

200 W 級ホールスラストの推進性能向上に関する研究

長野, 公勇
九州大学大学院総合理工学府先端エネルギー理工学専攻

<https://hdl.handle.net/2324/4150476>

出版情報 : Kyushu University, 2018, 修士, 修士
バージョン :
権利関係 :



平成30年度
九州大学大学院 総合理工学府
先端エネルギー理工学専攻

修士論文

論文名

200 W 級ホールスラストの推進性能向上
に関する研究

氏 名

長野 公勇

指導教員名

山本 直嗣

目次

第1章 序論	1
1.1 研究背景	1
1.2 研究目的	3
第2章 原理	5
2.1 ホールスラスタ	5
2.1.1 作動原理と内部構造	5
2.1.2 基本設計	7
2.1.3 ホールスラスタの分類	8
2.1.4 放電電流振動	10
2.2 推進性能評価	13
2.3 非平滑チョッパ型電源	17
2.4 磁場形状	19
第3章 実験装置	24
3.1 真空排気系	24
3.2 推進剤・作動ガス供給系	25
3.3 電源系	26
3.4 ホールスラスタの仕様	26
3.5 電子源	29
3.5.1 ホローカソード	29
3.5.2 マイクロ波放電式カソード	31
3.6 計測系	31
3.6.1 スラスタスタンド	31
3.6.2 イオンコレクタ	33
3.6.3 3次元トラバース機構	35
3.6.4 記録系	36
第4章 実験結果・考察	38
4.1 磁場の評価	38
4.1.1 実測値と計算値の比較	38
4.1.2 磁場形状依存性	39
4.2 推進性能評価	40
4.2.1 推進剤流量依存性	40
4.2.2 イオンコレクタによるビーム電流測定	42
4.3 推進性能の向上	45
4.3.1 アノード形状依存性	45

4.3.2 電子源.....	48
4.3.3 Volterra Engine による作動.....	49
第 5 章 結論	51
謝辞.....	53
参考文献	54
付録.....	57
A 放電室内における推進剤ガスの不均一による性能への影響	57

第 1 章 序論

1.1 研究背景

1950 年代，人類にとって初めての人工衛星「スプートニク」が旧ソビエト連邦によって打ち上げられ，人類による本格的な宇宙開発が始まった¹⁾．国家の威信と国防を懸けた宇宙開発競争は激化し，「アポロ計画」や「ミール宇宙ステーション」など国家主導の大型プロジェクトが推進されてきた．しかし，東西冷戦の終結以降，宇宙開発の流れは一変した．国家主導の大型プロジェクトの規模は縮小され，民生技術の向上により民間によるプロジェクトへ移行されたのである．それから今日まで，世界中で様々な人工衛星が打ち上げられており，通信衛星や GPS 衛星，気象衛星のように私たちの日常の近くでその恩恵を与えている．その中で，21 世紀に入り小型の人工衛星（～数百 kg）の打上げが急激に増加している²⁾．民間によるプロジェクトに移行したことでコストの抑制が第一に考えられ，小型の人工衛星を短期間で開発するようになったためである．小型軽量にすることで打上げコストが抑えられ，開発の短期化により開発費が低コスト化した．また，近年では人工衛星の開発に大学等の教育機関も参入し打上げ実績も挙げている³⁾．

このように宇宙開発では小型の人工衛星が近年のトレンドであり，将来的に様々なミッションが遂行されると考えられる．その中でも，小型衛星コンステレーションが現在注目されている．小型衛星コンステレーションとは複数（数十機から数百機単位）の小型衛星で編隊を組み，運用していくプロジェクトである²⁾．運用の実現が達成されると世界中で安定した高速通信が可能となることや観測衛星によるデータの送信頻度が高まり即時性が上がると期待されている．その他にも宇宙開発の活発化に伴い問題化しているスペースデブリに対して，小型衛星を利用して除去するプロジェクトが存在する²⁾．スペースデブリとは，軌道上で制御不能である人工物体を指しており，具体的には打上げロケットの最上段や運用を終えた衛星，その破片等が挙がる．これらのデブリは数 cm のものも

含めると何千万という数が存在し、かつ秒速約 7 km の速度を持つ。そのため、衝突の際のエネルギーは大きく、深刻な被害が生じる。そこで、スペースデブリの除去を行うために、小型衛星による除去ミッションが進行中である。

今後、小型衛星を様々なミッションで運用する上で推進機が非常に重要であると考えられる。推進機は人工衛星の軌道制御や姿勢制御に用いられており、人工衛星の運用期間は推進機に搭載する燃料によって左右されるからである。したがって、燃費のよい推進機を搭載することは長期のミッションを遂行する上で重要となる。そこで、燃費のよい推進機として電気推進が挙げられる⁵⁾。電気推進は燃料である推進剤を電気エネルギーによって電離させ、生成したプラズマ中のイオンを様々な形で加速・排出し、反作用として推力を得る。電気推進の推力自体はロケット等に用いられる従来の化学推進と比べ小さいことから、宇宙空間における運用にのみ使用されているが、推進機における燃費を表す比推力は 10 倍以上であり、推進剤の節約という観点からみると非常に優秀である。

電気推進には静電加速型であるイオンスラスタや電熱・電磁加速型であるアークジェットスラスタ、MPD (Magneto-Plasma-Dynamic) スラスタ、ホールスラスタなどがある。図 1.1 に各種推進機の推力密度(噴出口単位面積当たりの推力)と比推力の関係を示す⁵⁾。Oneweb や SpaceX で計画されている小型衛星コンステレーションやスペースデブリ除去衛星では数百 kg 程度の衛星で計画されており、ミッションに対しての要件として、高推力密度と高比推力の両立が挙がる。比推力は勿論のこと推力を確保しつつ小型化できるかが重要となる。つまり、低電力で高い推力密度が必要となり、図 1.1 からではホールスラスタか MPD スラスタが適していると考えられる。しかしながら、MPD スラスタは電力の消費が大きく小型衛星に適しているとは考えられない。したがって、今後の宇宙開発における小型衛星に搭載する推進機としてホールスラスタが最も適しているのではないかと考えられる。

ホールスラスタは旧ソビエト連邦が開発してきた電気推進である。イオンの

加速領域に電子が存在するため，空間電荷制限則を受けることなく推力密度を高くできる．結果として，スラスタを小型化できる⁶⁻⁸⁾．また，長寿命化も期待でき，1500-2000 秒の比推力領域において 50%以上の高い推進効率が達成可能であり結果として推力電力比を大きく取れる⁹⁾．しかし，ホールスラスタは小型化に伴い，プラズマ体積と壁面との接触面積の比が大きくなり壁面におけるプラズマの損失が増加し，性能低下が起こる．また，加速されたイオンが壁面に衝突することでスパッタされ，壁面の損耗による推進機の劣化の問題等も存在する．

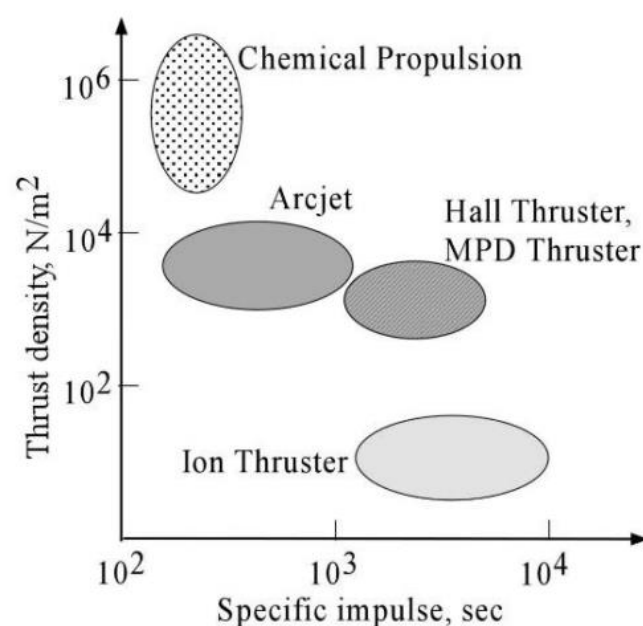


図 1.1 各種推進機の推力密度と比推力の関係⁵⁾

1.2 研究目的

本研究では 200 kg のスペースデブリ除去用小型衛星を仮定して，推進機に 200 W 程度の電力供給が見込めるとした 200 W 級ホールスラスタの開発を行う．実

際に実用化されている同級のホールスラスタの性能を指標にする．いくつか纏めたものを表 1.1 に示す．表 1.1 に示されているように 200 W 級のホールスラスタは実用化されているものの，その寿命は軌道遷移を複数回実行できるように設計されていない．また，デブリ除去ミッションでは単機の衛星で複数のデブリ除去を行うため，衛星が複数回の軌道遷移を行う必要がある．そこで，本研究では実用化されているホールスラスタと遜色のない推進性能（推力 10 mN，比推力 1500 s 程度）を備え，かつ複数回の軌道遷移を達成できる寿命を持つホールスラスタの開発を目指す．最初は開発したスラスタの現状における推進性能を把握し，最適な作動条件を探す．その後，スラスタの部品，電源，電子源などの推進性能に関わる部分で性能向上を図った．

表 1.1 実用化されている 200 W 級ホールスラスタ

	推力 [mN]	比推力 [s]	推進効率 [%]	寿命 [hr]
BHT-200 ²⁸⁾	13	1375	44	1700
HT-100 ²⁹⁾	8.5	1470	35	1150
ACE(300 W) ³⁰⁾	16	1040	33	2600

第2章 原理

2.1 ホールスラスタ

2.1.1 作動原理と内部構造

図 2.1 にホールスラスタの内部構造の概略図を示す⁵⁾。図に示すようにホールスラスタは単純な構造をしており、円環状のプラズマ加速部（チャンネル）とチャンネル内に電場を与えるアノード、放電を誘起させるための電子を供給するカソード、チャンネル内の電子の拡散に関わるチャンネル壁、磁場を与える磁気回路によって構成される。荷電粒子が磁場にトラップされる現象（ラーマ運動）を利用しプラズマ生成を促し、イオンと電子のラーマ半径長の違いからイオンのみを排出することを可能としている。カソードから放出された電子はアノードに向かって拡散していきプラズマ生成を誘起させるが、磁気回路により半径方向に磁場が印加されているチャンネル内において、電子はアノードによる軸方向電場との相互作用で周方向へドリフトする。これを $\mathbf{E} \times \mathbf{B}$ ドリフトと呼び、ドリフトによって生じる周方向電流をホール電流と呼ぶ。そして、このホール電流と半径方向磁場との相互作用により生じるローレンツ力によって上流へと拡散する電子を妨げ、加速チャンネル内部に電子を閉じ込める。印加している電位に対して加速チャンネル内部で電位の勾配が生じ、電場の集中を誘起させることでイオンを引き出している。図 2.2 に示すように、実際には加速に利用される正味の電位 V_b はビームの浮遊電位 V_p やカソードーグラウンド間電位 V_{cg} により印加した電位 V_d よりも低くなる¹⁰⁾。

このようにホールスラスタはその原理からイオン生成・加速領域において常に電子が存在しており、イオンスラスタのような電極間の高電場によってイオンのみを引き出すわけではないため、空間電荷制限則の影響を受けずに済む。結果として推力密度を大きくすることができる。

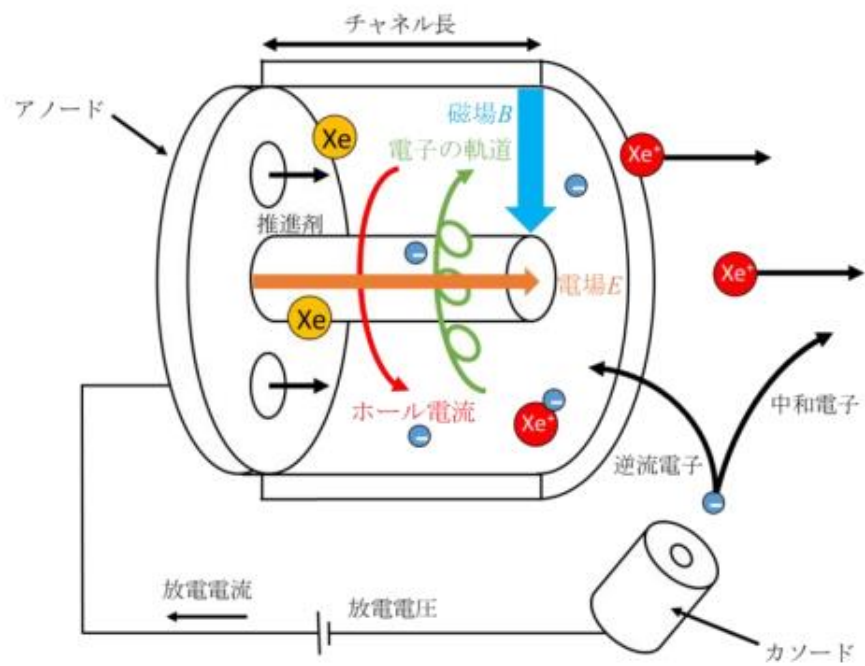


図 2.1 ホールスラスタの機構図

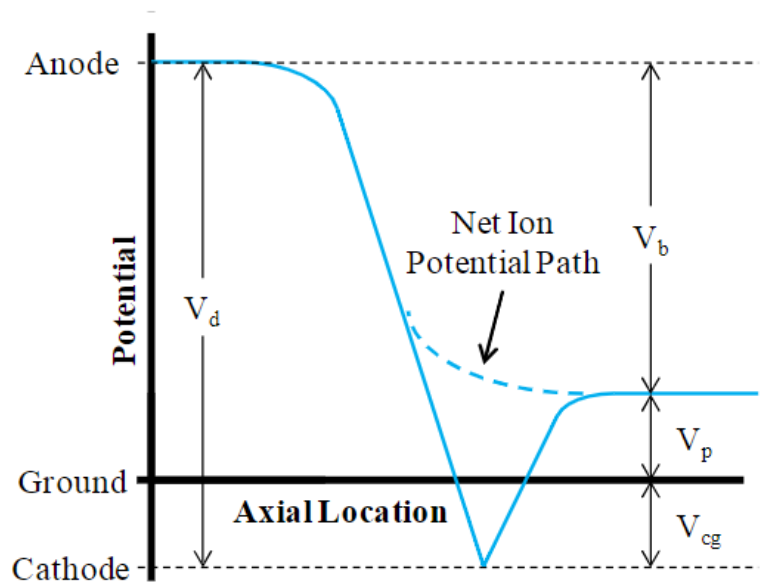


図 2.2 ホールスラスタの電位分布

2.1.2 基本設計

電子のみが周方向にドリフトしてホール電流が生じ、イオンは磁場の影響を受けることなく形成された電場によって加速され引き出される状態になるよう、加速チャンネルでは以下のような作動パラメータを条件として満たす必要がある。

$$\omega_e \tau_e \gg 1 \quad (2.1)$$

$$r_e \ll L \ll r_i \quad (2.2)$$

$$L \ll \lambda_m \quad (2.3)$$

ただし、 ω_e 、 τ_e は電子のラーマ周波数と衝突時間であり、その積はホールパラメータと呼ばれている。ホールパラメータは電子が一回衝突するまでにいくら旋回運動できるかを表しており、電子の拡散の指標となる。 r_e 、 r_i はそれぞれ電子とイオンのラーマ半径であり、 L はチャンネル長さ、 λ_m はイオンの平均自由行程を表す。式(2.1)では十分にホール効果が見込める条件であり、ホールパラメータの値が十分大きくない場合は拡散の頻度が高くドリフトによるホール電流とならずに上流へと電子が流れてしまうことになる。つまりプラズマ生成やイオンの加速に影響を与える。式(2.2)は電子をチャンネル内に閉じ込める一方でイオンは排出される条件である。このパラメータを満たさなければチャンネル内にイオンもトラップされてしまい推力を得ることができない。式(2.3)はイオンが他の粒子と衝突する前に排出されるかの条件である。チャンネル長さに対して十分な平均自由行程が得られない場合、イオンは加速されてもチャンネル内で中性粒子と衝突し、結果推力が得られないことになる。

