

目次

第1章 序論

1.1 研究背景.....	1
1.2 ホールスラスタの原理	3
1.3 ホールスラスタの分類	5
1.4 研究目的.....	9

第2章 原理

2.1 ホローカソードの原理	10
2.2 スラストスタンドの原理.....	11
2.3 エネルギーアナライザの原理.....	12
2.4 性能評価.....	14

第3章 実験装置

3.1 真空排気系	16
3.2 推進剤・作動ガス供給系.....	17
3.3 マイクロ波電源	18
3.4 小型ホールスラスタ	19
3.5 ホローカソード	23
3.6 スラストスタンド	
3.6.1 振り子式スラストスタンド.....	24
3.6.2 ねじりばね式スラストスタンド.....	27
3.6.3 マイクロ変位センサ	28
3.7 エネルギーアナライザ	29

第4章 実験結果及び考察

4.1 スラストスタンド.....	32
4.2 小型ホールスラスタの性能評価	
4.2.1 流量依存性.....	34
4.2.2 磁場依存性.....	36

4.3 カソード依存性.....	38
4.4 二段放電式小型ホールスラストの性能評価.....	40
第5章 結論.....	42
参考文献.....	43
謝辞.....	44

第 1 章 序論

1.1 研究背景

近年のロケットの打ち上げ能力の向上により、その余剰能力で相乗り衛星を打ち上げるといった試みが行われている。2009 年に打ち上げられた H-IIA ロケット 15 号機は主衛星 1 機の他に相乗り衛星 7 機を搭載した¹⁾。主衛星の重量が 1.7 t であるのに対し、相乗り衛星の重量は超小型衛星のそれと同じ 100 kg 以下であった。近年、このような小型衛星プロジェクトへの取組みが活発化してきている。小型衛星は開発期間が短く、開発コストが抑えられるためリスクの低減、開発予算の時間的分散化が実現できる。それによりこれまで限られた機関などでしか行われていなかった衛星開発に民間企業や大学レベルで参入することが可能となり、現在様々な研究機関で行われている。また、機能を分散させた小型衛星をフォーメーションフライトさせることにより大型衛星と同等の機能を持たせることができる²⁾。これにより故障が発生した際に故障箇所のみを交換すればよく、衛星を追加で打ち上げることにより機能の拡張ができるという利点がある。これらのことから小型衛星の需要が高まっている。今後ますます小型衛星の活躍の場が広がっていくと考えられるが、そのためには推進機が必要である。しかしながら小型衛星はそのサイズの制約や供給できる電力が限られていることから推進機が搭載されていないのが現状である。

推進機は衛星の軌道変更や姿勢制御などに用いられている。推進機は大きく化学推進と非化学推進の 2 つに分類される。非化学推進の中で電気推進は実用化され人工衛星などに搭載されている。電気推進は電気エネルギーにより推進剤を電離・プラズマ化させ、それを加速した反作用で推力を得る仕組みである。電気推進機は化学推進機と比較して推力は小さいが、燃費を表す指標である比推力 (Specific impulse: I_{sp}) が大きい。そのため同じミッションを仮定した場合、電気推進は推力が小さいため加速に時間がかかるが、消費する燃料は化学推進と比較して非常に少なく済む。よって長時間の運用が求められる人工衛星の姿勢制御や惑星間航行の主推進機に電気推進機は適していると言える。

電気推進にはアークジェット、MPD スラスタ、ホールスラスタ、イオンスラスタなど様々な種類が開発・研究されている。図 1.1 に各種電気推進機の推力密度と比推力の関係を示す。その中でホールスラスタは 50 % を超える高い推進効率と高比推力を両立することができる。また、ホールスラスタはイオン加速領域が準中性

に保たれているため、イオンスラスタのように空間電荷制限則の影響を受けず、高密度プラズマイオンの排出が可能である^{3,4)}。このことからホールスラスタは同じ電気推進機であるイオンスラスタと比較しても1桁程度大きい推力密度を得ることができる。同じ推力が必要な場合、ホールスラスタは推力密度が大きいため他の電気推進機と比較してスラスタの大型化が避けられ、小型衛星に適していると言える。またホールスラスタは推力電力比の面でもイオンエンジンを上回っている。これらのことからホールスラスタは次世代の宇宙推進機として現在最も注目されており、日欧米で競って研究開発が進められている⁵⁾。

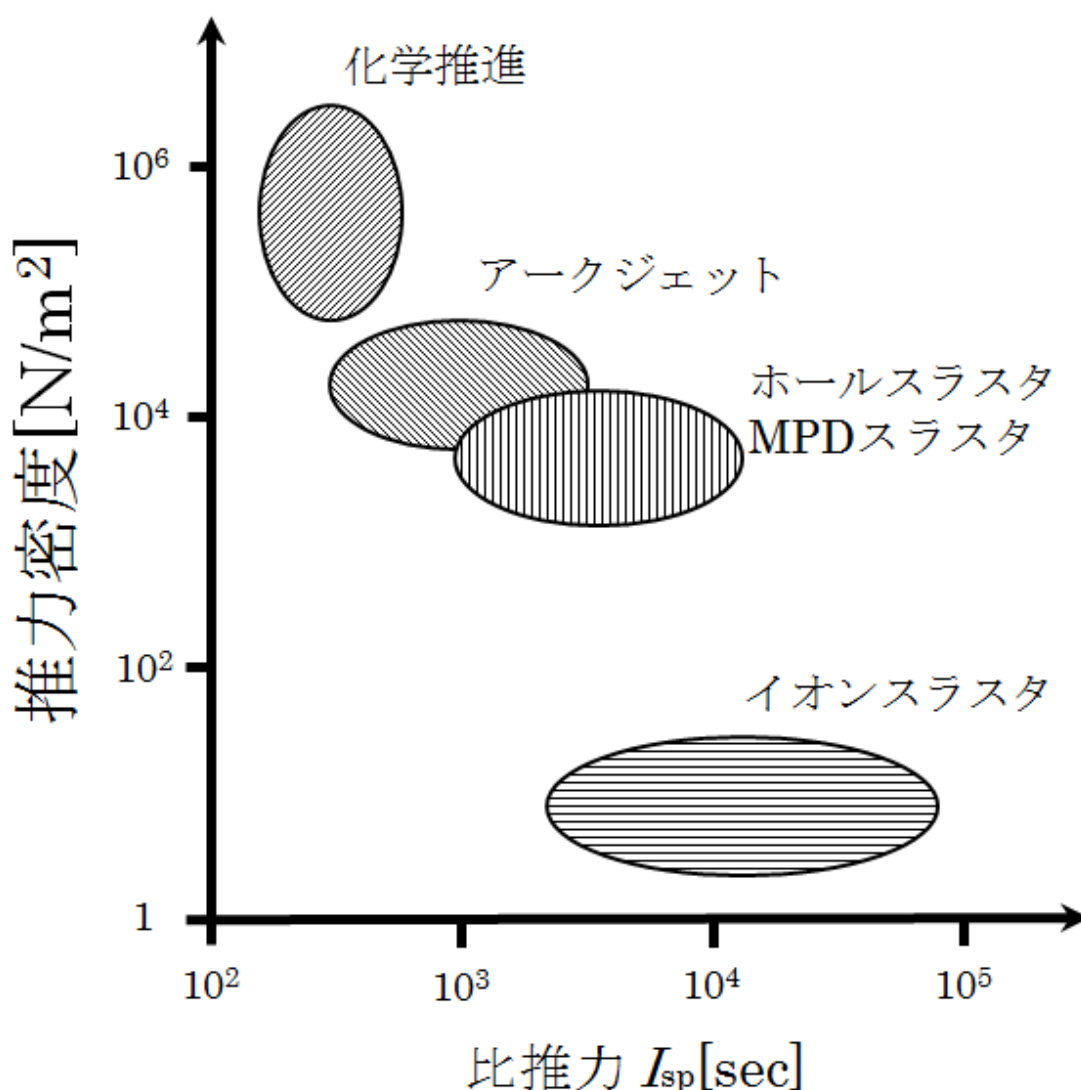


図 1.1 各種電気推進機の推力密度と比推力

1.2 ホールスラスタの原理

図 1.2 にホールスラスタの概略図を示す．ホールスラスタは円環状の加速チャンネル，チャンネル上流の陽極，外部陰極，磁気回路を持つ構造となっている．加速チャンネルの半径方向に磁場が，軸方向に電場がそれぞれ印加されている．陰極からチャンネル内に流入した電子は磁場によってトラップされ，推進剤の中性粒子と衝突しながら陽極に拡散する．このとき半径方向の磁場と軸方向の電場によりチャンネル内の電子が周方向に $\mathbf{E} \times \mathbf{B}$ ドリフトし，周方向にホール電流が誘起される．このホール電流と電場によって発生するローレンツ力により電子はチャンネル内に留まる．よってホールスラスタの加速チャンネル内は準中性に保たれ，空間電荷電流制限則の影響を受けないためイオンスラスタと比較して推力密度が大きくなる．このようにチャンネル内において電子は磁場にトラップされるが，一方でイオンは磁場の影響を受けない．そのためイオンは電場によって静電的に加速され，ホールスラスタは推力を得る．

チャンネル内で電子が周方向に加速し，イオンが電場に加速されるためには次のパラメータを満たす必要がある．

$$\omega_e \tau_e \gg 1 \quad (1.1)$$

$$r_e \ll L \ll r_i \quad (1.2)$$

$$L \ll \lambda_m \quad (1.3)$$

ここで ω_e [Hz] は電子のサイクロトロン周波数， τ_e [sec] は電子の衝突時間， r_e [m] と r_i [m] はそれぞれ電子とイオンのラーマー半径， L [m] は加速チャンネル長， λ_m [m] はイオンの平均自由行程である．これらの条件を満たすようにホールスラスタは設計されている．以下にそれぞれの式を説明する．

1) $\omega_e \tau_e \gg 1$

この式はチャンネル内で電子が $\mathbf{E} \times \mathbf{B}$ ドリフトする条件式である． $\omega_e \tau_e$ はホールパラメータと呼ばれている．一般的なホールスラスタのホールパラメータは 200~300 程度となっている⁶⁾．電子のサイクロトロン周波数 ω_e と電子の衝突時間 τ_e は次のように書ける．

$$\tau_e = \frac{1}{\sigma n v_e} \quad (1.5)$$

$$\omega_e = \frac{eB}{m_e} \quad (1.6)$$

$\sigma[\text{m}^2]$ は電子の衝突断面積, $n[\text{m}^{-3}]$ は中性粒子密度, $v_e[\text{m/s}]$ は電子の速度, $B[\text{T}]$ は磁場, $m_e[\text{kg}]$ は電子の質量である. 加速チャンネル内の電子がボルツマン分布であると仮定すると電子のドリフト速度 v_e は次のように表される.

$$v_e = \sqrt{\frac{2k_B T_e}{m_e}} \quad (1.7)$$

ここで k_B はボルツマン定数, T_e は電子温度である.

2) $r_e \ll L \ll r_i$

この式は, 電子はチャンネル内の磁場にトラップされるが, イオンは磁場に捕らわれずに電場によって排出される条件を表す式である. 電子とイオンのラーマー半径 r_e と r_i はそれぞれ次の式で表される.

$$r_e = \frac{m_e v_e}{eB} \quad (1.8)$$

$$r_i = \frac{m_i v_i}{eB} \quad (1.9)$$

$m_i[\text{kg}]$ はイオンの質量, $v_i[\text{m/s}]$ はイオンの速度である. イオンの熱速度が電場による速度に比べて無視できるほど小さいと仮定すると, イオン速度 v_i は次式のように求められる

$$v_i = \sqrt{\frac{2eV_m}{m_i}} \quad (1.10)$$

ここで $V_m[\text{V}]$ は平均加速電圧である.

3) $L \ll \lambda_m$

この式はチャンネル内でイオンが中性粒子と衝突することなく加速・排出される条件を表す式である。イオンの平均自由行程 λ_m は

$$\lambda_m = \frac{1}{4\sqrt{2}} \frac{1}{\sigma n} \quad (1.11)$$

と表される。

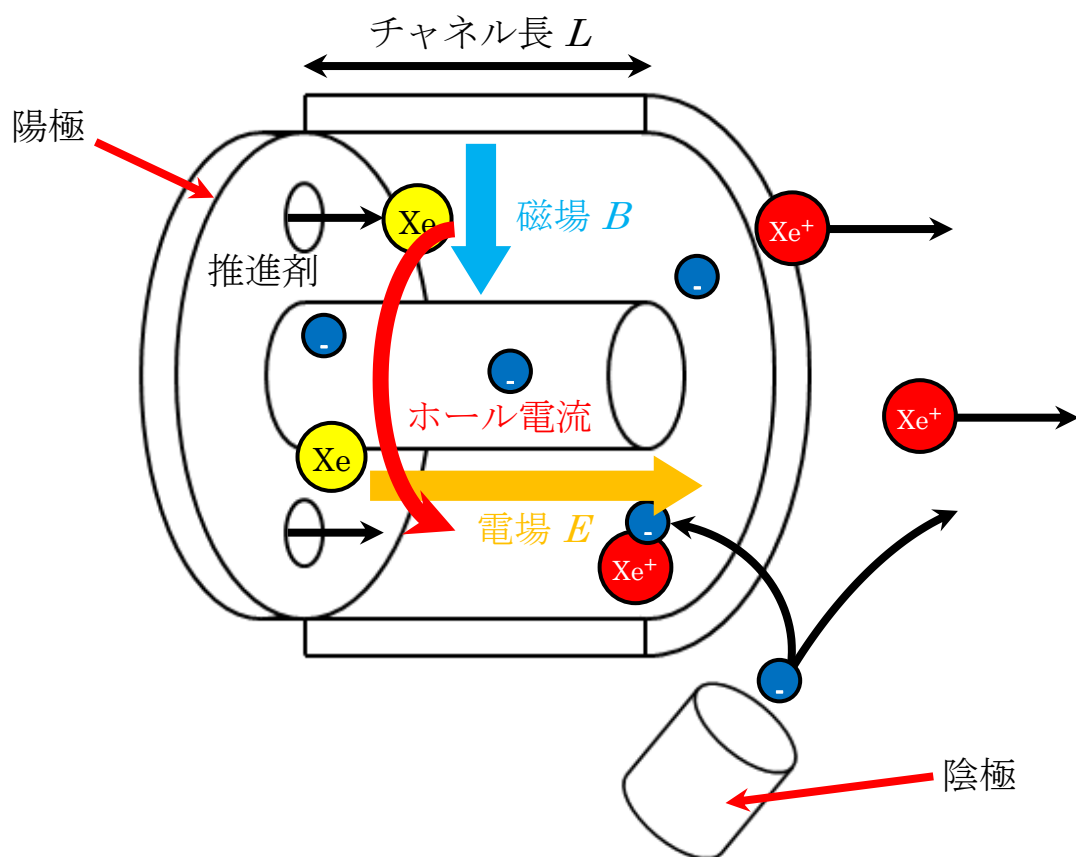


図 1.2 ホールスラストの概念図

1.3 ホールスラストの分類

ホールスラストは加速チャンネルの長さから大きく 2 種類に分類される。1960 年代に旧ソ連の Morozov らによって開発された SPT (Stationary Plasma Thruster)

