

適合格子細分化法を用いた 超並列マルチスケール・プラズマ粒子コードの開発

沼波政倫^{1,3}, 白井英之^{1,3}, 梶村好宏^{1,3}, 篠原育^{2,3}

¹ 京都大学生存圏研究所, ² 宇宙航空研究開発機構, ³ 科学技術振興機構 CREST

nunami@rishi.kyoto-u.ac.jp

概要: プラズマ物理学における諸現象は広範な時空間スケールに跨って生じる。本研究では、こうしたマルチスケール現象に対応した第一原理プラズマ粒子シミュレーションを実現するため、数値流体で用いられる適合格子細分化法(AMR 法)をオイラー場である電磁場に適用し、そこにラグランジュ的プラズマ粒子を扱う粒子法(PIC 法)を組み合わせた新しい粒子コードを開発している。AMR 法は、シミュレーション内に生起する現象の空間的特性長を各格子点においてモニターし、最適な空間分解能をもつ格子システムを局所階層的に生成することでマルチスケールシミュレーションを可能にする。粒子の運動論的效果が重要となる微視的プラズマ不安定性や磁気プラズマセイル等の将来型宇宙機推進システム開発ではマルチスケールな現象の定量的理解は不可欠である。本研究では、マルチスケール・プラズマ粒子法を用いた大規模プラズマ粒子シミュレーションを行うことにより様々なプラズマ諸現象の理解を目指す。

1 はじめに

プラズマ物理学で対象となる空間スケールは極めて広範囲に及ぶ。例えば、磁場閉じ込め核融合プラズマでは電子の旋回運動スケール($\sim 10^{-5}\text{m}$)から装置スケール($\sim 10^0\text{m}$)まで、宇宙プラズマ分野では電子運動スケール($\sim 10^1\text{km}$)から磁気圏スケール($\sim 10^5\text{km}$)、また JAXA/ISAS 宇宙推進系グループで研究を進めている磁気プラズマセイル(MPS)開発[1]では宇宙機近傍でのプラズマ噴射スケール($\sim 10^{-1}\text{m}$)から磁気インフレーションスケール($\sim 10^4\text{m}$)までと、4~5桁もの幅広いダイナミックレンジを取り扱わねばならない。そのため、これまでは粒子描像から流体モデルに至る様々な手法を適材適所に使い、さらにはそれらを連結しながらシミュレーション解析が行われてきた。これらの手法はそれぞれが対象とするスケールに焦点を絞り、ある近似を施した上で実行されるが、プラズマが多数の荷電粒子から構成されている以上、粒子シミュレーションは他のどの手法よりも多くの物理情報を含んでいるのは明らかである。特に微視的不安定性や前述の MPS 開発など、粒子の運動論的效果が重要となる対象には絶大な威力を発揮する。しかし、通常の粒子シミュレーション(或いは、PIC: Particle-In-Cell 法)では特徴的スケールが Debye 長程度に制限されるため、プラズマ密度が大きく変化する慣性核融合プラズマや MPS の開発研究では、幅広い空間領域を、考え得る最小の格子上で解析する必要があり、扱える空

間領域には限界があった。我々はこの課題を克服するため、数値流体で近年用いられている適合格子細分化法(AMR: Adapted Mesh Refinement 法)をオイラー場である電磁場に適用し、そこにラグランジュ的プラズマ粒子を従来の PIC 法を用いて導入するという非常にチャレンジングな試みを行っている。AMR 法ではシミュレーション内に生起する現象の空間的特性長(例えば電磁場の勾配長や Debye 長等)を各格子点においてモニターし、最適な空間分解能をもつ格子システムを局所階層的かつ動的に導入することにより、全体としてマルチスケールシミュレーションを実現する。本研究では、将来のペタフロップス級スパコンも見据えて、超並列環境に適用可能な AMR 法によるマルチスケール粒子コードを開発し、大規模プラズマ粒子シミュレーションを行うことにより、マルチスケール相互作用を包含した中での様々なプラズマ現象のシミュレーション解析を試みる。

2 アルゴリズム

本研究の主要部分を成す AMR 法を PIC 法に実装するため、FTT(Fully Threaded Tree)構造[2]と呼ばれる階層格子構造を用意する。これは各格子に対して、細分化された際に生成される子セル、自身の元となっていた親セル、隣り合う隣接セル、階層レベル等の情報を持たせることで階層構造を実現する(図 1)。また、各々をポインタで指示することにより動的な格子細分化・粗視化に柔軟に対応することができる。同時に各格子にはその格子

