

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 26 年度

修士論文

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

2015 年 2 月提出  
指導教員 小紫 公也 教授

47136063 鈴木 淳

# 目次

第1章 序論	1
1.1 電気推進	1
1.2 ホールスラスタ	2
1.2.1 作動原理	3
1.2.2 ホールスラスタの種類	5
1.2.3 効率の定義	7
1.3 ホールスラスタの寿命	9
1.4 研究目的	12
第2章 マグネティックシールドイング	13
2.1 マグネティックシールドイングの原理	13
2.2 マグネティックシールド型スラスタにおけるマグネティックシールドイング	17
2.3 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ドイング	22
2.4 アノードレイヤ型スラスタにおける壁面損耗評価	25
第3章 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	27
3.1 アノードレイヤ型スラスタ UT-58	27
3.2 マグネティックシールドイング搭載 UT-58	28
3.2.1 磁場形状	29
3.2.2 壁面形状	32
第4章 実験装置	35
4.1 ホローカソード	35
4.2 真空系	36
4.3 冷却系	39
4.4 推進剤供給系	40
4.5 測定系	42
4.5.1 電気回路	42
4.5.2 デジタルオシロスコープ	44
4.5.3 スラストスタンド	46
第5章 結果および考察	49
5.1 マグネティックシールドイング搭載 UT-58 のガードリング電流率および推進効率	49
5.1.1 ガードリング電流率	49
5.1.2 推進効率	52
5.2 ガードリング電流率の低減および推進効率の低下	54

5.3 トレードオフ .....	58
第6章 結論 .....	60
謝辞 .....	61
参考文献 .....	63
学術論文、学会発表 .....	66

# 目次

図 1.1	電気推進機の推力密度と比推力[1].....	2
図 1.2	作動中のホールスラスタ .....	3
図 1.3	ホールスラスタの作動原理.....	4
図 1.4	ホールスラスタの種類(左:SPT, 右:TAL) .....	6
図 1.5	SPT と TAL の電力に対する推進効率[13][14][15][16] .....	6
図 1.6	各電流の定義.....	9
図 1.7	BPT-4000 の耐久試験における壁面損耗[17] .....	10
図 1.8	BPT-4000 の 5800 時間作動後の壁面損耗の様子[17].....	11
図 1.9	TAL の壁面損耗の様子(左:作動前, 右:作動後)[18] .....	11
図 2.1	マグネティックシールドイングの原理[29] .....	14
図 2.2	イオンが加速される概念図.....	14
図 2.3	イオンの壁面スパッタリングの様子 .....	15
図 2.4	マグネティックシールドイングの磁場形状[29].....	15
図 2.5	磁場をチャンネル出口付近に集中させた時の数値シミュレーション結果[30] ...	16
図 2.6	マグネティックシールドイングを適用していない場合(左)と適用した場合(右)の 10 時間作動後のチャンネル壁の様子[32] .....	16
図 2.7	H6 ホールスラスタ[31].....	18
図 2.8	H6 スラスタのチャンネル壁面および磁気形状[31] .....	18
図 2.9	H6 スラスタの作動の様子(左:US, 右:MS) [31].....	19
図 2.10	マグネティックシールドイング搭載 H6 スラスタの作動前後の様子[31] ...	19
図 2.11	US,MS における壁面損耗率[31] .....	20
図 2.12	チャンネル中心軸上におけるプラズマ電位および電子温度分布[31].....	21
図 2.13	予想される放電室内部の電場およびガードリング電流率 .....	23
図 2.14	一般的なエネルギーとスパッタリング率[33] .....	23
図 2.15	入射角度に対するスパッタリング率(Xe と BN)[34].....	24
図 2.16	TAL における壁面損耗評価方法 .....	25
図 2.17	スラスタ前面を絶縁体 BN でコーティングした様子.....	26
図 3.1	UT-58 .....	27
図 3.2	UT-58 の断面図(gap=24).....	29
図 3.3	磁力線形状(gap=14) .....	30
図 3.4	磁力線形状(gap=19) .....	31

図 3.5	磁力線形状(gap=24)	31
図 3.6	各ポールピース間距離における中心軸上磁束密度分布(コイル電流 3 A)	32
図 3.7	gap=14 における壁面形状および磁場形状	33
図 3.8	gap=19 における壁面形状および磁場形状	33
図 3.9	gap=24 における壁面形状および磁場形状	34
図 4.1	ホローカソード	36
図 4.2	ホローカソードの模式図	36
図 4.3	真空チェンバー	38
図 4.4	真空ポンプおよび制御盤	38
図 4.5	冷却水タンク	39
図 4.6	冷却水ポンプおよびバルブ	39
図 4.7	マスフローコントローラー	40
図 4.8	マスフローコントローラー制御器	41
図 4.9	電力供給系	42
図 4.10	電源	43
図 4.11	オシロスコープ	44
図 4.12	スラストスタンド外観	47
図 4.13	スラストスタンド制御系	47
図 4.14	おもりに対する制御電流変化(推力キャリブレーション)	48
図 4.15	コイル電流に対する推力(コイルキャリブレーション)	48
図 5.1	各形状におけるガードリング電流率	50
図 5.2	各形状におけるガードリング電流率	50
図 5.3	各形状におけるガードリング電流	51
図 5.4	各形状におけるガードリング電流	51
図 5.5	UT-55 スラスタの壁面および磁場形状	52
図 5.6	各形状における推進効率	53
図 5.7	各形状における推進効率	53
図 5.8	gap=14 におけるプラズマ電位分布[41]	55
図 5.9	gap=24 におけるプラズマ電位分布[42]	55
図 5.10	gap=14 におけるチャンネル中心軸上電子温度分布[41]	56
図 5.11	gap=24 におけるチャンネル中心軸上電子温度分布[42]	56
図 5.12	gap=24 における推進剤流量に対する推進効率	57
図 5.13	gap=24 における推進剤流量に対するガードリング電流率	57
図 5.14	推進効率とガードリング電流率の関係	58
図 5.15	主な TAL 型スラスタとの比較	59

# 表目次

表 1.1	1 kW クラスの SPT および TAL の代表的なスラスト[13][14][15][16] .....	7
表 2.1	H6 スラストにおける US,MS の作動性能[31] .....	20
表 2.2	H6 スラストにおける US および MS 性能[31] .....	21
表 2.3	Xe ガスと Fe,Cr および Ni におけるスパッタリング閾値[35] .....	24
表 2.4	各エネルギーにおける Xe ガスと Fe,Cr,Ni および C に対するスパッタリング 率[36] .....	24
表 3.1	UT-58 の仕様 .....	28
表 3.2	壁面と磁力線の角度(壁面と平行時を 0 度) .....	34
表 4.1	マスフローコントローラーの使用 .....	41
表 4.2	電源定格 .....	44
表 4.3	計測器 WE7000 の仕様 .....	45
表 4.4	作動プローブ仕様 .....	45

## 主要記号一覧

$A$  : チャンネル断面積

$e$  : 電子素量

$F$  : 推力

$g$  : 重力加速度

$I_b$  : イオンビーム電流

$I_d$  : 放電電流

$I_e$  : 電子電流

$I_g$  : ガードリング電流

$I_{sp}$  : 比推力

$l$  : チャンネルの代表長さ

$m_i$  : イオン質量

$\dot{m}$  : 推進剤流量

$\dot{m}_i$  : イオン流量

$n_i$  : イオン数密度

$P$  : 電力

$V_d$  : 放電電圧

$v_{iz}$  : イオン速度の  $z$  方向成分

$\eta_a$  : 加速効率

$\eta_e$  : エネルギー効率

$\eta_i$  : 推進効率

$\eta_u$  : 推進剤利用効率

$r_e$  : 電子のラーマ半径

$r_i$  : イオンのラーマ半径

$\omega_e \tau_e$  : ホールパラメータ



# 第 1 章 序論

## 1.1 電気推進

2014 年 11 月、欧州宇宙機関 ESA により打ち上げられたロゼッタが史上初めて彗星への着陸に成功し、同年 12 月には、小惑星からのサンプルリターンを成功したはやぶさの後継機であるはやぶさ 2 が打ち上げられるなど、宇宙開発はますます盛んに行われてきている。また、はやぶさのような科学衛星だけではなく、通信や GPS など人々の生活に密接した役割を果たす様々な人工衛星も開発されており、日本では 2014 年 10 月には気象衛星であるひまわり 8 号が打ち上げられた。宇宙開発において重要なものが打ち上げコストの削減であり、この点において、はやぶさに使用されたイオンエンジンのような電気推進機が注目されている。また太陽発電衛星のような大型宇宙インフラの整備には、大型の電気推進機が必要不可欠だと考えられている。

化学エネルギーを利用して推力を発生させる化学推進とは違い、電気推進機は、太陽電池パネル等からの電気エネルギーを変換して推力を得る[1]。そのため、電気推進機は化学推進に比べ、推進剤をより高速に排出することができる。ロケットエンジンの性能を評価する指標として、比推力  $I_{sp}$  があり、その定義式を以下に示す。[1]

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

比推力は単位推進剤重量によって推進機が生み出すことのできるインパルスを表す。一般に、 $I_{sp}$  が増加するとバスシステム（推進系、構造系等、衛星の基本システム）重量が減少するため、高比推力な推進機ほど全衛星重量に占めるミッションシステム（観測機器等ミッション用システム）の割合が大きくなるのが可能となり、より高度なミッションを実現可能にする[2]。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。

電気推進には推力発生機構の違いにより、静電加速型、電熱加速型、電磁加速型に大別できる。静電加速型は電極に数千ボルトの高電圧を印加しプラズマ化させたイオンを加速することで推力を得る機構であり、イオンエンジンがその代表である。電熱加速型はアー

ク放電により推進剤ガスを熱し、その熱エネルギーを運動エネルギーに変換することで推力を生み出す。その代表例として、アークジェットやレジストジェットがある。電磁加速型は電流と磁場による電磁力を推進剤ガスの主加速力としており、MPD スラスタやPPT がその代表である。また、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に電気推進の比推力と推力密度の関係を示す[1]。本研究で取り扱うホールスラスタはすでに実用化されており、性能改善のため世界各国で日々研究が行われている。

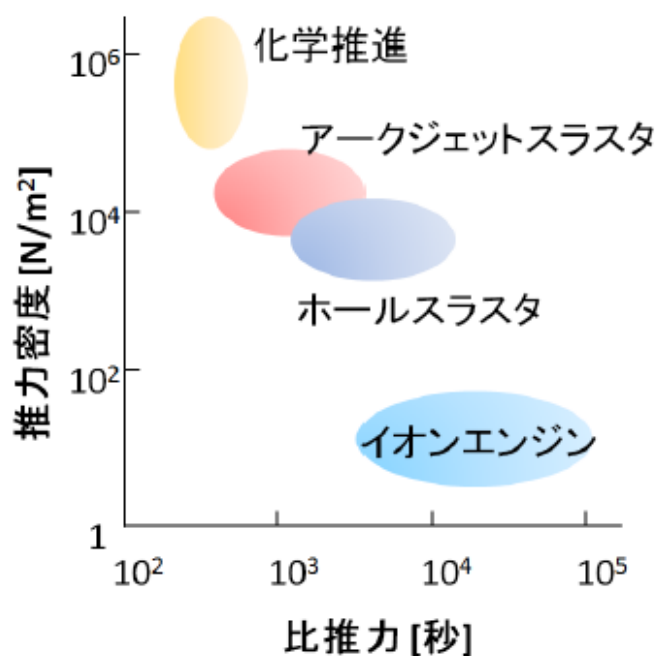


図 1.1 電気推進機の推力密度と比推力[1]

## 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持つ[3]。作動中の様子を図 1.2 に示す。

1. 1,000-3,000 s の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. イオンエンジンと比較して、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

ホールスラスタは推進剤に電離エネルギーの低い、希ガスを用いることが多い。特に、キ

セノンは電離エネルギーが低いため、最も一般的に推進剤として使用されている。

また、これらの利点から、ホールスラスタは人工衛星の LEO( Low Earth Orbit )から GEO( Geosynchronous Earth Orbit )等への軌道変更、人工衛星や宇宙大型建造物の南北制御などの地球近傍ミッションに適している。2003 年に打ち上げられ、2004 年に月に到着した ESA の月探査機 SMART-1[4]に使用されたホールスラスタ PPS-1350[5][6]、日本では MELCO によって、5 kW 級ホールスラスタの開発が進められている[8]。

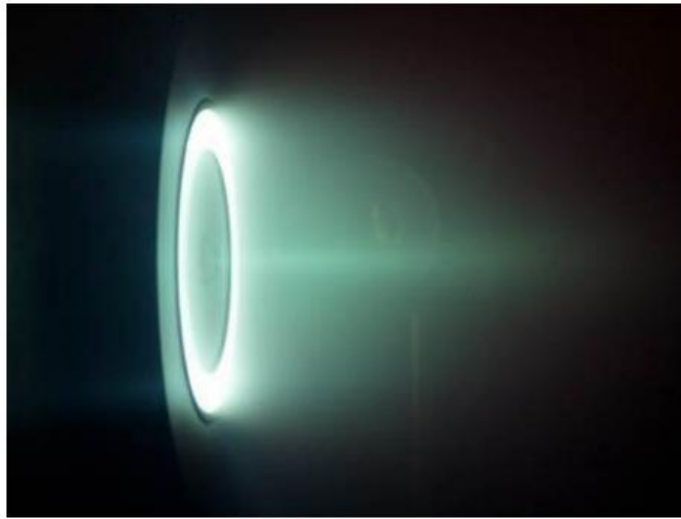


図 1.2 作動中のホールスラスタ

### 1.2.1 作動原理

ホールスラスタの作動原理を図 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、サイクロトロン運動を行う。この際、加速チャネル内の電場と磁場によって電子は周方向 ( $E \times B$  の向き) にドリフトする。それによって生じる電流はホール電流と呼ばれ、これがホールスラスタの名前の由来となっている。磁場によってトラップされた電子は、推進剤と衝突することで、軸方向の電場によって徐々にアノードへ向かって拡散する。電子温度が推進剤の電離エネルギー程度になると、推進剤は電離衝突を起こし、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、これ

が推進力となる。電離によって生成された電子は、カソードからチャンネル内へ供給された電子と同様、中性粒子と衝突を繰り返しながらアノードへ拡散する。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トの帯電を防止するという中和機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ンネルにおいて、以下の条件が満たす必要がある。

$$\omega_e \nu_{en} \gg 1 \quad (1.2)$$

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

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

式(1.2)は電子の拡散を抑え、磁場による効率的な閉じ込めを行うための条件を表しており、電子サイクロトロン周波数 $\omega_{ce}$ 、電子、中性粒子間の衝突周波数 $\nu_{en}$ の比はホールパラメータと呼ばれ、通常100程度の値となる。式(1.3)は電子のみが磁場によりトラップされ、イオンは磁場の影響を受けないための条件である。また、式(1.4)は中性粒子がチャンネル内で効率よく電離し、またイオンが再結合しないための条件である。

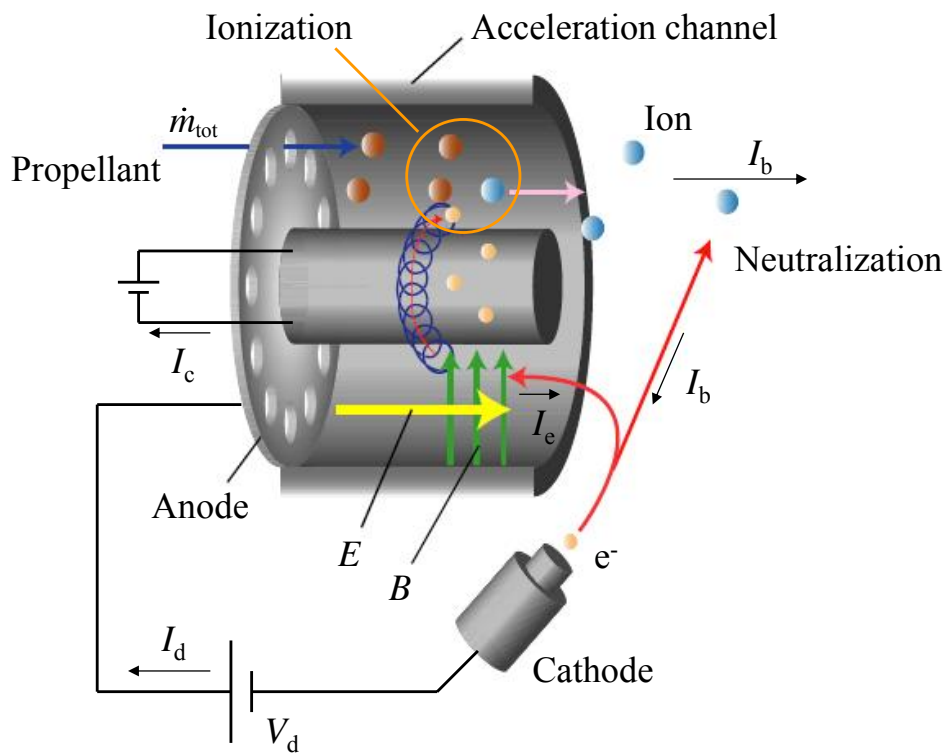


図 1.3 ホールスラスタの作動原理

## 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 (SPT 型) とアノードレイヤ型 (TAL 型) の 2 種類に分けられる [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[9]、アノードレイヤ型は Zharinov らによって開発が進められてきた[10]。これら 2 つの概略図を図 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あり、アノードレイヤ型に比べ安定した作動が可能である。絶縁体であるセラミック壁に電子やイオンが衝突することで低エネルギーの 2 次電子が放出されるため、チャンネル内の電子温度は低くなる。そのため、マグネティックレイヤ型はアノードレイヤ型に比べ、中性粒子を十分に電離させるためにチャンネル長が長くしてある。しかし、これは電子やイオンの壁面衝突を増加させる。スパッタリングによる壁面損耗の増大は、寿命を低下させてしまう[11]。