に代表されると同時期に旧ソ連の Zharinov らによって開発された TAL (Thruster with Anode Layer) に代表されるアノードレイヤー型ホールスラスタである。マグネティックレイヤー型ホールスラスタとの概略図をそれぞれ図 1.3, 1.4 に示す。マグネティックレイヤー型は加速チャンネルが長くセラミックス製であること、アノードレイヤー型は加速チャンネルが短く金属製であることが特徴である。マグネティックレイヤー型は加速チャンネルが長いいためプラズマが安定して生成される。そのため安定作動領域が比較的広く既に実用化されている。一方、アノードレイヤー型はプラズマ生成領域が狭いため安定作動領域も狭く実用化が遅れているが、近年作動の安定化が図られている⁷⁾。アノードレイヤー型はチャンネル長が短いためマグネティックレイヤー型と比較してプラズマの壁面損失が少なく、また壁面のエロージョンも抑えられるため長寿命化が期待できる。現在までマグネティックレイヤー型ホールスラスタとアノードレイヤー型ホールスラスタを小型・低電力化する試みがなされてきたが推進性能の低下という問題が発生している。

Kaufman は図 1.5 に示されるエンドホール型スラスタと呼ばれる推進機を開発した⁸⁾。はスラスタ中心のポールが無いいため、同じ放電室直径であればマグネティックレイヤー型と比較して放電室体積を大きくすることができる。またインナーコイルが放電室に囲まれていないためコイルの過熱を抑制できる。しかしエンドホール型の磁場はノズル状であるため、強い軸方向磁場成分による半径方向の電場が発生し、イオンが推力に直接寄与しない半径方向へも加速されてしまう。またこのスラスタは加速チャンネルが金属製のため、加速チャンネルにセラミックスを用いているマグネティックレイヤー型と比較して壁面における二次電子放出によるプラズマ冷却効果が小さい。そのため陽極へ流入する電子電流が大きくなり、放電電流が大きくなった。これらの結果、エンドホール型スラスタの推進効率は低い(20%以下)ものに留まった。

2000 年プリンストン大学プラズマ物理研究所の Raitses らによってマグネティックレイヤー型ホールスラスタとエンドホール型スラスタの長所を組み合わせた推進機が開発された⁹⁾。この推進機はシリンドリカルホールスラスタ (Cylindrical Hall Thruster: CHT) と名付けられた。その概略図を図 1.6 に示す。図から分かるように CHT はエンドホール型に類似したノズル状磁力線形状とマグネティックレイヤー型に類似したセラミックス製チャンネルを持つ^{10,11)}。CHT はセラミックスによるプラズマ冷却作用により放電電流を小さくすることができる。放電室径 2.6 cm の CHT はエンドホール型スラスタに比べて比較的高い推進効率 (~32 %) を達成した¹²⁾。

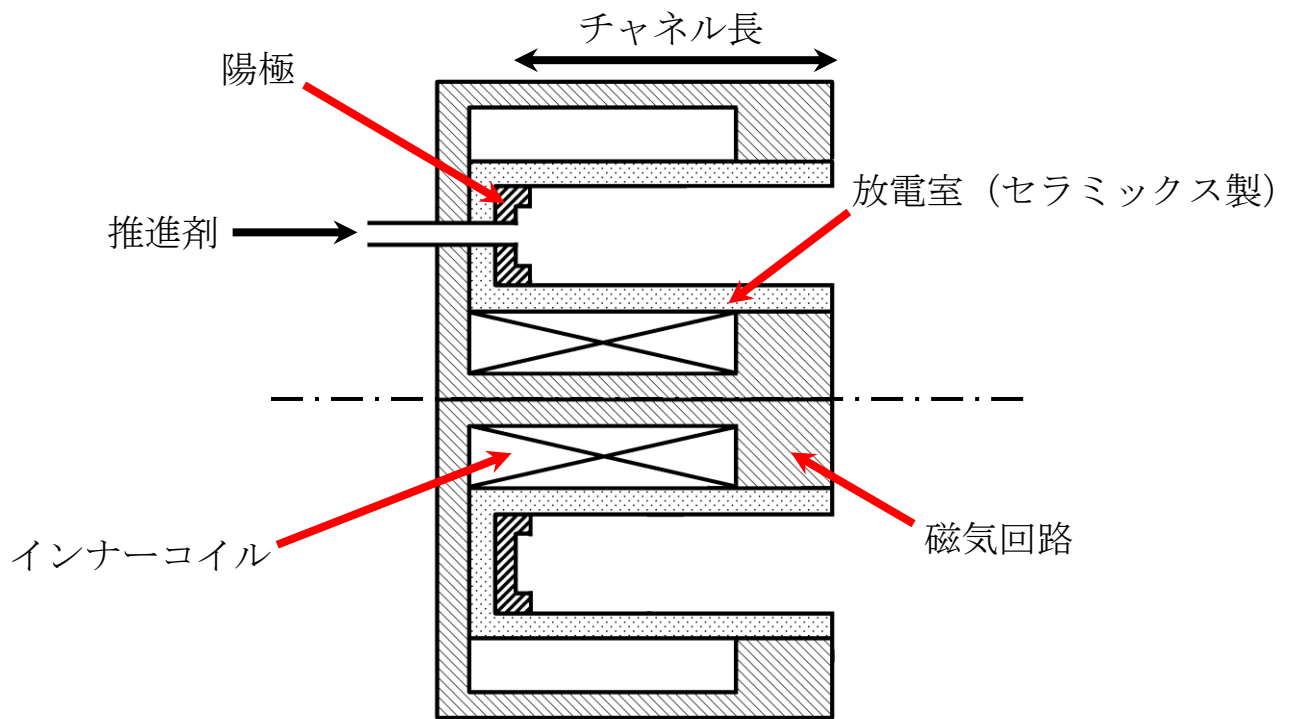


図 1.3 マグネティックレイヤー型ホールスラスタの概略図

チャンネル長

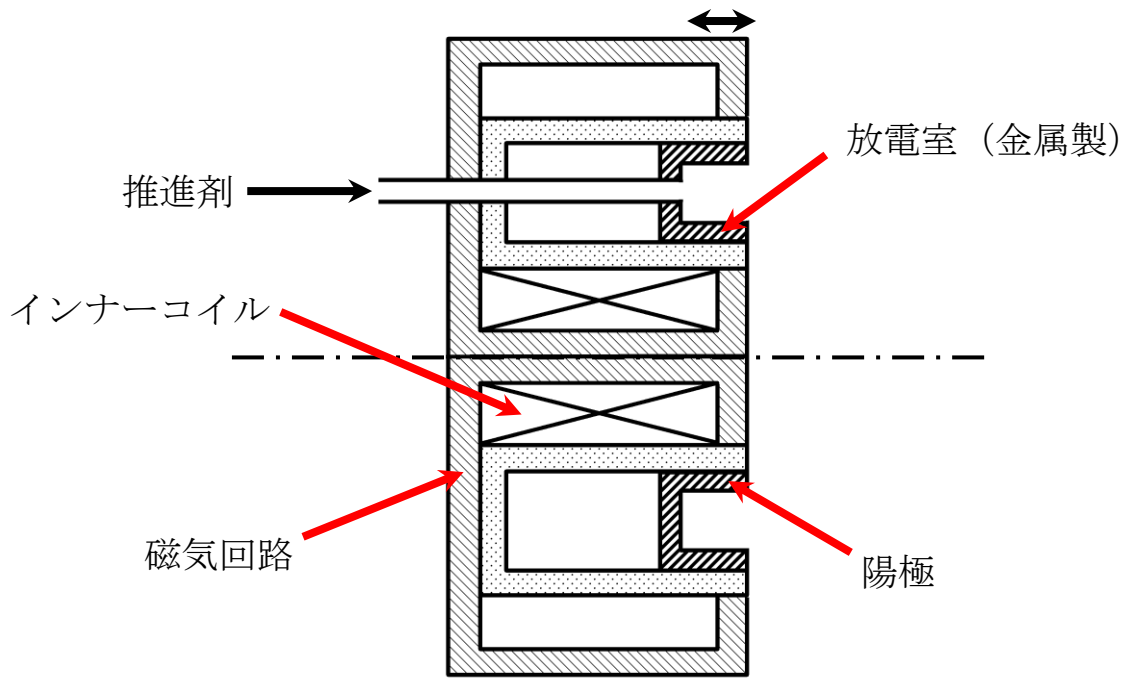


図 1.4 アノードレイヤー型ホールスラスタの概略図

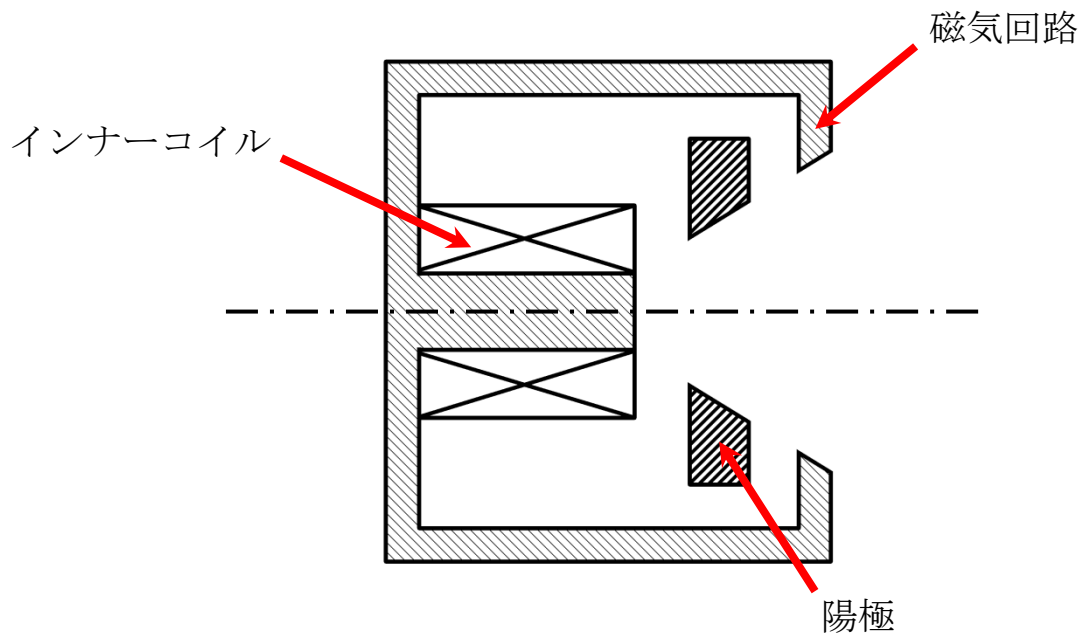


図 1.5 エンドホール型スラスタの概略図

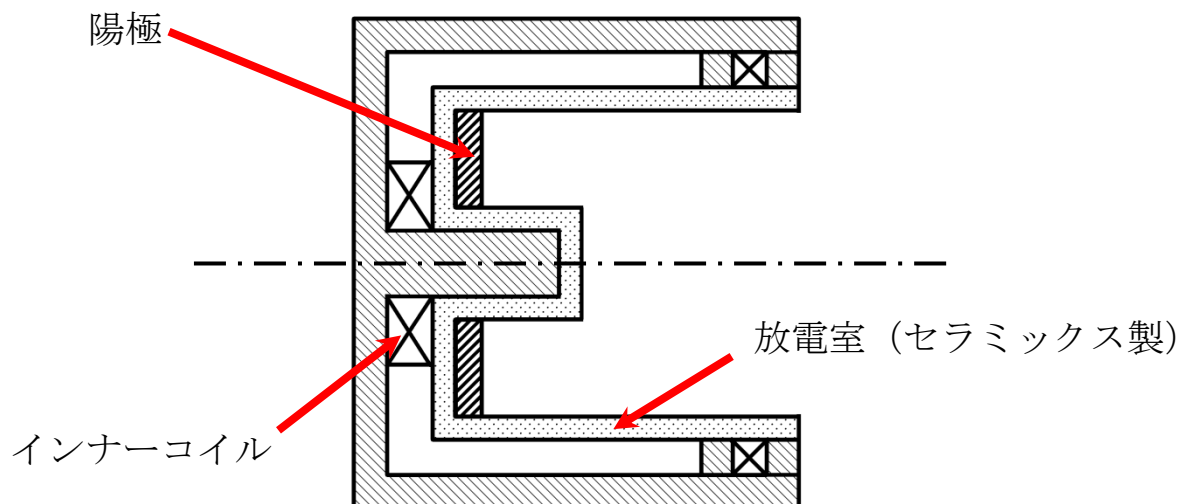


図 1.6 シリンドリカルホールスラスタの概略図

1.4 研究目的

ホールスラスタの性能を維持したまま小型化・低消費電力化し、小型人工衛星に搭載することができれば、小型人工衛星の性能は飛躍的に向上する。そこで本研究の目的は、重量 50 kg 程度の超小型人工衛星への搭載を目指し、消費電力 50 W で動作する小型かつ低消費電力なシリンドリカルホールスラスタを製作し、その性能を評価することとする。

第2章 原理

2.1 ホローカソードの原理

ホールスラスタにおいてホローカソードは放電陰極, チャンネル内への電子の供給源及び中和器の役割を果たす. 図 2.1 にホローカソードの概念図を示す. ホローカソードはフィラメント陰極と比較すると作動ガスを必要とするという欠点があるが, 安定した電子放出を行うことができることや長寿命 (1000 時間以上の寿命) であることなどの利点からホールスラスタの陰極として広く用いられている. ホローカソードは仕事関数の低いバリウムなどを含有する化学物質をインサーターとして使用している. このインサーターをヒーターにより高温まで熱すると, インサーターは熱電子を放出する. 放出された熱電子は作動ガスと電離衝突し, ホローカソード内でプラズマを発生させる. カソード出口にキーパーと呼ばれるカソードに対して正に印加された電極を設置すると, プラズマから電子がカソード外に引き出される. これがホローカソードの仕組みである. カソード作動前には外部ヒーターを用いてインサーターを加熱するが, いったんカソードが作動すると自己発熱によって電子を放出することができる.

