

講座

高密度相対論プラズマの粒子シミュレーション技法

Advanced Simulation Techniques of Particle-in-Cell Code
for High Density Relativistic Plasma

1. はじめに

1. Introduction

坂上仁志¹⁾, 城崎知至²⁾SAKAGAMI Hitoshi¹⁾ and JOHZAKI Tomoyuki²⁾¹⁾核融合科学研究所, ²⁾広島大学大学院工学研究院

(原稿受付: 2014年1月30日)

これまで本学会誌において、粒子シミュレーションの基本原理解法、大規模並列コンピュータ環境を活用するための技法等が講座・小特集等で紹介されてきた。その一方で、低密度レーザープラズマ相互作用領域から高密度固体領域までの幅広い密度領域を一括して取り扱うための粒子シミュレーション技法が開発されており、衝突や電離過程、輻射放出等の、従来は粒子シミュレーションに含まれていなかった物理過程を考慮し、相対論的レーザープラズマの基礎課程から超高強度レーザーによる高エネルギー粒子や光子の生成輸送等までも対象としたシミュレーションも可能となっている。そこで、本講座では粒子シミュレーションの新たな展開として、これから先進的な粒子シミュレーション研究を始めようとする研究者や大学院生に向けて、上述した物理過程を粒子コードに取り込む技法や物理モデルの深化した粒子シミュレーション研究を紹介する。

Keywords:

PIC code, simulation technique, collision, ionization, radiation emission

プラズマの挙動をシミュレーション研究する方法は、流体近似を用いてマクロ的に行う方法と運動論的手法を用いてミクロ的に行う方法に大別される。流体近似では、プラズマを構成する粒子は速度空間において熱力学的平衡状態にあると仮定し、その粒子一つ一つの運動は計算せずに、速度空間において平均化した密度や圧力といった物理量のみを取り扱う。このため、例えば、ランダウ・ダンピングのような速度分布が熱力学的平衡分布からずれたときに問題となる運動論的な効果を取り扱うことはできないが、プラズマ装置全体という比較的大きな系をシミュレーションできる。一方、運動論的手法としては、実空間並びに速度空間における粒子の分布関数を輸送方程式に基づいて解く方法 (Fokker-Planck 輸送計算など) や、プラズマを構成する個々の電子やイオンを、いくつかの粒子毎にまとめて超粒子として取り扱い、この超粒子の運動を一つ一つ計算する粒子法 (一般に、Particle-in-Cell コード、PIC コードと呼ばれる) がある。粒子法において実際に計算する方程式は、第一原理的な方程式である粒子の運動方程式と電磁場の方

程式であり、原理的には、実際のプラズマで起こる現象の全てをシミュレーションできる。しかし、膨大な数の粒子を取り扱わなければならないため、限定された比較的小きな系しか扱えない。

さて、プラズマには、デバイ遮蔽と呼ばれる特性があり、個々の粒子のクーロン場は周囲の粒子により遮蔽されるため、デバイ長以下の距離でのみ有効となる。よって、個々の粒子間クーロン力の相互作用によるクーロン衝突は、デバイ長内でのみ生じ、それ以上のスケールにおいては考慮する必要がない。一方、デバイ長以上のスケールにおいては、電磁場等による集団的相互作用が重要となる。この集団的効果がデバイ長内での衝突効果よりも支配的であるプラズマは、無衝突プラズマと呼ばれている。この性質を粒子コードの計算アルゴリズムに組み込むことにより、粒子コードにおける計算量の大幅な低減を実現できた[1]。このため、粒子コードによるプラズマ研究の黎明期である1970年代の現在のパソコン以下の計算能力しかもたない非力なコンピュータでも、プラズマシミュレーションが可能

National Institute for Fusion Science, Toki, GIFU 509-5292, Japan

author's e-mail: sakagami.hitoshi@nifs.ac.jp

となったが、その適用範囲は無衝突プラズマ条件を満足する比較的低密度プラズマに限られた。また、高密度プラズマを扱うためには、より多くの粒子数を必要とするため、プラズマ密度も、せいぜい、レーザー臨界密度（波長 $1\ \mu\text{m}$ の場合で電子数密度 $\sim 10^{21}\ \text{cm}^{-3}$ ）の数倍程度までの衝突効果に比べて集団的效果が支配的な領域であった。その後のコンピュータの計算能力の向上に伴って粒子コードによるプラズマ研究も大いに進展し、その適応範囲を拡大してきた。