これらの条件により、軸方向電場を E 、磁束密度を B 、電子密度を n_e とすると $\mathbf{E} \times \mathbf{B}$ ドリフトにより生じるホール電流密度 j は

$$j = en_e \frac{E}{B} \quad (2.4)$$

となり，これによるローレンツ力 F_h は

$$F_h = jB = en_e E \quad (2.5)$$

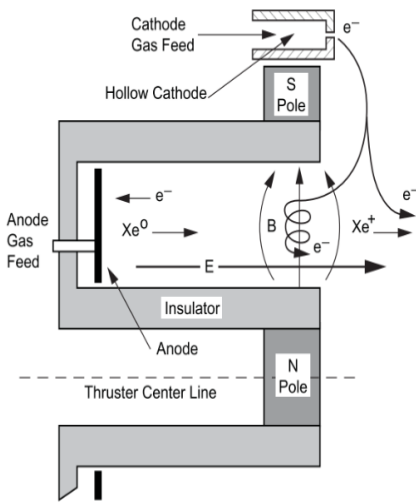
したがって，半径方向磁場によって電子の軸方向の動きを妨げ，軸方向への電場を維持することができることでイオンを静電的に加速するという静電加速型の推進機としての性質を持つ．また，スラスト自身は電子の軸方向の静電加速を打ち消すように働く式(2.5)のローレンツ力に起因して推力を得るという電磁加速型の推進機としての特徴を持つ．

2.1.3 ホールスラストの分類

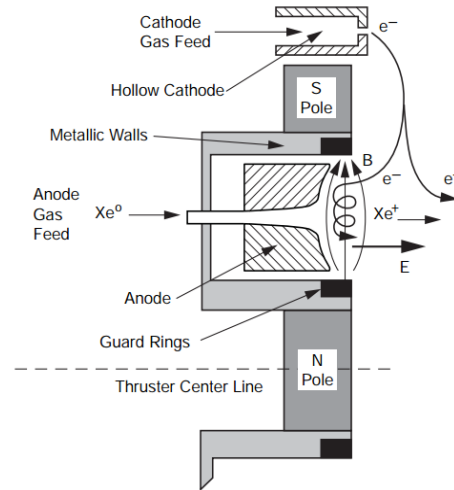
ホールスラストは旧ソビエト連邦によって開発され，1960年代に A. I. Morozov らによって開発されたマグネチックレイヤ型 (SPT : Stationary Plasma Thruster) と同時期に A. V. Zharinov らに開発されたアノードレイヤ型 (TAL : Thruster with Anode Layer) の二つが一般的な分類としてが存在している^{5),11-12)}．図 2.3 にその概要図を示す¹²⁾．二つのホールスラストの基本構造に違いはなく，プラズマが生成されるチャンネル内の誘電体絶縁壁の使用方法的違いから特性が異なる．打上げ可能レベルのホールスラストでは，壁面の材料は窒化ホウ素 (BN) や 窒化ホウ素とシリカゾルの混合物 (BN-SiO₂) が使用されており，研究室レベルでは酸化アルミ (AL₂O₃) が使用されることもある．これらの材料はスラスト作動時のイオンによる衝突時に発生するスパッタの影響を受けにくく，二次電子放出係数が低いという特徴がある．しかし，図 2.3 に示されているように，アノードレイヤ型では誘電体絶縁壁ではなく金属導体壁を用いている．また加速チャネ

ルの長さが短く、電場の領域が狭い。つまり、アノードの近傍でイオン加速が行われていることからアノードレイヤと名付けられている。アノードレイヤ型では電場の領域が狭いと述べたが、基本的なプラズマ生成やイオンの加速の過程は変わることはない。また金属導体であるチャンネル壁は磁気回路の一部と機能するだけでなく、カソード電位に保つことでイオン化領域において電子を追いつけている。追いつけることで、電子－電力損失の低減を可能としている。イオン衝突における損耗は大抵チャンネル壁で生じており、壁面の材料や設計方法によってスラスタの寿命が決まるといってもよいといえる。また、スラスタの排出口近くまで伸びたアノードは基本的に漏斗型にすることで推進剤や生成されるプラズマをチャンネル中心に拘束しつつ、磁力線に重ならないようにしている。これはアノードがプラズマの電子温度の高い領域に近接しているためであり、損失を抑えることに繋がる。

このようにアノードレイヤ型ではその構造から壁面との損失の低減が可能であり推進性能の高効率を実現できる。また、同時に壁面の損耗が抑制でき長寿命が期待できる。実際にマグネチックレイヤ型と比較すると同じパワーレベルではアノードレイヤ型の方が高効率で推力密度も高い。しかし、プラズマ生成領域の狭さから安定作動範囲が狭い。一方で、マグネチックレイヤ型では加速チャンネル長がチャンネル幅よりも長く設定されており、プラズマが安定して生成されやすいため、安定作動領域が比較的広い。そして、現在実用化されているホールスラスタの主流であり、宇宙空間での作動実績等により信頼性がある。そのため、作動実績を考慮し本研究においてはマグネチックレイヤ型を採用し開発を行った。



(a)マグネチックレイヤ型



(b)アノードレイヤ型

図 2.3 ホールスラスタの分類

2.1.4 放電電流振動

ホールスラスタの放電では，その放電にいくつかの振動現象を確認することができ，それぞれに固有の要因を持つ^{5),13)}．それらの放電電流振動はホールスラスタ内部における電子の拡散に深く関わり，作動安定性や推進性能において影響を与えることがわかっており，高性能化を目指すにあたり除去か抑制を行う必要がある．現在，放電電流振動の十分な解明はできていないが，作動パラメータの選定や推進剤供給方法，チャンネル形状，磁場形状などの推進機的设计による振動抑制の成功例が存在する¹⁴⁻¹⁵⁾．しかしながら，ホールスラスタは作動を繰り返すことで損耗が発生し，結果として振動現象の条件が時間経過とともに変化することに留意したい．本論文ではホールスラスタにおける電流振動現象として有力とされている，5 つについて説明を行っていく．

1. Ionization oscillation	:	10^4 - 10^5	Hz
2. Transit-time oscillation	:	10^5 - 10^6	Hz
3. Electron drift oscillation	:	10^6 - 10^7	Hz
4. Electron cyclotron oscillation	:	10^9	Hz
5. Langmuir oscillation	:	10^8 - 10^{10}	Hz

1 の振動は電離不安定性に起因する振動といわれている．この振動の振幅は他の振動と比べ一番大きく，スラスタ作動時に放電の維持が困難になり，作動の停止を招くことがある．安定にスラスタを作動させるためには，振動の影響が小さい作動領域を確保することが重要になる．また，振幅の大きさから電源系への負荷も一番大きく，故障や劣化に繋がる．

2 の振動はイオンが生成・加速され，加速チャンネル内を通り過ぎるときに生じている振動である．一般に印加されている磁場の強度に依存しているといわれているため，他のパラメータに対して影響が小さい¹⁶⁾．

3 の振動は電子のドリフト不安定性によるものと考えられており，周方向へのドリフトの際にチャンネル内に密度勾配が存在しているため発生している¹⁷⁾．周方向において磁場や推進剤の空間的な不均一がプラズマ生成後の密度勾配に繋がり，周方向電場を生み出す．その領域に電子が存在する場合，発生した周方向電場と元々印加されている半径方向磁場との相互作用を受け，チャンネル軸方向上流へドリフトする．つまり，アノードーカソード間の電子の導電率が高くなり，電子の閉じ込めが甘くなる．

4 の振動は電子のラーマ運動に起因するものと考えられており，その振動数は式(2.6)から求めることができる．

$$\omega_{ce} = \frac{eB}{m_e} \quad (2.6)$$

5 の振動はプラズマ中のイオンと電子の質量差より生じる慣性に起因するプラズマ振動として知られており、振動数は式(2.7)に示される⁵⁾。

$$\omega_p = \left(\frac{n_e e^2}{\epsilon_0 m_e} \right)^{1/2} \quad (2.7)$$

4, 5 の振動現象はプラズマと磁場を利用しているホールスラストである限り、必然的に発生してしまい回避ができない。また、1~3 の振動現象は電磁場の相互作用を利用しているホールスラスト固有のものである。

特に、電離不安定性によって生じる放電振動は捕食者と被食者の増減関係をモデル化した **Prey-Predator** モデルに起因している¹⁸⁾。図 2.4 に **Prey-Predator** モデルの解の例を示す。このとき、被食者は中性粒子、捕食者は電子で表される。モデルの一連の流れとして、はじめに放電室の内部で推進剤の電離が生じる。このとき推進剤の供給よりも先に、電離が進むため中性粒子密度は減少しプラズマ密度は増加する。次に、生成されたイオンは電界により加速・排出される。このときも、推進剤の流入が遅いことから、プラズマ密度が先に減少する。これにより電離の量が減り電子の数も少なくなる。この間に放電室内の推進剤の量が徐々に増え中性粒子密度は増加し始めるが、プラズマ密度の低い状態なので電離はあまり進まない。その後、はじめに戻り繰り返す。電離不安定性による放電電流振動はこのサイクルを繰り返しており、プラズマの増減は放電電流の振幅として確認できる。図 2.5 に放電電流振動波形の例を示す¹²⁾。SPT-100 と呼ばれるホールスラストの放電電流波形であり、約 17 kHz で振動している。この振動は推進剤流量や電圧、磁場により、その周波数が 10-30 kHz の範囲で変化する。

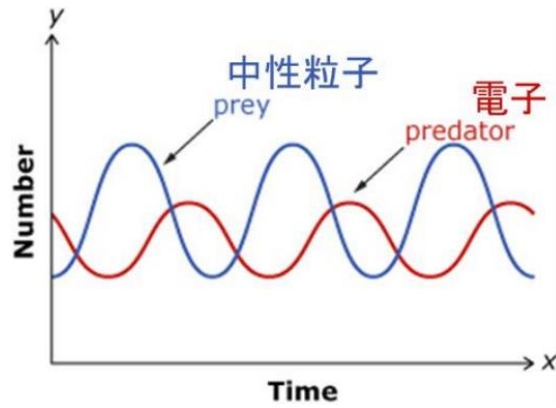


図 2.4 Prey-Predator モデル

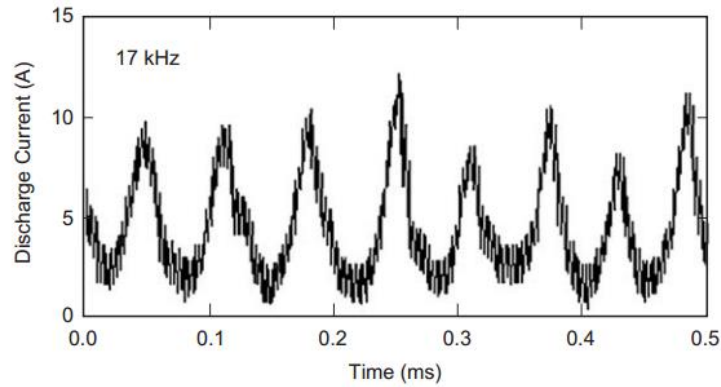


図 2.5 放電電流振動の例（SPT-100）

2.2 推進性能評価

ホールスラスタの推進性能は、スラストスタンドにより直接測定した推力に加え、推力から算出して求められる比推力、推進効率、推力電力比によって評価される⁵⁾。ホールスラスタの推進効率 η_t は以下の式で記述される。

$$\eta_t = \frac{F^2}{2\dot{m}P} \approx \frac{F^2}{2\dot{m}V_d J_d} \quad (2.8)$$

ここで F [N]は発生する推力, $\dot{m}$ [kg/s]は推進剤の質量流量, V_d [V]は放電電圧, J_d [A]は放電電流を表す. 推進効率とは電気推進機に投入した電力がどの程度推力発生の変換エネルギーに変換できたかを表す. 放電以外に消費される磁気回路の励磁エネルギーやホローカソードの消費電力は一般に小さいため, ここでは無視しても評価の妨げにはならない. また, 推進効率は内部効率の積で表すこともできる. 以下にこの評価法について述べる.

まず, 推力はスタンドで直接測定する以外に以下の式で表せる.

$$F = \eta_{div} \eta_{multi} \dot{m}_i v_b = \eta_{div} \eta_{multi} \frac{J_b \sqrt{2m_i E_m}}{e} \quad (2.9)$$

ここで η_{div} はイオンビームの発散, η_{multi} は多価イオンに依存する効率を示す. また $\dot{m}_i$ [kg/s]はイオンの質量流量, v_b [m/s]はイオンビーム速度, J_b [A]はイオンビーム電流, E_m [eV]はイオンビーム平均エネルギーである. この式から, 推力を上げるには投入した推進剤に対しどれだけ電離したかを表す推進剤利用効率を上げイオンビーム電流を大きくすることと, 電離したそれぞれのイオンを出来るだけ加速させてイオンビーム平均エネルギーを上げることが必要だと分かる. 式(2.8)に式(2.9)を代入すると以下の式を得る.

$$\eta_t = \eta_{div}^2 \eta_{multi}^2 \frac{J_b^2 m_i E_m}{\dot{m} V_d J_d e^2} \quad (2.10)$$

内部効率の一つとして加速効率 η_a を排出されたトータルイオンビーム電流 J_b [A]と放電電流 J_d [A]の比として次のように定義する.

$$\eta_a = \frac{J_b}{J_d} \quad (2.11)$$

この加速効率 η_a は静電加速型スラスタでは作動状態を表す重要なパラメータである。ホールスラスタでは推進剤の大部分がイオンとなり加速し、推力に寄与する。そのため、イオンビーム電流の比率を高めることが推進性能の向上にとって重要である。ホールスラスタの内部効率の中では加速効率が最も悪く 60 ~ 70 % 程度である。

次に、推進剤利用効率 η_u をトータルのイオンビーム電流と電流値として換算した推進剤流量 (Aeq.) の比として次のように定義する。

$$\eta_u = \frac{m_i J_b}{e \dot{m}} \quad (2.12)$$

これは、投入された推進剤のうち、どの程度が電離してイオンになり、イオンビームとして利用されているかを示すパラメータである。ただし、上式は 1 価イオンのみを前提としており、多価電離がある場合には実際よりも高めに見積もられる。

次にエネルギー効率 η_E は、イオンビームの平均エネルギーと放電電圧から、

$$\eta_E = \frac{E_m}{e V_d} \quad (2.13)$$

と定義される。このエネルギー効率は、イオンが放電電圧に相当する電位をどの程度加速に有効利用できたかを示すパラメータであり、一般的にチャネル上流のアノード近傍でイオンが生成されるほうが高くなる。以上の内部効率の式

(2.11), (2.12), (2.13)を式(2.10)に代入すると, 推進効率は次のように表される.

$$\eta_t = \eta_{div}^2 \eta_{multi}^2 \eta_a \eta_u \eta_E \quad (2.14)$$

次に, 比推力 I_{sp} [s]は次式で表される.

$$I_{sp} = \frac{F}{\dot{m}g} \quad (2.15)$$

ここで, g [m/s²]は重力加速度(9.8 m/s²)である. 比推力は推進機において燃費を表す値であり, この値が大きいほど長期ミッションへの運用に適していることを表す重要なパラメータの一つである.

