

平成 30 年度 (2018 年度) 学位論文 (修士)

RF カソード/TAL 型ホールスラスタ 組み合わせ時の性能評価

平成 31 年 (2019 年) 1 月 25 日

首都大学東京大学院
システムデザイン研究科 システムデザイン専攻
航空宇宙システム工学域 博士前期課程

17891501 青山 周平

指導教員 竹ヶ原 春貴 教授

Dissertation

Performance Evaluation of
RF Cathode/TAL-type Hall Thruster
Combination

Department of Aerospace Engineering
Tokyo Metropolitan University

Submitted by
Shuhei Aoyama

Supervisor Prof. Haruki Takegahara

目次

第1章 序論	1
1.1 研究背景	1
1.2 研究目的	4
第2章 ホールスラスタと電子源	5
2.1 ホールスラスタ	5
2.1.1 ホールスラスタの作動原理	5
2.1.2 ホールスラスタの種類	6
2.1.3 ホールスラスタの電位分布	7
2.1.4 ホールスラスタの電流収支	8
2.1.5 放電電流振動現象	9
2.2 電子源	10
2.2.1 ホローカソード	10
2.2.2 マイクロ波カソード	11
2.2.3 高周波プラズマカソード	11
2.2.4 インピーダンスマッチング	12
第3章 実験装置および実験条件	15
3.1 真空環境模擬装置	15
3.2 ホールスラスタ	16
3.2.1 ホールスラスタの概略	16
3.2.2 TMU-066 の磁場形状	17
3.3 高周波プラズマカソード	18
3.4 ホローカソード	19
3.5 RPA	19
3.6 半径方向イオンビーム測定計	21
3.7 電力供給系	22
3.7.1 直流電力供給系	22
3.7.2 高周波電力供給系	22
3.8 作動ガス供給系	23

3.9	測定系	23
3.9.1	電流・電圧測定系	23
3.9.2	推力測定系	23
3.10	実験構成	23
3.11	大電流ツェナー回路	26
3.12	ローパスフィルタ	27
3.13	実験条件	28
3.14	性能評価指標	30
第4章 実験結果および考察		31
4.1	RF/C 27.12 MHz による TMU-066 の作動	31
4.2	電子源の違いによる TMU-066 の推進性能の比較	32
4.2.1	作動範囲	32
4.2.2	磁場特性	34
4.2.3	放電電圧特性	34
4.2.4	電子源による推力の相違の考察	37
第5章 結論		43
5.1	結論	43
参考文献		45

第1章 序論

1.1 研究背景

人工衛星で利用される電気推進は化学推進に比べ比推力 I_{sp} が 10 倍以上もある．図 1.1 に各推進機における比推力と推力密度の関係を示す．

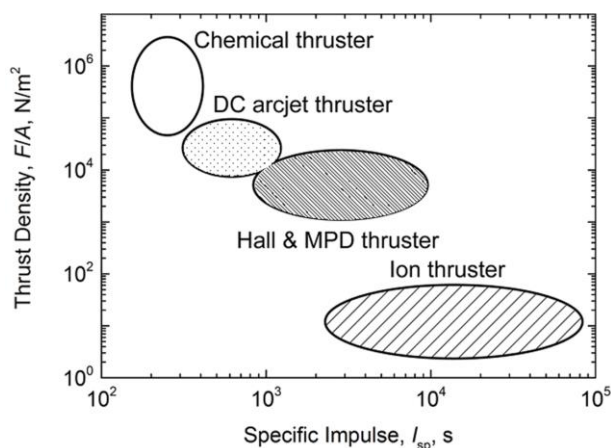


図 1.1 推進機における比推力と推力密度の関係¹⁾

また衛星バスの発電能力の向上，電気推進の性能向上に伴い近年，宇宙開発において電気推進の活躍の場が増えている．2015 年 3 月にはアメリカが推進系を電気推進のみで構成したオール電化衛星と呼ばれる人工衛星 Eutelsat115 West B と ABS-3A を打ち上げた²⁾．そして，ABS-3A は 9 月に，Eutelsat115 West B は 10 月に静止軌道への投入が成功している．これを機に世界中でオール電化衛星の開発が加速し，日本も技術試験衛星 9 号機（ETS-9）でオール電化衛星の技術実証をする計画である³⁾．Eutelsat115 West B と ABS-3A の推進機にはイオンエンジンが用いられている．図 1.1 からわかるようにイオンエンジンは，比推力が大きいが推力密度が小さいという欠点を持つ．そのためイオンエンジンのみのオール電化衛星では静止軌道投入までに約 6 カ月かかってしまう．この遷移期間の短縮のために推力密度が大きいホールスラスタの研究が進んでいる．オール電化衛星にホールスラスタを用いることで遷移期間を 3~4 カ月に短縮できると考えられている．この利点により今後，各国で計画されているオール電化衛星の推進系はホールスラスタがメインであり，ETS-9 も国産のホールスラスタを搭載予定である．よって今後さらなる電気推進の，ホールスラスタの活躍が期待される．表 1.1 に各国のオール電化衛星の計画を示す．

表 1.1 各国のオール電化衛星の計画⁴⁾

開発元	衛星/バス名	搭載電気推進	打上時質量	発生電力	ステータス
Boeing	702SP	イオンエンジン XIPS-25	2 ton	8 kW	実証済 2015 初フライト
USAF (LM)	AEHF (A2100M) 化学/電気双方での O/R	ホールスラスタ XR-5	6 ton	不明	実証済
LM	A2100	ホールスラスタ XR-5	3 ton 5 ton ^{*1}	10 kW 20~25 kW ^{*1}	開発中
OHB (ESA)	Electra	ホールスラスタ 5 kW 級, 型式 TBD	3 ton	10 kW	開発中 2021 初フライト
SSL	SSL 1300	ホールスラスタ SPT or PPT	~5 ton	~25 kW	開発中 2018 初フライト
TAS	Spacebus Neo	ホールスラスタ PPS-5000	3.5 ton	16 kW 以上	開発中 2019 初フライト
Airbus DS	Eurostar E3000	ホールスラスタ PPS-5000/SPT-140	3.5 ton	13 kW	開発中 2017 初フライト
	Eurostar Neo	ホールスラスタ PPS-5000	3~6 ton	~30 kW ^{*1}	開発中
RSCC (ロシア)	Express-2000	ホールスラスタ SPT	3.4 ton	14 kW	不明
中国航天	DFH-4SP	不明	2~2.5 ton	9 kW	開発中

*1 公表されたペイロード電力から推測.

ホールスラスタは中空円環状の放電チャンネルを有し、放電チャンネルの軸方向に電場、半径方向に磁場を印加している。外部の電子源（カソード）から放出された電子がホールスラスタの電場と磁場の相互作用により放電チャンネル内でトラップされ放電チャンネル上流から供給された中性粒子と衝突電離することでプラズマが生成される。このプラズマ中のイオンが電場により加速噴出され、その反作用でホールスラスタは推力を得る。電子源はプラズマ生成のみならずホールスラスタから噴出されたイオンを中和する役割も担っている。電子源についてはこれまでホローカソード（Hollow Cathode: H/C）が用いられてきた。H/C は内部にインサートと呼ばれる低仕事関数の酸化物陰極があり、その周りに巻いてあるヒータにより加熱することでインサートから熱電子が放出されプラズマが生成される。H/C は低ガス流量、低電力で大電子電流を得ることができるという特徴があるが、インサートに起因する欠点もある。欠点は高低温サイクルを繰り返すことによるヒータの断線、大気や推進剤に含まれる不純物により酸化物陰極の劣化、酸化物陰極の含侵剤消耗による寿命制限などがある。そこで本研究室では、インサートによる欠点を取り除くため熱電子放出ではなく、高周波放電を利用した電子源（Radio Frequency plasma Cathode: RF/C）の研究開発を行ってきた。RF/C は放電室の内部、もしくは外部に設置されたアンテナコイルに高周波電流が流れることで誘導電磁場が発生し、初期電子にエネルギーが与えられプラズマが生成・維持される。このプラズマは誘導結合プラズマ（Inductively Coupled Plasma: ICP）と呼ばれるものである。アンテナコイルが放電室の内部にある Inner Coil RF/C では ICP 以

外にアンテナコイルの変動電場と金属製の放電室間で容量結合プラズマ (Capacitively Coupled Plasma: CCP) も生成される。

ホールスラスタには主にマグネティックレイヤ型 (Stationary Plasma Thruster: SPT) とアノードレイヤ型 (Thruster with Anode Layer: TAL) の2種類がある。TALはSPTに比べ推力密度が大きく高効率である。しかし、ホールスラスタには放電電流振動という、数十 kHz の周波数で放電電流が振動する現象が発生する。この振動により電源に負荷がかかり、最終的にはスラスタの作動停止を招いてしまう。この現象はTALに顕著に表れるため、安定作動領域が狭く、いまだ宇宙での推進機としての利用はない状況である。

本研究室の過去の研究において Inner Coil RF/C 13.56 MHz と TAL を組み合わせた際に RF/C を点火後、放電チャンネルに電場と磁場を形成せずとも放電チャンネル内でプラズマが生成される Inner Coil RF/C 特有の現象 (Doughnut-like ring light) が発生した。この様子を図 1.2 に示す。比較のために同じ条件下での H/C の様子を図 1.2 の左に示す。H/C では Doughnut-like ring light が確認されない。

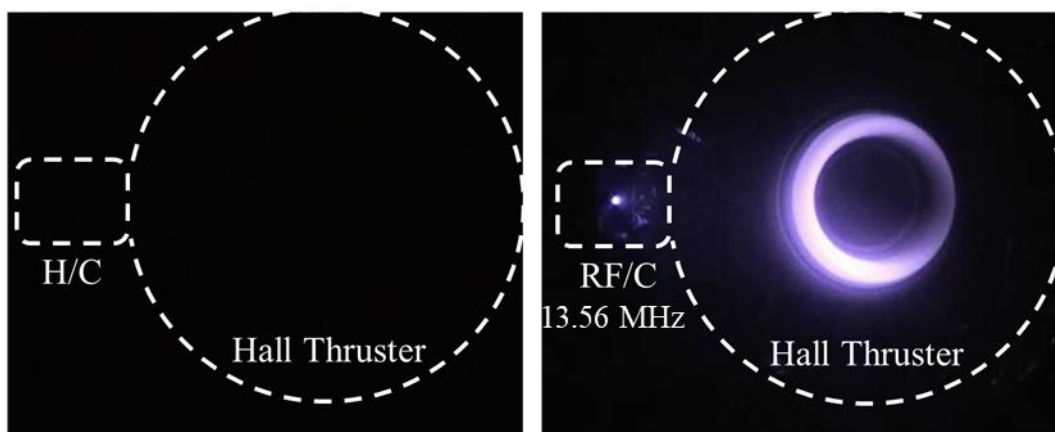


図 1.2 Doughnut-like ring light 発生時の様子 (左図:H/C, 右図 RF/C 13.56 MHz)

Doughnut-like ring light のプラズマは RF/C のアンテナコイルと放電チャンネル間で生じた CCP だと考えられている。ホールスラスタ本来の磁場と電場によるプラズマ生成機構に加えて、RF/C-放電チャンネル間の容量結合によるプラズマ (CCP) 生成機構が存在することで放電チャンネル内のプラズマ生成・維持が容易になり、作動範囲の拡大、しいては放電電流振動が緩和するのではないかと考える。また、坂本らの研究⁵⁾により RF プラズマ源の作動周波数を高くすると RF プラズマ源内部で生成される CCP が増加するという解析結果が報告されている。図 1.3 に RF プラズマ源内の電流の誘導結合と容量結合の周波数特性を示す。これより RF/C の作動周波数を高くすることでアンテナコイルと放電チャンネル間の CCP も増加すると考えられる。

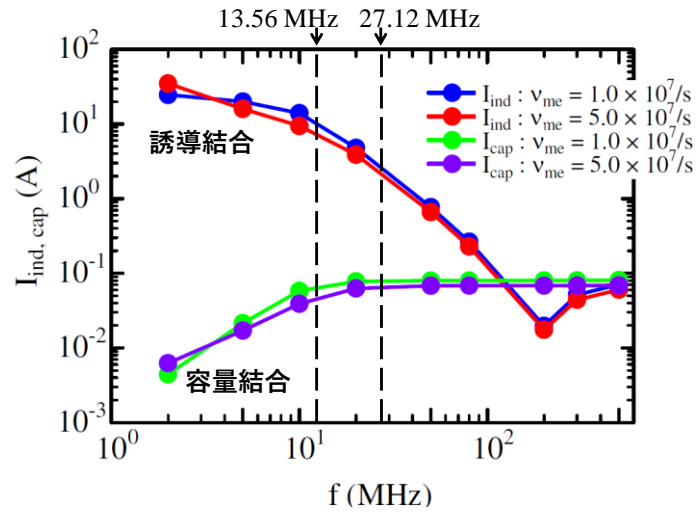


図 1.3 RF プラズマ源内の電流の誘導結合と容量結合の周波数特性⁵⁾

1.2 研究目的

これまで TMU-066 と Inner Coil RF/C 13.56 MHz の組み合わせ作動は行われてきた。本研究では、13.56 MHz よりも高周波の 27.12 MHz を使用した Inner Coil RF/C と TAL 型ホールスラスタ (TMU-066) の組み合わせ作動を行い、推進性能、作動範囲、放電電流振動を取得する。そして、他の電子源 (H/C, Inner Coil RF/C 13.56 MHz) と比較・評価することを目的とする。

第2章 ホールスラスタと電子源

2.1 ホールスラスタ

2.1.1 ホールスラスタの作動原理¹⁾

ホールスラスタは、図 2.1 に示すような中空円環状のプラズマ加速部（放電チャンネル）に、半径方向の磁場と軸方向の電場を印加している。外部の電子源から放出された電子は軸方向の電場と半径方向の磁場により周方向に \mathbf{ExB} ドリフトする。これにより周方向には電流が流れる。この電流はホール電流と言われ、ホールスラスタの名前の由来でもある。また電子には磁場とホール電流により下流方向にローレンツ力が働く。このローレンツ力と電場による上流方向への力により電子は、軸方向の運動が制限され放電チャンネル内の静電場が維持される。しかし最終的には、電子は衝突などの拡散によりアノードに到達する。

高エネルギーの電子はアノード上流から供給された推進剤と衝突電離を起こし、プラズマが生成される。イオンは電子に比べ質量が大きいためラーマ半径が大きいため磁場の影響をほとんど受けず電場により下流方向に加速される。このイオンが加速された反作用でホールスラスタは推力を得ている。放電チャンネル内は電子の供給により電氣的に準中性が保たれているため、空間電荷制限を受けない。そのためイオンエンジンに比べ高い推力密度が得られる。

このような作動原理からホールスラスタには以下の設計則がある。

$$\omega_{ce}\tau_e \gg 1 \dots (2.1)$$

$$r_{ce} \ll l \ll r_{ci} \dots (2.2)$$

$$l \ll \lambda_i \dots (2.3)$$

ここで、 ω_e は電子のサイクロトロン周波数、 τ_e は電子の平均衝突時間、 r_e 、 r_i はそれぞれ電子とイオンのラーマ半径、 l は加速部の代表的長さ、 λ_i はイオンの平均自由行程を表す。式(2.1)の左辺は、ホールパラメータと言われ、電子が1回衝突を起こすまでにどれだけ旋回運動を表すパラメータである。式(2.2)は、電子は磁場により旋回運動するがイオンはほぼ旋回運動しないことを表している。式(2.3)は、イオンが電子と再結合もしくは放電チャンネル壁に衝突しないことを表している。

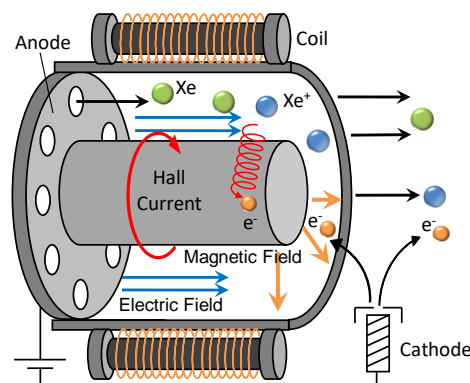


図 2.1 ホールスラスタの概念図

2.1.2 ホールスラスタの種類

ホールスラスタには、エンドホール型、シリンдриカル型、マグネティックレイヤ型 (Stationary Plasma Thruster:SPT), アノードレイヤ型 (Thruster with Anode Layer:TAL) などがある。本論文では、特に典型的なホールスラスタである SPT と TAL について説明する⁶⁾。図 2.2 に SPT の概念図、図 2.3 に TAL の概念図を示す。