一方、アノードレイヤ型はチャンネル壁が導電性であり、このチャンネル壁はカソード電位を保つ。そのため、電子はほとんど壁面衝突を起こさない。よって、電子エネルギーの損失は少なくなり、チャンネル内の電子温度はマグネティックレイヤ型に比べて高い[12]。その結果として、中性粒子の電離平均自由行程が減少するため、チャンネル長は短くて良い。また、これはイオンの壁面衝突を減少させるため、一般的に寿命はマグネティックレイヤ型に比べて長い。以上のことから、アノードレイヤ型は同規模のマグネティックレイヤ型に比べ、高性能だと考えられている。一方、欠点としては放電電流振動が大きく、また安定な作動点がマグネティックレイヤ型よりも狭い。そのため、実用化には至っていない。図 1.5 に SPT 型と TAL 型の投入電力に対する推進効率を示す[13][14][15][16]。また、表 1.1 に 1 kW クラスの SPT 型および TAL 型の代表的なスラスタを示す。SPT 型における数字はそのスラスタのチャンネル外径、TAL 型における数字はそのスラスタの平均径を示すが、同推力を達成するために必要なスラスタのサイズが SPT 型に比べて、TAL 型の方が小さいことがわかる。よって、大出力化ホールスラスタとしては TAL 型が適していると考えられる。

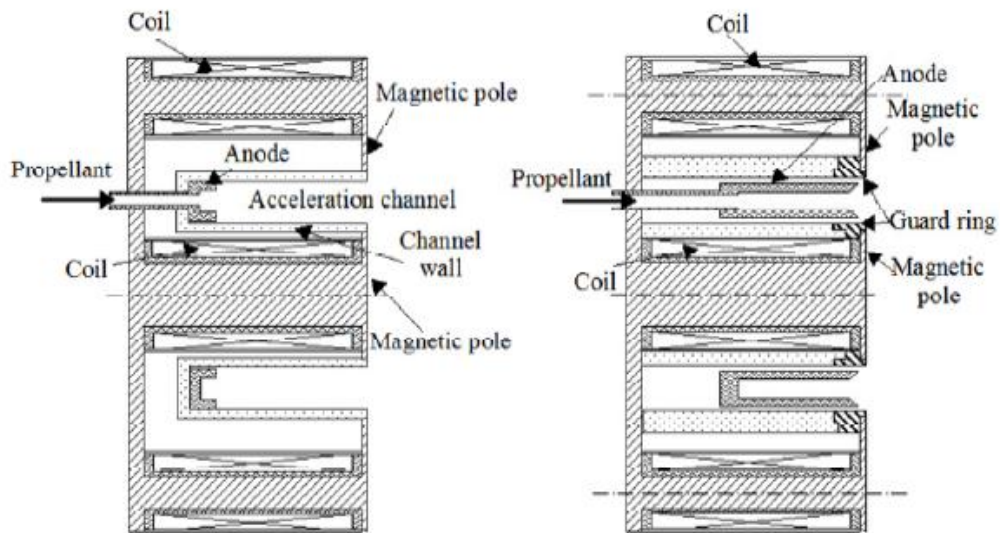


図 1.4 ホールスラスタの種類(左:SPT, 右:TAL)

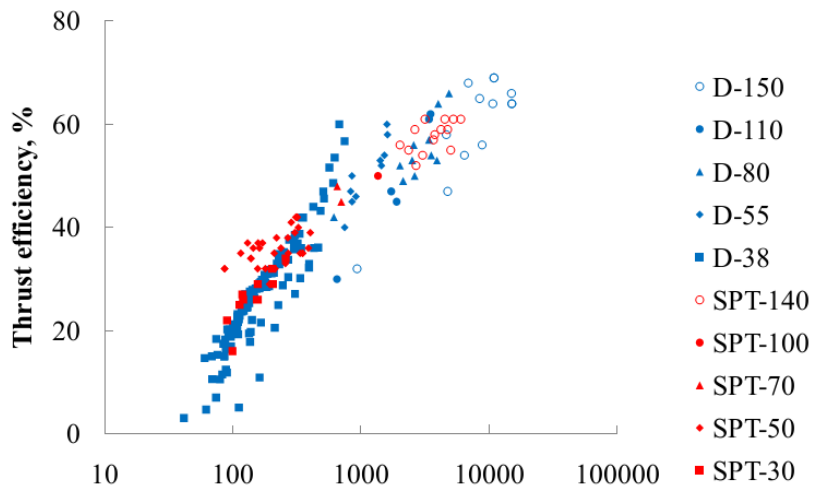


図 1.5 SPT と TAL の電力に対する推進効率[13][14][15][16]

表 1.1 1 kW クラスの SPT および TAL の代表的なスラスタ [13][14][15][16]

(数字は TAL は平均径、SPT では外形を表す)

	電力, kW	推力, mN
D-55 (TAL 型)	1.6	100
SPT-100 (SPT 型)	1.3	80

### 1.2.3 効率の定義

電気推進機において、アノード効率は比推力と同じくらい重要な性能評価パラメータである。アノード効率は投入エネルギーから推進剤運動エネルギーへの変換効率であり、以下の式で定義される。

$$\eta_A = \eta_u \cdot \eta_a \cdot \eta_e \quad (1.5)$$

また、このアノード効率は、推進剤利用効率、加速効率、エネルギー効率の積によって表すことができる。

推進剤利用効率は、電流相当の全推進剤流量のうち、推力に寄与するイオンビームの割合を示している。1 価電離のみを考えた場合、 $I_b = em_i / m_i$  となるので、 $\eta_u = \dot{m}_i / \dot{m}$  となる。推進剤の電離は、閾値 (12.13 eV) 以上のエネルギーを持った電子との衝突することによって起こる。そのため、チャンネル内の電子密度、電子温度が高いほど推進剤は電離しやすくなり、推進剤利用効率もよくなる。

加速効率は以下の式で表される。これは、放電電圧のうち、推力に寄与するイオンビーム電流の割合を表している。

$$\eta_a \equiv \frac{I_b}{I_d} \quad (1.6)$$

ここで、アノードレイヤ型スラスタの場合、図 1.6 のように放電電流は以下 3 つの電流に分解することができる。

$$I_d = I_b + I_g + I_e \quad (1.7)$$

この 3 つの電流のうち、ガードリング電流および電子電流は推力に寄与しない。イオンビ

ーム電流は推力に寄与するイオンビームとして、チャンネル外に引き出される電流である。ガードリング電流はガードリング壁面に衝突し、電子を受け取り中性粒子に戻るイオンに起因する電流である。これはイオンが壁面に衝突することによって生じる電流であり、また壁面損耗低減の観点からも低減させることが望ましい。最後に、電子電流はカソードによってチャンネル外から供給される電流であり、磁場による電子の閉じ込め度によって大きく決まる値である。

また、アノード効率は以下の式を用いて表すことができる。

$$\eta_e = \frac{eF^2}{2m_i I_b^2 V_d} \quad (1.8)$$

ここで、 $F = m_i n_i \langle v_{iz}^2 \rangle S$ 、 $I_b = en_i \langle v_{iz} \rangle S$  と表せるから、アノード効率は以下の式として表せる。

$$\eta_e = \frac{\frac{1}{2} m_i \langle v_{iz}^2 \rangle \langle v_{iz}^2 \rangle}{eV_d \langle v_{iz} \rangle^2} \quad (1.9)$$

ここで、 $\langle v_{iz}^2 \rangle = \langle v_{iz} \rangle^2$  の場合を考えると、これは放電電圧によってイオンが得るエネルギーに対する、実際に引き出されたイオンが持つ軸方向の平均運動エネルギーの割合を示す[6]。

ここで、ブルームの発散による損失を考えた場合、アノード効率は以下の式で書くことができる。

$$\eta_t = \eta_u \cdot \eta_a \cdot \eta_e \cdot \gamma_\theta^2 \quad (1.10)$$

ここで、 $\gamma_\theta$  はブルームの発散によるベクトルロスであり、以下の式で評価することができる。

$$\gamma_\theta = \frac{\langle v_{iz} \cos \theta \rangle}{\langle v_{iz} \rangle} \quad (1.11)$$

これにより、ブルームの発散によるエネルギー効率への影響を含んだ式となる。



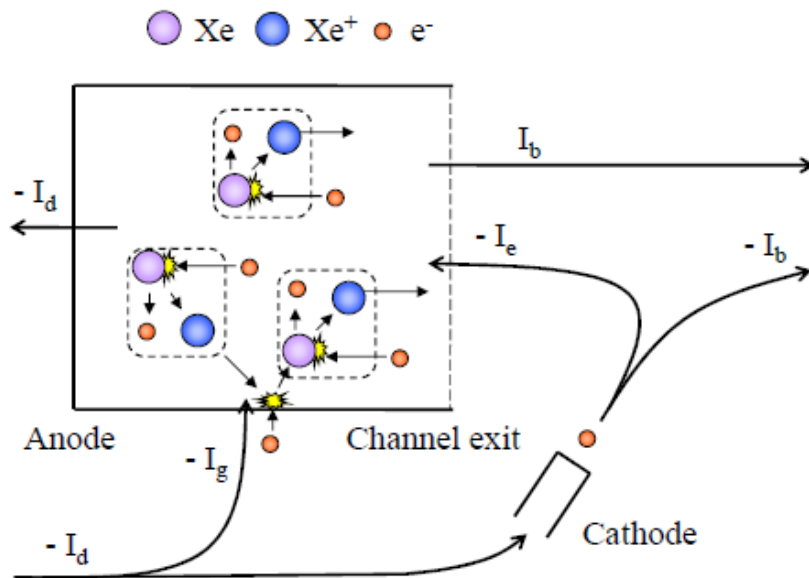


図 1.6 各電流の定義

### 1.3 ホールスラスタの寿命

ホールスラスタにおいて、推進性能と並び重要な性能評価の1つとして、寿命性能が考えられる。これは、推力が小さいため、長時間のオペレーションが必要になるからである。例えば、4.5 kW の商用ホールスラスタ BPT-4000 を使用し、1 t の宇宙機を低軌道から静止軌道へ輸送する場合を考えると、オペレーション時間は、約 13,000 h を必要である。しかし、BPT-4000 の耐久試験の結果を図 1.7 に示すが、その結果より、寿命は約 5,800 時間である[17]。図 1.8 に BPT-4000 の 5800 時間作動後のチャンネル壁損耗の様子を示すが、厚みが 10 mm 程度ある壁面も 5800 時間の作動により、完全に損耗してしまっている。チャンネル壁が全て損耗すると、電気回路や磁気回路が損傷し、推進機が作動不能に陥ってしまう。また図 1.9 に TAL の壁面損耗の様子を示す[18]。

ホールスラスタの寿命は、イオンのチャンネル壁面へのスパッタリングによって制限されている。イオンのスパッタリングは、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、チャンネル壁面の表面の原子や分子が削れる現象である。ホールスラスタのチャンネル壁面損耗は、電場によってチャンネル方向へ加速されたイオンによって、引き起こされる。

ホールスラスタは長時間のオペレーションが必要になるため、スタの寿命評価に関する研究が数多く行われてきた。例えば、耐久試験が地上の実験施設にて行われている

[18][19][20][21][22]。また、長時間作動を必要としない、即座の壁面損耗測定なども行われている[23][24]。これに加えて、実験結果および数値計算からイオンスパッタリングのモデル化が行われている[25][26][27]。

最近になって、耐久試験における壁面損耗測定の結果から、無損耗なスラスタ BPT-4000 (4.5 kW 級の SPT 型)が報告された[21]。これは、特殊な壁面形状と磁場形状がチャンネル壁面を保護するように働くことで、無損耗を実現している[28]。この仕組みは、実験および数値計算の双方から検証されており[29]、マグネティックシールドイングと呼ばれている。

マグネティックシールドイングは SPT 型には搭載され、無損耗を実現しているが、TAL 型に応用されたことはない。TAL 型の壁面電位は SPT 型異なり、カソード電位を保っているため、TAL 型においてもマグネティックシールドイングで期待されるような効果があるかどうか、不明である。もしマグネティックシールドイングを TAL 型に応用できれば、推進性能と寿命性能を向上させることが可能である。

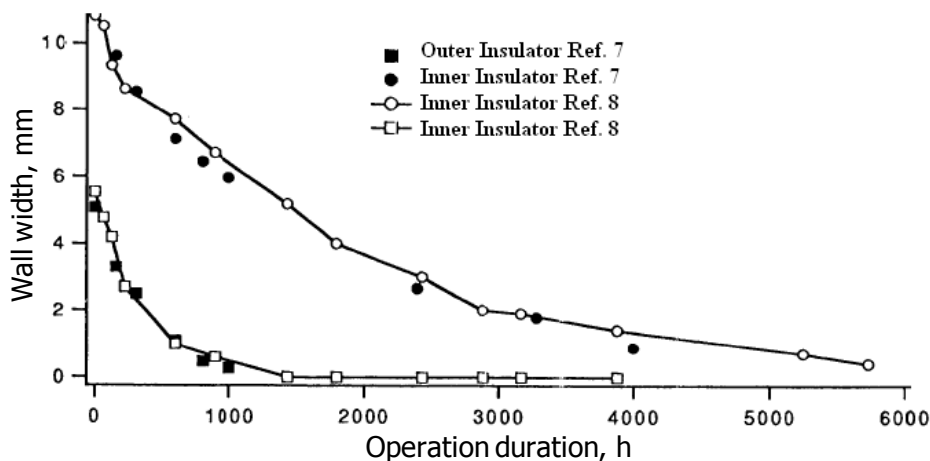


図 1.7 BPT-4000 の耐久試験における壁面損耗[17]

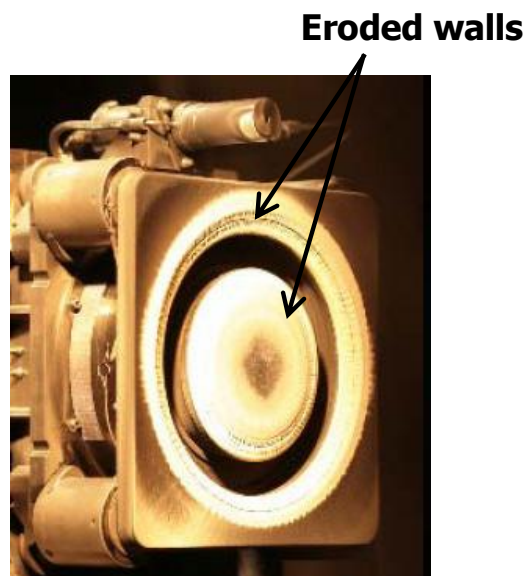


図 1.8 BPT-4000 の 5800 時間作動後の壁面損耗の様子[17]

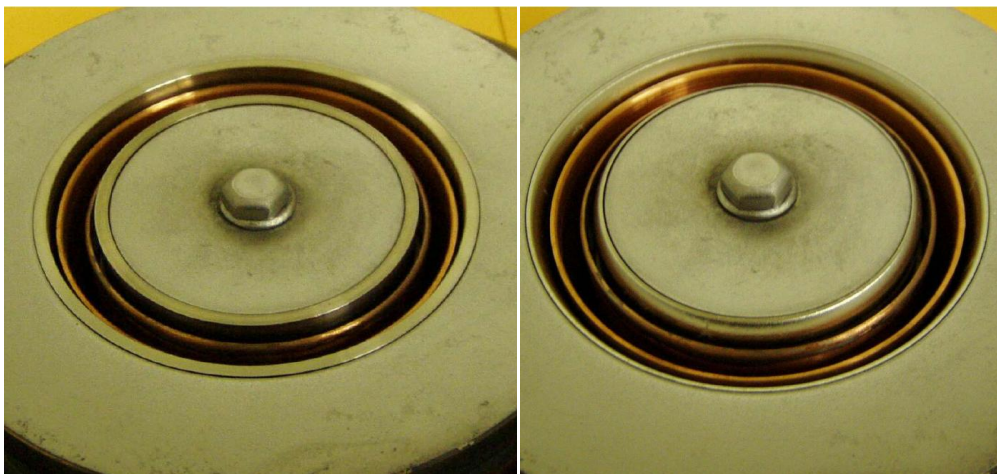


図 1.9 TAL の壁面損耗の様子(左:作動前, 右:作動後)[18]

## 1.4 研究目的

本研究の目的はマグネティックシールドリングを搭載したアノードレイヤ型ホールスラストにおけるイオン損失の低減である。

イオン損失は、ホールスラストの寿命を制限する壁面損耗を引き起こすため、これを寿命性能の指標とする。また、イオン損失を低減することで、推進性能を向上が期待できる。

よって、本研究では、チャンネル壁面形状と磁場形状をマグネティックシールドリング形状になるよう設計し、ガードリング電流率と推進性能を評価した。

## 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

SPT型におけるマグネティックシールドイングの原理を図 2.1 に示す。従来の磁場形状は、磁力線はチャンネル壁面を貫く(図 2.1 (b))ような形をしているのに対し、マグネティックシールドイングを搭載した場合、磁力線はチャンネル壁面と平行である(図 2.1 (c))[29]。電子温度が低い場合、等電位線は磁力線に沿うように形成される。

イオンは軸方向に対して多少ぶれた方向に加速されるため、特に壁面付近のイオンは壁面に衝突しやすい。そのため、壁面付近に壁面に平行な電場が存在すると、図 2.1 のようにイオンは壁面方向へ加速され、高いエネルギーを持ち、壁面材料をスパッタリングする。図 2.3 にスパッタリングの様子を示す。しかし、図 2.4 に示すように磁場を壁面に平行にし、壁面を貫く磁場を減少させる Magnetic shielding 磁場形状では、チャンネル壁面近傍でイオンが壁から遠ざかる電場が形成される[30]。これにより、チャンネル壁面の損耗が低減される。Magnetic shielding の効果は、数値計算および実験結果から検証されている。マグネティックシールドイングを搭載した場合の数値計算の結果を図 2.5 に示す[30]。

