

運動論モデルおよび流体論モデルのボーム条件

Bohm criterion of kinetic and fluid models

中島篤史¹⁾ 津島晴¹⁾

Atsushi Nakajima Akira Tsushima

¹⁾横浜国大物理

Graduate School of Engineering, Yokohama Nat. Univ.

プラズマに接する固体壁が存在することによって、プラズマの準中性が大きく崩れた領域であるシース領域が生じる。プラズマを構成するイオンの速度分布 $f(v)$ を考慮した、シース領域の形成条件は、一般化ボーム条件

$$\langle \frac{1}{v^2} \rangle = \int_0^\infty \frac{f(v)}{v^2} dv \leq \frac{1}{C_0^2} \quad (1)$$

として知られている ($C_0 = \sqrt{k_B T_e / m}$ であり、 m はイオン質量、 k_B はボルツマン定数、 T_e は電子温度である。)。一方で、プラズマを流体的に扱った流体論におけるボーム条件は、イオン圧力 p_i とイオン密度 n_i の関係

$$\frac{1}{p_i} \frac{dp_i}{dx} = \frac{\kappa}{n_i} \frac{dn_i}{dx}$$

から決まるバドトロピック係数 κ を用いて

$$u(x)^2 \geq \frac{k_B T_e + \kappa k_B T_i}{m} = C_s^2 \quad (2)$$

となる。ただし、イオン流速 $u(x)$ は速度分布関数 $f(x, v)$ を用いて

$$u(x) = \int_{-\infty}^{\infty} v f(x, v) dv$$

と表される。(1)式の上限と(2)式の下限が、それぞれ、運動論と流体論におけるプラズマシース境界条件として用いられる。

イオンの速度分布関数を実験によって測定することが困難であるため、運動論的な境界条件を用いることができない。一方、バドトロピック係数 κ を実験的に決める困難さから、流体論的境界条件も用いることができない。そこで、速度分布関数もバドトロピック係数の値も得ることができる粒子シミュレーション (PIC[1]) を用いて、運動論的ボーム条件と流体論的ボーム条件が実現されているか調べる。

イオン温度を考慮したボーム条件を検討するモデルとして Bissell and Johnson モデル[2] と Emmert モデル[3] の2つのモデルが知られている。本研究ではプラズマ中心でイオンがマクスウェル分布するようなシミュレーションを用いるため、Emmert モデルを用いてバドトロピック係数とイオン温度の関係を調べた。

PIC シミュレーションでは、グリッド間隔をデバイ長 λ_D の $1/20$ とした。また、シミュレーションによる計算が進んだ後でも、グリッド間に十分な粒子を確保するために系の長さ L を $L/\lambda_D = 100$ 、初期状態でのグリッド間の平均粒子数を $n_0 = 500$ とした。

PIC シミュレーションにおけるプラズマシース境界は、イオン温度が高いときのプラズマシース境界条件を検討するために、 $T_i/T_e \approx 1$ 付近で Emmert モデルと同じ流速をもつ位置での電場 $E = 0.015 k_B T_e / e \lambda_D$ を用いて特定した (E は電場、 e はイオンの電荷、 λ_D はデバイ長をそれぞれ表す。)。

(1)式の下限で表される運動論的ボーム条件を、PIC シミュレーションでのプラズマシース境界がどの程度満たしているのかを検討するために、 $\langle 1/v^2 \rangle$ と境界でのイオン温度 T_i^b の関係を図 1(a) に示した。一方、(2)式の上限で表される流体論的ボーム条件を検討するために、Emmert モデルを用いて求めた κ と T_i の関係を用いた $C_s = \sqrt{(k_B T_e + \kappa k_B T_i) / m}$ と $\langle v \rangle$ の比と T_i^b の関係を図 1(b) に示した。

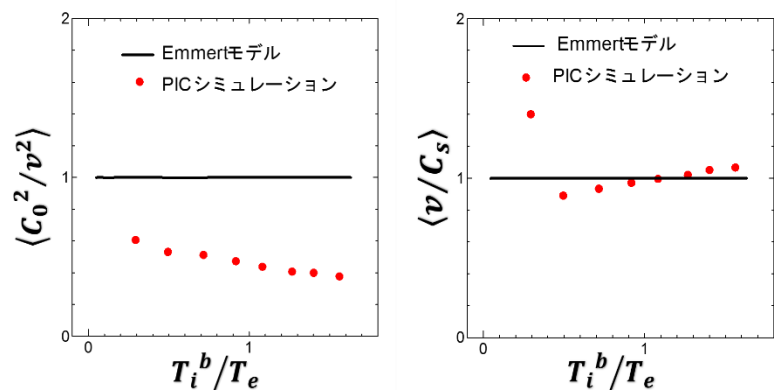


図 1 (a) PIC シミュレーションと Emmert モデルの運動論的ボーム条件の比較

(b) PIC シミュレーションと Emmert モデルの流体論的ボーム条件の比較

図 1(a) における、PIC シミュレーションから求めた $\langle 1/v^2 \rangle$ の値から、PIC シミュレーションで定義したプラズマシース境界はかなりシースの中に入り込んでしまっていることが分かる。また、 T_i^b/T_e が増加するにつれて $\langle 1/v^2 \rangle$ が減少していることから、イオン温度が大きくなるにつれてプラズマシース境界での電場は小さくなるのではないかと予想される。一方で、図 1(b) から、Emmert モデルにおける境界でのバドトロピック係数と PIC シミュレーションから求めたバドトロピック係数はかなり一致していることが分かる。これは、イオン速度の逆数を用いる運動論的ボーム条件は、シミュレーションの数値的な揺らぎによって生じる速度の低いイオンの影響が大きいのに対して、流体論的ボーム条件では速度の低いイオンの影響が小さいからだと考えられる。

参考文献

- [1] C.K. Birdsall, A.B. Langdon, Plasma Physics Via Computer Simulation, McGraw-Hill Book Company, (1991)
- [2] R.C. Bissell, P.C. Johnson, Phys. Fluids **30**, (1987), 779-786
- [3] G.A. Emmert, R.M. Wieland, A.T. Mense, J.N. Davidson, Phys. Fluids **23**, (1980), 803-812
- [4] A. Tsushima, S. Kabaya, J. Phys. Soc. Jpn **67**, (1997), 2315-2321
- [5] S. Kuhn, K.-U. Riemann, et al., Phys. Plasma **13**, (2006)