SPT は、放電チャンネル壁が窒化ホウ素(BN)や BN-SiO₂ などの絶縁体でできている。イオンや高エネルギーの電子が放電チャンネル壁に衝突することで低エネルギーの 2 次電子が放出される。そのため、放電チャンネル内の電子温度は低く抑えられる。電子温度が低いと中性粒子の平均自由行程が長くなり、中性粒子を電離させるために放電チャンネル幅に比べ放電チャンネル長が長くしなければならない。また放電チャンネル壁にイオンや高エネルギーの電子の衝突による耐久性の問題がある。

一方、TAL は、放電チャンネル壁 (ガードリング) が耐スパッタ性の高い金属でできている。また、ガードリングはカソード電位であるため電子の放電チャンネル壁への衝突が少なく、電子のエネルギー損失が少ないため放電チャンネル内の電子温度は高いままである。ゆえに中性粒子の平均自由行程が短くなり、SPT に比べ、放電チャンネル長が短くて済み、かつ耐久性が高い。そのうえ、壁面衝突によるエネルギー損失が小さいため SPT に比べ高効率が見込める。アノード (電位) とガードリング (カソード電位) の電位差はアノード近傍の薄い層 (この層をアノードレイヤという) に集中しており、イオンの加速はほとんどこの範囲で行われていると考えられている⁷⁾。

以上より、TAL は SPT に比べ耐久性・推力密度が高く、高効率が見込める。

しかし、TAL は SPT に比べ安定作動領域が狭く、放電電流振動が起こりやすいという欠点があるため宇宙での推進機としての利用実績がない状況である。

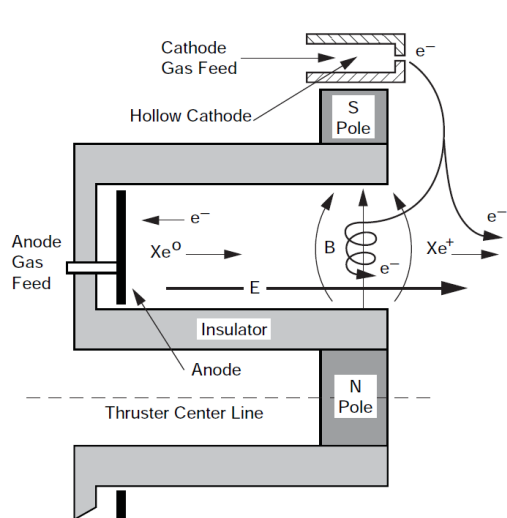


図 2.2 SPT の概念図⁶⁾

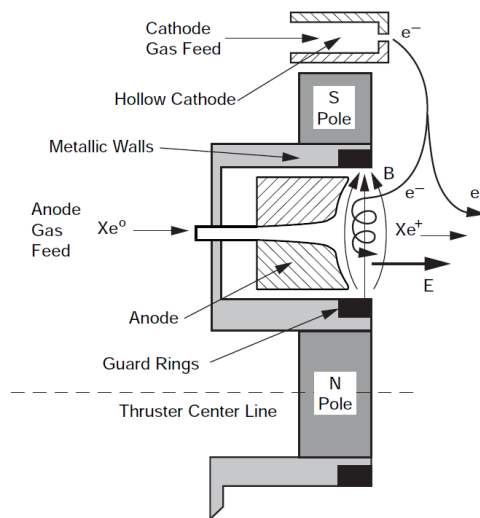


図 2.3 TAL の概念図⁶⁾

2.1.3 ホールスラストの電位分布⁶⁾

ホールスラストの電位分布を図 2.4 に示す。 V_d は放電電圧， V_c はイオンビーム電圧 V_b とカソード電位差（接触電圧）を表している。 この接触電圧 V_c により電子源内の電子が引き出される。 イオンビーム電圧 V_b は式 (2.4) のように表せる。

$$V_b = V_d - V_c \cdots (2.4)$$

また，接触電圧 V_c はカソード電位とグラウンド電位差 V_{cg} とプラズマ（空間）電位とグラウンド電位差 V_p を用いると式 (2.5) ように表せる。

$$V_c = V_{cg} + V_p \cdots (2.5)$$

式 (2.4)，式 (2.5) より V_b は式 (2.6) ように表せる。

$$V_b = V_d - V_p - V_{cg} \cdots (2.6)$$

一般的に $V_p = 10 \sim 20 \text{ V}$ とされている。 V_{cg} はホールスラストに対する電子源の設置位置，流量，放電電圧などにより変化し，一義的に決まらないことが報告されている⁸⁾⁹⁾。

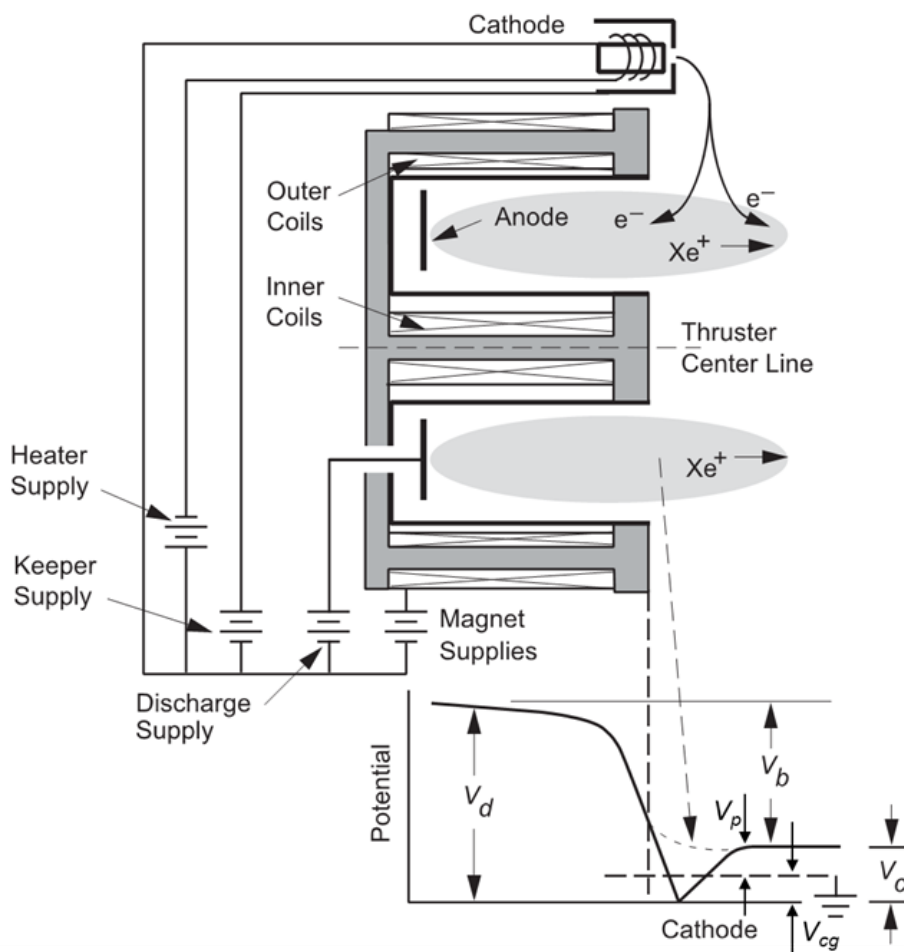


図 2.4 ホールスラストの電位分布⁶⁾

2.1.4 ホールスラストの電流収支⁶⁾

ホールスラストの電流収支モデルを図 2.5 に示す。アノードに流れるイオン電流や電子源に逆流するイオンについては微小であるため、ここでは無視する。アノードに流れる電子電流 I_d は電子源から放出された電子 I_{ec} とプラズマ生成で生じた 2 次電子 I_{ei} であり、式 (2.7) のように表せる。

$$I_d = I_{ec} + I_{ei} \cdots (2.7)$$

放電電流 I_d は電子源から放出される電子電流 I_e と等しいため式 (2.8) のように表せる。

$$I_d = I_e = I_{ec} + I_{eb} \cdots (2.8)$$

衝突電離で生成されるイオンがすべて 1 価イオンだと仮定すると、衝突電離で生じた電子電流 I_{ei} とイオン電流 I_{ib} は式 (2.9) のように等しくなる。

$$I_{ei} = I_{ib} \cdots (2.9)$$

式 (2.7) , (2.8) , (2.9) より式 (2.10) が導かれる

$$I_{ib} = I_{eb} \cdots (2.10)$$

以上より、アノードに流れる電子電流と電子源から放出される電子電流 (=電子源から放電電源に流れる電流) が等しい時ホールスラストから噴出されたイオンビームは電子源からの電子により中和されたといえる。

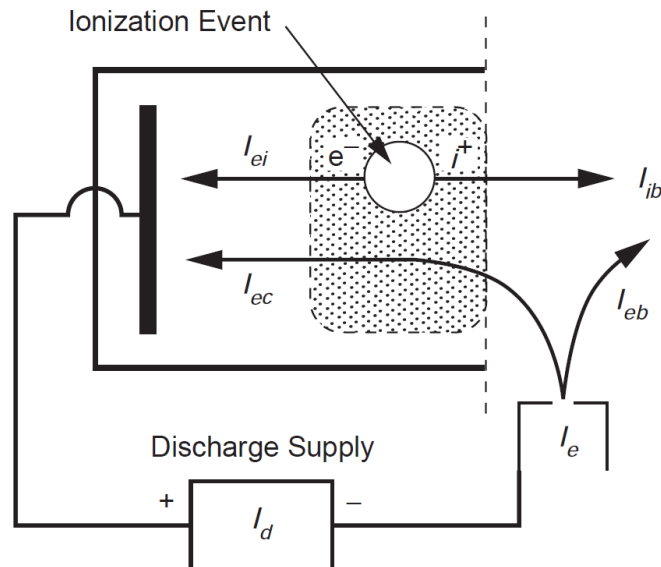


図 2.5 ホールスラストの電流収支モデル⁶⁾

2.1.5 放電電流振動現象¹⁾

ホールスラスト（特に TAL）の作動時の問題のひとつとして、放電電流の振動現象がある。この現象は、推進効率の低下、作動不安定性の要因のひとつであるとされている。信頼性と耐久性が重視される宇宙ミッションに適応するために、この現象の物理機構を解明し、振動を抑制しなければならない。現在のところ振動現象は、振動数帯域的に 5 種類に分類される説が有力である。

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

このなかで 1.~3.はホールスラスト特有の振動と考えられている。4.5.はプラズマ固有の振動であり、回避不可能である。ホールスラストの振動の中で振幅が最大であり、作動安定性に影響を与えるのが 1. の Ionization Oscillation（電離振動）である。この振動のメカニズムはロトカ-ヴォルテラの捕食者-被食者モデルで説明でき、図 2.6 に示す。①作動ガス（=中性粒子）の供給速度よりも電離速度が上回り中性粒子密度が減少しプラズマ密度が増加する。②ホールスラストからイオンが噴出しプラズマ密度が減少する。③プラズマ密度が小さいため電離が進まず中性粒子密度が増加する。④中性粒子が増加したため電離が進むようになり①に戻る。

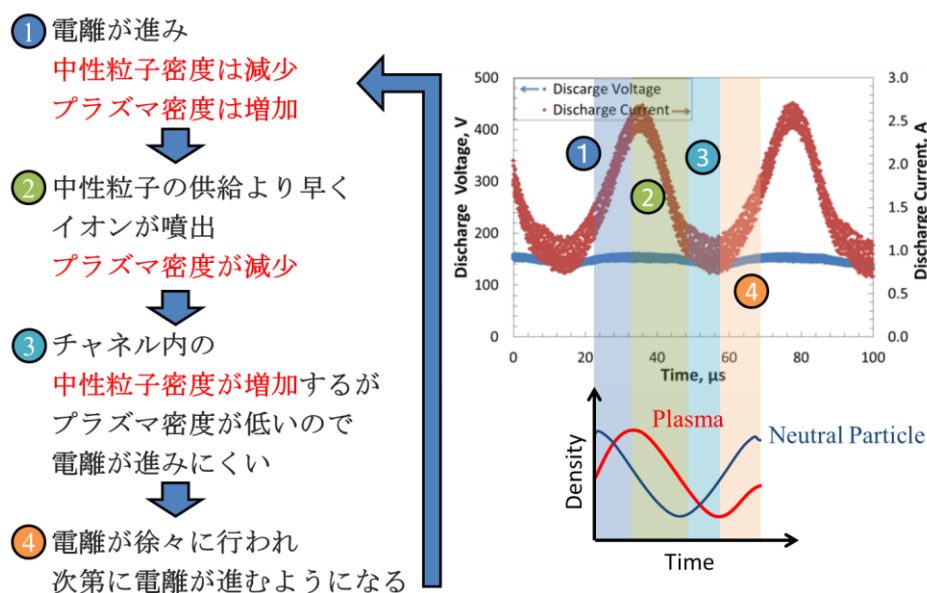


図 2.6 電離振動のメカニズム

2.2 電子源

2.1.1 で述べたプラズマ生成に必要な電子と、ホールスラストから噴出したイオンを中和するための電子を供給するためにホールスラストには電子源（カソード）が必要である。以下では、主な電子源であるホローカソード、高周波プラズマカソード、マイクロ波カソードについて述べる。

2.2.1 ホローカソード (Hollow Cathode: H/C)

ホローカソードの概念図を図 2.7 に示す（以下、H/C）。H/C の特徴は、低ガス流量、低電力で大電子電流を得られることである。仕事関数の小さい物質でできたインサートをヒータで加熱することでインサートから熱電子を放出される。この熱電子放出はリチャードソン・ダッシュマン (Richardson-Dushman) の式によって表され、式 (2.11) に示す。

$$J_f = A_f T_f^2 \exp\left(-\frac{\phi_{wf}}{k_B T_f}\right) \dots (2.11)$$

ここで、 J_f は熱電子電流密度、 A_f は熱電子放出係数、 T_f は表面温度、 ϕ_{wf} は仕事関数である。放出された熱電子は、放電室と外部に設置されたキーパ電極の間の電場によりエネルギーを得て、作動ガスを衝突電離させる。また、H/C の作動が一度開始すると、放電室内のプラズマ中を電流が流れることによるジュール加熱と電子やイオンがインサートに衝突することによる加熱により、ヒータを切っても、熱電子放出に必要な温度は維持される。しかし、H/C は、ヒータによるインサートの加熱が必要であり、即時点火ができない。また、インサートの損耗による寿命制限、インサートの材質は反応性が高く、水や酸素等と反応し、仕事関数が増加し熱電子放出能力が低下してしまう。そのため作動ガスの純度や大気暴露に注意しなければならないなどの欠点がある。

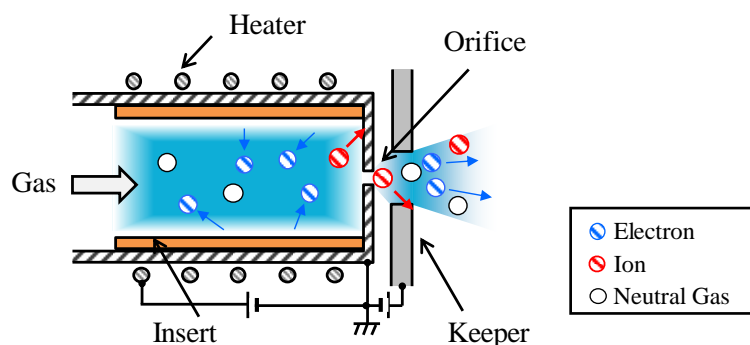


図 2.7 H/C の概念図

2.2.2 マイクロ波カソード

マイクロ波カソードの概念図を図 2.8 に示す。マイクロ波カソードは、永久磁石による磁場とアンテナから投入したマイクロ波（周波数 $f=2.45$ GHz）より ECR プラズマを生成することにより電子を供給している。マイクロ波カソードから放出された電子と等価なイオンを放電室内壁で捕集し、電気的中性を保っている。また、ヒータによる加熱、インサートの損耗による寿命制限などのホローカソードの問題を解決している。

