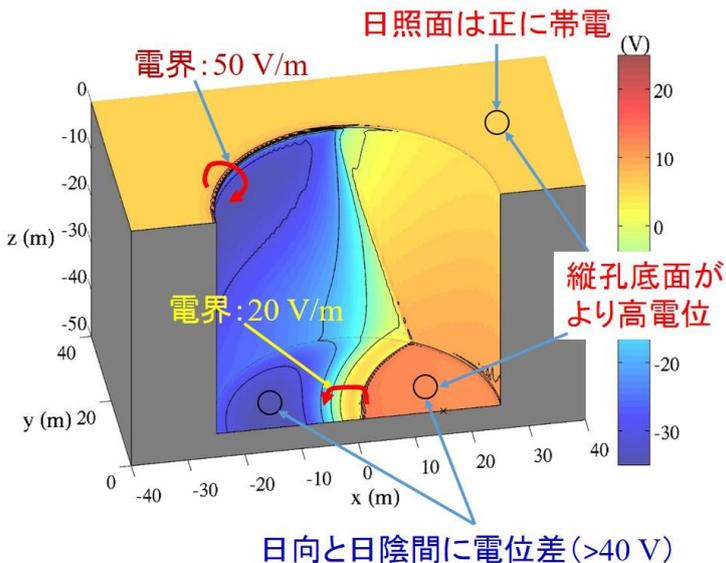
(1) 月縦孔周辺プラズマ環境の大規模全粒子シミュレーション

「かぐや」衛星による地形カメラ観測により、月面に特徴的な縦孔構造が発見されている。この縦孔や地下空洞を直接探査する UZUME 計画が立案されている中、将来の着陸探査への影響を知る上でも縦孔周辺プラズマおよび帯電ダスト環境を事前評価することは重要である。そこで OhHelp 適用済の全粒子プラズマシミュレーションコード EMSES を、月面昼側の月縦孔周辺プラズマ環境の定量評価に適用した。

本解析では、Marius の丘に発見されている直径 50 m、深さ 45 m の月縦孔に着目し、その上空も含めて、おおよそ $200 \text{ m} \times 200 \text{ m} \times 1 \text{ km}$ の空間を計算領域とし、京都大学 CRAY XC30 の最大 128 ノードを利用した計算により、①縦孔近傍のプラズマ分布および電気環境、②その中での帯電ダストの挙動、を明らかにした。

一般的にプラズマに固体表面が接している状態

a) 縦孔の表面電位分布(太陽光照射角度: $\theta = 30^\circ$)



b) 帯電ダストの挙動

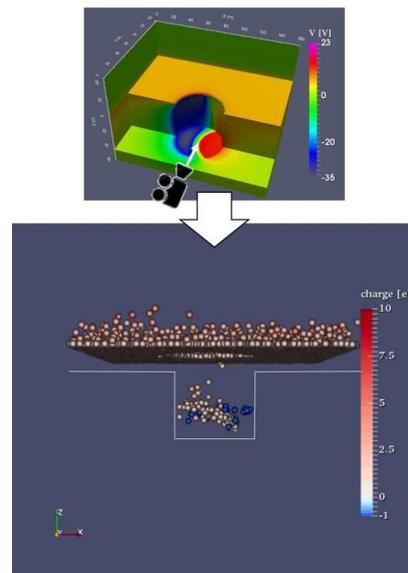


図 1: 月縦孔近傍の電位分布および帯電ダスト挙動の大規模シミュレーション解析。

では、プラズマ荷電粒子が表面に捕捉されることにより、帯電が生じる。図 1a に太陽風（太陽光）入射角度 $\theta=30^\circ$ のケースにおける月縦孔を含めた表面電位分布を示す。図から明らかなように、縦孔内部では、場所によって帯電値が大きく異なり、大きな電位差 (40 V 程度) が生じている。これは、日照面では先述した光電子放出により、正に帯電するのに対し、日陰面からは光電子は放出されず、周辺を浮遊する電子の一部が表面に付着することで負に帯電するためである。この電位差により、日照-日陰境界付近には大きな電場が生じていることが示唆され、着陸探査においては留意すべき点であるといえる。この結果は学術論文として、*Icarus* にて発表済である。

帯電は月面のみならず、月表層に堆積している微小な塵であるダストに対しても発生する。帯電したダストは、月縦孔周辺の特異な電気環境のもとで浮遊し、特徴的なダイナミクスを示すことが予想されるが、こうした帯電ダストが月面探査用のローバーに付着することにより、機器の故障などの障害を引き起こす恐れがある。そこでダストの挙動を明らかにすることを目的に、テスト粒子シミュレーション解析を実施した。

