

## 静電加速と電磁加速特性を併せ持つ発散磁場静電加速スラスタ

### Divergent Magnetic Field Electrostatic Thruster (DM-EST) having both electrostatic and electromagnetic acceleration characteristic

○ 水谷佳祐 ・ 鄭栽勳 ・ 春日勇人 ・ 岩川輝 ・ 佐宗章弘 (名大)

○ Keisuke Mizutani ・ Jaehun Jeong ・ Hayato Kasuga ・ Akira Iwakawa ・ Akihiro Sasoh (Nagoya University)

#### Abstract (概要)

The electrostatic thruster utilizing single solenoid coil, ring shaped anode and hollow cathode on central axis is developed as variation of reported electrostatic thruster. Thrust measurement is carried with different discharge voltage, flow rate, magnetic field strength and anode shape, using Xenon as propellant. Thrust is linear to flow rate, and doesn't depend on magnetic field strength. This result shows this thruster has electrostatic thrust characteristic. At the same time, thrust is proportional to the product of discharge current and magnetic field strength, in other words, this thruster has also electromagnetic thrust characteristic. In this study, thrust measurement result of the thruster having both electrostatic and electromagnetic acceleration characteristic is reported.

#### 記号の説明

$A$ :	コイル断面積
$B$ :	放電室磁束密度
$B_{\text{coil}}$ :	コイル磁束密度
$B_{\text{GEO}}$ :	地磁気の磁束密度
$C_1 - C_5$ :	Tare Force 係数
$F$ :	推力
$F_{\text{counter}}$ :	アクチュエータ力
$F_{\text{GEO}}$ :	コイル - 地磁気干渉による力
$F_{\text{tare}}$ :	Tare Force
$H_{\text{GEO}}$ :	地磁気磁場強度
$J_c$ :	コイル電流
$J_d$ :	放電電流
$l_{\text{counter}}$ :	スタンド旋回点 - アクチュエータ距離
$l_{\text{thrust}}$ :	スタンド旋回点 - スラスタ距離
$Q$ :	コイル磁荷
$R_a$ :	アノード半径
$R_c$ :	カソード半径
$V_d$ :	放電電圧
$\mu_0$ :	真空の透磁率 ( $= 4\pi \times 10^{-7}$ H/m)

#### 1. はじめに

##### 1.1. 背景

近年著しく電気推進への注目が高まり、その用途も多様

化<sup>1</sup>している。このような様々な需要に対して、既存のスラスタのみが必ずしも最適であるとは限らない。各ミッションに対して最適な性能（推力、比推力、電力、寿命など）が存在するため、既存の加速方式だけではすべてのミッション要求の最適値をカバーしきれるとは限らない。そこで、既存の加速方式の改良に加えて、新しい加速方式の確立が必要であるといえる。

新しい加速方式の確立を目指して、Haradaら<sup>2</sup>がヘリコンプラズマをリング状アノードと下流のカスプ磁場内のカソードとの電位差で静電加速するスラスタ Helicon Electrostatic Thruster (HEST) を開発した。HESTについて、Retarding Potential Analyzer (RPA) を用いてイオンビームエネルギーが計測され、イオンが加速電圧相当まで加速されていることが報告された。さらにUchigashimaら<sup>3</sup>によって、HESTの放電室内の加速メカニズムについて詳しく調査された。その中でも重要な結果の一つとして、リング状アノードの下流面を絶縁体で塞いでもイオンが加速されていたことがある。この結果から、主にリング状アノードの内面がイオンの加速に寄与していると考えられる。この理由について、以下のように説明できる。ホールパラメータが充分大きいプラズマでは磁力線が等電位線だとみなせる。HESTの放電室内でも、磁力線が等電位だと仮定すると、下流カスプ磁場およびその上流の中心軸状付近の磁力線がカソード電位になると考えられる。この時、アノードの内面と中心軸上には電位差が生まれる。アノード内面が主に加速に効いていることから、アノード内面のアノード電位

と中心軸上のカソード電位の電位差でイオンを加速していると考えられる。つまり、HESTはリング状アノードとカソードが配置された下流カスプ磁場から上流へ伸びる軸方向磁場によって径方向の電界が生まれ、径方向内向き電界によってイオンが加速されているといえる。さらに、Ichiharaら<sup>4</sup>によって、ヘリコンプラズマなしでも上記の加速方式が有効であることが示された。IchiharaらはHESTと同じ磁気回路で、同様にリング状アノード、カスプ磁場中のカソードで直流プラズマを静電加速するDM-EST (Diverging Magnetic field Electrostatic Thruster)を開発、試験した。HESTとの違いの一つとして、上流のヘリコンプラズマがないことが挙げられる。HESTでもヘリコンプラズマなしでも作動可能なことが確認されており、この径方向内向き電界の加速方式には必ずしもヘリコンプラズマが必要であるというわけではない。また、もう一つの違いとして、推進剤をアノード内表面に沿って投入していることがある。径方向電界で加速していると考ええると、ポテンシャルの高いアノードに近い領域で加速が開始されたイオンほど最終的に高い運動エネルギーをもって排気されると考えられる。よって、アノード付近で積極的に推進剤を電離させたいのに対して、HEST上流のヘリコンプラズマは中心付近の密度が濃いという特性を持っていた。そこで、DM-ESTではアノ

ード内表面から推進剤を投入することで、アノード近傍の中性粒子密度を高め、積極的にアノード電位の領域でイオンを生成しようという狙いがある。DM-ESTでもイオンビームエネルギー、イオンビーム電流の計測の結果からイオンは充分加速されていることが実証された。

