

負荷分散技法を用いた 3 次元粒子シミュレーションによる 高密度プラズマ中でのプラズマチャンネル形成の研究

羽原 英明

大阪大学 大学院工学研究科 電気電子情報通信工学専攻

1. はじめに

大阪大学におけるレーザー核融合研究では、高速点火方式[1]という、核融合燃料の高密度圧縮（爆縮）過程と加熱過程を分離する方式が主流となっている。この方式では球状爆縮の均一性への要求が緩和され、点火燃焼に必要な投入エネルギーが少なく済むという利点がある。一方、燃料プラズマを高効率に加熱する手法は様々な提案が検討されている段階である。爆縮プラズマの密度分布は中心より指数関数的に減少しており、レーザーは臨界密度と呼ばれる密度領域までしか伝搬できない。そこで高強度レーザーを照射し、生成する高エネルギー電子で燃料を加熱することが主に試みられている。この高強度レーザー強度はいわゆる相対論強度（レーザー電場によって振動する電子のエネルギーが静止質量程度、概ね 10^{18}W/cm^2 以上）であるため、プラズマ中でのレーザーの振る舞いは相対論的自己集束など相対論的な効果が無視できない。そのため、高強度レーザーと高密度プラズマとの相互作用を研究するために PIC(Particle-in-cell)法が広く用いられている[2]。この手法は粒子の運動方程式と、電磁場のマクスウェル方程式を連立させ、系の時間発展を観測する手法であり、プラズマ中の粒子は自由運動、電磁場は空間をデバイ長程度のメッシュで離散化した空間格子上で定義される。また粒子は多数の粒子が集まる超粒子として取り扱い、点電荷ではなく広がりを持つ分布を用いることで粒子移動時の数値ノイズを低減させている。

しかし、我々が実際の実験で扱う系は非常に大きく（空間：ミリメートル、時間：数十ピコ秒）、これは必要となる空間分解能（爆縮プラズマのデバイ長）を考えると 1 方向 10^5 セル、また必要な時間分解能（プラズマ周波数の逆数）より計算ステップは 10^7

ステップ程度必要であり、更に 1 セルあたり最低でも 10 粒子を配置したとしても、全空間で 10^8 以上の粒子運動を計算する必要がある。

このような大規模計算を実行するためにスーパーコンピュータを用いた計算が行われてきた。特に近年の技術的進歩により大型化が容易となった分散メモリ型のクラスタ並列計算機に向け、様々な実装手法が開発されている[3]。主なものとして、計算体系を空間的に分割し、各 MPI プロセスがそれぞれの領域を計算する領域分割法が広く用いられている。この手法ではそれぞれの領域で計算が閉じており、粒子の領域間移動や境界での電磁場の情報を各プロセス間でやり取りするだけなので通信コストを低く抑えることが可能となる。しかし我々が取り扱う爆縮プラズマでは、各空間における密度の差が非常に大きく、均一に空間を分割すると計算量の大きなプロセスがボトルネックとなり、分割量が多くなるほど全体の計算効率が低下する。さらに粒子も光速に近い速度で移動するために時間的な密度の変動が大きく、必ずしも常に特定の領域の計算負荷が大きいわけではない。このような理由で、現在世界で広く用いられている並列計算対応の PIC コードにおいては、各プロセスが取り扱う領域の大きさを動的に変化させる手法が取られている[4,5]。

我々はこれとは別に、領域は均一に分割するが、負荷の少ないプロセスが、多いプロセスの計算を手助けする手法、Oh!Help[6]ライブラリを我々の PIC コードに実装した。これは各領域を担当するプロセスが主担当領域と副領域を持ち、必要に応じて複数の副領域が計算負荷の大きい領域を分担することでボトルネックを減らし計算効率を大幅に改善する。我々はこれによって米国ロチェスター大学で行われた実験の実スケール計算を行い、計算結果が実験を