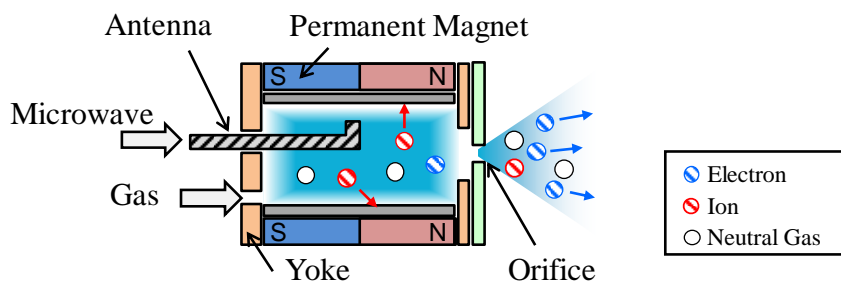


図 2.8 マイクロ波カソードの概念図

2.2.3 高周波プラズマカソード (Radio Frequency plasma Cathode: RF/C)

高周波プラズマカソードの概念図を図 2.9, 2.10 に示す。高周波プラズマには容量結合プラズマ (Capacitively Coupled Plasma : CCP) と誘導結合プラズマ (Inductively Coupled Plasma : ICP) の 2 種類がある。CCP は高周波電極と接地電極間の変動電場により電子にエネルギーが与えられプラズマが生成・維持される。ICP はアンテナコイルに高周波電流を流すことにより磁場変動が起こり、初期電子にエネルギーが与えられ、電離を起こしプラズマが生成される。また、磁場により電場が誘導され、電子が加速することでプラズマを維持する。本研究で用いる RF/C は、ICP が主に生成するように設計されている。ICP をメインとした RF/C の構造はアンテナコイルを放電室の内部もしくは外部に設置しており、そのコイルが外部にあるものを Outer Coil 型、内部にあるものを Inner Coil 型という。Outer Coil 型は放電室が絶縁体でできているため、放出した電子と等価なイオンを捕集するための電極（イオンコレクタ）が内部にある。また、コイルは電気抵抗の小さい銅を用いることが多い。一方、Inner Coil 型は、放電室が金属製であるため、放電室がイオンコレクタの役割を果たしている。また、コイルは内部にあるため、スパッタリングを考慮して仕事関数の大きいタンゲステンなどを用いる。本研究で用いる RF/C は ICP がメインと述べたが Inner Coil RF/C は放電室が金属のため、放電室-コイル間で CCP も生成されている。坂本らの研究⁵⁾により、高周波の周波数を高くすることで生成されるプラズマ中の ICP の割合が減少し、CCP の割合が増加するという解析結果が出ている。

使用する周波数は、国際電気通信連合 (ITU)により制限されており、使用できるのは ISM (Industry Science Medical) バンド内である。このバンドには 13.56, 27.12, 40.68 MHz 等が含ま

れている。これらの周波数は半導体プロセスにも使用されているため、高周波を発生させる電源や整合器が安価で入手が可能であり、半導体プロセスで得られた知見を RF/C に応用ができるなど利点がある。そこで本研究では、13.56 MHz と 27.12 MHz を使用した。他の電子源と比較した際の RF/C の利点・欠点として以下が挙げられる。

・利点

- (1) H/C に比べ構造が簡素である
- (2) 電源が高周波電源の 1 台で作動が可能である
- (3) 即時点火，電子放出が可能である
- (4) 作動ガスの純度，種類に制限がない

・欠点

- (1) 電子電流が小さい
- (2) 高周波の伝達のために整合器が必要である

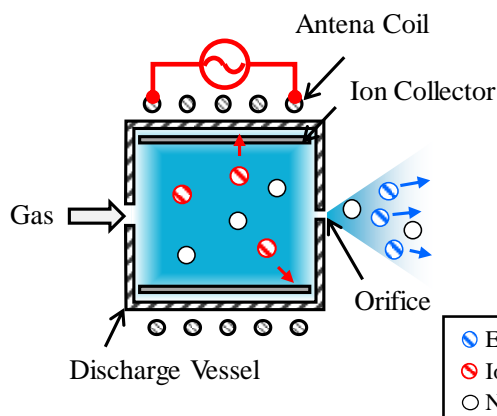


図 2.9 Outer Coil 型 RF/C の概念図

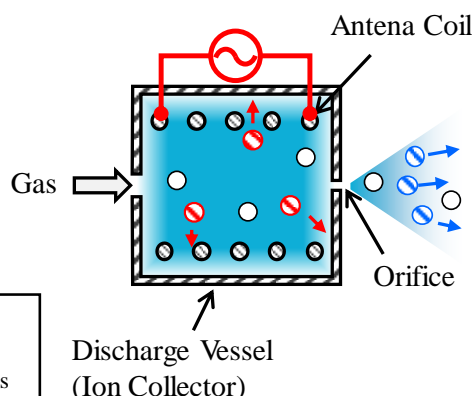


図 2.10 Inner Coil 型 RF/C の概念図

2.2.4 インピーダンスマッチング

高周波を負荷に投入する際、電源のインピーダンスと負荷のインピーダンスが一致していないと反射波が発生し、電力が効率的に負荷へ投入されない。また、高周波電源の故障にもつながる。このため RF/C を使用する場合は高周波電源の他に電源と負荷のインピーダンスを一致させるための整合器が必要である。このインピーダンスを一致させることをインピーダンスマッチングという。ここで、図 2.11 のように高周波電源から出力される電圧を V_0 、電流を I_{RF} 、高周波電源のインピーダンスを Z_0 、負荷のインピーダンスを Z_L とすると負荷に供給される電力 W_L は式 (2.12) となる。

$$\begin{aligned}
W_L &= I_{RF}^2 \times Z_L \\
&= \left(\frac{V_0}{Z_0 + Z_L} \right)^2 Z_L \quad \dots (2.12) \\
&= V_0^2 Z_L / (Z_0^2 + 2Z_0 Z_L + Z_L^2) \\
&= V_0^2 / \{ Z_L + 2Z_0 + (Z_0^2 / Z_L) \}
\end{aligned}$$

電力 W_L が最大になるためには式 (2.12) の分母が最小となる必要がある。負荷のインピーダンス Z_L を変数として $f(Z_L) = Z_L + 2Z_0 + (Z_0^2 / Z_L)$ とおいて、 $f(Z_L)$ を Z_L について微分すると式 (2.13) となる。

$$f'(Z_L) = 1 - Z_0^2 / Z_L^2 \quad \dots (2.13)$$

式 (2.13) より $f(Z_L)$ が最小 (W_L が最大) となるのは $Z_L = Z_0$ のときである¹⁰⁾。

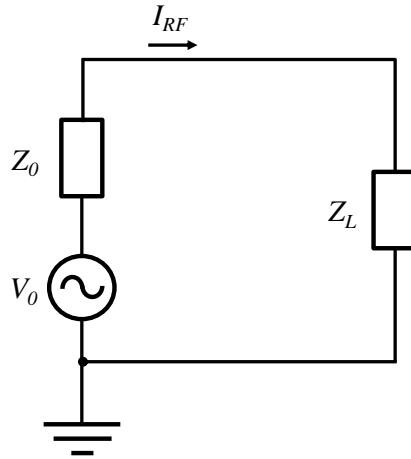


図 2.11 高周波回路モデル

本研究で使用した整合回路は図 2.12 に示すように直列と並列に 1 個ずつ可変コンデンサから構成されたものを使用した。高周波電源のインピーダンスは 50Ω に設定されているので $Z_0 = 50 \Omega$ 、負荷の抵抗を R_L 、負荷のリアクタンスを X_L 、角周波数を ω とする。

負荷のインピーダンスとマッチング回路の直列コンデンサ C_S を合わせたインピーダンス Z_S は式 (2.14) のように表せる。

$$\begin{aligned}
Z_S &= Z_L - j \frac{1}{\omega C_S} \\
&= (R_L + jX_L) - j \frac{1}{\omega C_S} \quad \dots (2.14) \\
&= R_L + j \left(X_L - \frac{1}{\omega C_S} \right)
\end{aligned}$$

次に Z_S とマッチング回路の並列コンデンサ C_P を合わせたインピーダンス Z_{S+P} は式

(2.15) のように表せる.

$$\begin{aligned}
 Z_{S+P} &= \frac{1}{\frac{1}{Z_S} + j\omega C_P} \\
 &= \frac{1}{\frac{1}{R_L + j\left(X_L - \frac{1}{\omega C_S}\right)} + j\omega C_P} \quad \dots (2.15) \\
 &= \frac{1}{\frac{R_L}{R_L^2 + \left(X_L - \frac{1}{\omega C_S}\right)^2} + j\left\{\frac{-X_L + \frac{1}{\omega C_S}}{R_L^2 + \left(X_L - \frac{1}{\omega C_S}\right)^2} + \omega C_P\right\}}
 \end{aligned}$$

以上より, インピーダンスマッチングの条件は式 (2.16), (2.17) のように表せる.

$$\frac{R_L}{R_L^2 + \left(X_L - \frac{1}{\omega C_S}\right)^2} = \frac{1}{50} \quad \dots (2.16)$$

$$\frac{-X_L + \frac{1}{\omega C_S}}{R_L^2 + \left(X_L - \frac{1}{\omega C_S}\right)^2} + \omega C_P = 0 \quad \dots (2.17)$$

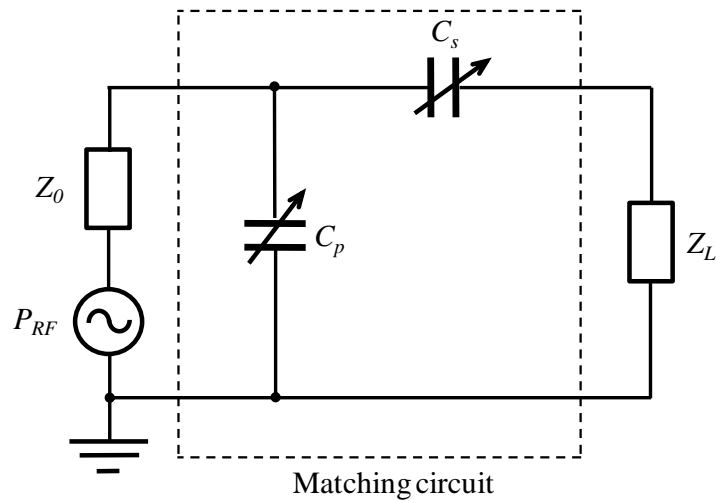


図 2.12 マッチング回路

第3章 実験装置および実験条件

3.1 真空環境模擬装置

本研究で用いた真空環境模擬装置（真空槽）の概要を示す。図 3.1 は真空槽全体の概略図である。真空槽は、長さ 3.2 m、直径 1.6 m の SUS304 製の円筒型である。低真空排気にロータリーポンプ（RP）とメカニカルブースターポンプ（MBP）、高真空排気にはオイルフリーであるクライオポンプ（CP）を 2 台使用した。これにより汚染の少ない高真空環境を作り出すことが可能である。表 3.1 に各ポンプの性能を示す。真空槽内圧力は低真空環境ではコンベクトロンゲージ、高真空環境では電離真空計で測定している。なお、実験で使用したキセノンガス流量と真空槽内圧力の関係を図 3.2 に示す。使用した圧力計は窒素で校正されているため窒素基準である。

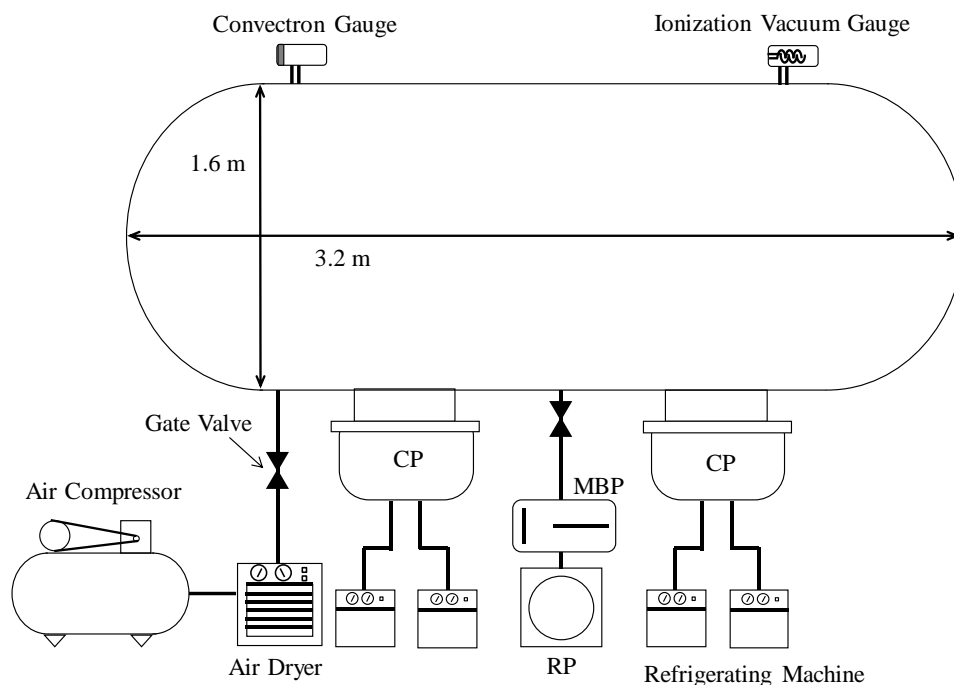


図 3.1 真空槽全体の概略図

表 3.1 ポンプの排気性能

		Pumping speed	Ultimate pressure	Power consumption
		L/s	Pa (Torr)	kW
Mechanical booster pump	MBP with RP-A	78	$2.0 \times 10^{-2} (1.5 \times 10^{-4})$	4.0
Cryogenic Pump	CP	28000	$1.0 \times 10^{-6} (7.5 \times 10^{-9})$	5.9

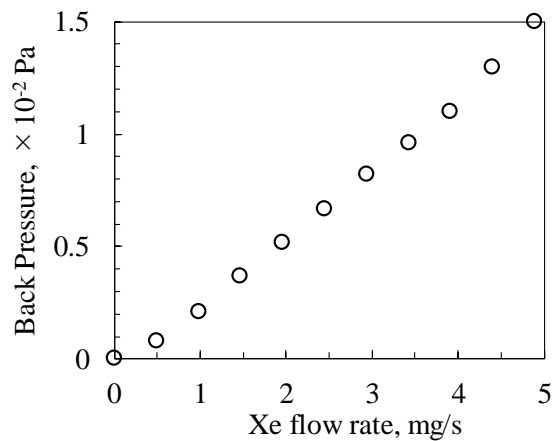


図 3.2 キセノンガス流量と真空槽内圧力の関係

3.2 ホールスラスタ

3.2.1 ホールスラスタの概略

図 3.3, 3.4 に本研究で使用した TAL 型ホールスラスタ (TMU-066) の外観図, 断面図を示す.



図 3.3 TMU-066 外観図

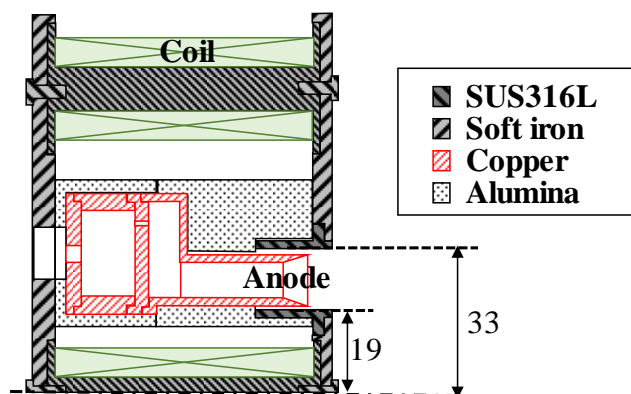


図 3.4 TMU-066 断面図 (単位:mm)

放電チャンネルの半径方向に磁場を形成するためにソレノイドコイルを TMU-066 の中心部に 1 本, 外周部に 6 本配置している. 中心部のコイル (以降, Inner Coil とする) と外周部のコイル (以降, Outer Coil とする) はそれぞれ独立して電流を流すことができる. ゆえに, コイルに流す電流を変化させることで磁束密度, 磁場形状を変化させることが可能である. 軸方向の電場の形成は銅製のアノードに電圧を印加することで行っている. アノード形状は中空円環形状のホローアノードとなっている. ガードリングと磁極はカソード電位となっている. 推進剤は, スラスタ後部から投入し, アノード上流部の空間に一時的に貯留し, 貯留部の放電チャンネル側の壁面に周方向に均一に設けられた 24 個の孔から供給される.