図 2.5 上段から、マグネティックシールドイング形状において、壁面付近における電位が減少していることがわかる。また、イオン生成は中性粒子密度、電子密度、電子温度によって決まり、電子温度が高いほど起こりやすいが、図 2.5 中段の図から、電子温度の高い領域も壁面から離れていることが分かる。以上の結果、図 2.5 下段の図のように壁面に向かうイオンは減少していることが分かり、マグネティックシールドイングの効果为数値計算の結果から確認されている。

また、マグネティックシールドイングの効果は実験によっても確認されている。マグネティックシールドイングの搭載有無による 10 時間作動後における壁面の様子を図 2.6 に示す[32]。壁面損耗の有無は壁面の色で判別でき、白色部分は壁面損耗が起こっており、黒色部分は損耗が起こっていないことを表している。図 2.6 よりマグネティックシールドイングを搭載していない場合、チャンネルの出口付近で壁面の損耗が起こっていることが分かる。一方、マグネティックシールドイングを搭載した場合、損耗していないことが分かる。以上より、マグネティックシールドイングの効果は実験結果からも確認されている

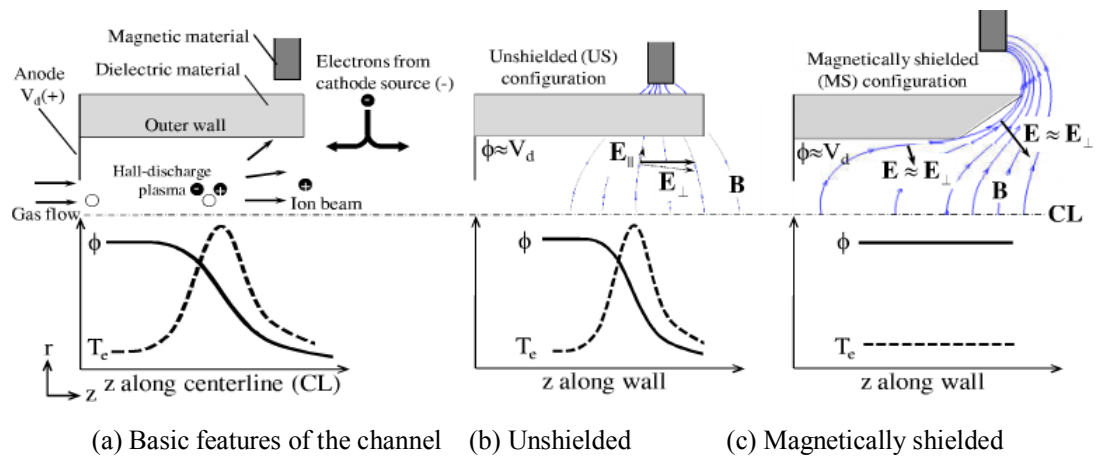


図 2.1 マグネティックシールドの原理[29]

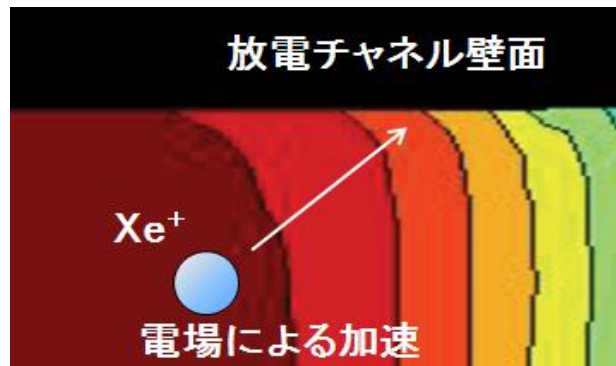


図 2.2 イオンが加速される概念図

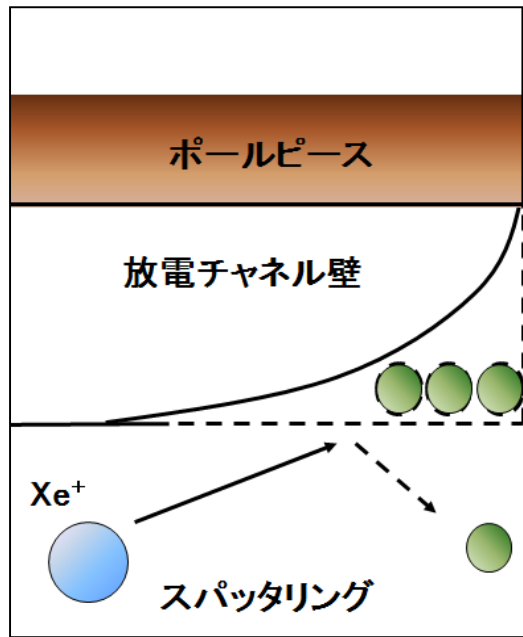


図 2.3 イオンの壁面スパッタリングの様子

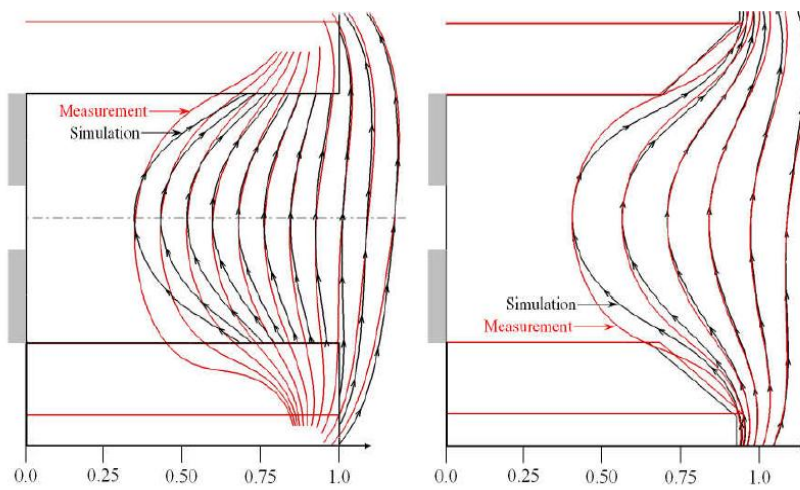


図 2.4 マグネティックシールドの磁場形状[29]

(左:マグネティックシールド未搭載, 右:マグネティックシールド搭載)

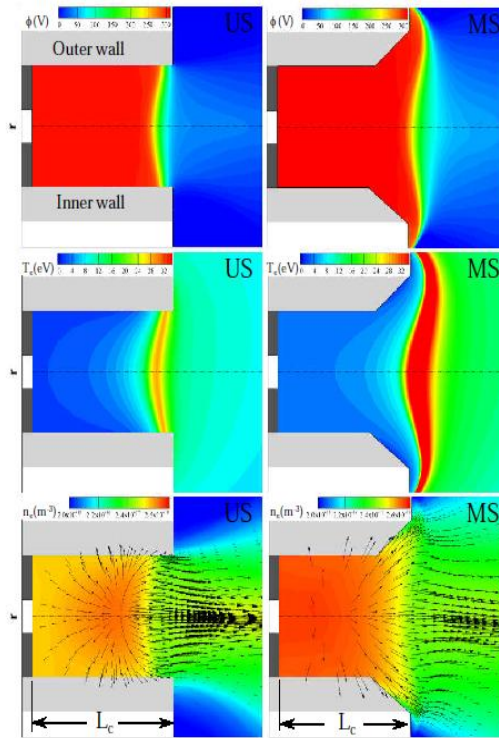


図 2.5 磁場をチャンネル出口付近に集中させた時の数値シミュレーション結果[30]  
 (左：磁気シールド未適用、右：磁気シールド適用  
 上段：電位、中段：電子温度、下段：電子数密度)

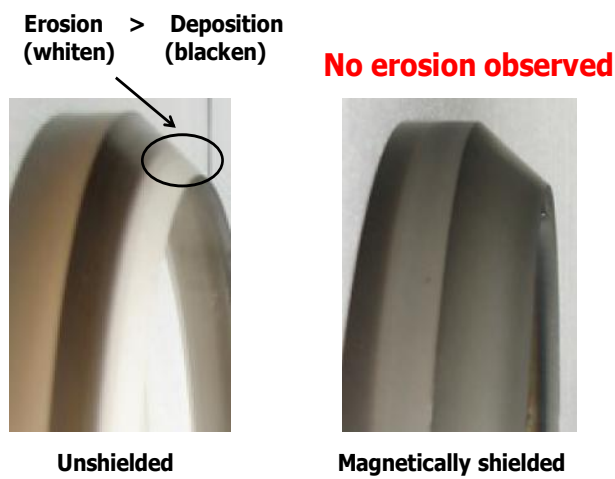


図 2.6 マグネティックシールディングを適用していない場合(左)と適用した場合(右)の10時間作動後のチャンネル壁の様子[32]



## 2.2 マグネティックシール型スラスタにおけるマグネティックシールディング

図 2.7 に H6 ホールスラスタを示す[31]。これは、6 kW 級の SPT 型スラスタであり、マグネティックシールディング搭載した場合の様々な計測や実験が行われている。図 2.8 は、H6 スラスタのマグネティックシールディングを搭載した場合 (以後 MS)、搭載していない場合 (US)のそれぞれの壁面形状と磁場形状を示す[31]。ここでは、マグネティックシールディングを搭載した場合の作動特性について述べる。

図 2.9 は US、MS における H6 スラスタ作動の様子を示す[31]。図 2.10 は MS の実験前後のスラスタの様子である。また、図 2.11 に壁面損耗率を示す[31]。これより、カーボンのバックパッタが  $0.004 \mu\text{m/h}$  であることを考慮して、MS における損耗率は US に比べて 1/2000 程度であることがわかる。

表 2.1 に US、MS における H6 スラスタの放電電流 20A、放電電圧 300V における作動性能を示す[31]。アノード効率は US において 68.2 %であり、MS において 67.2 %である。これより、マグネティックシールディングを搭載した場合、アノード効率はマグネティックシールディングの有無にかかわらず、ほとんど同じであることがわかる。MS の場合、発散角が  $20^\circ$  と US の場合の  $15^\circ$  に比べて大きくなっていることもわかる。放電電流振動については、US の場合 0.8 であり、MS の場合は 1.0 であり。

図 2.12 は US および MS におけるチャンネル中心軸上におけるプラズマ電位と電子温度を示す[31]。US と比較して、MS において、電子温度のピーク値がチャンネル下流方向へシフトしている。また、プラズマ電位計測から加速領域も下流へシフトしている。

SPT 型へマグネティックシールディングを搭載結果を表 2.2 にまとめる。

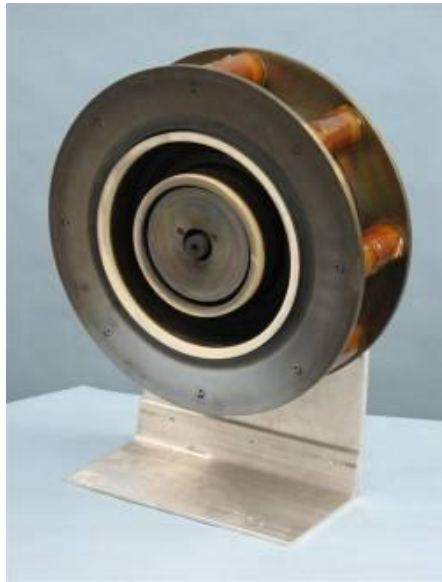


図 2.7 H6 ホールスラスタ[31]

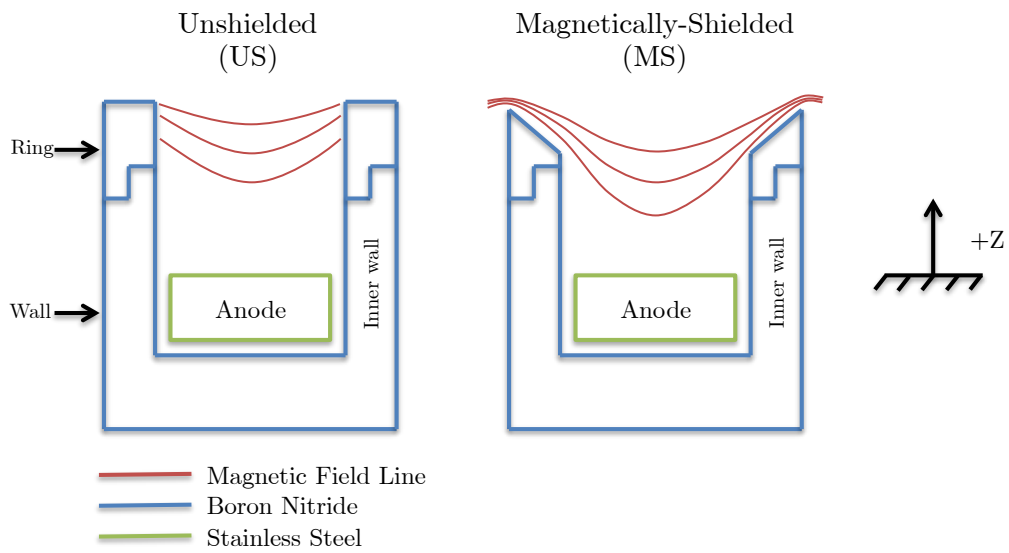


図 2.8 H6 スラスタのチャンネル壁面および磁気形状[31]

(左：マグネティックシールドなし、右：マグネティックシールドあり)

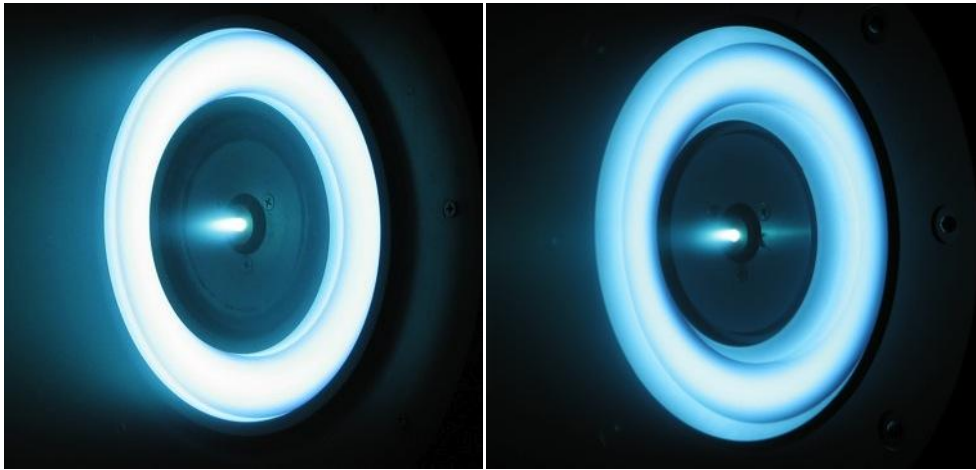


図 2.9 H6 スラスタの作動の様子(左:US, 右:MS) [31]

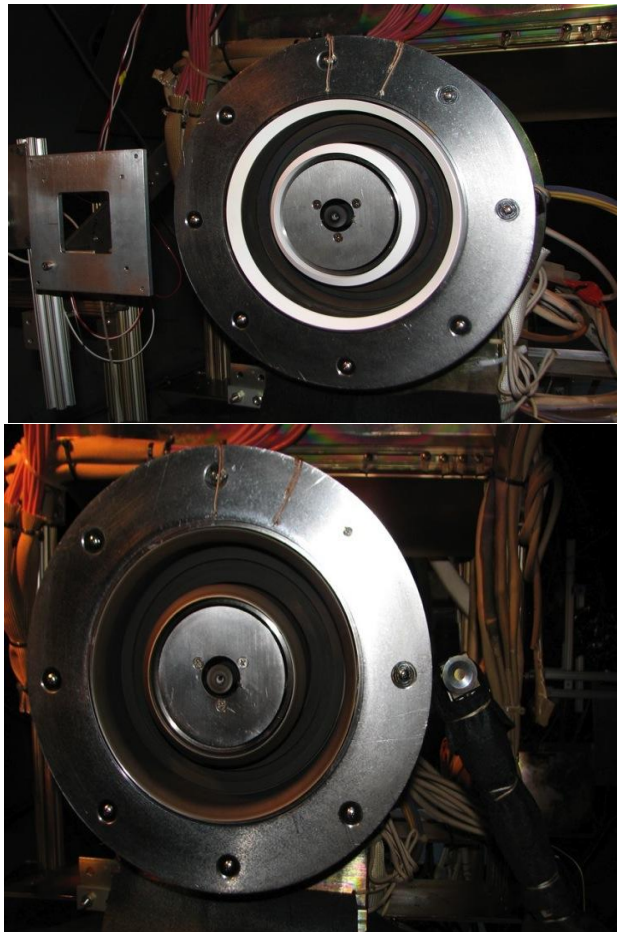


図 2.10 マグネティックシールド搭載 H6 スラスタの作動前後の様子[31]  
(上:作動前、下:作動後)

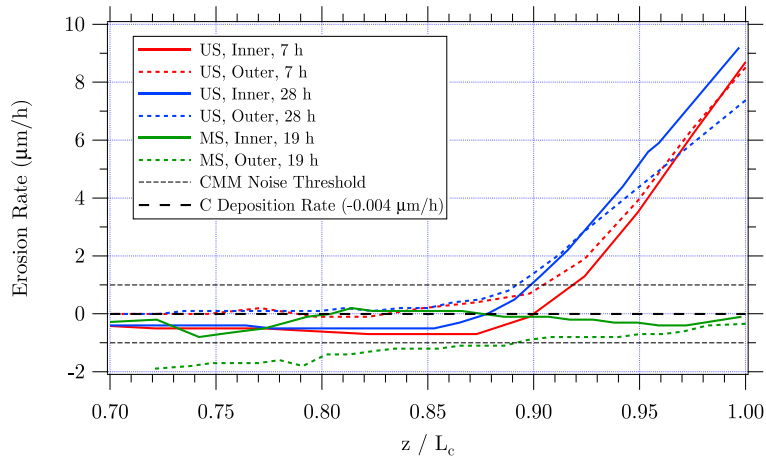


図 2.11 US,MS における壁面損耗率[31]

表 2.1 H6 スラスタにおける US,MS の作動性能[31]

