

高周波プラズマ電子源における電子放出性能の周波数依存特性

Frequency Dependent Characteristics on Radio Frequency Plasma Cathode for Hall Thruster

○出口 公統・市村 正範・三浦 唯貴・橋本 龍生・渡邊 裕樹・竹ヶ原 春貴（首都大学東京）

○Takanori Deguchi・Masanori Ichimura・Yuki Miura・Ryusei Hashimoto・Hiroki Watanabe・Haruki Takegahara
(Tokyo Metropolitan University)

Abstract（概要）

Recently, Hall thrusters are expected for reduction of propellant weight and orbit transition period. For Hall thrusters, it is necessary that electron source is used for ionization of propellant and neutralization of ion beam. To solve the issue caused by thermionic emitter of dispenser hollow cathodes, radio frequency (RF) plasma cathodes have been researched and developed. Absorption power depends on discharge frequency. Therefore, the electron emission characteristics of RF plasma cathode was evaluated by changing discharge frequency. In the case of xenon mass flow rate of 0.2 mg/s and RF power of 300 W, anode current of 1.8 A and 2.5 A were obtained at discharge frequency of 13.56 MHz and 27.12 MHz as well as anode voltage of 111 V and 50.8 V, respectively. As a result, the electron production cost was improved from 267 W/A at discharge frequency of 13.56 MHz to 159 W/A at discharge frequency of 27.12 MHz. Thus, discharge frequency had an influence on the electron emission performance. However, it is important to reduce the power consumption for application of RF plasma cathodes to Hall thrusters.

記号の説明

C_e :	電子生成コスト
I_a :	アノード電流
I_c :	コレクタ電流
I_k :	キープ電流
I_{sa} :	飽和アノード電流, 電子電流
m_c :	カソード流量
m_{Aeq} :	カソード流量のキセノンを用いた電流換算値
P :	真空度
P_i :	進行波電力
P_r :	反射波電力
P_{RF} :	高周波電力
U_e :	ガス利用効率
V_a :	アノード電圧
V_k :	キープ電圧
V_{sa} :	飽和アノード電圧, 接触電圧

1. 予熱ヒータの高低温度サイクルによる断線.
2. 高エネルギーのイオンがキープ電極に衝突することによるキープ電極およびオリフィスの損耗.
3. 大気や推進剤に含有される不純物による酸化物陰極の劣化, 電子放出性能の低下.
4. 含浸された活性剤の枯渇による寿命制限.

最近では, 酸化物陰極の代替として化合物陰極を用いることで, 熱電子放出源の損耗抑制や長寿命化などの多くの研究結果が報告されている⁶⁾.

一方で, これらの課題を解決するため, 熱電子放出源に依存しない高周波放電やマイクロ波放電を用いた電子源が研究されている. 特に, 熱や磁場による制約がないため, 構造が簡素である高周波プラズマ電子源 (Radio Frequency Plasma Cathode : RF/C) に着目した. RF/C は高密度のプラズマが得られるが, H/C と比較して消費電力が大きく, 抽出される電子電流が小さいため, 電子生成コストが高い.

高い電子生成コストを改善するため, 本研究では高周波放電プラズマの電力吸収に着目した^{7)~10)}. 高周波放電プラズマの電力吸収は, 次の式により書き表される.

$$P_{abs} = \frac{\omega}{2\pi} \int_0^{\frac{2\pi}{\omega}} \frac{d}{dt} \sum_{j=1}^n \frac{1}{2} m_e v_{e,j}^2 dt \quad (1)$$

ここで, ω は角周波数, m_e は電子の質量, v_e は電子の速度である. 放電周波数は, 実際に放電周波数の項が表れている箇所だけでなく, 電子 1 個の運動エネルギーを表す項にも影響を及ぼし, 容量結合と誘導結合の寄与割合も複雑化する. 鷹尾らにより, 数 100 MHz 帯域では容量結合が顕著に

1. 研究背景と目的

近年, 推進剤重量の削減と軌道遷移期間の短縮を両立するため, ホールスラスタが期待されている. ホールスラスタの作動には, 推進剤の電離・イオンビームの中和のため, 電子源が必要とされる. その電子源として, 主にホローカソード (Hollow Cathode : H/C) が用いられている. H/C は小流量および小電力において大電子電流が得られ, 実機における数多くの実績を挙げている^{1)~5)}. しかし, 内部に置かれた熱電子放出源に起因する次のような課題を抱えている.