HESTおよびDM-ESTがリング状アノードと、下流カスプ磁場中のカソードで径方向内向き電界を生成していたのに対して、他の磁場形状、電極配置でも同じように径方向内向き静電加速は実現できると考えられる。例えば、カソードを中心軸上に配置すれば下流の磁場形状に関係なく、電極間には径方向内向きの電界が加えられる。この時、電極間を軸方向の磁場が横切っていれば下流の磁場はカスプ磁場である必要はなく、例えば単一のソレノイドコイルにより作られるような発散磁場でもよい。以上の考え方に従うと、リング状アノードおよび中心軸上上流のカソードと、電極間を軸方向磁場が貫くような発散磁場の組み合わせでも、HESTおよびDM-ESTと同様に径方向内側へ静電加速できるといえる。

## 1.2. 目的

そこで、本研究ではリング状アノードと発散磁場中の上流のカソードにより、イオンを径方向内側に加速する静電加速スラスタを開発した。このスラスタについて、推力計測を行い、その作動特性を調査する。

## 2. 実験装置

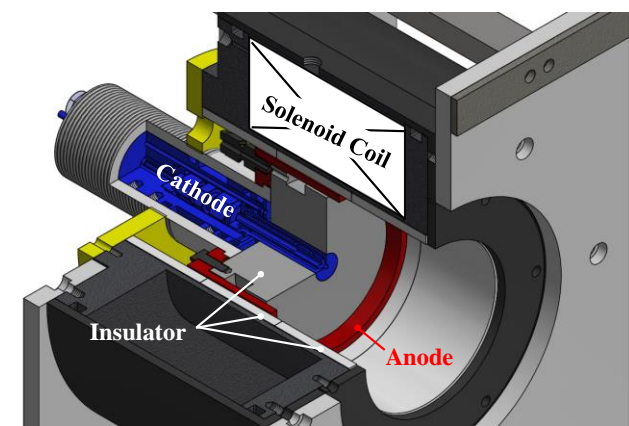
### 2.1. スラスタ詳細

図1にスラスタヘッドのCADおよび断面図を示す。スラスタは外側から順にソレノイドコイル、絶縁壁、アノード、電極間の絶縁体、ホローカソードからなる。

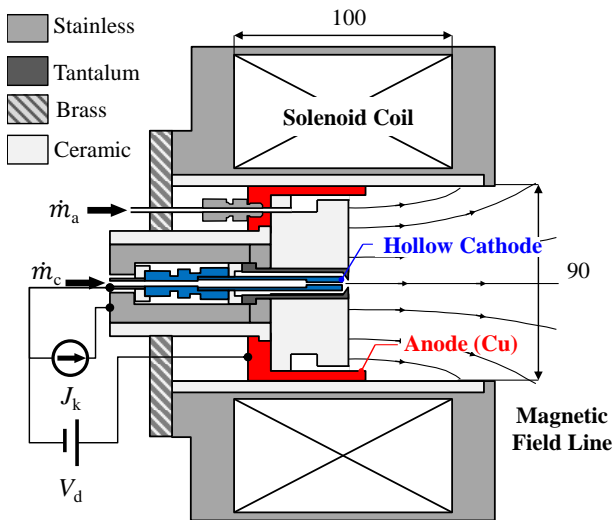
ソレノイドコイルは、SUS316製のコイルケースに径1mmの銅線を巻き製作した。銅線は、ポビン型コイルケースの外径106mm、長さ100mmのくびれ部分に、1層当たり軸方向に約90巻、径方向に30層の合計約2700回巻かれている。使用の際は常に水冷している。軸方向の磁場強度について、コイル中心で最も強く、下流に行くほど弱くなっている。また磁力線について、中心付近ではほとんど軸方向を向いており、下流に行くほど発散している。ただし、中心軸付近の磁力線は下流までほぼ直線に伸びている。

コイル内面には円筒形のホトベール製の絶縁壁が挿入されている。この絶縁壁により、コイルケースが直接プラズマに晒されないようになっている。絶縁壁とその内側のアノードの間には間隔が設けられており、アノードが融点近くの温度に達するまで加熱、膨張してもこの絶縁壁に接触しないようになっている。

アノードは銅製で、内径がR29mm、R40mmのものを製作し作動を行った。アノードの上流には推進剤投入用の継手があり、そのすぐアノードとその内側の絶縁体によってキャビティが設けられている。上流から投入された推進剤はこのキャビティで周方向に一樣に拡散させた後、放電室



(a) スラスタ CAD



(b) スラスタ断面図

図1 スラスタ概要

へ流入するようになっている。

アノードの内側には絶縁体があり、電極間の絶縁と上記のような推進剤流路確保の役割をもつ。絶縁体によってホローカソードのキーパー電極が覆われており、ホローカソードの下流面のみが放電室へ露出するようになっている。こうすることで、ホローカソードの下流面以外の部分がプラズマに影響しないようにしている。

ホローカソードは自作のキーパー電極と Kaufman & Robinson Inc 製の熱電子放出部から構成される。キーパー電極のうち、プラズマに晒される最下流の部品はタンタル製で、外径 14 mm で、下流端には 3 mm のオリフィスが設けられている。熱電子放出部は Kaufman & Robinson Inc 製の CATH, INSERT ASSY H/O LHC-03AE1-01 を使用している。このカソードチップは仕様上、約 100 sccm でキーパー放電を開始し、作動を維持するために最低 5 sccm の推進剤を投入している。