また, 推力電力比は単位電力あたりに発生する推力を表したものであり, 式(2.8), (2.15)を用いて

$$\frac{F}{P} = \frac{2\eta_t}{gI_{sp}} \quad (2.16)$$

と表すことが出来る. 実際のミッションを想定して推進機を設計する場合, ある決まった比推力で, ある値の推力を得るにはどの程度の電力が必要か, または決められた電力でどの程度の推力を得られるかの簡単な見積もりが出来る有用なパラメータである.

2.3 非平滑チョッパ型電源

前述したように、電離不安定性による放電電流の振動現象はホールスラストの作動停止の要因になり、その振動の振幅の大きさから電源系へ負荷が掛かる。そのため、電源側の対策として電源容量を多めにしておく必要があり、結果として重量の増加を招く。しかし、放電電流振動はホールスラストの作動において不可避の現象であり、抑制することも容易ではない。

そこで、放電電流振動に対してのアプローチを一変させ、自然に発生する振動を抑制するのではなく作動停止しないことを念頭に置き、振動そのものを許容することとした。つまり、従来では電源に定電圧電源を使用していたところを振動に対して協調し、無理のない作動を行う電源システムを利用することにした。この電源システムは Prey-Predator モデルの考案者の名から「Volterra Engine」と名付けられた¹⁹⁾。実際にはパルス重畳電源の一つである非平滑化チョッパ型電源を使用しており、図 2.6 にその回路図、図 2.7 に概観を示す。本回路は出力電圧を入力電圧からその数倍まで変えることができる DC-DC コンバータの一つである²⁰⁾。スイッチングの信号によってオン・オフさせ、デューティ比を調整することで出力電圧を調整する。昇圧する過程を簡単に述べると、スイッチがオンのときダイオードによって出力側は切り離され、キャパシタからの放電によって負荷に電圧が掛かる。一方、入力側ではインダクタが短絡され、エネルギーが蓄えられる。そして、スイッチがオフになると入力電圧と共にインダクタに蓄えられていたエネルギーが出力側にかかる。同時にキャパシタに充電される。そして、再びオンになると、キャパシタから放電とインダクタにエネルギーを蓄えが繰り返され、結果として出力側は入力側より大きい電圧が掛かり続ける。デューティ比 0 から 1 で制御し入力電圧 V_{in} を印加したとき、出力電圧 V_{out} は以下の式 (2.8)により表すことができる。

$$V_{out} = \frac{1}{1 - duty} \cdot V_{in} \quad (2.8)$$

一般的に DC-DC コンバータにおいて、出力電圧への電圧交換際に出力側に容量が十分に大きいキャパシタを設けることで出力電圧は平滑化されている。しかしながら、Volterra Engine においては放電振動に対して協調するために出力側のキャパシタの容量を小さくすることで出力電圧の変動を許容し、平滑化をあえて行わない。従来の電源における設計思想と異なるが、平滑用キャパシタは不要であり、インダクタを減らすことができるため、電源の容量・重量も少なくすることができる²¹⁾。5 kW のホールスラストでは電源系の全重量における約 7 % にあたる、およそ 0.8 kg (キャパシタ 0.2 kg, インダクタ 0.6 kg) の軽量化が可能となる。宇宙機において至上命題である軽量化の面で大きな利点となる。

また、この電源システムを導入してホールスラストを作動させると、推進効率や推力電力比が定電圧電源使用時よりも向上することが確認されている¹⁹⁾。表 2.1 は両者の電源を用いた場合の性能を比較したものである。推力の維持と消費電力の削減が両立し、推進効率と推力電力比を高める結果であった。

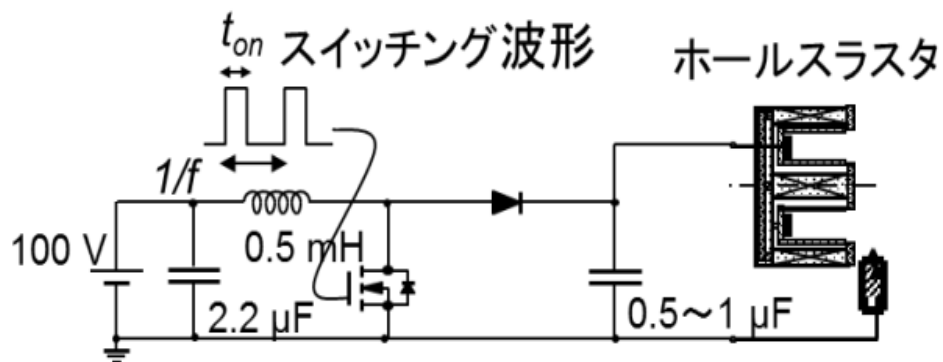


図 2.6 非平滑化チョッパ型電源回路

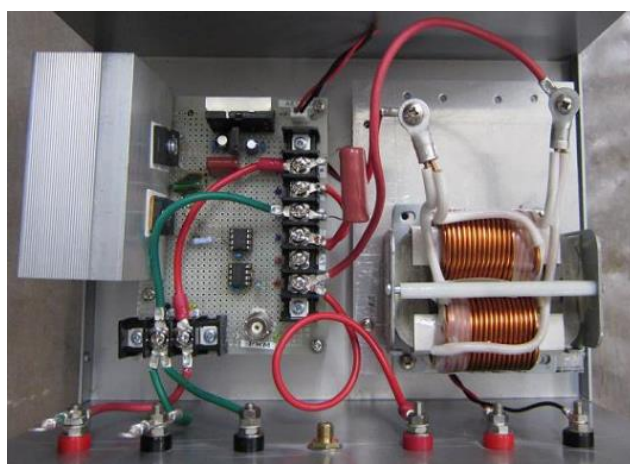


図 2.7 電源回路の概観

表 2.1 各電源における性能

電源	推力 [mN]	推進効率 [-]	推力電力比 [mN/kW]	消費電力 [W]
DC 電源	10.0	0.22	50	200
パルス重畳電源	9.5	0.26	57	166

※放電電圧 150V, チョッピング周波数 26kHz での比較

2.4 磁場形状

第 1 章で述べたように, これまでもいくつかの小型ホールスラスタが開発されてきた. しかしながら動作範囲は広範囲とはいえず, 600~1700 時間程度に寿命が制限されているのが現状である. 寿命制限の要因として, 加速チャネル壁へのイオン衝突による損耗が存在する¹⁰⁾. 図 2.8 においてシース電位によりイオンが加速される構造を示す¹⁰⁾. チャネル内部においてプラズマと壁面の間にはシース電位が形成され, 電子の大部分を追い返す. そのとき, 局所的に電位の変

化が生じることで壁面付近に存在するイオンを壁面へと加速させる．基本的にプラズマ密度が高い加速チャンネルにおいて，加速されたイオンの影響が集中し壁面や磁気回路に損耗が現れる．この現象はスラストの大きさに依存しておらず，小型化による厚みの小さいチャンネル壁では寿命の制限が顕著に現れている．

シース電位によるイオンの加速だけでなく，ホール効果で形成された電場による加速で壁面に衝突し損耗を生じさせる場合もある．

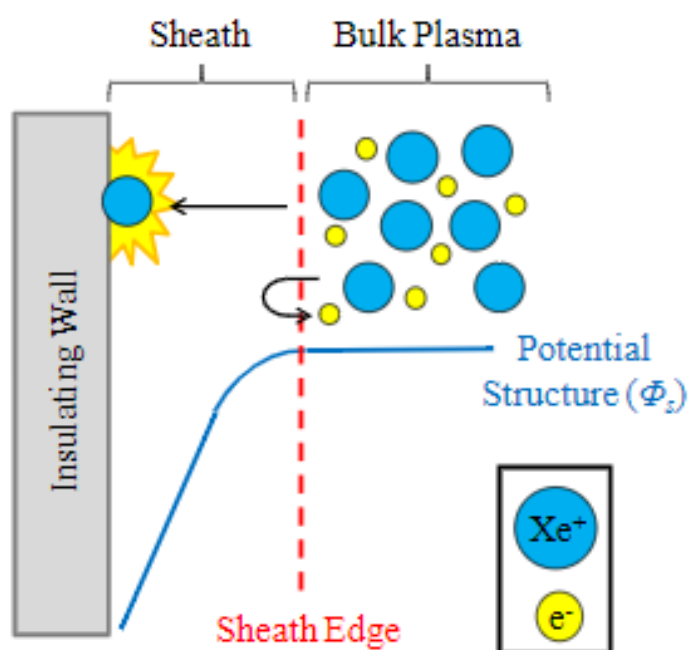


図 2.8 ホールスラスタ内部のシース構造

一方，近年，Magnetic shielding（以下 MS）という技術が注目をあつめている²²⁻²⁴⁾．これは BPT-4000 Hall thruster の寿命計測中に 6000 時間を超えても壁面が損耗されない事が確認されたためである²²⁾．すなわち電子源や電源により，寿命は制限されるが，イオンを排出するホールスラスタ本体の寿命はイオンエンジンの 30,000 時間と同等になり得る事が示された．様々な研究・開発機関が物理の解明に取り組むと共に，様々なサイズのスラスタへの適用が広がっている．

これを採用した小型ホールスラスタが完成すれば、小型衛星によっても ESA(欧州宇宙機構)の月探査機 SMART-1 と同様のミッションも可能となる。

図 2.8, 図 2.9 にそれぞれ従来型の磁場形状と MS 型の磁場形状を示す¹⁰⁾。従来型では磁力線が壁面を貫通・交差し、放電チャネル出口付近内部において電子のトラップが行われ電場を形成する。このとき、チャネル内の電子流における熱と質量の移動は磁場の垂直成分に比べ並行成分は非常に小さいことから、電子温度 T_e は磁力線沿いにおいて変化があまりないといえる。これを式(2.9)に示す。

$$\nabla_{\parallel} T_e \approx 0 \quad (2.9)$$

さらに、この方向成分における電子の運動量の式は電場への抵抗寄与がないとし、 n_e を電子密度とすれば式(2.10)となる。

$$E_{\parallel} \approx -T_e \nabla_{\parallel} \ln(n_e) \quad (2.10)$$

式(2.9), (2.10)によりホールスラスタの内部での磁力線における特性がもたらされる。

$$T_e \approx T_{e0} \quad (2.9)$$

$$\Phi \approx \Phi_0 + T_{e0} \ln(n_e/n_{e0}) \quad (2.11)$$

ここで、添え字 0 はチャネルの中心軸上での値を示している。つまり、各磁力線において、電子温度はほぼ等温であり、0 でない限り電位の変動が生じることを表している。その結果、磁力線が壁面と交差する部分において磁力線間の電位により壁面へのイオンの加速が生じる可能性がある。つまり、イオンは壁面をスパ

ッタするために十分なエネルギーを得ることになる。

そこで MS 型の磁場形状では磁力線がチャンネル内において壁面と交差することなく壁面に沿うように周りで湾曲している。式(2.9)により電子温度は磁力線沿いでは等温であることから、チャンネル深くの磁力線が低温の電子をトラップすることで加速チャンネル壁面付近の電子温度の低下を促す。シース電位は電子温度の関数であるので電子温度の低下により減少する。また、電子の密度はチャンネル中心軸から離れるほど減少するため、式(2.11)の自然対数項が負になることで壁面を横切るプラズマ電位は減少する。これらのことからイオンが壁面へ加速されても十分なエネルギーを得ることを防ぎ、損耗を抑制できると考えられている。図 2.11 にチャンネル内部での電子温度と電位の関係を示している²⁴⁾。

また、壁面と磁力線の交差しない MS 型の磁場形状では生成された高エネルギー電子の閉じ込めが改善されることから、高エネルギー電子の壁面での損失が抑えられることで、スラスタへの熱的影響を減らすことが可能である。

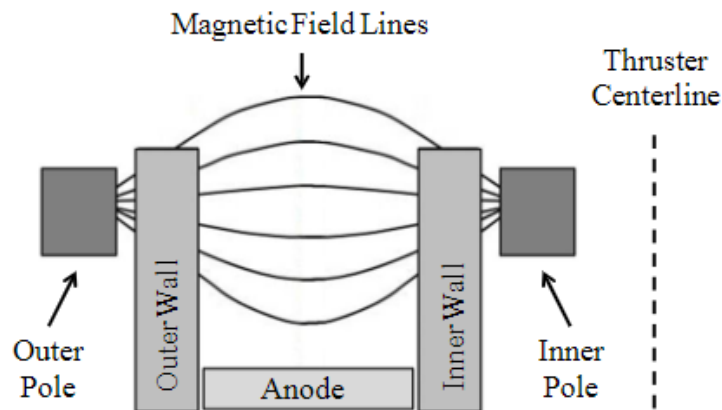


図 2.9 従来型の磁場形状

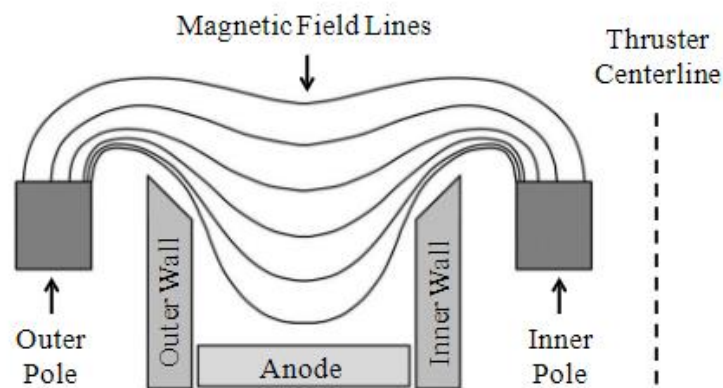


図 2.10 MS 型の磁場形状

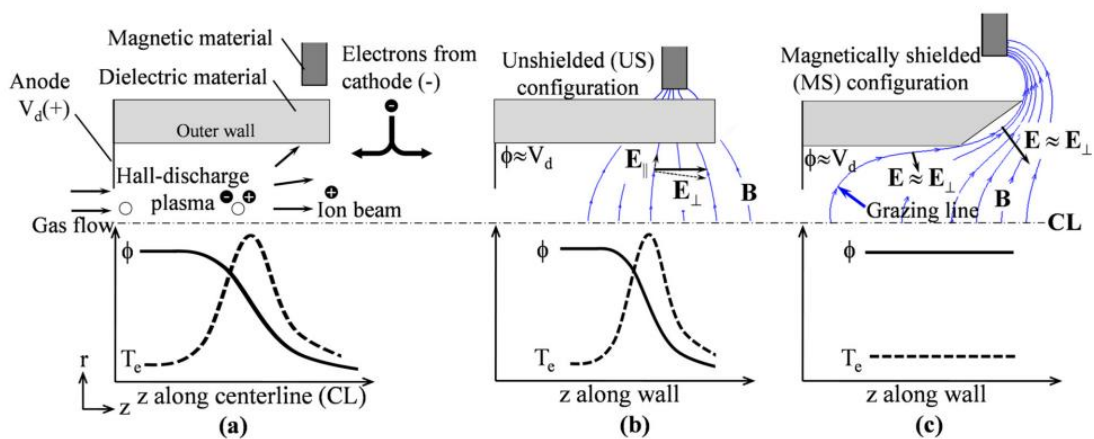


図 2.11 ホールスラスタ内部での磁場構造（上部）と電子温度・プラズマ電位の分布（下部），(a)チャンネル中心軸での基本的な機能と分布，(b)従来型の磁場構造と壁面沿いの分布，(c)MS 型の磁場と壁面沿いの分布