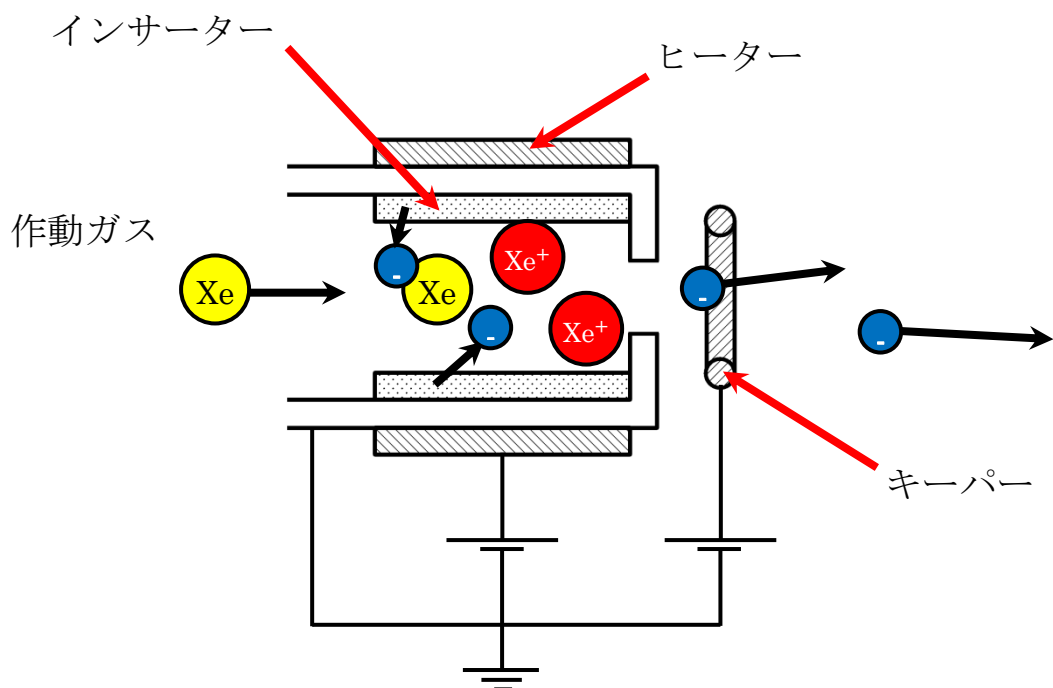


図 2.1 ホローカソードの概念図

2.2 スラストスタンドの原理

スラストの推力を測定するためにスラストスタンドを用いる。図 2.2 にねじりばね式スラストスタンドの概略図を示す。 l_t [m] は回転軸からスラストまでの距離， l_m [m] は回転軸から変位センサの変位測定点までの距離である。このスラストスタンドが測定できる推力 F [N] の分解能を求める。スラストスタンドの回転軸周りの運動方程式は次式で書き表すことができる。

$$T(t) = J \frac{d^2\theta}{dt^2} + C \frac{d\theta}{dt} + K\theta \quad (2.1)$$

ここで T [N·m] はトルク， J [kg·m²] は回転軸周りの慣性モーメント， C [kg·m/s] は減衰抵抗の比例係数， K [N·m/rad] はバネ定数， θ [rad] は回転角である。定常状態となった時，式は次のように表される。

$$T = K\theta \quad (2.2)$$

トルク T は推力 F と回転軸からスラストまでの距離 l_t を用いて

$$F \cdot l_t = K\theta \quad (2.3)$$

$$F = \frac{K}{l_t} \theta \quad (2.4)$$

変位センサで測定される変位 x [m]は $x = l_m \cdot \sin\theta$ と書き表すことができるので

$$F = \frac{K}{l_t} \sin^{-1} \left(\frac{x}{l_m} \right) \quad (2.5)$$

これより、推力の分解能を求めることができる。次にスラストスタンドの固有振動数を求める。固有振動数 ω_0 [Hz]は

$$\omega_0 = \sqrt{\frac{K}{J}} \quad (2.6)$$

と表される。

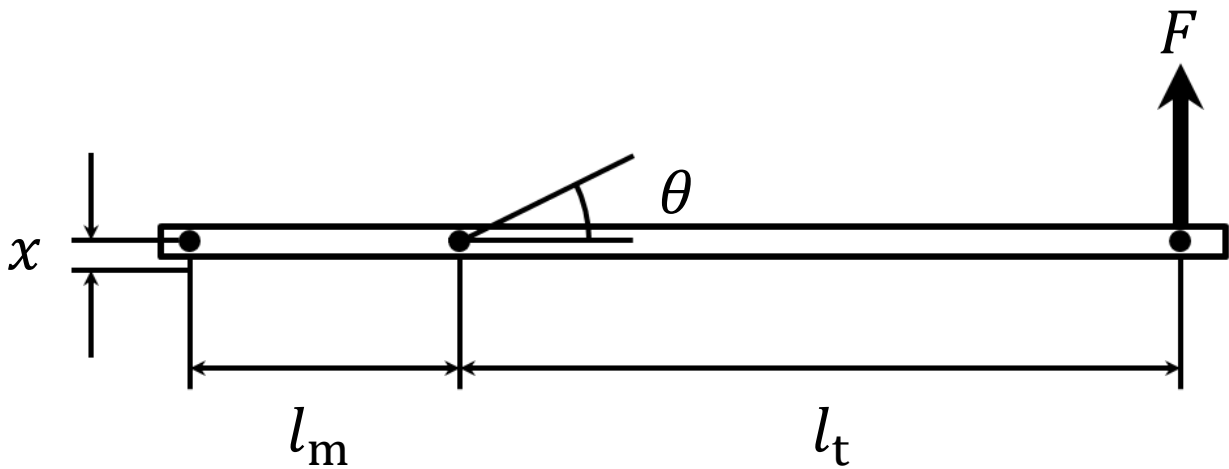


図 2.2 ねじりばね式スラストスタンドの概略図

2.3 エネルギーアナライザの原理

図 2.3 にエネルギーアナライザの概略図を示す。エネルギーアナライザ (RPA: Retarding Potential Analyzer) は RPA に入ってくるイオンビームに対してグリッ

ド (IRG) に正電位を印加し, そのエネルギーに満たない低エネルギーイオンを遮断することによってグリッドに印加した電位以上のエネルギーをもつイオンのみを捕集する装置である. 本研究で用いた RPA は 4 枚のグリッドとコレクタから構成されている. 各グリッド及びコレクタの詳細を以下に述べる.

1) FG (Floating Grid)

1 枚目のグリッドは FG と呼ばれ, RPA 内部の電場がプラズマ中に浸透し, 擾乱を引き起こすことを防ぐためのグリッドである. そのためにこのグリッドは電位的に浮かせてある.

2) ERG (Electron Retarding Grid)

2 枚目のグリッドは ERG と呼ばれ, 電子が RPA 内部へ侵入することを防ぐためのグリッドである. そのために負電圧が印加されている.

3) IRG (Ion Retarding Grid)

3 枚目のグリッドは IRG と呼ばれ, RPA 内部に侵入してきたイオンにフィルタをかける掃引電圧を印加するグリッドである. これにより掃引電圧以下の.

4) SESG (Secondary Electron Suppression Grid)

4 枚目のグリッドは SESG と呼ばれ, コレクタに衝突したイオンによって 2 次電子が放出されることを防ぐグリッドである. このグリッドも ERG と同様に負の電圧が印加されている.

5) Collector

最後のコレクタは IRG の掃引電圧によるフィルタを透過したイオンを捕集する. イオンコレクタの捕集能力を高めるために負電圧を印加される.

イオンビームエネルギー分布関数 $f(E)$ は RPA のコレクタで捕集されたイオン電流 I_c [A] とグリッド掃引電圧 V_{sw} [V] を用いて次式で示される.

$$E_{sw} = eV_{sw} \quad (2.7)$$

$$f(E) = -\frac{1}{I_{c0}} \frac{dI_c}{dE_{sw}} \quad (2.8)$$

ここで、 $I_{c0}[A]$ はグリッド印加電圧が 0 V のときにコレクタで捕集されるイオン電流である。得られたイオンビームエネルギー分布を図に示す。2.4 節で述べるエネルギー効率 η_E を求めるためにイオンビームの平均エネルギー $E_m[eV]$ が必要になる。イオンビームの平均エネルギーの導出には上式で得られたイオンエネルギー分布関数 $f(E)$ を用いて次式より求める。

$$E_m = \left\{ \int f(E) \sqrt{E_{sw}} dE \right\}^2 \quad (2.9)$$

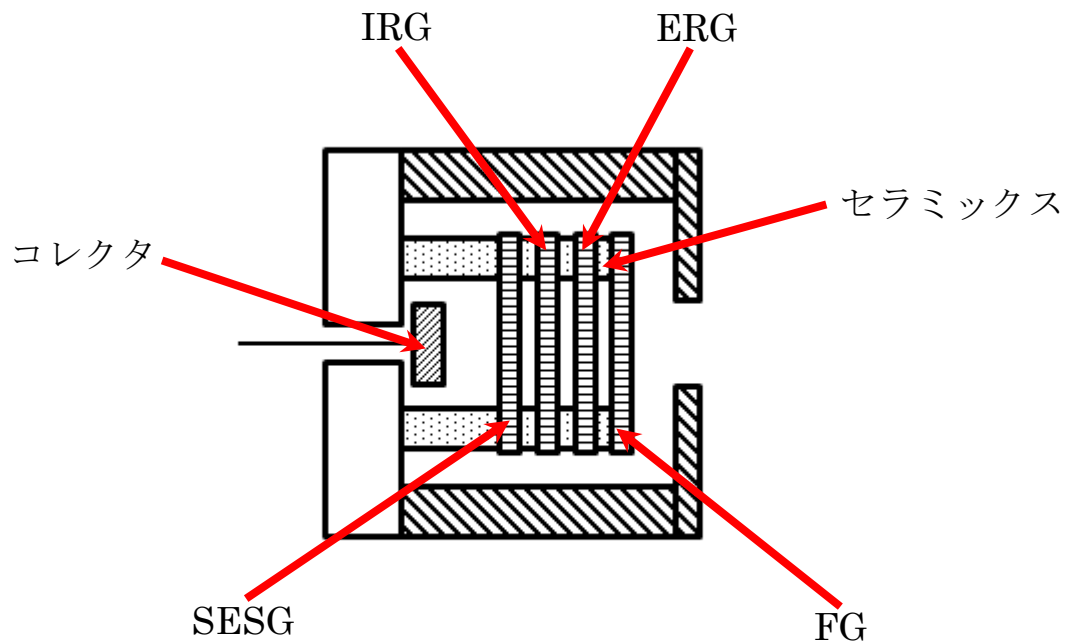


図 2.3 エネルギーアナライザの概略図

2.4 性能評価

スラスタの性能を評価するために推進効率 η_t を求める。推進効率は以下のように表すことができる。

$$\eta_t = \frac{F^2}{2\dot{m}V_d I_d} \quad (2.10)$$

ここで $F[\text{N}]$ は推力, $\dot{m}[\text{kg/s}]$ は推進剤流量, $V_d[\text{V}]$ は放電電圧, $I_d[\text{A}]$ は放電電流である. 推進効率 η_t はスラスタに投入された電力がどれだけ推力を発生する運動エネルギーに変化したかを表す指標である.

加速効率 η_a を求める. 加速効率は次の式で表される.

$$\eta_a = \frac{I_b}{I_d} \quad (2.11)$$

ここで $I_b[\text{A}]$ はイオンビーム電流である. 加速効率はイオンビーム電流を放電電流で除した値で求められ, 放電電圧をどれだけイオンの加速に利用したかを表す指標となっている.

推進剤利用効率 η_u は

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

と表される. 推進剤利用効率は投入した推進剤がどれだけ電離してイオンビームとなったかを表す指標である.

エネルギー効率 η_E は

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

と表される. エネルギー効率は放電電圧がどれだけイオンビームの加速に使われたかを表す指標である.

また, 加速効率 η_a , 推進剤利用効率 η_u , エネルギー効率 η_E は内部効率と呼ばれる. これらの内部効率の積は推進効率 η_t となる.

$$\eta_t = \eta_a \eta_u \eta_E \quad (2.14)$$

第3章 実験装置

3.1 真空排気系

実験はすべて直径 1.0 m, 長さ 1.2 m のステンレス製真空容器で行った. 実験に用いた真空容器を図 3.1 に示す. 真空容器はロータリーポンプ (Rotary pump) 及びターボ分子ポンプ (Turbo molecular pump) を用いて真空排気を行った. ロータリーポンプは粗排気用として用いられ, 排気速度は 27 L/sec である. ロータリーポンプによって 50 Pa 以下まで粗排気が行われた後, 排気速度 2230 L/sec のターボ分子ポンプで高真空まで排気する. ターボ分子ポンプの排気口はロータリーポンプによって背圧が下げられている. 到達圧力はガス未流入時に 5.7×10^{-4} Pa であった.

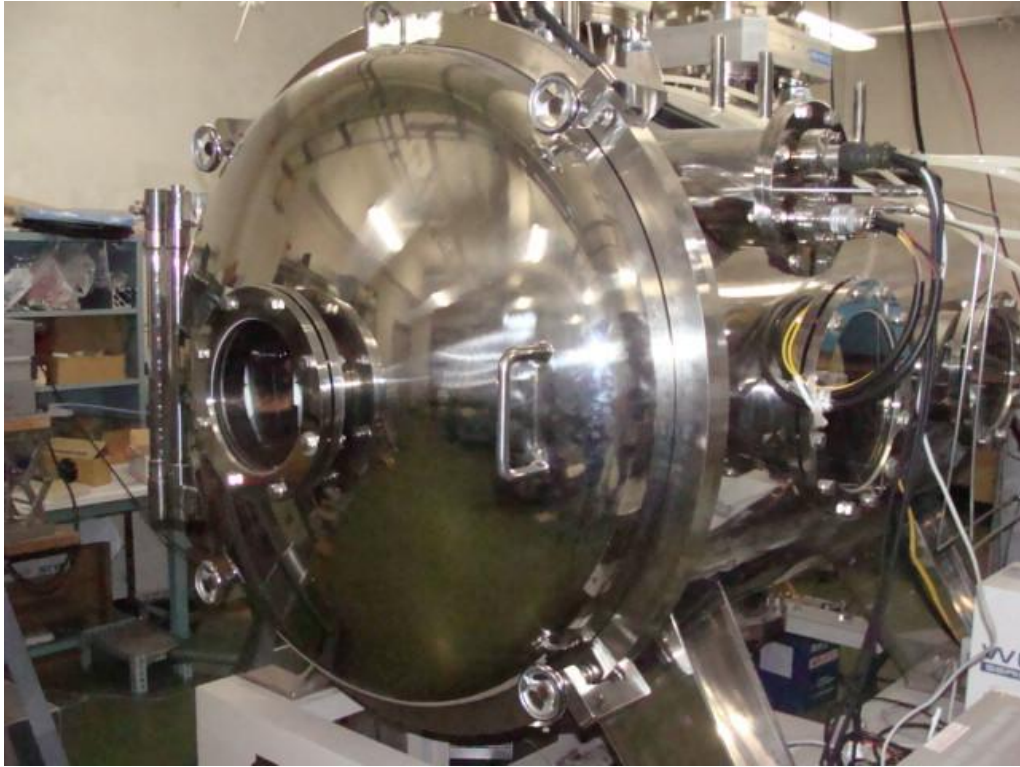


図 3.1 実験で用いた真空容器

3.2 推進剤・作動ガス供給系

本研究では推進剤及びホローカソード作動ガスにキセノン, 実験終了後のホローカソードの冷却にアルゴンを使用した. キセノン及びアルゴンはそれぞれホールスラストとホローカソードの 2 系統に分かれ, マスフローコントローラによりそれぞれ独立して流量を制御される. 推進剤・作動ガス供給系の概略図を図 3.2 に示す.