## 2.2. 真空装置

スラスタの作動はすべて径 2 m、長さ 4 m の真空タンク内で行われた。真空タンク内は排気速度 33.3 L/s の油回転ポンプで 200 Pa 以下まで減圧した後、排気速度 3600 L/s のターボ分子ポンプで減圧する。ターボ分子ポンプ作動中も油回転ポンプは作動させており、ターボ分子ポンプの高圧側を減圧している。スラスタの作動はターボ分子ポンプの回転数が最大に達したのを確認してから行い、スラスタ作動中もチャンバー内はターボ分子ポンプで減圧されている。図 2 にスラスタから投入した推進剤流量に対する真空タンク内の背圧を示す。推進剤の投入がない状態で真空タンク内は 3 mPa 程度である。推進剤流量を増やすに従い真空度は悪くなるものの、25 sccm でも 30 mPa 以下に抑えられている。スラスタの作動はこの程度の真空度で行われている。

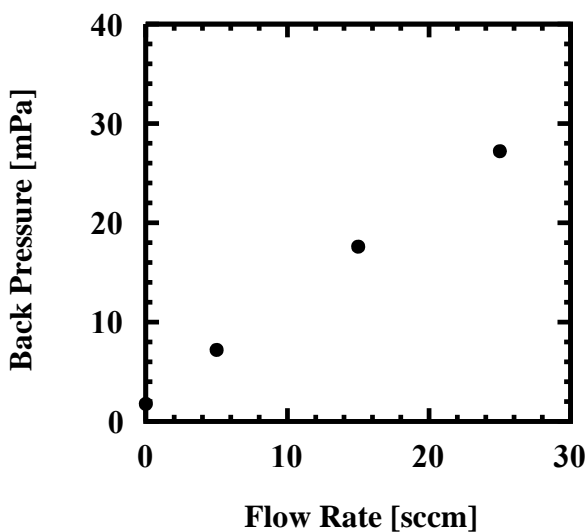


図 2 推進剤流量に対する背圧

## 2.3. 推力測定装置

### 零変位スラストスタンド

本研究では振り子式スラストスタンドに零変位法<sup>5</sup>を導入し、推力計測を行った。図 3 にその概要を示す。復元力を能動的に制御し推力による変位を打ち消すのに要した力から推力を求める方式を零変位法と呼ぶ。零変位法では収束時間がスタンドの振動の時定数に直接依存しないため、より短時間での推力計測が期待される。

スタンドに取り付けられた差動変圧器の変位を入力とし、その変位を打ち消すように電磁アクチュエータの出力を制御し、変位を打ち消した時の出力値から推力を求める。ここで電磁アクチュエータとは、ソレノイドコイルの磁場により永久磁石に力を加える装置である。永久磁石がソレノイドコイルと中心同軸に位置している時、永久磁石が受ける力はコイルの電流（アクチュエータ電流、 $J_{act}$ ）に比例する。よって、変位が打ち消された時

$$F = \frac{F_{counter} l_{counter}}{l_{thrust}} = K_{thrust} J_{counter} \quad (1)$$

以上より、アクチュエータ電流  $J_{act}$  と比例定数  $K_{thrust}$  から推力を求めることが出来ることがわかる。

比例定数  $K_{thrust}$  の較正は既知の重さの錘を用いて行った。錘は糸に固定されており、糸は滑車を通して、スラスタへと繋がっている。DC モータにより糸を巻き取り、スタンドへ印加する錘の数を変化させる。図 4(a) にその時間履歴を示す。錘を印加・除外するとスタンドが変位するものの、フィードバック制御によりアクチュエータに電流が流れ、変位が打ち消されていることが確認できる。充分に変位が打ち消された時のアクチュエータ電流の値を採用し、錘による力とアクチュエータ用電流の関係を図 4(b) にプロットした。この時、加えられた力とアクチュエータ電流の間

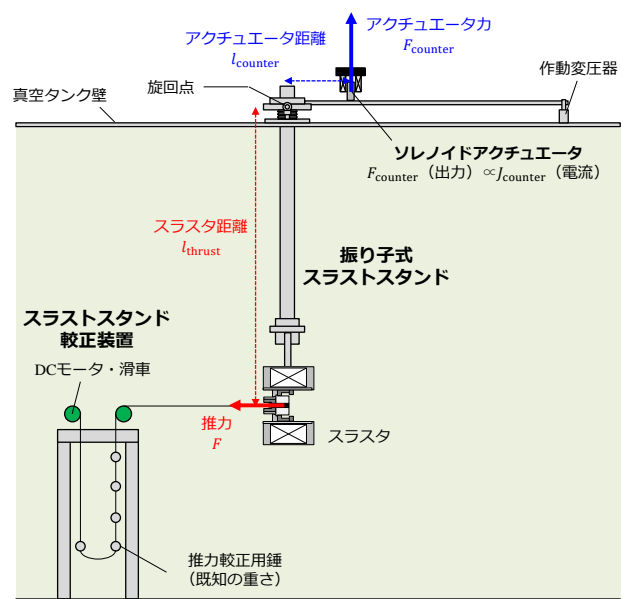


図 3 零変位式スラストスタンド概要

には、ヒステリシスがなく十分な線形性があることが確認できる。

### フィードフォワード制御の付加

また、本研究ではフィードフォワード制御を追加して収束時間の短縮を試みた。

フィードバック制御の入力はスタンドの変位のみである。そのため、スタンドが変位してからしか制御を開始しない。一方で、スラスターの推力は、スラスターの放電の間のみ存在し、その大きさは流量、放電電圧の関数として概算できる。つまり、推力が放電の開始と同時に発生し、その大きさが予想できるのにも関わらず、フィードバック制御では変位のみを頼りに制御しているのである。そこで、スタンドの収束時間の短縮のため、スラスターの放電の信号を入力とする制御を組み込むことを考えた。具体的に言えば、放電電圧信号によるフィードフォワード制御の追加である。