3.2.2 TMU-066 の磁場形状

3.2.1 で述べた通り，コイルの電流値を変更することで放電チャンネル内の磁束密度，磁場形状を変更できる．そこで Outer Coil に流す電流 I_{co} を 0 A から 0.1 A ずつ 2.0 A まで変化させたときの放電チャンネル内の半径方向の磁場を Lakeshore 製のガウスメータ 421 とプローブ MMT-6J04-VG を用いて計測した．Inner Coil に流す電流 I_{ci} は I_{co} の 1/4 とした．計測構成，回路を図 3.5 に，計測結果を図 3.6 に示す．図 3.6 について TMU-066 の端面を $z=0$ として負方向が放電チャンネル内，正方向が放電チャンネル外となっている． I_{co} を増加させることで半径方向の磁束密度は増加する．しかし， $I_{co}=1.6$ A 付近から磁束密度の増加量が減少し磁束密度が飽和している．これは，Outer Coil が 6 本なのに対し Inner Coil が 1 本であり，かつ，コイルの鉄心（軟鉄）が Outer Coil に比べ Inner Coil は細いため，Inner Coil の鉄心が磁気飽和しているためと考えられる．

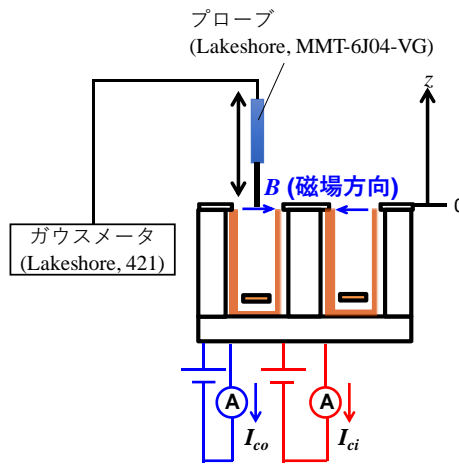


図 3.5 磁場計測回路

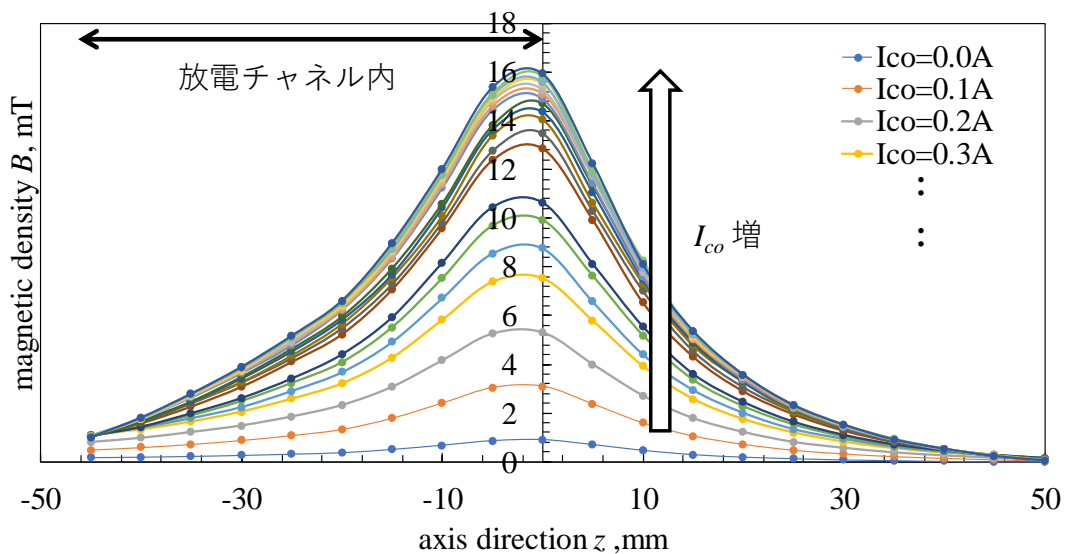


図 3.6 磁場計測結果

3.3 高周波プラズマカソード (Radio Frequency plasma Cathode: RF/C)

本研究で使用した RF/C は放電室の内部にアンテナコイルがある Inner Coil RF/C である。図 3.7, 3.8 に本研究で使用した RF/C の外観図, 断面図を示す。耐熱・耐スパッタ性を考慮し, 放電室はモリブデン, オリフィスとアンテナコイルはタングステンである。放電室内で生成された電子はオリフィスから放出される。その放出された電子と等価のイオンは金属製の放電室に捕集される。図 3.10 に RF/C の電子放出性能を示す。電子放出性能を評価した実験構成の概略は図 3.9 に示す。図 3.9 は電子源単体実験でよく行われるダイオードコンフィグレーションである。これは電子源の下流 50 mm にイオンビーム模擬のための金属プレートを設置し, そのプレートに正電圧を印加することで電子源内から電子を引き出す。そのプレートに流れ込む電子電流を計測し電子源の性能を評価する実験である。作動ガスはキセノンであり, 流量は 0.2 mg/s, 作動周波数は 13.56 MHz, 27.12 MHz, 電力は 300 W とした。図 3.10 より 13.56 MHz に比べ 27.12 MHz の方が電子放出性能が高いといえる。



図 3.7 RF/C 外観図

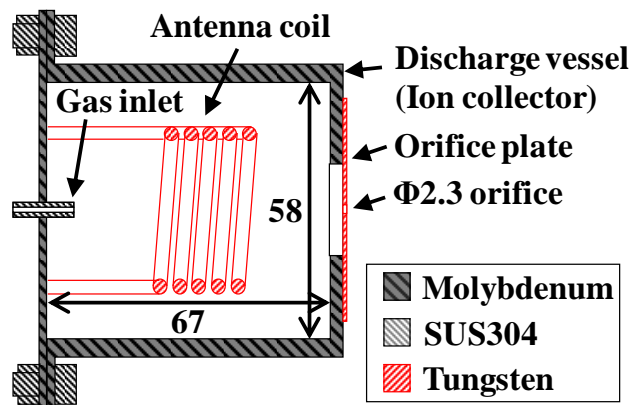


図 3.8 RF/C 断面図 (単位:mm)

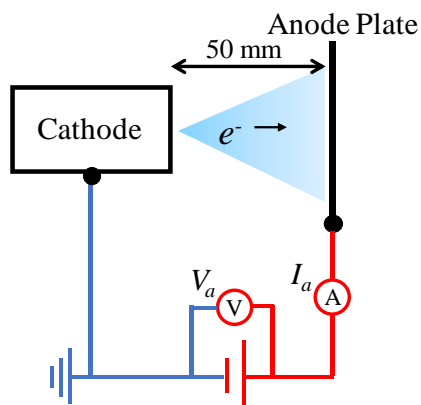


図 3.9 ダイオードコンフィグレーション

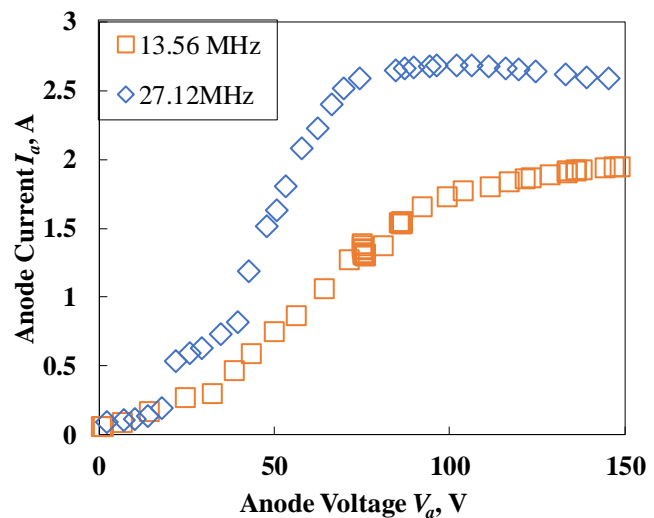


図 3.10 RF/C の電子放出性能

3.4 ホローカソード (Hollow Cathode: H/C)

本研究では Veeco 社製の HCN-252 を使用した。図 3.11 に H/C の外観図を示す。図 3.12 に H/C の電子放出性能を示す¹¹⁾。実験構成は 3.3 と同様である。作動ガスはキセノンである。



図 3.11 H/C 外観図

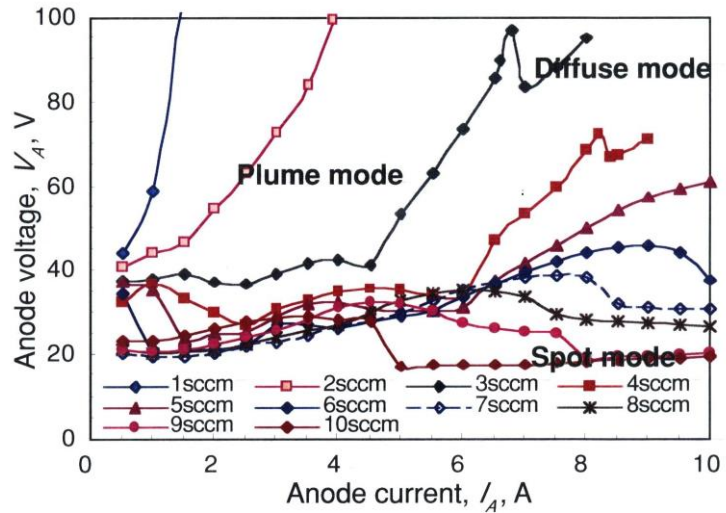


図 3.12 H/C の電子放出性能¹¹⁾

3.5 RPA

RPA とは Retarding Potential Analyzer の略であり、逆電位アナライザ、反射電界型アナライザとも言われている。図 3.13 に RPA の概念図を示す。RPA は、3 もしくは 4 枚のメッシュ状の金属グリッドとコレクタ電極で構成されている。G3 に印加した電圧よりも大きいエネルギーのイオンのみをコレクタが捕集し、イオンエネルギー分布を取得する測定計である。また、各グリッド、コレクタの役割と印加電圧を次で説明する。G1 の電圧を V_1 , G2, 4 は同じ電圧を印加するため $V_{2,4}$, G3 の印加電圧を V_3 , C に印加する電圧を V_{col} とする。

G1 (Floating Grid)

RPA 内部の電場によるプラズマ空間への擾乱を防ぎ、RPA に侵入するプラズマ密度を減少させる¹²⁾。そのため、G1 は電位的に浮かせる。つまり、 $V_1 = V_s$ である。

G2 (Electron Retarding Grid)

プラズマ空間中の電子の RPA への侵入を防ぐ。そのため、G2 には負電圧を印加する。

G3 (Ion Retarding Grid)

RPA 内に侵入してきたイオンにフィルタをかけ、印加電圧よりもエネルギーの低いイオンを遮断する。 V_3 は 0 ~ 放電電圧以上である。

G4 (Secondary Electron Suppression Grid)

G4 までに生じた二次電子をコレクタへの侵入を防ぐ。また、コレクタで生じた二次電子をコレクタに戻す。G4 も G2 と同様に負電圧を印加する。

C (Collector)

全グリッドを通過したイオンを捕集する。イオンの捕集能力を高めるために、負電圧を印加する。

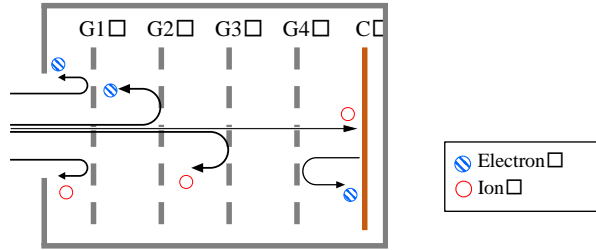


図 3.13 RPA の概念図

RPA を設計するにあたって、メッシュ状のグリッドの孔の大きさ、各グリッド同士の間隔が重要な設計パラメータである。

メッシュの線と線の間にはシースが形成されることにより電位障壁となり、電子やエネルギーの小さいイオンを跳ね返す。また、シースはデバイ長 λ_D [m]の数倍となるので、本研究ではメッシュサイズがデバイ長以下になるように 7.4×10^{-6} m とした。

空間電荷制限電流により、各グリッド同士の間隔はできるだけ小さくしなければならない。また、グリッド間距離 x [m] は式(3.1)のようにも表せる。

$$\frac{x}{\lambda_D} = \frac{2}{3} \left[\frac{2}{\exp(-1)} \right]^{1/4} \left(\frac{eV_{dg}}{k_B T_e} \right)^{3/4} = 1.02 \left(\frac{eV_{dg}}{k_B T_e} \right)^{3/4} \dots (3.1)$$

ここで、 e [C]は電気素量、 V_{dg} [V]はグリッド間電位差、 k_B はボルツマン定数、 T_e [K]は電子温度を表す。一般的に、式(3.1)よりもグリッド間隔を狭めた式(3.2)を適用することが望ましいとされている¹²⁾。よって本研究でもグリッド間隔に式(3.2)を適用した。

$$x < 4\lambda_D \dots (3.2)$$

G1 は RPA 内に流入する電子密度を減らす役割がある。また、孔の大きさとグリッド間距離の設計値はデバイ長に比例する。そのため、デバイ長を大きくすることは RPA の製作を容易にすることになる。デバイ長は電子密度に比例するため、G1 の開孔率は小さい方が良い。ハウジングには SUS304、コレクタには銅、絶縁材にはテフロン (PTFE) を使用した。RPA 入口径は 14mm とした。図 3.14 に RPA の概略図、図 3.15 に外観図を示す。イオンエネルギー分布関数 (Ion Energy Distribution Function: IEDF) $F(E)$ は式(3.3)で示される。ただし、 $E = eV_3$ 、 I_{col} はコレクタ電流、 I_{col0} は $V_3 = 0$ V 時のコレクタ電流である。

$$F(E) = -\frac{1}{I_{col0}} \frac{dI_{col}}{dE} \dots (3.3)$$

また平均イオンビーム電圧 \overline{V}_b は式 (3.4) より求めた. ホールスラスタ外で生成されたイオンの影響をとりのぞくため, 平均イオンビーム電圧 \overline{V}_b の算出には $V_3 > 50$ V のデータを使用した.

$$\overline{V}_b = \frac{\int_{50} F(E) E dE}{\int_{50} F(E) dE} \dots (3.4)$$

表 3.2 RPA のグリッドの仕様

	Material	Mesh size	Open area ratio
G1	SUS304	0.138 mm (80 mesh/inch)	18.8%
G2,3,4	SUS316	0.074 mm (200 mesh/inch)	34.0%

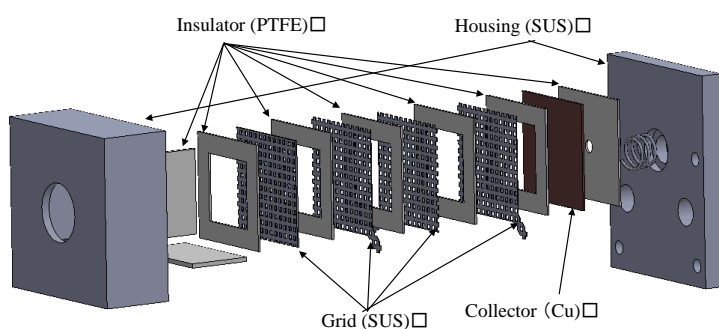


図 3.14 RPA 概略図

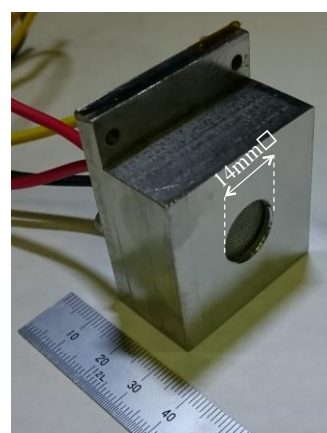


図 3.15 RPA 外観図

3.6 半径方向イオンビーム測定計

イオンビーム電流の測定計は本来, ファラデーカップであるが, 本研究では, RPA をファラデーカップと見立ててイオンビームの測定を行った. グリッド構成は RPA と同じであり. 印加電圧は G2 と G4 には -30 V, G3 にはホールスラスタ外部で生成されたイオン (電荷交換イオン CEX など) のコレクタへの侵入を防ぐため 50 V, コレクタには -10 V である. このようにグリッドに電圧を印加することで, エネルギーが 50 eV 以上のイオンのみが全グリッドを通過しコレクタに到達するため, この RPA によりイオンビーム電流の測定が行える. (便宜上, 本論文では, この RPA のことをファラデーカップとする.) 通常, イオン電流, 発散角の計測にはホールスラスタを中心に円弧上にファラデーカップを駆動させるが, 本研究では直線のみ駆動できる移動機構を使用したために電子源, 作動条件の違いによるイオンビーム電流, 発散角の相対評価を行った. ここで, eV はエネルギーの単位の一つであり, 1 eV は 1 個の電子が 1 V の電位差により得る運動エネルギーを表す.