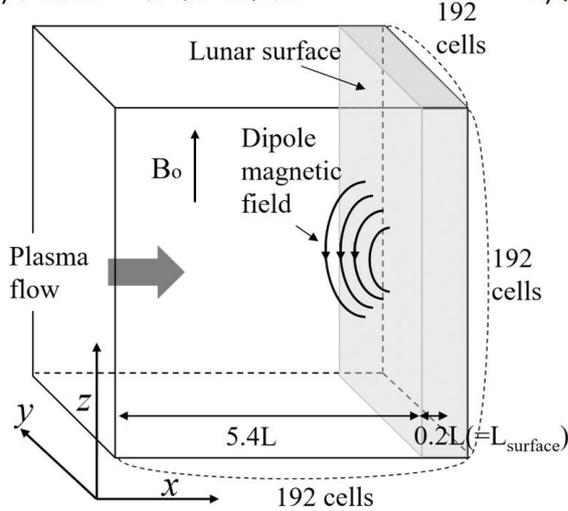
図 1b に縦孔周辺でのダスト分布のスナップショットを示す。初期状態ではダストは月面上に堆

積しているという仮定の下での計算であるが、静電気力の作用により、ダストが浮遊していることが図から確認できる。ダストの持つ電荷は日向では正、日陰では負であるが、一方で日向および日陰の月面からはそれぞれ上向きおよび下向きの電場が発生しているため、ダストが浮かび上がる向きに静電気力が作用する。この静電気力と下向きの重力との釣り合いにより、ダストが上下に振動する運動が確認されている。現在はダストの直径と質量をある一定値に固定した計算であるが、今後はダストの直径に分布があることを想定した計算を実施し、平均的なダスト密度分布を算出することを目指す。

(2) 月磁気異常 - 太陽風プラズマ相互作用の大規模全粒子シミュレーション

上述の解析は、月面上空およそ 1 km までの描像であるが、より上空では太陽風プラズマと月に局所的に存在する磁気異常の間の電磁的相互作用が電気環境の決定に大きな役割を果たす。そこで、*Reiner Gamma* と呼ばれる月磁気異常をモデルケースとして採用し、プラズマ粒子シミュレーションによる解析を実施した。ダイポール中心から磁気圧と太陽風動圧が釣り合う点までの距離を磁気異常の代表長 L とすると、磁気異常ではその代表

a) シミュレーションモデル



b) 月面から上空を見上げた際のプラズマ電流構造

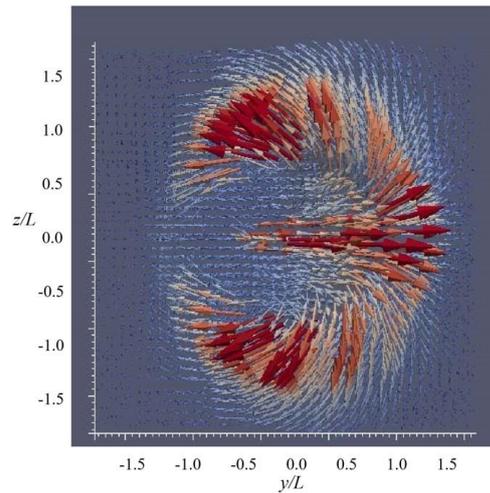


図 2: 月磁気異常と太陽風プラズマの相互作用によって形成される大規模電流構造.

長 L が太陽風電子のジャイロ半径よりも十分大きく、イオンのジャイロ半径より小さい。このような条件下では、太陽風プラズマと磁気異常磁場間の相互作用により小型磁気圏が形成される。また磁気圏境界層における太陽風電子とイオンの磁場に対する応答差に起因する静電界が磁気圏形成に重要な役割を果たす。

本シミュレーションでは、特に磁気圏境界層における電子ダイナミクスによって決定づけられる電流構造に着目して、詳細解析を実施した。シミュレーション結果から、境界層低緯度領域においては朝側から夕方側に向かう電子ドリフト運動が顕著であるが、中高緯度領域においては逆に夕方側から朝側に向かう電子の流れが主に見えた。このような二層の電子ドリフト運動の構造により磁気圏層間側、すなわち磁気異常上空の南北両半球において電子電流の渦構造が見られた (図 2)。特に赤道面における電子電流には、電子-イオン間の荷電分離によって発生する電場と磁気異常磁場による $E \times B$ ドリフトと、磁気圏境界層付近での電子圧力の急速な減少に伴う反磁性ドリフト電流が大きな役割を果たしていることが明らかとなった。これらの結果は小型磁気圏の構造、ひいてはその周辺でのイオンのダイナミクスにも大きく影響を及ぼすという点で、月プラズマ科学上、きわめて重要な成果といえることができる。

