

東京大学 大学院新領域創成科学研究科
基盤科学研究系
先端エネルギー工学専攻

平成 27 年度

修士論文

アノードレイヤ型ホールスラストにおける
マグネティックシールドイングの効果

2016 年 2 月 2 日提出
指導教員 小紫 公也 教授

47146061 平野 雄也

目次

第1章 序論.....	9
1.1 電気推進.....	9
1.2 ホールスラスタ	10
1.2.1 作動原理.....	11
1.2.2 ホールスラスタの種類	12
1.2.3 ホールスラスタの効率定義	13
1.3 RAIJIN プロジェクト	15
1.4 ホールスラスタの寿命	16
1.5 本研究の目的.....	18
第2章 マグネティックシールドイング.....	19
2.1 マグネティックシールドイングの原理	19
2.2 アノードレイヤ型ホールスラスタにおけるマグネティックシールドイング	20
2.3 マグネティックシールドイング搭載アノードレイヤ型ホールスラスタ UT-58.....	21
2.4 マグネティックシールドイングの効果の評価方法.....	24
2.4.1 ガードリング電流率.....	24
2.4.2 プラズマ電位計測	27
第3章 実験装置.....	28
3.1 ホローカソード	28
3.2 真空系	29
3.3 冷却系	31
3.4 推進剤供給系	32
3.5 電源系	34
3.6 デジタルオシロスコープ	37
3.7 スラストスタンド.....	39

3.8 エミッシブプローブ	41
第4章 結果と考察	44
4.1 磁場最適化	44
4.1.1 インナーコイル電流とアウターコイル電流の大小	44
4.1.2 インナーコイル強度	47
4.1.3 トリムコイル	48
4.2 マグネティックシールドイングの効果	51
4.2.1 ガードリング電流率	51
4.2.2 プラズマ電位分布	52
4.3 高効率作動にむけて	54
第5章 結論	56
謝辞	57
参考文献	59
学会発表	62

目次

図 1.1 各種推進機の推力密度と比推力の関係	10
図 1.2 作動中のホールスラスタ	11
図 1.3 ホールスラスタの概略図	12
図 1.4 2 種類のホールスラスタの概略図	13
図 1.5 ホールスラスタ内の電流概略図	15
図 1.6 JAXA による宇宙探査ロードマップ	16
図 1.7 RAIJIN プロジェクトの構想	16
図 1.8 ホールスラスタ SPT-100 の作動前と作動後の壁面の様子	17
図 1.9 アノードレイヤ型ホールスラスタの壁面損耗の様子	17
図 2.1 マグネティックシールディングの原理	20
図 2.2 マグネティックシールディングを搭載した場合に予想される等電位線図	21
図 2.3 UT-58 の外観	22
図 2.4 UT-58 の断面図	22
図 2.5 UT-58 における磁場形状のシミュレーション結果	23
図 2.6 入射イオンエネルギーとスパッタリング率の関係	25
図 2.7 BN におけるスパッタリング率の入射角度依存性	25
図 2.8 アノードレイヤ型スラスタにおける電流構成	26
図 2.9 スラスタ前面を BN スプレーでコーティングした様子	26
図 2.10 プローブの加熱による浮動電位の変化	27
図 3.1 ホローカソードチップ	29
図 3.2 ホローカソードの模式図	29
図 3.3 真空チャンバ	30
図 3.4 真空ポンプおよび制御盤	31
図 3.5 冷却塔	32
図 3.6 冷却水とバルブ	32
図 3.7 マスフローコントローラー	33
図 3.8 マスフローコントローラ制御器	33
図 3.9 電気回路概略	35
図 3.10 電源	36
図 3.11 オシロスコープ WE7000	37
図 3.12 スラストスタンド外観	40
図 3.13 較正による推力値と制御電流値の関係	40
図 3.14 エミッシブプローブの断面図(左)と写真(右)	42
図 3.15 純タングステンとトリエイテッドタングステンにおける温度に対するエミッ	

ジョン電流密度.....	42
図 3.16 加熱電流と浮動電位の関係.....	43
図 3.17 エミッシブプローブ測定システム全体図.....	43
図 4.1 各コイル電流比における磁場形状.....	45
図 4.2 各コイル電流比における磁束密度軸方向分布	45
図 4.3 各コイル電流比におけるガードリング電流率とアノード効率.....	46
図 4.4 各コイル電流比におけるビーム収束効率.....	46
図 4.5 発散が大きい時と小さい時のスラスト作動の様子	47
図 4.6 インナーコイル電流とガードリング電流率, アノード効率の関係.....	48
図 4.7 インナー5 A, アウター5 A のときのトリムコイルによる磁場形状の変化.....	49
図 4.8 インナー2 A, アウター5 A のときのトリムコイルによる磁場形状の変化.....	49
図 4.9 インナー5 A, アウター5 A のときのトリムコイル電流によるガードリング電流率とアノード効率に対する影響(放電電圧 200 V, 流量 2.72 mg/s)	50
図 4.10 インナー2 A, アウター5 A のときのトリムコイル電流によるガードリング電流率とアノード効率に対する影響(放電電圧 200 V, 流量 2.72 mg/s)	50
図 4.11 UT-55 におけるチャンネル壁面形状と磁場形状	51
図 4.12 磁場を変化させた際のアノード効率とガードリング電流率の関係	52
図 4.13 プラズマ電位分布測定結果(放電電圧 250 V, 流量 3.40 mg/s)	53
図 4.14 D55 におけるプラズマ電位分布の計算結果	53
図 4.15 流量 3.40 mg/s において放電電圧を振った際のアノード効率	55
図 4.16 放電電圧 250 V において流量を変えた際のアノード効率	55

表目次

表 2.1 UT-58 の仕様.....	23
表 2.2 Xe と Fe, Cr, Ni におけるスパッタリング閾値.....	26
表 2.3 各エネルギーにおける Xe と Fe, Cr, Ni に対するスパッタリング率.....	26
表 3.1 電離真空計の相対感度.....	31
表 3.2 マスフローコントローラの仕様.....	34
表 3.3 電源定格.....	35
表 3.4 オシロスコープ WE7000 の仕様.....	38
表 3.5 差動プローブ仕様.....	39
表 3.6 リニアモーターUCM640-7C 仕様.....	43

主要記号一覧

I_{sp} : 比推力

F : 推力

\dot{m} : 推進剤流量

g : 重力加速度

v : 排気速度

ω_{ce} : 電子サイクロトロン周波数

τ_{e} : 電子の平均自由時間

r_{e} : 電子のラーマー半径

r_{i} : イオンのラーマー半径

l : チャネル代表長さ

λ_{n} : 中性粒子の平均自由行程

λ_{i} : イオンの平均自由行程

$\omega_{\text{ce}}\tau_{\text{e}}$: ホールパラメータ

η_{A} : アノード効率

η_{a} : 加速効率

η_{u} : 推進剤利用効率

η_{E} : エネルギー効率

η_{div} : ビーム収束効率

V_{d} : 放電電圧

I_{d} : 放電電流

I_{b} : ビーム電流

I_{g} : ガードリング電流

I_e : 電子電流

m_i : イオン質量

e : 電子素量

E_m : イオンビームの平均エネルギー

$j(\theta)$: 電流密度

T_e : 電子温度

n_e : 電子密度

$E_{//}$: 磁力線に平行方向の電場

第 1 章 序論

1.1 電気推進

近年宇宙開発は各国で盛んに行われてきており、国際競争が激化している。そこで重要になってくるものが宇宙開発コストの削減である。その一環として、軌道投入や軌道保持、姿勢制御のために高性能な電気推進を搭載しようという動きが活発になってきている。

電気推進とは、電力を推進剤に与えることで推力を得ようというロケット推進機関である。燃料と酸化剤を燃やして得た単位時間当たりのエンタルピー上昇を推進パワーに変換する化学推進のように強大な力を発生させるものではなく、電力に見合った推力しか得られない。また、放電を介した推力発生機構のため大気中でというよりは真空の宇宙空間で使うのが一般的である[1]。

電気推進の特徴として、化学推進と比較して推力は小さいが比推力が大きいことが挙げられる。比推力 I_{sp} は式(1.1)で表わされる。

$$I_{sp} \equiv \frac{F}{\dot{m}g} = \frac{v}{g} \quad (1.1)$$

ここで v は排気速度である。比推力は推進剤をいかに効率よく加速させるかを表わす指標であり、一般的にこれが高いほど加速に必要な推進剤の量が少なくて済むため、全衛星重量に占めるミッションシステムの割合を大きくすることが可能である。電気推進では I_{sp} を化学推進に比べ 1 桁以上高めることが可能である。図 1.1 に各種推進機の比推力と推力密度の関係を示す[1]。

電気推進は推力発生機構により、静電加速型、電熱加速型、電磁加速型に大別できる[2]。静電加速型は、プラズマ化させた推進剤を静電場によって加速させることで推力を得る機構であり、代表的な推進機としてイオンスラスタが挙げられる。電熱加速型は、推進剤を電極間に流し、放電によりプラズマ化させ、そのプラズマ内に流れる電流によって推進剤をジュール加熱し、ノズルでもって膨張・加速させることで推力を得るものである。代表的なものにアークジェットスラスタやレジストジェットスラスタが挙げられる。電磁加速型は、電流とそれに直交する磁場を与えることで得られるローレンツ力を利用して推進剤を加速させ推力を得るものである。代表例として、MPD スラスタや PPT が挙げられる。本研究で取り扱うホールスラスタは、静電加速型と電磁加速型の両方の特徴を備える電気推進である。

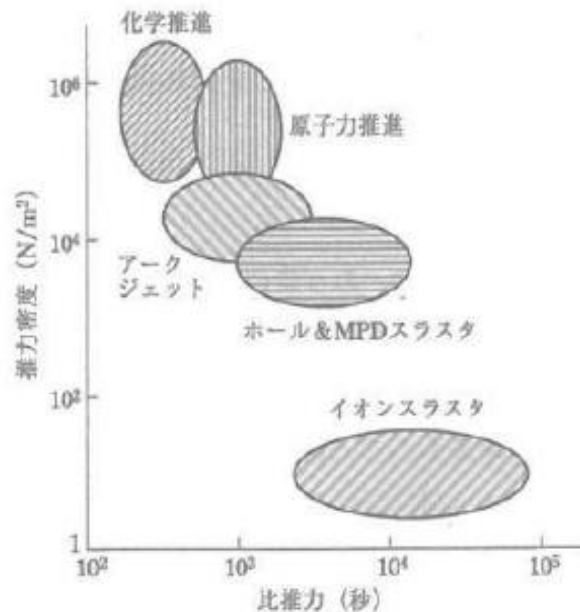


図 1.1 各種推進機の推力密度と比推力の関係

1.2 ホールスラスタ

ホールスラスタは以下のような特徴をもつ電気推進である[3]。作動中の様子を図 1.2 に示す。

1. 1000 ~ 3000 s という比推力範囲において 50%以上の高い推進効率を達成可能
2. イオンスラスタと比較して、推力密度が高い
3. スラスタシステムが軽量かつコンパクト

上記の特徴からホールスラスタは地球近傍の人工衛星の姿勢制御や軌道間輸送に適している。ロシアではすでに 100 機以上のホールスラスタが人工衛星の軌道修正や東西制御に使われており、ESA では月探査衛星 SMART-1[4]で PPS-1350 ホールスラスタ[5][6]を使用した。また、日本では三菱電機株式会社が 5 kW 級のホールスラスタを開発している[7]。

推進剤としては、電離エネルギーの低い希ガスをを用いることが多い。特に、キセノンはその電離エネルギーの低さから、最も一般的な推進剤として使用されている。

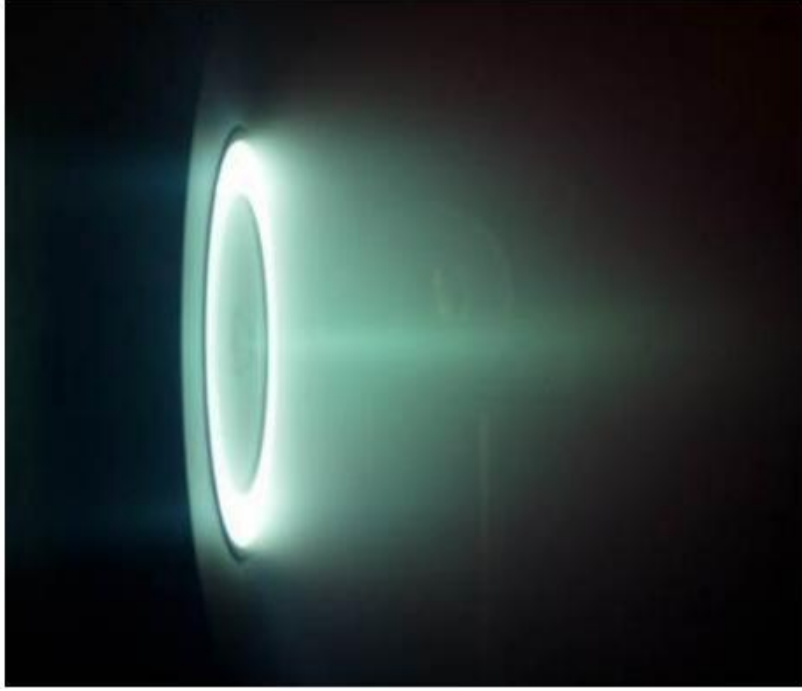


図 1.2 作動中のホールスラスタ

1.2.1 作動原理

ホールスラスタの概略図を図 1.3 に示す．加速チャネルにおいて，電場は軸方向，磁場は半径方向に印加されている．電子源であるカソードから放出された電子は，磁場にトラップされ，チャネル内で周方向に $\mathbf{E} \times \mathbf{B}$ ドリフトをする．それによって生じるホール電流と呼ばれ，ホールスラスタの名前の由来となっている．トラップされた電子とアノードからチャネル内へ流された推進剤の中性粒子が電離衝突を起こし，イオンが生成される．生成されたイオンは電場により高速でチャネル外へ放出され，推力が生まれる．カソードからチャネル内へ供給された電子と電離によって生成された電子は，中性粒子と衝突を繰り返しながら徐々にアノードへと拡散していく．また，カソードは放出されたイオンを中和することでスラスタの帯電を防止する中和器としての役割も果たしている．

ホールスラスタは加速チャネルにおいて，以下の条件を満たす必要がある．

$$\omega_{ce} \tau_e \gg 1 \quad (1.2)$$

$$r_e \ll l \ll r_i \quad (1.3)$$

$$\lambda_n \ll l \ll \lambda_i \quad (1.4)$$

ここで ω_{ce} は電子のサイクロトロン周波数, τ_e は電子の平均自由時間, r_e と r_i はそれぞれ電子とイオンのラーマー半径, l はチャンネルの代表長さ, λ_n と λ_i はそれぞれ中性粒子とイオンの平均自由行程である. $\omega_{ce}\tau_e$ はホールパラメータと呼ばれ, 電子が衝突する間にどれだけ旋回運動をするかを示す無次元量であり, 式(1.2)はチャンネル内で電子が磁場に効率的に閉じ込められるための条件を示している. 式(1.3)は電子のみが磁場の影響を受けて, イオンは磁場の影響を受けないための条件である. 式(1.4)は中性粒子がチャンネル内で十分に衝突して電離し, イオンは電子と再結合せずにチャンネル外へ放出されるための条件である.