第 3 章 実験装置

3.1 真空排気系

実験は国立研究開発法人 宇宙航空研究開発機構，宇宙科学研究所の大型真空容器「スペースサイエンスチャンバ」を使用して行った．実験に用いた真空容器を図 3.1 に示す．真空容器は直径 2.5 m，長さ約 5 m のステンレス製円筒状真空層であり，真空排気にはメカニカルブースターポンプ 1 台とロータリーポンプ 2 台で粗排気を行った後，ターボ分子ポンプ（TG3451MVAB：排気速度 3400 l/s at N₂）1 台とクライオポンプ（CRYO-U30H：排気速度 28000 l/s at N₂）2 台を用いて高真空まで排気する．図 3.2 に排気系統概略図を示す．到達圧力はガス未流入時に 4.8×10^{-5} Pa であった．



図 3.1 スペースサイエンスチャンバ

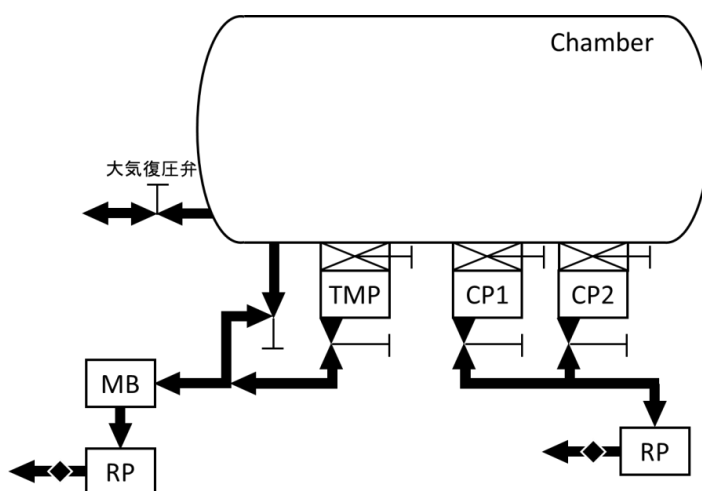


図 3.2 排気系統

3.2 推進剤・作動ガス供給系

本研究ではホールスラスタの推進剤及びホローカソードの作動ガスにキセノン（99.999 %）を，実験終了後のホローカソードの冷却にアルゴン（99.999 %）を使用した．キセノン及びアルゴンの高圧ボンベから減圧バルブによって2~3気圧に減圧された後，ホールスラスタとホローカソードの2系統に分岐しマスフローコントローラを介して流量を調節して流す．ホールスラスタとホローカソードの流量はそれぞれ独立して制御される．推進剤・作動ガス供給系の概略図を図3.3に示す．また，実験の際に作動ガスの流量について調整した際の真空容器内の圧力を表3.1に示す．ただし，電子源にホローカソードを使用し，流量0.27 mg/s で作動させている．表のイオン等価電流とはスラスタへの作動ガスが全て一価の電離が行われたときのイオン電流であり，放電特性等の実験結果において電離度の指標となる．

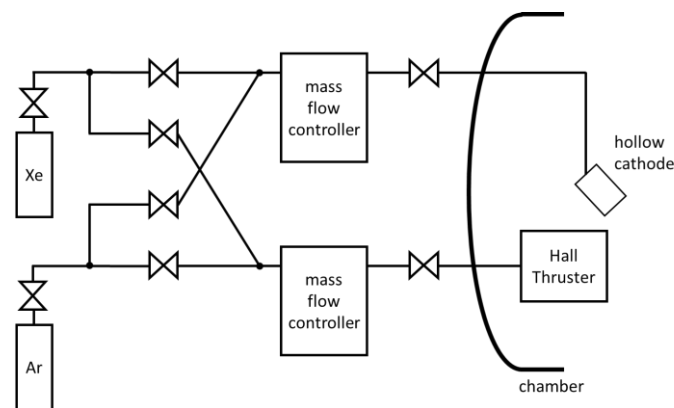


図 3.3 推進剤・作動ガス供給系

表 3.1 各流量における真空容器ない圧力

作動ガス流量	イオン等価電流	圧力
[mg/s]	[Aeq]	[Pa]
0.68	0.5	1.08×10^{-3}
1.02	0.75	2.05×10^{-3}
1.36	1.0	2.75×10^{-3}

3.3 電源系

ホールスラストに必要な電源は、アノード・カソード間に電位を与えるためのアノード電源、加速チャネル内に半径方向の磁場を作り出すためのインナーコイルとアウターコイル用の電源、ホローカソードのインサータを加熱するためのヒーター電源と生成した電子を引き出すための電位を与えるホローカソードキーパー電源の 5 種類の 5 台の電源が必要である。また、コイル用の電源はインナーコイルとアウターコイルを等比率で制御するために外部からのコントロール用電源を 1 台使用して制御を行った。この他に計測装置用の電源をそれぞれ使用した。各電源は市販の電源を使用しており、主に使用した電源を下記に示す。

アノード電源	: 高砂 HX0600-25G
インナーコイル電源	: 菊水電子 PAN16-10A
アウターコイル電源	: 菊水電子 PAN35-20A
カソードヒーター電源	: 菊水電子 PAN16-10A
カソードキーパー電源	: 松定 PR500-1.5
イオンコレクタ用電源	: 菊水電子 PMC35-3A

3.4 ホールスラストの仕様

実験に使用したホールスラストは 200 W 級マグネチックレイヤ型ホールスラストである。使用したホールスラストの概観を図 3.4 に示す。加速チャネルの内径は 40 mm、外径は 56 mm であり、加速チャネルは窒化ホウ素で出来ている。アノードはチャネル出口から 25 mm 上流に設置している。外側にはアウターコイルとして 4 つのソレノイドコイルを、インナーコイルとしてスラスト中心部にソレノイドコイルを 1 つ設置しており、加速チャネル内に半径方向磁場を印

加する．内側と外側のコイルに流す電流の大きさと比を変えることで磁束密度及び磁場形状が変更可能であり，実験ではその依存性等も確認した．使用したホールスラストの磁場解析結果を図 3.5，図 3.6 に示す．図 3.5 はチャンネル断面図であり，磁力線の形状を示している．紫に色付けされているところが磁気回路，白線が磁力線である．図左側に磁気シールドを設けることでチャンネル内での磁場強度を下げ，結果的に磁力線が湾曲してチャンネル内に入り込んだような MS 型に近い磁場形状であることがわかる．また，図 3.6 では，チャンネルの中心軸上における磁場強度分布の数値計算結果を示している．MS 型磁場の特徴では加速チャンネル内の磁場強度が低く設計されるため，チャンネル出口よりも外側で磁場強度が最大になり，その付近においてプラズマの生成やイオン加速領域が形成される．ただし，図 3.5 の右側に配置されている磁気回路の左側の端を 0 としている．

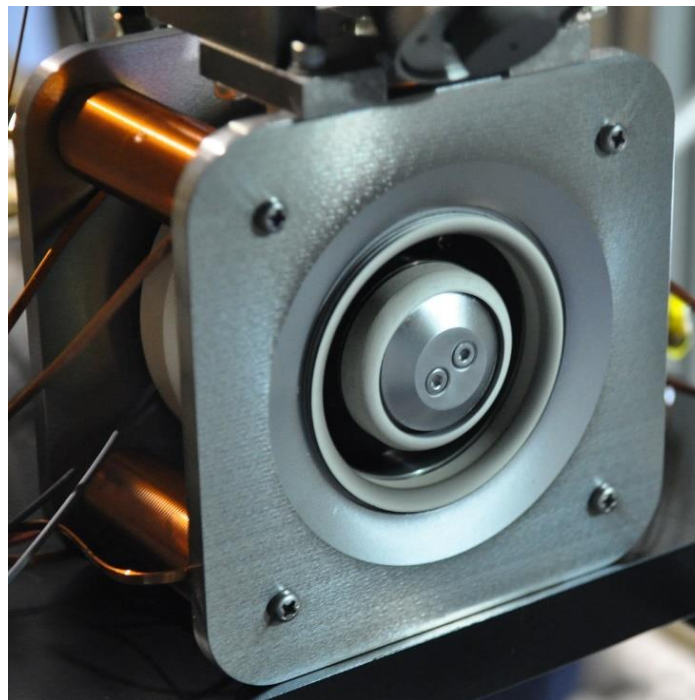


図 3.4 200 W 級ホールスラスト

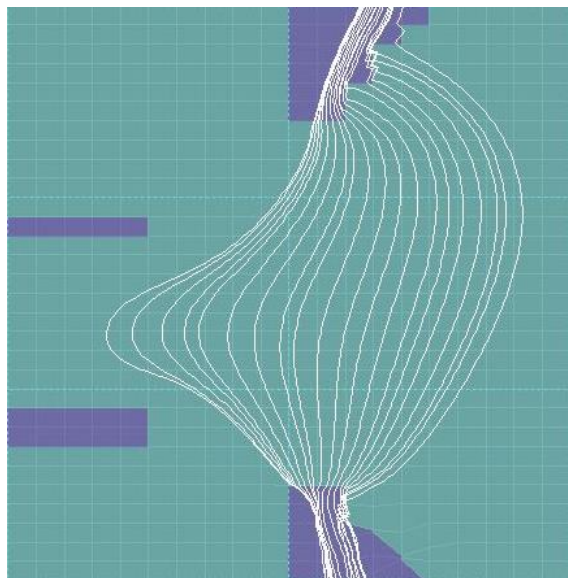


図 3.5 数値計算による磁場形状 (Magnum3.0 使用)

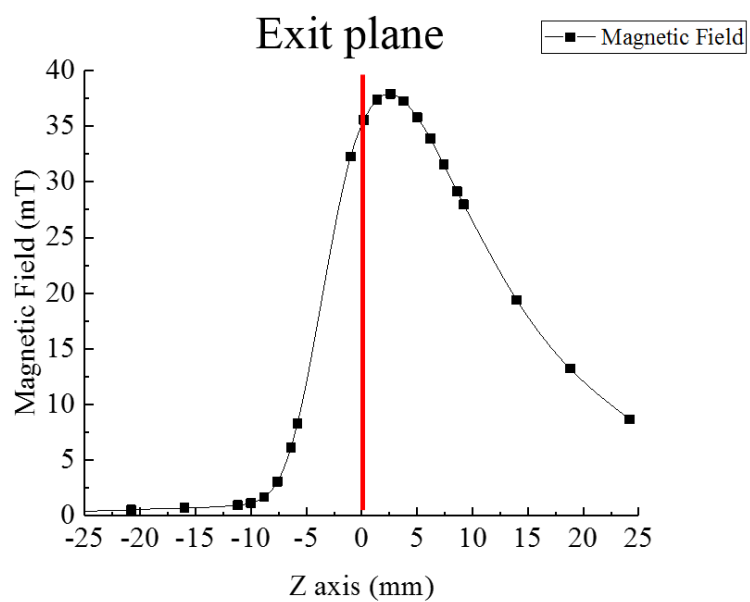


図 3.6 チャンネル中心軸上における磁場強度分布

3.5 電子源

3.5.1 ホローカソード

ホールスラスタやイオンスラスタなどにおいて主放電用および中和器用としてホローカソードが使用される。図 3.7 にその内部構造を示す¹²⁾。中空構造となっており、インサートと呼ばれる仕事関数が低く熱電子放出が容易な酸化物陰極が設置されている。ホローカソード内部ではグロー放電によって発生したイオンが内壁にぶつかることで二次電子放出作用をおこし、電子なだれによって放電が発生する。これをホローカソード放電と呼ぶ。その後、イオン衝撃によって加熱されたインサートから熱電子が放出され始めると静電シース効果も加わって電子電流密度は急激に増加する。また、出口のオリフィスでは作動ガスの中性子密度を高め、低ガス流量においても、比較的高密度なプラズマを生成でき高い電子電流が得られるようになっている。

実験に使用したホローカソード (Ion Tech 社製, HC252) の概観を図 3.8 に示す。仕事関数の低いバリウムなどを含有する物質をインサートに使用しており、これを高温に熱することで熱電子が放出される。作動ガスにはキセノンを使用した。実験終了後はアルゴンを流し約 60 分間の冷却を行った。大気解放中もアルゴンを流し続けてインサートとの大気暴露を避けた。ガス流量は 0.27 mg/s で作動させた。キーパー電源の電圧・電流はそれぞれ 13~20 V, 0.20 A, ヒーター電源の電圧・電流はそれぞれ 4.5 V, 3.5 A であるため、ホローカソードの消費電力は 20 W 程度であった。