(3) 惑星磁気圏における波動粒子相互作用に関する大規模ハイブリッドシミュレーション

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、発生するコーラス放射の波動特性が、背景磁場の空間スケールならびに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ている。放射線帯は固有磁場を持つ惑星の磁気圏に普遍的に存在するが、コーラス放射も同様に惑星磁気圏に共通したプラズマ波動である。本研究の成果から、地球・木星・水星磁気圏でのコーラス放射発生条件の考察が可能となるデータセットが得られており、学术论文への投稿を準備中である。

6. 今年度の進捗状況と今後の展望

(1) 当初の目標に対する達成度の自己評価 : 90%

(2) 進捗の詳細 1 : PIC カーネル計算の SIMD 最適実装の検討

Xeon Phi における SIMD 演算機構は、NEC SX シリーズに代表されるようなベクトル計算機におけるパイプライン処理に概念上は類似しているが、Xeon Phi における SIMD 演算器はリストベクトルのような強力な機構を持たないことや、ベクトルレジスタの数が少ないなどの理由により、複雑なデータアクセスパターンを有するアプリケーションへの適用性は必ずしも高くない。また SIMD 命令発行の可否は最終的にはコンパイラの判断に委ねるしかないので、カーネル計算部のプログラム構造やデータ構造を変更しながら、SIMD 命令が発行可能な実装を見つけ出す、といった試行錯誤を繰り返すこととなる。

このレベルの最適化においては、PIC 計算のカーネル部分である粒子速度位置更新、電流計算を含む粒子ループの SIMD-aware 実装が焦点となる。特に電流計算では、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上の電流格子点配列に配分する。この粒子位置は実行時まで未知数であるため、格子点配列へのアクセスはしばしばランダムになる。

Xeon Phi は 512 bit 幅の SIMD ベクトルを持つため、原理上は 8 つの粒子を同時に処理することが当面の目標であるが、従来のプログラムにおいては、ループ内のプログラム構造が複雑すぎるとして、Intel コンパイルによる SIMD 命令発行がなされていなかった。この主な要因は、電磁場や電流配列に対する間接的なアクセスにある。粒子ループの各繰り返しにおいて、速度更新の際には粒子に隣接する 8 格子点分の電磁場ベクトル (6 成分)、すなわち 48 成分の $E(\delta(x_p))$ や $B(\delta(x_p))$ を参照する。ここで x_p は浮動小数点であらわされた粒子位置、関数 δ はそれを周辺の 8 格子点に整数化する処理を表す。同様に電流計算においては、粒子が存在するセルの辺上に定義される電流ベクトル 12 成分に参照書き込みが行われるが、それを粒子移動前後それぞれについて行う必要があるため、計 24 成分の $J(\delta(x_p - v_p \Delta t))$ および $J(\delta(x_p))$ にアクセ

スする必要がある。ここで v_p と Δt はそれぞれ粒子速度と時間ステップ幅を表し、 $(x_p - v_p \Delta t)$ により粒子移動前の位置を示している。ここでコンパイラは関数 δ によって計算されるインデックスに規則性を見つけないことができないため、8 つの粒子それぞれに対する $E(\delta(x_p))$ 、 $B(\delta(x_p))$ 、 $J(\delta(x_p - v_p \Delta t))$ 、そして $J(\delta(x_p))$ から構成される SIMD ベクトル $48 + 24 = 72$ 本をレジスタに登録することで SIMD 命令発行を試みる。しかし、現実には Xeon Phi で登録可能な最大ベクトル数は 32 であるため最終的には SIMD 命令発行が不可であると判断されてしまうのである。

この問題を解決するためには、次の 2 つの対策をとればよいと考えられる。

- A) 参照書き込みを行う格子点を 8 つの粒子の間で共通化する。
- B) A の事実が「コンパイラから見て」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。

A の対策は、粒子の所属セルをキーとしたソーティングで実現される。ここで、粒子ループ中では粒子位置更新が行われるため、その際に所属セルが変化する可能性があり、その場合は A が満たされなくなる点に注意する必要がある。そこで従来の長大な粒子ループを、速度更新、位置更新前の電流計算、位置更新後の電流計算という 3 つのループに分割することで、各ループの中で常に A を満たすことが保証される。