影響し、損失の増大を招くことが報告されている^{11)~13)}。そのため、本研究では、数 10 MHz 帯域の放電周波数である ISM バンドの周波数を用いた。

本研究では、高周波放電プラズマの電力吸収に着目し、放電周波数が電子放出特性や電子放出性能に与える影響を評価することを目的とした。

2. 実験装置

本研究に用いた RF/C の概略を図 1 に示す。RF/C は、プラズマを維持するための円筒放電室、高周波電力の供給によって、プラズマを生成・維持するためのインダクションコイル、電子を抽出するための 2 mm のオリフィスをも有するオリフィス板、イオン衝撃によるスパッタリング損耗を抑制し、インダクションコイルの長寿命化を図るため、接地電位から浮遊電位にするブロッキングキャパシタから構成されている。インダクションコイル、オリフィス板は、タングステン製であり、放電室は、モリブデン製である。また、インピーダンス整合を行うための整合回路が RF/C の上流端面に接続されており、真空槽内の整合回路を外部から制御している。さらにアノード電流およびコレクタ電流の高調波成分を抑制するため、LC フィルタを用いた。

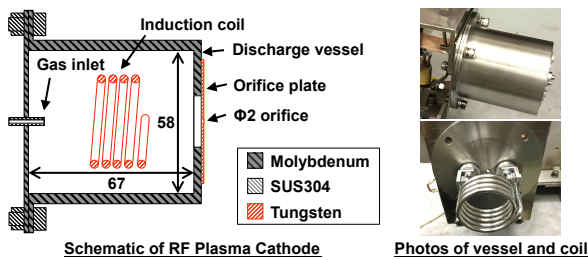


図 1 本研究で用いた RF/C の概略。

直径 1.6 m、長さ 3.2 m の円筒状の真空槽内で実験を行った。2 台のクライオポンプを用い、不純物の少ない高真空環境を維持しており、図 2 に流量と真空度の関係を示す。到達真空度は 1.333×10^{-5} Pa 以上であり、実験に用いた作動ガスのそれぞれの流量における真空度を計測した結果も併せて示している。このとき、十分な真空環境下で実験を行った。

図 3 に示すように、真空槽内に RF/C を設置し、50 mm 離れた位置にイオンビームを疑似したターゲットとなるアノード電極を置いた。流量調整器、ガス絶縁器を介して、作動ガスが供給され、その後、高周波電源からそれぞれの放電周波数に対応する整合器を通して、RF/C へと高周波電力が投入されることで、内部に高周波放電プラズマが生成される。アノード電源を昇降圧することで、RF/C とアノード電極間にプラズマの橋が形成され、それを電子が渡る。ガス種：キセノン、流量 0.1 mg/s から 0.4 mg/s、放電周波数 13.56 MHz および 27.12 MHz、高周波電力 20 W から 300 W、アノード電圧 0 V から 300 V まで増減させ、電子放出特性を取得した。

また、高周波電源は、放電周波数 13.56 MHz と 27.12 MHz

に対応する電源を用いており、それぞれに対応する整合回路を製作し、用いることで、インピーダンス整合を行っている。

さらに、低域通過フィルタは 13.56 MHz にて 3 次、27.12 MHz にて 5 次の LC フィルタを用いて、アノード電源への高調波成分の侵入を抑制し、直流成分のみを計測した。

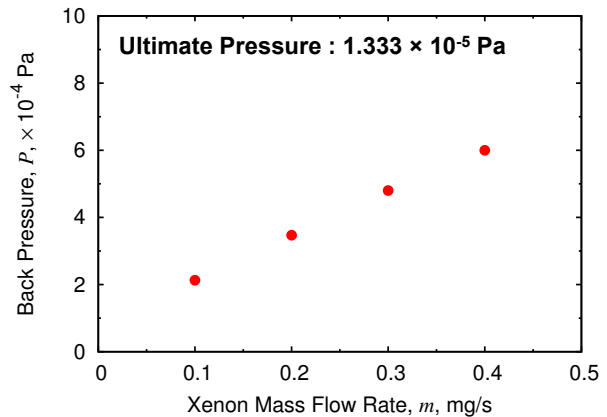


図 2 流量と真空度の関係。

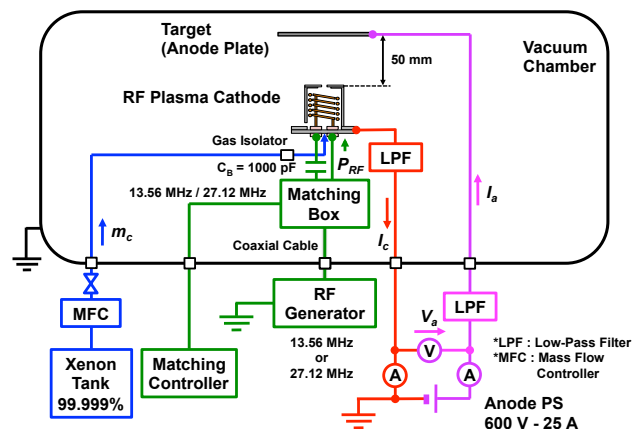


図 3 実験構成。

3. 実験結果と考察

3.1 電子放出特性 図 4 に流量 0.3 mg/s、高周波電力 60 W の電圧電流特性を示す。流量、高周波電力を変化させても、図 4 に示すような電圧電流特性が得られる。加えて、放電周波数の変化により、得られる電圧電流特性の傾向が大きく変化することはない。