3.7 電力供給系

3.7.1 直流電力供給系

本研究で使用した直流電源の一覧を表 3.3 に示す。TMU-066 の電場形成用に 1 台，磁場形成用に 2 台，H/C のヒータ，キープ用に各 1 台，RPA，ファラデーカップには G2 と G4 には同じ電圧を印加するため共有で 1 台，G3,コレクタに各 1 台使用した。

表 3.3 直流電源一覧

		Company	Model	Output
TMU-066	Discharge Power Supply (PS1)	Takasago	HX0600-25G	0-600 V/0-25 A
	Inner Coil Power Supply (PS2)	Matsusada	PK15-26	0-15V/0-26A
	Outer Coil Power Supply (PS3)	Matsusada	PK80-5	0-80V/0-5A
H/C	Heater Power Supply (PS4)	Kikusui	PAD110-10L	0-110 V/0-10 A
	Keeper Power Supply (PS5)	Nistac	NT7001	0-700 V/0-1 A
RPA	G2,4 Power Supply (PS6)	Nistac	NT7001	0-700 V/0-1 A
	G3 Power Supply (PS7)	Nistac	HV-2K10	0-2kV/0-1A
	Collector Power Supply (PS8)	Nistac	NT-20	0-550V/0-1A

3.7.2 高周波電力供給系

RF/C に使用した高周波電源及び整合回路 (Matching Box: MB) の仕様を表 3.4 に示す。MB は電子源に対して直並列に 1 個ずつ，計 2 個の可変キャパシタで構成されている。13.56 MHz ではこの MB に加えて直列にインダクタ L_s を挿入した。MB は真空槽内に設置し，真空槽外部からコントローラによりキャパシタの容量を変化させることでインピーダンスマッチングを行った。

表 3.4 高周波電源および整合回路一覧

RF Generator				
Company	Model	Frequency	Output	
Ion Tech	RF5-S	13.56MHz	0 - 500 W	
Thamway	T161-5727HAM	27.12MHz	0 - 500 W	
Matching Box for 13.56 MHz				
Company	Model	Series Capacitance (C_s)	Parallel Capacitance (C_p)	Series Inductance (L_s)
Thamway	T020-5766K	150 - 1500 pF (MEIDEN, SCV-415H65UW)	200 - 200 pF (MEIDEN, SCV-320H70UW)	0.3 μ H
Matching Box for 27.12 MHz				
Company	Model	Series Capacitance (C_s)	Parallel Capacitance (C_p)	
Thamway	T020-5766K	200 - 200 pF (MEIDEN, SCV-320H70UW)	25 - 250 pF (MEIDEN, SCV152.5H55UW-NP)	

3.8 作動ガス供給系

TMU-066 の推進剤, H/C と RF/C の作動ガスにはキセノンガスを使用した。充填タンクからレギュレータを通し減圧したのち流量調整器 (Mass Flow Controller: MFC) を介することで所望の流量を供給した。MFC の仕様を表 3.5 に示す。流量の単位の sccm は, Standard Cubic Centimeter per Minutes の略であり, 標準状態 (0°C, 1atm) で 1 分間に何 cc 流れるかを表している。キセノンガスの場合, 原子量が 131.29 mg/mol であるので式(3.5)のように単位換算ができる。

$$\frac{\dot{m}[\text{sccm}]}{22.4 \times 10^3 \times 60} \times 131.29 = \dot{m}[\text{mg/s}] \dots (3.5)$$

$$\Leftrightarrow 1 \text{ sccm} = 0.0977 \text{ mg/s}$$

表 3.5 MFC の仕様

	company	Model	Calibration Gas	Range	Accuracy
MFC for TMU-066	Aera Japan	FC-260J	Xenon	~50.0 sccm	< ±0.2% F.S.
MFC for Cathode	Aera Japan	FC-260J	Xenon	~10.0 sccm	< ±0.2% F.S.

F.S.=full scale

3.9 測定系

3.9.1 電流・電圧測定系

TMU-066 の電流・電圧はキーエンス社製データロガー NR-500 を使用した。H/C と RPA の電流・電圧は Sanwa 製デジタルマルチメータ PC773 を使用した。放電電流振動の大きさの評価に必要な放電電流波形の取得は Tektronix 製オシロスコープ TDS2014B, 電流プローブ TCPA300 を使用した。

3.9.2 推力測定系

TMU-066 の推力の測定には, 振り子式スラストスタンドと LED 式変位計を用いた。振り子式スラストスタンドに取り付けられたホールスラストが推力を発生させると, スラストスタンドに微小な変位が生じる。その変位を変位計で読み取ることで推力を算出する。LED 式変位計はオムロン製の Z4W-V25R を使用した。

3.10 実験構成

TMU-066 と各電子源の組み合わせ作動, RPA の実験構成を図 3.16, 3.17, 3.18 に示す。表 3.6 に実験構成の記号表を示す。TMU-066 に対する電子源の位置は TMU-066 の下流方向に 37 mm, 中心から半径方向に 93 mm の位置に電子源のオリフィスがくるように設置した。RF/C の放出した電子には高周波成分が含まれているため, TMU-066 と組み合わせた際に TMU-066 や RPA で使用する直流電源にも高周波成分が侵入し作動に影響を与えてしまう。そのため RF/C 使用

時はローパスフィルタ (Low Pass Filter: LPF) を挿入し直流電源へ高周波ノイズが侵入することを抑制している。RF/C コールド側-MB 間のブロッキングキャパシタ (Cbc) はアンテナコイルを接地電位から浮かせることでイオンによるスパッタを抑制するために挿入されている¹³⁾。RPA は TMU-066 中心から下流 250 mm の位置に設置し IEDF を取得した。RPA の基準電位はグラウンドとした。ファラデーカップは TMU-066 中心から下流 250 mm の位置を基準に半径方向に駆動させることでイオン電流と発散角の相対評価を行った。ファラデーカップの実験構成は図 3.18 の RPA と同様である。ただ、 V_3 は 50 V に固定している。そして、 I_d と I_c の不一致を防ぐためカソード電位-グラウンド電位間にツェナー電圧 $V_z=51$ V の大電流ツェナー回路を挿入した。

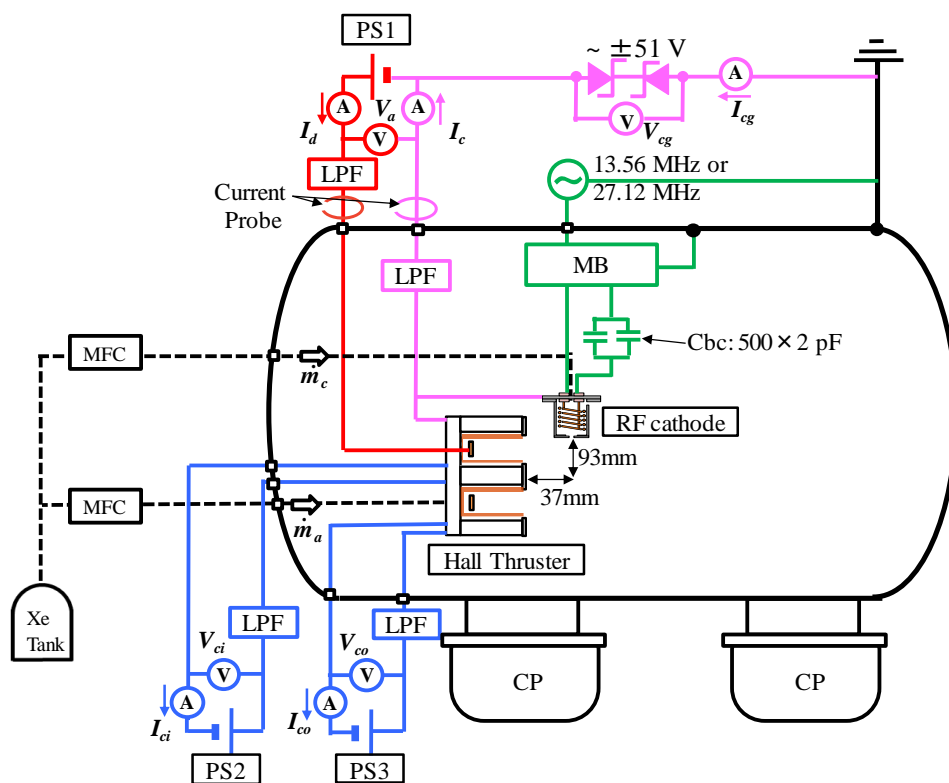


図 3.16 TMU-066 + RF/C の実験構成

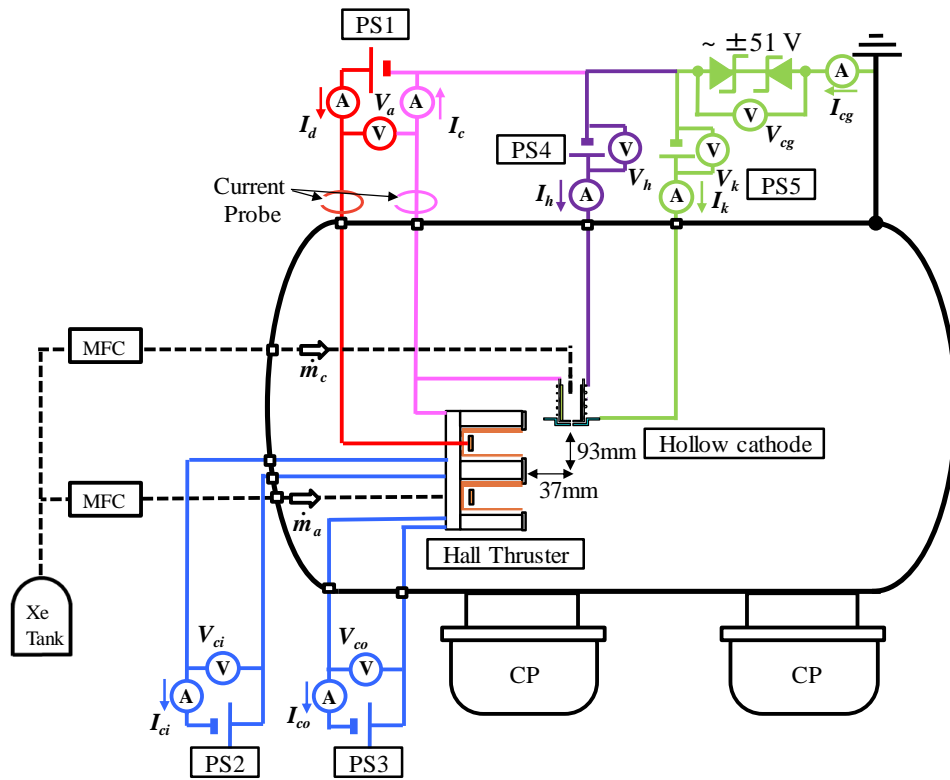


図 3.17 TMU-066 + H/C の実験構成

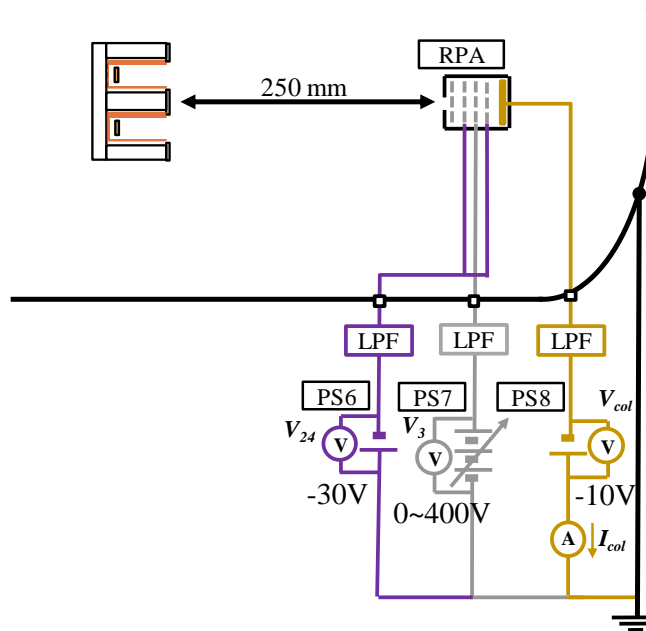


図 3.18 RPA の実験構成

表 3.6 記号表

PS1 :放電電源	m_a :アノードガス流量	I_k :キープ電流
PS2 :インナーコイル電源	m_c :カソードガス流量	V_k :キープ電圧
PS3 :アウターコイル電源	I_{co} :アウターコイル電流	V_{24} :G2,4印加電圧
PS4 :ヒータ電源	V_{co} :アウターコイル電圧	V_3 :G3印加電圧
PS5 :キープ電源	I_{ci} :インナーコイル電流	I_{col} :コレクタ電流
PS6 :G2,4電源	V_{ci} :インナーコイル電圧	V_{col} :コレクタ電圧
PS7 :G3電源	I_d :放電電流	I_{cg} :カソード-グラウンド間電流
PS8 :コレクタ電源	I_c :カソード電流	V_{cg} :カソード-グラウンド間電圧
MB :マッチングボックス	V_d :放電電圧	
LPF :ローパスフィルタ	I_h :ヒータ電流	
MFC :流量調整器	V_h :ヒータ電圧	

3.11 大電流ツェナー回路

ホールスラストのカソード電位，放電電源がグラウンド電位に接続されていると，ホールスラストの放電チャンネル内でのプラズマ生成に寄与する電子が電子源のみならずグラウンドから供給される．このことによりホールスラストの推進性能が過大評価されてしまう．そこでカソード電位，放電電源を浮遊させ，電子源のみでホールスラストを作動させるためにカソード電位-グラウンド電位間にツェナー電圧 $V_z=51\text{ V}$ の大電流ツェナー回路を挿入した．本研究で使用した大電流ツェナー回路はカソード電位-グラウンド電位間 V_{cg} が $\pm 51\text{ V}$ 以下ではツェナーによりグラウンド-電子源間に電流 I_{cg} が流れず， I_d と I_c が一致する． V_{cg} が $\pm 51\text{ V}$ より大きくなると保護回路が働きグラウンド-電子源間に電流 I_{cg} が流れる．図 3.19 に回路図，図 3.20 に大電流ツェナー回路の作動特性を示す．

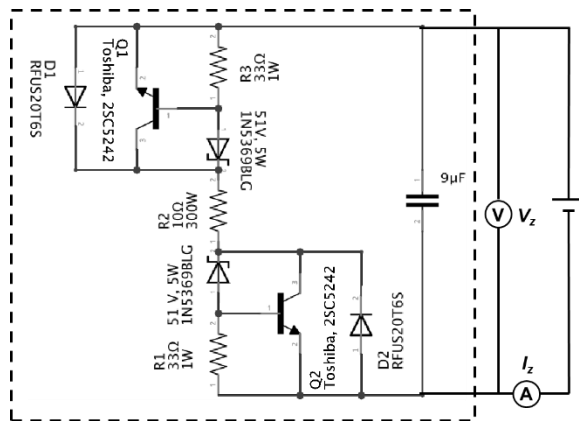


図 3.19 大電流ツェナー回路図

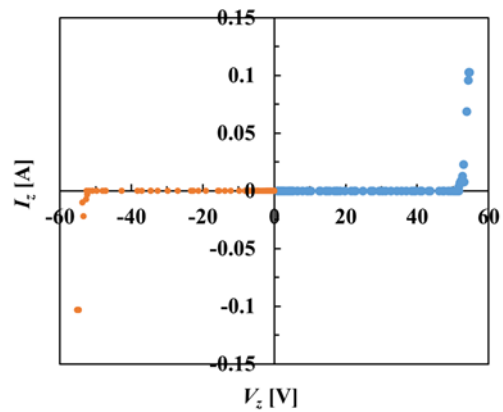


図 3.20 大電流ツェナー回路の特性

3.12 ローパスフィルタ (Low Pass Filter: LPF)