B については、これまで 1 重の粒子ループであったものを、セルに関する外側ループとそのセルに所属する粒子の内側ループから成る、2 重ループ構造に変更する。これによりセルループの内側では、 $\delta(x_p)$ は共通であるから、 $E(\delta(x_p))$ 、 $B(\delta(x_p))$ を e や b 、 $J(\delta(x_p))$ を j といったスカラー変数にコピーすることが可能である。内側での粒子ループでは、元の配列ではなく、 e 、 b 、そして j を対象に計算を実施する。これらを踏まえ、変更前後のループ構造を表したのが、図 3 および 4 である。このような変更を施すことにより、PIC 計算のカーネル部分である粒子速度位置更新、電流計算に

ついて、コンパイルによる SIMD 命令発行が可能となることを確認した。

次に粒子のデータ構造に関して、①各粒子の持つ座標成分のメモリ上での配置、および②多数の粒子の格納方法、の変更を実施する。まず①について、粒子配列のレイアウトを構造体配列 (Structure of Array: SoA) から配列構造体 (Array of Structure: AoS) へ変更する。この変換の目的は、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、図 4 に示した同一セル内粒子のループにおけるベクトルレジスタへの粒子データの load/store に関して、SIMD 命令が発行されることになり、演算効率の向上が見込める。

②に関しては、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、図 5 のように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。これは次に述べる「On-the-fly 方式の粒子ソーティング」の実装のために必要な処置である。ここで所属セルが異なる粒子群の間マージンの幅は、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、あらかじめ定められた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も想定される。このような場合には、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。この例外処理はメモリ上での大規模な粒子移動を必要とするため、慎重な実装が必要となるが、本稿で詳述することは避ける。

(3) 進捗の詳細 2 : On-the-fly 方式にもとづく低コスト粒子ソート手法の検討

本方式による粒子ソーティングの要点は、メモリ空間上で移動対象となる粒子の個数を、実際にセル間を移動した粒子個数に抑えることで、ソーティングのコストを削減することにある。これは同一セル内の粒子に関して、格納順序を考慮する必要が無い、という PIC アルゴリズム上の特徴に

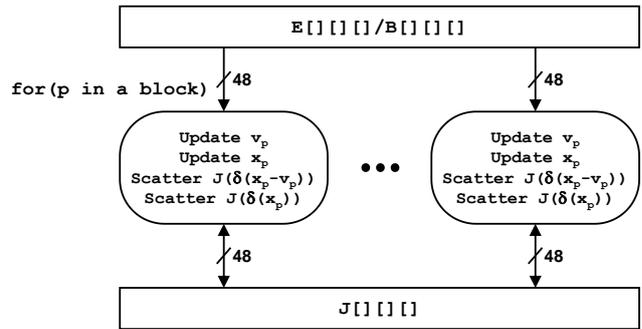


図 3: SIMD 最適化前の PIC カーネルループ。

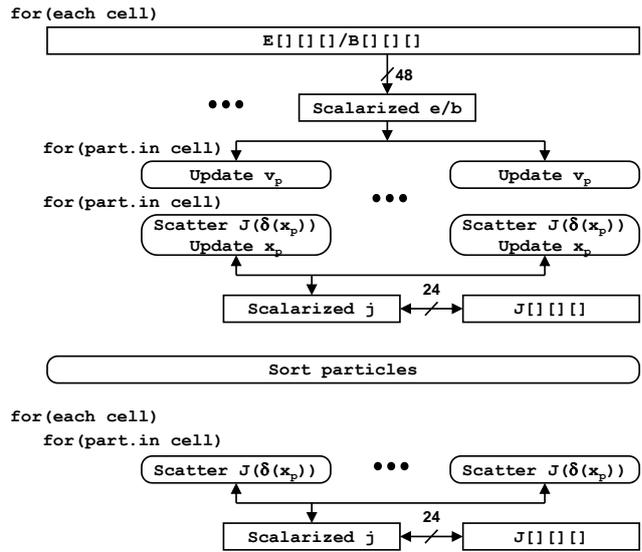


図 4: SIMD 最適化後の PIC カーネルループ。

より、可能となっている。また一般的に各時間ステップでセル境界を超える粒子の割合は比較的小さいと想定されるため、本方針はソーティングコストの削減において非常に有効である。

