

# 24Aa10 プラズマ粒子シミュレーションのための全多重Boris解法の提案 Full multiple Boris integrator for particle-in-cell simulations

銭谷誠司 加藤恒彦  
Seiji Zenitani, Tsunehiko N. Kato

神戸大学 国立天文台  
Kobe University, National Astronomical Observatory of Japan

プラズマ粒子 (Particle-In-Cell; PIC) シミュレーションは、宇宙空間のさまざまな運動論プラズマ現象を扱うために有効なツールである。我々は、太陽フレアにおける粒子加速現象を理解するために、大規模 PIC シミュレーションを活用することを計画している。

PIC シミュレーションの根幹部の粒子の運動方程式を解く部分では、Boris法 (Boris 1970; Buneman-Boris法とも) が標準的に使われている。Boris法は時間2次精度の解法で、適度な計算コストで粒子運動を安定に解くことができるなど、優れた性質を備えている。しかし、Boris法はローレンツ力によるジャイロ回転を近似するため、磁場が強い箇所でジャイロ回転の位相に数値誤差が混入する。一方、この位相誤差を補正すると、リコネクションジェットなどのプラズマ高速流のバルク速度に別の誤差が混入する。

こうした問題を解決するため、多くの研究者がBoris法そのものを高精度化することに取り組んでいる。最近、我々は、方程式を時間刻み  $\Delta t/m$  ( $m = 1, 2, 3 \dots$ ) で解き手順全体を  $m$  回繰り返すサブサイクリング手法を、Boris法の主要部に導入する「多重Boris法」を提案したところである [1]。

本講演では、Boris法をさらに高精度化する3つの手法を提案する。1つめは高次精度化である。我々は、電磁場の扱いを工夫することで、バルク誤差を生じずに粒子運動を  $2n$  ( $n = 1, 2, 3 \dots$ ) 次精度で解く方法を提案する。2つめは、運動方程式全体を  $m$  分割して解くサブサイクリングである。我々は、Boris法全体に対してサブサイクリングを適用したうえで、任意の  $m$  回のサブ演算を1ステップで計算する公式を導出し、全体の計算負荷を軽減する方法を提案する。3つめは、両者のハイブリッド方式である。1・2の2つの方法はお互いに互換性があるため、両者を組み合わせると、位相誤差とバルク速度

を含めた全体の誤差を  $\propto (\Delta t/m)^{2n}$  に抑えることができる。ここで、 $m, n$  は任意の自然数であることを強調しておく。我々は、この手法を「全多重Boris法」と名付けた。

本講演では、数値解法の導出過程と、数値誤差および計算負荷のベンチマーク結果 (図1) を紹介する。

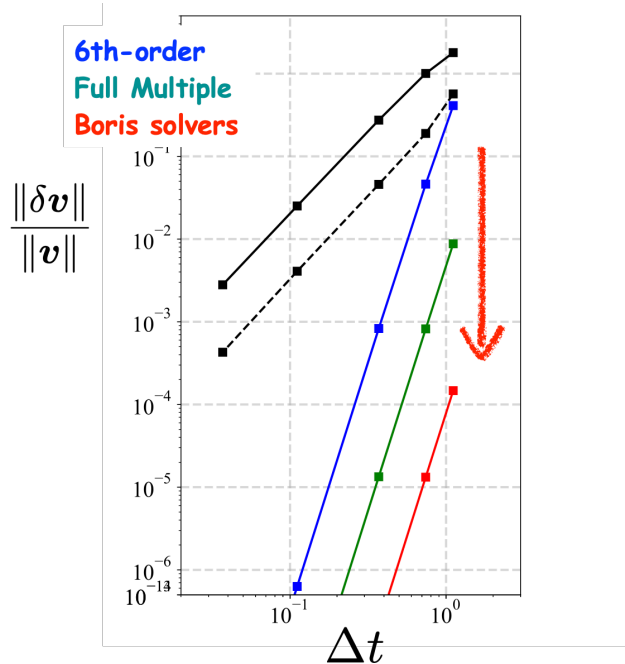


図1 : 6次精度 ( $n=3$ )・ $m$ 分割の全多重Boris法の数値誤差の評価結果。黒の実線が古典Boris法 ( $m=n=1$ ) に対応する。

参考文献 :

[1] S. Zenitani and T. N. Kato, *Multiple Boris integrators for particle-in-cell simulation*, Comput. Phys. Commun., 247, 106954 (2020)