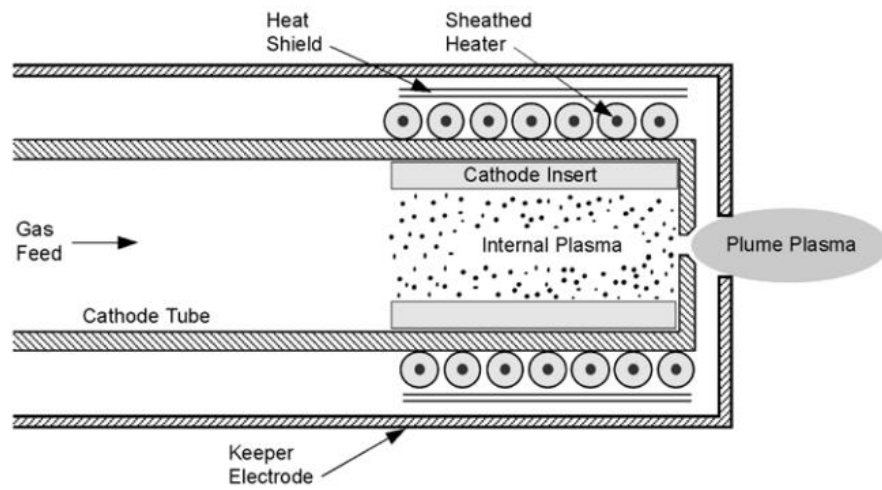


図 3.7 ホローカソードの内部構造

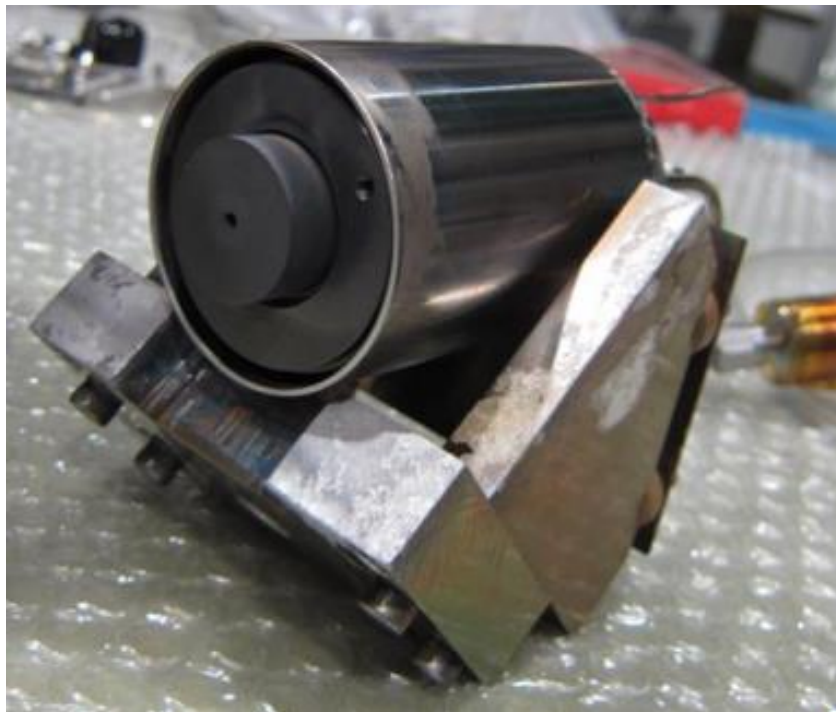


図 3.8 ホローカソードの概観

3.5.2 マイクロ波放電式カソード

マイクロ波放電式カソードはプラズマ生成をマイクロ波放電によって行い、電子を引き出しイオンビームの中和を行う²⁵⁾。図 3.9 に内部構造を示す²⁶⁾。マイクロ波放電とは、マイクロ波帯域の交流電場によって電子を加速し、中性粒子と衝突電離により放電を行うことである。電子のサイクロトロン共鳴²⁵⁾を利用し、電子の加熱効率を上げている。ホローカソードのような直流放電式のカソードと比べると、予備加熱不要であり電源を減らすことができるため軽量化を見込める。図 3.10 に実験に用いたマイクロ波放電式カソードの外観を示す。今回、東京大学、國中・西山研究室との共同研究においてカソードとのカップリング試験を行った。そのため、カソードの詳細は機密となっており省略する。

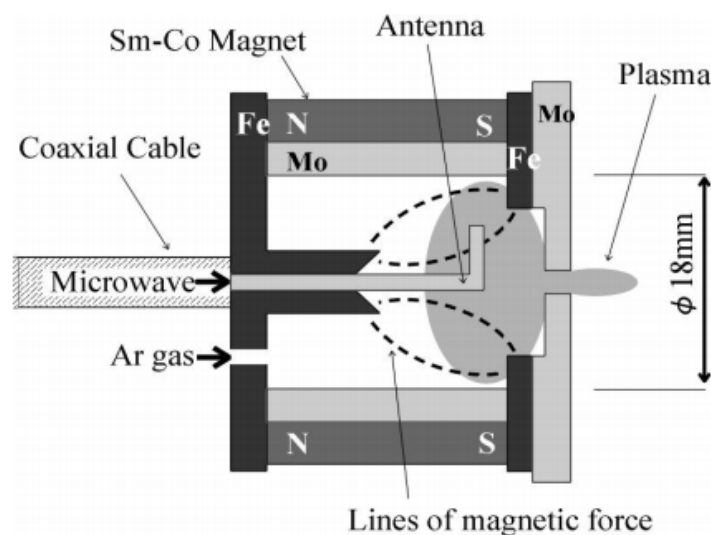


図 3.9 マイクロ波放電式カソード内部構造

3.6 計測系

3.6.1 スラストスタンド

ホールスラストの推進性能を評価するために推力の測定を行った。今回使用したホールスラストの推力は mN オーダーであるため、非接触式のスラストス

タンドを用いた。使用したスラストスタンドを図 3.11 に示す。スタンドは縦 500 mm, 横 450 mm, 奥行き 500 mm のサイズであり, 外枠はアルミフレーム, 内枠は C/C コンポジット製の骨組みで出来ている。2 組の内枠はそれぞれ 2 つのナイフエッジが取り付けられており, その対になるナイフエッジはアルミフレームに取り付けられている。また内枠にはホールスラストを載せるためのナイフエッジがそれぞれ取り付けられており, 合計 6 つのナイフエッジによりスタンドが動く箱ブランコのような構造をしている。スラストが作動し推力が発生すると 6 個のナイフエッジによりスタンドが前後に動く。その変位を LED 方式のマイクロ変位センサ (OMRON 社製, Z4D-F04A) を用いて計測した。この変位センサの諸元を表 3.2 に示す。推力の算出は既知の水平方向荷重をスラストに加えた際の変位を測定し得られた関係式から求める。この振り子式スラストスタンドの誤差は 1 mN at 10 mN であった。

表 3.2 マイクロ変位センサの諸元

検出範囲	4±1.25 mm
分解能	5 μ m 以下
応答速度	5 ms 以下
出力	1~5 V (1.6 V/mm±10 %)

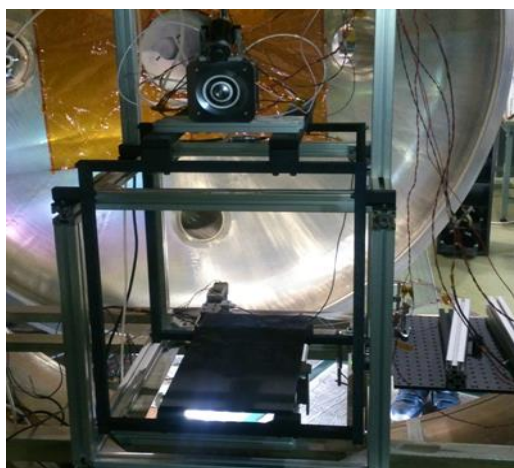
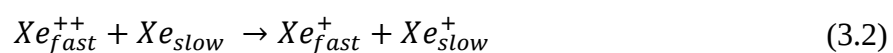
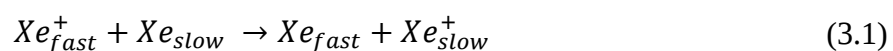


図 3.10 スラストスタンド

3.6.2 イオンコレクタ

ホールスラストから排出されたイオンビームの測定にはイオンコレクタを使用した。イオンコレクタの外観を図 3.12 に示す。イオンコレクタは 50 mm×50 mm のカーボンの中心に直径 9 mm の円盤状イオン捕集用コレクタを取り付けたものである。コレクタには-30 V が印加されており、イオンの捕集及び電子の追い返しを行っている。また、コレクタのみではコレクタの電位が周囲のプラズマに擾乱を引き起こし、イオン軌道を曲げてしまったりコレクタから二次電子が放出されたりし、実際のイオン電流よりも大きい信号が出てしまう。そこで、コレクタの周囲に取り付けたカーボンにも同様に-30 V を印加し、コレクタ周囲でのプラズマの擾乱を防いでいる。しかしながら、ホールスラストから排出されたイオンビームの一部はチャンバ内に存在する背景ガスと電荷交換衝突を起こす²⁷⁾。電荷交換衝突とは、高速のイオンが低速の中性粒子と衝突し、電荷のみの交換を行い、高速の中性粒子と低速のイオンになる反応のことである。以下にその反応式を示す。



電荷交換によって生成された低速のイオンはもともと熱速度で運動していることから、等方散乱する中性粒子である。つまり、電荷交換後はスラスト由来のイオンビームとは異なる方向へと飛んでいく。そのため、イオンビームは測定距離が離れるほど減衰する。結果、イオンコレクタに捕集されるイオンビーム電流は減少し、測定値の補正を行う必要がある。

イオンビーム電流の減衰は以下の式で与えられる。

$$J_z = J_0 \exp\left(-\frac{z}{\lambda_{cex}}\right) \quad (3.3)$$

$$= J_0 \exp(-n_b \sigma_{cex} z)$$

J_0 は元の電流値で、 J_z は距離 z だけ進んだ位置での電流値である。 λ_{cex} は電荷交換の平均自由行程で σ_{cex} は電化交換の衝突断面積、 n_b はバックグラウンドの中性粒子密度である。 σ_{cex} は

$$\sigma_{cex} = (a - b \log c_r)^2 \quad (3.4)$$

で、近似され、単位は $\text{\AA}^2$ である。 c_r は相対速度である。 a 、 b は衝突する粒子により異なる。今回用いた係数 a, b を表 2 に示す。

表 3.3 電化交換衝突断面積係数

Cllision	a	b
$Xe^+ - Xe$	18.832	1.9803
$Xe^{++} - Xe$	34.049	2.7038
$Kr^+ - Kr$	16.528	1.7123
$Ar^+ - Ar$	15.706	1.641



図 3.11 イオンコレクタ

3.6.3 3次元トラバース機構

イオンコレクタをチャンバ内の 3 次元トラバース機構に取り付けてホールスラスタのイオンビーム測定を行った。図 3.13 に外観を示す。スラスタ中心軸のチャンネル出口を座標の原点とし、イオンコレクタの出力値を測定した。測定装置の位置はスラスタのチャンネル出口から下流 750 mm に設定した。イオンコレクタによるビームプロファイルの測定ではスラスタ水平方向に ± 500 mm を 50 mm 間隔で動かして測定した。しかし、トラバースへの取り付けの問題から、イオンコレクタは -710 mm $\sim +290$ mm の範囲で移動を行った。

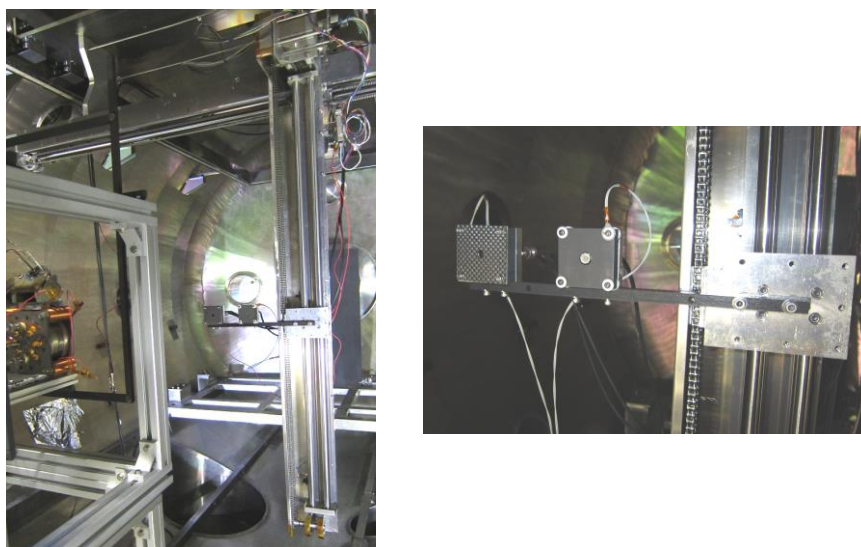


図 3.12 3次元トラバース機構

3.6.4 記録系

スラストスタンドの変位センサの出力やイオンビーム電流、放電電圧、コイル電流などの信号の測定には横河メータ&インスツルメンツ社の WE7000 を使用した。WE7000 には WE7121, WE7273, WE7282 の各モジュールを実装して使用した。表 3.4 に主な仕様を示す

また、放電電流振動現象などの高速現象を測定する場合は横河メータ&インスツルメンツ社の DL850 を使用した。

表 3.4 各モジュールの仕様

WE7121	
出力チャンネル数	1 チャンネル
標準出力波形	正弦波/方形波/三角波/ランプ波/パルス波
出力振幅分解能	12bit
発振周波数範囲	正弦波/方形波：1 μ Hz~10 MHz
	三角波/ランプ波/パルス波：1 μ Hz~200 kHz
WE7273	
入力チャンネル数	8 チャンネル
A/D 分解能	16bit
サンプリングレート	100 kHz
入力インピーダンス	約 1 M Ω
測定レンジ	$\pm 50/100/200/500$ mV, $\pm 1/2/5/10/20/50$ V
WE7282	
出力チャンネル数	4 チャンネル
出力波形	正弦波/パルス波(デューティ可変)/ランプ波/

	三角波/簡易任意波形/DC
出力レンジ	$\pm 1/2/5/10\text{ V}$
最大出力電流	$\pm 10\text{ mA}$ （チャンネルあたり）

第4章 実験結果・考察

4.1 磁場の評価

4.1.1 実測値と計算値の比較

スラスタ出口付近に磁場強度を高めた 200 W 級ホールスラスタの性能評価を行うために、実際の半径方向磁場の強度分布を確認した。計算値と実測値との比較を行った結果を図 4.1 に示す。ただし、内側コイルと外側コイルから生成される磁場の強度比 1:1 となるよう電流を制御している。添え字 cal は計算値を表し、 Z はチャンネル中心軸上での位置を表す。また、出口付近で磁場を形成している磁気回路の一つであるヨークの上流側の端を 0 とし、正が大きくなる方向が下流となっている。半径方向磁場の強度や分布に差異はなく、出口付近外側に磁場強度が最大になっており、目的の磁場形状であると考えられる。

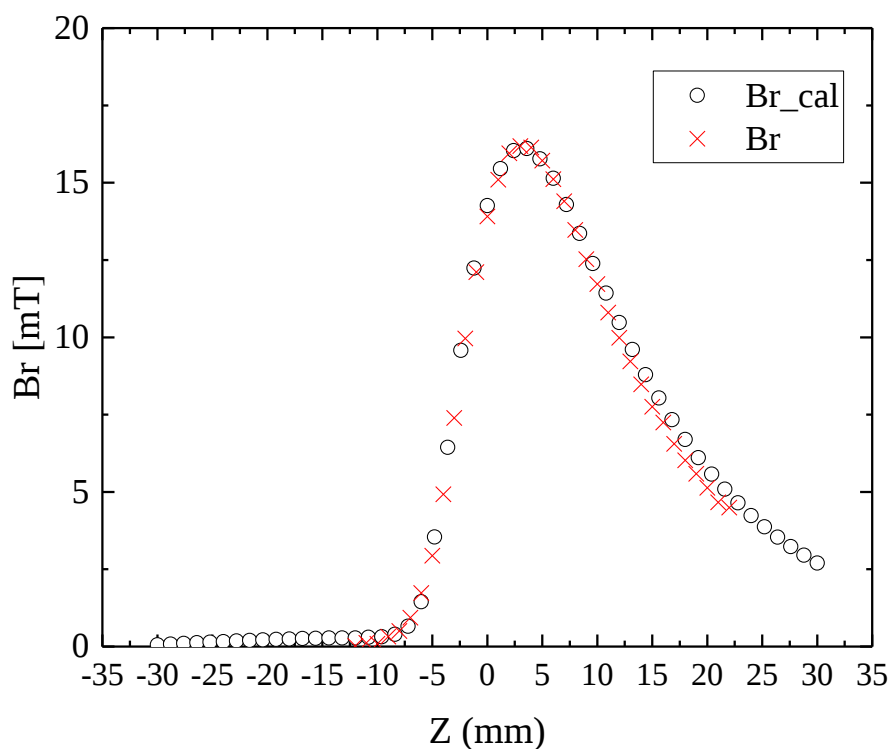


図 4.1 チャンネル中心軸上の磁場分布

4.1.2 磁場形状依存性

ホールスラストの原理上、磁場の形状によって電場が形成されることから、最適な磁場形状を選択することが求められる。そこで、次に、磁場形状が変化した場合について検討を行った。磁場を印加するためのコイル電流の内側と外側の値を調整し、内側コイルによる磁場と外側コイルによる磁場の比を調整した。推進性能の比較結果を図 4.2 に示す。ただし、内側コイルによる磁場と外側コイルによる磁場の比が 0:1, 1:1, 1:0 となるように調整した。磁場比 1 対 1 において最も性能が発揮されるという結果になった。これは、形成される磁場のつりあいが取れず、磁場の分布が内側か外側の壁面付近に遷移したためだと考えられる。図 4.3 に示すように、磁場の比を調整すると磁力線の分布が磁気シールドと出口付近のヨーク間にあるチャンネル壁面付近に偏ることがわかる。このことから、チャンネル内でのプラズマ生成領域が偏り、プラズマ生成時におけるプラズマ壁面間での損失が増加することで性能への悪影響を与えたのではないかと考えられる。