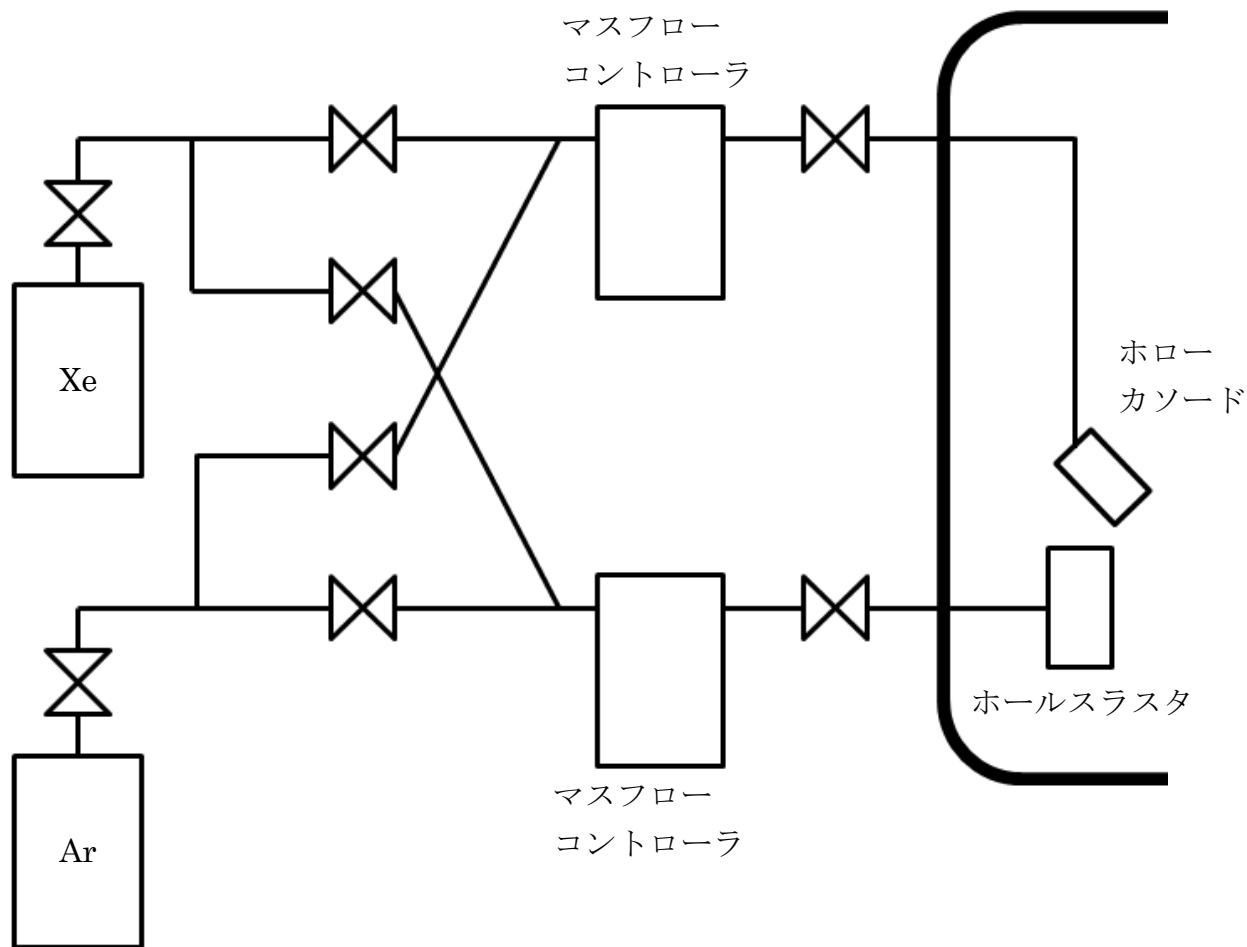


図 3.2 推進剤・作動ガス供給系の概略図

3.3 マイクロ波電源

本研究で用いたマイクロ波の周波数は 2.45 GHz と 4.2 GHz のものである。一般的に 2.45 GHz の発振に使用されるマグネトロン管のマイクロ波電源の場合、低電力領域では発振が不安定であるという特性を持つ。そのため本研究では固体発振器により発振されたマイクロ波をアンプにより増幅することとした。

マイクロ波伝送系のフローチャートを図 3.3 に示す。マイクロ波は固体発振器

から発振された後、アンプによって増幅され、特性インピーダンス 50Ω の N 型ケーブルより出力される。投入された電力はパワーモニタにより計測され入射波と反射波の差より算出される。また反射波はダミーロードにて熱として外部へ放出される。

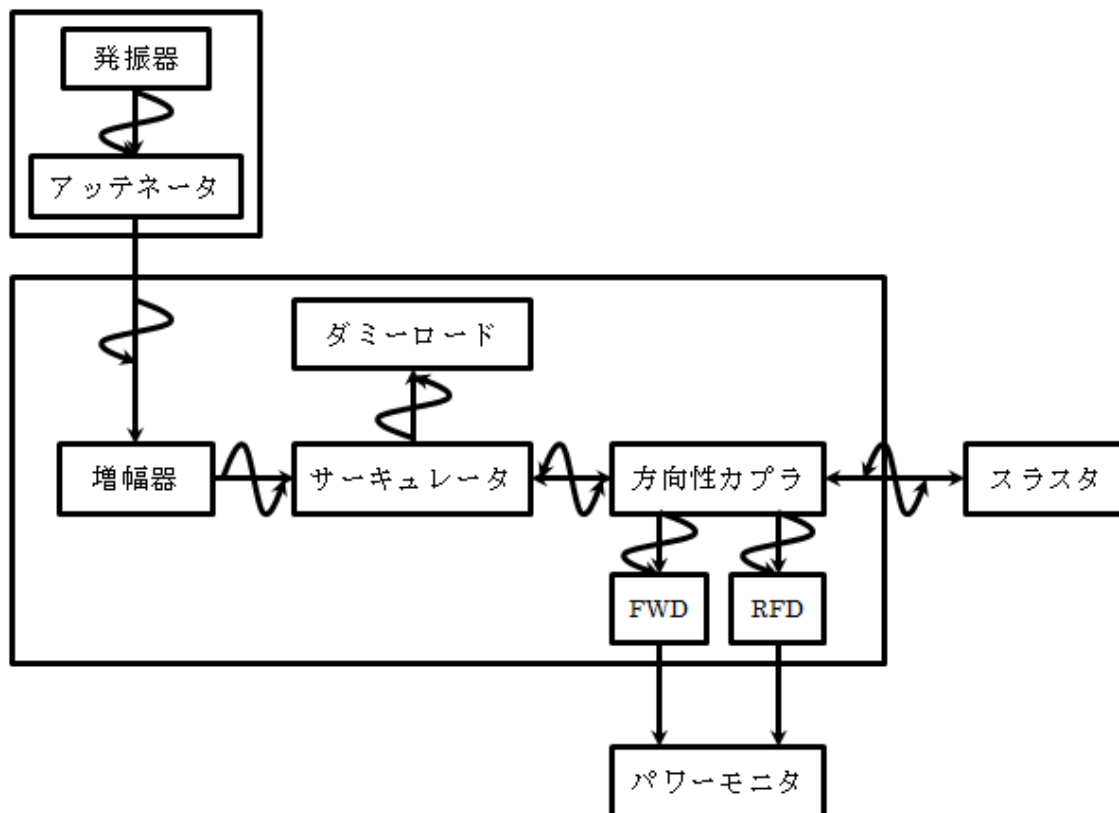


図 3.3 マイクロ波伝送系

3.4 小型ホールスラスタ

実験にあたって式(1.1)-(1.3)の設計則に則り小型ホールスラスタを製作した。その小型ホールスラスタの概略図と外観をそれぞれ図 3.4, 3.5 に示す。窒化ホウ素製の円環状の加速チャンネルは外径 18 mm, 内径 10 mm でチャンネル幅は 4 mm であり、チャンネル長は 9 mm である。陽極は厚さ 1 mm の銅製で、陽極とチャンネルの間に厚さ 4 mm のカーボンを挟んでいる。陽極が発熱することがあったのでスラスタを固定する台に水を循環させ冷却する。

このホールスラストは軟鉄と永久磁石により加速チャンネル内に半径方向に磁場を形成している。永久磁石は $4\text{ mm} \times 4\text{ mm} \times 12\text{ mm}$ の長手方向に磁化したサマリウムコバルト (Sm-Co) 磁石を 4 個または 5 個用いた。磁石個数を 4 個, 5 個としたときのチャンネルの磁場強度・磁場形状を図 3.6, 3.7 に示す。

チャンネル内の磁場は 0.0 T なので電子とイオンのラーマー半径は 0.0 m となる。加速チャンネル長が 9 mm なので、これは式(1.2)を満たしている。

また、この小型スラストは SMA コネクタとアンテナを通してマイクロ波を投入できるようにになっている。これによりマイクロ波放電によりチャンネル内でプラズマを発生させることができる。図 3.8 にアンテナの外観を示す。

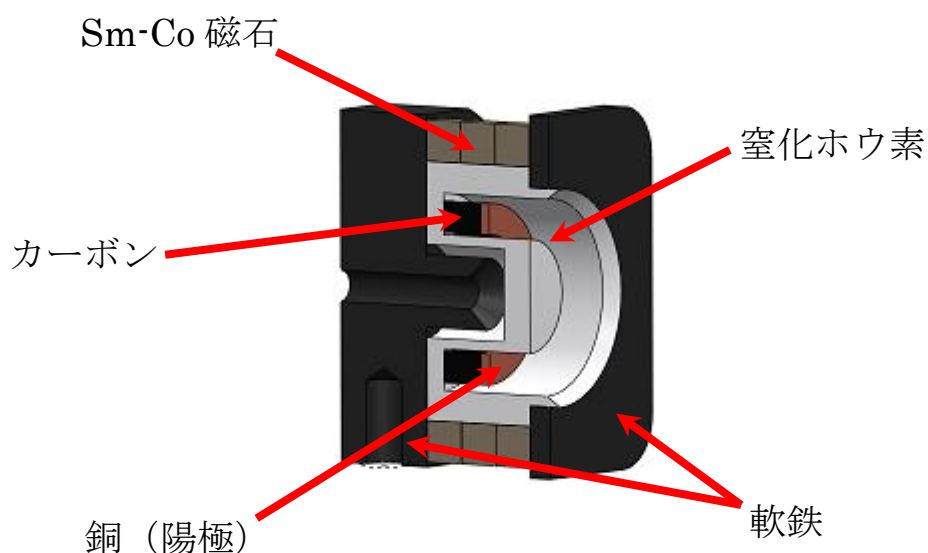


図 3.4 小型ホールスラストの概略図



図 3.5 小型ホールスラストの外観

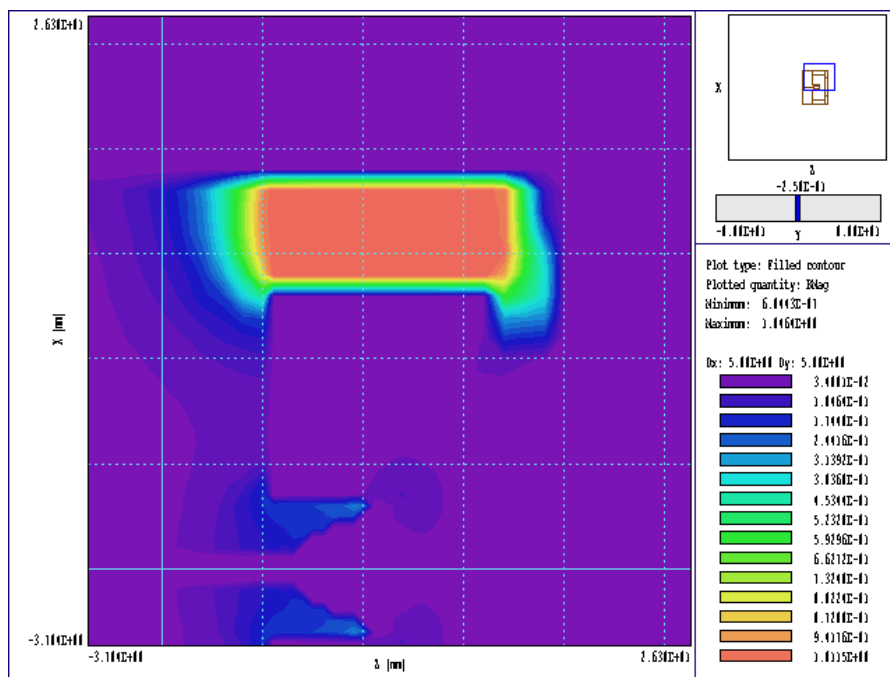


図 3.6 磁石個数 4 個としたときのチャネルの磁場形状

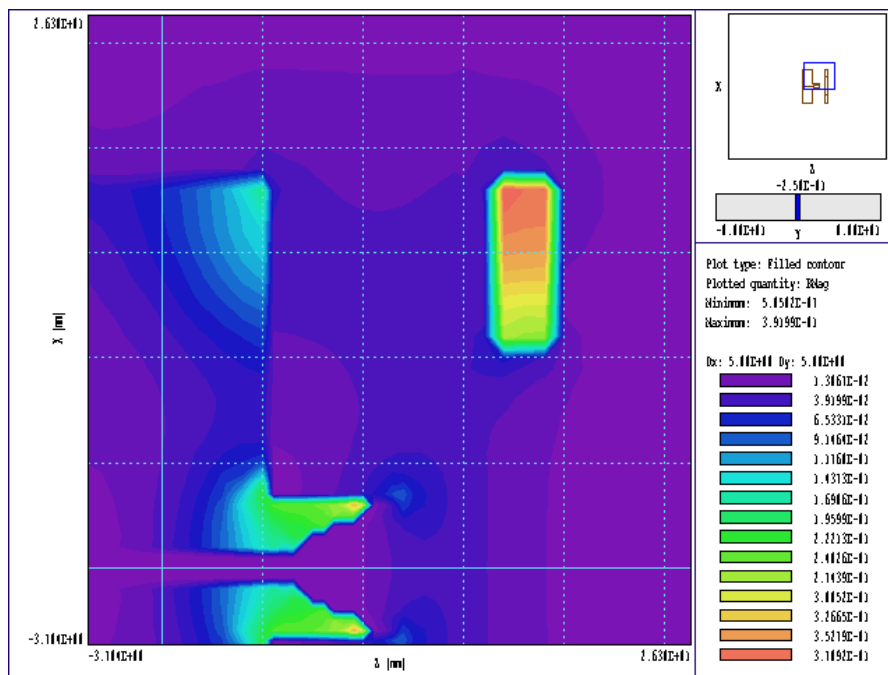


図 3.7 磁石個数 5 個としたときのチャネルの磁場形状



図 3.8 小型ホールスラストに設置されたアンテナ

3.5 ホローカソード

本研究では陰極にホローカソード (Ion-Tech 社製, HC252) を使用した. 実験に用いたホローカソードの外観を図 3.9 に, ホローカソードの設置位置を図 3.10 に示す. 作動ガスにはキセノン (99.999 %) を用い, カソードへのガス流量は 0.28 mg/s とした. キーパー電圧・電流はそれぞれ 10 V, 0.20 A, ヒーター電圧・電流は 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 程度である.