	Unshielded (US)	Magnetically-Shielded (MS)	% change relative to US
Ion energy (V)	270	279	3.4%
Xe <sup>+</sup> current fraction	0.755	0.575	-24%
Xe <sup>2+</sup> current fraction	0.161	0.259	61%
Xe <sup>3+</sup> current fraction	0.064	0.119	86%
Xe <sup>4+</sup> current fraction	0.020	0.047	135%
Ion beam current (A)	16.7	17.4	4.2%
Thrust (mN)	401.0	384.2	-4.2%
Total specific impulse (s)	1950	2000	2.6%
Total efficiency (-)	0.635	0.624	-1.7%
Anode specific impulse (s)	2080	2140	2.9%
Anode efficiency (-)	0.682	0.672	-1.5%
Cathode efficiency	0.935	0.935	0.0%
Magnet efficiency	0.995	0.992	-0.3%
Voltage utilization	0.900	0.931	3.4%
Charge utilization	0.973	0.957	-1.7%
Mass utilization (anode)	0.995	0.977	-1.9%
Mass utilization (total)	0.931	0.913	-1.9%
Divergence utilization	0.937	0.888	-5.2%
Divergence half-angle (deg)	15	20	34%
Current utilization	0.835	0.870	4.2%
Electron current fraction	0.165	0.130	-21%

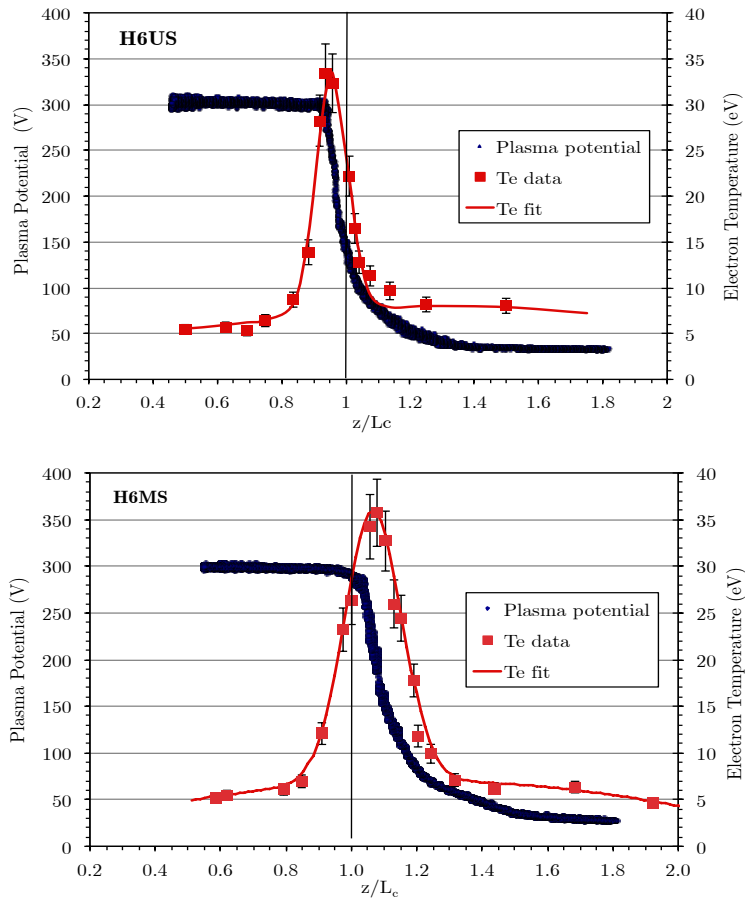


図 2.12 チャンネル中心軸上におけるプラズマ電位および電子温度分布[31]  
(上 : US、下 : MS)

表 2.2 H6 スラスタにおける US および MS 性能[31]

	US	MS
アノード効率	68.2 %	67.2 %
振動	0.8	1.0
壁面損耗	8 $\mu\text{m}/\text{h}$	0.004 $\mu\text{m}/\text{h}$ 以下

## 2.3 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ドイング

マグネティックシールドイングは SPT 型に搭載実績はあるが、TAL 型に応用されたことはまだない。TAL 型に応用できれば、ガードリング電流が低減し、推進性能および寿命性能を向上させることが可能である。しかし、TAL 型の壁面電位は SPT 型異なり、カソード電位を保っているため、SPT で期待されるような効果があるかどうか不明である。

これまでに TAL 型スラスタ表面を絶縁体で被膜することで、スラスタ前面に流れる電流が低減されたことが知られている[32]。しかし、これは CEX イオンに起因する電流であるため、壁面損耗を引き起こすチャンネル壁面に流れるガードリング電流が低減したかどうかは不明である。

図 2.13 にマグネティックシールドイングを TAL 型に応用した際に予想される放電室内部の電場およびガードリング電流率を示す。ガードリング電流率については、次の 2.4 章で言及する。もし、図 2.13 の左のような電位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いと考えられ、ガードリング電流率は小さくなると予想される。しかし、図 2.13 の右のような電位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小さいと考えられ、ガードリング電流率は大きくなることが予想される。

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. ターゲットの種類
2. エネルギー
3. 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 2.14 のような関係がある[33]。また、エネルギー閾値が存在し、それ以下のエネルギーではスパッタリングは起こらない。また、スパッタリング率は入射角に依存し、粒子が垂直に入る場合を 0 度とした場合における Xe と BN における角度依存性を図 2.15 に示す[34]。

一方、Xe ガスと TAL のチャンネル壁面としてよく用いられている SUS とのエネルギー依存性、入射角度依存性等はあまり調べられておらず、不明である。また、TAL のチャンネル壁面以外にも実験設備において SUS が多く使用されている。そのため、分光法によるガードリング壁面の損耗評価は難しい。

SUS の主成分は Fe、Cr、Ni であり、それらと Xe ガスのスパッタの閾値を表 2.3 に示す[35]。

また、図 2.15 に Xe ガスの各エネルギーにおけるスパッタ率を示す[36]。

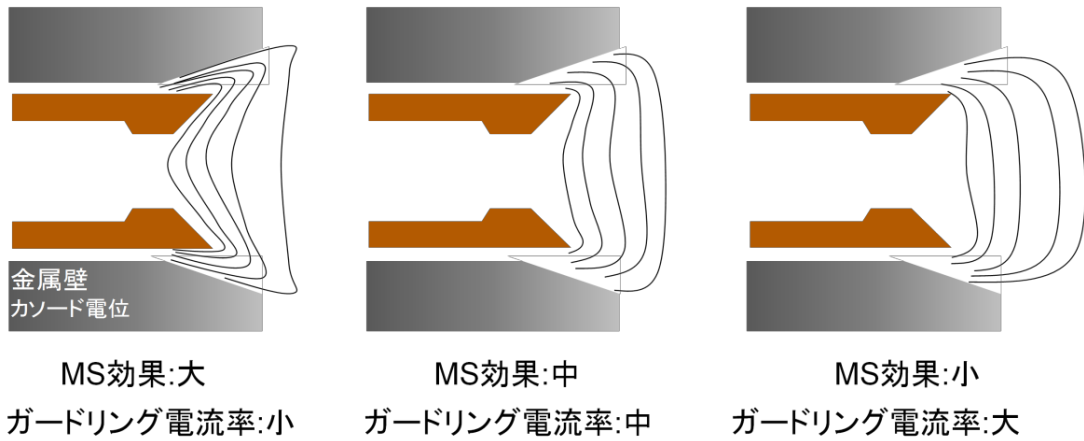


図 2.13 予想される放電室内部の電場およびガードリング電流率

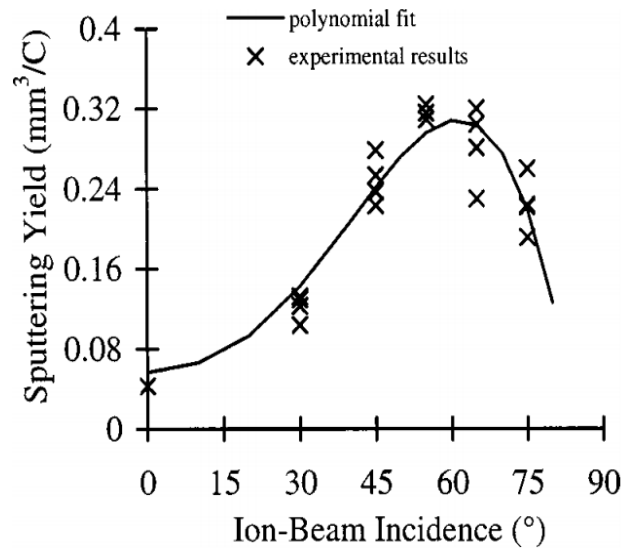


図 2.14 一般的なエネルギーとスパッタリング率[33]

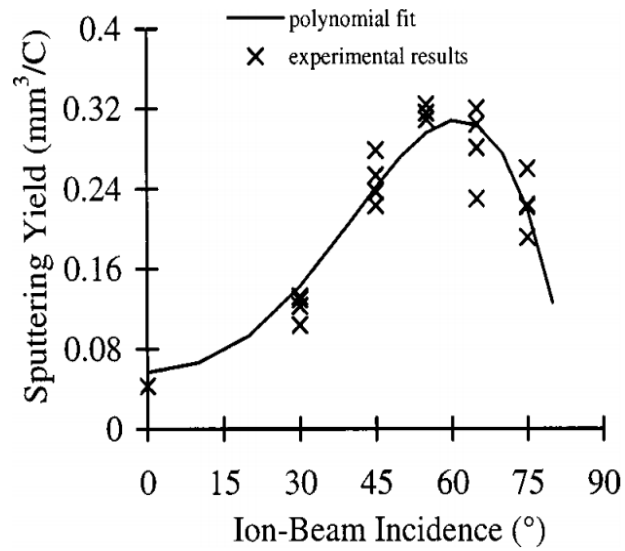


図 2.15 入射角度に対するスパッタリング率(Xe と BN)[34]

表 2.3 Xe ガスと Fe,Cr および Ni におけるスパッタリング閾値[35]

	Fe	Cr	Ni
閾値	約 22 eV	約 20 eV	約 20 eV

表 2.4 各エネルギーにおける Xe ガスと Fe,Cr,Ni および C に対するスパッタリング率[36]

	Fe	Cr	Ni	C
100 eV	0.06	0.13	0.10	-
200 eV	0.29	0.44	0.37	0.04
300 eV	0.54	0.85	0.71	0.08
600 eV	1.20	1.90	1.48	0.21



## 2.4 アノードレイヤ型スラストにおける壁面損耗評価

今回、TAL 型の壁面損耗評価として、式(2.1)で表されるガードリング電流率を用いた。これは、図 2.16 に示すように、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。スタスタ全面は図 2.17 に示すように、絶縁体 BN でコーティングを行った。ガードリング電流に起因するイオンのエネルギーはシースで加速された後、壁面に衝突するため、Xe と SUS の主成分の閾値より十分高いと考えられる。そのため、ガードリング電流に起因するイオンはスパッタリングを引き起こすと考えられ、ガードリング電流率を壁面損耗を指標とした。

$$\text{ガードリング電流率} \equiv \frac{I_g}{I_d} \quad (2.1)$$

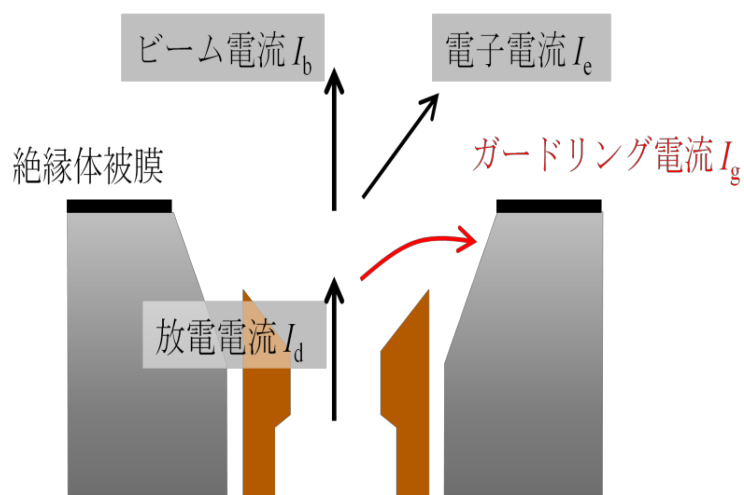


図 2.16 TAL における壁面損耗評価方法



図 2.17 スラスト前面を絶縁体 BN でコーティングした様子

## 第3章

# 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

### 3.1 アノードレイヤ型スラスタ 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タ UT-58 を図 3.1 に示す[37]。また、その仕様を表 3.1 に示す。

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、内側に1つ、外側に4つのソレノイドコイルを使用している。同線はそれぞれ、内側 320 巻、外側 160 巻である。チャンネル出口付近の磁力線は、中心軸上においてほとんどが半径方向を持つように設計されている。また、ホローアノード外側の純鉄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。FEMM 4.2 で計算されたコイル電流 2.5 A における中心軸上における磁束密度分布を図 3.2 に示すが、最大磁束密度は 55.6 mT である。磁束密度はコイル電流により変えることができ、4.5 A コイル電流で約 80 mT を印加できる。

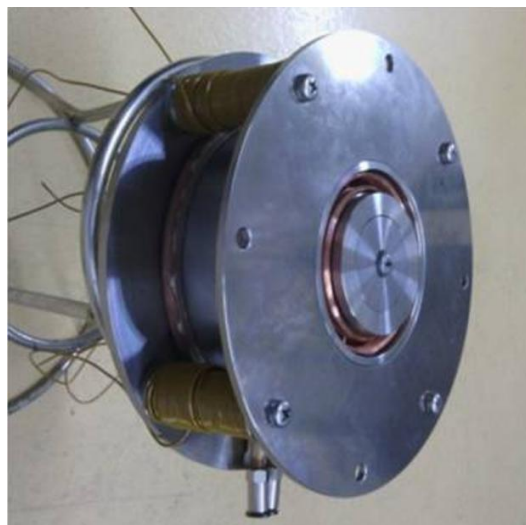


図 3.1 UT-58

表 3.1 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 PIMK-U
Number of turns of windings	160 turns for four outer coils 320 turns for single inner coils
Cooling medium	Water

### 3.2 マグネティックシールドイング搭載 UT-58

アノードレイヤ型ホールスラスト UT-58 に Magnetic shielding を搭載するため、設計変更を行った。図 3.2 に本実験で使ったアノードレイヤ型ホールスラスト UT-58 with magnetic の断面図を示す。今回行った主な設計変更点は、磁気回路、ガードリング壁面形状である。

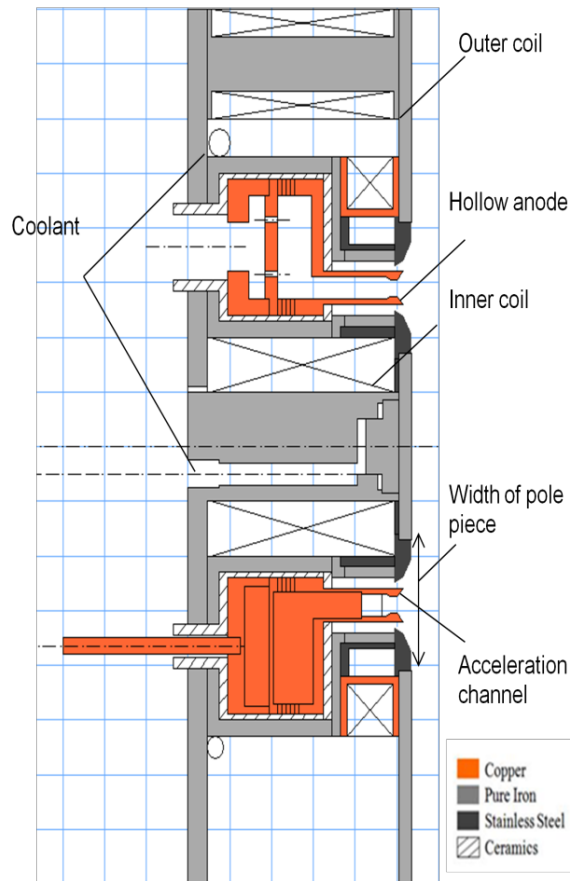


図 3.2 UT-58 の断面図(gap=24)

### 3.2.1 磁場形状

ポールピース間距離を変更することで、磁力線形状を変える事ができる。当初、UT-58 のポールピース間距離は 14 mm であったが、今回 19 mm, 24 mm と 2 段階に広げ、マグネティックシールドリングの磁場形状となるような設計を行った。図 3.3、図 3.4、図 3.5 に FEMM で計算した gap=14, 19, 24 の磁力線形状をそれぞれ示す。また、図 3.6 にそれぞれの磁場形状におけるチャンネル中心軸上磁束密度分布を示す。図 3.6 が示すように、ポールピース間距離を広げ、MS 形状にすると、以下ようになる。

1. 最大磁束密度値が減少
2. 最大磁束密度を達成する軸方向位置が下流方向へ移動

ポールピース間距離が広げることにより、チャンネル出口付近の磁力線をよりガードリン

グ壁面に沿った形状にすることができる。これによりガードリング壁面に衝突するイオンを少なくできると期待できる。最大磁束密度を達成する軸上位置が下流方向へシフトすることで、イオン化生成領域も下流へシフトすることが期待でき、これもガードリング壁面に衝突するイオンを減少させると考えられる。

ポールピース間距離を広げることで、同コイル電流で達成できる最大磁束密度は小さくなるが、これはコイル電流を多く流すことで回避できる。80 mT を印加するために必要なコイル電流は gap=14 で 4.5 A, gap=24 で 7.5 A 程度である。