フィードフォワード制御とは、外乱による影響が現れる前に先回りしてその影響を小さくするように制御する方式である。フィードバック制御が外乱による影響が現れてから修正制御をするのに対して、フィードフォワード制御は事前に外乱による影響に対して制御する。そのため、フィ

ードフォワード制御を用いることで、応答が後追いになってしまうというフィードバック制御の欠点を補うことが出来る。ただし、フィードフォワード制御自体は閉ループになっていないため、フィードバック制御と併せて用いられることが多い。

スラストスタンドについて、推力が放電開始と同時に発生するのがわかっているため、放電の信号を入力とするフィードフォワード制御を組み込むことで、応答が速くなることが期待できる。そのブロックダイアグラムを図 5 に示す。フィードフォワードによる力は、放電電圧が印加されている間のみ出力され、その大きさはそれまでの経験則から放電電圧と推進剤流量の関数として決定する。

フィードフォワード制御を追加した時の、放電電圧と制御信号の時間履歴を図 6 に示す。図 6 から、フィードフォワード制御により立ち上がりが速くなっていることがわかる。また、フィードフォワード制御により出力した力と目標値の残差はフィードバック制御により打ち消され、最終的に 12 mN 程度に落ち着くことがわかる。

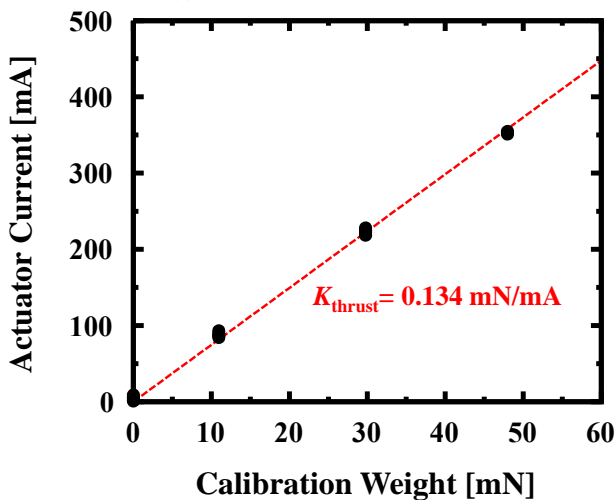
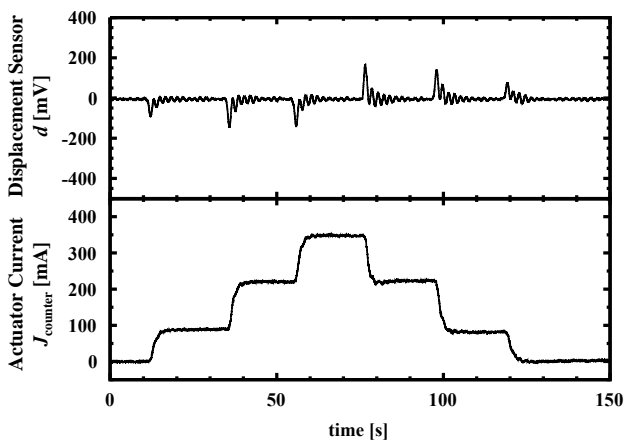
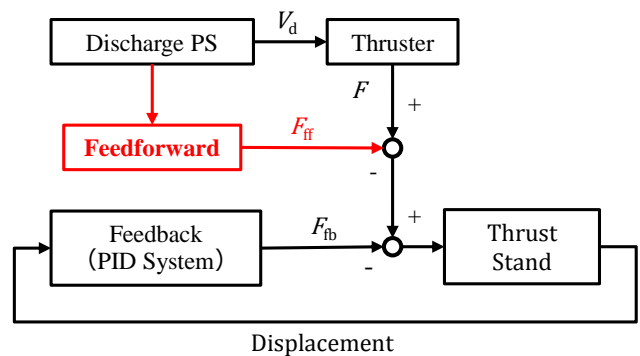


図 4 スラストスタンド較正結果



$$\text{ただし, } F_{ff} = \begin{cases} 0 & (V_d = 0) \\ f(V_d, \dot{m}_a) & (V_d > 0) \end{cases}$$

図 5 フィードフォワード制御付加ブロックダイアグラム

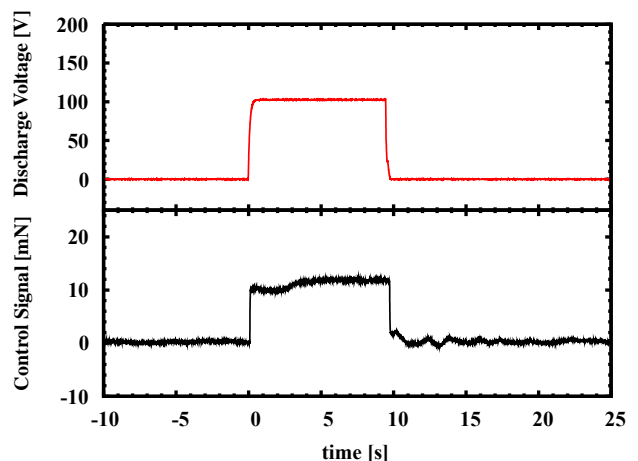


図 6 フィードフォワード制御付加スタンド時間履歴

### コイルによる外乱

実験の際、コイルに電流を印加しただけにも関わらず力が発生していることがわかった。発生している力の大きさは数 mN 程度であり、対象としている推力が数 mN~30mN 程度であるためこの力は無視できない大きさである。推力計測の外乱となるこの力の原因について調査を行った。

