

磁気ノズル中電子ビーム励起プラズマの熱力学的膨張過程 Thermodynamic properties of electron-beam-excited plasma expanding in a magnetic nozzle

佃耕介, 高橋和貴

Kosuke TSUKUDA, Kazunori TAKAHASHI

東北大院工

Dept. Electrical Eng., Tohoku Univ.

大電力宇宙推進として期待される RF 磁気ノズルプラズマ推進機を開発する上で、磁気ノズル中のプラズマの膨張が重要な要素となる。このような装置では、RF 電力が電子と結合し、電子の熱エネルギーが種々のエネルギー変換過程を介して推力へと変換される。特に、磁気ノズル中では自発的に誘起される反磁性電流と磁気ノズルの相互作用により推力が増加することが観測されており、電子エネルギーが推進エネルギーへと変換されている[1]。エネルギー授受を記述する基本法則として熱力学第一法則があり、磁気ノズルと相互作用する電子の熱力学的特性は推進性能を決定する重要な指標である。この熱力学特性は $pV^\gamma = \text{const.}$ の式で示されるポリトロップ関係を用いて記述でき、 γ の値によりその特性を評価できる。ここで、 p , V , γ はそれぞれ圧力、体積、ポリトロップ指数であり、等温膨張では $\gamma = 1$ 、断熱膨張では $\gamma = (N + 2)/N$ (N は自由度) に対応する。

これまで、電子流が磁気ノズルのみと相互作用する際の熱力学特性を評価するため、電子ビーム励起プラズマ源により、プラズマ中の電場を排除した実験が確立され、断熱膨張を示すことから電子が磁気ノズルへと仕事をし、その結果推力が発生していることを報告してきた[2,3]。推進機の大電力化を図る際には、プラズマの高密度化に伴いパラメータ領域が大きく変化する。特に電子の衝突平均自由行程がシステム長よりも短くなる領域では、磁気ノズルとの相互作用も変化することが考えられる。本研究では、電子ビーム励起プラズマ源の高密度化を行い、磁気ノズル中の電子の熱力学特性の評価を行った。

実験装置の概略図を図1に示す。熱陰極により生成された電子ビームをプラズマが生成される石英管と拡散チャンバーに入射する。プラズ

マ電位を制御するためのアノードメッシュを取り外すことで拡散チャンバーに流入するビーム電流を増やすことに成功し、また、これまでの実験同様、プラズマ電位をほぼ0Vに設定することが可能となっている。

今回の実験では、熱陰極電源、抵抗 R_D 、放電電圧 V_D を調整しカソード電流を増やすことにより、 10^{17} m^{-3} 以上の電子密度を得ることができる。高密度条件では、低密度条件に比べてポリトロップ指数が増加し、電子温度の低下、すなわち電子の冷却が顕著になることがわかった。電子エネルギー確率関数(EEPF)の測定により、高エネルギー電子ビームの存在が確認されていることから、高密度条件では電子ビーム不安定性によって電子エネルギーの一部が波動へと移動し、熱損失としての効果が発現していると考えている。発表ではこれらの詳細な結果について報告する。

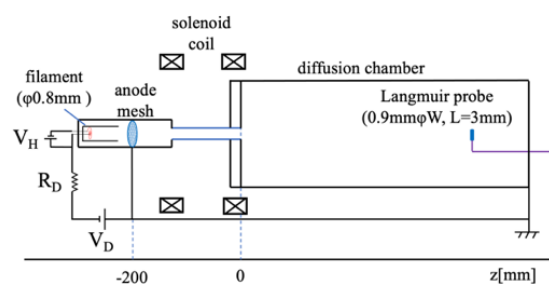


図1. 実験装置の概略図

- [1] K. Takahashi, *Rev. Mod. Plasma Phys.* **3**, 3 (2019).
 [2] K. Takahashi *et al.*, *Phys. Rev. Lett.*, **120**, 045001 (2018).
 [3] K. Takahashi *et al.*, *Phys. Rev. Lett.*, **125**, 165001 (2020).