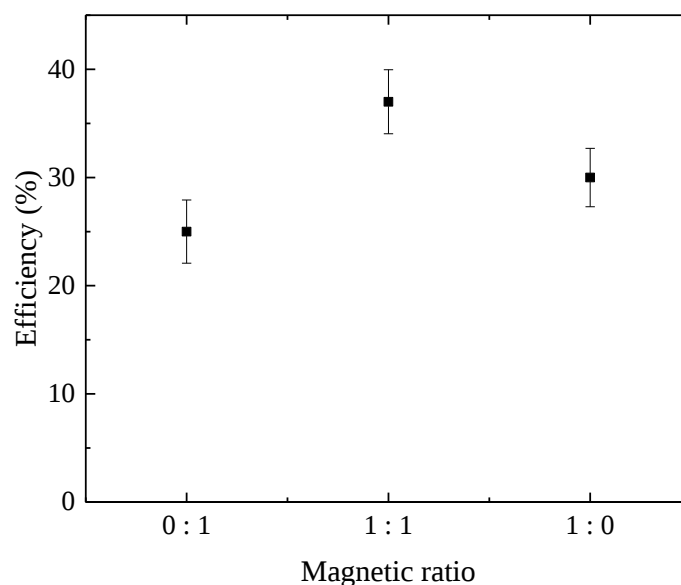
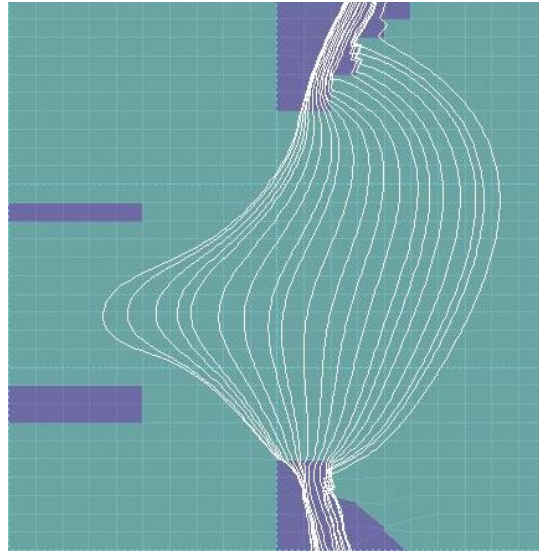
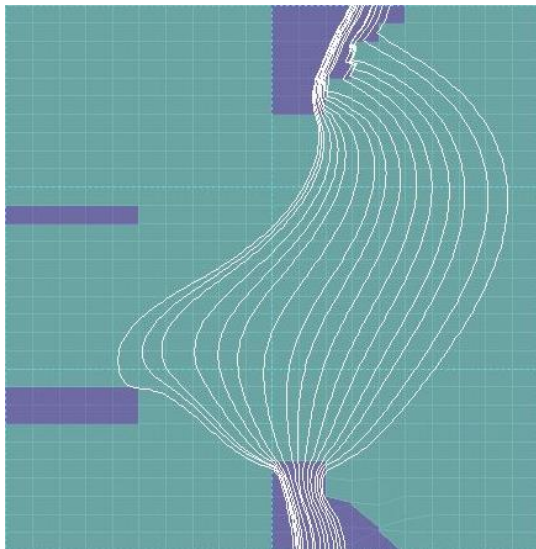


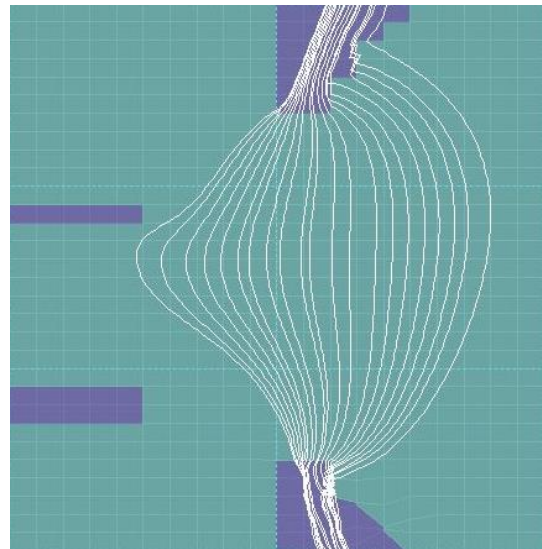
図 4.2 磁場比による性能への影響



(a) 磁場比 1:1



(b) 磁場比 0:1



(c) 磁場比 1:0

図 4.3 数値計算による磁力線分布

4.2 推進性能評価

4.2.1 推進剤流量依存性

今回開発した出口付近外側に磁場強度が最大になる 200 W ホールスラスタにおいて最も推進性能が発揮できる作動条件について検討した．スラスタへの

推進剤流量は 6.97 sccm (0.68 mg/s), 10.46 sccm (1.02 mg/s), 13.94 sccm (1.36 mg/s) の 3 パターンを行った。放電特性の結果を図 4.4 に示す。放電特性では、放電電流の飽和を確認することで推進剤が最も電離しイオンを生成しているかを大まかに知ることができ、飽和領域での最もよい性能はそのスラストにおいて最高性能であることを意味する。図 4.4 のように、どの流量においても放電電流の飽和が確認でき、この放電領域において得られた推進性能がこのスラストにとって最もよい結果であるといえる。

投入電力に対する推進性能の結果を図 4.5 に示す。200 W 級での作動という条件下で性能が一番発揮できた流量は 1.02 mg/s であることが効率や比推力等の推進性能から判断できる。しかし、放電特性に示されているように 1.02 mg/s における放電電流は約 0.7 A 程度だったが、電流値がイオンビーム電流に加え電子電流が合算されたものであること、イオン等価電流が 0.75 Aeq であることを踏まえると、推進剤の電離が十分でなく推進剤利用効率に問題があると考えられる。

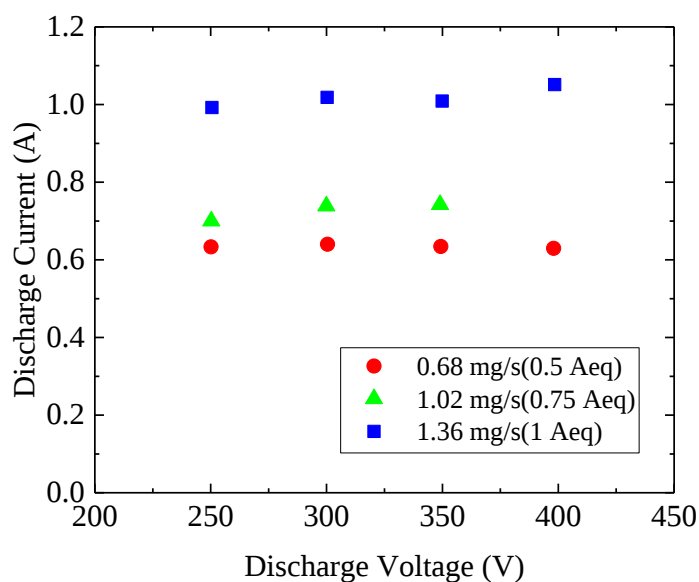


図 4.4 推進剤流量毎の放電特性

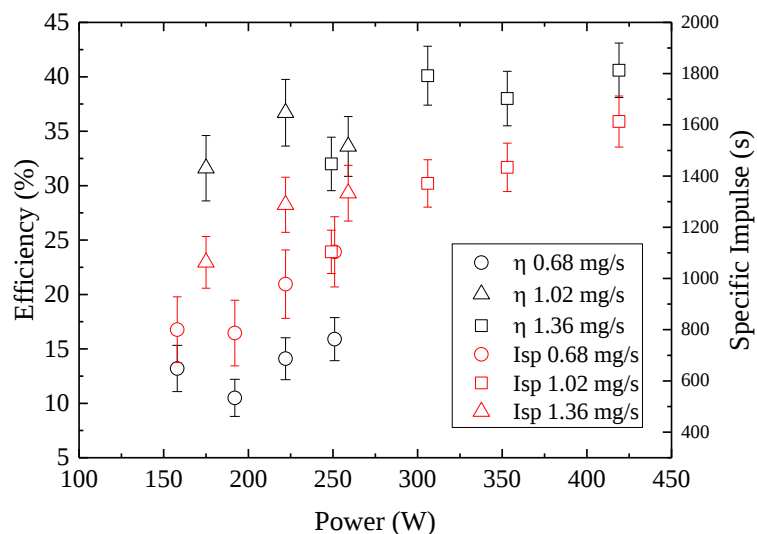


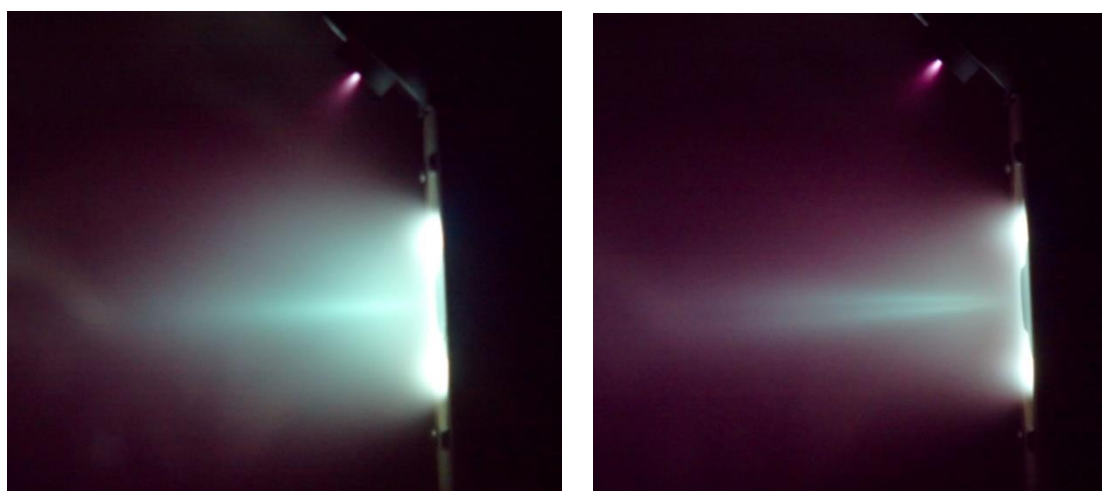
図 4.5 推進剤流量毎の推進性能

4.2.2 イオンコレクタによるビーム電流測定

前項では 200 W 級において推進剤流量 1.02 mg/s、放電電圧 300 V での作動条件においてスラストの最高性能を確認できた。その際、放電モードの変化も同時に確認でき、図 4.6 に示しているように、コイル電流を 1 A から 1.25 A に増加させるとプルームの発光模様に変化した。推力の増加がみられ、推進性能が向上した。これは、推力に寄与するイオン粒子束が集中したためプルーム形状に変化を及ぼしたと考えられる。そこで、実際にイオンビームの集中を確認するためにイオンコレクタによるビーム電流測定を行った。

放電電圧 300 V における一次元のビームプロファイルを測定した結果を図 4.7 に示す。ただし、推進剤流量は 1.02 mg/s であり、750 mm 離れた位置からスラスト中心を横切るように測定した。ビームの集中という観点では放電モードが変化する前の方が集中しており、推力に寄与するイオンビームの総量に違いはあまりない。しかし、図 4.8 に示す同条件で測定した 2 次元ビームプロファイルから、放電モードが変化した後のほうがイオン電流の高い領域が広いことがわかる。つまり、イオンビーム全体で見ると集中しているといえ、推力に寄与するイ

オンの総量が多いといえる．また，図 4.8 の結果からスラストの推進効率に寄与する推進剤利用効率を求めた．結果は $\eta_{u,1.0A} = 0.393$ ， $\eta_{u,1.25A} = 0.455$ となった．ただし，投入した推進剤が全て一価で電離した場合を考慮し，すべてのイオンが加速され排出された場合 1 になる．この結果から放電モード変化後のほうが排出されたイオンの総量が多く，結果として推力が大きくなったといえる．また，プルーム形状が推進性能を把握する上で一つの指標となることがわかった．