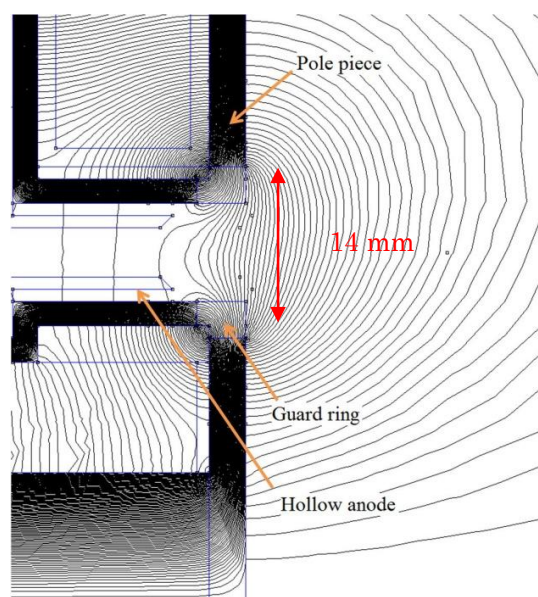


図 3.3 磁力線形状(gap=14)

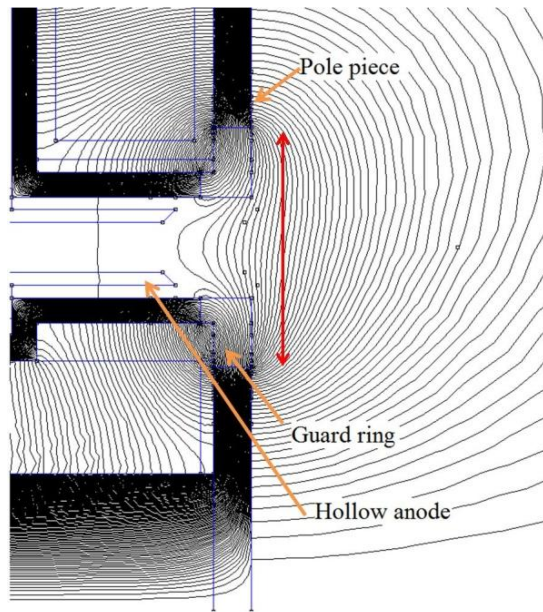


図 3.4 磁力線形状(gap=19)

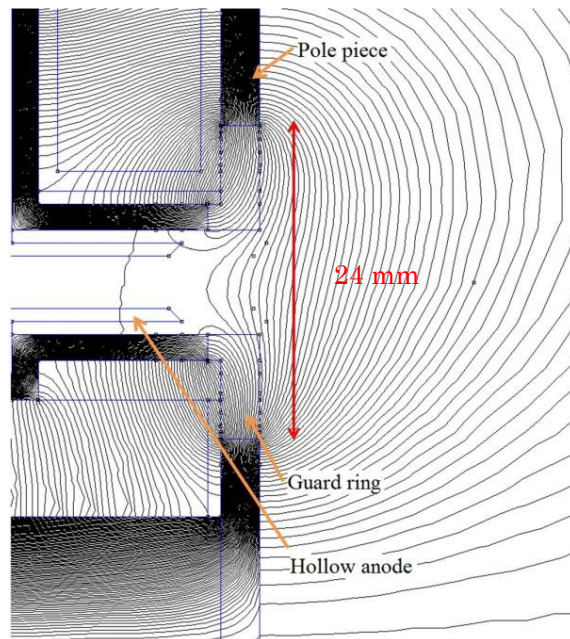


図 3.5 磁力線形状(gap=24)

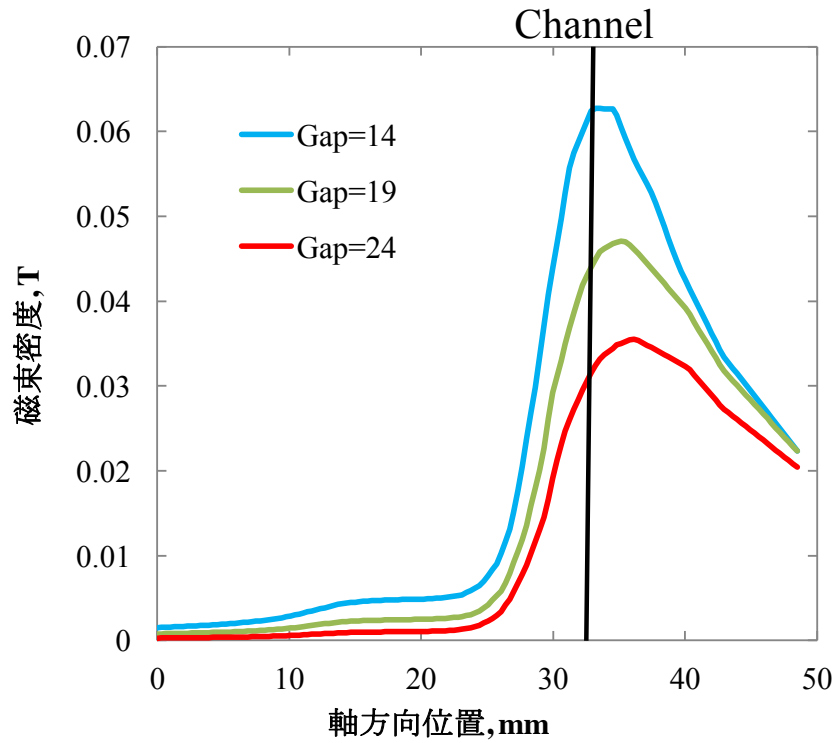


図 3.6 各ポールピース間距離における中心軸上磁束密度分布(コイル電流 3 A)

### 3.2.2 壁面形状

アノードレイヤ型スラスタ UT-58 に Magnetic shielding を搭載するため、磁気回路に加えて、ガードリング壁面の変更を行った。図 3.7、図 3.8、図 3.9 に gap=14, gap=19, gap=24 における壁面形状と磁力線を示す。

壁面形状を加工することで磁力線がよりガードリング壁面と平行となるようにした。表 3.2 に、壁面と磁力線が平行の場合を 0 度とした時の、各形状における磁力線と壁面の角度を示す。壁面および地場形状の変更で、磁力線がより壁面と平行になったことがわかる。これより、壁面に向かう電場が減少し、ガードリング壁面に流れ込むイオンが減少することが期待できる。



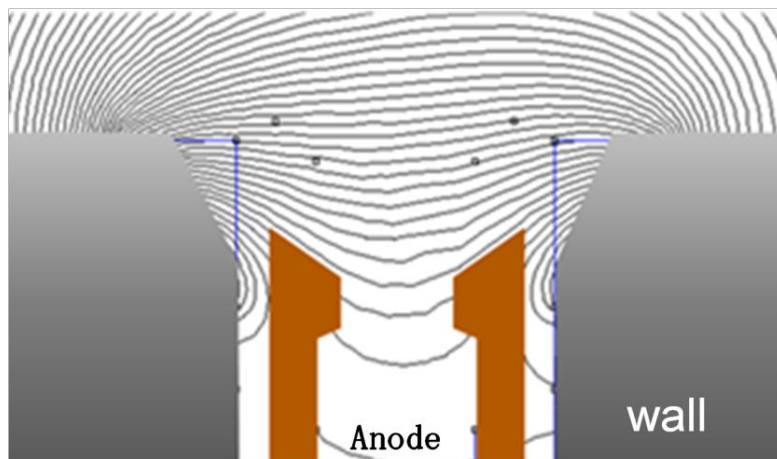


図 3.7 gap=14 における壁面形状および磁場形状

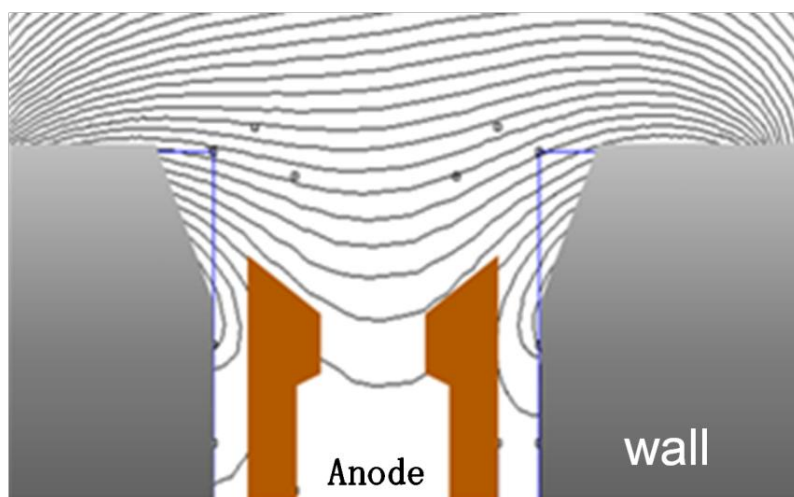


図 3.8 gap=19 における壁面形状および磁場形状

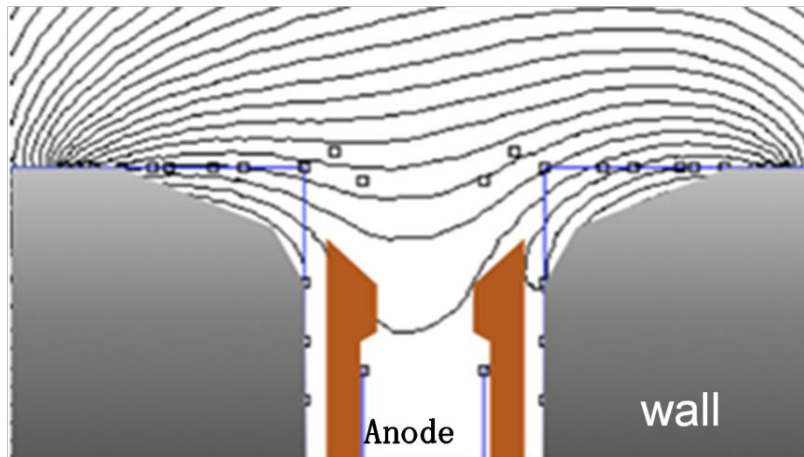


図 3.9 gap=24 における壁面形状および磁場形状

表 3.2 壁面と磁力線の角度(壁面と平行時を 0 度)

壁面と磁力線の平均角度	gap=14	gap=19	gap=24
内側	32.2 度	27.5 度	13.5 度
外側	26.0 度	17.8 度	16.6 度
両側	29.1 度	22.7 度	15.0 度

## 第4章 実験装置

### 4.1 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。[38][39]

- I. 消費電力が小さい
- II. 寿命が 1000 時間以上と長い
- III. 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、電気推進機に有効な電子源として数多く使われている。図 4.1 に使用した Veeco 社のカソードをチップ示す。図 4.2 に作動模式図を示す。HC-252 のシリンダー内側に仕事関数の低い R-500 (ダブルカーボネイ, Ba/Sr)CO<sub>3</sub> が塗られたタンタル箔(インサート)が入っている。始動時にヒーター(7.50A 程度)で加熱する事で、インサート内は 1000 度以上に達し、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、生成された電子はキープ電圧により外側に引き出される。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側には出られず、インサート内壁に衝突し、電子と再結合し中性粒子になる。この際、衝突したイオンのエネルギーは熱に変換される。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壁面が加熱される。そのため、作動開始後はヒーター加熱をヒーター電流 6A に低下させて作動させる。

ホローカソードは非常にデリケートであり、取り扱いには下記の注意が必要である

1.  $2.7 \times 10^{-2}$  Pa 以下で作動させる。理由は、CEX イオンの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。
2. 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 1.5 時間以上、十分冷却した後に行い、大気雰囲気中では Ar ガス (20ccm) 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。
3. 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、ホットベールとマイカを挿入する事で、熱絶縁をとっている。

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 (2.78 sccm, 0.2 Aeq) とし、キーパー電流は 0.2 A とした。

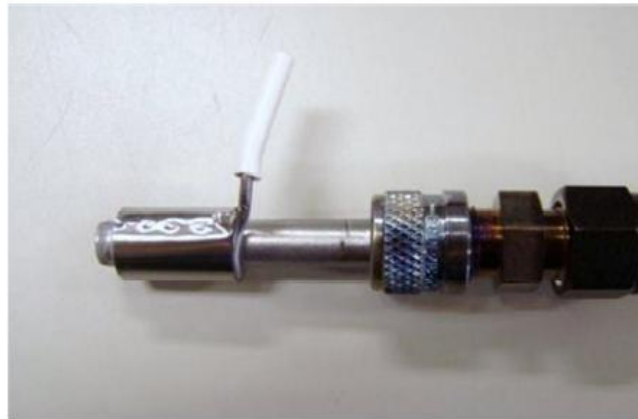


図 4.1 ホローカソード

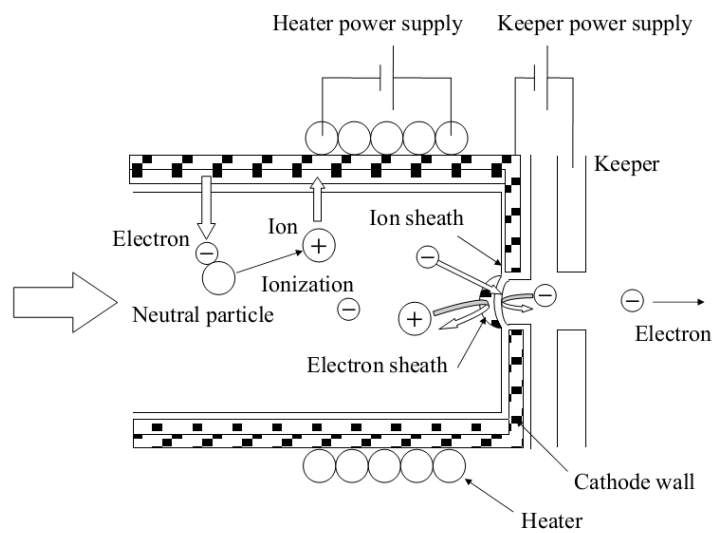


図 4.2 ホローカソードの模式図

## 4.2 真空系

本実験は宇宙での真空環境を模擬するために、図 4.3 に示す直径 2.0 m, 長さ 3.0 m のステンレス円筒形真空チェンバを使用した。真空排気には、油拡散ポンプ(ULVAC 社製 SOD-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 MB-10000, 排気速度 10000m<sup>3</sup>/h) 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 KS-150, 排気速度 15000 L/min) を 2 台使用している。これらの写真を図 4.4 に示す。ポンプとバルブの制御にはチェンバ横に取り付けてあるコントロール版で行う。

真空度の測定には、低真空度(大気圧~  $1.0 \times 10^{-1}$  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圧力を測定するため、使用ガスによって感度校正を行う必要がある。主なガスの相対感度を **Error! eference source not found.**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を **Error! Reference source not found.**に示す。スラスト Xe 流量 xx mg/s (カソード流量は xx mg/s)において、xxx × xxx<sup>-1</sup> Pa 以下に保たれた。

表 4.1 電離真空計の相対感度

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

表 4.2 実験中におけるチャンパー背圧

Propellant (Mass flow rate)	Xe 4.76 mg/s (3.0 Aeq)
Back pressure (Torr)	$5.4 \times 10^{-5}$



図 4.3 真空チェンバー



(a) 油拡散ポンプ



(b) メカニカルブースタポンプ



(c) ロータリーポンプ



(d) 制御盤

図 4.4 真空ポンプおよび制御盤

### 4.3 冷却系

ホールスラスタの冷却のため、循環冷却系を使用した。図 4.5 冷却水タンクのように実験室外に設置されている水ポンプと冷却塔から、0.3 MPa の冷却水をスラスタに供給している。冷却水は推進剤供給系と同じフランジを通して真空チェンバ内に入り、スラスタを冷却した後、再度チェ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 4.6 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 4.5 冷却水タンク



図 4.6 冷却水ポンプおよびバルブ

## 4.4 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1~1.5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管を通してチェンバ内へ供給される。フランジからスラスタへは外径6mm、内径4mm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。これを図4.7に示す。また、その仕様を表4.1に示す。これらのマスフローコントローラの制御には、図4.8の同社製リードアウトユニットMODEL CR300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 4.7 マスフローコントローラー





図 4.8 マスフローコントローラー制御器

表 4.1 マスフローコントローラーの使用

	MODEL 3200	MODEL 3660
S/N	U07010500, U07010510	0607P05213N
Correction of CF	Corrected using xenon	
Valve type	Normally closed, 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 $1 \times 10^{-8}$ Pa $\cdot$ m <sup>2</sup> /s (Permeation of He is not included.)	smaller than $1 \times 10^{-8}$ Pa $\cdot$ m <sup>2</sup> /s (Permeation of He is not included.)

