

修士学位論文要約（令和4年3月）

磁気ステアリングによる磁気ノズルプラズマ推進機の推力ベクトル制御

今井 涼二

指導教員：安藤 晃，研究指導教員：高橋 和貴

Thrust vector control of a magnetic nozzle plasma thruster by a magnetic steering
Ryoji IMAI

Supervisor: Akira ANDO, Research Advisor: Kazunori TAKAHASHI

Thrust vector deflection of a magnetic nozzle radiofrequency plasma thruster is an alternative way for a thrust vector control by a spacecraft, called “magnetic steering”. In order to demonstrate the feasibility of magnetic steering, axial and horizontal thrust components are measured for a magnetically steered radiofrequency plasma thruster. The measurements show that thrust deflection up to 7 degrees can be performed by the magnetic nozzle deflection, demonstrating the magnetic steering. In addition, the measured profiles of the ion saturation current, the ion beam current, and the horizontal dynamic momentum of the plasma show that the deflections of both the dynamic momentum flux and the electron-diamagnetic-induced Lorentz force contribute to the thrust vector control.

1. はじめに

電気推進機の一つである磁気ノズルプラズマスラストは無電極構造であることから、他の電気推進機と比べて長寿命化や大電力運用が可能と考えられ、将来の深宇宙探査ミッション等での利用が期待されている。磁気ノズルプラズマスラストでは、両極性電場等により自発的に加速されたイオンの放出する運動量の反力、及び自己誘起の周方向電流 j_θ と外部印加磁場の径方向成分 B_r により生じ、プラズマに与えられるローレンツ力 $j_\theta \times B_r$ の反力として推力が生じることがこれまでの研究から明らかになっている[1]。

宇宙機には軌道調整のための推力ベクトル制御技術が必要不可欠であり、新たな制御手法の一つとして、磁気ノズル偏向による制御（磁気ステアリング）が提案されている[2,3]。一方で、磁気ノズル偏向によって発生する水平方向の推力の定量的評価とその発生機構が実験的に明らかにされていないのが現状である。そこで、本研究では推力ベクトルの直接計測を行うことにより、磁気ステアリングによる磁気ノズルプラズマスラストの推力ベクトル制御の実証、及び磁気ノズル偏向によって生じる推力変化の物理機構の解明を行った。

2. 実験装置

本研究にて用いた実験装置、及びスラスト構造の概略図を図 1(a), (b)にそれぞれ示す。スラストには軸方向磁場印加用のソレノイド 1 に加え、磁気ノズル偏向用に径方向磁場印加用のソレノイド 2, 3 が取り付けられている。スラスト構造全体は推力計測用のスラストバランスに取り付けられており、推力の直接

計測が可能となっている。また、本研究では推力ベクトルの評価を行うため、図 1(c), (d)に示す軸方向、及び径方向に振り子運動する 2 種類のスラストバランスを用いることにより軸方向、及び径方向推力成分の分解計測を行った。ソレノイド 1 に流す電流を I_{B1} 、ソレノイド 2, 3 は直列に接続し、流す電流を I_{B2} と定義する。図 2 に $(I_{B1}, I_{B2}) = (a) (10 \text{ A}, 0), (b) (0, 10 \text{ A}), (c) (10 \text{ A}, 4 \text{ A}), (d) (10 \text{ A}, 10 \text{ A})$ とした時の磁場強度、及び磁力線（白実線）の計算結果を示す。図 2(a), (b)から軸方向、及び径方向の磁場が生成されていること、また、それらを組み合わせることにより、図 2(c), (d)に示すように磁気ノズルの向きを偏向可能であることが確認できる。

