

大気圧非平衡プラズマにおける力の平衡式 Force Balance Equations in Atmospheric-Pressure Plasma

山家 清之
YAMBE Kiyoyuki

新潟大学
Niigata University

大気圧状況下において、電子及びイオン、中性粒子としての三流体の動きを考える。中性粒子は圧力差によって一方向の流れを伴う状態とする。流れる中性粒子に電界を印加すると、電子とイオンは電界による加速力を受けるため、電子は電荷による加速力を受け移動する。一方、イオンの電界による加速力は中性粒子との衝突による抗力との釣り合いによりキャンセルされ、動くことができない。従って、電子及びイオン、中性粒子がそれぞれ異なる運動を行うことになり、オームの法則からそれぞれ運動は個々に三流体の方程式によって次のように記述することができる。

$$-en_e(\mathbf{E} + \mathbf{v}_e \times \mathbf{B}) - n_e m_e \mathbf{v}_e \cdot \nabla \mathbf{v}_e = \nabla p_e + \mathbf{R}_{ei} + \mathbf{R}_{en} \quad (1a)$$

$$en_i(\mathbf{E} + \mathbf{v}_i \times \mathbf{B}) - n_i m_i \mathbf{v}_i \cdot \nabla \mathbf{v}_i = \nabla p_i - \mathbf{R}_{ei} + \mathbf{R}_{in} \quad (1b)$$

$$(0) - n_n m_n \mathbf{v}_n \cdot \nabla \mathbf{v}_n = \nabla p_n - \mathbf{R}_{en} - \mathbf{R}_{in} \quad (1c)$$

ここで、e、i、nの添え字は電子、イオン、中性粒子を示し、 e は電荷素量、 n は密度、 \mathbf{E} は電界、 \mathbf{v} は電荷の実効的移動速度、 \mathbf{B} は磁界、 m は質量、 p は圧力($p = nkT$, k はボルツマン係数)、 \mathbf{R} は衝突モーメントを示す。ここで大気圧状況下において、磁界を印加しない状況を考える。電界によるイオンの加速力は中性粒子との衝突によりキャンセルされるため、式(1b)において

$$en_i \mathbf{E} = \mathbf{R}_{in} + n_i m_i \mathbf{v}_i \cdot \nabla \mathbf{v}_i \quad (2)$$

となる。その結果、式(1)は

$$-en_e \mathbf{E} - n_e m_e \mathbf{v}_e \cdot \nabla \mathbf{v}_e = \nabla p_e + \mathbf{R}_{ei} + \mathbf{R}_{en} \quad (3a)$$

$$0 = \nabla p_i - \mathbf{R}_{ei} \quad (3b)$$

$$-n_n m_n \mathbf{v}_n \cdot \nabla \mathbf{v}_n = \nabla p_n - \mathbf{R}_{en} \quad (3c)$$

となる。式(3)において、電子との衝突モーメントの項により足し合わせると、

$$-en_e \mathbf{E} - n_e m_e \mathbf{v}_e \cdot \nabla \mathbf{v}_e - n_n m_n \mathbf{v}_n \cdot \nabla \mathbf{v}_n = \nabla p_e + \nabla p_i + \nabla p_n \quad (4)$$

と求まる。結果に、プラズマ形成を担う電荷の実効的移動速度は電子の移動速度で記述され

る。これは大気圧状況下においては、イオンが動くことができないため、プラズマジェットやプラズマルーム形成に伴う発光は電子とイオンのつなぎ変わりによる電子の動きに伴う電離面の形成として観測される。また、このような電子の動きによって実効的に電流が流れる現象は、N型半導体における自由電子による動作や導線を通る電流の動きと同質である。

中性粒子に印加する電界が時間的に変化する交流電界(電圧)の場合、時間平均された電界の実効値により、

$$\mathbf{F}_D = \pm en(\mathbf{E}) - \frac{\epsilon_0 \omega_p^2}{2 \omega^2} \nabla \langle E^2 \rangle (= \mp en\mathbf{E}) \quad (5)$$

駆動力(加速力) \mathbf{F}_D が記述される。ここで、 ω_p はプラズマ角周波数、 ω は交流電界の角周波数である。通常、一周期で時間平均を取ると、式

(5)の第1項は両極性拡散に伴い消去されるが、大気圧状況下において、電子は動き、イオンが動かない場合には、電圧の極性に伴う効果が生じるため、消去されない。その結果、負電圧が印加された場合には、第1項、第2項共に、同極性となるため、第1項により電子は更に加速される。一方、正電圧が印加される場合には、第1項、第2項は異極性となるため、第1項により電子は減速される。

抗力 \mathbf{F}_R を中性粒子の流れに伴う動圧として、

$$\mathbf{F}_R = n_n m_n \mathbf{v}_n \cdot \nabla \mathbf{v}_n + \nabla p_n = n_n m_n f_{col} \mathbf{v}_{rel} \quad (6)$$

が記述される。ここで、 \mathbf{v}_{rel} は電子とガスの相対速度、 p_n はガスの平衡に伴う静圧であり、大気圧下で ∇p_n はゼロとなる($1 - 1 = 0$ [atm])。

そして、形成されるプラズマジェットの長さ L_{pl} は、プラズマエネルギーの空間積分から、

$$\int_L (\mathbf{F}_D - \mathbf{F}_R) ds = (\mathbf{F}_D - \mathbf{F}_R)' L_{plu} = p_e + p_i + \frac{n_e m_e v_e^2}{2} \quad (7)$$

と記述される。