(a) コイル電流 1 A

(b) コイル電流 1.25 A

図 4.6 プルーム発光の変化

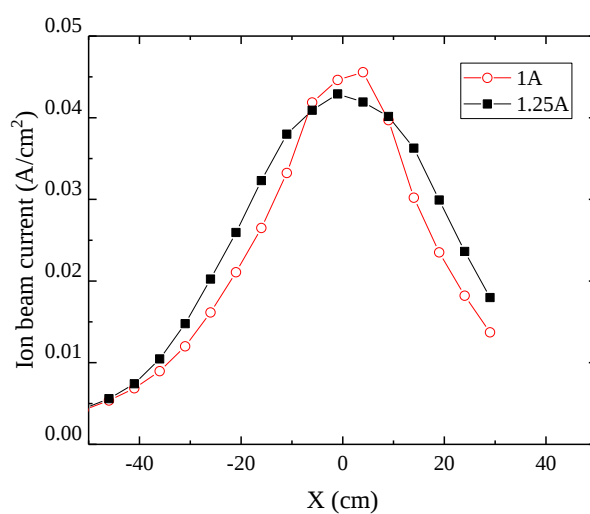
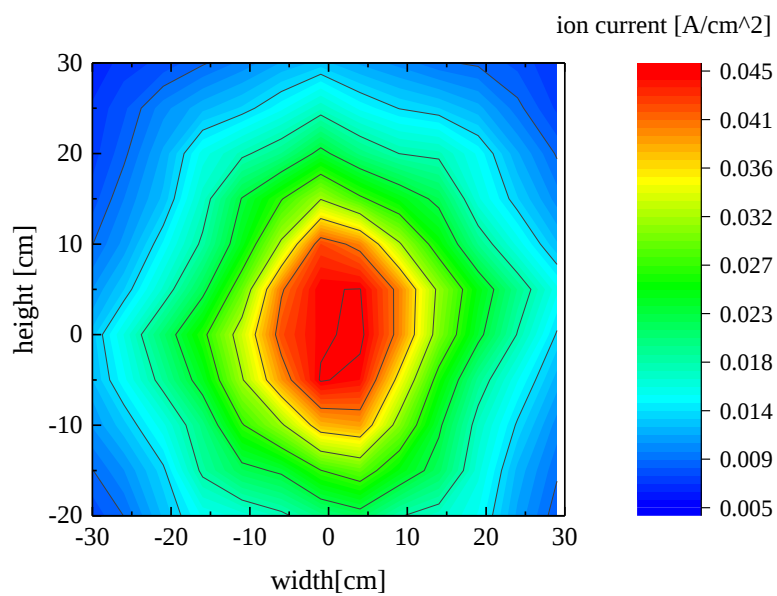
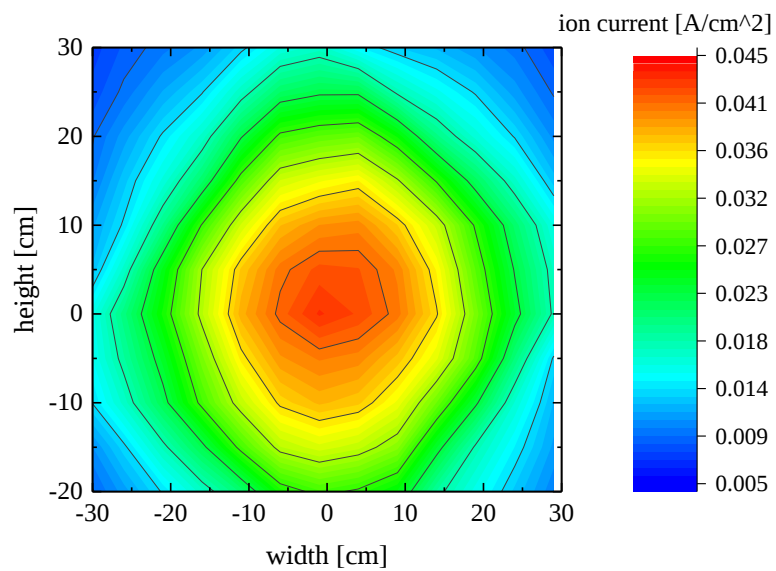


図 4.7 1次元ビームプロファイル



(a) コイル電流 1 A



(b) コイル電流 1.25 A

図 4.8 2次元ビームプロファイル

4.3 推進性能の向上

4.3.1 アノード形状依存性

前節までは開発したホールスラスタの現状における特性や性能について論じてきた。しかし、比推力等の推進性能において目標に届いていない結果となった。そのため、今節では性能改善について検討結果をまとめた。最初の方策としてアノードの形状に注目した。アノードは電位を与えるだけでなくガス供給や作動安定性に関わっており、推進性能を向上するための 1 つの要素である。今回検討することはシンプルではあるが、アノードの厚みによる形状依存性について検討した。厚みの違いによって、電場形成の差が性能変化に繋がる可能性や出口付近にアノードが近づくことで TAL 型のように放電特性が変化するのか確認した。使用したアノードの形状を図 4.9 に示す。アノード A, B, C は 2 つの供給口からの作動ガスを 4 つに分配しチャンネル内に流入させる。また、それぞれの厚みを 6mm, 9mm, 12mm とし、加速チャンネル付近のプラズマ生成領域への影響がないように設定した。図 4.10 に各アノードにおける放電特性、図 4.11 に推進性能を示す。放電特性において、アノード A, B では放電電流の飽和が見られたがアノード C では確認できなかった。そして、推進性能においてもアノード A, B では変化が生じなかった。つまり、厚みによる形状依存性はあまりないといえる。しかし、最も厚みのあるアノード C で推進効率低下を確認できる。これが厚みによる形状依存なのか判断する上で図 4.12 のスラスタ作動時のプルーム発光を確認すると、アノード C において発光に明暗が生じていることがわかる。この明暗は磁場の強度に依ることなく生じており、異なる実験設備でも再現性が確認できた。このプルームのむらによって、スラスタ周方向において電場が形成されている可能性がある。そのため、印加磁場と周方向電場による作用によりチャンネル内での電子の導電率が上昇することで放電電流の増加や推進効率の低下がおこったと考えられる。この原因としてガス供給において問題が発生していた可能性がある。実際、最も厚いアノードであるため、ガス供給口がプラズ

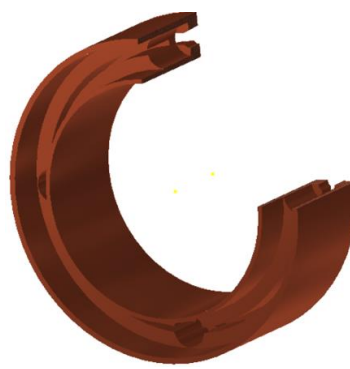
マ生成領域に近くなり，流入ガスの拡散が十分に行えていなかったことからこのような結果を招いたと考えられる．



(a) アノード A



(b) アノード B



(c) アノード C

図 4.9 アノード形状

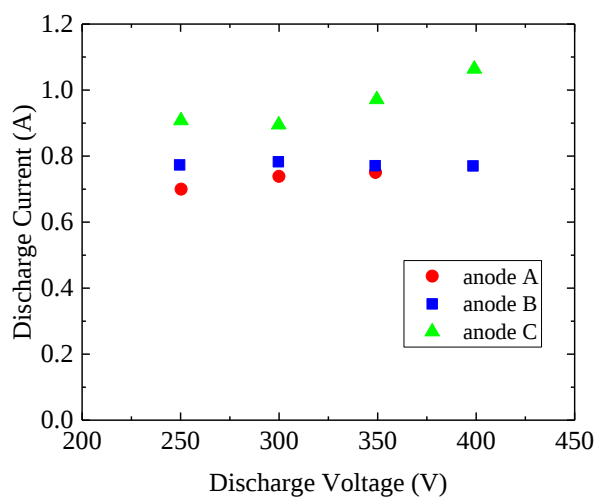


図 4.10 アノード形状における放電特性

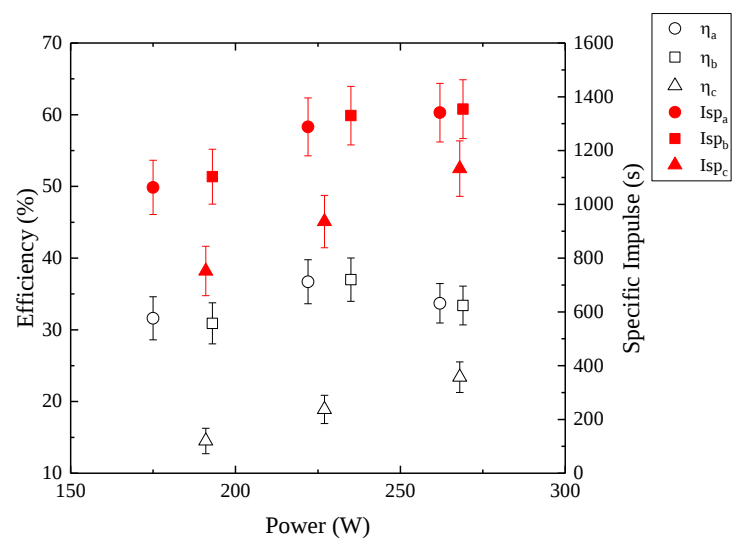


図 4.11 アノード形状における推進性能の変化



(a) アノード B



(b) アノード C

図 4.12 スラスタ作動時のプルーム発光

4.3.2 電子源

一般的にホールスラストは作動実績や寿命を考慮し、直流放電式のホローカソードを用いて中和を行う。しかし、小型のホールスラストが開発されるようになり中和電流が小さくなると、マイクロ波放電カソードを用いても中和できる可能性が出てきた。そこで、本スラストでも使用可能であるか実験を行った。その結果を図 4.13 に示す。ただし、カソードの限界供給電子電流を考慮し、作動ガス流量は 6.97 sccm (0.68 mg/s) である。推進効率においてマイクロ波放電式カソードの方が上回る結果となった。ホローカソードでは最適な条件として作動ガス流量は 10.46 sccm (1.02 mg/s) であったが、カソードを交換することで推進剤を節約しながらも推力を得られる可能性を確認できた。実際、推進機の燃費の指標である比推力は推力と推進剤流量の関係式で表され、作動ガス流量を抑制しつつ推力を得ることができると比推力は向上する。しかしながら、マイクロ波放電式カソードの位置条件等により作動が不安定になることや放電電流が過度に流れると短時間でカソードが故障することなどの問題点が存在する

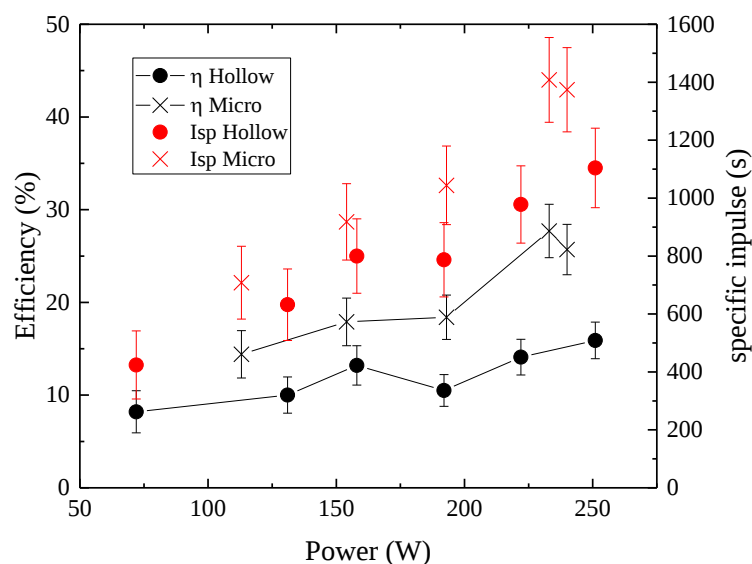


図 4.13 カソードの違いにおける推進性能

4.3.3 Volterra Engine による作動

放電電流振動の項で述べたが、振動現象はスラスタの性能に深く関わっておりまた、避けられないものでもある。そこで、振動と協調して作動させる方法として Volterra Engine を用いた。また、1 kW 級のホールスラスタにおいて推力電力比という省エネルギーという観点の性能において向上がみられたという報告があり、その有用性は確認できている。そこで、今回の小型化した 200 W 級のホールスラスタに対しても有用性があるか調べた。図 4.14 は放電電流と放電電圧の時間データである。ただし、入力電圧は 100 V、オン・オフの繰り返し周波数は 15 kHz、duty 比は 33.33 %、作動ガスは 1.02 mg/s で作動させた。振動している電流に対して電圧が協調していることを確認できる。また、電圧と電流の振動では位相のずれが生じており、電圧の増加に電流の増加が追従している。つまり、電流がピークを迎えるときに電圧は下降しており、プラズマ生成が過剰に起きないように、余計な電力投入を控えている。DC 電源の場合、一定に電圧が印加されるためプラズマ生成に電力が多く投入され続ける。その結果、反動で中性粒子が減少し、電離不安定性が高まり振動が大きくなる。

入力電圧や duty 比が同条件で繰り返し周波数を変化させ、その結果を表 4.1 に示す。周波数を 15 kHz から 20 kHz にすると電力や推力が低下した。これは周波数に比例して細かくオン・オフされることから、チョップ回路内の蓄えるエネルギーの低下を招き電力が減少するためである。また、プラズマ生成への電力投入が抑えられるためイオンが生成されず、推力が低下する。しかし、推力電力比がすぐれていることから効率よく電圧は印加できていると考えられ、DC 電源での結果と同じ推力を得たとしても消費電力を抑えることができた。

結果として、Volterra Engine を利用したほうが性能の向上が見込める条件が存在し、200 W 級の小型ホールスラスタにおいても有用性が確認できた。

表 4.3 DC 電源との比較 (duty:33.33%, 入力 100V)

周波数 [kHz]	電力 [W]	推力 [mN]	推進効率 [%]	推力電力比 [mN/kW]
15	186	7.9	16.2	42.3
20	151	7.0	15.8	46.1
DC	163	7.0	14.8	43.1

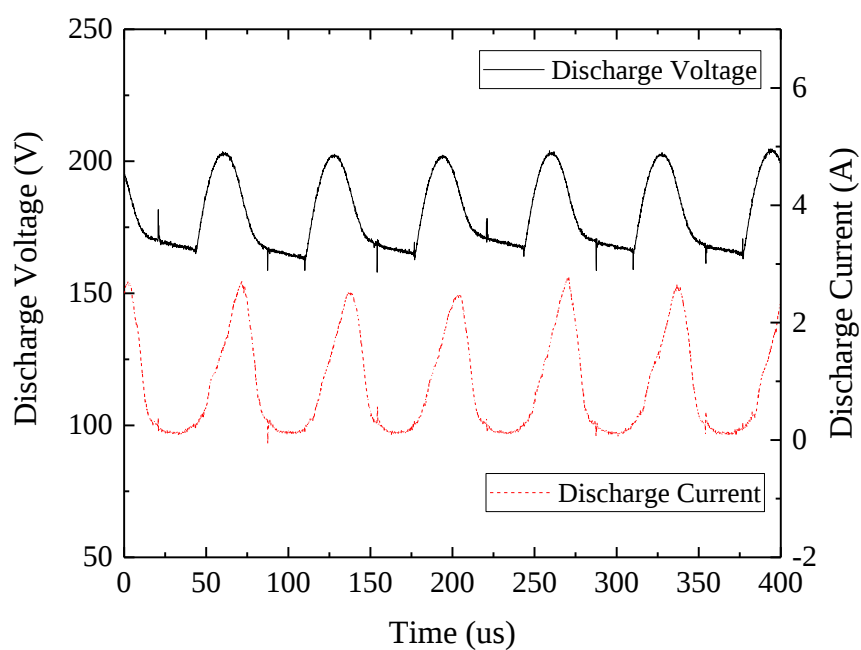


図 4.14 時間経過における放電振動

第5章 結論

本研究では、現在実用化されている小型ホールスラスタと遜色のない推進性能を備えながら、複数回の軌道遷移に対応できる寿命を達成する 200 W 級ホールスラスタの開発に取り組んできた。寿命を達成するために、MS 型に近い磁場形状を導入し、磁場分布を数値計算と実測値から確認した。

実際に開発した本スラスタを作動させ、最も推進性能が発揮できる条件として、推進剤流量が 1.02 mg/s、内側コイルからの磁場と外側コイルからの磁場の比率が 1 対 1、そして放電電圧が 300 V であることを確認した。また、放電モードの変化をプルーム形状から確認でき、イオンビーム電流測定の結果から放電モードの変化で推進剤利用効率の向上した。しかし、放電モードの変化は顕著に現れることからモード変化による寿命への影響を検討していく必要性があると考えられる。表 5.1 では本スラスタ (200 W HT) と実用化済みの同クラスのホールスラスタの推進性能をまとめた。実用化されている同クラスのホールスラスタの性能と比べても見劣りしない結果となった。しかしながら、比推力等において推進性能向上の余地があるといえる。また、他のスラスタと比べ、長時間の耐久試験等を行っておらず、実際の寿命に関しては比較できなかった。そのため、得られた性能が長時間の作動において維持できるか不明である。