よく再現していることを示した。

2. 動的負荷分散手法 Oh!Help

上で述べたように、Oh!Help ではまず空間を均等に分割する。図 1 では例として空間を 16 分割しており、赤い点は空間に点在している粒子を示している。各領域左上にある、黒字で示されたマトリクス番号は主領域の番号を示している。一方、青字は副領域番号を示しており、例えば特に粒子が多い 12 番領域では、5 つのプロセス(00, 10, 11, 20, 31)が副領域としてこの領域の算を担当することを示している。

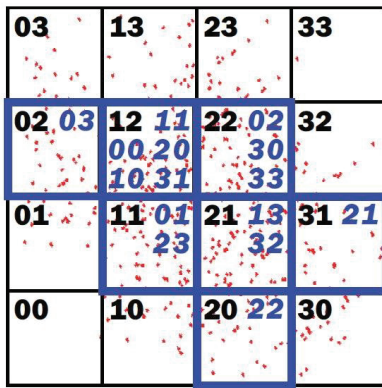


図 1：16 分割された領域の主担当（黒字）と負荷の高い領域を手助けする副担当（青字）

計算の進展により粒子が移動し、負荷が大きい領域が変化した場合以下のように動的に領域を再割り当てする。まず図 2 上の初期状態のように各領域を粒子が多い順に並べ替え、一番多い領域から、全体の平均粒子数分だけの粒子をあるプロセスに割り当てる。そうするとその領域の未割り当ての粒子数は減少するので、次に 2 番目に粒子数の多い領域の粒子から同様に平均粒子数分だけを別のプロセスに割り当てる。これを繰り返すことで、図 2 下のよう

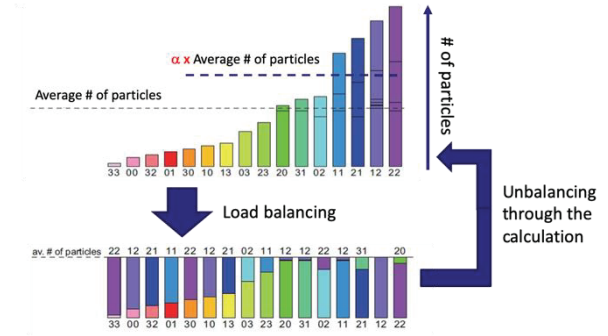


図 2：(上) 各領域に存在する粒子数。右から多い順に並べ替えられている。(下) 各プロセスに振り分けられた粒子。すべてのプロセスは主担当と副担当を合わせると平均粒子数となる。図中の α は不均等許容限度を表すパラメータ。

然、再割り当て過程は計算コストがかかるため、計算の効率化のためには適切な値が存在する。次章では Oh!Help 導入によるパフォーマンスを評価するためのテスト計算の結果を示していく。

3. テスト計算

3.1 線形性検証

まず図 3 のように真空中に方形のプラズマを配置し、極端な密度差がある状況を計算した。体系は 2 次元で、縦横それぞれ 2400 グリッドを取り、その左側中央に総計 2×10^7 粒子のプラズマを配置した。このプラズマに対し左側から高強度レーザーを照射し、プラズマの挙動を観測した。このとき、使用するプロセス数を 32 から 1024 まで変化させスケラビリティを観測した。計算時間は 150 フェムト秒、負荷分散許容度は 10%（平均粒子数の 10%を上回る不均一性が生じた場合に再割り当て実行）とした。また比較のため不均等許容度をかなり大きく取り、実質的に通常の領域分割法としての計算を行った。