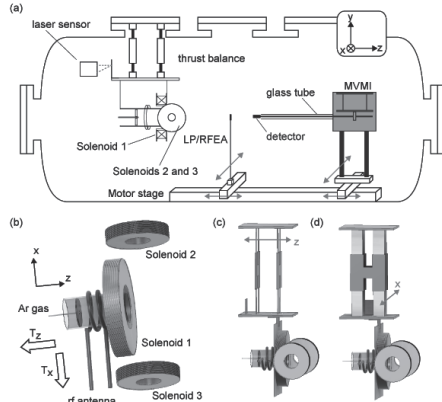


図 1 (a)実験装置と(b)スラスト構造の概略図。(c) z 方向、及び(d)x 方向推力計測用スラストバランス[4,5]。

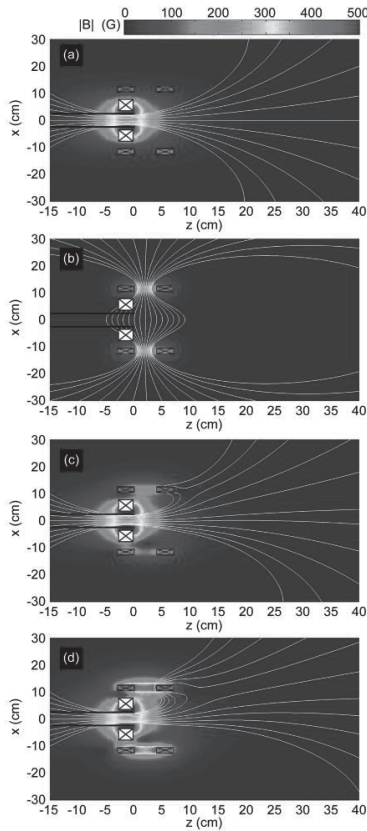


図 2 $(I_{B1}, I_{B2}) =$ (a) (10 A, 0), (b) (0, 10 A), (c) (10 A, 4 A), (d) (10 A, 10 A)の時の磁場強度、及び磁力線(白実線)の計算結果[4].

3. 実験結果

入力電力を 500 W, I_{B1} を 10 A で一定とし, I_{B2} を変化させた際の z 方向推力 T_z , x 方向推力 T_x の計測結果をそれぞれ図 3(a), (b)に示す. 結果から I_{B2} の値によらず T_z はおおよそ一定となる一方, I_{B2} の上昇に伴い T_x は上昇することが確認された. これらの結果から, 磁気ステアリングによる最大偏向角 7 度程度までの推力ベクトル制御が実証された.

磁気ノズル偏向により T_x が生じる物理機構を解明するため, スラスタ下流部のプラズマ計測を行った. 図 4 に $(I_{B1}, I_{B2}) =$ (a) (10 A, 0), (b) (10 A, 4 A)としたときの, イオン飽和電流 I_{is} の x - z 平面分布の計測結果を示す. 結果から, 磁気ノズルの変化に沿うようにブルームが偏向する様子が確認された. 圧力勾配が駆動する電子反磁性電流と磁場によるローレンツ力は磁力線に対して垂直に働くことから, 図 4(b)において, ローレンツ力により生じる磁気ノズル起因の正味の推力が $-x$ 方向に生じると考えられる. この結果は実測された T_x の向きと定性的に一致した. また, イオンビーム電流, 及びプラズマの x 方向運動量の x - z

平面分布の計測結果から, 磁気ノズルを $+x$ 方向へ偏向させた際にイオンの加速方向が $+x$ 方向へと変化する様子が確認された[5]. この際, イオン噴射の反力として $-x$ 方向への推力が生じるため, 実測された T_x の向きと定性的に一致する結果が得られた.

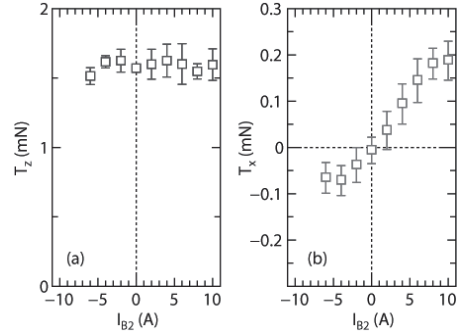


図 3 (a) z 方向推力 T_z , 及び(b) x 方向推力 T_x の I_{B2} 依存性[4].

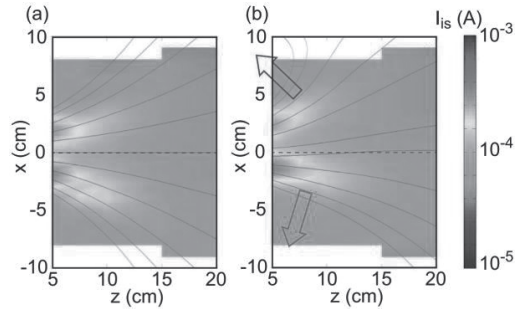


図 4 $(I_{B1}, I_{B2}) =$ (a) (10 A, 0), (b) (10 A, 4 A)の時のイオン飽和電流 I_{is} の x - z 平面分布[5].

4. まとめ

磁気ステアリングの実験的実証, 及び物理機構の解明を行うため, 磁気ノズルを偏向可能なスラスタにて実験を行った. 結果より, 磁気ステアリングによる最大偏向角 7 度までの推力ベクトル制御を実証した. また, 磁気ノズル起因の推力とイオン加速起因の推力の両方の変化が計測された推力ベクトルの変化に一致していることから, 両者とも磁気ステアリングによる推力偏向に寄与していることを明らかにした.

文献

- 1) K. Takahashi, Rev. Mod. Plasma Phys., **3** (2019) 3
- 2) C. Charles, *et al.*, Appl. Phys. Lett., **93** (2008) 201501
- 3) M. Merino and E. Ahedo, Plasma Sources Sci. Technol., **26** (2017) 095001
- 4) R. Imai and K. Takahashi, Appl. Phys. Lett., **118** (2021) 264102
- 5) R. Imai and K. Takahashi, J. Phys. D: Appl. Phys., **55** (2022) 135201