RF/C から放出される電子による直流電源への高周波ノイズの侵入を抑制されるため、TMU-066 + RF/C 時には放電電源-アノード間、アノード電源-電子源間、コイル用電源-コイル間に LPF を挿入している。TMU-066 + H/C 時は LPF を挿入していない。また RPA にもグリッド、コレクタ-電源間に LPF を挿入している。図 3.21 に TMU-066 + RF/C 13.56 MHz 時の LPF、図 3.22 に TMU-066 + RF/C 27.12 MHz 時の LPF、図 3.23 に RPA、ファラデーカップの LPF を示す。RPA、ファラデーカップの LPF は H/C 時も挿入している。

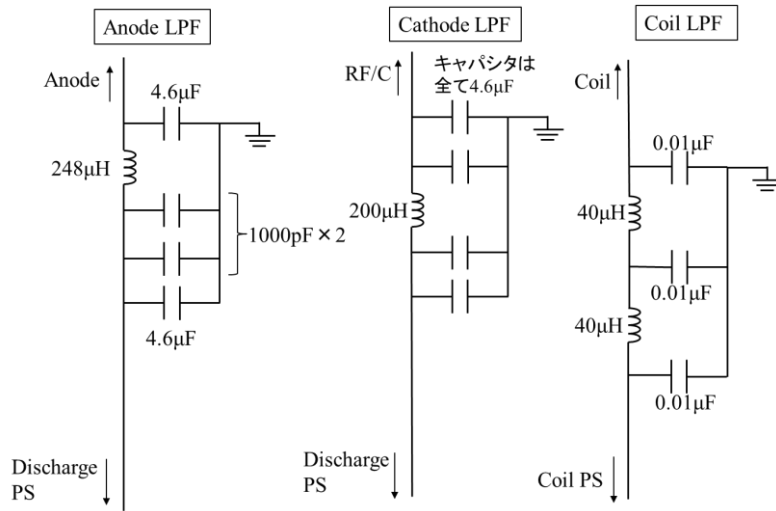


図 3.21 TMU-066 + RF/C 13.56 MHz 時の LPF

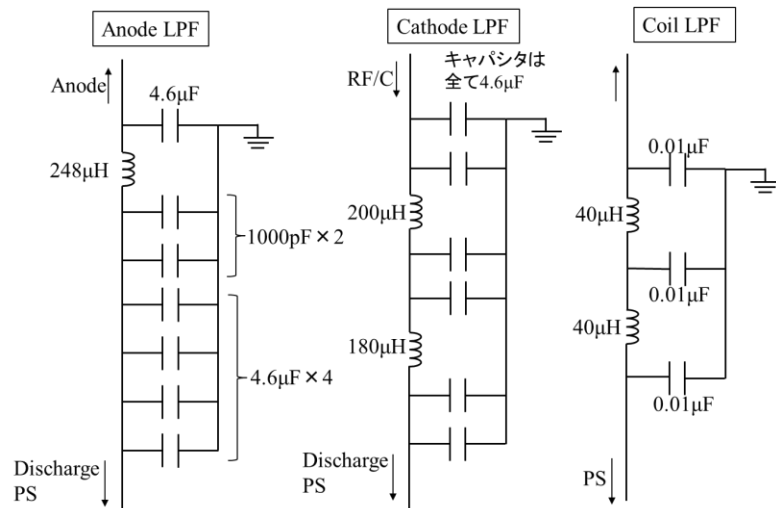


図 3.22 TMU-066 + RF/C 27.12 MHz 時の LPF

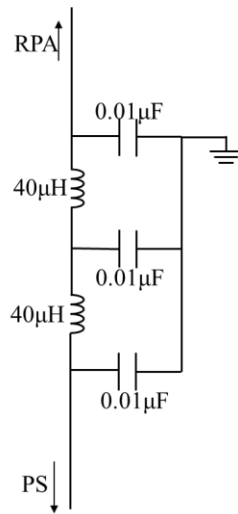


図 3.23 RPA, ファラデーカップの LPF

3.13 実験条件

TMU-066 と各電子源組み合わせ時, RPA, ファラデーカップの実験条件を表 3.7, 3.8, 3.9 に示す. TMU-066, 電子源ともに作動ガスはキセノンを用い, 電子源の流量は TMU-066 の流量の 10 %とした. 磁場形成用コイルの電流値は Outer Coil の電流値 I_{co} を 0.1~2.0 A の範囲で 0.1 A 刻みで変更し放電チャンネル内の磁束密度, 磁場形状を変更した. Inner Coil の電流値 I_{ci} は I_{co} の 1/4 とした.

H/C は一度プラズマ点火すると放電室内のプラズマに電流が流れることによるジュール加熱と電子やイオンがインサートに衝突することで熱電子放出に必要な温度が維持される. そのため, 通常, H/C 点火後はヒータによる加熱が必要なくなる. 本研究では, ヒータに 8.0 A, キーパに 500 V を投入することで点火し, 点火後もプラズマ維持のためにヒータに 5.0 A 投入している.

RF/C は周波数 13.56 MHz, 27.12 MHz の二種類用いた. RF/C は投入電力を増加させることで電子電流が増加することが過去の研究より明らかとなっている. しかし, 投入電力を増加させると MB 内の部材等の融解の恐れがあるため本研究では投入電力は 300 W とした.

RPA は, G2, G4 には電子の侵入を防ぐために -30 V, コレクタにはイオンの捕集能力を高めるために -10 V 印加している. G3 にはコレクタ電流が 0 A となるまで正電圧を掃引した. ファラデーカップは G3 に 50 V を印加し, その他の電圧は RPA と同じである.

各条件につき 3 回実験を行い以降で示す結果のグラフのシンボルは 3 回の平均値を示し, エラーバーは標準偏差を表す.

表 3.7 TMU-066, RF/C, H/C の実験条件

TMU-066	
Gas	Xe
Gas Flow Rate, mg/s	2.0
Discharge Voltage V_d , V	200, 300, 400, 500
Outer Coil Current I_{co} , A	0.1 ~ 2.0 (@0.1A刻み)
Inner Coil Current I_{ci} , A	0.025 ~ 0.5(I_{co} の1/4)
RF/C	
Gas	Xe
Gas Flow Rate, mg/s	0.20
Frequency f , MHz	13.56, 27.12
RF Power P_{RF} , W	300
H/C	
Gas	Xe
Gas Flow Rate, mg/s	0.20
Keeper Current I_k , A	0.30
Heater Current I_h , A	5.0

表 3.8 RPA の実験条件

RPA	
G3 Voltage V_3 , V	0 ~ 400
G2,4 Voltage V_{24} , V	-30
Collector Voltage V_{col} , V	-10

表 3.9 ファラデーカップの実験条件

FaradayCup	
G3 Voltage V_3 , V	50
G2,4 Voltage V_{24} , V	-30
Collector Voltage V_{col} , V	-10

3.14 性能評価指標

本研究で使用したホールスラストの性能評価指標を以下に示す.

- ・アノード効率, η_a : ホールスラストに投入したエネルギーがどの程度イオンの運動エネルギーに変換されたかを示す指標

$$\eta_a = \frac{1}{2} \frac{T^2}{\dot{m}_a I_a V_d} \dots (3.6)$$

- ・放電電流振動評価指標, Δ : 放電電流振動の強度を示す指標であり, この値が小さいほどホールスラストの作動が安定しているといえる

$$\Delta = \frac{RMS}{\bar{I}_d} = \frac{1}{\bar{I}_d} \sqrt{\frac{\int_0^\tau (I_d - \bar{I}_d)^2 dt}{\tau}}, \left(\bar{I}_d = \frac{\int_0^\tau I_d dt}{\tau} \right) \dots (3.7)$$

ここで, T は推力, \dot{m}_a はアノード流量, I_d はある瞬間の放電電流, \bar{I}_d は波形計測時間内の平均放電電流, τ は波形計測時間を表している.

第4章 実験結果および考察

4.1 RF/C 27.12 MHz による TMU-066 の作動

RF/C 27.12 MHz から放出された電子により TMU-066 の点火し推力が発生していることを確認した。図 4.1 に TMU-066 + RF/C 27.12 MHz 作動時の様子を示す。図 4.2 に RF/C 27.12 MHz による TMU-066 の作動範囲を示す。○は電子源から放出された電子のみで TMU-066 の放電チャンネル内でプラズマが生成し、推力が発生したときである。×は放電チャンネル内でプラズマが生成しないときである。△は放電チャンネル内でプラズマは生成するが、電子源からの電子の不足により $V_{cg} < -51$ V となりグラウンドから電子が供給されているときである。—は未実施である。未実施は電子電流不足が予想されるため実施していない。また、 $V_{cg} > -51$ V (図 4.2 の○の作動点) の時には電子源-グラウンド間に流れる電流 I_{cg} は常に 0 A であり、RF/C 27.12 MHz により TMU-066 のプラズマ生成とイオンビームの中和が行われたといえる。磁場が小さい場合は $V_{cg} < -51$ V となり I_{cg} に電流が流れ RF/C の電子電流不足が確認された。

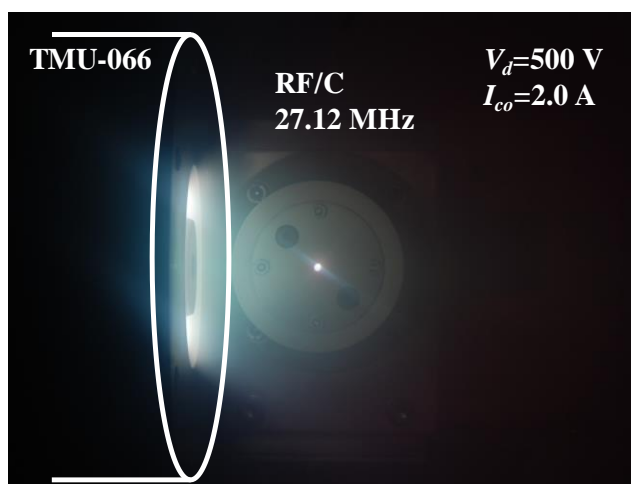


図 4.1 TMU-066 + RF/C 27.12 MHz 作動の様子 (ss=1/2 s, f/11, ISO100)

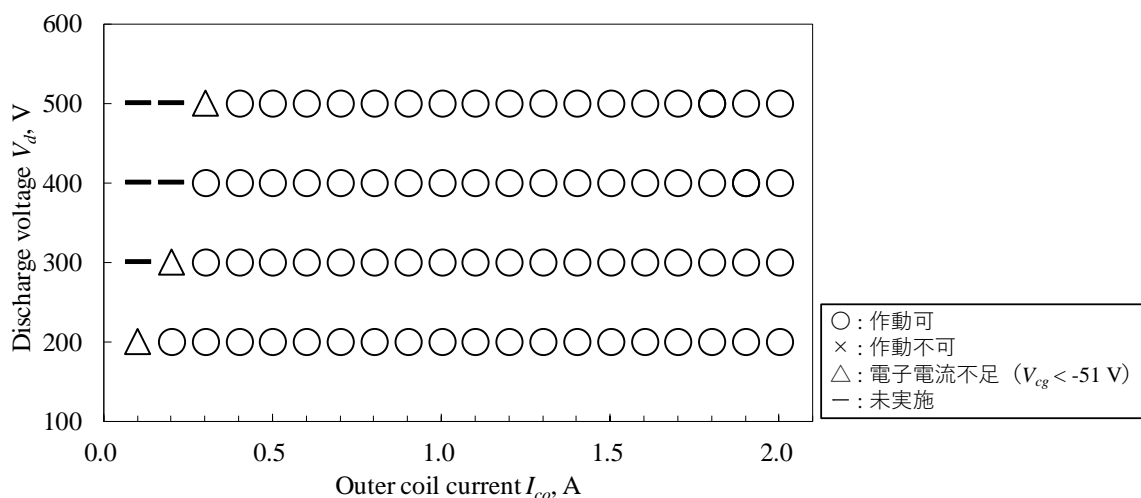


図 4.2 RF/C 27.12 MHz による TMU-066 の作動範囲

1.1 で述べたように過去の研究で TMU-066 と RF/C 13.56 MHz を組み合わせ時に磁場，電場を印加せずとも放電チャンネル内でプラズマが生成する Doughnut-like ring light が確認されているが，この現象は 27.12 MHz でも確認された．そのときの様子を図 4.3 に示す．

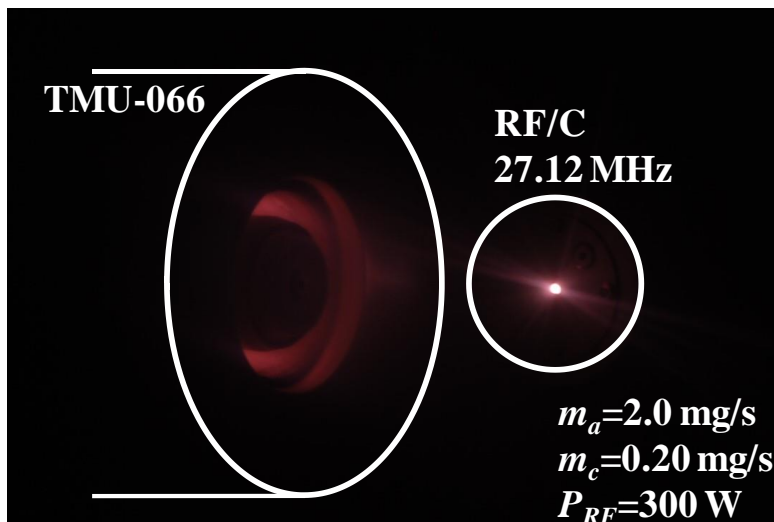


図 4.3 RF/C 27.12 MHz による Doughnut-like ring light (ss=6 s, f/9, ISO100)

4.2 電子源の違いによる TMU-066 の推進性能の比較

4.2.1 作動範囲

TMU-066 と RF/C 27.12 MHz の組み合わせ時の作動範囲を図 4.2，RF/C 13.56 MHz 使用時を図 4.4，H/C 使用時を図 4.5 に示す．図中の記号については 4.1 で説明したとおりである．磁場が弱い範囲で電子源により作動範囲が異なり，RF/C 27.12 MHz が最大で次に RF/C 13.56 MHz，H/C となった．これは RF/C の場合，アンテナコイル-放電チャンネル間の容量結合 (Doughnut-like ring light) により放電チャンネル内でプラズマの生成・維持が容易になり，作動範囲が拡大したと考えられる．