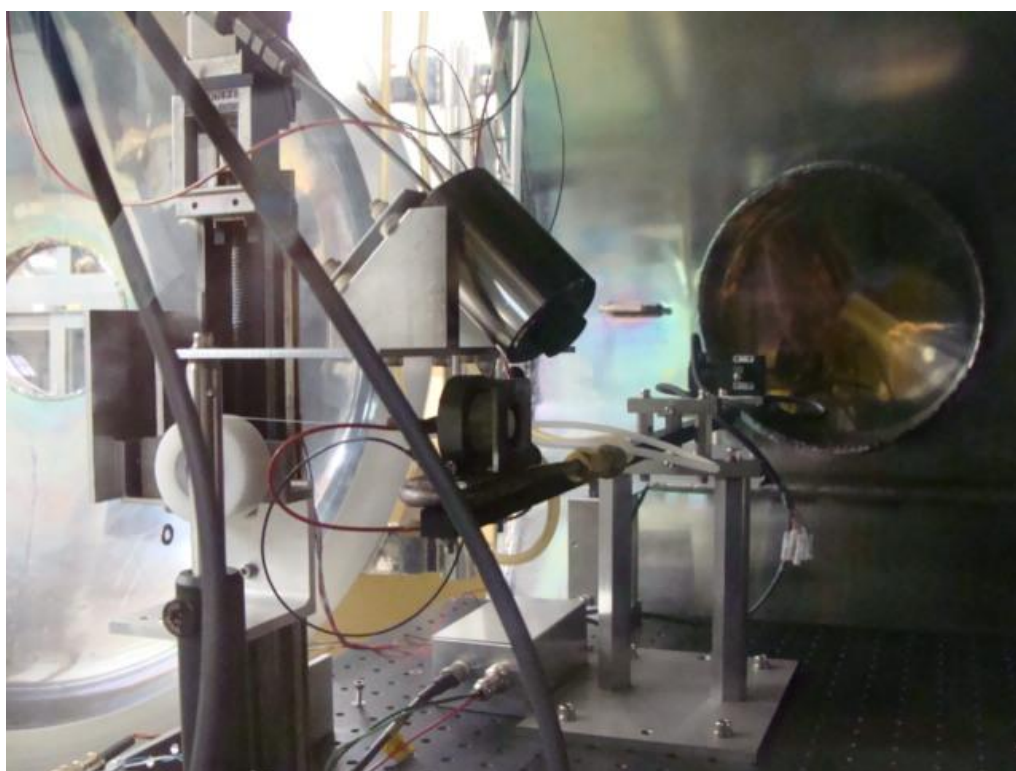


図 3.9 実験に用いたホローカソードの外観

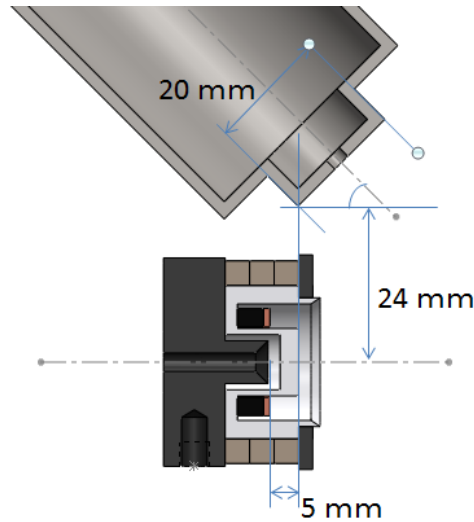


図 3.10 ホローカソードの設置位置

3.6 スラストスタンド

ホールスラストの性能を評価するために推力測定を行う必要がある。ホールスラストの推力は mN オーダーと非常に小さいため、本研究では推力測定に非接触式のスラストスタンドを用いた。変位の測定には LED 式のマイクロ変位センサを使用した。以下に製作した振り子式スラストスタンドとねじりばね式スラストスタンドについて述べる。

3.6.1 振り子式スラストスタンド

製作した振り子式スラストスタンドの概略図と外観を図 3.11, 3.12 に示す。このスラストスタンドは C/C コンポジット製の骨組みに 1 対のナイフエッジで支えられた C/C コンポジット製のアームが 2 本乗っており、そのアームにはそれぞれ 1 つずつナイフエッジが取り付けられている。アームに取り付けられた計 2 個のナイフエッジの上に 220 mm×64 mm×10 mm のカーボン板が乗っている箱ブランコのような構造になっている。スラストはカーボン板の端に、変位測定用の反射板(テフロン製)はその反対側にそれぞれ設置されている。支点からスラストまで距離は 325 mm である。スラストが作動し推力が発生すると計 6 個のナイフエッジによりカーボン板は前後に動く。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、推力を算出する。推力の算出は既知の水平方向荷重をスラストに加え、その変位を測定し、水平方向荷重と変位の関係式を求め

る．その関係式とスラスタ作動時の反射板の変位から推力が求まる．スラスタスタンドの推力較正は滑車を用いスラスタに水平方向に荷重がかかるようにおもりを糸に吊るし，モーターによってスラスタにかかるおもりの個数を変えることによつて行う．推力較正の概念図を図 3.13 に示す．

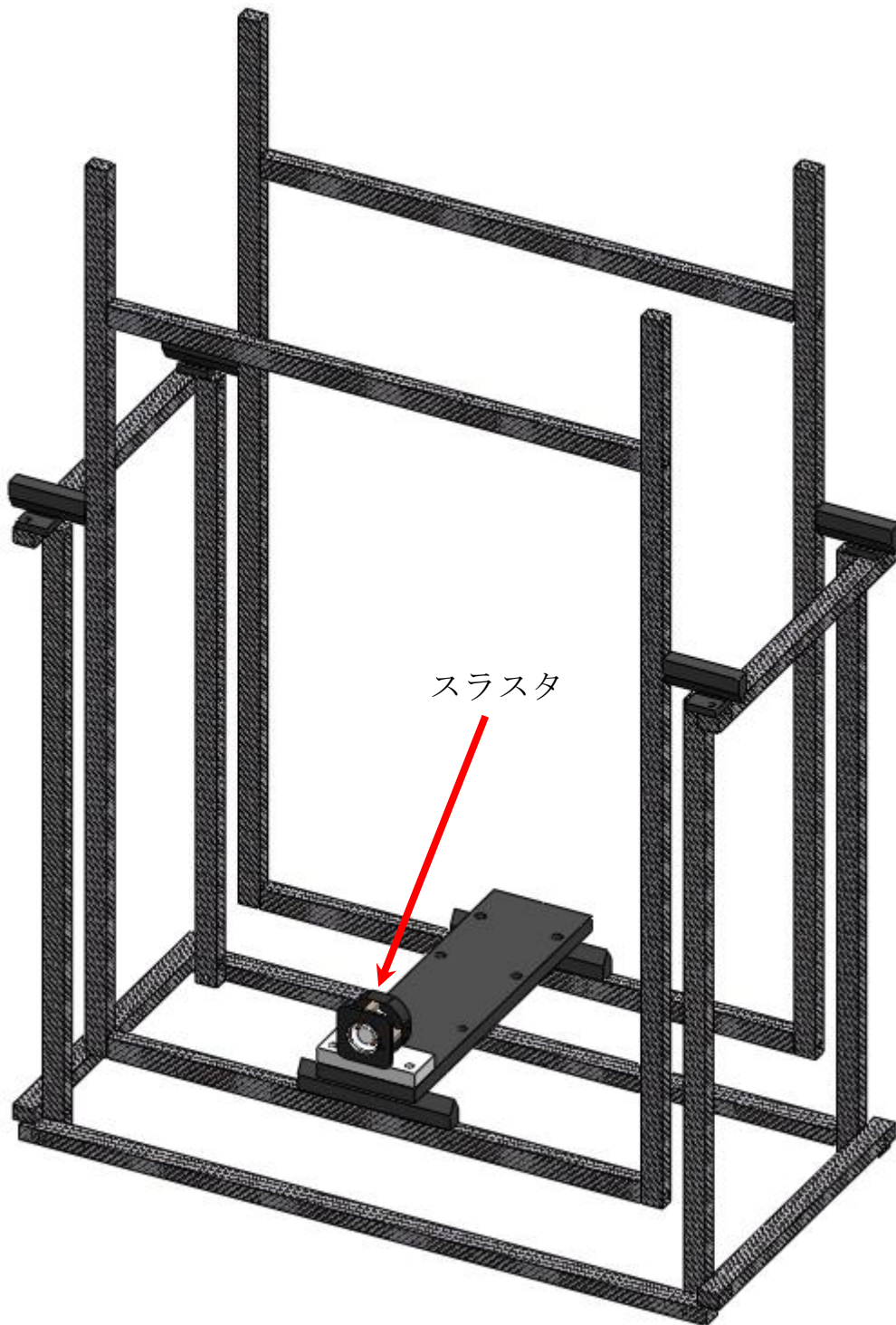


図 3.11 振り子式スラスタスタンドの概略図

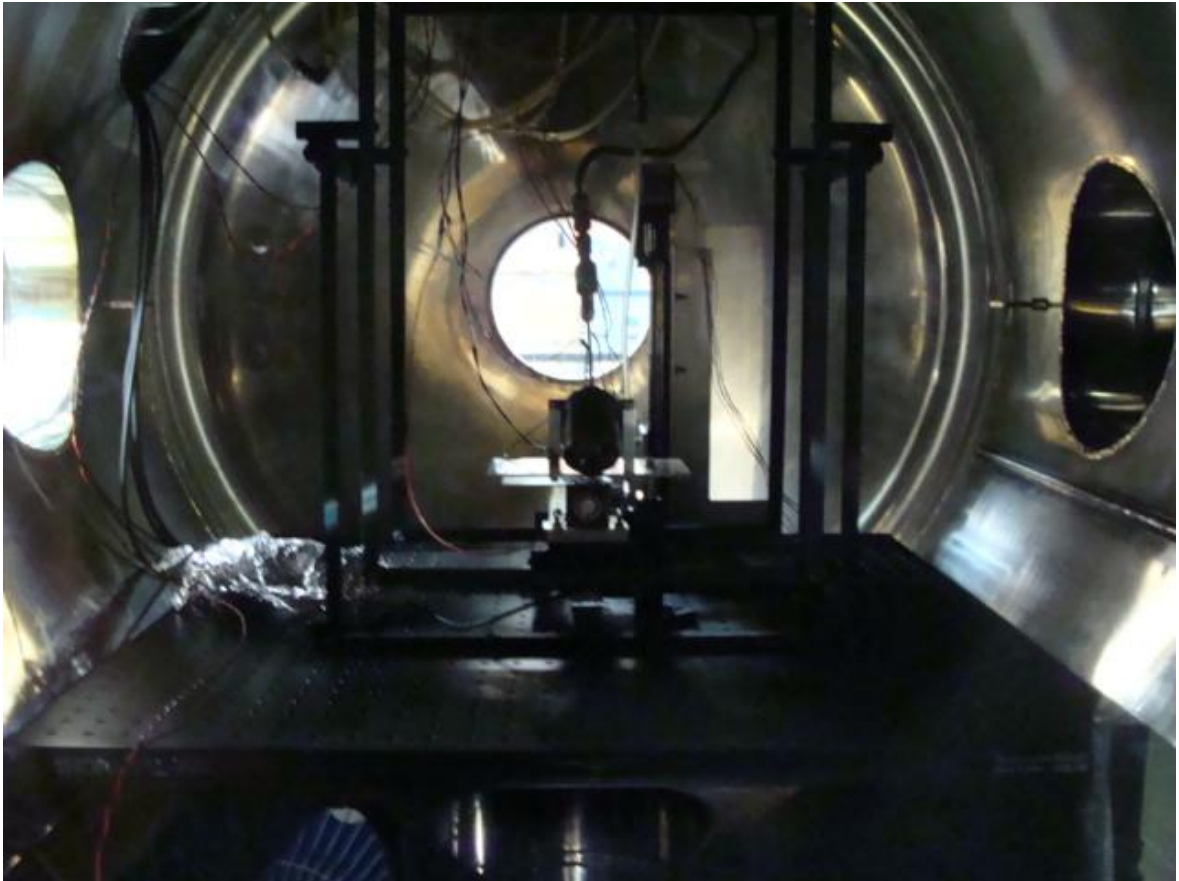


図 3.12 振り子式スラストスタンドの外観

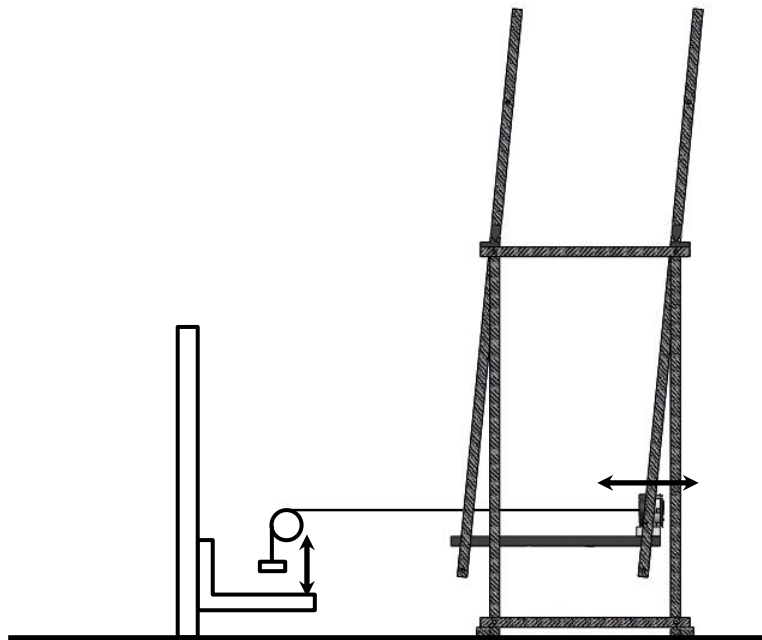


図 3.13 推力較正の概念図

3.6.2 ねじりばね式スラストスタンド

製作したねじりばね式スラストスタンドの概略図と外観を図 3.14, 3.15 に示す。このスラストスタンドはステンレス製の台座と 2 つの Flexural pivot (Riverhawk 社製, 5006-400) で C/C コンポジット製のアームを支える構造になっている。アームの両端にはそれぞれスラストと変位測定用の反射板 (セラミックス製) が設置されている。回転軸から推進機までの距離 l_t は 340 mm, 回転軸から変位センサの変位測定点までの距離 l_m は 200 mm である。スラストが作動すると pivot を支点としてアームが水平方向に回転し, セラミックス板が変位する。その変位を振り子式スラストスタンドと同様にマイクロ変位センサを用いて計測し, 推力を算出する。