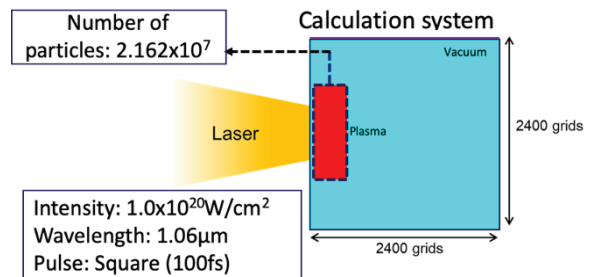


図 3：計算体系

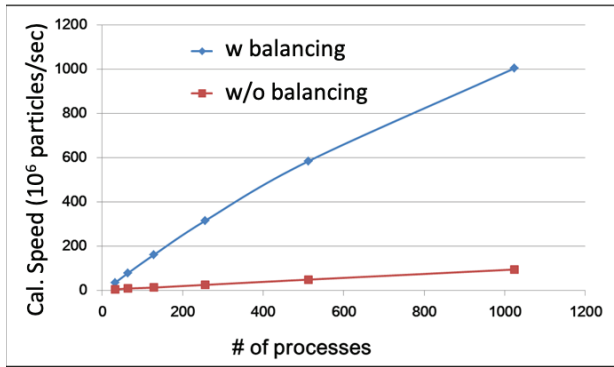


図 4 : 計算結果

図 4 は横軸に計算で使ったプロセス数、縦軸は単位時間あたりに計算した粒子数を表す指標で、青線と赤線は粒子再割当てあり、なしの場合の結果を示している。再割当てありの結果を見ると、横軸に対してほぼ比例して増加していく様子が見て取れ、プロセス数を増加しても計算効率が低下せず、非常に高いスケーラビリティを保っていることが示された。また赤線の粒子配分がない場合と比べると、計算スピードは 11 倍近く増加しており、このように高い密度差があり、かつ粒子が高いモビリティを持つケースの場合、本手法は非常に有効な手法であることが示された。

3.2 不均等許容度依存性

次に図 5 のような、中心が臨界密度の 10 倍、左右端で臨界密度まで線形に減少する密度分布に対し、左右から強度 $10^{20}\text{W}/\text{cm}^2$ のレーザーを照射する、時間とともに不均一性が上昇する体系において、負荷分散許容度の影響を調べた。体系は 1400×480 グリッド、計算時間 200fs、プロセス数は 256 で固定し、 α を 5 から 1000 まで変化させて計算した。

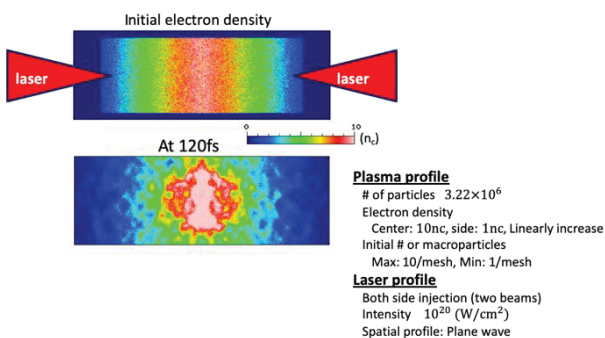


図 5 : 計算体系

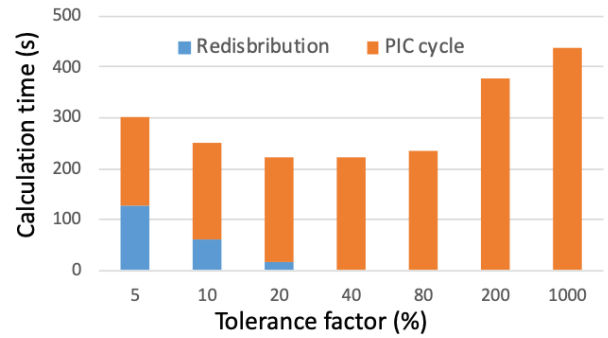


図 6 : 計算結果

図 6 はその結果を示している。横軸は α 、縦軸は総計算時間を示している。また青いバーが再割り当てに掛かった時間で、オレンジが PIC のサイクルで使用された時間である。この結果より、 α が 5% だと、総計算時間に占める再割当ての時間は 40% 以上を占めてしまい、 α を 20% にしたときよりも逆に計算時間が増加していることが示された。今回は 20% が最適であるが、最適値は計算体系によって変わる可能性が高いため、体系サイズや総粒子数などをベースとした α を決定する指標の探索は今後の課題である。

4. 実スケール計算

これらの結果を踏まえ、実験で得られたデータに対し実スケール PIC 計算を行い解析した。図 7 は米国ロチェスター大学の大型レーザー装置で行われた実験で、平板ターゲットに爆縮用レーザーを 2 ビーム照射して 1 次元的に広がるプラズマを生成し、その正面より高強度レーザーを照射し、高強度レーザーの強い光圧によって作られる低密度導波路（プラズマチャンネル）の形成を、様々な照射条件で行った実験である。