推進機の地上試験における推力以外の見かけの力の一つとして、Tare Force<sup>6</sup>が挙げられる。Tare Force とは配線内を流れる電流の干渉による電磁力である。スタンドに固定されている配線同士の干渉はスタンドの内力になるため、主にスタンドに固定されている配線と固定されていない配線（または磁性体）の干渉による力のみが見かけの力として現れる。扱っている電流が主放電電流、コイル電流の二つの時、Tare Force は以下のように分解される。

$$F_{\text{tare}} = C_1 J_d + C_2 J_c + C_3 J_d^2 + C_4 J_c^2 + C_5 J_d J_c \quad (2)$$

力の内訳を調べるため、これらの結果について最小二乗法で以下の式で係数を求めた。

$$F_{\text{tare}} = C_1 J_d + C_2 J_c^2 + C_3 J_d J_c + C_4 J_c \quad (3)$$

$J_d = 4 \text{ A}$  の時のこれらの項の内訳を図 7 の色線で示す。真空チャンバー壁は非磁性のステンレス製で、チャンパー内に磁性体はほぼないため、 $J_d$ 、 $J_c$  の一乗の項は無視すべきである。しかし、計測結果から扱っている力が  $J_c$  に比例しているように見えるため、 $J_c$  の一乗の項は無視せずフィッティングを行った。真空チャンパー内に磁性体はないにも関わらず、この力は  $J_c$  の一乗の項が支配的であることがわかる。

また、詳細は省略するがこの力がコイルの配線に関係ないこと、電流の向きを逆にすると力の向きが逆になることがわかった。

以上より、この力がコイルの磁場と地磁気との干渉だと考えた。このように考えると、この力がコイル電流に比例すること、配線に関係ないこと、電流の向きを逆にすると力の向きが逆になることが説明できる。

では、コイルの磁場と地磁気との干渉によりどの程度の力が発生するかを見積もる。地磁気と対象のソレノイドコイルについて、図 8 のようにモデル化する。地磁気について、気象庁によると実験を行った名古屋でも水平方向に  $30\mu\text{T}$  程度の地磁気があることがわかる。スタンドがやや

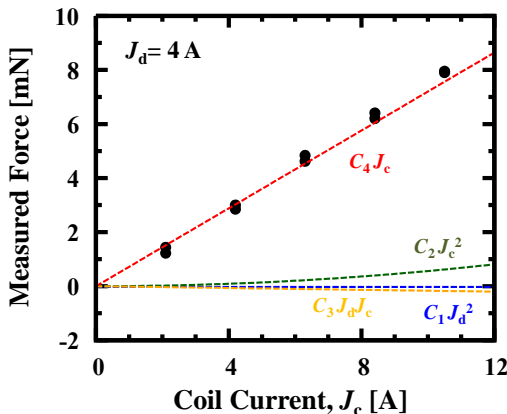


図 7 コイル Tare Force の内訳

北西に向いているとして、推力方向の地磁気を  $20\mu\text{T}$  とする。この時、真空の透磁率  $\mu_0$  を用いて、地磁気による磁界を求めると、

$$H_{\text{GEO}} = \frac{B_{\text{GEO}}}{\mu_0} = \frac{20 \times 10^{-6}}{4\pi \times 10^{-7}} = 15.9, \text{ A/m} \quad (4)$$

となる。ソレノイドコイルについて、両端に  $\pm Q$  の磁荷をもつ磁極とする。例えば、コイル電流  $J_c = 8.4 \text{ A}$  (コイル中心で  $200 \text{ mT}$ ) の時、端での磁束密度が  $136 \text{ mT}$ 、径  $50 \text{ mm}$  の円柱磁石と見なすと、その磁極  $Q$  は

$$Q = B_{\text{coil}} A = B_{\text{coil}} \times \pi r^2 = 0.136 \times \pi \times 0.050^2 = 1.07 \times 10^{-3} \text{ Wb} \quad (5)$$

この時、コイルが地磁気から受ける偶力は

$$F_{\text{GEO}} = Q H_{\text{GEO}} = 1.07 \times 10^{-3} \times 15.9 = 17.0 \times 10^{-3} = 17.0 \text{ mN} \quad (6)$$

となる。この結果より、径  $10^1 - 10^2 \text{ mm}$ 、磁束密度  $10^2 \text{ mT}$  のソレノイドコイルは地磁気との干渉により  $10^1 - 10^2 \text{ mN}$  程度の力を受けることがわかった。以上の結果より、コイルによる力は地磁気との干渉が支配的だと言えることがわかる。

地磁気の影響を取り除くことは困難だと考え、コイルを主放電の持続時間に比べて長い時間作動させておくことにより、コイルと地磁気の干渉により変位した点を基準として推力を評価する。