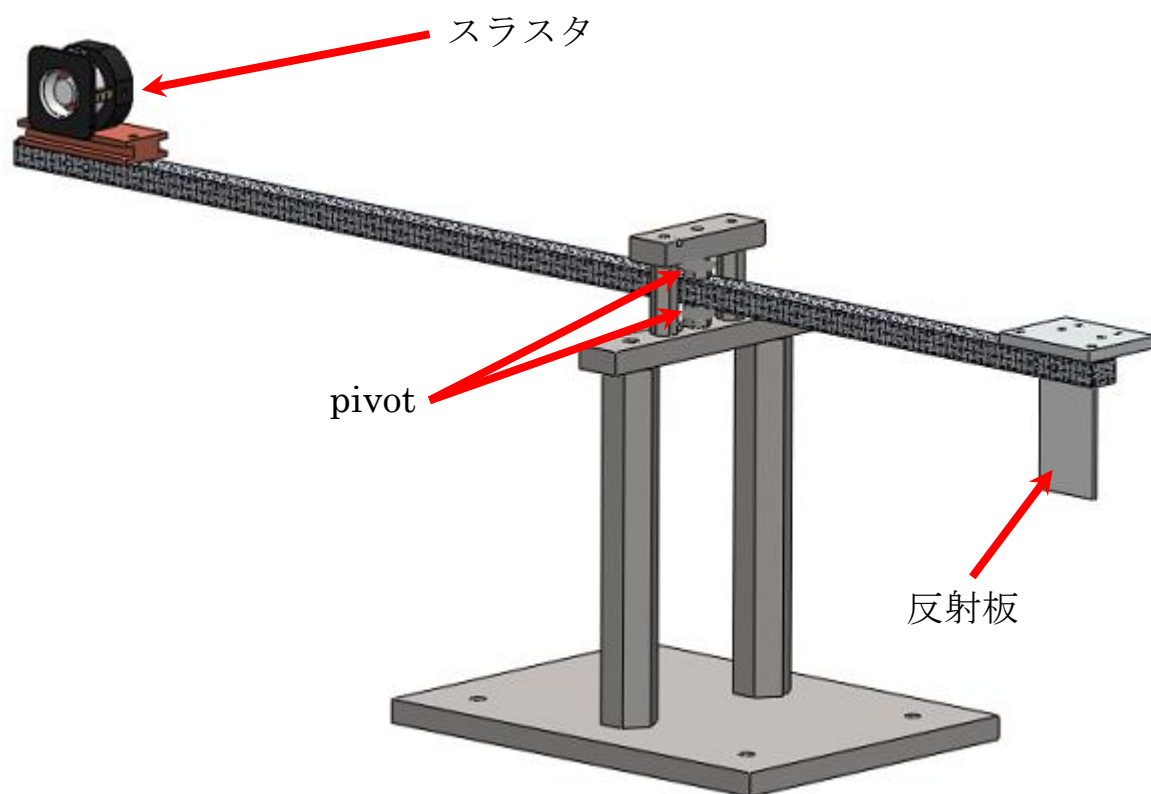


図 3.14 ねじりばね式スラストスタンドの概略図

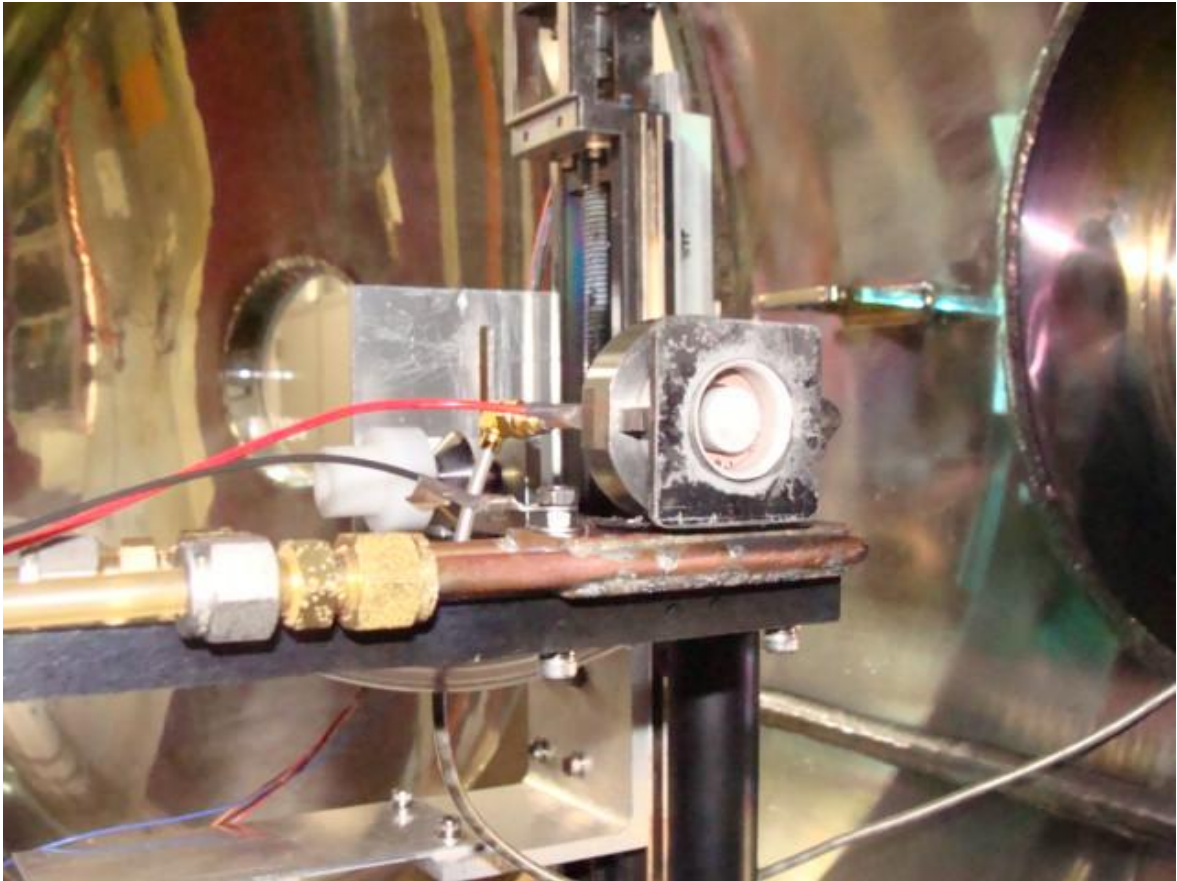


図 3.15 ねじりばね式スラストスタンドの外観

3.6.3 マイクロ変位センサ

スラストスタンドに設置したマイクロ変位センサを図 3.17 に示す. 実験にはマイクロ変位センサ (OMRON 社製, Z4D-F04A) を 2 つ用いた. この変位センサの諸元を表 3.1 に示す. 変位センサは反射板を挟んでそれぞれ 4 mm の距離に設置した. 変位センサから出力された信号は差動増幅回路により増幅させて変位を測定した.

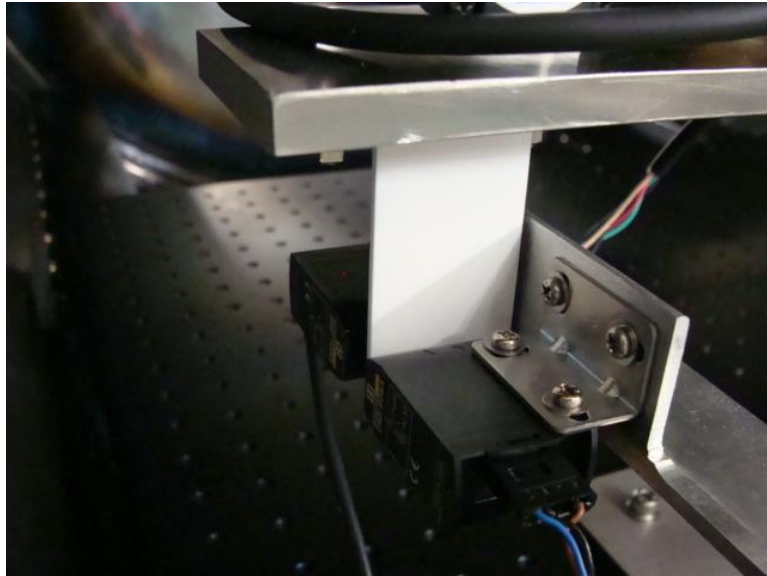


図 3.17 マイクロ変位センサの写真

表 3.1 変位センサの諸元

検出範囲	$4 \pm 1.25 \text{ mm}$
分解能	$5 \mu\text{m}$ 以下
応答速度	5 ms 以下
出力	$1\sim 5\text{V}$ ($1.6 \text{ V/mm} \pm 10\%$)

3.7 エネルギーアナライザ

ホールスラストから排出されたイオンビームのイオンエネルギー分布を測定するために RPA を製作した。製作したエネルギーアナライザの回路図と外観をそれぞれ図 3.18, 図 3.19 に示す。製作した RPA はアルミニウムのベースとカーボンの壁面, C/C コンポジットのオリフィス内に 4 枚のステンレス製メッシュとカーボン製コレクタを設置した構造になっている。実験ではホールスラスト開口部より下流 200 mm の位置で測定を行った。

EGR において電子がグリッドのメッシュを通らないようにするためにはメッシュの間隔がシースより小さいことが条件となる。シースの厚みがデバイ長の数倍程度と考えると, ERG のメッシュは測定位置におけるプラズマの密度から求められる。ホールスラスト下流 200 mm の位置における電子温度, 電子密度をそれぞれ 1 eV, $1.0 \times 10^{17} \text{ m}^{-3}$ とすると, デバイ長は 0.032 mm となる。この 2 倍の値がシ-

スの厚みとすると，ERGに用いるメッシュは400 mesh/inchより細かいメッシュでなければならない．このことを考慮してERGには500 mesh/inchのステンレス製メッシュを使用した．IRGはRPA内部に侵入してきたイオンにフィルタをかけるためのグリッドであり，全てのイオンにフィルタをかけるためにホールスラストの放電電圧以上の電圧まで掃引しなければならない．メッシュ間隔が広いとメッシュの間隙に掃引電圧よりも低い領域ができ，掃引電圧より低いエネルギーのイオンがIRGを通過してしまう．よってIRGには500 mesh/inchの細かいステンレス製メッシュを使用した．表3.2にRPAに用いたグリッドの諸元を示す．なおイオンコレクタにはイオン捕集能力を高めるために-30 Vの負電圧を印加した．

表 3.2 グリッドの諸元

グリッド	メッシュ [mesh/inch]	印加電圧[V]	材質
Floating Grid	250	—	
Electron Retarding Grid	500	-40	ステンレス
Ion Retarding Grid	500	0~250	
Secondary Electron Suppression Grid	250	-40	

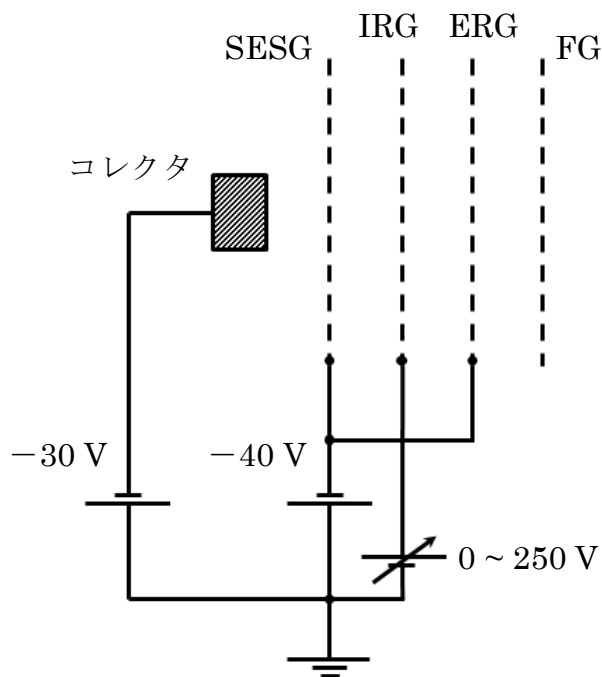


図 3.18 製作したエネルギーアナライザの回路図

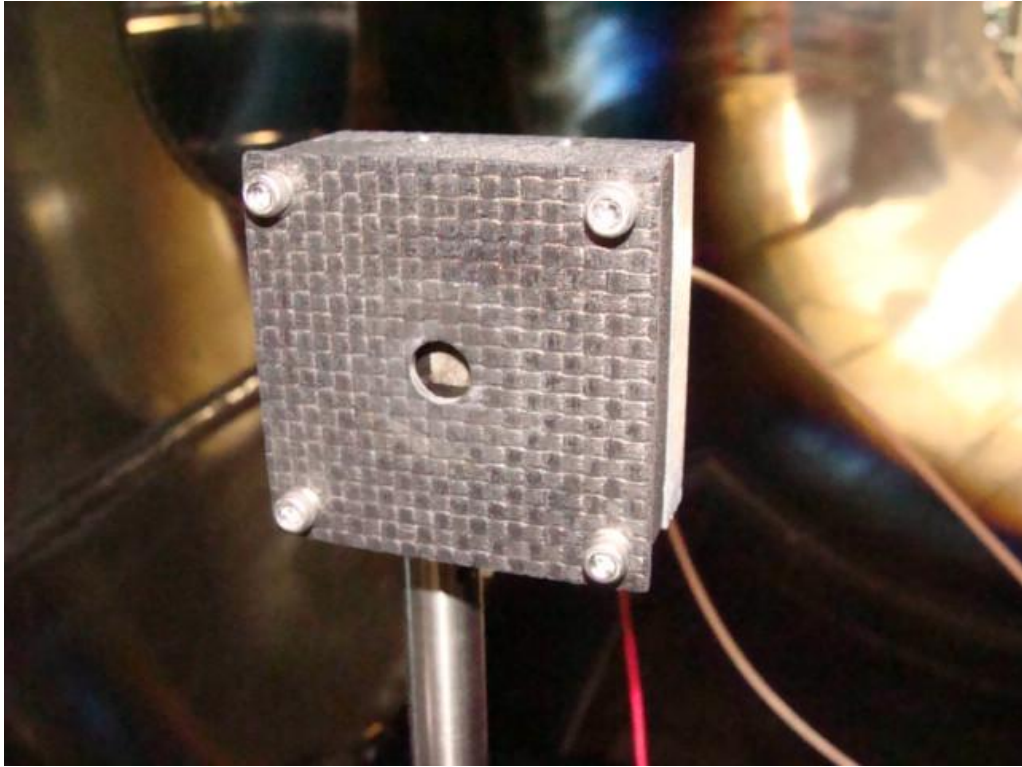


図 3.19 製作したエネルギーアナライザの外観

第4章 実験結果及び考察

4.1 スラストスタンド

ホールスラストの推力を測定する事前準備として、製作したスラストスタンドの推力較正を行った。推力較正は既知の荷重をスラストスタンドにかけた時の変位を測定することによって行われる。図4.1, 4.2に振り子式スラストスタンドとねじりばね式スラストスタンドで推力較正をした時に得られた変位センサの出力信号を示す。図から分かるように荷重がかけられたときに出力信号が大きくなり、荷重がなくなると出力信号が荷重をかける前の値まで戻っている。ここで振り子式スラストスタンドとねじりばね式スラストスタンドにかけたおもりはそれぞれ1gと300mgである。出力信号の変位はそれぞれ3.78Vと1.49Vであった。これよりねじりばね式スラストスタンドの方が推力の分解能がよいことが分かった。よって以後の実験では推力測定にねじりばね式スラストスタンドを用いることとする。なお、較正值はセッティングにより変化するため、セッティングを変えるたびに推力較正を行う。