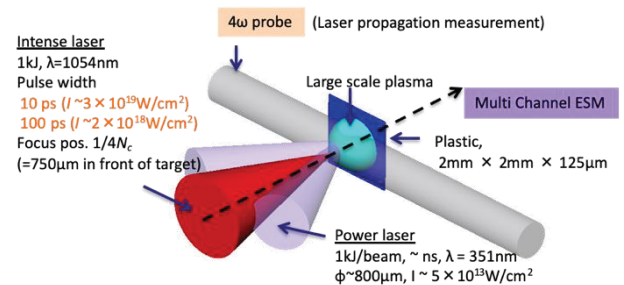


図 7 : 米国ロチェスター大学におけるプラズマチャンネル形成実験

高密度プラズマ中のプラズマチャンネルの観測は、プラズマの横から照射したプローブ光の屈折角より求めることができる。図 8 (左) はその一例で、リング状のパターンは、ある特定の密度領域を通過してきたプローブ光を示しており、一番右側のリングは臨界密度付近、左に行くにつれ低密度側から来た光に対応している。赤い三角はレーザーの照射コーンを示しており、この実験ではターゲット表面から $750\mu\text{m}$ の位置に集光するように照射した。中央のリングパターンが崩れている箇所が形成されたプラズマチャンネルを示している。四角点線で囲まれた領域を計算した結果が図 8 (右) である。プラズマ、レーザー条件は実験のものを用いた。この図は電子密度分布を示しており、実験結果をよく再現している。詳細な解析のためにコードの 3 次元化を行ったが、観測系の 3 次元化対応が一部未完了のため、本稿では 2 次元での計算結果を示している。計算結果の解析により、このプラズマチャンネルの形成には加速電子の電流が作る磁場が大きな役割を果たしていることがわかり、プラズマチャンネルを安定に形成するための指針を得ることができた。

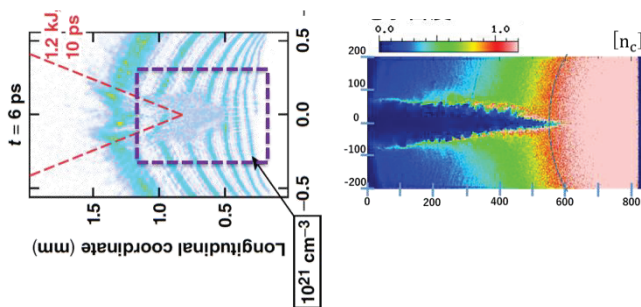


図 8 : (左) プローブ光によるプラズマチャンネル計測
(右) PIC による実スケール計算

5. おわりに

我々は新しい負荷分散技法である Oh!Help ライブラリを用いた PIC コードを開発した。この手法は負荷分散が少ないプロセスが、多いプロセスを手助けすることで動的に全体の負荷バランスを均一化し、特に大規模計算で計算効率を最大限向上させることが可能となる。このコードを用いた評価計算では通常の領域分割法のみでの計算よりも 10 倍以上の高速化が可能であることが示され、負荷分散許容度を

適切に設定することでより計算速度の向上が可能であることを示した。

このコードを用いて米国ロチェスター大学で行われたレーザー実験の実スケール計算を行い、実験結果をよく再現する結果を得るとともに、電磁場の評価から今後の実験に対する指針も得ることができた。

参考文献

- (1) M. Tabak, et al., Phys. Plasmas, **1**, 1626 (1994).
- (2) C. K. Birdsall and A. B. Langdon, *Plasma Physics Via Computer Simulation* (McGraw-Hill, New York 1985).
- (3) H. Sakagami, J. Plasma Fusion Res., **89**, 49-56, (2013).
- (4) OSIRIS manual, https://web.fnal.gov/collaboration/COMPASS/Documents/Osiris_Slide_120308.pdf
- (5) K. Germaschewski, J. Comp. Phys. **318**, 305 (2016).
- (6) H. Nakashima, et al., ICS s09, 90-99(2009).