

重み付き粒子法におけるクーロン衝突モデル A Coulomb Collision Model with a Weighted Particle Code

田中愛士¹⁾, 伊庭野健造²⁾, 滝塚知典²⁾, Heun Tae Lee²⁾, 上田良夫²⁾
Akito Tanaka¹⁾, Kenzo Imano²⁾, Tomonori Takizuka²⁾, Heun Tae Lee²⁾, Yoshio Ueda²⁾

1) 大阪大学工学部 2) 大阪大学大学院工学研究科

1) School of Engineering Osaka University, 2) Graduate School of Engineering Osaka University

1. Introduction

核融合プラズマにおいて、周辺および壁近傍のシミュレーションには粒子法が有効である。高Z不純物を含める時、その密度は背景プラズマに比べ非常に低いので、密度の違いを超粒子の重みにより表すことが必要となる [1]。粒子法のクーロン衝突モデルとして、Takizuka-Abe (TA)モデルが基本的なものとして広く用いられており、重みの等しい粒子間の二体衝突において運動量、エネルギーをともに保存する [2]。また、TAモデルを拡張し、重み付き粒子に適用したモデルが開発されてきた [3]。しかし、二体衝突モデルを重み付き粒子に適用する際には課題があり、個々の衝突において運動量、エネルギーをともに保存するモデルが存在しない。

本研究では、運動量、エネルギーをともに保存する新たなクーロン衝突モデルを開発し、テストシミュレーションを行った。

2. Algorithm

新モデルは、TAモデルを拡張する形で作成した。重み w_a の粒子 a と重み w_b の粒子 $b1$ ($w_a < w_b$) が衝突する場合、1st step として以下の速度更新を行う。

$$\begin{aligned} \mathbf{v}_a^{t+\Delta t} &= \mathbf{v}_a^t + (m_{ab}/m_a)\Delta\mathbf{u} \\ \mathbf{v}_{b1}^{t+\Delta t} &= \mathbf{v}_{b1}^t - (m_{ab}/m_b)\Delta\mathbf{u} \times (w_a/w_b) \end{aligned}$$

ここで $m_{ab} = m_a m_b / (m_a + m_b)$ であり、 $\Delta\mathbf{u}$ はTAモデルにより算出される変化速度ベクトルである。上記の速度更新前後において運動量は保存されるが、エネルギーは、

$$\Delta E = -(1 - w_a/w_b)w_a m_b (m_{ab}/m_b)^2 \Delta u^2$$

減少する。そこで2nd step として、第3粒子として b 種粒子 $b2$ を random に選び、粒子 $b1$ に $\Delta\mathbf{v}$ 、粒子 $b2$ に $-\Delta\mathbf{v}$ の速度ベクトルを加え、 ΔE を補う。

$$\begin{aligned} \mathbf{v}_{b1}^{t+\Delta t} &= \mathbf{v}_{b1}^{t+\Delta t} + \Delta\mathbf{v} \\ \mathbf{v}_{b2}^{t+\Delta t} &= \mathbf{v}_{b2}^t - \Delta\mathbf{v} \end{aligned}$$

2nd step において、運動量は保存されているので、2nd step 後には運動量、エネルギーがともに保存される。

$\Delta\mathbf{v}$ を決定する際には、 ΔE を補うという条件の他にもう一つ付帯条件を加える。

3. Numerical simulations

新モデルを用いて、重みの異なる二成分プラズマのクーロン衝突のテストシミュレーションを行った。各粒子種のパラメータを表1に示す。図1に両成分の温度の時間変化を示す。両成分の温度は等温度に収束していき、クーロン衝突による温度緩和が確認できた。

発表では、温度緩和に加え、速度分布、運動量とエネルギーの保存状況、2nd step の付帯条件等について報告する。

表1: 各粒子のパラメータ設定

	密度 $n[\text{m}^{-3}]$	質量 $m[\text{kg}]$	初期温度 $T_0[\text{eV}]$	電荷数 q_n
負粒子 b	4.0×10^{20}	1.67×10^{-29}	100	-1
正粒子 a	1.0×10^{20}	1.67×10^{-27}	10	4

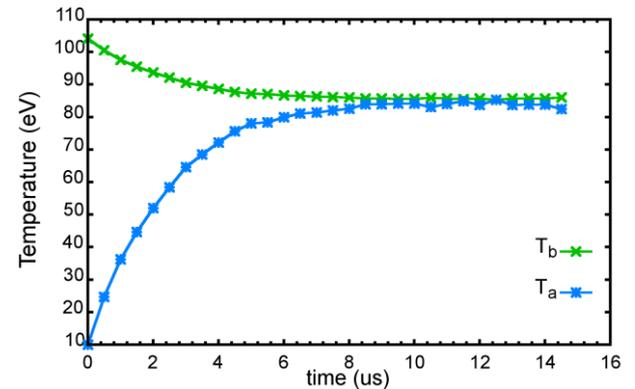


図1: 両成分の温度時間変化

References

- [1] K. Imano et al., Contrib. Plasma. Phys. 56 (2016) 705.
- [2] T. Takizuka, H. Abe, J. Comput. Phys. 25 (1977) 205.
- [3] Y. Sentoku, A.J. Kemp, J. Comput. Phys. 227 (2008) 6846.