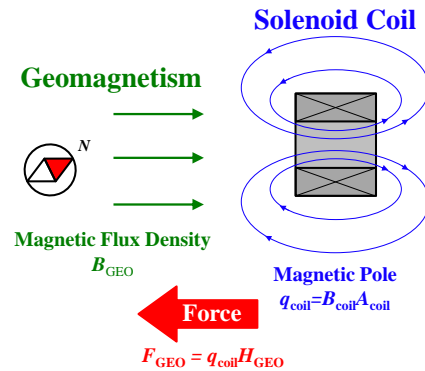


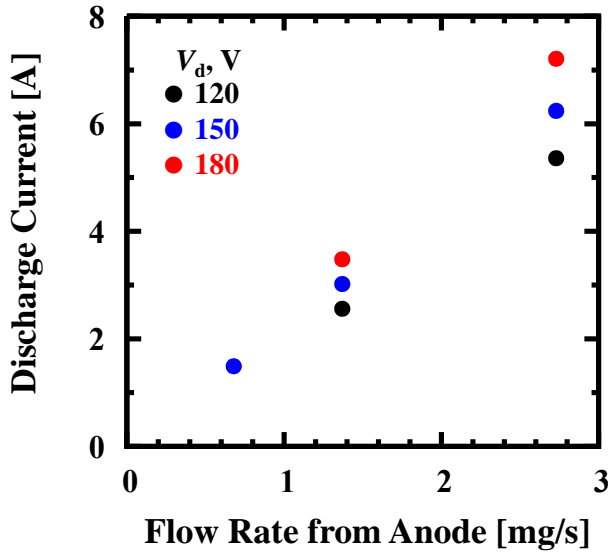
図 8 コイル-地磁気干渉のモデル概要



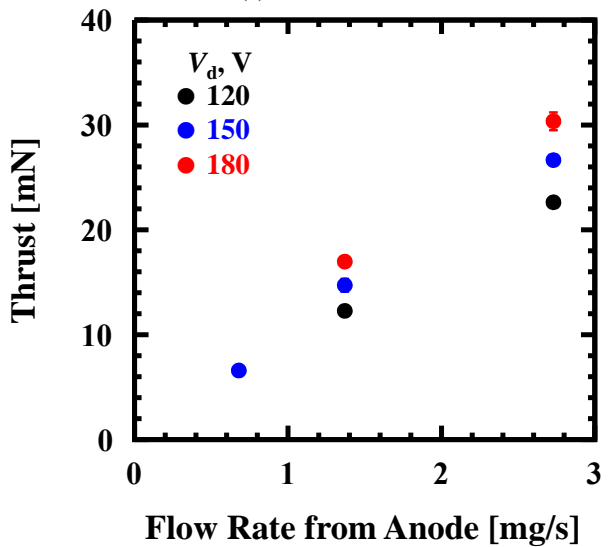
### 3. 実験結果

#### 3.1. 推進剤流量の影響

図 9 に得られた放電電流, 推力データについて, アノードから投入した推進剤流量を横軸にしてプロットする. グラフより, 推力が投入推進剤流量に比例して増加することがわかる. 放電電圧一定 (同じ色の点) では, 推力はアノードから投入する推進剤に対して線形に増加している. この結果は静電加速的に推力を定式化<sup>7</sup>して得られた特徴と一致する. さらに, イオンの排気速度について考える. 推力のグラフについて, 傾きがアノードから投入した推進剤の有効排気速度を表す. 異なる放電電圧 (異なる色の点) で比べると, 放電電圧が高いほど傾きが大きい, つまり排気速度が高いことがわかる.



(a) 放電電流



(b) 推力

図 9 推進剤流量に対する放電電流・推力  
( $R_a = 40$  mm,  $B = 200$  mT,  $\dot{m}_c = 0.49$  mg/s)

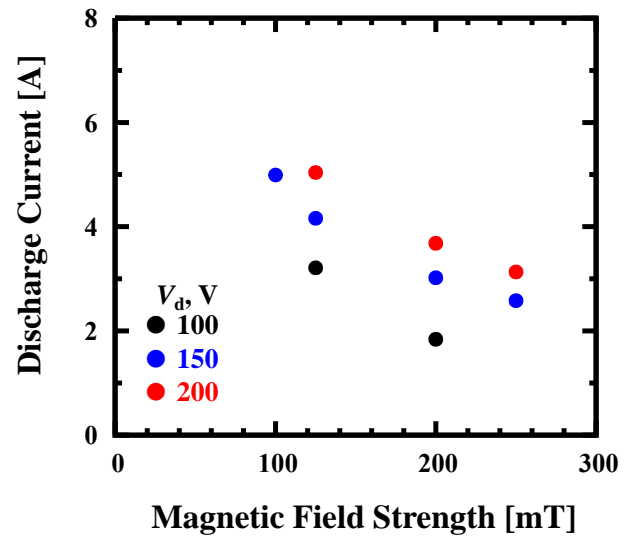
#### 3.2. 磁場強度の影響

イオンがクーロン力で加速されている時, 推力は磁場に直接依存していない. この傾向も実験結果から確認する.

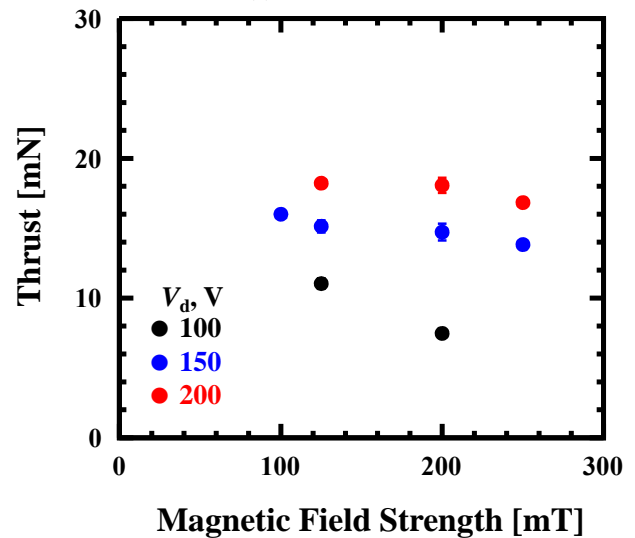
図 10 に磁場強度に対する放電電流, 推力を示す.