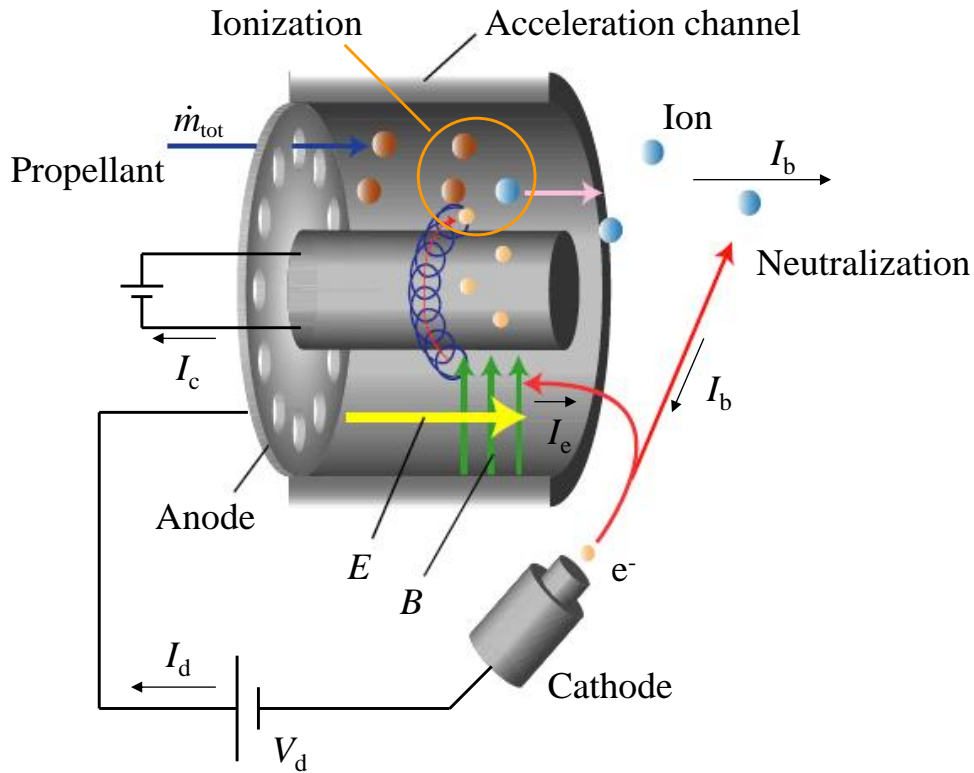


図 1.3 ホールスラスタの概略図

1.2.2 ホールスラスタの種類

ホールスラスタは一般的にマグネティックレイヤ型とアノードレイヤ型の 2 種類に大きく分けられる[8]. マグネティックレイヤ型は 1960 年代に Morozov らによって開発され, 代表的なものに SPT シリーズがある[9]. アノードレイヤ型は Zharinov らによって開発が

進められ、代表的なものに TAL(Thruster with Anode Layer)シリーズがある[10]。これら2つの概念図を図 1.4 に示す。

マグネティックレイヤ型はチャンネル壁が絶縁体で出来ており、アノードレイヤ型に比べて安定した作動が可能である。壁面にはプラズマからイオンと高エネルギーの電子が流れ込み、低エネルギーの二次電子が放出されるため、エネルギーの損失が比較的大きく、電子温度も低くなる。そのため十分に電離を起こすようチャンネル長が長くとられている。しかし、これは電子やイオンの壁面衝突を増加させ、スパッタリングによる壁面損耗による寿命低下につながっている[11]。

一方、アノードレイヤ型は壁面が導電性のガードリングであり、カソード電位に保たれている。そのため電子はチャンネル壁に衝突せず、電子エネルギーの損失を抑えることができる。この結果として、マグネティックレイヤ型と比べ短いチャンネル長で十分な電離を起こすことができるようになる。そしてチャンネル長が短いことによって、イオンの壁面への衝突が小さくなり、マグネティックレイヤ型と比べて寿命が長く、推進性能も高くなると考えられている。

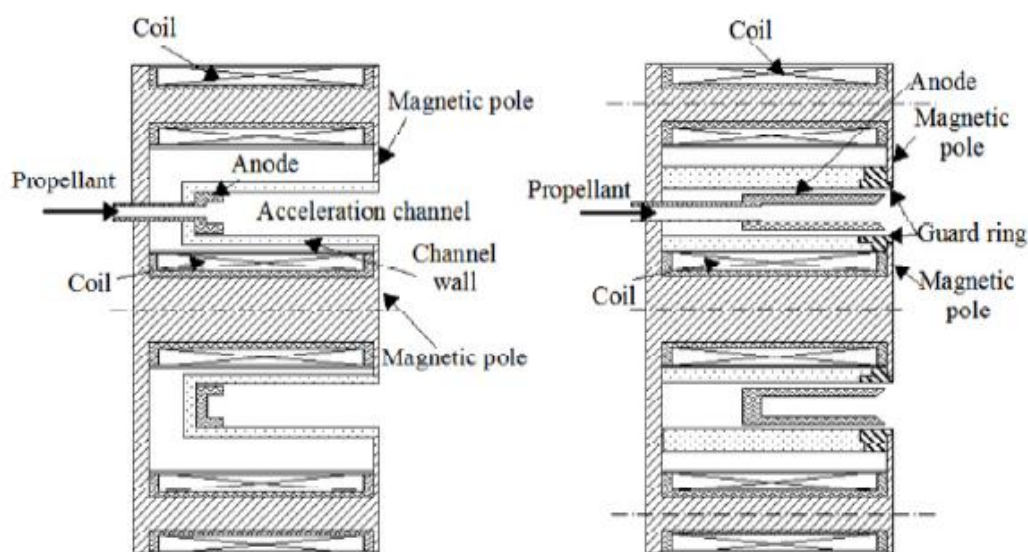


図 1.4 2 種類のホールスラスタの概略図

1.2.3 ホールスラスタの効率定義

電気推進機であるホールスラスタにおいて、アノード効率 η_A は重要な性能評価パラメータである。アノード効率はアノードへの投入エネルギーのうちどれだけ推力発生に運動エ

エネルギーに変換されたかを示す効率であり，以下の式(1.5)で定義される．

$$\eta_A = \frac{F^2}{2\dot{m}V_d I_d} \quad (1.5)$$

またアノード効率は，加速効率 η_a ，推進剤利用効率 η_u ，エネルギー効率 η_E ，ビーム収束効率 η_{div} を用いて次の式(1.6)のように書ける[12]．

$$\eta_A = \eta_a \eta_u \eta_E \eta_{div} \quad (1.6)$$

加速効率は，放電電流 I_d のうち推力に寄与するビーム電流 I_b の割合を示しており，式(1.7)で定義される．

$$\eta_a \equiv \frac{I_b}{I_d} \quad (1.7)$$

ホールスラスタにおいて，電流は図 1.5 のように流れ，放電電流を式(1.8)のように 3 つに分解することができる．

$$I_d = I_b + I_g + I_e \quad (1.8)$$

I_g はチャネル壁面に衝突したイオンが壁面から電子を受け取り，中性粒子に戻ることに起因するガードリング電流であり，マグネティックレイヤ型では 0 となる．これは壁面損耗低減の観点からも低い方が望ましい． I_e はカソードからチャネルに供給される電子電流であり，磁場による電子の閉じ込め度によって決まるものである．

推進剤利用効率は，ビーム電流と電流換算した推進剤流量の比として式(1.9)のように表わされる．

$$\eta_u \equiv \frac{m_i I_b}{e\dot{m}} \quad (1.9)$$

これは投入した推進剤がどの程度電離されてイオンになり，イオンビームとして利用されたかを示すパラメータである．ただし，これは全イオンが 1 価であるという仮定のもとでの式であるので，多価電離がある場合には高く見積もられる．

エネルギー効率はイオンが放電電圧 V_d に相当する電位をどの程度有効に利用したかを示すもので，イオンビームの平均エネルギー E_m を用いて，式(1.10)で表わされる．

$$\eta_E \equiv \frac{E_m}{eV_d} \quad (1.10)$$

ビーム収束効率はある角度 θ における電流密度を $j(\theta)$ として以下の式(1.11)，(1.12)で表

わされる.

$$\eta_{\text{div}} = \gamma^2 \quad (1.11)$$

$$\gamma = \frac{2\pi r^2 \int_0^{\pi/2} j(\theta) \sin(\theta) \cos(\theta) d\theta}{I_b} \quad (1.12)$$

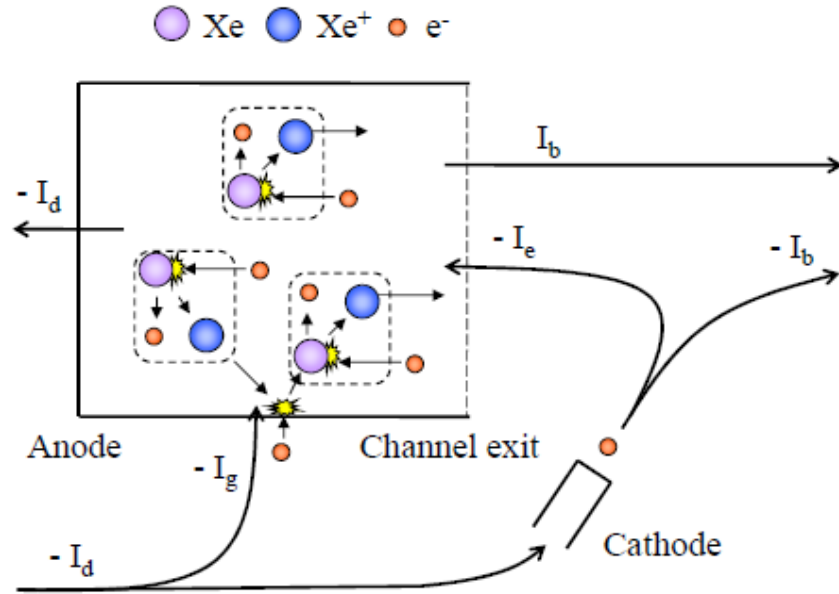


図 1.5 ホールスラスタ内の電流概略図

1.3 RAIJIN プロジェクト

現在，国際宇宙探査協働グループ (ISECG; International Space Exploration Coordination Group) は将来の有人火星探査を目標としたロードマップを掲げている．その中で要求される推進技術”In-Space Propulsion”は世界中で研究されている．日本においても，JAXA が図 1.6 に示すような In-Space Propulsion 研究のロードマップを掲げており，様々な推進機がその候補となっている [13]．そして，ホールスラスタは平成 24 年度に重点的に開発する大型電気推進機の 1 つとして選ばれている．これに応じ，マグネティックレイヤ型と比較して長寿命および高い推力密度が期待されるアノードレイヤ型が着目され，全日本体制でアノードレイヤ型ホールスラスタを研究開発する”RAIJIN (Robust Anode Layer Intelligent Japan IN-space propulsion system)”プロジェクトが発足した．その構想は図 1.7 に示す通りで，スラスタ本体の開発や電源系の開発，クラスタ作動した際のブルーミング干渉，大電流カソードの開発，ミッションや産業化への提案といったパートからプロジ

ェクトは成り立っている[14].

当研究室もこのプロジェクトに参画しており，アノードレイヤ型ホールスラスタ本体の開発に重点を置いている．スラスタの高効率・長寿命化といった性能の向上や，現行に変わる推進剤利用に関する研究が進められている．






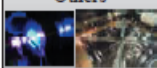
Mission Milestone	Transportation to GEO 	Transportation to EML 	Next Asteroid 
Power/Isp	5-10kW/2000s	50kW/1500~2000s	160kW/2000-3000s
Thrust	0.3N~0.6N	3N	6N~10N
Life time	0.5~1year	1year	1year
Hall thruster 	Long-life Discharge stability Analysis tool	System study (DDU/PPU) Selection of propellant Clustering (Plume interference)	Long-life in high power operation Weight saving High Isp
DC/MPD, Arcjet 	Analysis tool Optimization of electrode shape and external magnetic field	System study (DDU/PPU) Selection of propellant Long-life	Optimization of thermal design High propulsion efficiency
Others 	Track design	New test facility Light solar cell	High efficiency plasma source High current cathode Thin-film solar cell

図 1.6 JAXA による宇宙探査ロードマップ

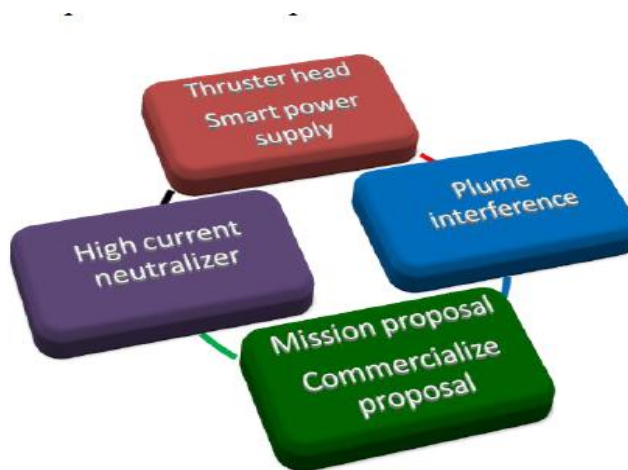


図 1.7 RAIJIN プロジェクトの構想

1.4 ホールスラスタの寿命

ホールスラスタに要求される性能として，推進性能と並び重要なものに寿命が考えられている．これは，推力が小さいため，大きな速度増分を得るには長時間作動が必要になるからである．

ホールスラストの寿命は、チャンネル壁面の損耗によって制限されている。壁面損耗は、高いエネルギーを持ったイオンが壁面に衝突することで起きるスパッタリングにより引き起こされる。図 1.8 および図 1.9 に作動前と作動後のスラストの壁面の様子を示す[15][16]。

ホールスラストの長時間作動に向けて、損耗の度合いを計測してスラストの寿命を評価する研究がなされてきた。例を挙げると、地上でのスラスト耐久試験[15][17]，短時間で行える壁面損耗測定法の研究[18][19]，実験および数値解析によるイオンスパッタリングのモデル化[20][21][22]などである。そこで近年，耐久試験における壁面損耗測定の結果から，無損耗なマグネティックレイヤ型ホールスラスト BPT-4000 が報告された[16]。これは，特殊な磁場形状と壁面形状を用いてチャンネル壁面をイオンスパッタリングから保護することにより実現された。この技術は，実験及び数値計算の双方から検証されており，マグネティックシールドイングと名付けられている[23][24]。

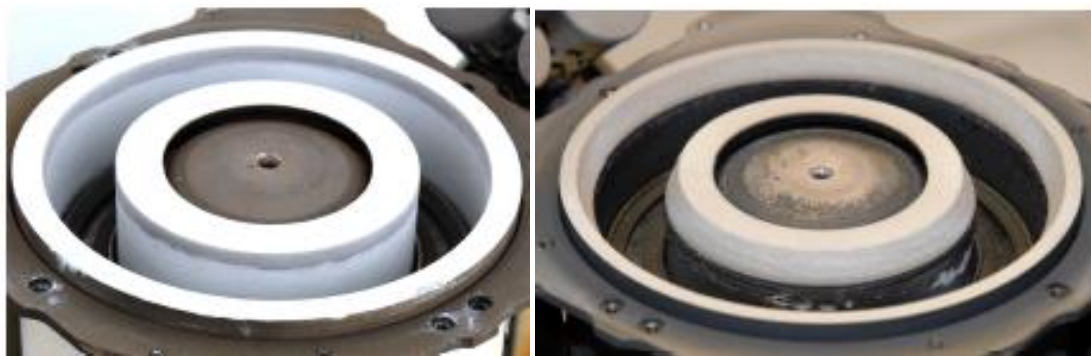


図 1.8 ホールスラスト SPT-100 の作動前と作動後の壁面の様子
(左：作動前，右：205 時間作動後)

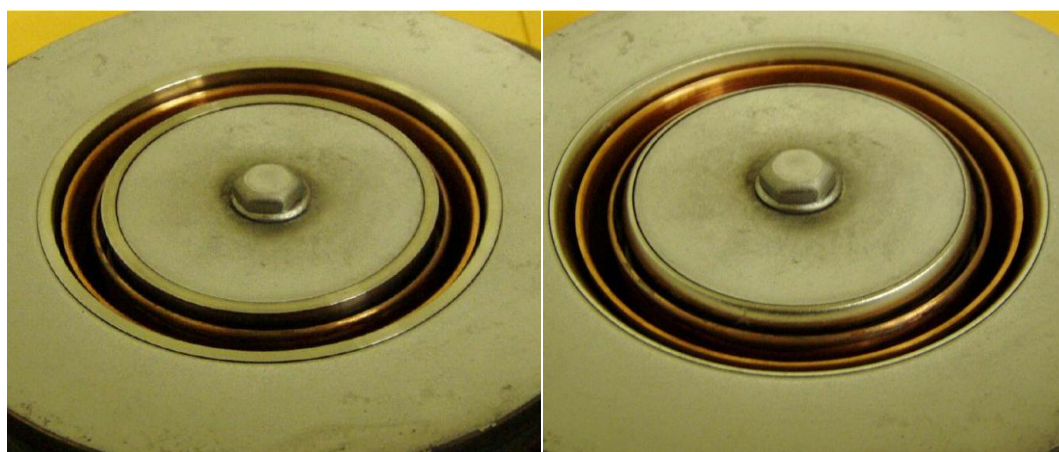


図 1.9 アノードレイヤ型ホールスラストの壁面損耗の様子
(左：作動前，右：作動後)

1.5 本研究の目的

前述のマグネティックシールディングをアノードレイヤ型スラスタに適用することができれば、より高効率・長寿命で **In-Space Propulsion** に適した推進機となると考えられる。しかし、マグネティックシールディングはマグネティックレイヤ型スラスタに応じて開発された技術であり、アノードレイヤ型スラスタに搭載した場合の効果は不明瞭である。過去にアノードレイヤ型スラスタにおけるマグネティックシールディングの研究もなされたが[25][26]、その際はインナー、アウターコイル電流比が 1 : 1 における作動しかなされておらず、磁場の最適化はなされていない。

そこで本研究の目的は、マグネティックシールディング搭載アノードレイヤ型スラスタ UT-58 においてインナーコイル、アウターコイル及びトリムコイルの電流値を振り磁場を変更させ、壁面損耗と推進効率の観点から最適作動点を見つけ、マグネティックシールディングの効果を解明することである。