本方式に基づく粒子ソーティングの動作例を図 5 に示す。図中セル c1 に属する 3 番地の粒子が隣のセル c2 に移動したとする。まず移動する粒子の情報をセル c2 のマージンの先頭 78 番地に移動する。これによりセル c2 に所属する粒子について、49 から 78 番地まで粒子データが隙間なく格納されることが確認できる。このとき、セル c1 については 3 番地に空きが生じた状態となっている。この空き番地を埋めるにあたっては、セル c1 に所属する粒子群の末尾である 32 番地のデータを当該番地に移動させる。これにより移動元のセルにおいても、粒子データが先頭から隙間なく格納されることを保証する。このような手順の繰り返しにより粒子ソーティングにかかるオーバーヘッドコ

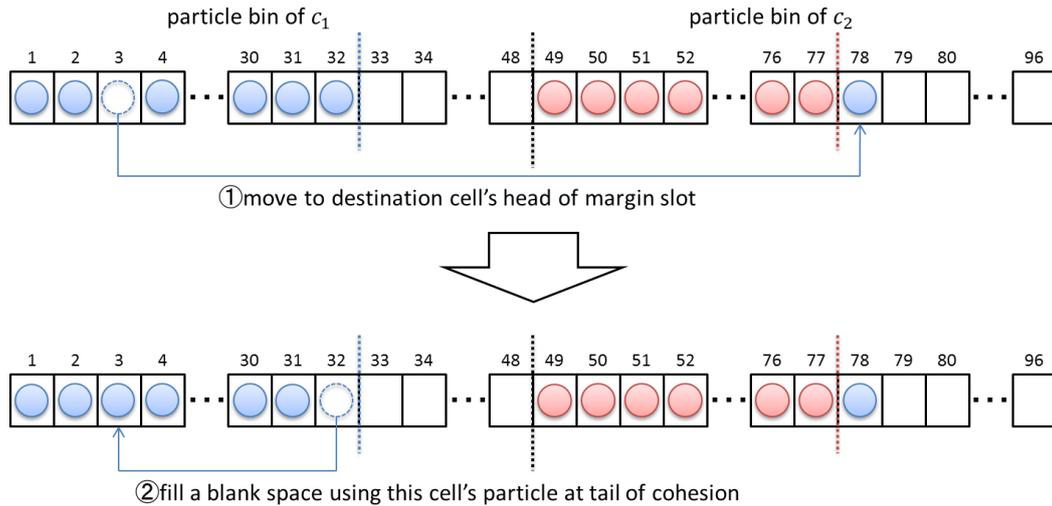


図 5: 粒子データの格納方法と On-the-fly 方式に基づくソーティング手法.

ストを最小化することが可能である。

前節までに述べた最適化を実装した結果、プラズマ粒子計算のカーネル計算部である粒子速度更新および電流計算の最内ループがベクトル化されること、および計算結果が正しいことを確認した。以下では本コードを用いた性能評価結果を紹介する。15 × 120 × 120 グリッドの計算空間内に、電子とイオンをそれぞれ 2,073,600 個ずつ一様に分布させ、100 時間ステップ分計算を実施した。粒子の初速度は x、y、z のいずれかランダムな成分に 0.01 grid/step を与えた。また、粒子ソーティング用に導入した同一セル所属セルの間のマーシンの大きさは cell あたりの粒子数(本評価では 96)の 75% と設定した。

図 6 に使用コア数を変化させて測定した性能評価の結果を示す。60 コアかつハイパースレッド数 HT=3 の 180 スレッドで実行した際に 414×10^6 particles/sec の最高性能を得た。また台数効果については 1 コア実行時の 53.1 倍の速度向上が得られた。図には示されていないが、SIMD 最適化を施す前のプログラムでは、180 スレッド実行での性能は 62.7×10^6 particles/sec にとどまっております、今回の SIMD 最適化により 6.6 倍の性能向上を達成できたことになる。本稿で述べたような包括的な最適化の必要性を示す結果と言える。

(4) 今後の展望

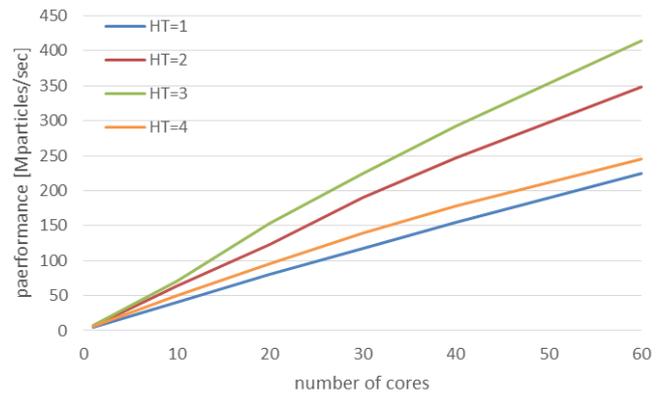


図 6: SIMD 最適化後の PIC 計算性能評価.