グラフより, 特に高電圧では推力が磁場強度に依存していないことがわかる. 電圧が高い条件, 例えば,  $R_a = 40$  mm,  $V_d = 200$  V では磁場強度に依らず, 推力がほぼ一定なのである. 式(5-18)より, 静電加速の推力には磁場の項は含まれていないため, 推力が磁場にほとんど依存しないのも静電加速の特徴だといえる.

また, 放電電流について, 磁場強度を強くすることで放電電流が抑制できていることがわかる. 放電電流がアノードへ流入する電子電流に由来し, 電子流束が磁場を横切る拡散で特徴づけられると考えると妥当である. 電子の磁場を横切る拡散係数はホールパラメータが充分大きい時, 磁場強度の自乗に反比例 (古典拡散) もしくは反比例 (Bohm



(a) 放電電流



(b) 推力

図 10 磁場強度に対する放電電流・推力  
( $R_a = 40$  mm,  $\dot{m}_c = 0.49$  mg/s,  $\dot{m}_a = 1.37$  mg/s)

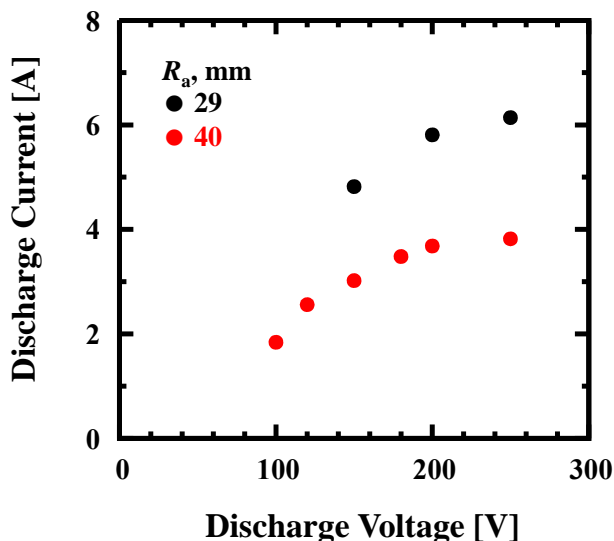
拡散)することが知られている。よって、放電電流をアノードへ径方向に流入する電子電流だと考えると、その拡散が磁場を横切る拡散で特徴づけられ、磁場強度に対して減少することがわかる。

### 3.3. アノード径の影響

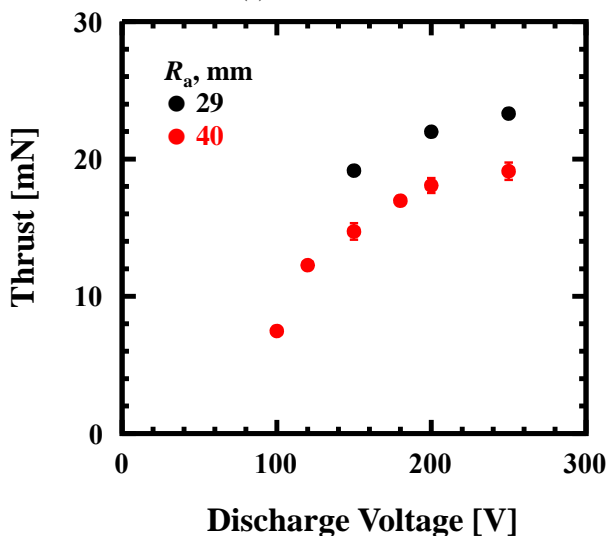
図 11 に同じ条件での  $R_a = 29, 40$  mm アノードでの比較を示す。放電電圧一定では、アノード径を大きくすることにより放電電流が低減できていることがわかる。これは電極間距離を大きくすることにより、アノードへ流入する電子流束が低減したためと考えられる。

### 3.4. 電磁加速推力による評価

このスラスタは放電電圧一定では推力が流量に比例するという点で静電加速的推力特性を有している一方で、推力は放電電流、磁場強度、アノード径の積に比例するという



(a) 放電電流



(b) 推力

図 11 異なるアノード径での放電電流・推力 ( $B = 200$  mT,  $\dot{m}_c = 0.49$  mg/s,  $\dot{m}_a = 1.37$  mg/s)

点で電磁加速的推力特性を有していることがわかった。

ここでは電磁加速の推力のモデルとして、Fradkin ら<sup>8</sup>により提案された Applied-Field Magnetoplasmadynamic Thruster (AF-MPD)でのプラズマの剛体回転を仮定した Swirl 加速の推力モデルを採用する。

放電室内について、中心軸上のカソード内を流れる電流により誘起される磁場、いわゆる自己誘起磁場は微小とする。また、スラスタ下流では磁場は発散しているものの、ここでは電極間の現象を捕らえるため、磁場は軸方向のみとする。さらに、電流について、径方向のみとし、軸方向、周方向の電流はないものとする。ここで、プラズマを一つの剛体とみなして、ローレンツ力により一定角速度で回転しているとする。この時、剛体回転の回転エネルギーが軸方向の運動エネルギーに変換されていると仮定すると、推力は

$$F = \frac{1}{\sqrt{2}} J_d B R_a \frac{1 - \left(\frac{R_c}{R_a}\right)^2}{\sqrt{1 + \left(\frac{R_c}{R_a}\right)^2}} \quad (7)$$