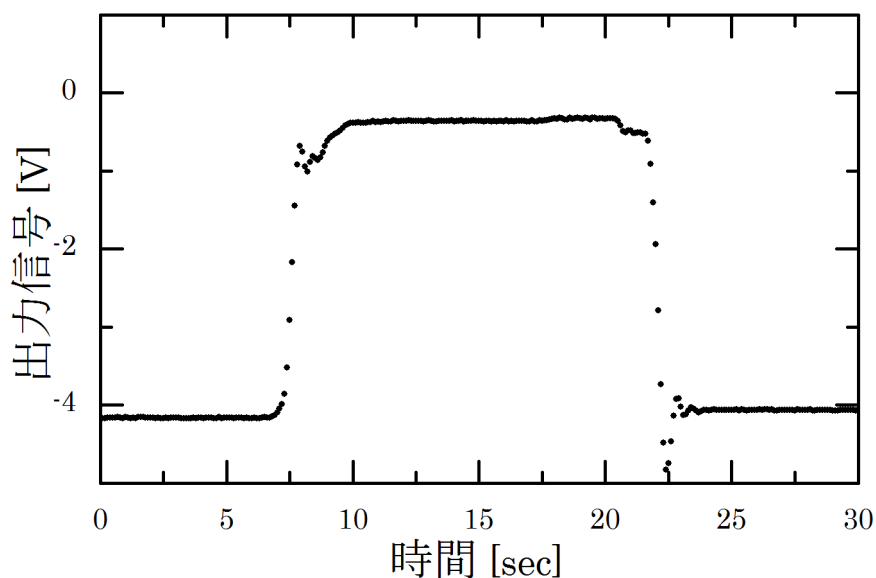


図4.1 振り子式スラストスタンドにて得られた出力信号

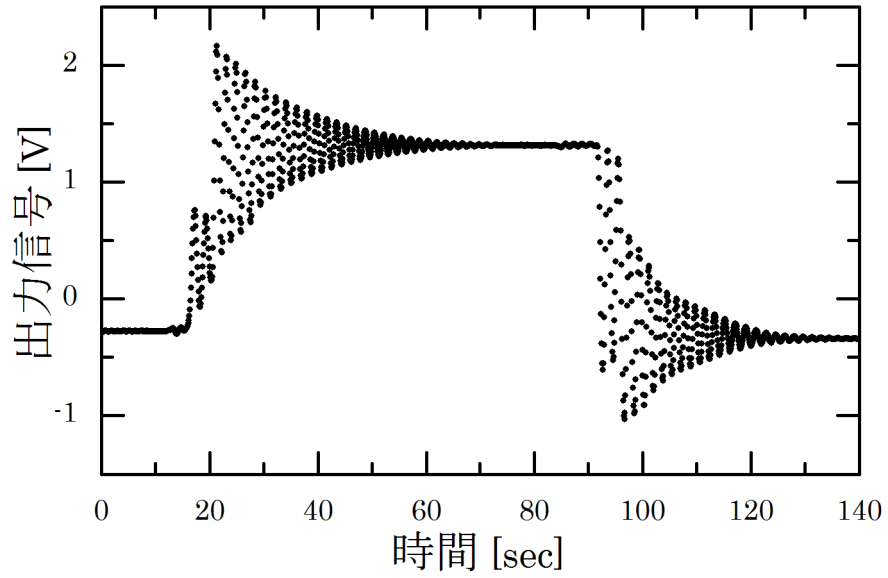


図 4.2 ねじりばね式スラストスタンドにて得られた出力信号

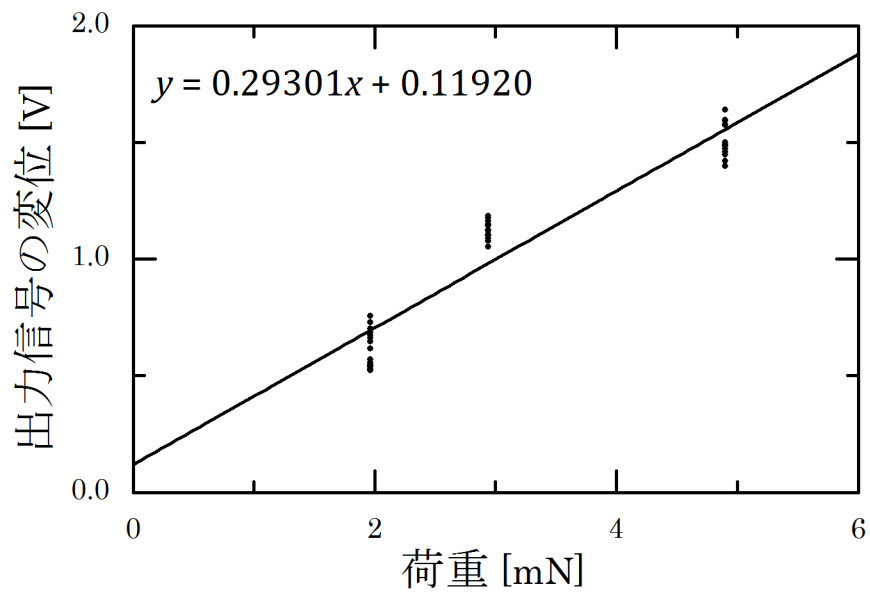


図 4.3 ねじりばね式スラストスタンドにて得られた荷重と出力信号の変位の関係

4.2 小型ホールスラスタの性能評価

ねじりばね式スラストスタンドを用いて小型ホールスラスタの推力及び放電電流の測定を行った。推進剤とホローカソードの作動ガスにはキセノンを用いた。

4.2.1 流量依存性

スラスタの磁石個数を4個、推進剤流量を0.20 mg/sと0.30 mg/sとし、放電電圧を変化させたときの推力を図4.3に示す。推進剤流量0.20 mg/sの場合は放電電圧125 V以下でプラズマを維持できなかった。一方、推進剤流量0.30 mg/sでは放電電圧を100 Vまで下げてもプラズマを維持することができた。推力の最大値は推進剤流量0.30 mg/s、放電電圧250 Vの時の3.1 mNであった。

同様に放電電流と推進効率のグラフをそれぞれ図4.4と図4.5に示す。図4.4の破線はスラスタの消費電力がそれぞれ50 Wと30 Wであることを示しているグラフである。ここで消費電力にカソードの消費電力は含まれていない。推進剤流量を増やしたことにより推力は全体的に大きくなった。ホールパラメータ $\omega_e \tau_e \gg 1$ を満たす時、加速チャンネル中の磁場を横切る電子の拡散係数 D_{\perp} は

$$D_{\perp} = \frac{k_B T_e}{m_e \omega_e^2 \tau_e} = \frac{k_B T_e \sigma n v_e}{m_e \omega_e^2} \quad (4.1)$$

と書ける。式(4.1)より、流量を増やしたことにより加速チャンネル中の中性粒子密度が大きくなり、磁場を横切って陽極へ向かう電子の拡散係数が大きくなる。この拡散係数が大きくなると磁場を横切って陽極へ向かう電子電流が増加し、放電電流も増加する。その結果として加速効率が小さくなり、推進効率が低下してしまうこととなる。

最も推進効率が良かったのは推進剤流量0.30 mg/s、放電電圧250 Vの場合の13.2%であった。また消費電力50 W以下の領域でも推進剤流量0.29 mg/s、放電電圧125 Vにおいて推力1.73 mN、推進効率11.4%を達成できた。また、推進剤流量0.20 mg/s、0.30 mg/sともに消費電力30 Wでの作動が可能であった。これはホローカソードの消費電力20 Wとあわせても50 Wを下回ることとなる。

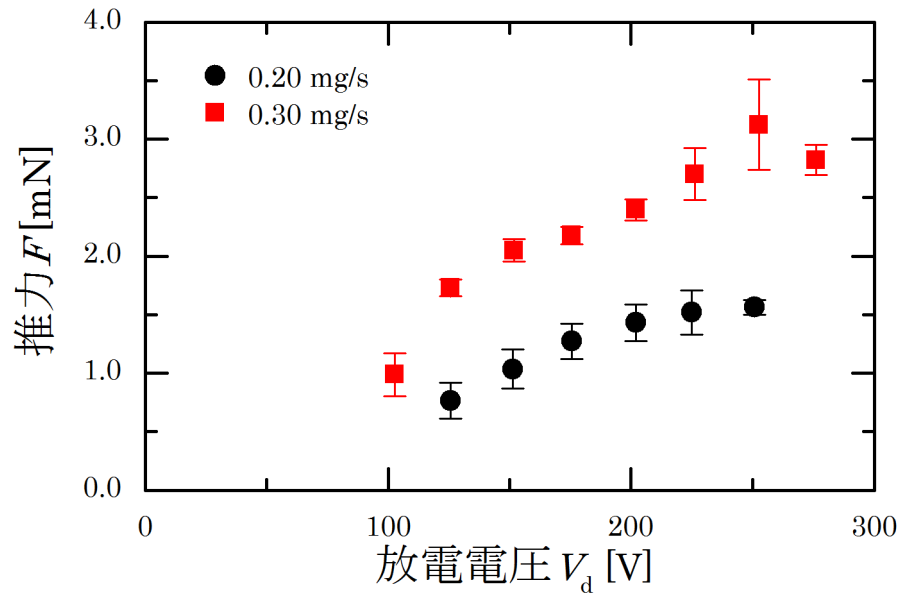


図 4.3 推力の流量依存性 (磁石個数 4 個)

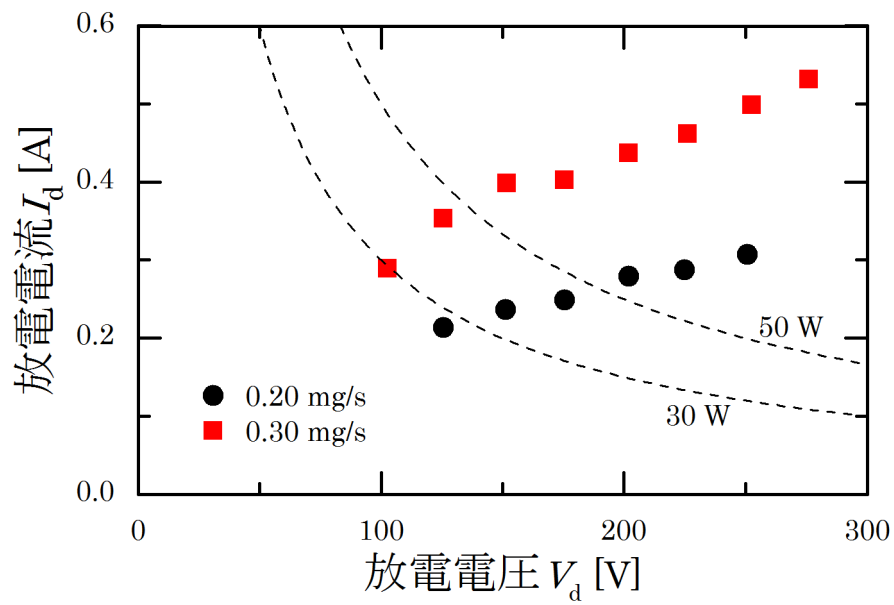


図 4.4 放電電流の流量依存性 (磁石個数 4 個)

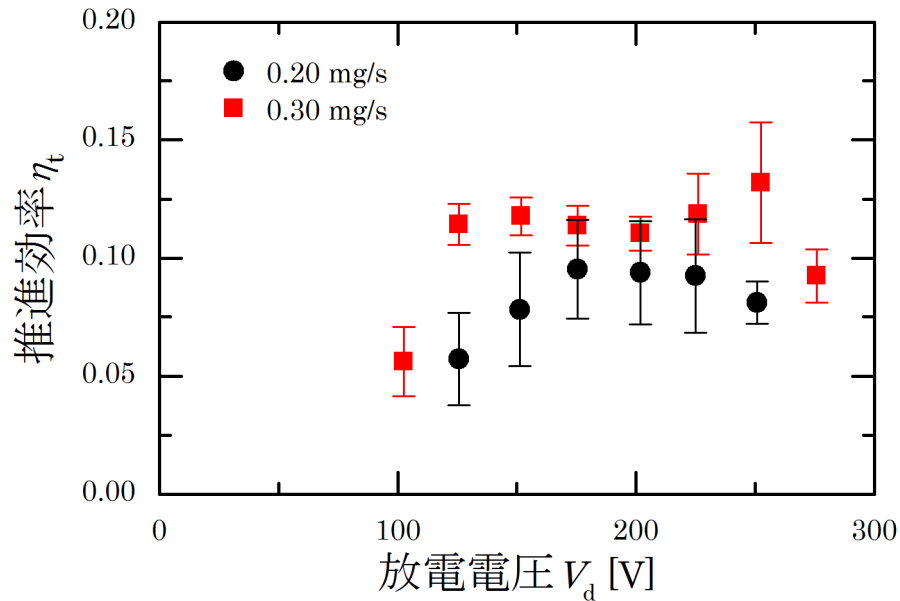


図 4.5 放電電流の流量依存性 (磁石個数 4 個)

4.2.2 磁場依存性

小型ホールスラスタに用いられている Sm-Co 磁石を 4 個から 5 個に変更し, 推進剤流量 0.20 mg/s として推力測定を行った. 図 4.6 に磁石 4 個の場合と磁石 5 個の場合の放電電流を示す. 磁石個数を 4 個とした時の放電電流と比較して磁石個数 5 個とした時の放電電流はあまり変化しなかった. 図 4.7 に推進剤流量 0.20 mg/s の時の推力の磁石個数依存性を, 図 4.8 に推進剤流量 0.20 mg/s のときの磁石個数 4 個の場合と 5 個の場合の推進効率をそれぞれ示す. こちらも放電電流と同様に値はほとんど変わらなかった. 磁石個数を変化させてみたが, 磁場強度に変化がなく, 性能に影響しなかった.

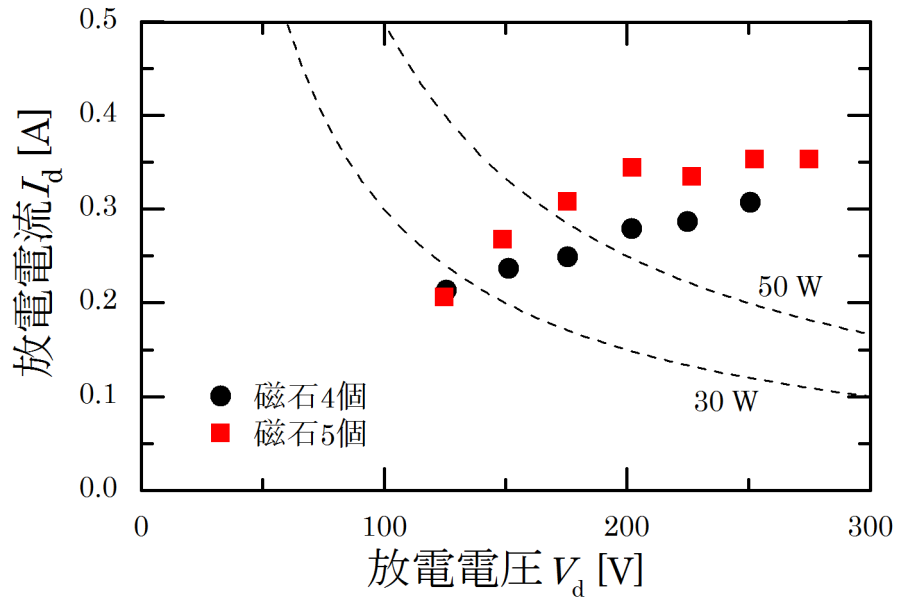


図 4.6 放電電圧の磁石個数依存性 (流量 0.20 mg/s)

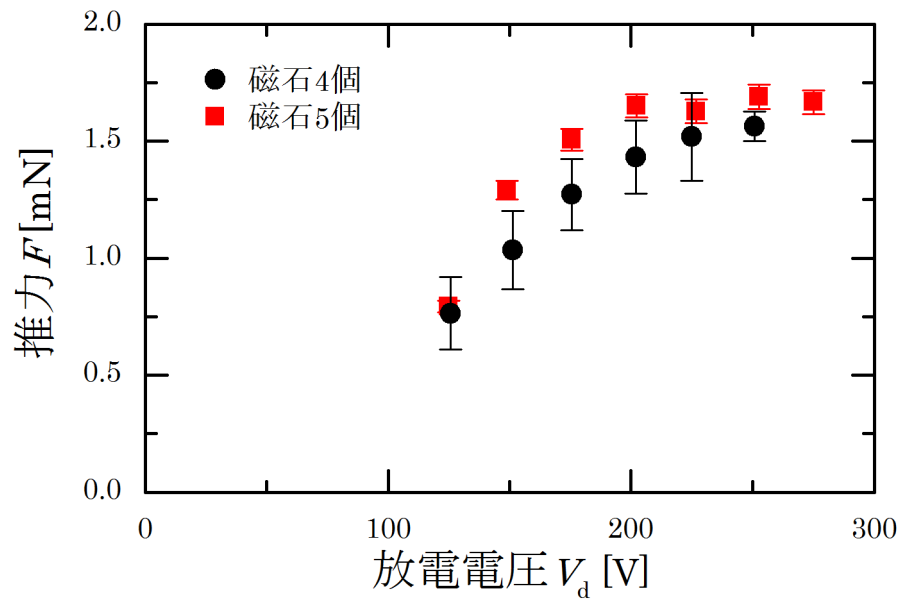


図 4.7 推力の磁石個数依存性 (流量 0.20 mg/s)

