

適合格子細分化プラズマ粒子シミュレーションにおける 動的負荷バランス手法の開発

白井 英之^{1,3}, 八木 耀平^{1,3}, 松本 正晴^{1,3}, 沼波 政倫^{2,3}

1. 神戸大学大学院システム情報学研究科, 2. 核融合科学研究所, 3. 科学技術振興機構(JST)/CREST

適合格子細分化法(Adaptive Mesh Refinement(AMR))を用いたマルチスケール対応プラズマ粒子シミュレーションコード(AMR-PIC)のプロセス並列演算において負荷バランスを維持するため、動的領域分割(Dynamic Domain Decomposition(DDD))法を導入した。

AMR-PIC では、高分解能が必要な領域のみに動的に時間および空間間隔が半分の格子階層を再帰的に生成することに、より少ない計算機資源で効率的なシミュレーションを可能にする。この AMR-PIC のプロセス並列では領域分割手法を用いる。粒子シミュレーションでは、粒子運動更新や空間格子での電流値計算など粒子計算負荷が非常に大きいため、粒子運動による各領域での粒子数の時間変化が負荷バランス不均衡の原因となる。これを回避する方法の一つとして、各プロセスの持つ粒子数が均等になるように全シミュレーション領域を再分割し各プロセスに割り付けなおすことが挙げられる。しかし、AMR-PIC では違った格子幅を持つ階層が存在するため単純に粒子数を負荷バランスの指標にはできない。上述のように細かい格子を持つ階層では、粗い格子階層に比べて時間ステップ間隔も半分になるため、粗い格子階層との時間同期を取るためには粒子計算ループ回数を粗い階層の場合の 2 倍にする必要がある。即ち、階層レベルが深くなれば、粒子計算ループ数は 2 の階層レベル乗の回数だけ必要となる。そこで本 AMR-PIC コードでは、負荷の指標として粒子数ではなく粒子計算ループ数を用いる。粒子数は格子ごとに違い、かつその格子が属する階層レベルによって粒子ループ数も違う。深い階層の各格子に定義された粒子ループ数はその格子の親である基本階層格子の粒子ループ数としてすべて加算され、基本階層の各格子に定義された粒子ループ数を負荷の指標として用いる。

次に、各プロセスに均等な粒子ループ負荷が割り当てられるように基本階層の格子をグルーピングする。この際、まず、近隣格子ができるだけ順番に並ぶように space filling curve (例えば Morton 順序)を用いて基本階層内の全ての格子の番号付けをする。次に、動的領域分割ルーチンにおいて、space filling curve で番号づけられた格子順序列をそれぞれ粒子ループ負荷が均等になるようにプロセスの数だけ切る。そして、切り取られグルーピングされた基本階層格子群とそれに属する深い階層の格子群を各プロセスに割り付けることにより負荷バランスを実現する。小規模並列における DDD の実装例を図に示すが、青色ヒストグラムにあるように DDD 適応後は粒子ループ数がプロセス間でほぼ均等になる。実際には、負荷バランスの不均衡がある閾値を超えた場合に DDD を適応し、並列演算パフォーマンスを向上させる。DDD の詳細とそれを用いたパフォーマンス例、オーバーヘッドの評価などについて議論する。