第 2 章 マグネティックシールドイング

2.1 マグネティックシールドイングの原理

マグネティックシールドイングの原理を図 2.1 に示す[24]．従来の磁場・壁面形状は，図 2.1(b)のように磁力線がチャンネル壁面を貫く形をしている．それに対し，マグネティックシールドイングを搭載した磁場・壁面形状は，図 2.1(c)のように磁力線が壁面に沿うように形成されている．

磁場に平行な方向に関して電子は自由に動くことができるので，熱および質量の流れの抵抗が磁場に垂直な方向に比べて小さい．このため，電子温度の変化も小さいと考えられるので，式(2.1)と書ける．

$$\nabla_{\parallel} T_e \approx 0 \quad (2.1)$$

さらに，磁場平行方向で電気抵抗が無視できるとすると，電子流体の運動量の式から式(2.2)が導ける．

$$E_{\parallel} \approx -T_e \nabla_{\parallel} \ln(n_e) \quad (2.2)$$

従って，磁場に平行な方向の電場は電子温度もしくはプラズマ密度勾配が 0 でない限り存在している．つまり電子温度が高いと等電位線が磁力線に沿う形にならないため，図 2.1(b)のような磁場形状だと，チャンネル出口付近の壁面近傍で電子温度が高くなりイオンが壁面に向かうような電場が形成され，壁面損耗を起こしてしまう．

そこで，図 2.1(c)のように磁力線とチャンネル壁面が平行になる形状にして，チャンネル壁近傍の磁力線をチャンネル内部の上流部まで伸ばすと，式(2.1)から壁面付近の電子温度をチャンネル上流部と同程度まで低く抑えることができる．電子温度が低い場合，式(2.2)から磁場に平行な方向の電場が小さくなるため，等電位線は磁力線に沿うように形成される．これにより，壁面近傍の電位を放電電圧程度まで高く保ち，チャンネル壁からイオンを遠ざけるような電場が形成されるようになる．

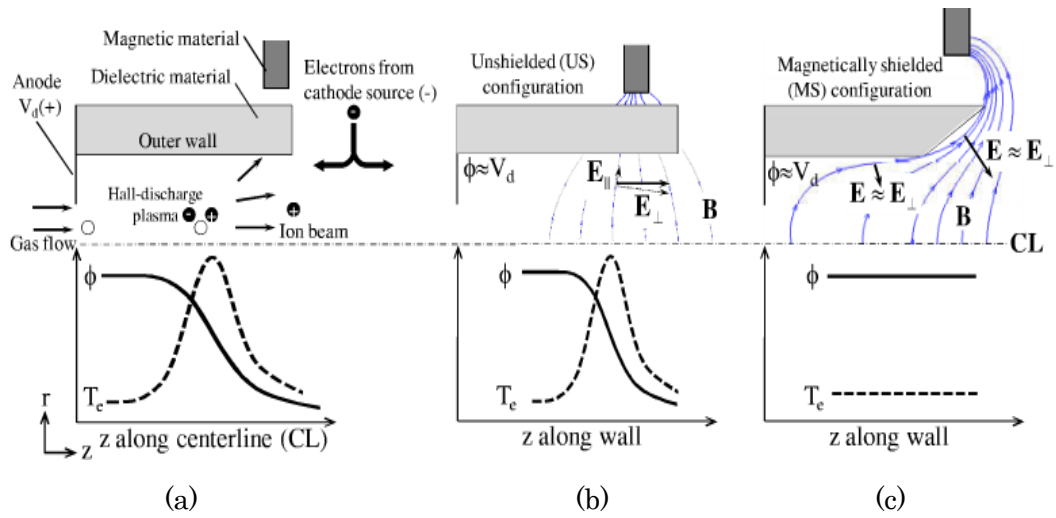


図 2.1 マグネティックシールドイングの原理

2.2 アノードレイヤ型ホールスラストにおけるマグネティックシールドイング

アノードレイヤ型においてマグネティックシールドイングの効果が不明瞭な理由として、壁面がマグネティックレイヤ型と異なりカソード電位を保っていることがある。そのため等電位線が磁力線に沿わずに横切る箇所が存在し、等電位線形状が不明となっている。図 2.2 にマグネティックシールドイングをマグネティックレイヤ型とアノードレイヤ型に適応させた場合に予想される等電位線図を示す。図 2.2(b)のような等電位線が形成されていれば、マグネティックシールドイングの効果は大きく、壁面損耗は小さくなると考えられる。しかし、図 2.2(d)のような等電位線が形成されていると、マグネティックシールドイングの効果は小さく、壁面損耗は大きくなると考えられる。

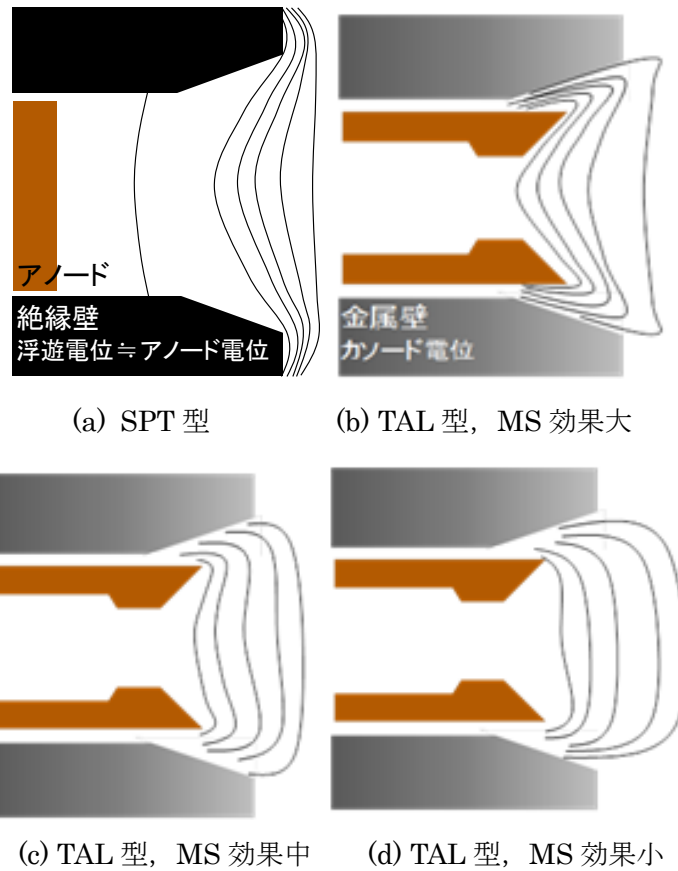


図 2.2 マグネティックシールディングを搭載した場合に予想される等電位線図

2.3 マグネティックシールディング搭載アノードレイヤ型ホールスラスト UT-58

東京大学で開発されたアノードレイヤ型ホールスラスト UT-58 を図 2.3 に示す[27]. また, その断面図と仕様をそれぞれ図 2.4, 表 2.1 に示す.

チャンネル内径, 外径はそれぞれ 50 mm, 66 mm であり, チャンネル長さは 2 mm となっている. チャンネル壁面は SUS304 で作られており, 電子の壁面衝突を防ぎ高い電子温度を保つため, カソード電位となっている.

過去の研究でホローアノードが放電電流振動を低減させることが分かっている[28][29] ため, 厚さ 1 mm の銅でできたホローアノードが搭載されている.

半径方向の磁場を印加するための磁気回路は純鉄(SUYB1)で構成されており, インナーに 1 つ, アウターに 4 つ, トリム用に 1 つのソレノイドコイルを使用している. コイル線には超耐熱巻線 CEW を使用しており, インナーコイル 294 巻, アウターコイル 147 巻,

トリムコイル 60 巻である。また、ホローアノード外側に純鉄を設置することにより、ホローアノード内部に磁束密度を持たないようにしている。図 2.5 に FEMM4.2 で計算されたインナーコイル 5 A, アウターコイル 5 A のときの磁場形状を示す。

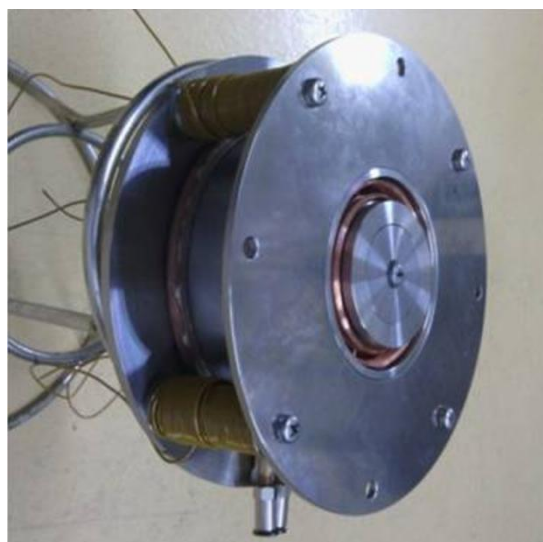


図 2.3 UT-58 の外観

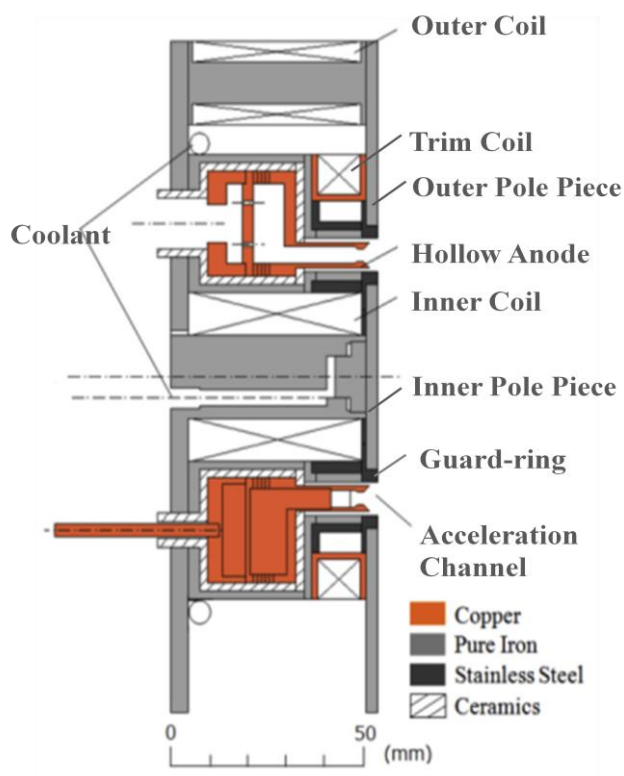


図 2.4 UT-58 の断面図

表 2.1 UT-58 の仕様

Anode material	Copper
Holes for propellant supply	ø 1 mm
Channel outer diameter	ø 66 mm
Channel inner diameter	ø 50 mm
Channel length	2 mm
Insulating material	Alumina
Magnetic circuit material	SUYB1
Magnetic wire	ø 1 mm CEW
Number of turns of windings	147 turns for four outer coils
	294 turns for single inner coil
	60 turns for single trim coil
Cooling medium	Water

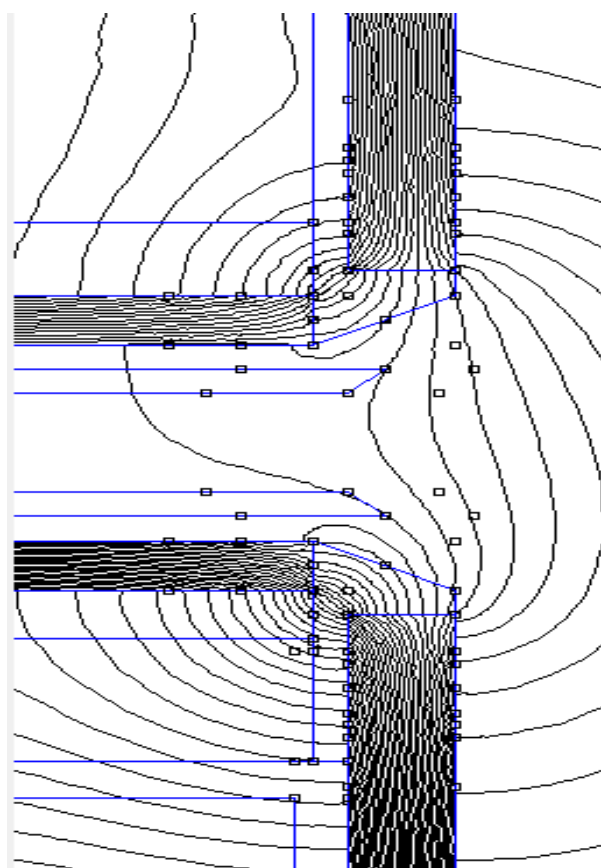


図 2.5 UT-58 における磁場形状のシミュレーション結果

2.4 マグネティックシールディングの効果の評価方法

2.4.1 ガードリング電流率

壁面損耗を引き起こすスパッタリングは入射イオンの以下の4つに依存している。

1. 入射イオンとターゲットの種類
2. 入射イオンのエネルギー
3. 入射イオンの入射角度
4. ターゲット表面の結晶構造

一般的にエネルギーとスパッタリング率は図 2.6 のような関係があり、エネルギー閾値以上のエネルギーを持つイオンが衝突しなければスパッタリングは起こらない。また、スパッタリング率は粒子の入射角度に依存し、粒子が垂直に入る場合を 0 度としたときの X マグネティックレイヤ型スラスタの壁面によく用いられる BN におけるスパッタリング率の角度依存性を図 2.7 に示す[30]。

一方、Xe とアノードレイヤ型スラスタの壁面によく用いられる SUS とのスパッタリング率のエネルギー依存性、入射角度依存性はあまり調べられておらず不明である。また、チャンネル壁面以外にも実験設備に SUS が多く使用されているため、分光法による壁面の損耗評価は困難である。

今回は、以下の式(2.3)で表わされるガードリング電流率を用いてマグネティックシールディングの効果を評価した。

$$\text{ガードリング電流率} \equiv \frac{I_g}{I_d} \quad (2.3)$$

これは、チャンネル壁面に流れるガードリング電流を放電電流で割った値である。図 2.8 にアノードレイヤ型スラスタにおける電流の構成を示す。スパッタリングに寄与しない CEX イオンによりガードリング電流が増大することが報告されているため[31]、図 2.9 に示すように絶縁体 BN スプレーでコーティングを施した。

ここで、SUSの主成分である Fe, Cr, Ni と Xe のスパッタリング閾値を表 2.2 に示す[32]。また、表 2.3 に Xe の各エネルギーにおける Fe, Cr, Ni に対するスパッタリング率を示す[33]。ガードリング電流の由来となるイオンはシースで加速された後壁面に衝突するため、そのエネルギーは Xe と SUS の主成分のスパッタリング閾値より十分高いと考えられる。そのため、ガードリング電流の由来となるイオンはスパッタリングを引き起こすと考えられる。マグネティックシールディングはそのようなイオンの量を低減する技術であるので、ガー

ドリリング電流率によってマグネティックシールディングの効果を評価した.

また, ガードリング電流はイオンの損失になるため, これを低減させることは推進性能の向上にもつながると考えられる.