## 4.5 測定系

本実験において、放電電流、ガードリング電流、推力を測定した。これらの測定には、電気回路、デジタルオシロスコープ、LabVIEW (National Instruments 社製)、スラストスタンドシステムを使用した。

### 4.5.1 電気回路

図 4.9 にスラストの電気回路の概略を示す。真空チェンバはスラストの電源系から浮かせてある。放電電流の測定において、ノイズがほとんどなく周波数特性も 100MHz 程度ある金属皮膜抵抗 ( $R=0.5\Omega$ , 定格入力電力 60W) をスラストのアノードと電源の陽極の間に挿入し、その両端の電位差を差動プローブ (横河電機製 700925) を用いて測定した。ホールスラストの等価回路は  $100\Omega$  程度の抵抗体であり、差動プローブの内部インピーダンスは約  $3\text{M}\Omega$  と非常に大きいため、スラストの放電への影響はほとんどない。スラストへの電力供給等は、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を図 4.10 に示す。また、各電源の定格を表 4.2 に示す。

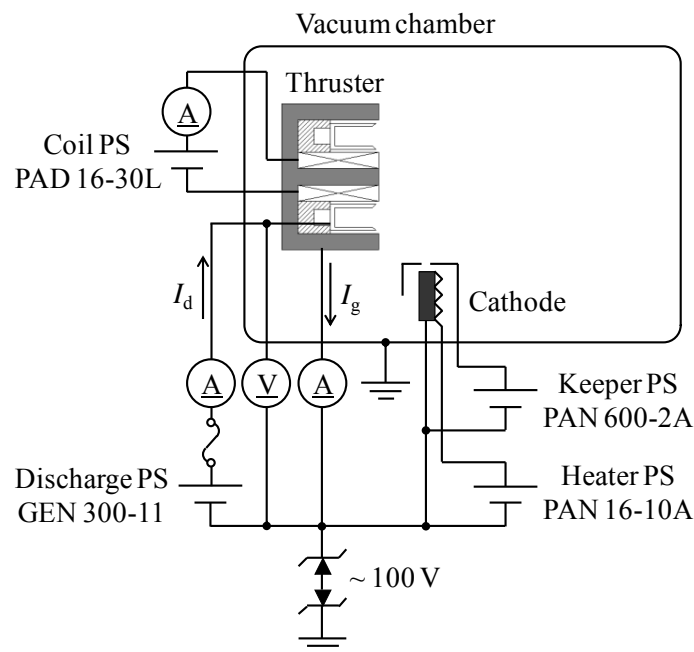


図 4.9 電力供給系



(a) 主放電電源



(b) ヒーター電源



(c) コイル電源



(d) カソードキーパー電源

図 4.10 電源

表 4.2 電源定格

Application	Model number	Manufacturer	Rated value
Main discharge	GEN 300-11	TDK Lambda	300 V – 11.0 A
Coils in the thruster	PAD16-30L	Kikusui	16 V – 30.0 A
Heater of the hollow cathode	PAN16-10A	Kikusui	16 V – 10.0 A
Keeper of the hollow cathode	PAN600-2A	Kikusui	600 V – 2.0 A

#### 4.5.2 デジタルオシロスコープ

図 4.11 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 4.3 に示す。WE7000 は計測ステーションである WE900 および計測モジュールで構成され、WE900 を PC と USB 接続し、各計測モジュールを PC 制御が可能となる。本実験では、ホールスラストの放電電流およびガードリング電流の測定には、2ch, 20MS/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[26]。また、コイル電流、制御電流、放電電圧の測定には 4ch, 100KS/s 絶縁デジタルライザモジュール WE7272 を使用した。放電電流、ガードリング電流および放電電圧の測定には横河電機社製差動プローブ 700925 を使用した。その使用を表 4.4 に示す。

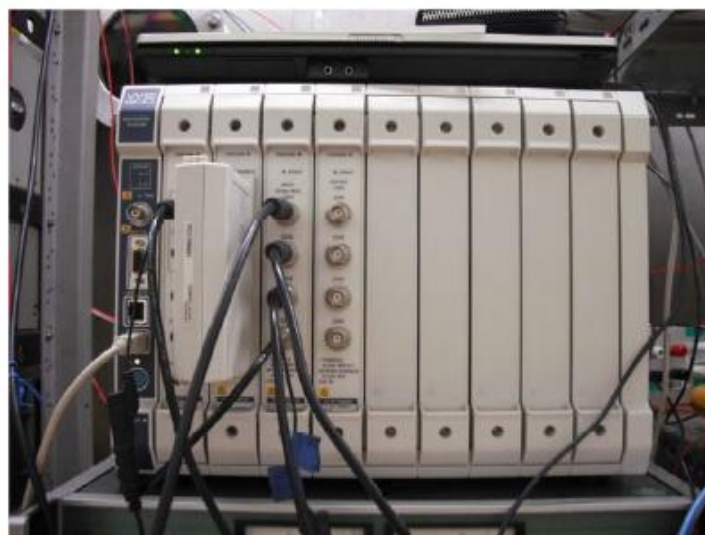


図 4.11 オシロスコープ

表 4.3 計測器 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 MΩ (約 28 pF)	約 1 MΩ
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): ±0.75% of full scale	±1 V: ±(0.04% of rdg + 0.4 mV) ±2 V: ±(0.04% of rdg + 0.6 mV) ±5 V: ±(0.04% of rdg + 1.3 mV) ±10 V: ±(0.07% of rdg + 6.5 mV) ±20 V: ±(0.07% of rdg + 8.7 mV) ±35 V: ±(0.07% of rdg + 15.5 mV)
入力フィルタ	OFF, 500 kHz, 1 MHz	OFF, 500 Hz, 5 kHz
最大許容入力 電圧	±250 V (DC+AC peak) または 177 Vrms	±50 V (DC+AC peak) 過電圧カテゴリ: CAT I, II
最大コモンモード電圧		±42.4 V (DC+AC peak)

表 4.4 作動プローブ仕様

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 $\Omega$ , 約 10 pF 並列
差動許容電圧	$\pm 500$ V (DC + AC peak) または 350 Vrms (100 : 1 時)
最大コモンモード入力電圧	$\pm 500$ V (DC + AC peak) または 350 Vrms
最大入力電圧	$\pm 1000$ V (DC + AC peak) または 700 Vrms
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 $\pm 5$ V (DC + AC peak)
出力インピーダンス	1 M $\Omega$ 入力システムで使用

---

### 4.5.3 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[40]。これを図 4.12 に示す。内側振り子にはスラスト本体および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  $\mu$ m 以下, 応答速度 5ms 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てしまう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、内側振り子の変位を測定することで、この相対変位をなくすように等大逆向きの力を作用させることで推力を測定する。

このスラストスタンドの接点はすべてナイフエッジ構造を採用しており、スラストが発生するモーメントによる測定誤差が生じない設計となっている。また、各接点で直交する 2 つのナイフエッジにより、軸方向、軸垂直方向の 2 次元推力を測定することが可能であるが、本実験では軸方向のみ測定した。

推力測定において、内側振り子と外側振り子の相対変位を計測し、チェンバ固定系に設置された J $\times$ B 制御器により、相対変位が 0 となるように内側振り子に制御力を加える。J $\times$ B 制御器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ェンバ固定系の導線で構成される。推力は、この導線に流れる制御電流値を LabVIEW 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、2g ( $\pm 5\text{mg}$ ) の精密分銅 4 つを使用した推力校正により求めた。推力値と制御電流値の関係を図 4.14 に示す。

制御系の概略を図 4.13 に示す。センサ変位信号をローパスフィルタ (カットオフ周波数 16Hz, 減衰比 1) に通した後、LabVIEW で読み込む。PC 内で、振り子間距離の変化に比例した電流を出力するよう制御用電源 (菊水電子社製, PAD70-15L) を定電流モードで外部制御を行う。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 20W) を用いて測定する。

また、推力測定前にコイル電流に対する推力較正も行った。この時の関係を図 4.15 に示す。スラストコイル電流 7.5 A に対して推力値変化は約 1 mN 以内である。

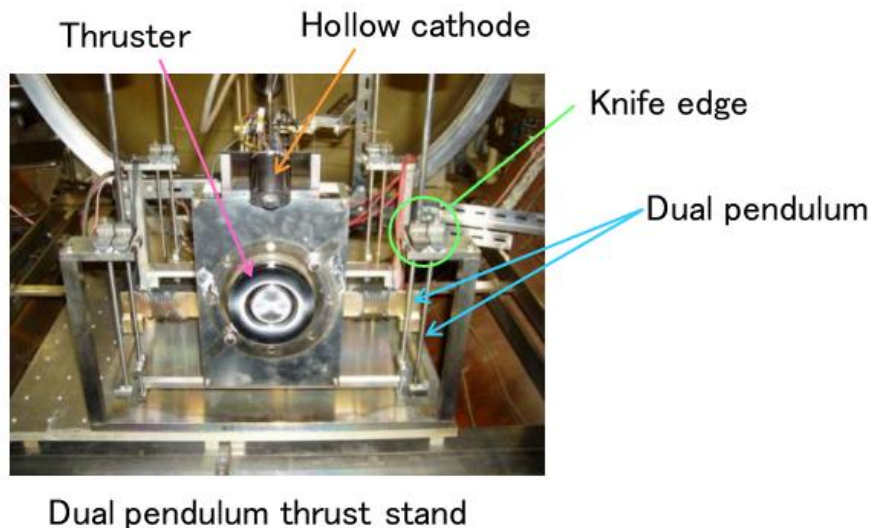


図 4.12 スラストスタンド外観

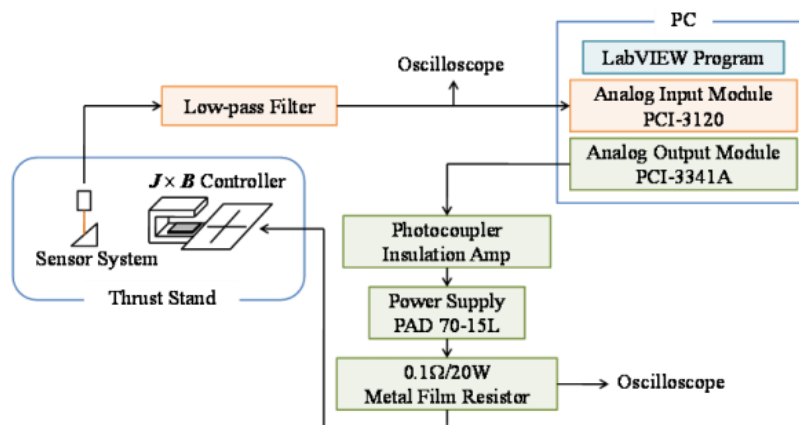


図 4.13 スラストスタンド制御系

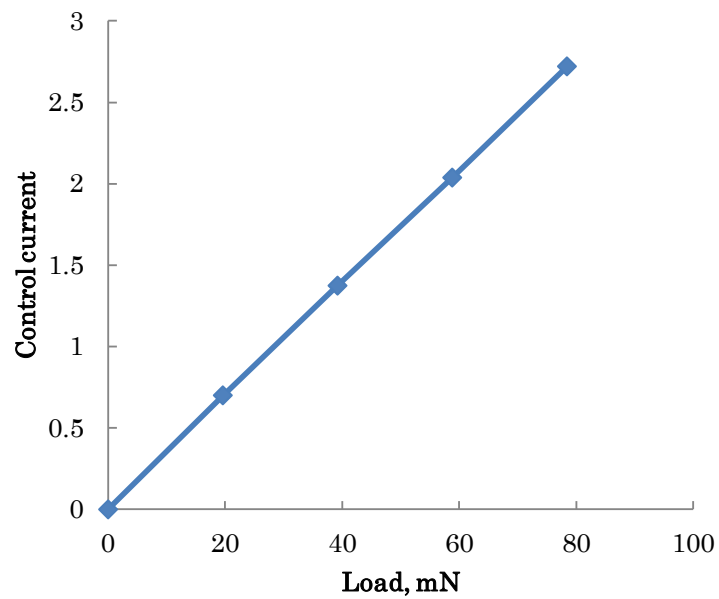


図 4.14 おもりに対する制御電流変化 (推力キャリブレーション)

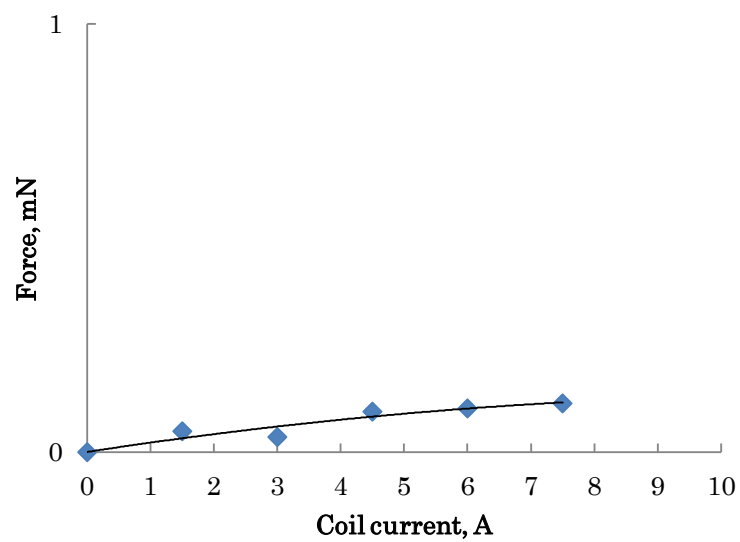


図 4.15 コイル電流に対する推力 (コイルキャリブレーション)



## 第 5 章

### 結果および考察

#### 5.1 マグネティックシールドイング搭載 UT-58 のガードリング電流率および推進効率

アノードレイヤスラスタ UT-58 において、マグネティックシールドイング磁場形状および壁面形状を搭載した際のガードリング電流率および推進効率を測定し、その有効性を検証する。

##### 5.1.1 ガードリング電流率

図 5.1 に推進剤流量 2.72 mg/s の場合の gap=14,19,24 におけるガードリング電流率を示す。同様に図 5.2 に推進剤流量 3.40 mg/s にそれぞれのガードリング電流率を示す。

gap=14 と比較し、gap=19, gap=24 においてガードリング電流率が低減していることがわかる。これにより、マグネティックシールドイング磁場形状、壁面形状をアノードレイヤスラスタに搭載し、磁力線を壁面と平行にすることで、ガードリング電流率が低減されることが実証された。gap=14 と比較して、gap=19 では約 50 %程度、また gap=24 ではにおいて約 70 %程度低減している。図 5.3 に推進剤流量 2.72 mg/s での gap=14,19,24 におけるガードリング電流値を示す。また同様に図 5.4 に推進剤流量 3.40 mg/s での gap=14,19,24 におけるガードリング電流値を示す。これより、ガードリング電流率の低減はガードリング電流の低減によるものだとわかる。

ここで、UT-58 とほぼ同サイズアノードレイヤ型スラスタ UT-55 のガードリング電流率と比較する。UT-55 は東京大学で設計されたアノードレイヤ型スラスタであり、放電室平均径は 55 mm であり、加速チャンネル長は 3 mm である。図 5.5 に UT-55 の磁力線およびチャンネル壁面形状を示す。推進剤流量 2.72 mg/s, 放電電圧 250 V におけるガードリング電流率は、10 %程度であり、これは今回使用したアノードレイヤ型スラスタ UT-58 の gap=14 とほぼ同程度である。これより、UT-58 の gap=14 におけるガードリング電流率は、同サイズのアノードレイヤ型とほぼ同じであることが分かる。また、推進剤流量 2.72 mg/s, 放電電圧 250 V における UT-55 の最大推進性能は 45 %である

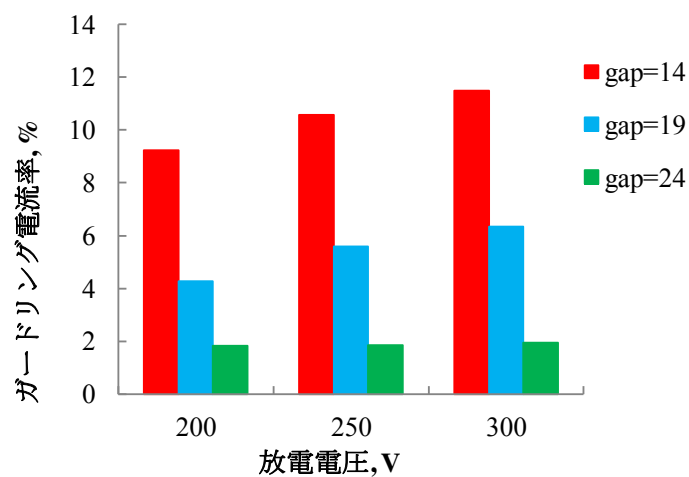


図 5.1 各形状におけるガードリング電流率  
(推進剤流量: 2.72 mg/s)

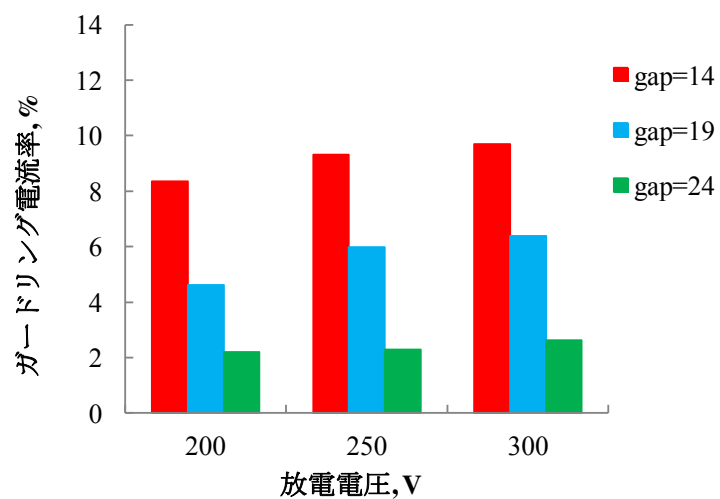


図 5.2 各形状におけるガードリング電流率  
(推進剤流量: 3.40 mg/s)

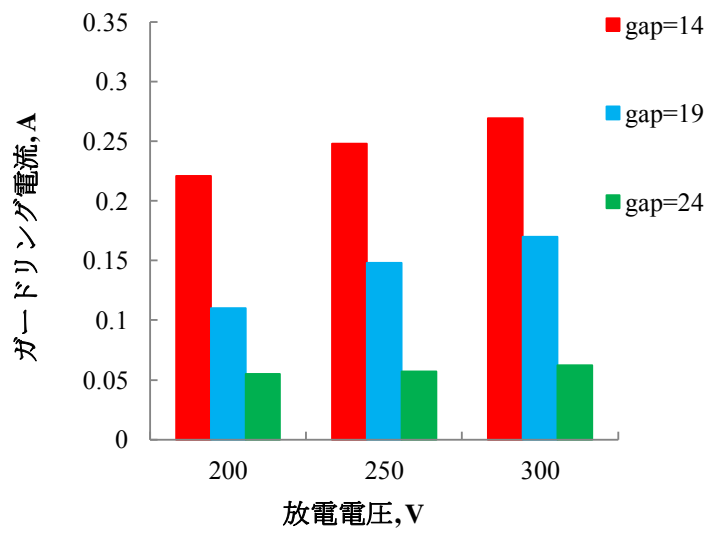


図 5.3 各形状におけるガードリング電流  
(推進剤流量: 2.72 mg/s)