現在取り組んでいる SIMD 最適化の先には、これまで取り組んできたノード間並列やノード内並列技法との組み合わせにより、メモリアーキテクチャを基盤とした超並列システムに対応したプラズマ粒子シミュレーション技法の確立を目指す。これは簡単な作業ではなく、各アーキテクチャ階層の最適化実装の間の両立性を丁寧に検討していかななくてはならない。H28 年度以降、こうした課題にも取り組んでいく。

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を、引き続き宇宙プラズマ理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 (例えば ERG 等) と密接に関連した形で、宇宙プラズマ物理過程に関する大規模数値解析を実施する。

7. 研究成果リスト

(1) 学術論文

1. Miyake, Y. and M.N. Nishino, Electrostatic Environment near Lunar Vertical Hole: 3D Plasma Particle Simulations, *Icarus*, 260, 301-307, 2015.
2. Miyake, Y., Y. Nishimura, and Y. Kasaba, Asymmetric Electrostatic Environment around Spacecraft in Weakly Streaming Plasmas, *J. Geophys. Res.*, 120, 6357-6370, 2015.
3. Nakashima, H., Manycore challenge in particle-in-cell simulation: How to exploit 1 TFlops peak performance for simulation codes with irregular computation, *Computers & Electrical Engineering*, 46, 81-94, 2015.

(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., Spacecraft-Plasma Interaction Effects on In-Space Electric Field Measurements, *URSI-Japan Radio Science Meeting*, Tokyo, 2015. (招待講演)
2. Kato, Y., Y. Omura, Y. Miyake, H. Usui, and H. Nakashima, Dependencies of the Generation Process of Whistler-Mode Emissions on Temperature Anisotropy of Energetic Electrons in the Earth's Inner Magnetosphere, *URSI-Japan Radio Science Meeting*, Tokyo, 2015.
3. Miyake, Y., and M.N. Nishino, Full-Particle Simulations on Plasma Environment around Lunar Vertical Hole, 12th ISSS, Prague, 2015.
4. Kato, Y., Y. Omura, Y. Miyake, H. Usui, H. Nakashima, Electron-hybrid Simulations of the Dependencies of the Generation Process

of Whistler Mode Emissions, 12th ISSS, Prague, 2015.

5. Kato, Y., Y. Omura, Y. Miyake, H. Usui, and H. Nakashima, Simulation study of dependencies of the generation process of whistler-mode chorus and hiss-like emissions on temperature anisotropy of energetic electrons, 12th AOGS, Singapore, 2015.
6. Miyake, Y., and M.N. Nishino, Full-Particle Simulations on Electrostatic Plasma Environment near Lunar Vertical Holes, *AGU Fall Meeting*, San Francisco, 2015.
7. Miyake, Y., and M.N. Nishino, Full-Particle Simulations on Electrostatic Plasma Environment near Lunar Vertical Holes, 12th Lunar and Planetary Science Conference, Woodlands, 2016.

(4) 国内会議発表

1. 三宅洋平, 超並列宇宙プラズマ粒子シミュレーションの研究, *Annual Meeting on Advanced Computing System and Infrastructure*, つくば, 2015. (招待講演)
2. 三宅洋平, 西野真木, 月縦孔プラズマ静電環境に関する大規模粒子シミュレーション, 第 59 回宇宙科学技術連合講演会, 鹿児島, 2015.
3. 加藤雄人, 深沢圭一郎, 木星磁気圏におけるコーラス放射発生過程に関する電子ハイブリッド・MHD 連成計算, 第 138 回 SGEPS 総会および講演会, 東京, 2015.
4. Nakashima, H., K. Kikura, and Y. Miyake, Prototype Implementation and Its Fundamental Performance Evaluation of a Manycore-Aware OhHelp'ed PIC Simulation Code, 第 153 回ハイパフォーマンスコンピューティング研究発表会, 松山, 2016.

(5) その他 (特許, プレス発表, 著書等)

該当なし