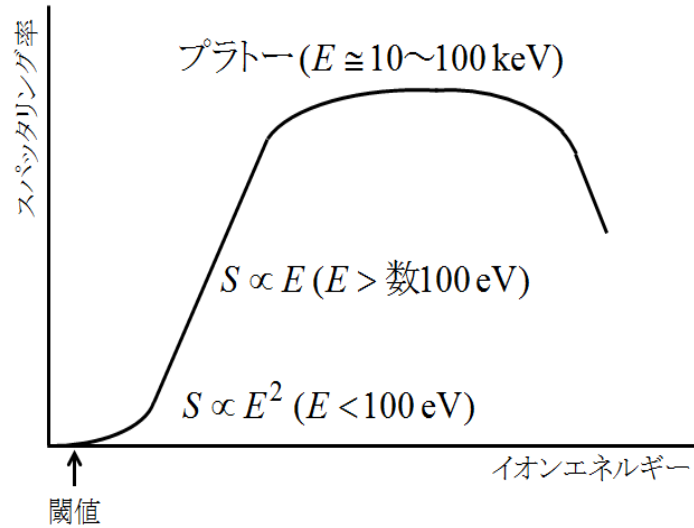


図 2.6 入射イオンエネルギーとスパッタリング率の関係

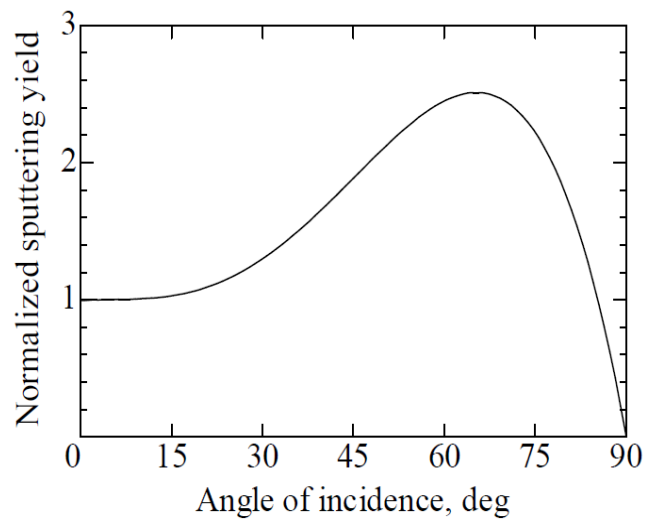


図 2.7 BN におけるスパッタリング率の入射角度依存性

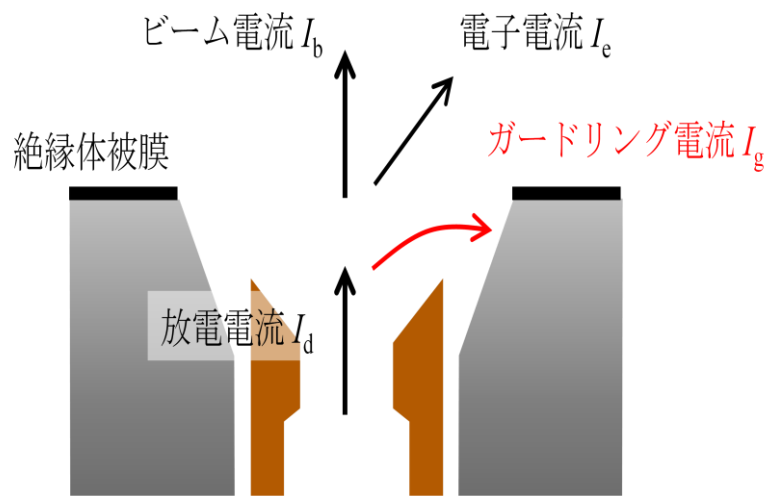


図 2.8 アノードレイヤ型スラスタにおける電流構成

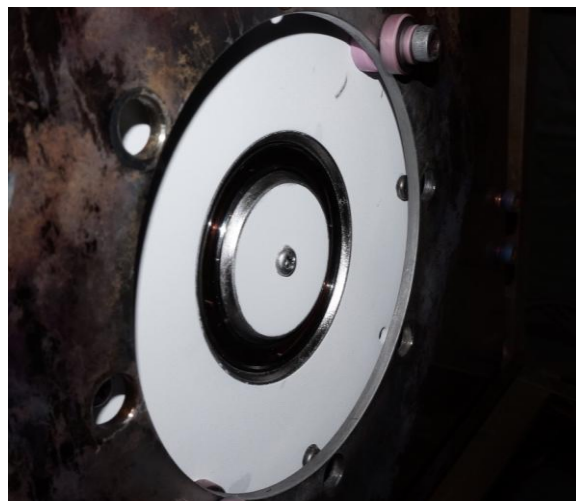


図 2.9 スラスタ前面を BN スプレーでコーティングした様子

表 2.2 Xe と Fe, Cr, Ni におけるスパッタリング閾値

	Fe	Cr	Ni
閾値	約 22 eV	約 20 eV	約 20 eV

表 2.3 各エネルギーにおける Xe と Fe, Cr, Ni に対するスパッタリング率

	Fe	Cr	Ni
100 eV	0.06	0.13	0.10
200 eV	0.29	0.44	0.37
300 eV	0.54	0.85	0.71
600 eV	1.20	1.90	1.48

2.4.2 プラズマ電位計測

2.2 節で述べたようにアノードレイヤ型スラスタにおいてはマグネティックシールドリングを搭載した際の電位形状が不明である．そこで，マグネティックシールドリングの効果を測る上でプラズマ電位分布も重要な指標となる．当研究ではプラズマ電位計測のためエミッシブプローブを用いた．その測定原理を以下に述べる．

一般的に浮動状態の金属プローブがプラズマ中にあると，電子の熱速度がイオンの熱速度よりはるかに大きいため，プローブの電位は電子を跳ね返すようプラズマ電位より低くなる．しかし，プローブを加熱して熱電子がプラズマに放出されるようになると，プローブに流入する電子を打ち消すようになり，浮動電位は見かけ上徐々にプラズマ電位に近づく．プローブの加熱が十分になされると，最終的には浮動電位がプラズマ電位とみなせるようになる．プローブの加熱による浮動電位の変化の様子を図 2.10 に示す[34]．浮動電位の測定は瞬間的に行えるため，十分加熱されたプローブを用いると瞬時にプラズマ電位を求めることができる．

プローブの加熱は一般的にフィラメントに電流を流すことによって行われ，フィラメントをそのままプローブとして用いる．

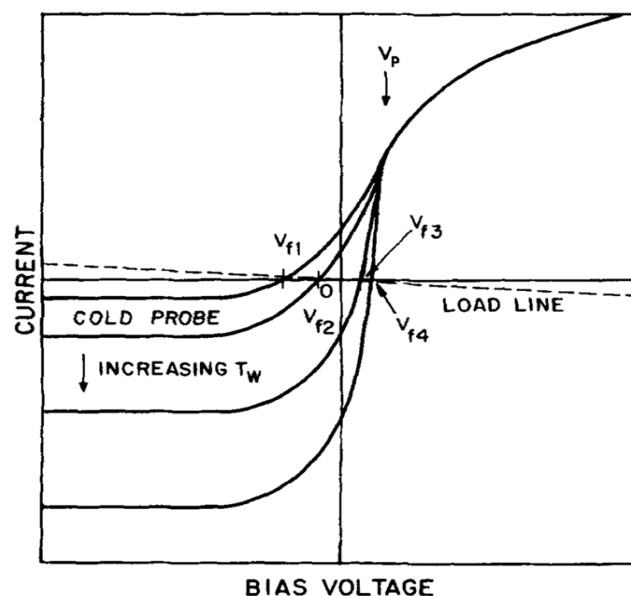


図 2.10 プローブの加熱による浮動電位の変化

第 3 章 実験装置

3.1 ホローカソード

ホールスラストの電子源として、ホローカソード(HC-252, Veeco 社)を使用した。ホローカソードは以下のような特徴を持つ[35][36]。

1. 消費電力が小さい。
2. 寿命が 1000 時間以上と長い。
3. フィラメント材料によるコンタミネーションがない。

そのため現在、電気推進に有効な電子源として数多く使われている。図 3.1 に使用した Veeco 社のカソードチップの写真を示す。図 3.2 に模式図を示す。HC-252 のシリンダー内には仕事関数の低い R-500(ダブルカーボネイト (Ba/Sr)CO₃)という薬品が内側に塗られたタンタル箔(インサート)が入っており、始動時にヒーター(7.50 A 程度)で加熱することで 1000℃まで達し熱電子を放出する。放出された熱電子は作動ガスと電離衝突し、プラズマを生成する。電子はキーパーによりカソード外部に引き出される。一方生成されたイオンは、カソードオリフィスのダブルシースにより外部に出られず、カソード電位のインサート内壁と衝突し、壁面で電子と再結合する。この際、衝突したイオンの運動エネルギーが熱エネルギーに変換される。電子放出が開始されるとヒーターに加え、イオン衝突による熱によっても壁面が加熱される。そのため、電子放出開始後は過加熱防止のためヒーター電流を 6 A に下げて作動させる。

ホローカソードは非常にデリケートなため、取り扱いには以下の注意が必要である。

- 2.7×10^{-2} Pa 以下で作動させる。理由は、CEX イオン衝突によるグリッドのスパッタリング損耗やスラストとの異常放電を防ぐためである。
- インサートの酸化防止のため、作動ガスには純度 99.999%以上の希ガスを用いる。大気解放は作動停止から 2 時間以上十分に冷却した後に行い、大気雰囲気中では Ar ガス (20 sccm)を流してインサートが大気と触れあわないようにする。また、配管にリークがないかどうかを確認し、酸素の混入を防ぐ。
- 作動時にカソードを高温に保つために、支持台との熱絶縁をとる。熱絶縁のために、ホトベールとマイカを挿入している。

本実験では、カソードの作動条件は一定として実験を行った。作動ガスとして純度

99.999%の Xe ガスを使用し，流量は 0.27 mg/s とし，キーパー電流は 0.2 A とした．

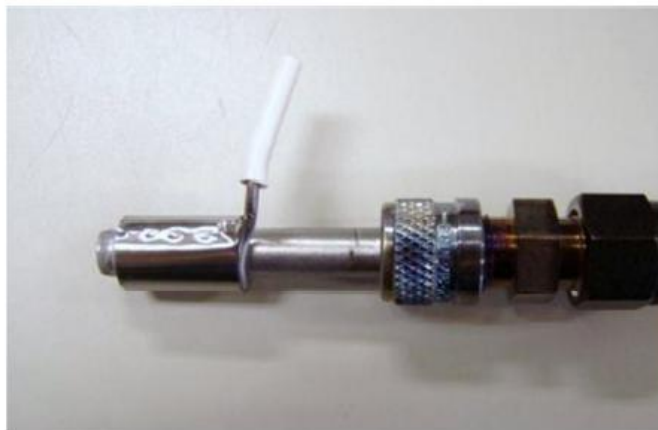


図 3.1 ホローカソードチップ

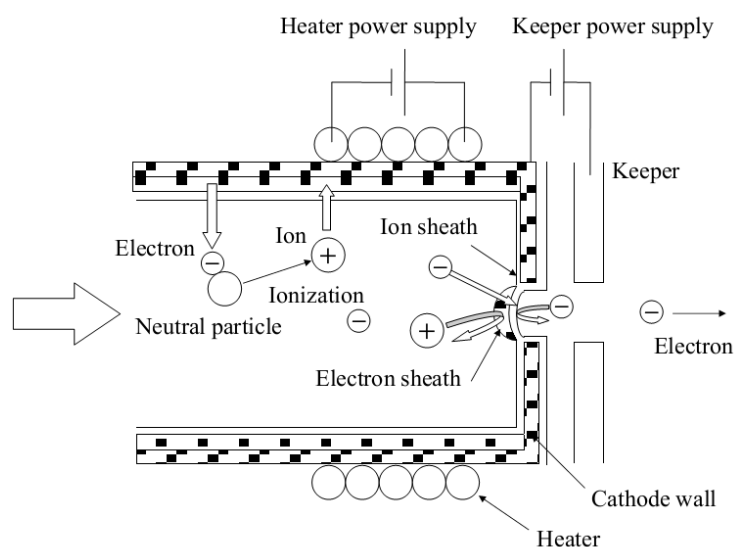


図 3.2 ホローカソードの模式図

3.2 真空系

本実験では，宇宙空間の真空環境を模擬するために，図 3.3 に示す直径 2.0 m，長さ 3.0 m のステンレス円筒型真空チャンバを使用した．真空排気には，油拡散ポンプ(ULVAC 社製 PFL-36，排気速度 37000 L/s)1 台を使用した．この油拡散ポンプの補助ポンプとして，メカニカルブースターポンプ(ULVAC 社製 PMB-060B，排気速度 1720 L/s)1 台を使用し，さらにこの補助ポンプとして，ロータリーポンプ(ULVAC 社製 PKS-070，排気速度 117 L/s)2

台を使用した。ポンプとバルブの制御にはチャンバ横に取り付けてある制御盤で行う。これらのポンプと制御盤の写真を図 3.4 に示す。

真空度の測定には、低真空度(大気圧 $\sim 1.0 \times 10^{-1}$ Pa)ではピラニ真空計(ULVAC 社製 GP-1S 測定子 WP-02)を使用し、これ以上の真空度では電離真空計(ULVAC 社製 GI-TL2 測定子 WI-T15)を使用した。電離真空計は、電離によって生成されたイオン電流を測定して圧力を求めるため、使用ガスによって感度較正を行う必要がある。主なガスの相対感度を表 3.1 に示す。本実験で使用した Xe ガスの相対感度値は 2.5 である。実験時のチャンバ内圧力は、スラスト Xe 流量 4.76 mg/s において 1.1×10^{-2} Pa 以下に保たれた。



図 3.3 真空チャンバ



(a) 油拡散ポンプ



(b) メカニカルブースターポンプ



(c) ロータリーポンプ



(d) 制御盤

図 3.4 真空ポンプおよび制御盤

表 3.1 電離真空計の相対感度

Species	He	Ne	Ar	Kr	Xe	N ₂	O ₂	H ₂	Air	CO ₂
Relative sensitivity	0.221	0.358	1.34	1.88	2.5	1	0.879	0.491	0.97	1.35

3.3 冷却系

ホールスラストの冷却のために循環冷却計を使用した. 図 3.5 のように実験室外に設置されている冷却塔から, 0.3 MPa の冷却水をスラストに供給している. 冷却水はフランジを通して真空チャンバ内に入りスラストを冷却した後, 再度チャンバ外へ排出される. 実験

室内の冷却水ポンプとバルブを図 3.6 に示す．このバルブの開閉により，冷却水の供給を制御している．



図 3.5 冷却塔



図 3.6 冷却水とバルブ

3.4 推進剤供給系

スラスタの推進剤およびカソードの作動ガスとして使用した Xe ガスはレギュレータにより 1~2 気圧に減圧された後，マスフローコントローラによって流量を制御され，1/4 インチ SUS 管を通してフランジからチャンバ内へ供給される．フランジからスラスタへは外径 6 mm，内径 4 mm のチューブを通して導入される．スラスタ本体の推進剤用マスフローコントローラには KOFLOC 社製 MODEL3200 を使用し，カソード推進剤用マスフローコントローラには同社製 MODEL3660 を使用した．これらの写真を図 3.7 に示し，仕様を表 3.2 に示す．これらのマスフローコントローラの制御には，図 3.8 の同社製リードアウトユニット MODEL CR-300 を使用した．マスフローコントローラの精度は，最大流量に対して 1% である．



図 3.7 マスフローコントローラー



図 3.8 マスフローコントローラ制御器

表 3.2 マスフローコントローラの仕様

	MODEL 3200	MODEL 3660
S/N	U07010500, U07010510	0607P05213N
Correction of CF	Corrected using xenon	
Valve type	Normally closed, solenoid, diaphragm sheet valve	Normally closed, solenoid, poppet valve
Max. flow rate	50 sccm	20 sccm
Control range	2 – 100%F.S.	2 – 100%F.S.
Accuracy	±1.0%F.S.	±1.0%F.S.
Linearity	±0.5%F.S.	
Repeatability	±0.2%F.S.	±0.5%F.S.
Allowable diff. pressure	49 – 294 kPa	49 – 294 kPa
Leakage rate	smaller than 1×10^{-8} Pa m ² /s (Permeation of He is not included.)	smaller than 1×10^{-8} Pa m ² /s (Permeation of He is not included.)