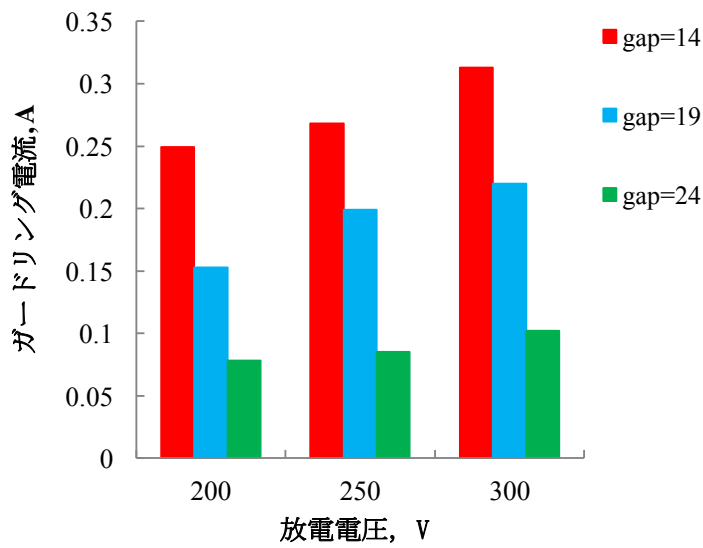


図 5.4 各形状におけるガードリング電流  
(推進剤流量: 3.40 mg/s)

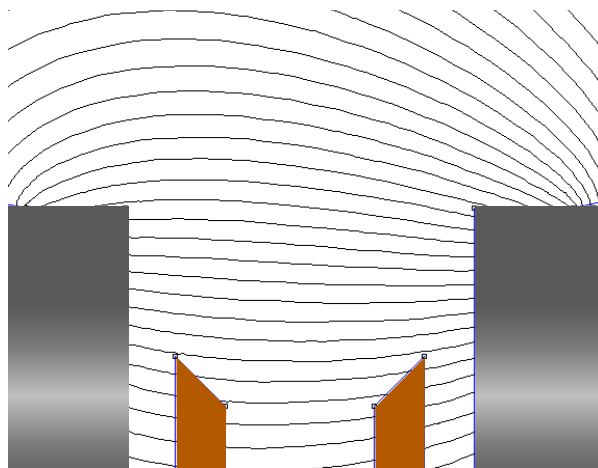


図 5.5 UT-55 スラスタの壁面および磁場形状

### 5.1.2 推進効率

アノードレイヤ型スラスタ UT-58 にマグネティックシールド磁場形状、壁面形状を搭載することでガードリング電流率が低減された際の推進効率を調べるために、推力を測定し、推進効率を求めた。図 5.4 に推進剤流量 2.72 mg/s での gap=14,19,24 における推進効率を示す。また同様に図 5.5 に推進剤流量 3.40 mg/s での同様に gap=14,19,24 における推進効率を示す。gap=14 と比較し、gap=19, 24 において推進効率が減少することが分かった。推進剤流量 3.40 mg/s では、gap=14 において推進効率は最大推進効率が 63 %であるのに対し、gap=19 においては最大 57 %、gap=24 では最大 39 %となった。また gap=14 において、作動条件が推進剤流量 2.72 mg/s、放電電圧 200V では推進効率が 40%程度となる。

推進効率放電電流、推力の測定結果を示す。放電電流は、gap=19, gap=24 において大幅に増加し、gap=14 と比較し、gap=19 で約 1.1 倍、gap=24 で約 1.3 倍近く増加した。**Error! eference source not found.**に gap=14,19,24 について、推進剤流量に対する放電電流の割合、放電電流に対するイオン損失電流の割合を示す。放電電流の値は推進剤流量に対して、gap=14 で 1.2 倍以下、gap=19 で 1.2~1.4 倍、gap=24 で 1.4 倍以上となっている。また放電電流に対するガードリング電流率の割合も gap=19,24 において低い値となっている。

一方、推力に関して、gap=14 と比較して gap=19 の大幅な変動は見られなかった。しかし、gap=24 において推力の大幅な減少が見られた。また gap=19, gap=24 に関して、ガードリン

グ電流率の低減による推力の増加は共に見られなかった。gap=19 に関して推進効率低下の主な原因は、放電電流の増加による、消費電力の増加だとわかる。gap=24 における推進効率低下の原因は、推力の低下および放電電流の増加である。

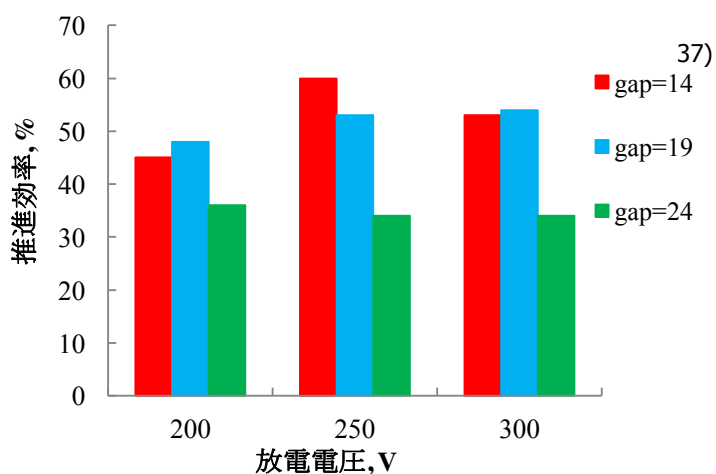


図 5.6 各形状における推進効率  
(推進剤流量: 2.72 mg/s)

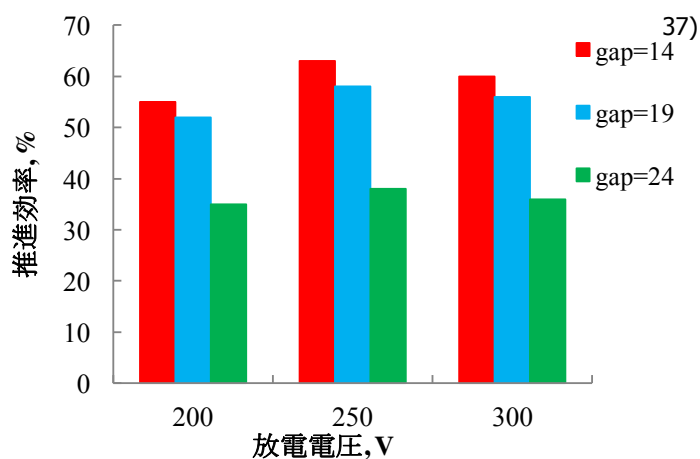


図 5.7 各形状における推進効率  
(推進剤流量: 3.40 mg/s)

## 5.2 ガードリング電流率の低減および推進効率の低下

アノードレイヤ型スタスタ UT-58 にマグネティックシールドリング磁場形状、壁面形状を搭載することでイオン損失電流が低減されたが、同時に推進効率も低下する結果になった。ここでは、ガードリング電流率の低減および、推進効率の低下について考える。

ガードリング電流率低減について、図 5.8 に伊藤氏によって行われた gap=14 におけるプラズマ電位分布の結果を示す[41]。また図 5.9 に平野氏によって行われた gap=24 におけるプラズマ電位分布の結果を示す[42]。これより壁面と磁力線を平行にすることで、電位分布が変化していることが確認できる。また、gap=14 と比較して、gap=24 での電場ベクトルが壁面から遠ざかる方向へ変化していることがわかる。これにより、磁場形状を壁面と平行にすることで電場ベクトルが壁面から遠ざかる方向にシフトし、これがガードリング電流率の低減の要因だと考えられる。

次に推進効率の低下について、図 5.10 に伊藤氏によって行われた gap=14 におけるチャンネル中心軸上の電子温度分布の結果を示す[41]。また図 5.11 に平野氏によって行われた gap=24 におけるチャンネル中心軸上の電子温度分布の結果を示す [42]。また、それぞれの図に各 gap における磁束密度分布も示している。はじめに、ポールピース間距離を広げたことで磁束密度の最大値をとる軸方向位置が下流へ移動する。図 5.10 より gap=14 において電子温度の高い領域はアノード端から 1~3 mm であることがわかる。一方、図 5.11、gap=24 において電子温度の高い領域はアノード端から 2~4 mm であり、gap=14 と比較して、電子温度のピーク値をとる軸方向位置が下流へ移動している。これより、最大磁束密度分布が軸方向下流へシフトしたことにより、電子温度のピークをとる軸方向位置も下流へシフトし、チャンネルの外側でピークを持つことがわかる。チャンネルの外側では拡散により中性粒子密度が低下するため、イオン生成量が減少し、これが推進効率の低下の原因だと考えられる。推進剤がイオン化されなければ、電場による加速を受けることができず、推力の低下を招くが、これは、推進剤流量を増やすことで推進剤利用効率の改善が期待できる。そこで、gap=24 において、推進剤流量を最大 4.76 mg/s まで増加させた時の、推進効率およびガードリング電流率を測定した。図 5.12 に gap=24 において放電電圧を 250 V 固定し、推進剤流量を変化させた場合の推進効率を示す。これより、推進剤流量を増加させることで、推進効率の改善が確認でき、最大で 44%まで向上した。またこの時のガードリング電流率を図 5.13 に示すが、推進剤流量を 4.76 mg/s に増加した時のガードリング電流率の増加は 1%以内であることがわかる。ここで、推進効率およびガードリング電流率が推進剤流量に対して線形と仮定した場合、gap=24 で推進効率 60%を達成するために必要な推進剤流量を計算すると、8.7 mg/s 程度となり、またこの時のガードリング電流率は 5%程度となる。しかし、推進剤流量を 8.7 mg/s 程度まで大幅に増加させると、2 価イオン生成が増加するなどの推進効率の悪化を引き起こすと考えられる。また、推進剤流量を 8.7 mg/s とした場合の投入電力を

考えると、本実験で使用した UT-58 の熱的制限である約 2.7 kW 程度の投入電力となる  
 ことがわかる。これより推進剤流量を増加させることによる推進効率を改善は、制限がある  
 ことがわかる。

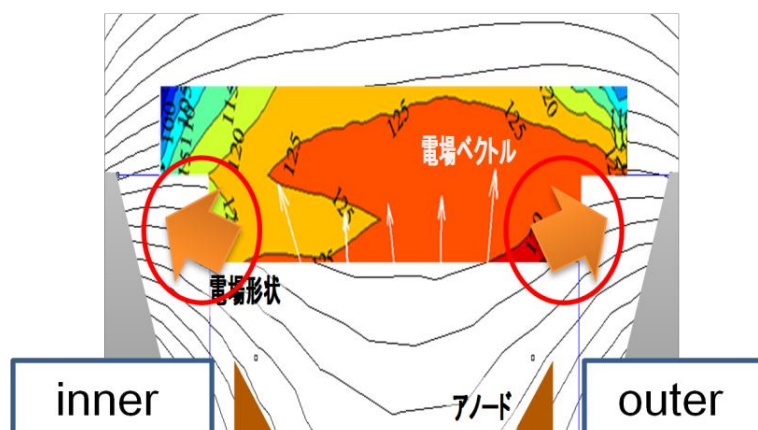


図 5.8 gap=14 におけるプラズマ電位分布[41]

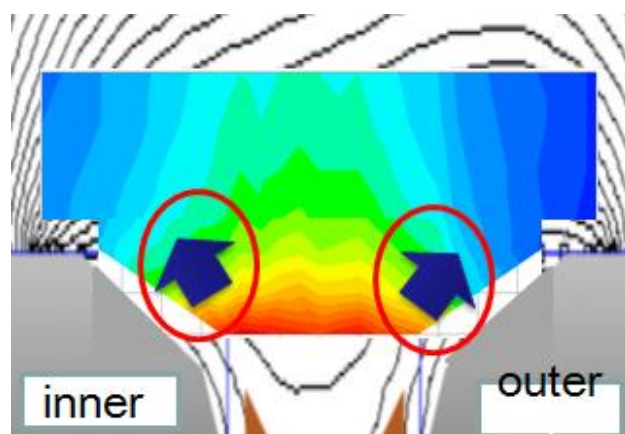


図 5.9 gap=24 におけるプラズマ電位分布[42]

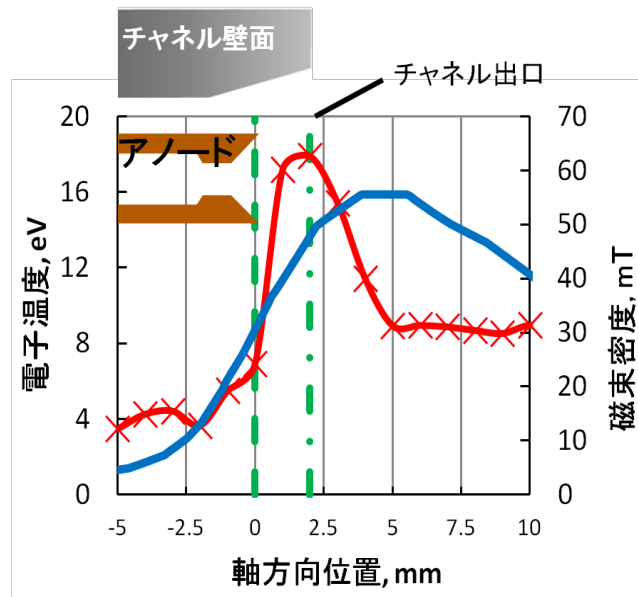


図 5.10 gap=14 におけるチャンネル中心軸上電子温度分布[41]

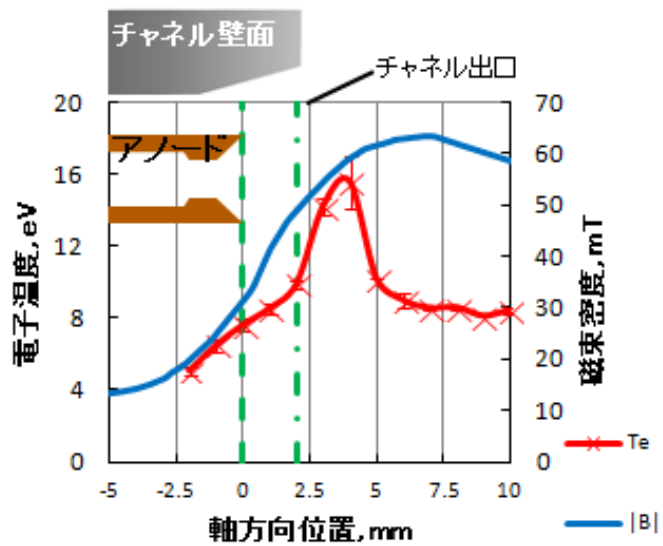


図 5.11 gap=24 におけるチャンネル中心軸上電子温度分布[42]



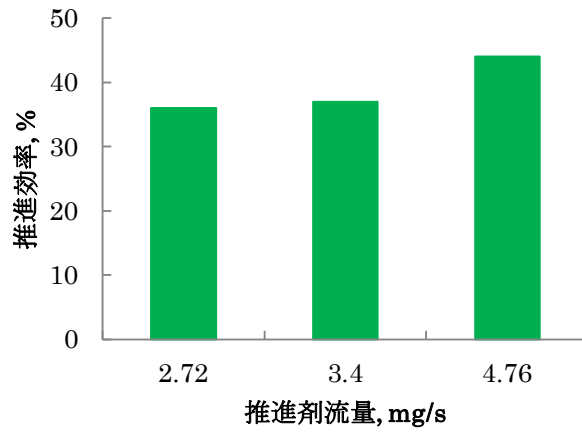


図 5.12 gap=24 における推進剤流量に対する推進効率  
(放電電圧: 250 V)

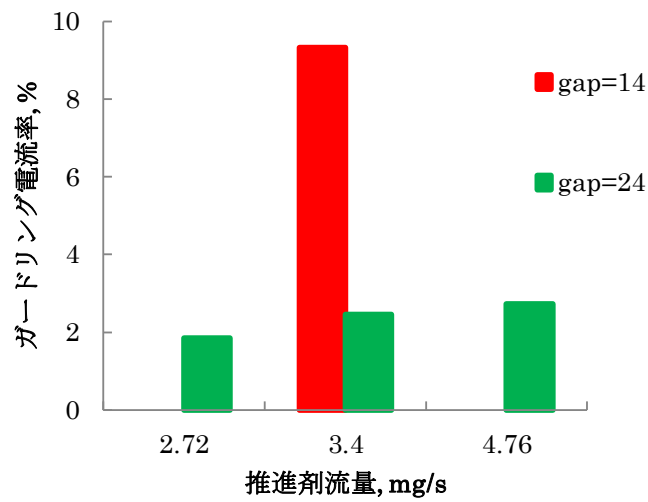


図 5.13 gap=24 における推進剤流量に対するガードリング電流率  
(放電電圧: 250 V)

### 5.3 トレードオフ

アノードレイヤ型スラスタ UT-58 にマグネティックシールディングを搭載することによるガードリング電流率の低減効果は、同時に推進効率の低下を引き起こす。推進効率とガードリング電流率の関係を図 5.14 示す。マグネティックシールディングを搭載しない従来の磁場形状、壁面形状である gap=14 においてガードリング電流率の低減と推進効率はトレードオフにあることがわかる。マグネティックシールディングを搭載することで、同推進効率でよりガードリング電流率の小さい作動点をを選べるようになった。

図 5.15 に本実験でし使用したアノードレイヤ型スラスタ UT-58 とロシアの TAL 型スラスタの主な D シリーズとの比較を示す。D シリーズにおける数字はそのチャンネル内平均径を表す。UT-58 の gap=19 は、ほぼ同じチャンネル平均径 D-55 と比較して、ほぼ同じ推進効率であり、同投入電力においてより高い推進効率を達成している。このことから、gap=19 は同サイズのアノードレイヤ型スラスタとほぼ同等の推進効率を維持しながら、ガードリング電流率の低減を実現できたと言える。