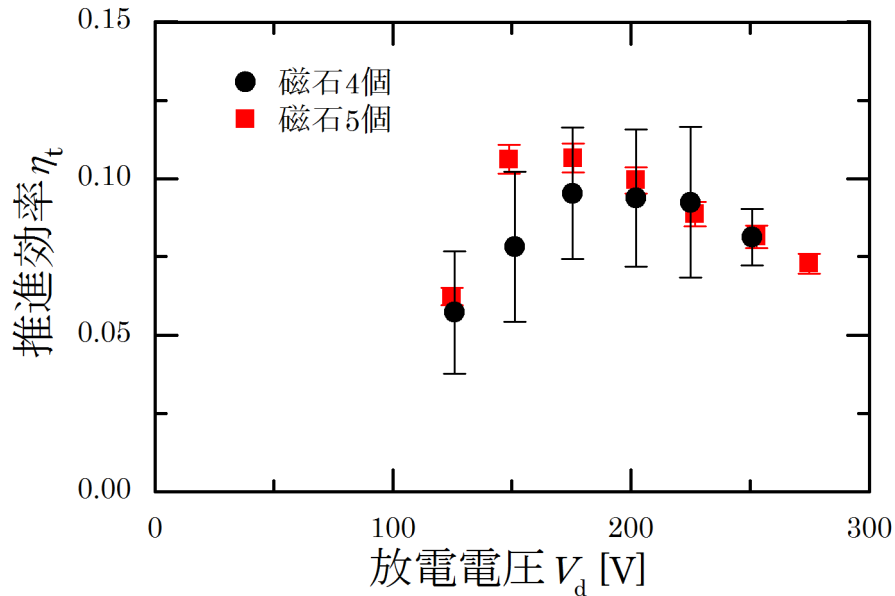


図 4.8 推進効率の磁石個数依存性 (流量 0.20 mg/s)

4.3 カソード依存性

これまでスラスタの性能を見てきたが、本研究で用いたホローカソードはスラスタに対してサイズが大きい。人工衛星への搭載を考えると小型化する必要がある、将来的に異なるカソードが使用されると考えられる。そこでスラスタの性能がカソードによるか、首都大学東京が開発した RF カソードを用いて推力測定実験を行った。推進剤流量 0.20 mg/s, 磁石個数 4 個としたときのスラスタの放電電流を図 4.9 に示す。RF カソードを用いた時の放電電流はホローカソードを用いた時の放電電流を下回っているが、これは RF カソードを用いて実験した時の真空度が 6.27×10^{-4} Pa (at 1.80 mg/s, Xe) とホローカソードを用いた実験した時の真空度 9.30×10^{-3} Pa (at 1.80 mg/s, Xe) より高真空なためであると考えられる。真空度が良いとチャンネル中の中性粒子密度が下がるため、電子の拡散係数が下がり放電電圧が抑えられる。

推力と推進効率のカソード依存性を図 4.10, 4.11 にそれぞれ示す。推力も RF カソードの方が下がった。これはエネルギー変換効率が下がったためであり、カソードによりイオン生成領域のポテンシャルが変わるためであると思われる。よって推力が減少したため推進効率も RF カソードの方が全体的に低下した。

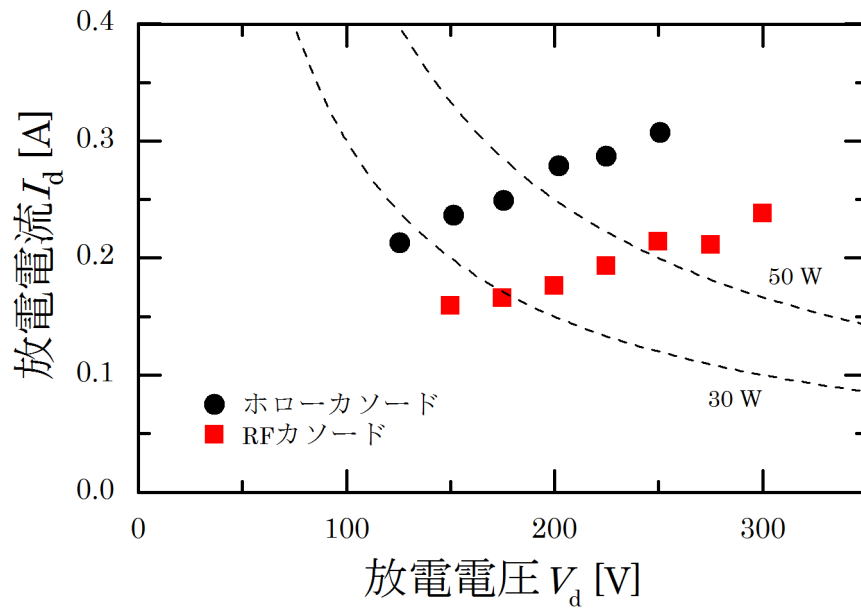


図 4.9 放電電流のカソード依存性

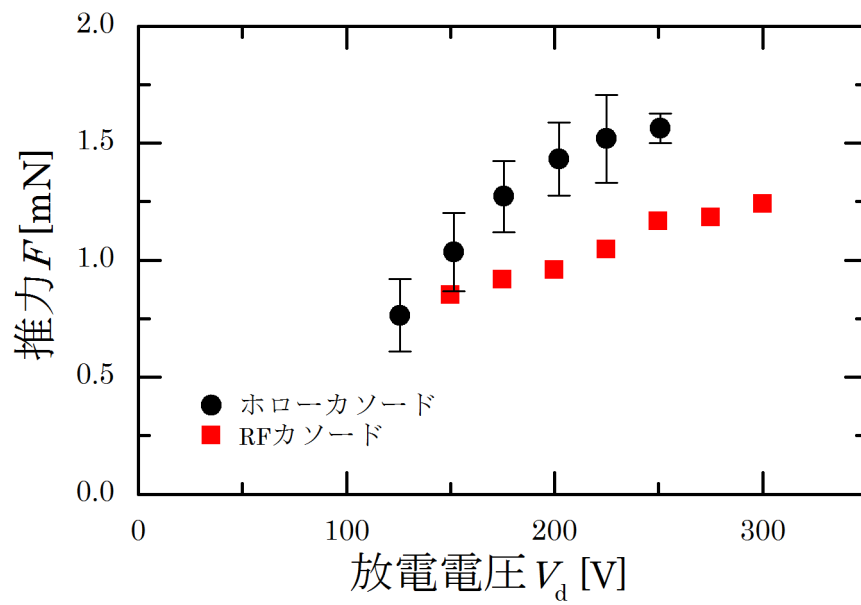


図 4.10 推力のカソード依存性

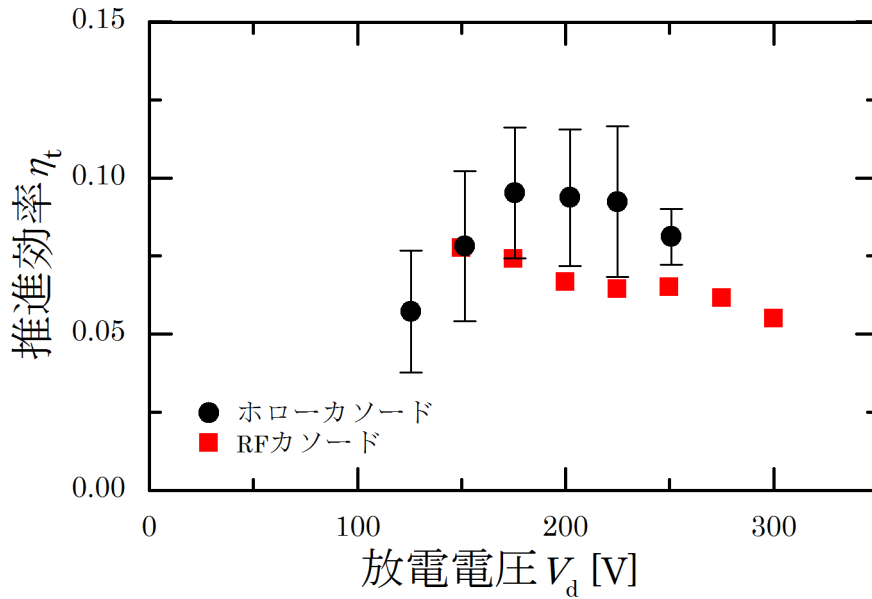


図 4.11 推進効率のカソード依存性

4.4 二段放電式小型ホールスラストの性能評価

小型ホールスラストにマイクロ波投入用のアンテナを設置し、マイクロ波を用いてプラズマの生成をできるようにした。このタイプのホールスラストは二段放電式ホールスラストと呼ばれる。投入されるマイクロ波の周波数は 4.2GHz となっている。推進剤流量 0.20 mg/s、磁石個数 4 個とした場合の、マイクロ波の投入による放電電流値の変化を図 4.12 に示す。低電圧の時はマイクロ波を投入することによってスラストの消費電力は下がったが、投入したマイクロ波の電力が大きくなりすぎた。

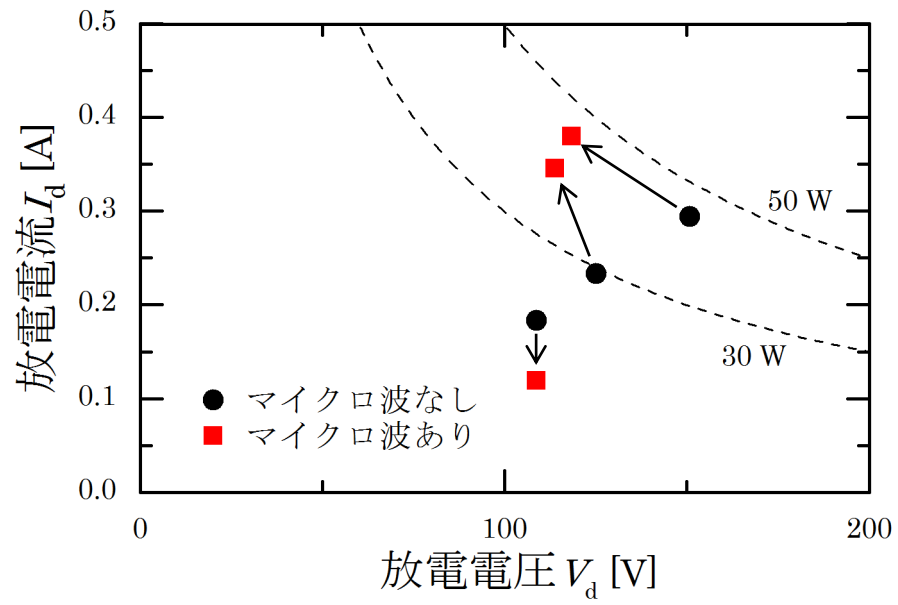


図 4.12 マイクロ波を投入した時の放電電流の変化

第 5 章 結論

重量 50 kg 程度の超小型人工衛星への搭載を目指し、消費電力 50 W で動作する小型シリンドリカルホールスラスタを開発し、その性能を評価した。研究より以下のことが得られた。

- 1) ホールスラスタの微小推力測定用に新たにねじりばね式スラストスタンドを製作した。推力較正を行ったところ振り子式スラストスタンドと比較して分解能が上がり性能が向上した。
- 2) 消費電力 50 W 以下の場合、磁石個数 4 個、推進剤流量 0.30 mg/s、放電電圧 125 V において推力 1.7 mN、比推力 597 秒、推進効率 11.4 %の性能が得られた。また、スラスタとカソードの消費電力を合わせ 50 W で作動が可能なが確認された。そのときの性能は
- 3) カソードによるスラスタの性能に違いが出るのか確認した。実験条件が異なったため放電電圧も異なってしまったが、推力の傾向が変わっており、カソードによりスラスタの性能が変わることが確認された。
- 4) マイクロ波投入を行い消費電力が低減されるか実験を行った。低電圧時に放電電流の減少が見られた。これにより、しかし投入されたマイクロ波のエネルギーが 50 W を超えていたので改善する必要がある。

参考文献

1. H-IIA ロケット 15 号機による温室効果ガス観測技術衛星「いぶき」及び小型副衛星の打上げ結果について (速報)
2. 斧高一, 福田武司: 宇宙マイクロ・ナノ工学とシリコンナノサテライト連携研究計画, 高温学会誌, Vol.31, No.5, pp.252-259, 2005.
3. 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.
4. 荒川義博, 小紫公也, 平川美晴: ホール推進機, 日本航空宇宙学会誌, Vol.46, No.530, pp.146-153, 1998.
5. Saccoccia, G.: “Introduction to the European Activities in Electric Propulsion”, IEPC Paper 03-341, 2003.
6. V. Kim, “Main Physical Features and Processes Determining the Performance of Stationary Plasma Thrusters”, Journal of Propulsion and Power, Vol. 14, No. 5, pp.736-743, 1998.
7. N. Yamamoto, K. Komurasaki and Y. Arakawa: “Discharge Current Oscillation in Hall Thrusters”, Journal of Propulsion and Power, Vol. 21, No. 5, pp.870-876, 2005.
8. H. R. Kaufman, R. S. Robinson, M. L. Day and T. W. Haag: “End-Hall Thrusters”, AIAA/DGLR/JSASS, 21st International Electric Propulsion Conference, Orlando, FL, AIAA-90-2595, 1990.
9. Y. Raitses, N. J. Fisch, K. Ermer and C. B. Burlingame: “A Study of Cylindrical Hall Thruster for Low Power Space Application”, Princeton Plasma Physics Laboratory, Princeton University, Princeton, NJ, USA, Paper PPPL-3479, 2000.
10. Y. Raitses, D. Staack, A. Smirnov, A. A. Litvak, L. A. Dorf, T. Graves and N. J. Fisch: “Studies of Non-conventional Configuration Closed Electron Drift Thrusters”, Princeton Plasma Physics Laboratory, Princeton University, Princeton, NJ, USA, Paper PPPL-3606, 2001.
11. Y. Raitses and N. J. Fisch: “Parametric Investigation of a Nonconventional Hall Thruster”, Physics of Plasmas, Vol. 8, No.5, pp.2579-2586, 2001.
12. A. Smirnov, Y. Raitses, and N. J. Fisch: “Parametric investigation of miniaturized cylindrical and annular Hall thrusters”, J. Appl. Phys. 92, 5673, 2002.

謝辞

初めにこの電気推進について研究する機会を与えて下さり、3年間ご指導いただいた中島秀紀教授に深く感謝致します。研究者としての姿勢を教えた下さった渡辺幸信教授に感謝致します。遅くまで残られ、実験や論文作成について熱心に指導して下さいました山本直嗣助教に深く感謝致します。

研究について相談に乗っていただき、また研究室を楽しい雰囲気にして下さった諸先輩方、研究面生活面でいろいろ相談し合い、実験・工作を手伝ってくれた同輩達、後輩達に深く感謝いたします。3年間本当にありがとうございました。

最後に今まで支えて下さった両親、妹に深く感謝致します。