3.5 電源系

図 3.9 にスラスタの電気回路の概略を示す．安全のため真空チャンバはカソード電位となっている．放電電流の測定では，ノイズがほとんどなく周波数特性も 100 MHz 程度ある金属皮膜抵抗($R=0.5 \Omega$ ，定格入力電力 60 W)をスラスタのアノードと電源陽極の間に挿入し，その両端の電位差を差動プローブ(横河電機製 700925)により測定した．ホールスラスタの等価回路は 100Ω 程度の抵抗体であり，それに比べて差動プローブの内部インピーダンスは約 $3 M\Omega$ と非常に大きいため，スラスタの放電への影響はほとんどない．スラスタへの電力供給等は，フランジの電流導入端子を用いて行った．

本実験に使用した電源の定格を表 3.3 に示し，それらの写真を図 3.10 に示す．

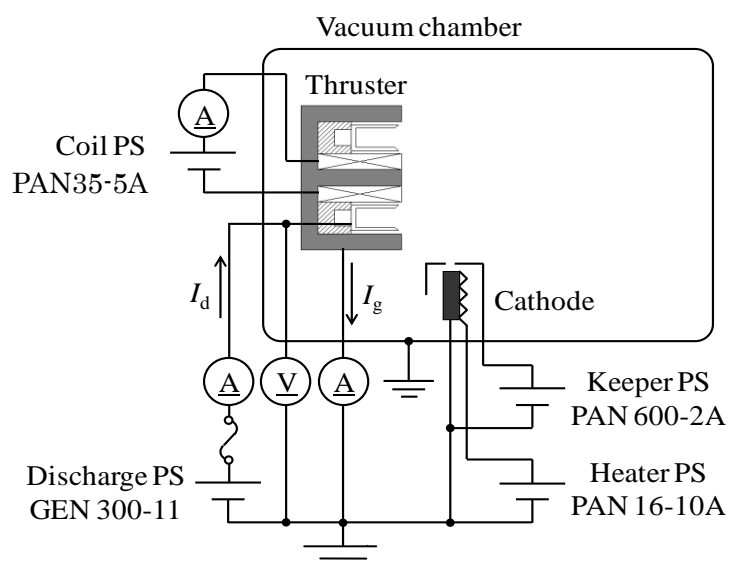


図 3.9 電気回路概略

表 3.3 電源定格

用途	型番	製造元	定格
主放電	GEN 300-11 (2 つを直列)	TDK Lambda	300 V – 11.0 A
インナーコイル	PAN35-5A	Kikusui	35 V – 5.0 A
アウターコイル	PAN35-5A	Kikusui	35 V – 5.0 A
トリムコイル	PAD70-15L	Kikusui	70 V – 15.0 A
カソードヒーター	PAN16-10A	Kikusui	16 V – 10.0 A
カソードキーパー	PAN600-2A	Kikusui	600 V – 2.0 A



(a) 主放電電源



(b) ヒーター電源



(c) コイル電源(左：インナー・アウター用，右：トリム用)



(d) カソードキープ電源

図 3.10 電源

3.6 デジタルオシロスコープ

図 3.11 に電流，電圧測定に使用した横河電機社製 PC ベース計測機 WE7000 を示す．またその仕様を表 3.4 に示す．WE7000 は計測ステーションである WE900 と計測モジュールから構成されており，WE900 を PC と USB で接続することで各計測モジュールが PC 制御可能となる．本実験では，ホールスラストの放電電流とガードリング電流の測定には，2ch, 20 MS/s デジタルモジュール WE7116 を使用した．このサンプリングレートは，ホールスラストの放電電流振動を測定するのに十分である[16]．また，プローブ測定の際は浮動電位の測定と軸方向トラバースのタイミング信号の取得に WE7116 を使用した．コイル電流，制御電流，放電電圧の測定には 4ch, 100 KS/s 絶縁デジタライザモジュール WE7272 を使用した．放電電流，ガードリング電流，放電電圧およびプローブ浮動電位測定には横河電機社製差動プローブ 700925 を使用した．その仕様を表 3.5 に示す．



図 3.11 オシロスコープ WE7000

表 3.4 オシロスコープ WE7000 の仕様

	WE7116	WE7272
最大サンプリングレート	20 MS/s	100 kS/s
入力チャンネル数	2 ch	4 ch
入力形式	非絶縁不平衡入力	フローティング不平衡入力
A/D 分解能	12 bit 相当 (符号を含む)	16 bit
入力インピーダンス	約 1 M Ω (約 28 pF)	約 1 M Ω
周波数特性 (フィルタ OFF 時)	-3 dB 減衰点 DC 結合時: DC ~ 8 MHz AC 結合時: 5 Hz ~ 8 MHz	-1.5 dB 減衰点 DC ~ 40 kHz
測定レンジ: 直流確度	± 100 mV ~ ± 50 V (1-2-5 step): $\pm 0.75\%$ of full scale	± 1 V: $\pm(0.04\%$ of rdg + 0.4 mV)
		± 2 V: $\pm(0.04\%$ of rdg + 0.6 mV)
		± 5 V: $\pm(0.04\%$ of rdg + 1.3 mV)
		± 10 V: $\pm(0.07\%$ of rdg + 6.5 mV)
		± 20 V: $\pm(0.07\%$ of rdg + 8.7 mV)
入力フィルタ 最大許容入力 電圧 最大コモンモード電圧	OFF, 500 kHz, 1 MHz ± 250 V (DC+AC peak) または 177 Vrms	± 35 V: $\pm(0.07\%$ of rdg + 15.5 mV)
		OFF, 500 Hz, 5 kHz ± 50 V (DC+AC peak)
		過電圧カテゴリ: CAT I, II ± 42.4 V (DC+AC peak)

表 3.5 差動プローブ仕様

差動プローブ 700925	
入力形式	平衡差動入力
周波数帯域	DC ~ 15 MHz (-3 dB)
入力減衰比	100 : 1, 10 : 1
入力インピーダンス	約 3 M Ω , 約 10 pF 並列
差動許容電圧	± 500 V (DC + AC peak) または 350 V _{rms} (100 : 1 時)
最大コモンモード入力電圧	± 500 V (DC + AC peak) または 350 V _{rms}
最大入力電圧	± 1000 V (DC + AC peak) または 700 V _{rms}
同相除去比 (CMRR)	-90 dB 以下 (60 Hz), -66 dB 以下 (20 kHz), -56 dB 以下 (200 kHz), -40 dB 以下 (1 MHz)
出力電圧	最大 ± 5 V (DC + AC peak)
出力インピーダンス	1 M Ω 入力システムで使用

3.7 スラストスタンド

推力測定には東京大学で開発された 2 重振り子式スラストスタンドを使用した[37]。この外観を図 3.12 に示す。内側振り子にはスラスト本体とセンサターゲットが、外側振り子には LED 変位センサ(OMRON 社製 Z4D-F04A, 分解能 5 μ m 以下, 応答速度 5 ms 以下)が設置されている。従来用いられていた単振り子式スラストスタンドでは、熱輻射による振り子腕の熱変形によって熱ドリフトが発生し、推力測定に影響を与えるという問題があった。しかし本実験で使用したスラストスタンドでは、ほぼ同位置に配置され等しい熱入力を受ける外側振り子を基準にして内側振り子の相対変位を測定し、この相対変位をなくすような、推力と等大逆向きの制御力を作用させている。制御力は内側振り子に搭載された 2 つの永久磁石とそれらに挟まれるチャンバ固定系の導線で構成される $\mathbf{J} \times \mathbf{B}$ 制御器により加えられている。推力は、この導線に流れる制御電流値をオシロスコープ WE7000 で読み取ることで算出した。推力値と制御電流値の変換係数は、2 g(± 5 mg)の精密分銅 4 つを使用した推力較正により求めた。推力値と制御電流値の関係を図 3.13 に示す。

次に制御系の概要を述べる。センサ変位信号をローパスフィルタ(カットオフ周波数

16 Hz, 減衰比 1)に通した後, LabVIEW で読み込む. そして LabVIEW から, 振り子間距離の変化に比例した電流を出力するよう, 定電流モードにした制御用電源(菊水電子社製, PAD250-4.5L)に外部制御信号を送る. J×B 制御器に流れる電流は金属皮膜抵抗(抵抗値 $0.1\ \Omega$, 定格電力 20 W)を使用して測定する.

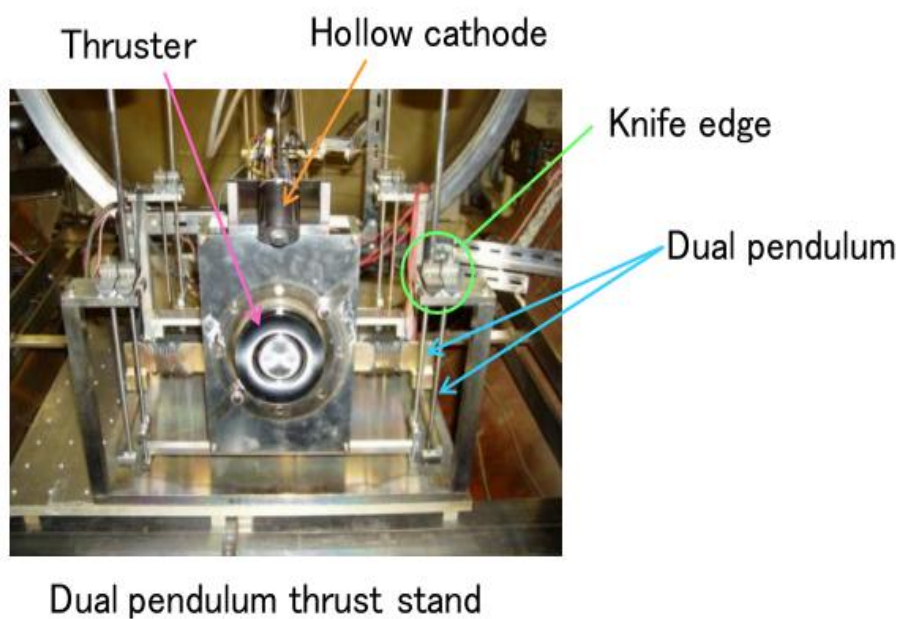


図 3.12 スラストスタンド外観

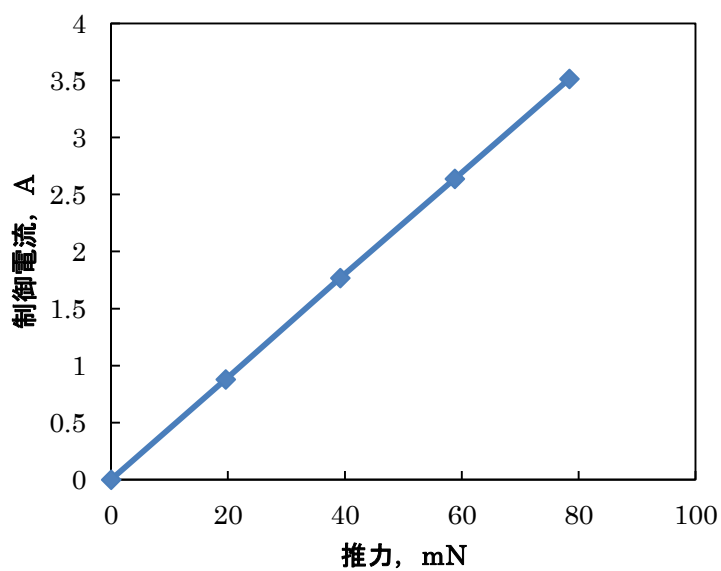


図 3.13 較正による推力値と制御電流値の関係

3.8 エミッシブプローブ

プラズマ電位はエミッシブプローブを用いて測定された。その断面図と写真を図 3.14 に示す。

測定の際は十分加熱したフィラメントをプラズマ中に挿入しなければならないが、その際フィラメントは非常に高温になるため、融解し断線しやすいという問題点がある。そのためフィラメントには融点が高く、仕事関数の低い 1%トリエイテッドタングステン(径 0.15 mm)を用いた。図 3.15 にトリエイテッドタングステンと純タングステンの温度に対するエミッション電流密度の違いを示す[38]。フィラメントには加熱のために電源 PAN16-10A を用いて 5.9 A の電流を流した。これは図 3.16 に示すように、加熱電流を増加させた際に 5.9 A で浮動電位が飽和することから決めた。ここで用いた電源は推力測定時にはカソードヒーター用に使用していたものであるため、エミッシブプローブ測定の際は、ヒーター電源に PAD70-15L(推力測定時のトリムコイル電源)を用いてトリムコイルを使用しなかった。軸方向空間分解能を良くするため絶縁管とフィラメント先端の距離は 0.5 mm とした。

絶縁管には長径 3.0 mm、短径 1.5 mm の 2 つ穴アルミナ楕円管を用いた。半径方向の測定範囲を最大化するため、絶縁管の短軸がスラスタのチャネル壁面と直交するようにプローブを設置した。この絶縁管の穴には、径 0.2 mm のタングステン線の束を通し、先端部のみにフィラメントを取り付けた。これにより、フィラメントが断線しても容易に交換することができる。フィラメントから 25 mm より下流は径 4.3 mm の SUS 管を取り付けた。これはプローブの剛性を高め振動を抑制するためである。SUS 管と絶縁管は東亜合成製耐熱性無機接着剤アロンセラミックによって固定した。

プローブの位置は 2 つのモーターによって制御した。プローブをホールスラスタのチャネルに挿入する際、プローブに流入する熱流束によるアルミナの融解を避けるため、チャネル内滞在時間は 100 ms 程度に抑える必要がある[39]。そのため軸方向の移動には加速度が大きく高速運転可能なオリエンタルモーター製リニアモーター UCM640-7C を用い、プローブのチャネル内滞在時間を約 70 ms に抑えた。その仕様を表 3.6 に示す。半径方向の移動にはオリエンタルモーター製ステッピングモーター PK545AW を用いた。

測定システムの全体図を図 3.17 に示す。軸方向モーターの制御は LabVIEW によって行っている。浮動電位のデータの取得は、各半径方向位置においてプローブを軸方向に掃引中に瞬間的に行った。浮動電位は加熱用電源の負電極とカソード間の電位差を差動プローブ 700925 によって測り、オシロスコープ WE7000 で読み取った。フィラメント中の電圧降下の影響を除くため、電源表示電圧の半分の値を測定値に加え浮動電位とした。また、軸方向位置算出のため、軸方向モーターのタイミング信号も併せて WE7000 で読み取った。

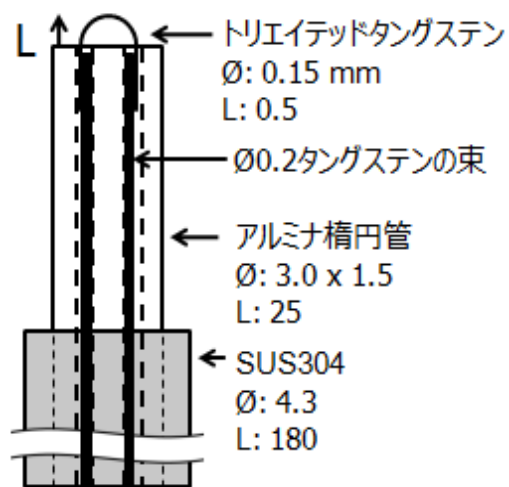


図 3.14 エミッシブプローブの断面図(左)と写真(右)

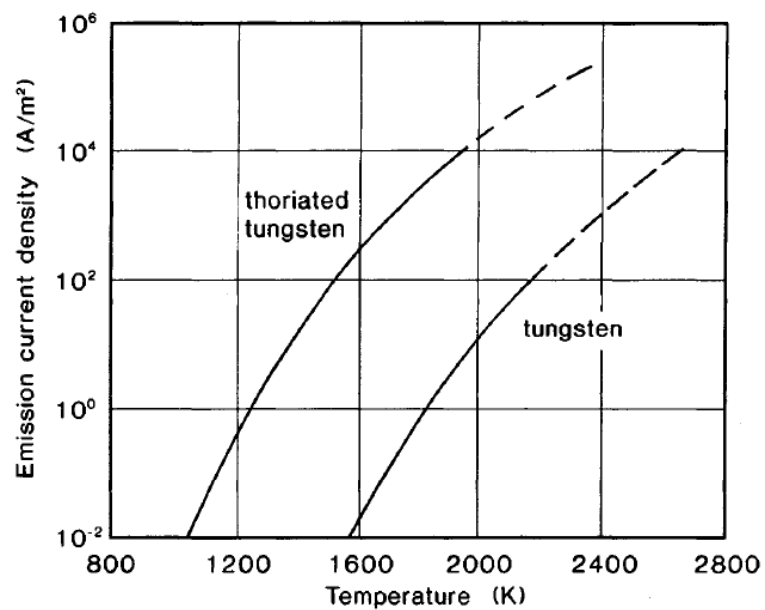


図 3.15 純タングステンとトリエイテッドタングステンにおける温度に対する
エミッション電流密度

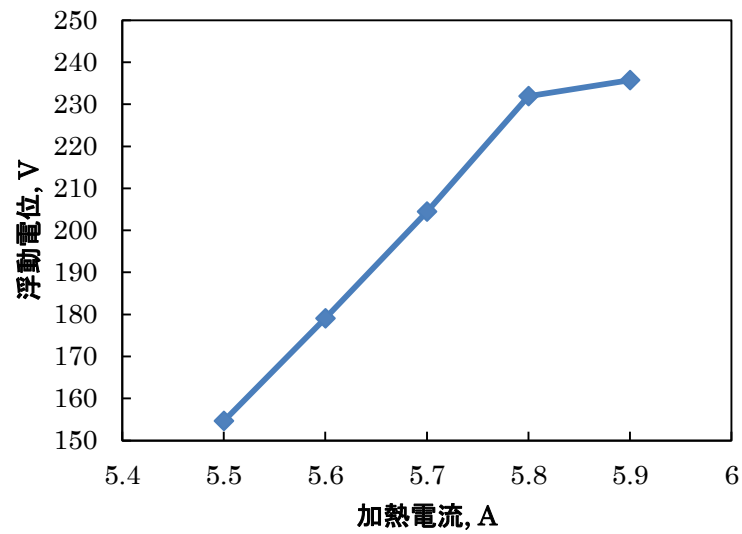


図 3.16 加熱電流と浮動電位の関係

表 3.6 リニアモーターUCM640-7C仕様

Stroke length	70 mm
Maximum speed (No Load)	600 mm/s
Repeatability accuracy	$\pm 10 \mu\text{m}$
Hysteresis error	$< 0.05 \text{ mm}$
Base step length	0.255 mm
Maximum resolution	$1.02 \mu\text{m}$

