

擬火花放電を応用した電磁加速型プラズマジェットの推進性能

Propulsive performance of electromagnetically accelerated plasma jet applying pseudo-spark discharge

○井野陽介¹, 川崎竜司¹, 松崎大吾², 渡部政行³*Yosuke Ino¹, Ryuji Kawasaki¹, Daigo Matuzaki², Masayuki Watanabe³

Abstract: Plasma jet is a technological device that shoots plasma at high speed from the electrode nozzle and has been applied to various fields such as material processing, nuclear fusion research, and electric thruster. The MPD thruster is one of the propulsion methods with high thrust density and high specific thrust. However, it has not yet been put to practical use because of the difficulty in the low durability of the electrodes. The MPD thruster using a pseudo-spark discharge has been developing for the purpose of reducing electrode damage. The purpose of this research is to optimize and redesign the plasma jet device for improved properties of thrust power and low durability. In the experiments, a discharge current of about 9.0 kA at a charging voltage of -2 kV are observed. The half period of the discharge was about 125 μ s. The maximum value of the thrust force obtained so far is about 128N.

1. 研究背景と目的

プラズマジェットとは電極ノズル部から高速にプラズマを撃ち出す技術の総称である。これまで物質の加工や核融合プラズマへの燃料補給、宇宙空間における電気推進機など様々な分野にプラズマジェットが応用されてきた。

プラズマは電離気体であることから、電気力や電磁力などが作用する。電磁加速型プラズマジェットは電磁力を用いてプラズマを高速に撃ち出す装置である。電気推進機分野では電磁プラズマ加速 (Magneto-Plasma-Dynamic:MPD) スラスタと呼ばれる。MPD スラスタは、電気推進機の中でも比較的、燃費の指標である比推力が 1000~6000 秒と高く、推力密度も $10^3 \sim 10^4$ N/m² と高い推進機であり、火星等への有人探査や大規模ミッションへの実用が期待されている。しかしながら、大電流放電に伴う電極の損傷などが原因で未だ実用化には至っていない。

本研究においてはプラズマジェットの電極損傷の低減を目的として、擬火花放電を応用した電磁加速型プラズマジェットの開発を進めている。また、電極部の最適化・大型化を念頭に現行機の性能計測や大型化に向けた再設計を行っている。

2. 擬火花放電を用いた電磁加速型プラズマジェット

図1に一般的な電磁加速型プラズマジェットを用いたMPDスラスタの概略図を示す。電磁加速型プラズマジェットは放電によりガスを電離し、プラズマ化させ、放電電流とその自己誘起磁場による電磁力によりプラズマを打ち出す。この打ち出し機構においては

る。その結果、アーク放電が電極の損傷の原因となる。

そこで本研究においては大電流放電でも多点のアーク放電である擬火花放電に着目し、プラズマジェットの放電機構に擬火花放電を応用した。擬火花放電とは平行平板電極の中心軸に孔を持ち、陰極側背面に中空陰極を備えた電極形状でパッシェン曲線の最下点より低圧側の特性が見える低気圧放電である。この特徴としては放電がグロー状もしくは多点のアーク放電と考えられる形態を持つこと、電流の立ち上がり時間が短いこと、大電流放電が可能であることが挙げられる。以上の理由により擬火花放電を電磁加速型プラズマジェットの放電機構に用いることによって高推力等の特性を維持しつつ電極等の損傷が抑えられると期待している。本研究に用いるプラズマジェットの概略図を図2に示す。内径22mmの中空陰極を持ち、陰極孔、絶縁体を挟み、陽極ノズルで構成されている。または陰極孔、陽極ノズルは口径をそれぞれ8mm~20mm、20mm~40mmに変更することができる。実験は $10^{-2} \sim 10^{-3}$ Paの高真空状態において陽極を接地し、合成静電容量1.2mFのコンデンサを介して最大-2kVを陰極側に印加してガスを導入管より入れ放電を形成、プラズマを打ち出した。

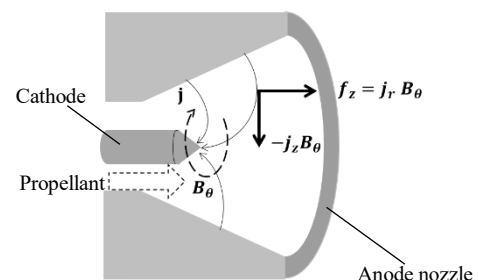


Figure 1. Thrust generation mechanism of MPD thruster.

1: 日大理工・院(前)・量子: Graduate School of Quantum Science and Technology, CST, Nihon University

2: 日大理工・学部・航空宇宙: CST, Nihon University

3: 日大・教員・量科研: Institute of Quantum Science, Nihon University

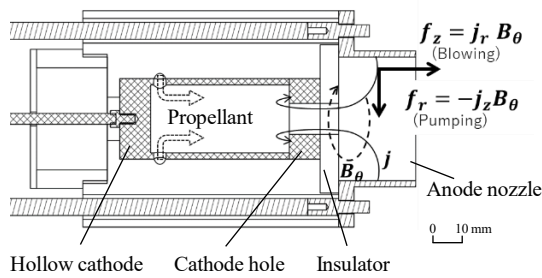


Figure 2. Schematic drawing of electrode parts.