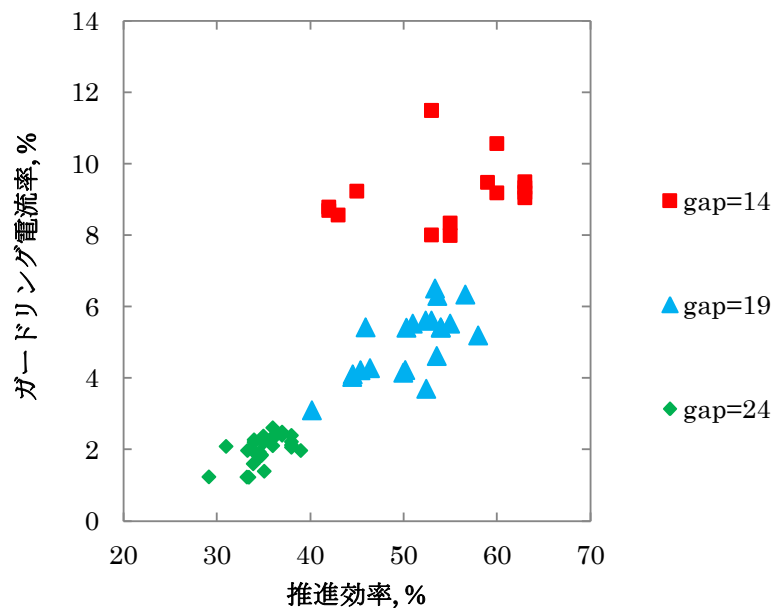


図 5.14 推進効率とガードリング電流率の関係

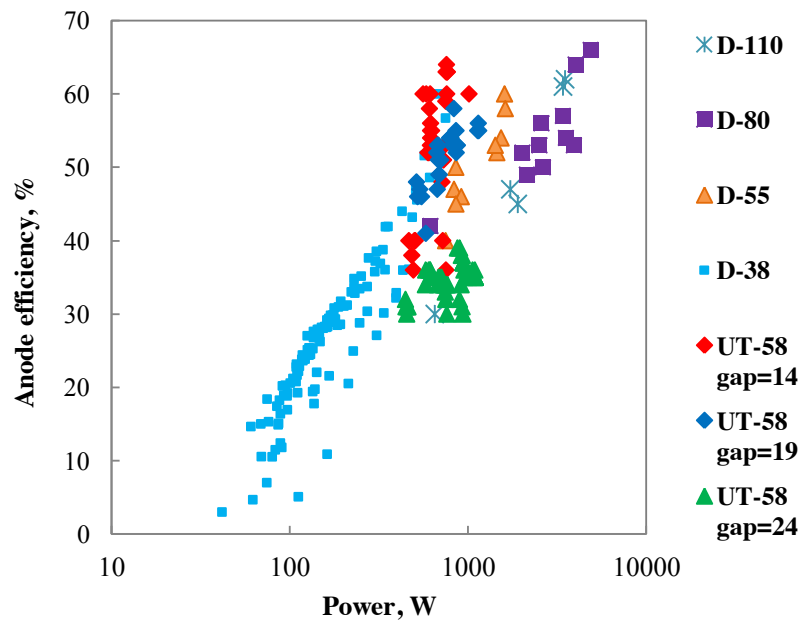


図 5.15 主な TAL 型スラスタとの比較

## 第 6 章

### 結論

マグネティックシールドリングをアノードレイヤ型スラスタに搭載し、ガードリング電流率および推進効率を測定することで、アノードレイヤ型スラスタに応用した際の効果の検証を行った。

結果として、以下のことがわかった。

1. マグネティックシールドリング磁場形状、壁面形状を搭載することで、ガードリング電流率が低減された。
2. ガードリング電流率と推進効率はトレードオフとなった。
3. マグネティックシールドリングにより、同推進効率でより、ガードリング電流率の小さい作動点を選択できるようになった。

本研究により、マグネティックシールドリングをアノードレイヤ型スラスタに搭載した際、ガードリング電流率の低減を確認した。また、推進効率はやや犠牲となるが、 $gap=19$ においては、本実験で使用したスラスタとほぼ同じサイズのアノードレイヤ型スラスタとほぼ同等の推進効率 57% を達成しながら、ガードリング電流率の低減を確認した。よって、マグネティックシールドリングのアノードレイヤ型スラスタへの応用は有効だと考えられる。

## 謝辞

本研究を進めるにあたり、多くの方々にお世話になりました。この場をお借りして感謝の意を表したいと思います。

指導教員であります小紫公也教授には心より深く感謝しております。大学院2年間にわたり、熱心にご指導ご鞭撻下さりました。企業や研究施設等、学外で実験する機会も数多く頂き、多くの事を学ばせていただきました。特に宇宙研でトラブルが起こった際の先生の迅速な対応から、常に自らあらゆる場面を想定しかつ、不測の事態にも適切な対処法を導き出す重要性を身を持って学ばせて頂きました。トラブルを解決できそうな道筋が立ち、少しほっとしていた私に、「もしここが東大から電車で1時間の宇宙研ではなくて、アメリカだったらどうしてた?」と言われた一言は、とても衝撃的でした。常に2歩3歩先を想定し示して下さる先生のご指導は、1歩先を自ら考えられるように私を成長させて下さりました。留学生等もたくさん在籍し、研究、そして研究以外においても活発で規律のあるこの研究室に2年間在籍することができ、大変喜ばしく感じています。そして、研究室のこの雰囲気を作り上げてくださっていらっしゃいます小紫先生に大変感謝致します。2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も最大限の感謝を致します。輪講において、鋭いご指摘に数々の助言を頂きました。また研究以外の場においても、交流を持って頂く機会を頂き、知識の広さや考えの深さに感銘を受けておりました。研究はもちろんのこと、研究以外においても大変活気に満ちた小泉先生の近くで大学院生活を過ごせたこと、大変光栄に思っております。ありがとうございました。

博士課程3年の川嶋嶺さんには感謝してもきれないほど、一番の感謝をしています。いつもの確なアドバイスや助言を頂きました。研究に関する内容だけではなく、その姿勢や、考え方など数え切れないほどたくさんの事を川嶋さんから教えていただきました。本論文は川嶋さんなしでは完成させることが出来なかったと思います。全ての輪講発表後にコメントを下さり、また私の稚拙な原稿を何度も丁寧にご指導して下さいました。本郷から柏への実験装置の運搬を何度も手伝って頂き、またそのサポートを全ての移動の際にして頂きました。書ききれないほど川嶋さんにはお世話になりました。研究以外の場でも、食事の時間等楽しい時間を川嶋さんと過ごすことができました。至らぬことが多い私に、限りないほどの助言を頂きましたこと、心より感謝しています。本当にありがとうございました。

Tony Schönherr 助教授さんにはホール輪講の場でたくさんのアドバイス、助言を頂きました。また原稿のコメントを頂きました。大いに感謝しています。小林さんにも大変お世話になりました。

同じ研究班の赤木将平くん、平野雄也くん、上本一樹くん、朴俊輝さん、Simon KÖNIGくん、そして先輩である藤田大樹さん、伊藤裕樹さんにも大いに感謝しております。藤田さん、裕樹さんには実験についてあらゆることを教えていただきました。ホールスラスタについて何も知らない私に、実験のいろはから教えて頂き、やさしくご指導頂けたこと、大変感謝しております。赤木くんにもこの上ない感謝をしています。この2年間、隣の席で研究の話だけではなく、研究以外の話もたくさんしました。研究や物理に関して、赤木くんにはたくさん教えてもらいました。自分よりはるかに優秀な赤木くんの横で、勉強させられることがしょっちゅうでした。でも、いつでも気さくに相談に乗ってくれ、サポートしてくれました。新しいこの研究室に入って、何でも気さくに話せる同期に巡り会えて、研究以外でも楽しい研究室生活を送ることができたのも赤木くんのおかげです。ありがとうございます。平野雄也くん、上本一樹くん、朴俊輝さん、Simon KÖNIGくんにはホール輪講を通してたくさんのアドバイスをもらいました。また率直な疑問をぶつけてもらい、研究を進めていく上で良い刺激となりました。特に平野くんには実験の面で多くのサポートをしてもらいました。感謝しています。

研究室の先輩、後輩の皆様にも感謝しています。普段の輪講だけではなく、研究室旅行や飲み会等で楽しい時間を共有させていただきました。

そして、研究室の同期である横手くん、Natくん、稲垣くん、笠木くん、名古くんに感謝いたします。研究室で同じ時間を過ごし、時にはくだらない事で盛り上がりました。特にNatくんとは、研究室旅行で大島を自転車で1周したり、忘年会後に成田空港までパスポートを持って追いかけたり等、良い思い出がたくさん出来ました。ありがとうございます。

今まで応援してくれてくれた両親、家族、親戚に感謝しています。人より長い学生生活でしたが、特に両親は、いつも私の進む道を応援してくれ、サポートしてくれました。有意義な学生生活を送ることができたのは、紛れもなく両親のおかげでした。ありがとうございました。

最後に、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。

2015年2月  
鈴木淳

## 参考文献

1. 栗木恭一, 荒川義博: 電気推進ロケット入門, 東京大学出版会, 2003.
2. Ronald W. Humble, Gary N. Henry, Wiley J. Larson,: Space Propulsion and Design, Learning Solutions, 1995.
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., Estublier, D.: The SMART-1 Hall Effect Thruster Around the Moon: In Flight Experience, IEPC Paper 2005-119,2005.
5. Dumazert, P., Verdier, S. L., Marchandise, F., Koppel, C. R., Garnero, P. and Blame F.: PPS-1350-G Qualification Status March 2003, IEPC Paper 2003-270, 2003.
6. Marchandise, F. R., Biron, J., Gambon, M. Cornu, N., Darnon, F. and Estublier D.: The PPS 1350 qualification demonstration 7500h on ground, about 5000h in flight, IEPC Paper 2005-209,2005
7. Ozaki, T., Kasai, Y., Inanaga, Y., Nakagawa, T., Osuga, H., Itoh, T., Kajiwara, K. and Matsui, K.: Electric Propulsion Development Activity at MELCO. AIAA Paper 2006-4321, 2006.
8. Zhurin, V. V., Kaufman, H. R. and Robinson, R. S.: Physics of closed drift thrusters, Plasma Source Science and Technology, 8 (1999), R1-R20.
9. Kim, V., Popov, G., Arkhipov, B., Murashko, V., Gorshkov, O., Koroteyev, A., Garkusha, V., Semenkin, A. and Tverdokhlebov, S.: Electric Propulsion Activity in Russia, IEPC Paper 2001-005, 2001.
10. Semenkin, A. V., Tverdokhlebov, S. O., Garkusha, V. I., Kochergin, A. V., Chislov, G. O., Shumkin, B. V., Solodukhin, A. V. and Zakharenkov, L. E.: Operating Envelopes of Thrusters with Anode Layer, IEPC Paper 2001-013, 2001.
11. Yim, J. T., Keidar, M. and Boyd, I. D.: And Evaluation of Sources of Erosion in Hall Thrusters, AIAA Paper 2005-3530, 2005.
12. Choueiri, E. Y.: Fundamental Difference between the Two Hall Thruster Variants, Physics of Plasma, 8 (2001), pp. 5025-5033.
13. Semenkin, A., Kochergin, A., Garkusha, V., Chislov, G. and Rusakov, A.: RHETT/EPDM Flight Anode.
14. Manzella, D., Oleson, S., Sankovic, J., Haag, T., Semeskin, A., Kim, V.: Evaluation of low

- power Hall thruster propulsion, AIAA Paper 1996-2736, 1996.
15. Ashkenazy, J., Raitses, Y., Appelbaum, G.: Low Power Scaling of Hall Thrusters, ESPC Paper, 1997.
  16. Semeskin, A.: Demonstration Tests and an Anode Analysis of Critical Issues Associated with Low Power TAL, 2000.
  17. W. Eagle, *et al.* , "The Erosion Prediction Impact on Current Hall Thruster Model Development" 44th JPC, 2008.
  18. 山本直嗣:ホールスラストの放電振動に関する研究, 東京大学, 2003, 博士論文.
  19. Ozaki, T. et al., "Electric Propulsion Development Activity at MELCO," in 42nd AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference & Exhibit, Sacramento, 2006, p. 4321.
  20. Garner, C. E. et al., "Experimental Evaluation of Russian Anode Layer Thrusters," in 30th ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference & Exhibit, Indianapolis, 1994, p. 3010.
  21. Nakles, M. R. et al., "A 205 Hour Krypton Propellant Life Test of the SPT-100 Operating at 2 kW," in 33rd International Electric Propulsion Conference, Washington, D.C., 2013, p. 347.
  22. Grys, K. d. et al., "Demonstration of 10,4000 Hours of Operationi on a 4.5 kW Qualification Model Hall Thruster," in 46th AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference & Exhibit, Nashville, 2010, p. 6698.
  23. Hofer, R. R. et al., "Wear Test of a Magnetically Shielded Hall Thruster at 3000 Seconds Specific Impluse," in 33rd International Electric Propulsion Conference, Washington, D.C., 2013, p. 033.
  24. 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, Jan. 2013.
  25. Huang, W. , Gallimore, A. D., "A Low-Cost Optical Approach to Evaluate the Life Time of Hall Thruster Discharge Channel," in 48th AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference & Exhibit, Atlanta, Aug. 2012, p. 4035.
  26. Cho, S. et al., "Channel Wall Erosion Modeling of a SPT-Type Hall Thruster," *Transaction of the Japan Society for Aeronautical and Space Sciences*, vol. 10, pp. Pb25-Pb30, 2012.
  27. Eagle, W. E. et al., "The Erosion Prediction Impact on Current Hall Thruster Model Development," in 44th AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference & Exhibit, Hartford, 2008, p. 5087.
  28. Yamamoto, N., Nakashima, H., Yalin, A. P., "Dependence of Lifetime on Magnetic Field Configuration in a Hall Thruster," in 48th AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference & Exhibit, Georgia, Aug. 2012, p. 3791.
  29. Mikellides, I. G. et al., "Magnetic Shielding of the Channel Walls in a Hall Plasma Accelerator," *Physics of Plasmas*, vol. 18, p. 03350, Mar. 2011.
  30. Mikellides, I. et al., "Design of a Laboratory Hall thruster with Magnetically Shielded Channel



- Walls, Phase III Comparison of Theory with Experiment," in 48th AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference & Exhibit, Atlanta, Aug. 2012, p. 3789.
31. R. Hofer, et al., "Design of a Laboratory Hall Thruster with Magnetically Shielded Channel Walls, Phase II: Experiment," 48th JPC, 2012.
  32. 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," 東京大学工学部 航空宇宙工学科荒川・小紫研究室, 2010.
  33. 細田誠也, "ホールスラスタ高精度寿命評価法," 東京大学, 2012, 修士論文.
  34. Yamamura, Y., Tawara, H., "Energy Dependence of Ion-Induced Sputtering Yields from Monoatomic Solids at Normal Incidence," Atomic Data and Nuclear Data Table 62, 149-253, 1996.
  35. Maris A. Manteniaks, al. "Sputtering Threshold Energies of Heavy Ions," IEPC-97-187
  36. D. Rosenberg, "Sputtering Yields for Low Energy He<sup>+</sup>, Kr<sup>+</sup>, and Xe<sup>+</sup> Ion Bombardment," J. Appl. Phys. 33, 1842, 1962
  37. 藤田大樹: Scaling Law for Argon Anode Layer Hall Thrusters, 東京大学, 2013, 修士論文.
  38. Goebel, D. M., Crow, J. T. and Forrester, A. T.: Lanthanum hexaboride hollow cathode for dense plasma production, Review of Scientific Instruments, 49 (1978), pp. 469-472.
  39. Dan M. Goebel and Emily Chu: High Current Lanthanum Hexaboride Hollow Cathode for 20-to-100 kW Class Hall Thrusters, AIAA-2012-4079, 48th JPC, Atlanta, July 2102.
  40. N. Nagao, S. Yokota, K. Komurasaki, and Y. Arakawa: Development of a 2D Dual Pendulum Thrust Stand for Hall Thrusters, Review of Scientific Instruments, Vol. 76, 115108, 2007.
  41. 伊藤裕樹: Electric Field Measurement in a Channel for the Realization of a Zero-Erosion Hall Thruster, 東京大学, 2013, 修士論文.
  42. 平野雄也, 鈴木淳, Tony Schönherr, 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タにおける Magnetic Shielding の効果の検証,"第 58 回 宇宙科学技術連合講演会,長崎 m 2014, 1L10, 発表資料.

## 学術論文、学会発表

- [1] 鈴木淳, 藤田大樹, 伊藤裕樹, Schönherr, Tony, 川嶋嶺, 赤木将平, 小紫公也, 小泉宏之, “アノードレイヤスラスタ UT-58 のアルゴン推進剤高電圧動作特性,” 第 57 回宇宙科学技術連合講演会, 鳥取, 2013, p.P05.
- [2] 藤田大樹, 川嶋嶺, 伊藤裕樹, 赤木将平, 鈴木淳, Tony Schönherr, 小泉宏之, 小紫公也, “アルゴンアノードレイヤ型ホールスラスタの作動特性,” 平成 25 年度宇宙輸送シンポジウム, 神奈川, 2014, p.STEP-2013-054.
- [3] T. Schönherr, D. Fujita, Y. Ito, P. Bambach, J. Suzuki, R. Kawashima, H. Koizumi, and K. Komurasaki, “Performance evaluation and probe measurements of argon-based high-power thruster with anode layer UT-58,” Asian Joint Conference on Propulsion and Power 2014, Mar. 2014.
- [4] Daiki Fujita, Rei Kawashima, Yuki Ito, Shohei Akagi, Jun Suzuki, Tony Schönherr, Hiroyuki Koizumi, Kimiya Komurasaki, “Operating parameters and oscillation characteristics of an anode-layer Hall thruster with argon propellant,” Journal of Vacuum, Aug. 2014.
- [5] 平野雄也, 鈴木淳, Tony Schönherr, 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タにおける Magnetic Shielding の効果の検証,” 第 58 回宇宙科学技術連合講演会, 長崎 m 2014, 1L10.
- [6] 赤木将平, 川嶋嶺, 鈴木淳, Tony Schönherr, 小泉宏之, 小紫公也, “粒子法を用いた UT-58 ホールスラスタ解析,” 第 58 回宇宙科学技術連合講演会, 長崎 m 2014, 1L03.