アノード径に対してカソード径が充分小さいとして近似すると

$$F = \frac{1}{\sqrt{2}} J_d B R_a \left(1 - \frac{3}{2} \left(\frac{R_c}{R_a}\right)^2\right) \approx \frac{1}{\sqrt{2}} J_d B R_a \quad (8)$$

このモデルに従うと、推力は放電電流、外部磁場強度、アノード内径に比例し、またその比例係数が  $1/\sqrt{2}$  だということがわかる。

$m_a$ , mg/s		0.68	1.37	2.04
$B$ , mT	60, 80	●		
	100	●	▲	
	150	●		
	200	●	▲	◆

● : ref 9

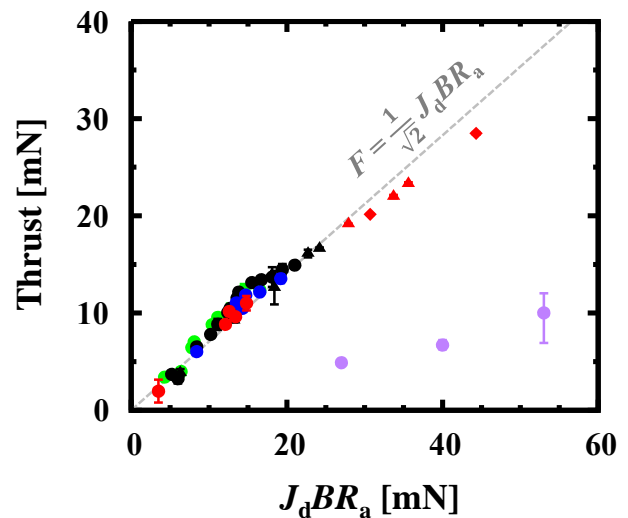


図 12 ローレンツ力に対する推力 ( $R_a = 29$  mm,  $B = 60 - 200$  mT,  $\dot{m}_c = 0.49$  mg/s,  $\dot{m}_a = 0.68 - 2.05$  mg/s)

図 12 に横軸を放電電流, 磁場強度, アノード径の積, 縦軸を計測した推力としてプロットする. ただし, 本スラスタは定電圧作動を行っているため, 放電電流が計測値であることに注意されたい.

グラフより, 計測された推力が電磁加速的モデルである剛体回転モデルの理想的な推力とよく一致していることがわかる. また, この結果を, 先行研究の AF-MPD<sup>9</sup> の結果 (紫色の点) と比較する. グラフより, 先行研究の AF-MPD に比べて傾きが大きくなっていることがわかる.

本研究で開発したスラスタは, 静電加速型のスラスタのバリエーションの一つというコンセプトを基にしている一方で, 電極の位置や磁場はいわゆる AF-MPD と似ていることもあり, このような両特性をもっていることは不思議ではない.

#### 4. まとめ

静電加速スラスタを開発し, 推力測定の結果を基に, その作動特性を調査した. その結果, 推力が推進剤流量に比例する, 磁場強度に依存しないという点で静電加速推進機の特性を持つことがわかった. 一方で, 推力は放電電流と磁場強度の積にも比例し, これは電磁加速型の推進機の特徴である. 以上のように, この推進機は静電加速と電磁加速の両方の特性を併せ持つ推進機であることがわかった.

#### 参考文献

1. Oh, D. Y. *et al.* Solar Electric Propulsion for Discovery Class Missions. *33rd Int. Electr. Propuls. Conf.* **51**, 1–26 (2013).
2. Harada, S. *et al.* Electrostatic acceleration of helicon plasma using a cusped magnetic field. *Appl. Phys. Lett.* **105**, (2014).
3. Uchigashima, A. *et al.* Anode Geometry Effects on Ion Beam Energy Performance in Helicon Electrostatic Thruster. *IEEE Trans. Plasma Sci.* **44**, 306–313 (2016).
4. Ichihara, D., Uchigashima, A., Iwakawa, A. & Sasoh, A. Electrostatic ion acceleration across a diverging magnetic field. *Appl. Phys. Lett.* **109**, (2016).
5. Kakami, A., Hiyamizu, R., Masaki, S. & Tachibana, T. A PRELIMINARY STUDY ON AN ACTIVE-CONTROLLED THRUST STAND FOR THRUST VARIATION MEASUREMENT. in *PROCEEDINGS OF THE INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON SPACE TECHNOLOGY AND SCIENCE. Vol. 25.* 212–217 (2006).
6. Sasoh, A. & Arakawa, Y. Electromagnetic effects in an applied-field magnetoplasmadynamic thruster. *J. Propuls. Power* **8**, 98–102 (1992).
7. Goebel, D. M. & Katz, I. *Fundamentals of Electric Propulsion: Ion and Hall Thrusters. Fundamentals of*

*Electric Propulsion: Ion and Hall Thrusters* (2008). doi:10.1002/9780470436448

8. Fradkin, D. B. *et al.* Experiments using a 25-kw hollow cathode lithium vapor mpd arcjet. *AIAA J.* **8**, 886–894 (1970).
9. Ichihara, D. *et al.* Ten-Ampere-Level, Applied-Field-Dominant Operation in Magnetoplasmadynamic Thrusters. *J. Propuls. POWER* 1–10 doi:10.2514/1.B36179