3. 放電特性

中空陰極内径 22mm, 陰極孔径 8mm, 陽極ノズル径 20mm の擬火花放電を応用した電磁加速型プラズマジェットの放電特性を図 3, 図 4 に示す. それぞれコンデンサ間電圧, 放電電流の時間変化である. 放電電流の最大は約 9.0kA である.

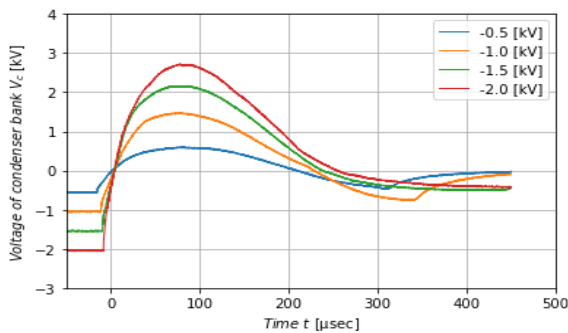


Figure 3. Temporal change of discharge voltages between condenser bank.

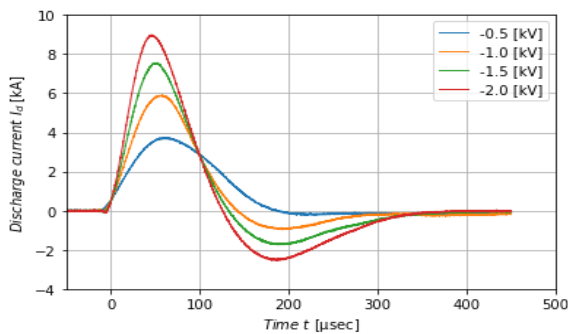


Figure 4. Temporal change of discharge currents.

4. 性能計測

電気推進機の推進性能の評価として, 推進効率 η_t と比推力 I_{sp} が主に用いられる. 推進効率は電気推進機に投入された電力がどれだけ推力発生 of 運動エネルギーに変換されたかを示す指標である. また比推力とは単位時間当たり消費する推進剤重量当たりの発生推力を示す値で燃費を示す指標である. この 2 つ評価値を得るためには, 電気推進機で発生する推力 F とプラズマ

ジェットの排気速度 u_e を計測する必要がある.

本研究においてはプラズマジェット本体上部に設置した推力計測装置より推力を計測する. プラズマの撃ち出しによって発生した推力により, プラズマジェット本体, 推力計測装置は減衰振動する. この振動より推力 F を算出する. 中空陰極内径 22mm, 陰極孔径 8mm, 陽極ノズル径 20mm の場合の推力測定結果を図 5 に示す.

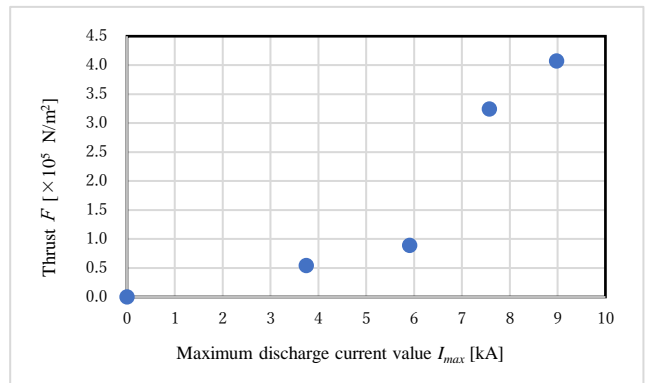


Figure 5. Relationship between thrust and maximum discharge current value

また, プラズマジェットの排気速度 u_e の測定においてはダブルプローブを使った飛行時間(TOF)法を用いる. 電圧を印加したダブルプローブ 2 本をプラズマ流の上流側, 下流側にそれぞれ設置する. プローブ端子間にプラズマが流れ込むと電流が流れ, この電流波形はプローブ位置におけるプラズマの密度の時間変化に依存している. この 2 つの波形を比較することによりプラズマ流の速度を算出する.

本講演においては再設計を行った推力測定装置, 電磁加速型プラズマジェットの放電特性および推力, 排気速度等の推進機性能を報告する. また, 推進機性能の電極形状依存性, プラズマ温度, 密度に関して報告する予定である.

5. 参考文献

[1] 栗田恭一・荒川義博:「電気推進ロケット入門」, 2003
 [2] J.Christiansen and Ch.Schultheiss : Production of High Current Particle Beams by Low Pressure Spark Discharges, Z. Physik. A., vol.290 (1979), pp.35-41.
 [3] Jahn, R. G., Clark, K. E., Oberth, R. C. and Turchi, P. J.: Acceleration Patterns in Quasi-Steady MPD Arcs, AIAA J., vol.9 (1971), pp. 167-172.