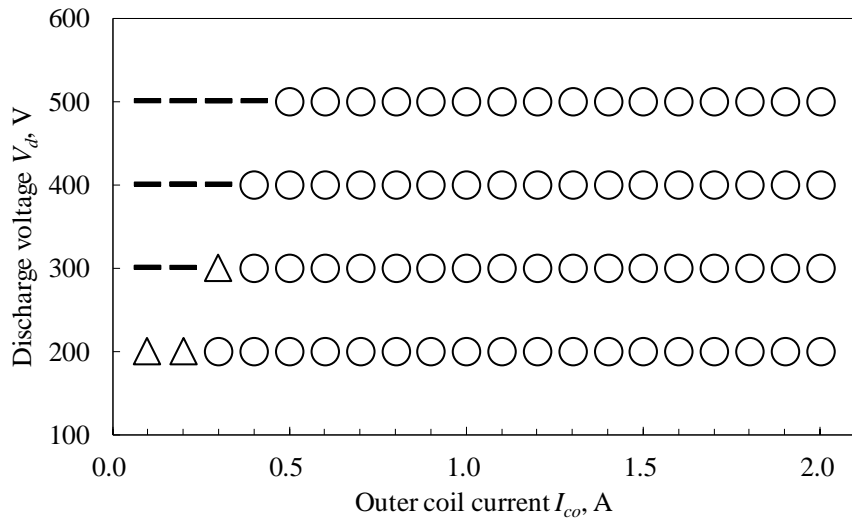


図 4.4 RF/C 13.56 MHz による TMU-066 の作動範囲

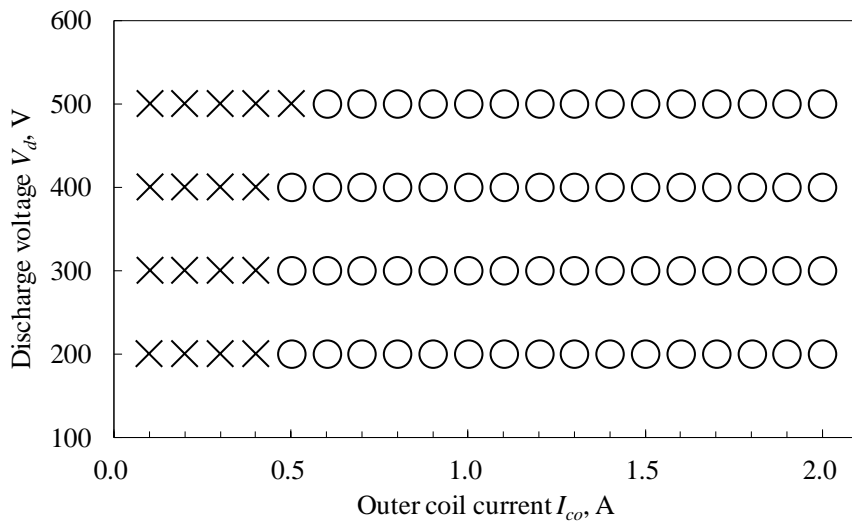


図 4.5 H/C による TMU-066 の作動範囲

4.2.2 磁場特性

半径方向の磁場 B に対する放電電流 I_d , 推力 T , 放電電流振動の評価指標 Δ , アノード効率 η_a の電子源による影響を評価する. 結果を図 4.6 に示す. グラフの横軸は, 図 3.6 の axis direction=0 mm における磁場を用いた. 電子源の違いによる放電電流の違いは確認されなかった. 電子源の種類に依らず放電電流, 推力は磁場が増加するにつれて減少し, 放電電流は $B=13.5$ mT から, 推力は $B=14.8$ mT から増加に転じる. また放電電流は $B=14.8$ mT で急増した. Δ は $B=7.4$ mT では大きい磁場を増加させると落ち着き, 放電電流と同様に $B=14.8$ mT で急増した. アノード効率は放電電流が小さく, 推力が比較的大きい $B=9.9$ mT で最大値となった. 電子源の違いによる放電電流に差は生じなかった. 推力は RF/C 27.12 MHz が一番大きく, 次に RF/C 13.56 MHz, H/C となった. Δ は $B=12.9$ mT 以下では RF/C に比べ H/C の方が小さくなった. ただ, 電子源に依らず $\Delta < 0.05$ 程度でありホールスラストの安定作動に対して優位な差ではない. アノード効率については, 推力の差により RF/C 27.12 MHz が一番高くなった.

4.2.3 放電電圧特性

放電電圧 V_d に対する放電電流 I_d , 推力 T , 放電電流振動の大きさを表す Δ , アノード効率 η_a の電子源による影響を評価する. 結果を図 4.7 に示す. 磁場 B は 10.8, 16.2 mT とした. 磁場, 電子源に依らず, 放電電流と推力は放電電圧の増加に対してほぼ線形に増加している. アノード効率は磁場, 電子源に依らず 300 V と 400 V の間で最大となることが予想された. Δ については 10.8 mT ではほぼ変化がないが, 16.2 mT では 400V のみ大きくなった. これは, この作動条件が電子の拡散モードが古典拡散からボーム拡散への遷移区間内であったためと考えられる.

14)

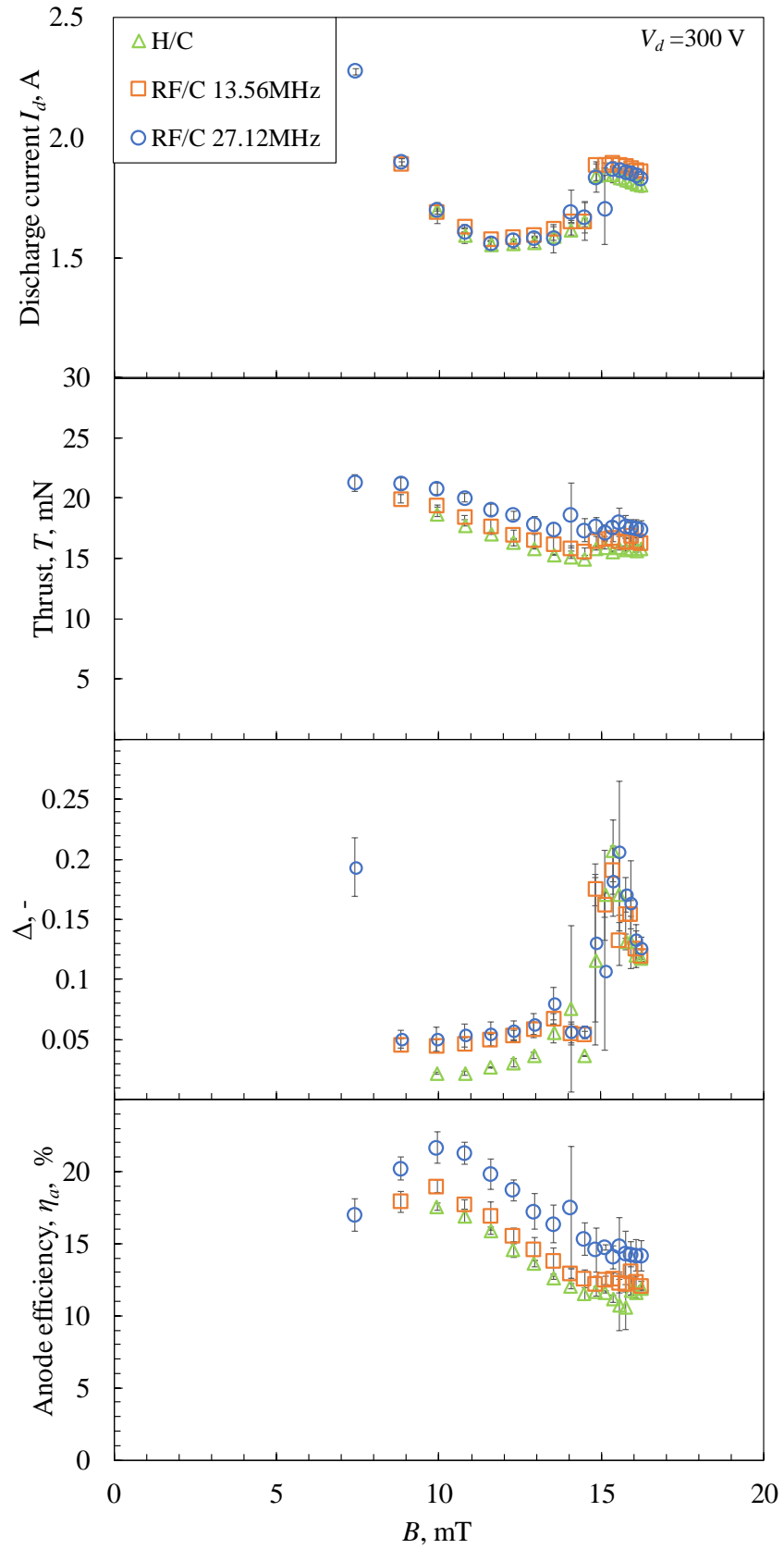


図 4.6 磁場に対する放電電流 I_d , 推力 T , 放電電流振動の大きさを表す Δ , アノード効率 η_a

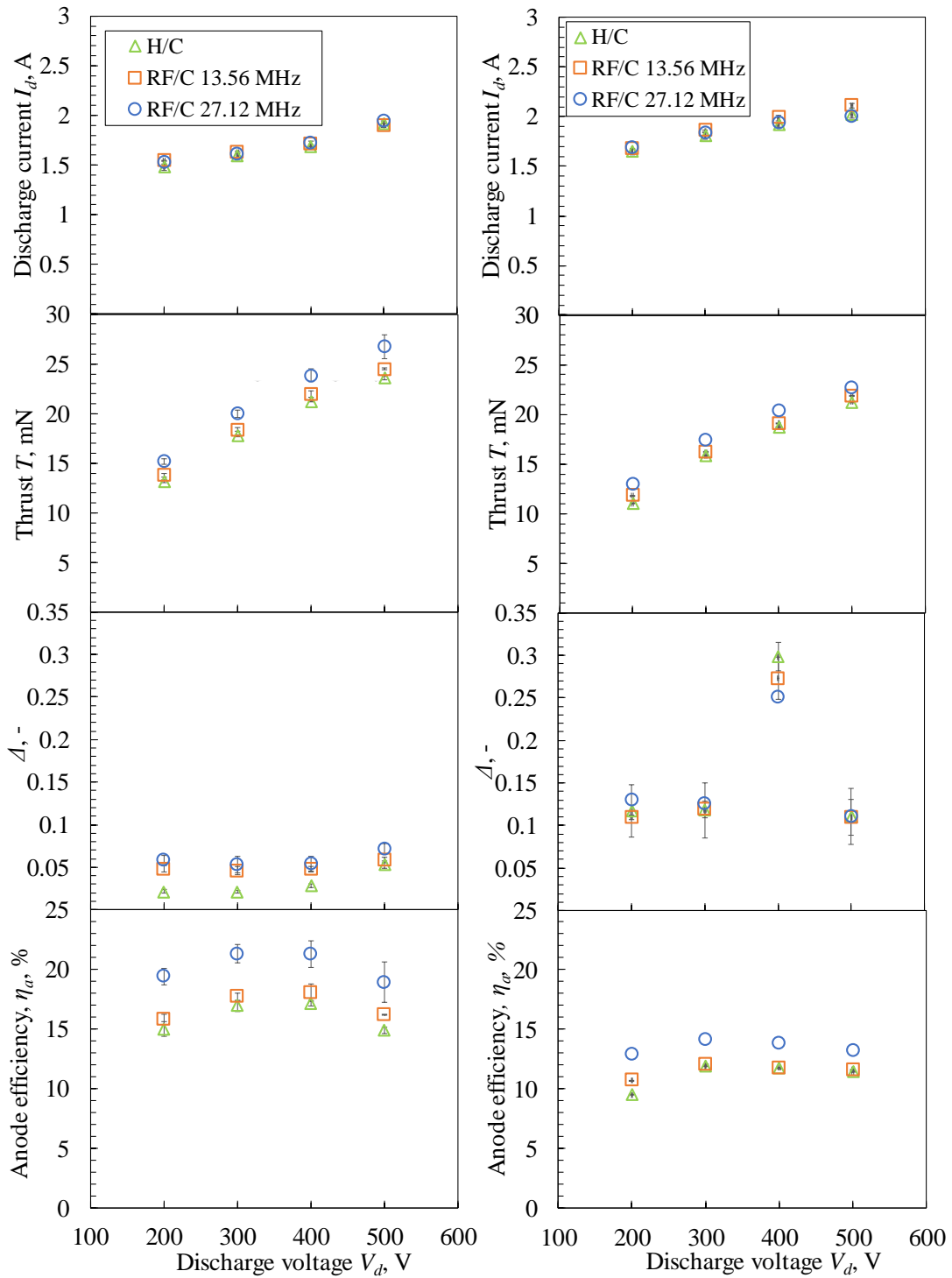


図 4.7 放電電圧 V_d に対する放電電流 I_d , 推力 T , 放電電流振動の大きさを表す Δ , アノード効率 η_a (左: $B = 10.8$ mT, 右: $B = 16.2$ mT)

4.2.4 電子源による推力の相違の考察

電子源による推力の差について考察する．推力の理論式（イオンは1価と2価のみと仮定）は式（4.1）で表せる．

$$T = \cos \theta \frac{1 + \gamma / \sqrt{2} M}{1 + \gamma} \frac{I_i m_a}{e} \sqrt{\frac{2M}{e} \bar{V}_b} \dots (4.1)$$

ここで、 θ はイオンビームの発散半角、 γ は1価イオン電流値に対する2価イオン電流値、 M はイオン質量、 e は電気素量、 I_i はホールスラストから噴出した全イオン電流、 m_a はアノード流量、 \bar{V}_b は平均イオンビーム電圧を表す．そこでホールスラスト噴出プルームのプラズマ診断を行い、推力に影響を与えるパラメータを取得し、電子源による影響を比較し推力が異なった要因を探る．平均イオンビーム電圧は3.5で示したRPAを用いて計測した．発散角とイオンビーム電流は3.6で示したファラデーカップを用いて評価した．電子源はH/CとRF/C 27.12 MHzを使用し放電電圧 $V_d=200, 300$ V, $B=10.8, 16.2$ mTでのプラズマ診断を行った．

図4.8にRPAによるIEDFの測定結果の一例を示す．表4.1に各条件における平均イオンビーム電圧 \bar{V}_b （平均イオンエネルギー）を示す．RatioはH/C使用時のプラズマ診断結果に対するRF/C 27.12 MHzのその増加率を表す．表4.1より、どの作動点においてもH/Cに比べRF/C 27.12 MHzのほうが平均イオンビーム電圧が高くなった．この要因は電子源による電子源-グラウンド間電位差 V_{cg} の違いによるものだと考えられる．表4.2に電子源による V_{cg} の違いを示す．表4.2よりRF/C 27.12 MHzに比べH/Cが-8~-13V程度、負に沈み込んでいることが分かる．この相違は、電子源の電子放出性能の相違が要因と考えられる．図3.10と図3.12よりキセノンガス流量0.2mg (2sccm)では低アノード電圧でのアノード電流（電子電流）はRF/C 27.12 MHzのほうが大きいため V_{cg} が負に沈み込まなかったと考えられる．式(2.6)より V_{cg} が負に沈み込むほどイオンビーム電圧 V_b がその分減少するため、式(4.1)より推力の減少につながる事が分かる．また図4.9に平均イオンビーム電圧 \bar{V}_b と $|V_{cg}|$ を足し合わせたものを示す．電子源の違いにより合計した電圧値に大きな差はなく、式(2.6)より電子源に関係なくプラズマ空間電位 V_p は10V前後と推定できる．

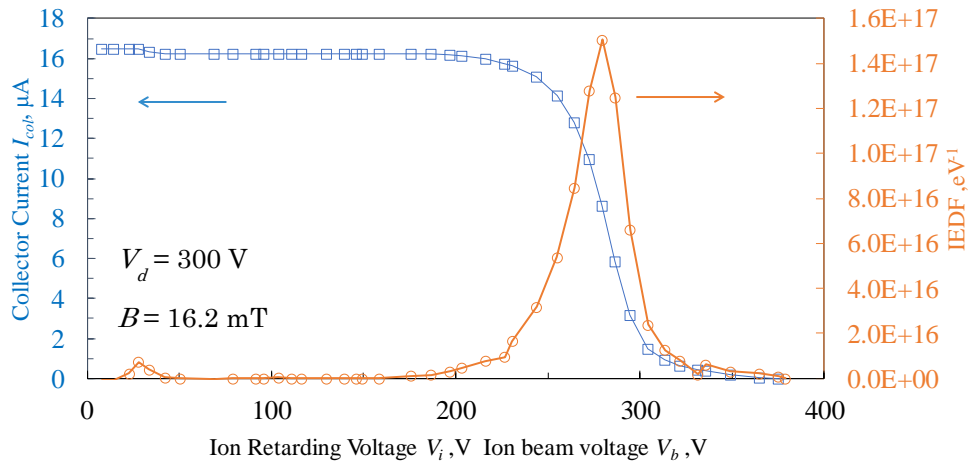


図 4.8 コレクタ電流と IEDF

表 4.1 電子源による平均イオンビーム電圧の違い

Ave. ion beam voltage, V_b , V	$V_d=200$ V		$V_d=300$ V	
	$B=10.8$ mT	$B=16.2$ mT	$B=10.8$ mT	$B=16.2$ mT
H/C	177.1	174.6	272.8	269.3
RF/C 27.12 MHz	193.3	179.3	284.3	276.9
Ratio	1.091	1.027	1.042	1.028

表 4.2 電子源による V_{cg} の違い

V_{cg} , V	$V_d=200$ V		$V_d=300$ V	
	$B=10.8$ mT	$B=16.2$ mT	$B=10.8$ mT	$B=16.2$ mT
H/C	-15.8	-19.1	-14.4	-19.2
RF/C 27.12 MHz	-2.0	-6.7	-6.1	-9.3