その一方で、レーザー技術の急速な進歩により、相対論的なエネルギーをもつ電子を容易に生成できる程の超高強度レーザーがテーブルトップのレーザーとして導入できるようになり、様々な産業応用を睨んで、多くの研究室において各種の実験が進められている。このように、高エネルギー密度物理への期待が高まっているが、それらの物理現象は、非常に微少な空間において極めて高速に起こるため、その解析には運動論的取り扱いが必須である。このため、粒子シミュレーションは、比較的低密度のレーザープラズマ相互作用領域から固体のような高密度領域までを一括して取り扱う必要がある。しかし、粒子数はプラズマの密度に比例するため、レーザープラズマ相互作用を正確にシミュレーションするために臨界密度近傍で十分な粒子数を確保すると、高密度領域ではシミュレーションの計算資源に比して非現実的な数の粒子が必要となる。そこで、高密度領域では多くの超粒子を静的に一つの代表粒子で表現する重み付き粒子を導入し、粒子数を低減する手法が開発されている[2]。また、このような広範囲の密度領域を扱う必要がある系は、空間的にも比較的大きな系となることが多いため、必要な空間メッシュ数も大きくなり、実際のシミュレーションを困難にする。このため、粒子とフィールドの物理量間を補間するとき高精度補間式を導入し、計算精度を保ちつつ、空間メッシュサイズを大きくして空間メッシュ数を低減する手法も用いられている[3]。

ところで、このような高密度プラズマの粒子シミュレーションを可能にしたことは、新たな課題を提起した。従来の粒子シミュレーションが適用できるのは、無衝突プラズマであった。例えば、超高強度レーザーとプラズマの相互作用で生成される相対論的エネルギーの高速電子は、ある程度高密度プラズマ領域でも衝突効果は無視できたが、電流中性を保つために誘起される背景電子流を担う電子は、衝突効果が無視できない。このため、粒子コードに衝突効果を導入する必要が生じ、その効果を第一原理的に二体衝突問題として取り扱う技法が開発された[4,5]。また、計算量の低減をめざして、統計論的な衝突モデルも開発されている[6,7]。

一方、粒子コードでは、最初からプラズマありきとしてシミュレーションを行っているが、物質がプラズマになる過渡的な現象そのものが重要になる場合もあり、電離過程モデルを取り入れた粒子コードが開発されている[8,9]。さらに、昨今のレーザー技術の進歩は目覚ましく、レーザー強度は $10^{22}\ \text{W}/\text{cm}^2$ にも達しようとしている。このような強度では、電子からの放射放出が無視できなくなり、そ

の効果も取り入れた粒子コードも開発されている[10]。

このように、粒子シミュレーションによるプラズマ研究は、スーパーコンピュータの能力向上も相まって、その適用領域を絶え間なく広げており、未知の物理フロンティアに絶えず踏み出している。そこで本講座では、粒子シミュレーションの新たな展開として、これから先進的な粒子シミュレーション研究を始めようとする研究者や大学院生に向けて、上述した物理過程を粒子コードに取り込む技法や物理モデルの深化した粒子シミュレーション研究のいくつかを紹介する。

本講座の構成と執筆者は以下の予定である。

- 第1章 はじめに (坂上仁志, 城崎知至)
- 第2章 低密度から高密度まで広密度領域への適用法 (千徳靖彦)
- 第3章 粒子シミュレーションにおける衝突モデル (千徳靖彦, 田口俊弘)
- 第4章 粒子シミュレーションにおける電離モデル (岸本泰明)
- 第5章 粒子シミュレーションにおける放射放出モデル (中村龍史)
- 第6章 粒子シミュレーションにおける放射輸送と核反応モデル (城崎知至, 千徳靖彦)