現状の性能を把握後、電界形成の影響についてアノード形状依存性、低ガス流量での性能向上でマイクロ波放電式カソードとのカップリング、Volterra Engine の推力電力比における有用性について調査した。アノード形状依存性では、アノードの厚みに注目し比較したが性能差を見ることはできなかった。しかし、放電チャネル内のガスの均一性が性能に影響することがわかった。マイクロ波放電式カソードとのカップリングでは推進剤流量を抑えた中で高い推進性能を発揮したが、制御の困難さやスラスタとカソードの磁場が干渉することなど乗り越えるべき課題が見つかった。そして、Volterra Engine を用いた作動では、推力の維持と消費電力の抑制が確認でき、1 kW 級のホールスラスタで確認されていた有用性が 200 W 級の小型ホールスラスタに対しても有用であることがわかった。

今後の展望として、実際に長時間耐久試験を行うことで磁場形状の有用性を確認する必要があることや推進剤利用効率を上げるために生成されるプラズマ

の体積に対して加速チャネル壁面の面積の比率を大きくすることで損失を減らすこと，そして長時間作動におけるスパッタの影響を調査することなどが挙げられる．これらを行うことで，より高性能で長寿命の 200 W 級のホールスラスタに近づくと考えられる．

表 5.1 推進性能比較

	推力 [mN]	比推力 [s]	推進効率 [%]	寿命 [hr]
BHT-200 ²⁸⁾	13	1375	44	1700
HT-100 ²⁹⁾	8.5	1470	35	1150
ACE(300 W) ³⁰⁾	16	1040	33	2600
200 W HT	12.9	1288	36.7	—

謝辞

本実験は、国立研究開発法人 宇宙航空研究開発機構、宇宙科学研究所「スペースサイエンスチャンバー」を利用したものです。本研究は JSPS 科研費 JP23686123, JP18H03815 の助成を受けたものです。ここに謝意を表します。また、実験遂行に当たり細田聡史氏、西山和孝氏、船木一幸氏の多大な協力により実現できました。ここに感謝の意を表します。

本研究を行うにあたり、電気推進機について研究する貴重な機会を与えて下さり 2 年間御指導して頂きました山本直嗣教授に心より感謝の意を申し上げます。また、研究内容や論文作成に関して御指導、助言をして下さった森田太智助教に深く感謝致します。そして、事務秘書の大内田映子さんには日々の研究生活のお世話をして頂きました。本当にありがとうございました。

研究や進路についての助言等をして下さった諸先輩方、講義や研究面で苦楽を共にした池田凌氏、大坪正和氏、児島富彦氏、竹末一平氏に深く感謝致します。また修士 1 年、学部 4 年生の皆さんに心から感謝申し上げます。

最後に、温かく見守りサポートして下さい下さった両親、兄、妹に深い感謝の意を表して謝辞と致します。

参考文献

- 1) 茂原正道, 鳥山芳夫 “衛星設計入門”, 培風館, 2002.
- 2) Bhavya Lal, Elena de la Rosa Blanco, Jonathan R. Behrens, Benjamin A. Corbin, E. K. Green, Alyssa J. Picard, Asha Balakrishnan “Global Trends in Small Satellites,” SCIENCE & TECHNOLOGY POLICY INSTITUTE, 2017.
- 3) 松永三郎 “超小型衛星の夢と現実”, J.Microgravity Sci. Appl.Vol.30, No.3, pp136-142, 2013.
- 4) “State of Satellite Industry Report,” Satellite Industry Association, 2017.
- 5) 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.
- 6) Zhurin, V. V., Kaufman, H. R., Robinson, R. S. “Physics of Closed Drift Thrusters,” Plasma Sources Sci. Technol. 8, R1-R20, 1999.
- 7) Zharinov, A. V. and Popov, Yu. S. “Acceleration of Plasma by a Closed Hall Current Physics-Technical Physics,” Vol. 12, Aug. pp. 208-211, 1967.
- 8) H. R. Kaufman “Technology of Closed-Drift Thrusters,” AIAA journal, Vol.23, No.1, pp.78-86, 1985.
- 9) 田原弘一 “最近の電気推進機の開発研究とプラズマ技術, 新たな宇宙開発を拓く核融合技術”, J.Plasma Fusion Res. Vol.83, No.3, p266, 2007.
- 10) Ryan William Conversano, “Low-Power Magnetically Shielded Hall Thrusters,” University of California, Doctor thesis, 2015.
- 11) G. Saccoccia, J. Gonzalez, “Electric Propulsion in ESA,” 40th AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference & Exhibit, AIAA-2004-3329, 2004.
- 12) Dan M. Goebel, Ira Katz “Fundamentals of Electric Propulsion: Ion and Hall Thrusters,” JPL SPACE SCIENCE AND TECHNOLOGY SERIES, 2008.
- 13) 山本直嗣, “Discharge Current Oscillation in Hall Thrusters,” 東京大学, 博士学位論文, 2004.
- 14) 福島靖博, 横田茂, 小紫公也, 荒川義博 “日本航空宇宙学会誌論文集”, Vol.58, No.672, pp.8-14, 2010.
- 15) Boeuf, J. P. and Garrigues, L., “Low Frequency Oscillation in a Stationary Plasma Thruster,” Journal of Applied Physics, Vol.8, No.7, pp.3541 - 3554, 2005.

- 16) Choueiri, E., "Plasma oscillations in Hall thrusters," *Physics of Plasmas*, 8, 4 1411-1426, 2001.
- 17) Jean-Pierre Boeuf, "Tutorial : Physics and modeling of Hall thrusters," *Journal of Applied Physics* 121, 011101(2017).
- 18) T. Tamida, H. Osuga, N. Yamamoto, H. Takegahara, J. Aoyagi, and K. Kuriki, "Performance Improvement of Hall Thrusters Using a Pulse-Synchronous Driver System," *Journal of Propulsion and Power*, AIAA Early Edition.
- 19) 山本直嗣, 民田太一郎, 大須賀弘行, 竹ヶ原春貴, 栗木恭一, "ホールスラストのパルス同期駆動方式の開発", 宇宙輸送シンポジウム, STEP-2013-047, 2014.
- 20) 野村弘, 藤原憲一郎, 吉田正伸, "PSIM で学ぶ基礎パワーエレクトロニクス", 電気書院, 2007.
- 21) N. Yamamoto, H. Takegahara, J. Aoyagi, K. Kuriki, T. Tamida, and H. Osuga, "Development of a Novel Power Processing Unit for Hall Thrusters," *IEEE Transactions on Plasma Science*, Vol.43, No.1, 2015.
- 22) K. de Grys et al, "Demonstration of 10,400 Hours of Operation on a 4.5 kW Qualification Model Hall Thruster," 46th AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference & Exhibit, 25-28 July 2010, Nashville, TN
- 23) I. G. Mikellides, R. R. Hofer, I. Katz, and D. M. Goebel, "Magnetic shielding of Hall thrusters at high discharge voltages," *J. Appl. Phys.* 116, 053302, 2014.
- 24) Ioannis G. Mikellides, Ira Katz, Richard R. Hofer, and Dan M. Goebel, "Magnetic shielding of a laboratory Hall thruster. I. Theory and validation," *JOURNAL OF APPLIED PHYSICS* 115, 043303 (2014).
- 25) 楠田将士, "マイクロ波放電式中和器の引き出し電流電圧特性解析," 九州大学, 修士学位論文, 2015.
- 26) 鶴哲平, "マイクロ波放電式中和器の性能向上に関する研究," 九州大学, 修士学位論文, 2008.
- 27) 豊田裕司, "小型マイクロ波プラズマ推進機の性能向上に関する研究," 九州大学, 修士学位論文, 2014.
- 28) http://www.busek.com/index_htm_files/70000700%20BHT-

200%20Data%20Sheet%20Rev-.pdf

29) <http://www.sitael.com/sitael-ht100-hall-thruster-successfully-operated-with-krypton-propellant/>

30) <http://apollofusion.com/missions.html>

付録

A 放電室内における推進剤ガスの不均一による性能への影響

4 章 3 節 1 項において、放電室内での推進剤ガスが不均一に拡散することで生成プラズマの不均一を招き、周方向電場の不安定性による性能への影響があったと述べた。当該項において推進剤ガスの影響は副次的であったが、本研究室で使用している 600 W 級ホールスラスタにおいて実際に推進剤ガスの供給方法をいくつか試した結果があり、付録としてまとめた。

使用したホールスラスタは 600 W 級マグネチックレイヤ型ホールスラスタであり、概観を図 A-1 に示す。加速チャンネルの内径は 52 mm、外径は 82 mm となっており、その他の基本的な構成は本論文主題のスラスタと同じである。推進剤ガスは二つのガスポートからアノードを経由し供給され放電室に流入されるが、アノードに周方向ガス滞留溝を設け、そこにガスを分配するための穴を開けた蓋を設置することで複数の供給口から流入される。今回 A, B, C の 3 パターンの供給を試みた。A の蓋は外径 68 mm、内径 56 mm、厚み 1.5 mm の円環であり、供給口は径 65.5 mm の円周上に等間隔に 6 つ設けている。B の蓋は A と同様の円環状であるが、供給口となる穴の位置が A と比べ片側に 2 度ずらしている。そのため、A の上から B を設置することで周方向へ軸方向速度の小さいガスが流入する。そして、C では周方向両方側に流入するように両側に 1 度ずらした計 12 の供給口によって流入する。これらの 3 パターンのガス供給によって、放電室内におけるガスの不均一さが及ぼす性能への影響を調査した。

最初に放電特性について調査した。結果を図 A-2 に示す。ただし、作動ガスは 1.02 mg/s である。A, B では 300 V 付近の放電領域において放電電流の飽和が見られ差異があまりないが、C では同領域で電流が多く流れている。つまり、ガスの供給の違いによって放電の特性が変化していることがわかる。そして、図 A-3 では各パターンでの推進性能として効率と比推力について示しており、低電力の領域において効率は C が優れており、A と B では投入電力に対する傾向はあまり変わらないことがわかる。また、比推力の結果では、投入電力に対する傾向

は各パターンであまり差がなく、各パターンでは同程度の推力が得られている。つまり、A と B では C よりも放電電流が多く流れていることや供給口の形状等を考慮すると、C のパターンが最もガスの均一化に成功しているのではないかと考えられる。また、ガスの放電室内における均一性は性能へ影響を与えることがわかったが、C における効率の誤差の大きさや本文で述べたようなプルームの発光に違いが出るほどの差が無かったことから今後は顕著な差が現れる形状において同様の調査が求められると考えられる。

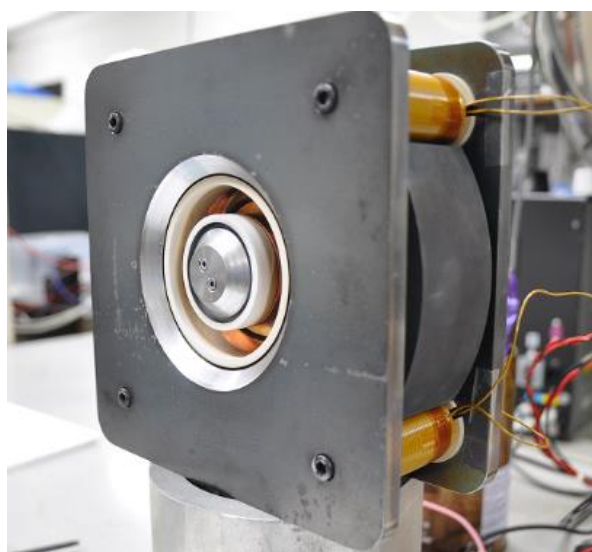


図 A-1 600 W 級ホールスラスタ

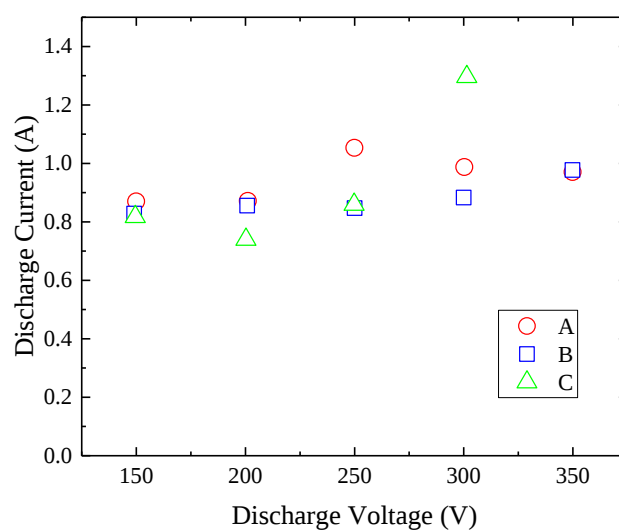
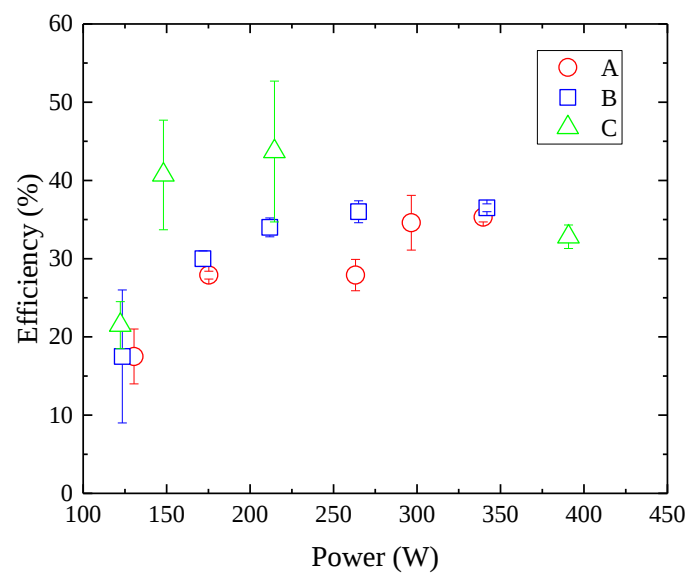
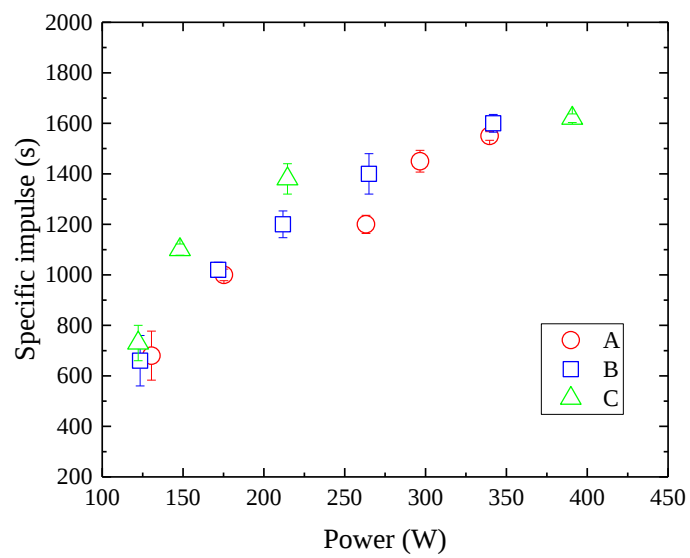


図 A-2 放電特性



(a) 効率



(b) 比推力

図 A-3 推進性能