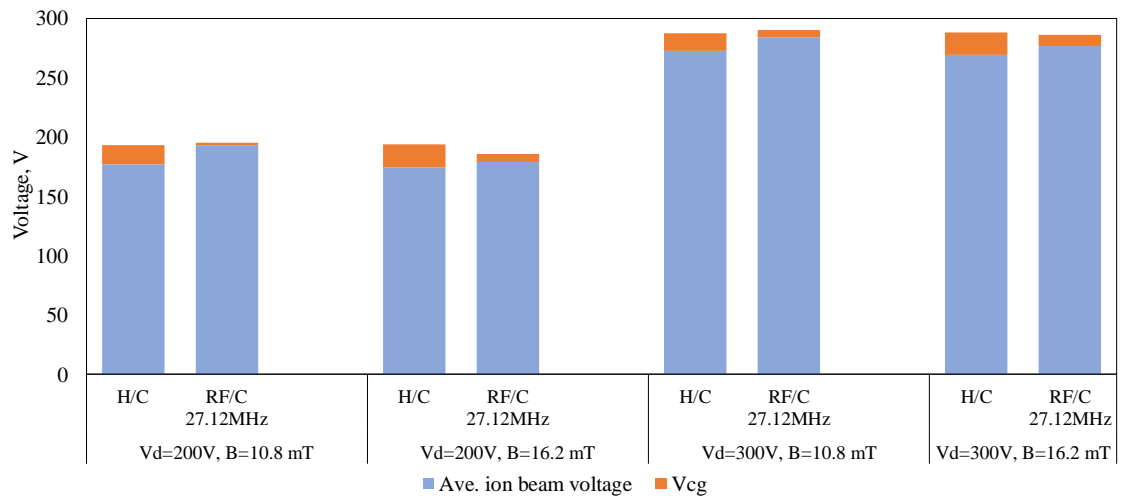


図 4.9 平均イオンビーム電圧 $\overline{V_b} + |V_{cg}|$

以上より、電子源の違いにより V_{cg} が異なり、それにより平均イオンビーム電圧が異なることが分かった。また、平均イオンビーム電圧の違いが推力の違いを生む要因の一つであるとわかった。

次に、電子源の違いによるイオンビーム電流への影響について論じる。イオンビーム電流は 3.6 で述べたように計測手法の問題により相対評価とすることに注意してほしい。イオンビーム電流は 3.6 で示したファラデーカップを用いて評価した。TMU-066 の下流 250mm における半径方向のイオンビーム電流分布の一例を図 4.10 に示す。Position = 0mm が TMU-066 の中心である。縦軸はファラデーカップのコレクタ電流値を示している。図 4.10 より、H/C に比べ RF/C 27.12 MHz のほうがイオンビーム電流が大きいとわかる。イオンビームが中心軸 (Position=0) で線対称であるとする全イオンビーム電流 I_i は図 4.10 の積分値の 2 倍となる。この仮定の下、各電子源と作動条件における全イオンビーム電流 I_i を表 4.3 に示す。イオン電流は全作動条件で RF/C 27.12 MHz の方が 6.4~23.4%大きくなった。以上より、電子源によりイオンビーム電流が異なり、推力の違いを生む要因の一つであるとわかった。

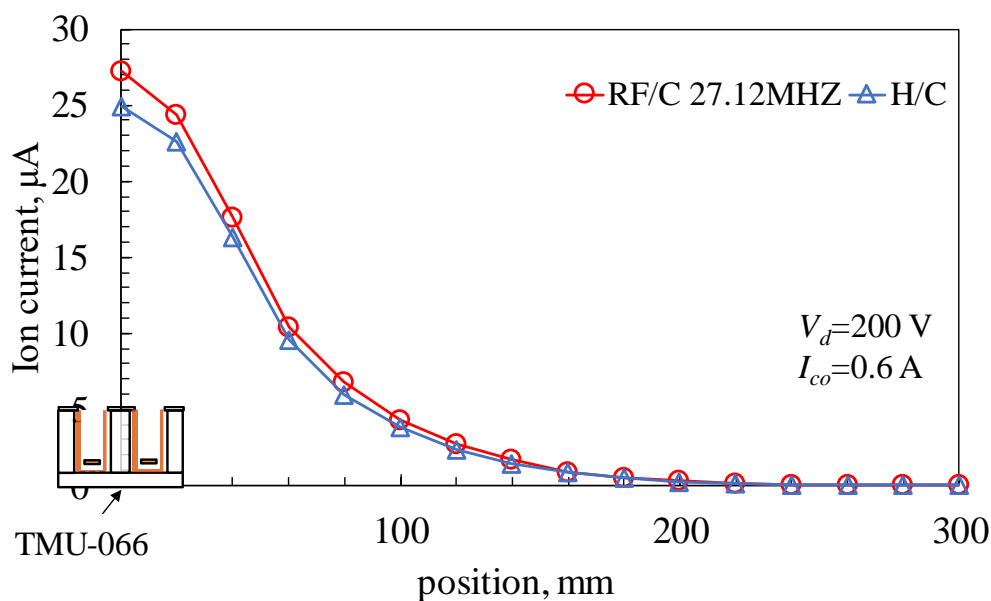


図 4.10 下流 250mm における半径方向のイオンビーム電流分布

表 4.3 電子源と作動条件における全イオンビーム電流 I_i

Ion current, I_i , μA	$V_d=200\text{ V}$		$V_d=300\text{ V}$	
	$B=10.8\text{ mT}$	$B=16.2\text{ mT}$	$B=10.8\text{ mT}$	$B=16.2\text{ mT}$
H/C	177.6	86.8	206.2	124.7
RF/C 27.12 MHz	194.1	107.1	219.3	142.3
Ratio	1.093	1.234	1.064	1.141

最後に、電子源の違いによるイオンビームの発散角への影響について論じる。発散角も 3.6 で示したファラデーカップを用いて相対評価した。下流 250mm における半径方向のイオンビーム電流分布において最大値を 1 として規格化したイオン電流分布からイオンビームの発散角の相対評価を行った。また、発散角は数値化が厳しかったため角度の大きさを大小のみで評価した。下流 250 mm におけるイオンビームの発散の比較を図 4.11 に示す。 $B=10.8\text{ mT}$ では電子源、放電電圧に依らず発散角は一致し、 $B=16.2\text{ mT}$ では RF/C 27.12 MHz の方が発散角が大きくなった。以上より、電子源によりイオンビームの発散角が異なり、推力の違いを生む要因の一つであるとわかった。

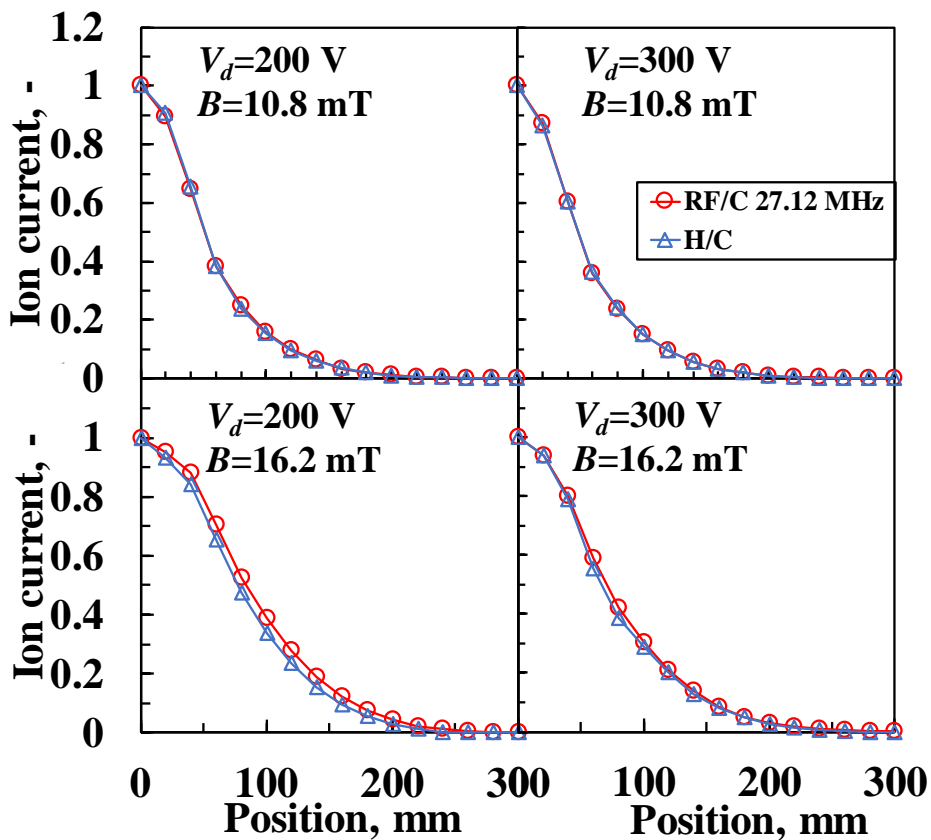


図 4.11 下流 250 mm におけるイオンビームの発散の比較

スラストスタンドから求めた推力の実験値 (Thrust) とプラズマ診断の結果をまとめた表を表 4.7 に示す. 式 (4.1) より平均イオンビーム電圧は理論推力に対して 1/2 乗に比例するので, 表 4.7 中の $V_b \times I_i$ の Ratio は Ave. ion energy の $\sqrt{\text{Ratio}}$ と Ion current の Ratio をかけた値である. 発散角が等しくなった $B=10.8$ mT で Thrust の Ratio と $V_b \times I_i$ の Ratio を比較すると, Thrust の Ratio のほうが大きい. 式 (4.1) より本研究で評価したパラメータ以外に電子源の違いにより変化するパラメータは 2 価イオン比率のみである. つまり, H/C に比べ RF/C 27.12 MHz を使用した場合, ホールスラストからの噴出イオンビーム中の 2 価イオン比率が小さいと推測される.

以上より, 電子源の違いにより推力が異なる要因はイオン電流, 平均イオンビーム電圧, 2 価イオン比率となった. H/C に比べ RF/C 27.12 MHz を使用した場合, イオン電流, 平均イオンビーム電圧が増加し, 2 価イオン比率が減少することで推力が大きくなったと考えられる. 発散角は作動条件により H/C の方が小さくなった.

表 4.7 推力とプラズマ診断の結果のまとめ

		$V_d=200$ V		$V_d=300$ V	
		$B=10.8$ mT	$B=16.2$ mT	$B=10.8$ mT	$B=16.2$ mT
Thrust, T , mN	H/C	13.2	11.0	17.8	15.8
	RF/C 27.12 MHz	15.2	13.0	20.0	17.4
	Ratio	1.155	1.179	1.126	1.100
Ave. ion beam voltage, V_b , V	H/C	177.1	174.6	272.8	269.3
	RF/C 27.12 MHz	193.3	179.3	284.3	276.9
	Ratio	1.091	1.027	1.042	1.028
	$\sqrt{\text{Ratio}}$	1.045	1.013	1.021	1.014
Ion current, I_i , μA	H/C	177.6	86.8	206.2	124.7
	RF/C 27.12 MHz	194.1	107.1	219.3	142.3
	Ratio	1.093	1.234	1.064	1.141
$V_b \times I_i$	Ratio	1.142	1.250	1.086	1.157
Divergence angle	H/C	同	小	同	小
	RF/C 27.12 MHz	同	大	同	大

第5章 結論

5.1 結論

本研究では TAL 型ホールスラスタ (TMU-066) と電子源を組み合わせた作動実験を行い、ホールスラスタ性能評価と電子源の違いによる影響を評価した。用いた電子源は Inner Coil RF/C 27.12 MHz, Inner Coil RF/C 13.56 MHz, H/C の3つである。その結果、以下の結論が得られた。

1. 電子源により TMU-066 の作動範囲が異なるという実験結果が得られた。作動範囲の広さは RF/C 27.12 MHz が最大であり、次に RF/C 13.56 MHz, H/C の順となった。
2. TMU-066 の半径方向の磁場 B を変化させたときの放電電流 I_d , 推力 T , 放電電流振動評価指標 Δ , アノード効率 η_a の変化の傾向は電子源の種類に依らず同じであった。また, I_d の大きさは, 電子源に依らず同じであった。 Δ の大きさは, $B < 12.9$ mT において H/C が RF/C に比べ小さくなったが, どの電子源においても $\Delta < 0.05$ であった。これはホールスラスタの作動において優位な差ではなく, T の大きさは, RF/C 27.12 MHz が最大であり, 次に RF/C 13.56 MHz, H/C の順となった。 η_a は, 推力の違いにより, RF/C 27.12 MHz が最大であり, 次に RF/C 13.56 MHz, H/C の順となった。
3. TMU-066 の放電電圧 V_d を変化させたときの放電電流 I_d , 推力 T は電子源に依らず放電電圧に比例してほぼ線形に増加した。 Δ は放電電圧の影響が確認されなかった。アノード効率 η_a は 300~400V の間に最大値が存在し, アノード流量 2.0 mg/s において最適な放電電圧は 300~400 V に存在することが分かった。
4. TMU-066 の噴出イオンビームのプラズマ診断を行い, 電子源 (H/C, RF/C 27.12 MHz) により推力が異なる要因を考察した。その結果, H/C に比べ RF/C 27.12 MHz では平均イオンビーム電圧 $\overline{V_b}$, イオン電流 I_i が大きく, 2 価イオン比率 γ が小さいと分かった。これらの違いにより推力が異なると考えられる。

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, pp.20-21, pp141-155, 2003
- 2) Casaregola, C. : Electric Propulsion for Station Keeping and Electric Orbit Raising on Eutelsat Platforms, IEPC-2015-96/ ISTS-2015-b-96, Joint Conference of 30th International Symposium on Space Technology and Science, 34th International Electric Propulsion Conference and 6th Nano-satellite Symposium, Hyogo-Kobe, Japan, July, 2015.
- 3) 鳩岡恭志, 佐野伊彦, 工藤伸夫, 久本泰慶, 戸田謙一: 次期技術試験衛星によるオール電化衛星の開発, 第60回宇宙科学技術連合講演会, 函館, JSASS-2016-4131, 2016
- 4) 杵淵紀世志, “全電化衛星の世界動向”, 日本航空宇宙学会誌, **65**, 9(2017)
- 5) 坂本将隆, 鷹尾祥典, 江利口浩二, 斧高一 “超小型高周波イオン推進機の回路シミュレーションと実機特性評価”, 平成24年度宇宙輸送シンポジウム, STEP-2012-061, 2013
- 6) Dan M. Goebel, Ira Katz, “Fundamentals of Electric Propulsion: Ion and Hall Thrusters”, pp.325-328, 2008
- 7) E. Y. Choueiri, “Fundamental difference between the two Hall Thruster Variants,” Phys. Plasmas, 8, 11, 2001.
- 8) Dan M. Goebel, Kristina K. Jameson and Richard R. Hofer, “Hall Thruster Cathode Flow Impact on Coupling Voltage and Cathode Life”, Journal of Propulsion and Power, Vol. 28, No. 2, pp. 355-363, 2012
- 9) Kunning G. Xu and Mitchell L. R. Walker, “Effect of External Cathode Azimuthal Position on Hall-Effect Thruster Plume and Diagnostics”, Journal of Propulsion and Power, Vol. 30, No. 2, pp. 506-513, 2014
- 10) 鈴木茂夫, “わかりやすい高周波技術入門”, 日刊工業新聞社, pp.95-101, 2010
- 11) 松山淳子, “イオンエンジン用ホローカソードの放電モードとプラズマ特性評価”, 平成16年度東京都立科学技術大学大学院 修士論文, pp38, 2005
- 12) I. H. Hutchinson, “Principles of Plasma Diagnostics 2nd Edition”, Cambridge University Press, pp.94-99, 2005
- 13) 鳥井夏実, “RFカソードの大電流作動特性とホールスラスタへの適用研究”, 平成25年度首都大学東京大学院 修士論文, pp.47-51, 2014
- 14) Taidhiro Tamida, Takafumi Nakagawa, Ikuro Suga, Hiroyuki Osuga, Toshiyuki Ozaki and Katsuaki Matsui, “Determining parameter sets for low-frequency-oscillation-free operation of Hall thruster”, Journal of applied physics **102**, 043304, 2007