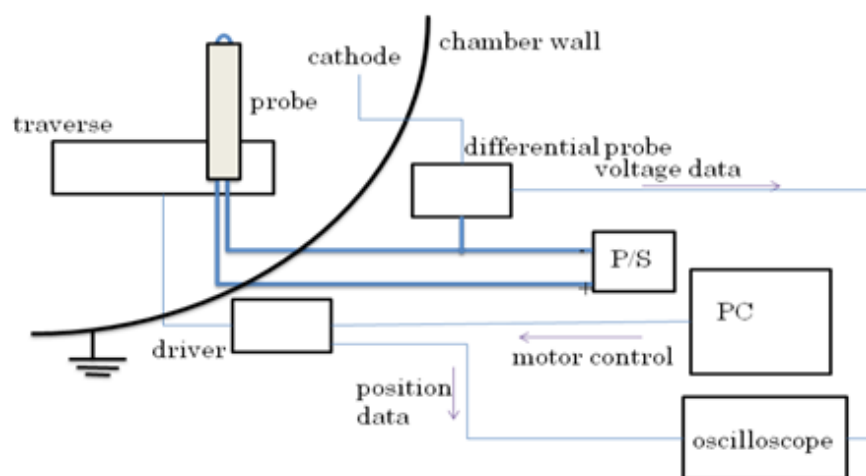


図 3.17 エミッシブプローブ測定システム全体図

第 4 章 結果と考察

4.1 磁場最適化

4.1.1 インナーコイル電流とアウターコイル電流の大小

まず，コイル電流値をインナー<アウター，インナー=アウター，インナー>アウターと変化させることによるガードリング電流率とアノード効率に対する影響を調べた．インナーコイル電流：アウターコイル電流が 2 A：5 A, 5 A：5 A, 5 A：2 A のときの FEMM によって計算された磁場形状を図 4.1 に，チャンネル中心軸における磁束密度の強度分布を図 4.2 に示す．インナーを弱めた時にはチャンネル中の磁力線の法線がインナーに傾き，アウターを弱めたときにはアウターに傾くような傾向がある．図 4.3 にこれらのコイル電流比のときのガードリング電流率とアノード効率の結果を示す．横軸はインナーコイル/アウターコイルの起磁力比で表わしている．スラスタの作動条件は放電電圧 200 V, 流量 2.72 mg/s である．この結果から，起磁力比を従来比 2 よりも低い時に最もガードリング電流率を低く抑えることができることが分かる．また，この時にアノード効率も最も高くなっている．図 4.2 から磁束密度のピークの位置はどのコイル電流比のときも変わらないことが分かるため，イオン化領域の下流方向へのシフトが起こればそのことがガードリング電流率低減につながったとは考えられない．朴氏がこれらのコイル電流比において，ファラデープローブを用いてビーム電流計測を行った．その計測によるビーム収束効率の結果を図 4.4 に示す[40]．この結果から，起磁力比が従来より低い時に最もビーム収束効率が高いことが分かる．つまりこの時に発散を最も小さく抑えることができおり，このことがガードリング電流率低減およびアノード効率向上に寄与していると考えられる．図 4.5 に発散が大きい時と小さい時のスラスタの作動の様子を示す．

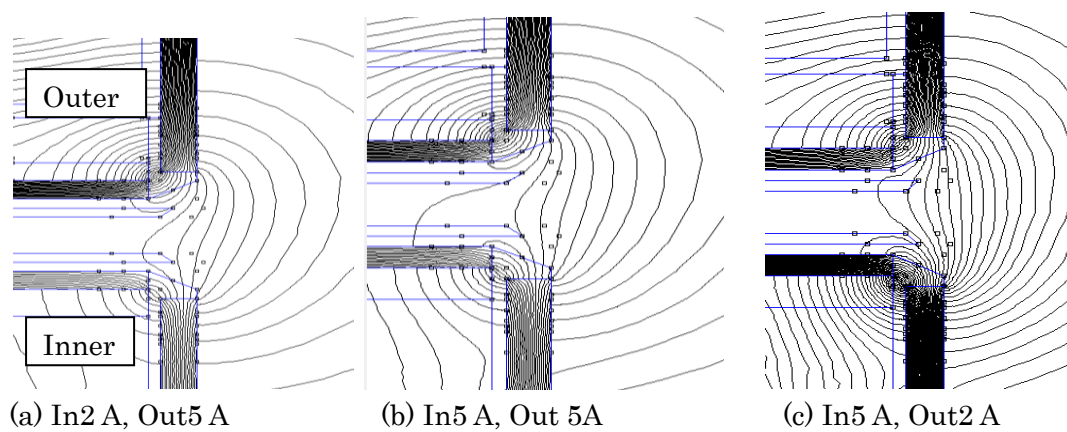


図 4.1 各コイル電流比における磁場形状

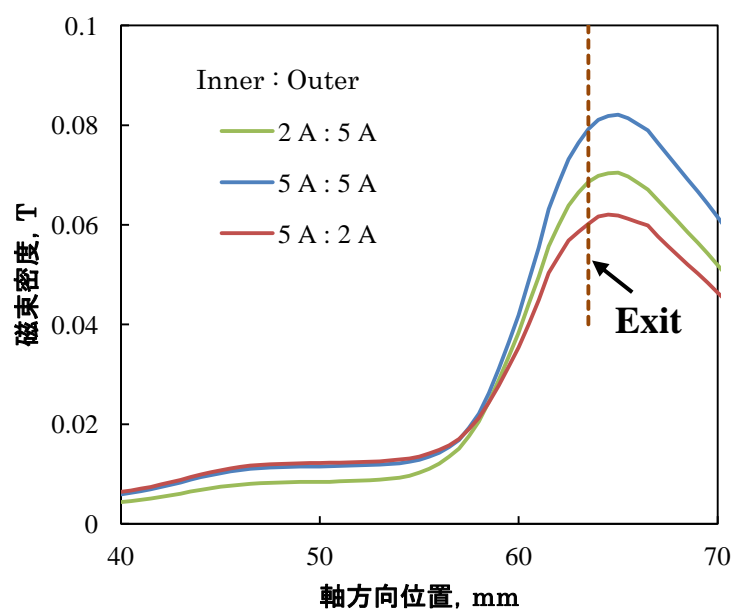


図 4.2 各コイル電流比における磁束密度軸方向分布

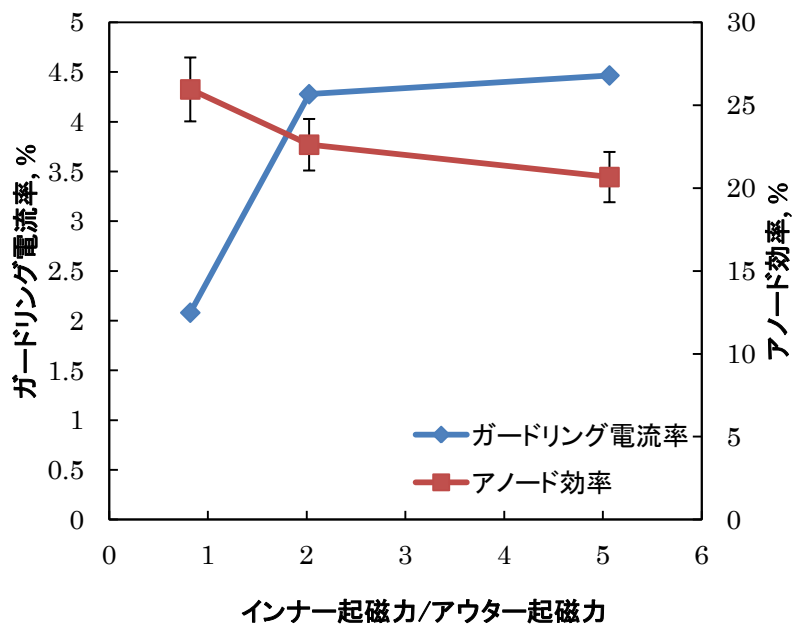


図 4.3 各コイル電流比におけるガードリング電流率とアノード効率
(放電電圧 200 V, 流量 2.72 mg/s)

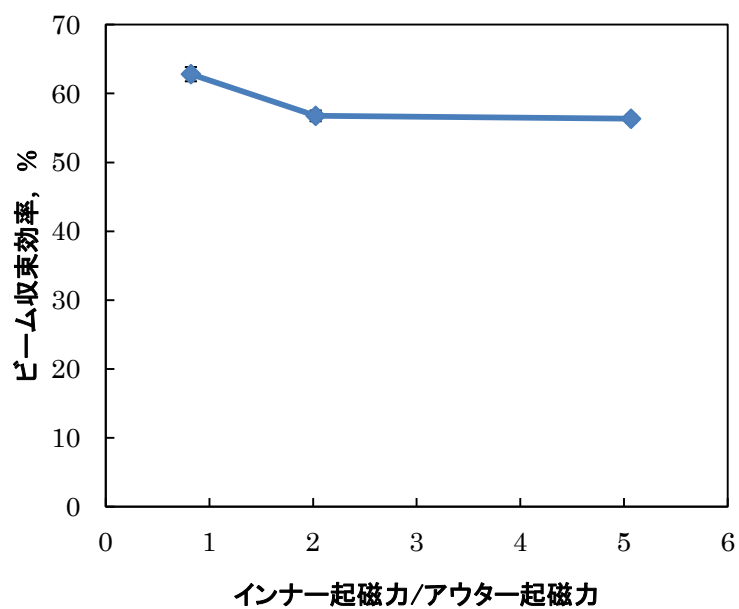
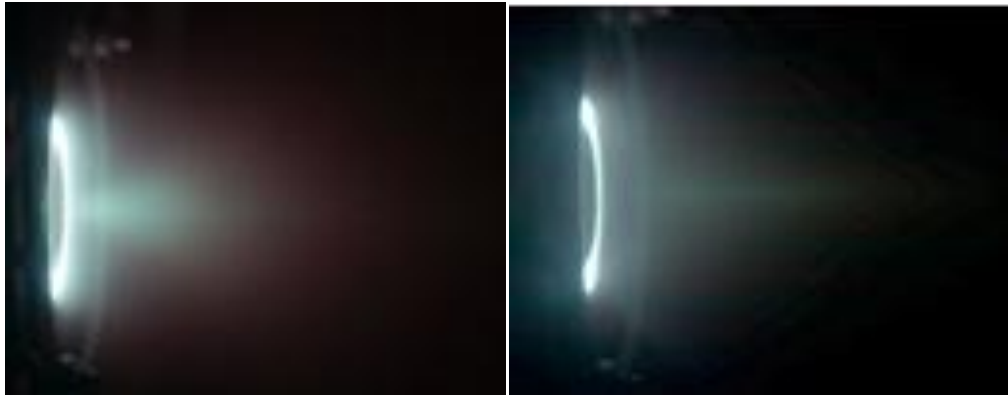


図 4.4 各コイル電流比におけるビーム収束効率
(放電電圧 200 V, 流量 2.72 mg/s)



(a) 発散大

(b) 発散小

図 4.5 発散が大きい時と小さい時のスラスト作動の様子

4.1.2 インナーコイル強度

前節からインナー/アウター起磁力比が従来より低いときの方がガードリング電流の観点からもアノード効率の観点からも良いことが分かった。そこで、次はアウターコイル電流を現状のシステムにおける最大値である 5 A に固定してインナーコイル電流の値を変化させた。その際のガードリング電流率とアノード効率の結果を図 4.6 に示す。作動条件は放電電圧 200 V 、流量 2.72 mg/s である。この結果からこの作動条件では起磁力比が 0.8 のときガードリング電流率を最も低減させ、アノード効率も向上させていることが分かる。また、起磁力比を 0.4 にまで下げた際には放電が不安定となったため、この点では電子を十分にトラップするのに十分な磁場強度が得られておらず、それがアノード効率低下の要因にもなっていると考えられる。つまり、電子を十分にトラップできる磁場強度が保たれる範囲においてビームの発散を抑えられる点で最適点をとっていると考えられる。

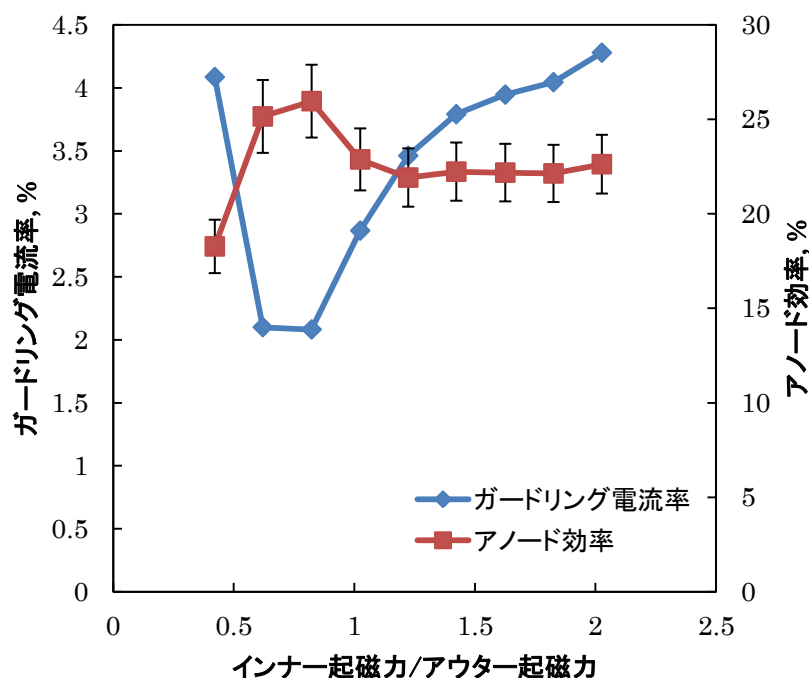


図 4.6 インナーコイル電流とガードリング電流率, アノード効率の関係
(放電電圧 200 V, 流量 2.72 mg/s)

4.1.3 トリムコイル

次に, トリムコイルによるガードリング電流率とアノード効率に対する影響を調べた. ここでは, トリムコイル電流がプラスの時にインナーからアウターに向かう磁力線を打ち消す向きとなる. トリムコイルを加えることによって, 磁場の自由度を増やしてよりマグネティックシールドニングに適した磁場形状を作ることを期待している. 図 4.7 にインナー 5 A, アウター 5 A に対して, 図 4.8 にはインナー 2 A, アウター 5 A に対してトリムコイルを加えたときの磁場形状の変化の様子を示す. 作動条件は放電電圧 200 V, 流量 2.72 mg/s である. 図 4.9 にインナー 5 A, アウター 5 A において, 図 4.10 にインナー 2 A, アウター 5 A においてトリムコイル電流を変化させた際のガードリング電流率とアノード効率の結果を示す. 図 4.9 が示すようにインナーとアウターの比が最適化されていないインナー 5 A, アウター 5 A の時にはトリムコイル起磁力/全起磁力が 0.08 でガードリング電流率を最も低減させ, アノード効率も向上させているが, その効果はインナーアウター比を最適化させた時と比べて微小である. さらに図 4.10 から, インナーアウター比を最適化させている際のトリムコイルによる有効な効果は見られなかった. 以上の結果から, トリムコイルは微小な磁場の調整にのみ有効であり, ガードリング電流率低減およびアノード効率向上に大きな有効な効果はなかったと言える.