領域に存在する粒子情報(位置や速度)も持たせる。従って、粒子運動計算では各格子で閉じた形での実行が可能になる。さらに、細分化条件により格子が細分化される度に空間領域を Morton 順序則に基づいて分割し、MPI 通信を通じて並列計算を実現する。粒子シミュレーションでの並列計算では各ノード領域に存在する粒子数のばらつきのために負荷バランスが崩れる危険性があるが、先述のように Debye 長等、粒子密度に依存した物理量を細分化指標に用いた上で Morton 順序則に基づいた領域分割を行うことで、負荷バランスは維持される。上記のように構成された階層格子の下で従来の PIC 法を適用し、マルチスケール粒子シミュレーションが実現される。

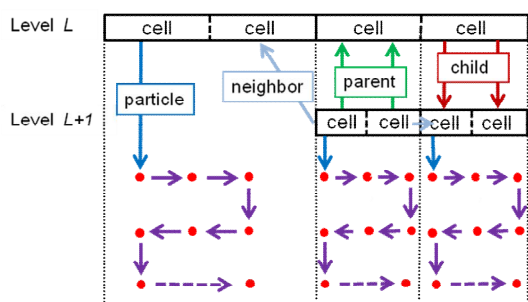


図 1 階層格子構造と粒子のポインタ指示関係。矢印はポインタを表す。

3 解析例

開発したコードのベンチマークをとるため、各ルーチンに対してテストシミュレーションによりコードの評価を行っている。図 2 は球状プラズマ雲の膨張現象に対する AMR 法による粒子計算の例である。プラズマ膨張に伴い粒子密度が変化中、ある一定の粒子密度を条件として各格子には適時、細分化格子が生成・消滅され、境界値以上の領域では非常に高い解像度を維持しながら粒子計算が実行されている。他にも、Langmuir 波の Landau 減衰等、良く知られたプラズマ現象についての物理的なテストや、並列環境下での高効率化に向けた評価・検討を行っている。

4 まとめと今後の展望

PIC シミュレーションでは、膨大な数のラグランジュ変数粒子の情報を空間格子に定義されたオイラー場に電流として配分する。そのため従来は高速演算の理由から規則性をもった等間隔格子が用いられてきた。現状では、局所的に格子点間隔を非一様化する試みは非常に少ない。地球シミュ

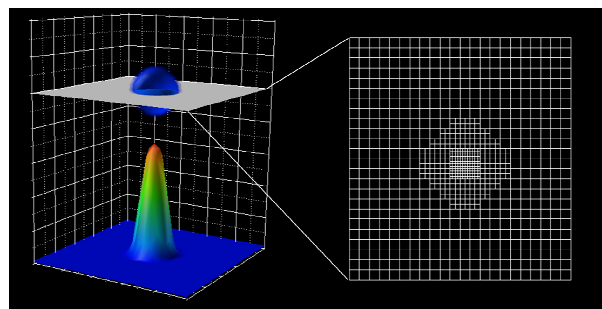


図 2 AMR 法による適合細分化格子生成を伴った粒子計算例。球状プラズマ雲の膨張(左図上段)に従って粒子密度が変化中(同下段)、ある一定の粒子密度を条件として細分化格子が生成・消滅(右図)を繰り返し、粒子計算が実行されていく。

レータに代表される近年の大規模計算機の発展に伴い、粒子シミュレーションで扱える空間領域は大幅に増大したものの、一様等間隔格子による解析には依然として限界があり、動的に制御可能な局所的空間分解能を持つ手法の開発は不可欠である。本研究では、こうしたマルチスケールに対応したプラズマ粒子シミュレーションを実現するため、AMR 法と呼ばれる動的階層格子生成法を PIC 法に適用し、超並列環境も視野に入れた新しい粒子コードを開発した。本手法が、プラズマプロセスや核融合分野、宇宙プラズマ分野における粒子シミュレーション研究に対して非常に強力なツールになることは確実である。即ち、マルチスケールな事例が多いプラズマ現象の理解において、粒子性を損なわずマルチスケールなシミュレーションが可能となる。今後はこの手法を、磁場閉じ込め核融合における微視的不安定性の解析や慣性核融合プラズマにおけるプラズマ膨張過程の解明、さらには MPS 等の次世代型宇宙機推進システムの定量評価に応用していく予定である。

本研究は JST-CREST 課題「惑星間航行システム開発に向けたマルチスケール粒子シミュレーション」の支援の下で行われた。

参考文献

- [1] 船木一幸, 山川宏, “磁気プラズマセイルの研究と深宇宙探査への挑戦”, プラズマ核融合学会誌, Vol.83, No.3, pp.281-284, 2007.
- [2] A. M. Khokhlov, “Fully Threaded Tree Algorithms for Adaptive Refinement Fluid Daynamics Simulations”, J. Comput. Phys., Vol.143, pp.519-543, 1998.