第1章は、本章であり、本論への導入である。

第2章では、レーザープラズマ相互作用が主に起こる無衝突な低密度領域から衝突効果が無視できない高密度領域まで幅広い密度領域を取り扱うための技法を紹介する。

第3章では、粒子コードにおける相対論的クーロン二体衝突過程の計算手法を紹介する。さらに、ランジュバン方程式に基づく統計論的衝突モデルの計算手法も紹介し、それぞれの利点ならびに問題点などについても触れる。

一般に、高エネルギー密度のレーザープラズマ相互作用研究では、常温の固体やガスにレーザーを照射する。この場合、ターゲットの電離状態が相互作用や生成粒子の輸送過程に大きく影響するため、電離過程の考慮は不可欠である。そこで第4章では、強電磁場による直接電離過程および粒子間衝突による電離過程のモデル化について紹介する。そして、衝突電離過程や電磁場による電離過程によって支配されるプラズマの複雑性とその過程による構造形成について述べる。

一方、 $10^{22}\ \text{W}/\text{cm}^2$ を超えるような超高強度レーザーでは、そのレーザー場によって振動する電子からの放射放出が無視できなくなる。また、MeVを超える高エネルギー電子が物質中を伝播すると物質粒子との相互作用による相対論的制動放射が生じる。これら高エネルギー粒子による放射過程は、レーザープラズマの素過程としても重要であるとともに、X線源や γ 線源としても注目されている。第5章では、相対論的電子とレーザー場やバルク粒子との相互作用による放射放出過程を紹介し、その計算手法についても紹介する。また、第6章では熱放射や相対論高速電子からの放出 X 線・ γ 線の輸送過程や、高エネルギー粒子や

光子による核反応過程を粒子コードに組み込む手法並びにその適用例についても触れる。

参考文献

- [1] C.K. Birdsall and A.B. Langdon, *Plasma Physics Via Computer Simulation* (McGraw-Hill, New York, 1985).
- [2] H. Sakagami and K. Mima, *Inertial Fusion Sciences and Applications 2001* (Proc. 2nd Int. Conf. on Inertial Fusion Sciences and Applications, Kyoto, Japan, Sept. 9-14, 2001), K.A. Tanaka, D.D. Meyerhofer, J. Meyer-ter-Vehn, (Elsevier, Paris, 2002) p.380.
- [3] T. Tajima, *Computational Plasma Physics, with Applications to Fusion and Astrophysics* (Addison-Wesley, 1989).
- [4] T. Takizuka and H. Abe, *J. Comp. Phys.* **25**, 205 (1977).
- [5] Y. Sentoku and A.J. Kemp, *J. Comput. Phys.* **227**, 6846 (2008).
- [6] T. Taguchi *et al.*, *Opt. Expr.* **18**, 2389 (2010).
- [7] H. Sakagami *et al.*, *Laser Part. Beams* **30**, 243 (2012).
- [8] Y. Kishimoto, *Control of Molecules in Intense Laser Fields, Scientific Research on Priority Area (2002)*, 科学研究費補助金特定領域研究平成14年度報告書.
- [9] Y. Kishimoto, *Annual Report of the Earth Simulator Center, April 2002-March 2003*, 201 (2003).
- [10] T. Nakamura *et al.*, *Phys. Rev. Lett.* **108**, 195001 (2012).



さがみ ひとし
坂上 仁志

核融合科学研究所基礎物理シミュレーション研究系, 教授. 仕事では, レーザー核融合に関連する粒子および流体シミュレーション, 大規模並列計算の研究に従事しています. 趣味では, 最近ではアジアの世界遺産を積極的に攻めています. 国内では, 「日本の秘湯を守る会」加盟の温泉旅館を訪ね歩いたり, 未だにスキーを楽しんでいます.



じょうぎき ともゆき
城崎 知至

広島大学大学院工学研究院, 准教授. 学位取得後十数年のポスドクを経て, 不惑の歳を過ぎてなんとか2年前に現職に. 衝突・核反応素過程や高エネルギー粒子輸送過程に着目し, レーザー核融合の点火燃焼特性解析を中心にシミュレーション研究を行っている. 最近では相対論PIC計算にも手を伸ばしてはいるが, 計算機環境が中々整わないのが悩み. 趣味は酒・読書・自転車. 最近では休日の大半は娘のお相手. 相手してくれている今を大切に.