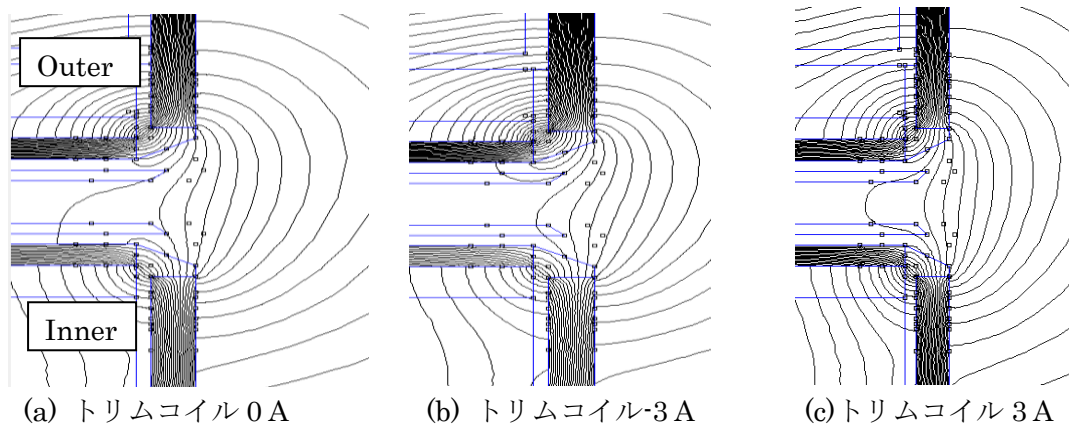


図 4.7 インナー5 A, アウター5 A のときのトリムコイルによる磁場形状の変化

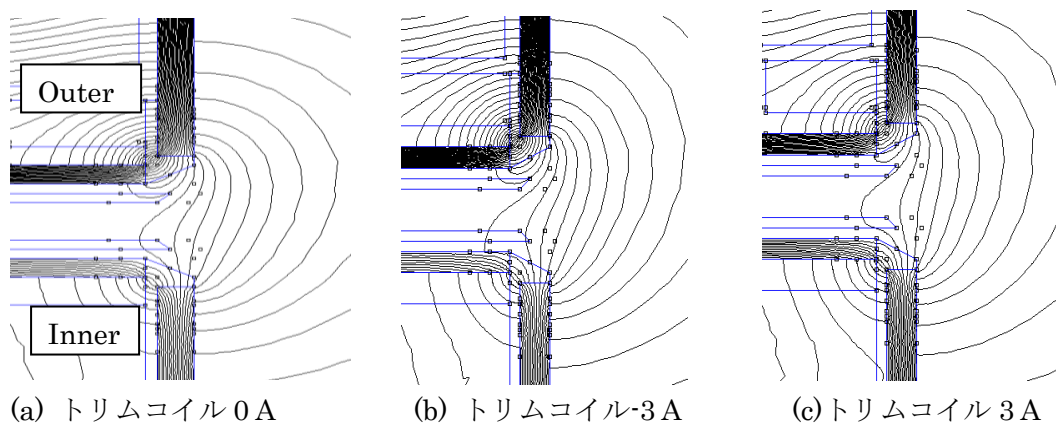


図 4.8 インナー2 A, アウター5 A のときのトリムコイルによる磁場形状の変化

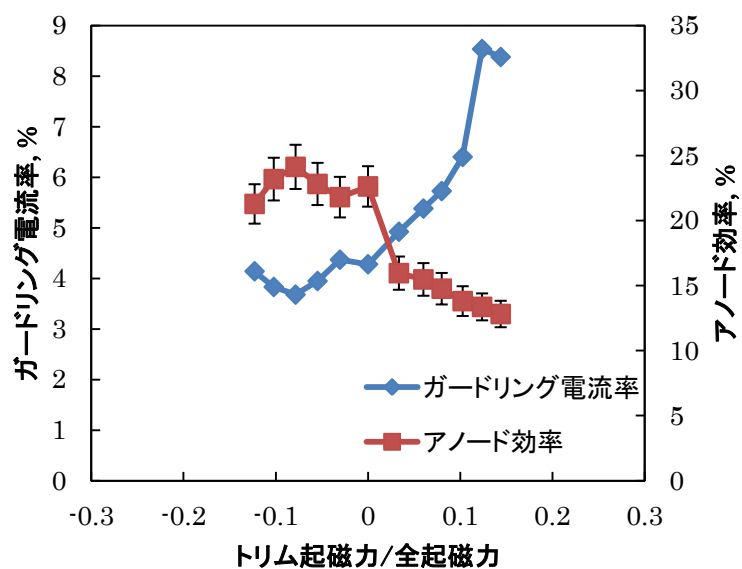


図 4.9 インナー5 A, アウター5 A のときのトリムコイル電流によるガードリング電流率とアノード効率に対する影響(放電電圧 200 V, 流量 2.72 mg/s)

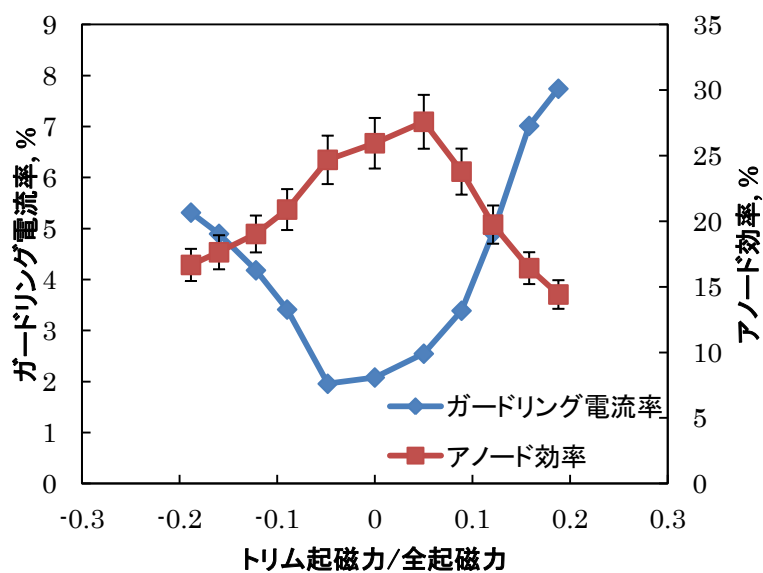


図 4.10 インナー2 A, アウター5 A のときのトリムコイル電流によるガードリング電流率とアノード効率に対する影響(放電電圧 200 V, 流量 2.72 mg/s)

4.2 マグネティックシールドイングの効果

4.2.1 ガードリング電流率

ここで、マグネティックシールドイングを搭載していないアノードレイヤ型ホールスラスタ UT-55 とガードリング電流率を比較する。UT-55 は東京大学で設計されたスラスタであり、そのチャンネル壁面形状および磁場形状を図 4.11 に示す。UT-55 は放電電圧 250 V、流量 2.73 mg/s においてガードリング電流率が 7.4%であった[41]。前節での結果から、マグネティックシールドイング搭載スラスタである UT-58 におけるガードリング電流率は、インナー/アウターの起磁力比が従来の時で 4.3%、コイル電流比を調整して起磁力比を最適化した際には 2.0%にまで低減している。マグネティックシールドイングを搭載し磁場を最適化することにより、ガードリング電流率はマグネティックシールドイング無しの時に比べて約 27%にまで低減された。

次に、放電電圧 200 V、流量 2.72 mg/s で作動させた UT-58 における、インナー、アウター、トリムコイル電流を様々に振った際のアノード効率とガードリング電流率の関係を図 4.12 に示す。この図から、ガードリング電流率低減がアノード効率向上につながっていることが分かる。これは、ガードリング電流低減つまりイオン損失低減そのものがアノード効率向上につながっているだけでなく、コイルバランスを調整することでビームの発散が抑えられ、そのことがガードリング電流率低減とアノード効率向上の 2 つに寄与していると考えられる。

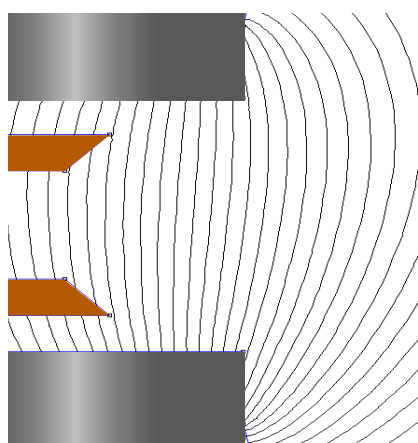


図 4.11 UT-55 におけるチャンネル壁面形状と磁場形状

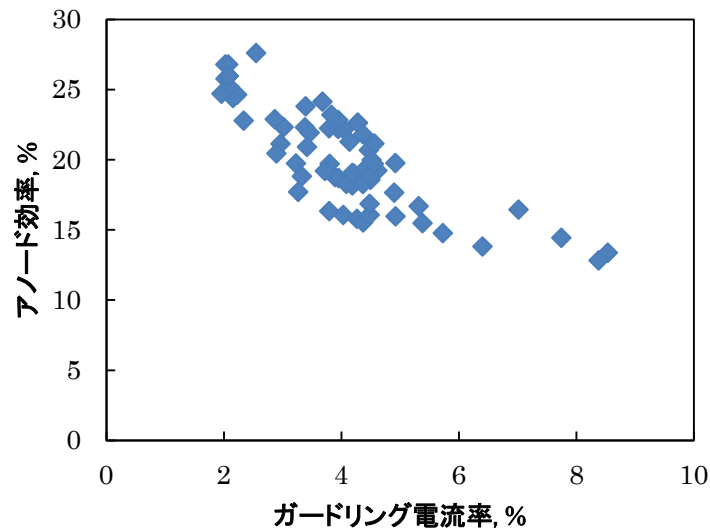


図 4.12 磁場を変化させた際のアノード効率とガードリング電流率の関係
(放電電圧 200 V, 流量 2.72 mg/s)

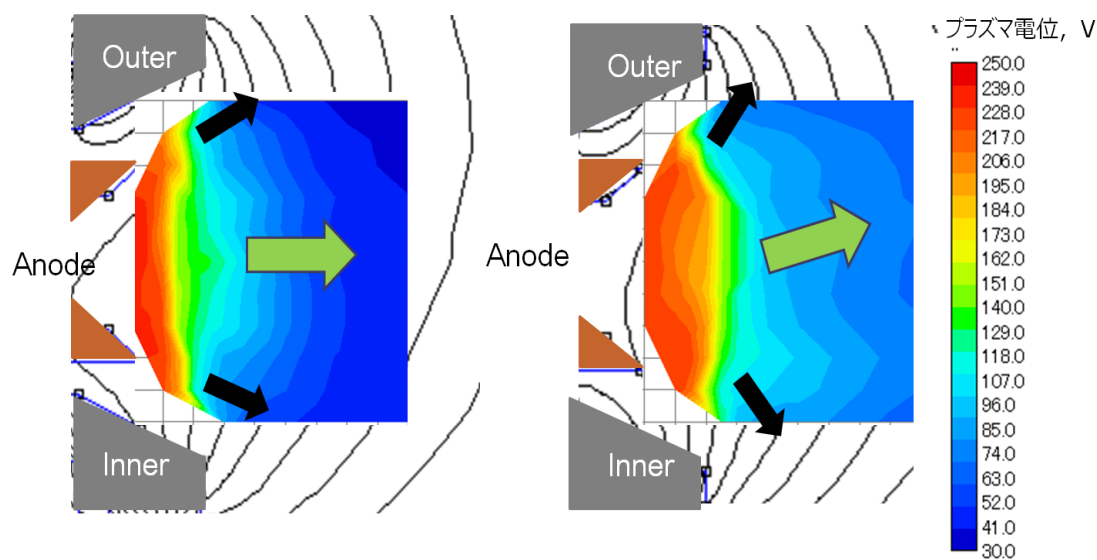
4.2.2 プラズマ電位分布

磁場形状を変化させた際プラズマ電位がどのように変化し、またマグネティックシールドイング搭載アノードレイヤ型スラスタの等電位線形状を解明するため、エミッシブプローブにより 2 次元プラズマ電位分布を計測した。半径方向に 1 mm 間隔でプローブを掃引し、軸方向に移動中の電位を瞬時測定した。測定条件は放電電圧 250 V, 流量 3.40 mg/s である。コイル電流は最適化されていない時はインナー 5 A, アウター 5 A とし、最適化された時はインナー 2.5 A, アウター 5 A である。

図 4.13(a)がインナー 5 A, アウター 5 A のときの測定結果, (b)がインナー 2.5 A, アウター 5 A の時の電位分布計測結果である。イオン化領域は伊藤氏によりアノードから下流 1~3 mm と推定されている[25]。イオン化領域より下流域において、磁場形状最適化前はイオンがアウター側へ発散するような電位分布が形成されているのに対し、最適化後はイオンが真っすぐ排出されるような電位分布が形成されていることが分かる。これは磁力線の法線の傾きの変化によるものである。また、磁場を最適化することで壁面近傍においても電位分布がビームの発散を抑制するような形状になっていることが分かる。このことがビーム発散を抑制し、壁面損耗の低減およびアノード効率の向上につながっていると考えられる。

図 4.14 にマグネティックシールドイングを搭載していないアノードレイヤ型ホールスラスタである D55 のプラズマ電位分布のシミュレーション結果を示す[42]。この図から、マグネティックシールドイング搭載無しの場合は等電位線が全体的に下流に凸になっており、

イオンが壁面に向かうようになっていることが分かる．それに対しマグネティックシールドディンク搭載スラストでは，図 4.13(b)から分かる通り，チャンネル内ではアノード幅程度の範囲において等電位線が直線的になっており，イオンが壁面に向かわずチャンネル外に真っすぐ加速されるようになっている．



(a) インナー5 A, アウター5 A

(b) インナー2.5 A, アウター5 A

図 4.13 プラズマ電位分布測定結果(放電電圧 250 V, 流量 3.40 mg/s)

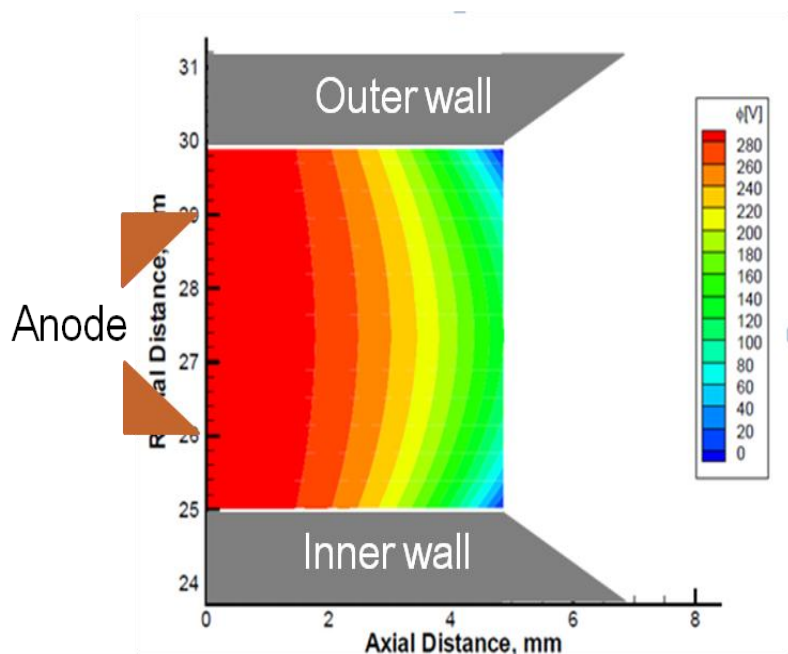


図 4.14 D55 におけるプラズマ電位分布の計算結果

4.3 高効率作動にむけて

ホールスラストにおいては一般に投入電力を上げると効率が向上する傾向があるため、高効率を狙って投入電力を上げて作動を行った。4.1 節でインナーよりアウターに大きなコイル電流を流した時に効率が良いことが分かっているため、アウターコイル電流を電源の最大値 5 A で固定し、インナーコイル電流を振ることで各投入電力の最適作動点を探った。図 4.15 に流量 3.40 mg/s において放電電圧を振った際のアノード効率の結果を示す。この結果から、放電電圧を 200 V から 250 V に上げた際はアノード効率の向上が見られたが、そこから 300 V に上げた際のアノード効率の向上は見られなかった。

そこで次は放電電圧を 250 V に固定し、流量を変えて作動を行った。その結果が図 4.16 である。インナー/アウター起磁力比が最適化されていない領域では、流量を上げるにつれアノード効率が向上していることが確認された。しかし、各流量でのアノード効率の最大値は 2.72 mg/s から 3.40 mg/s に増やしたときに向上したのみで、それ以上に流量を増やしたときのアノード効率の最大値はいずれも 35% 程度であった。また、流量を上げるにつれピークをとるインナーコイル電流の値が増大する傾向があることが分かり、流量を 3.40 mg/s から 4.08 mg/s に増やしたときはピークでのアノード効率の上昇幅が半減している。さらに流量 4.76 mg/s では特にピークが見られない。流量を上げるとピークをとるインナー/アウター起磁力比が上昇する原因としては次の 2 つの要因が考えられる。1 つ目は流量を増やし中性粒子密度と電子密度が増えたことにより、イオン化がチャンネル上流部でも起きるようになりイオン化領域が上流側に広がることである。これにより、下流部で完全に発散を抑えるようになっていないインナー/アウター起磁力比が大きい点でもアノード効率が向上したと考えられる。2 つ目は電子密度が増えたことにより電子を十分にトラップするのに必要な磁場強度が増大したことである。このことにより、起磁力比を小さくしていった際アノード効率がピークから降下する点もインナー/アウター起磁力比が大きい方へシフトしたと考えられる。

アノード効率向上のためには、電子をトラップするのに十分な磁場強度を保ちつつビーム発散を抑えるような磁場形状を形成しなければならないが、 4.08 mg/s および 4.76 mg/s といった高流量条件では十分な磁場強度を保てる点においてコイルのバランスが最適でなくなっている。コイルのバランスを最適な状態に保ちつつ磁場強度を増やすには、アウターコイルが発生する磁場を強める必要がある。現状のシステムではアウターコイルに流せる電流の最大値が 5 A であったがそれを増やす、もしくはコイルの巻き数を増やすことで、高流量条件においてアノード効率の向上がなされると予想される。

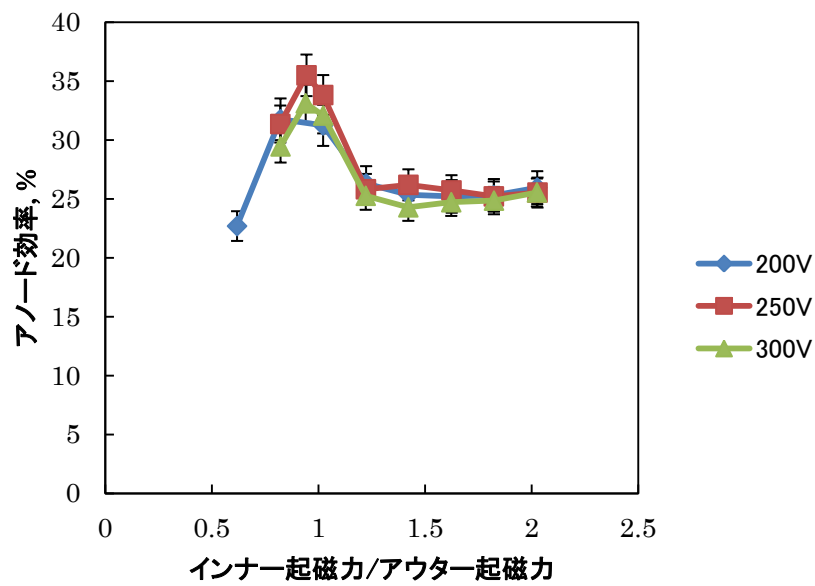


図 4.15 流量 3.40 mg/s において放電電圧を振った際のアノード効率

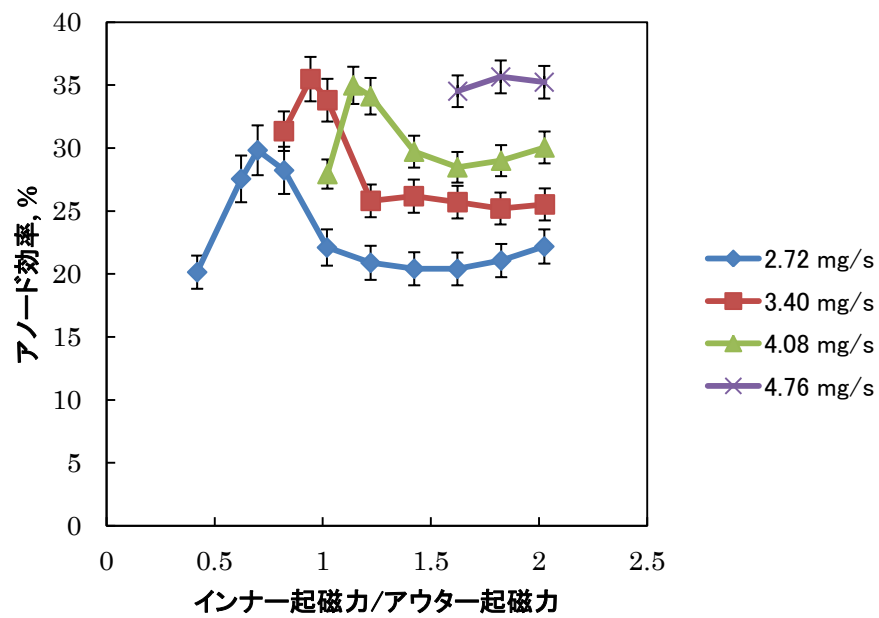


図 4.16 放電電圧 250 V において流量を変えた際のアノード効率

第 5 章 結論

まず、マグネティックシールディング搭載アノードレイヤ型ホールスラスタ UT-58 においてインナー、アウター、トリムの 3 つのコイル電流値を振ることで磁場形状を変化させ最適作動点を探った。その結果、以下のことが分かった。

1. アウターコイル電流をインナーコイル電流よりも強めた時にビームの発散を低減させ、その結果としてガードリング電流率を低減させ、アノード効率も向上させた。
2. トリムコイルは微小な磁場調整のみに有効であり、ガードリング電流率低減およびアノード効率向上には大きな有効な効果は見られなかった。

次に、磁場を最適化した作動点においてガードリング電流率と電位分布の観点からマグネティックシールディングの効果を検証し、以下のことが分かった。

1. マグネティックシールディングを搭載し磁場を最適化することで、ガードリング電流率はマグネティックシールディング搭載無しのスラスタの約 27%にまで低減された。
2. マグネティックシールディング搭載無しのものは等電位線形状が全体的に下流に凸であったが、マグネティックシールディングを搭載し磁場を最適化することでチャンネル内ではアノード幅程度の範囲内において等電位線が直線的になっており、イオンが壁面に向かわずにチャンネル外へ真っすぐ加速されている。

最後に、投入電力を上げた際にアノード効率が 35%程度で頭打ちになるという問題点があったが、アウターコイルの磁場を現状よりも強め、高流量作動させることでアノード効率の向上がなされると考えられる。

謝辞

本論文を執筆するにあたり、多くの方々にお世話になりました。ここにその感謝を述べさせていただきます。

まず、指導教員であります小紫公也教授には最大限の感謝を表します。学士課程より本研究室に配属されてからの3年間、大変熱心なご指導を賜りました。また他の企業、大学、研究機関との共同研究として、学外で実験させていただく機会も数多く頂きました。その機会を通じて、不測の事態にも最短時間で適切な対処をとるためには、ありとあらゆる事態を予め想定しておくことが非常に大切であると身を持って学びました。また、学外実験の他にも学会発表、電気推進及びプラズマの勉強会等、他の先生、研究者の方との交流の場を設けてくださり、研究を進める上で大変刺激になりました。研究以外のことでも学生のことを常に気かけ親身になって話してくださる小紫教授には、心より感謝申し上げます。改めて3年間、誠にありがとうございました。

同研究室の小泉宏之准教授には研究室輪講の場で、数多くの鋭いご指摘、アドバイスを頂きました。その知識の広さ、考えの深さに感銘を受け、視野を広げることができたと思っております。また、常日頃から研究室の明るく活気ある雰囲気を作ってくくださったことにも感謝しております。研究はもちろんのこと、何事にも精力的に取り組む小泉准教授のお近くで研究生活を送れたことを大変喜ばしく思います。ありがとうございました。

九州大学の山本直嗣准教授には、宇宙科学研究所での実験の際大変お世話になりました。ホールスラストの実験手法や物理に関して多くのことを教えていただき、知見を広めることができました。長期に及ぶ実験に精力的に取り組む姿には大変感銘を受けました。山本准教授と交流を持てたことを大変光栄に思います。ありがとうございました。

助教の Tony Schönherr さんにはホール輪講の場で数多くのアドバイスを頂きました。また、英語の発表スライド、原稿にも毎回コメントを頂きました。大いに感謝しています。

ホールスラスト研究班の川嶋嶺さん、朴俊輝さん、濱田悠嗣君、水川将暢君、Sainadh Chamarthi さんにも感謝しています。毎回のホール輪講の場で多くのアドバイスを頂いただけでなく、日頃のディスカッションから多くのことを考え、学ぶことができました。特に川嶋さんには、私が修士1年のころから大変お世話になりました。ホールスラストやプラズマの物理に関してだけでなく、研究の進め方、発表資料や原稿の書き方等、何も分かっていなかった私に親身に教えて頂きました。朴さんと濱田君には多くの実験のサポートをもらいました。長時間に及ぶ実験に何度も付き合ってもらったり、トラブルが発生した際は一緒に原因を真剣に考えて対処してもらったりと助けられることが多々ありました。宇宙研での実験も2人の知恵と頑張りがあったからこそ上手くいったと思っております。

昨年度卒業された鈴木淳さんにも感謝しています。ホールスラストの実験法をその基礎から丁寧に教えてくださり、ありがとうございました。

そして、同研究室の先輩、同期、後輩、卒業された先輩方には、研究室輪講におけるご指摘に限らず、様々な場面で研究を助けてもらいました。この研究に熱心に取り組み、かつ明るく活気ある研究室で研究生活を送れたことを大変嬉しく思います。おかげさまで研究の励みになり、充実した研究生活になりました。本当にありがとうございました。

最後に、今まで応援し支えてくださった両親、親戚、お世話になった全ての方々に感謝申し上げます。ありがとうございました。

2016 年 2 月

平野雄也

参考文献

- [1] 栗木恭一, 荒川義博: 電気推進ロケット入門, 東京大学出版, 2003.
- [2] Jahn, R. G.,: Physics of Electric Propulsion, McGraw-Hill, 1968.
- [3] Brown, D. L., Larson, C. W., and Beal, B. E.,: Methodology and Historical Perspective of a Hall Thruster Efficiency Analysis, AIAA Journal of Propulsion and Power, Vol. 25, No. 6, 2009, pp.1163-1177
- [4] Koppel, C. R., and Estublier, D.,: The SMART-1 Hall Effect Thruster Around the Moon: In Flight Experience, IEPC-2005-119, 2005.
- [5] Dumazert, P., et al.,: PPS-1350-G Qualification Status, AIAA-2004-3604, 2004.
- [6] Marchandise, F. R., et al.,: The PPS1350 Qualification Demonstration 7500h on Ground, About 5000h in Flight, IEPC-2005-209, 2005.
- [7] Ozaki, T., et al.,: Electric Propulsion Development Activity at MELCO, AIAA-2006-4321, 2006.
- [8] Zhurin, V. V., et al.,: Physics of Closed Drift Thrusters, Plasma Source Science and Technology, Vol. 8, No. 1, 1999, R1-R20.
- [9] Kim, V., et al.,: Electric Propulsion Activity in Russia, IEPC-2001-005, 2001.
- [10] Semenkin, A. V., et al.,: Operating Envelops of Thrusters with Anode Layer, IEPC-2001-013, 2001.
- [11] Yim, J. T., et al.,: An Evaluation of Sources of Erosion in Hall Thrusters, AIAA Paper 2005-3530, 2005.
- [12] Komurasaki, K. and Arakawa, Y.,: Two-Dimensional Numerical Model of Plasma Flow in a Hall Thruster, Journal of Propulsion and Power, Vol. 11, pp.1317-1323, 1996.
- [13] Saito, Y., et al.,: R&D Activities of Electric Propulsion in Japan, IEPC-2015-28, 2015.
- [14] Yamamoto, N., et al.,: Developments of Robust Anode-layer Intelligent Thruster for Japan IN-space propulsion system, IEPC-2013-244, 2013.
- [15] Nakles, M. R., et al.,: A 205 Hour Krypton Propellant Life Test of the SPT-100 Operating at 2 kW, IEPC-3013-347, 2013.
- [16] 山本直嗣: ホールスラスターの放電振動に関する研究, 博士論文, 東京大学, 2003.
- [17] Grys, K. D., et al.,: Demonstration of 10,400 Hours of Operation on a 4.5 kW Qualification Model Hall Thruster, AIAA-2010-6698, 2010.
- [18] Cho, S., et al.,: Multilayer Coating Method for Investigating Channel Wall Erosion in a Hall Thruster, Journal of Propulsion and Power, Vol. 29, No. 1, pp. 278-282,

2013.

- [19] Huang, W., and Gallimore, A. D.,: A Low-Cost Optical Approach to Evaluate the Life Time of Hall Thruster Discharge Channel, AIAA-2012-4035, 2012.
- [20] Cho, S., et al.,: Channel Wall Erosion Modeling of a SPT-Type Hall Thruster, Trans. JSASS Aerospace Tech. JAPAN, Vol. 10, pp. Pb25-Pb30, 2012.
- [21] Eagle, W. E., et al.,: The Erosion Prediction Impact on Current Hall Thruster Model Development, AIAA-2008-5087, 2008.
- [22] Yamamoto, N., et al.,: Dependence of Lifetime on Magnetic Field Configuration in a Hall Thruster, AIAA-2012-3791, 2012.
- [23] Mikellide, I. G., et al.,: Magnetic Shielding of the Channel Walls in a Hall Plasma Accelerator, Physics of Plasma, Vol. 18, 033501, 2011.
- [24] Mikellide, I. G., et al.,: Design of a Laboratory Hall thruster with Magnetically Shielded Channel Walls, Phase III Comparison of Theory with Experiment, AIAA-2012-3789, 2012.
- [25] Ito, Y.,: Electric Field Measurement in a Channel for the Realization of a Zero-Erosion Hall Thruster, Master thesis, University of Tokyo, 2014.
- [26] 鈴木淳 : アノードレイヤ型スラスタのマグネティックシールドイングによるイオン損失低減, 修士論文, 東京大学, 2015.
- [27] Fujita, D.,: Scaling Law for Argon Anode Layer Hall Thrusters, Master thesis, University of Tokyo, 2014.
- [28] Yamamoto, N., et al.,: Discharge Current Oscillation in Hall Thrusters, Journal of Propulsion and Power, Vol. 21, pp. 870-876, 2005.
- [29] Yamamoto, N., et al.,: Condition of Stable Operation in a Hall Thruster, IEPC Paper 2003-086, 2003.
- [30] 細田誠也 : ホールスラスタ高精度寿命評価法, 修士論文, 東京大学, 2012.
- [31] 細田誠也 : ホールスラスタ表面の絶縁体被膜によるイオン損失低減, 卒業論文, 東京大学, 2010.
- [32] Yamamura, Y., et al.,: Energy Dependence of Ion-Induced Sputtering Yields from Monoatomic Solids at Normal Incidence, Atomic Data and Nuclear Data Table 62, 149-253, 1996.
- [33] Maris A. Mantenieks., et al.,: Sputtering Threshold Energies of Heavy Ions, IEPC-97-187, 1999.
- [34] J. P. Sheehan., et al.,: Emissive probes, Plasma Sources Science and Technology, Vol. 20, 063001, 2011.
- [35] Gobel, D. M., et al.,: Lanthanum hexaboride hollow cathode for dense plasma production, Review of Scientific Instruments, 49 (1978), pp. 469-472.

- [36] Gobel, D. M., et al.,: High Current Lanthanum Hexaboride Hollow Cathode for 20-to-100 kW Class Hall Thrusters, AIAA-2012-4079, 48th JPC, Atlanta, July 2012.
- [37] N. Nagao., et al.,: Development of a 2D Dual Pendulum Thrust Stand for Hall Thrusters, Review of Scientific Instruments, Vol. 76, 115108, 2007.
- [38] Lassner, E, and Schubert, W.-D.,: Tungsten: Properties, Chemistry, Technology of the Element, Alloys, and Chemical Compounds, Springer, 1999.
- [39] Hass, J. M., et al.,: Development of a high-speed, reciprocating electrostatic probe system for Hall thruster interrogation, Review of Science Instruments, Vol. 71, 11, pp. 4131-4138, 2000.
- [40] 朴俊輝, 水川将暢, 平野雄也, 濱田悠嗣, 小紫公也, 小泉宏之, Tony Schönherr : アノードレイヤ型ホールスラスタ UT-58 のプルーム特性および効率研究, 平成 27 年度宇宙輸送シンポジウム, 神奈川, STEP-2015-035, 2016.
- [41] 福島靖博 : 周方向に非一様な推進剤供給によるホールスラスタの放電安定化, 修士論文, 東京大学, 2009.
- [42] Yongjum C.,: MODELING AN ANODE LAYER HALL THRUSTER AND ITS PLUME, Doctoral thesis, University of Michigan, 2008.

学会発表

1. 平野雄也, 鈴木淳, Schönherr Tony, 川嶋嶺, 赤木将平, 上本一樹, 小紫公也, 小泉宏之: アノードレイヤ型ホールスラストにおける Magnetic Shielding の効果の検証, 第 58 回宇宙科学技術連合講演会, 長崎, 1L10, 2014.
2. Yuya Hirano: Reduction of the Guard Erosion in a 2 kW Anode Layer Hall Thruster, 30th ISTS, Kobe, 2015-s-02-b, 2015.
3. Naoji Yamamoto, Kohei Takase, Akira Kakami, Yuya Hirano, Kimiya Komurasaki, Ryudo Tsukizaki, Satoshi Hosoda, Hitoshi Kuninaka, Shigeru Yokota, Thrust Performance in a 5 kW Class Anode Layer Type Hall Thruster, 34th IEPC & 30th ISTS, Kobe, IEPC-2015-459p/ISTS-2015-b-459p, 2015.
4. 朴俊輝, König Simon, 平野雄也, 小紫公也, Schönherr Tony, 小泉宏之, 小林鶴雄: ヨウ素供給アノードレイヤ型ホールスラスト UT-58 の作動検証, 第 59 回宇宙科学技術連合講演会, 鹿児島, 1C10, 2015.
5. 朴俊輝, 水川将暢, 平野雄也, 濱田悠嗣, 小紫公也, 小泉宏之, Tony Schönherr: アノードレイヤ型ホールスラスト UT-58 のプルーム特性および効率研究, 平成 27 年度宇宙輸送シンポジウム, 神奈川, STEP-2015-035, 2016.