図 4 に示すように、電子を引き出し始める初期、すなわちアノード電極に印加するアノード電圧が低い領域では、アノード電流が小さく、RF/C からの有効な電子の放出が行われない。その後、アノード電圧の昇圧に伴い、アノード電流が流れ始め、アノード電流が急激に増加する。アノード電流が急激に増加する領域を過ぎると、一定のアノード電圧をそれ以上に昇圧してもアノード電流は増加しなくなり、アノード電流が飽和する。加えて、降圧しても同様の

電圧電流特性が得られ、アノード電圧の昇降圧によって、電圧電流特性が変化せず、ヒステリシス性が存在しない。作動ガスの流量や消費電力が制限される実機では、電子源が一定の流量、消費電力で大きな電子電流を得ることが望ましい。そのため、図 4 に示すように、飽和した際のアノード電流を飽和アノード電流 I_{sa} 、そのときのアノード電圧を飽和アノード電圧 V_{sa} と定義し、RF/C の電子放出特性を評価する。

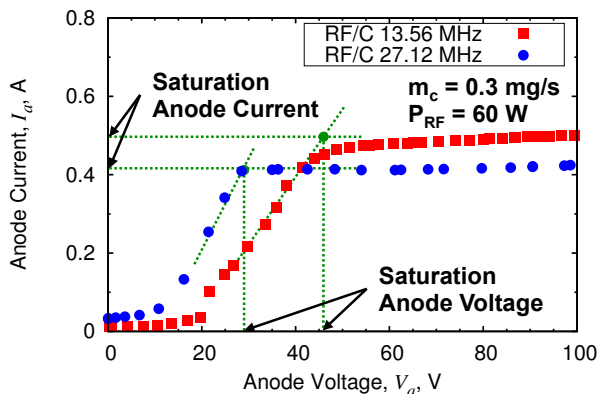


図 4 流量 0.3 mg/s, 高周波電力 60 W での電圧電流特性。

次に、図 5 にアノード電圧に対するアノード電流とコレクタ電流の比を示す。アノード電流がアノード電極に捕集される電子電流であるのに対して、コレクタ電流はイオン捕集電極に捕集されるイオン電流を示す。アノード電極を昇降圧したアノード電圧は、0 V から 300 V までであり、図 5 は作動に用いたアノード電圧の全範囲における比を示している。その結果、アノード電流とコレクタ電流が等しく、流量、高周波電力、加えて放電周波数に依存せず、電気推進機として機能しており、系全体で電気的中性が保たれていることを確認した。

また、電源の出力インピーダンスに対して、整合回路により、インピーダンス整合を行うことで、高周波電力が投

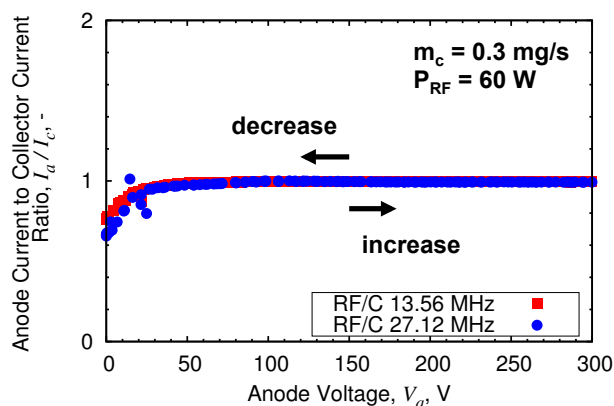


図 5 アノード電流とコレクタ電流の比 @ 0.3 mg/s, 60 W.

入され、次式から算出される。

$$P_{RF} = P_i - P_r \quad (2)$$

ここで、 P_{RF} は RF/C に供給される正味の高周波電力、 P_i は進行波電力、 P_r は反射波電力である。高周波電力は進行波電力と反射波電力に分割して測定され、図 4、図 5 および作動の全範囲において、その差である正味の高周波電力が投入されている。

3.2 放電周波数が飽和アノード電流に与える影響

図 6 および図 7 に放電周波数 13.56 MHz と 27.12 MHz を用いた際の流量、高周波電力が飽和アノード電流に与える影響を示す。

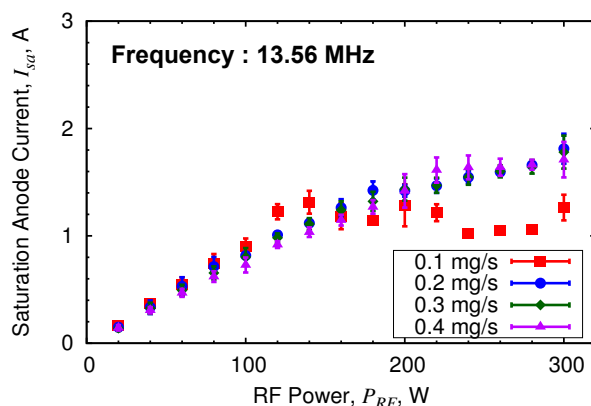


図 6 流量、高周波電力と飽和アノード電流 @ 13.56 MHz.

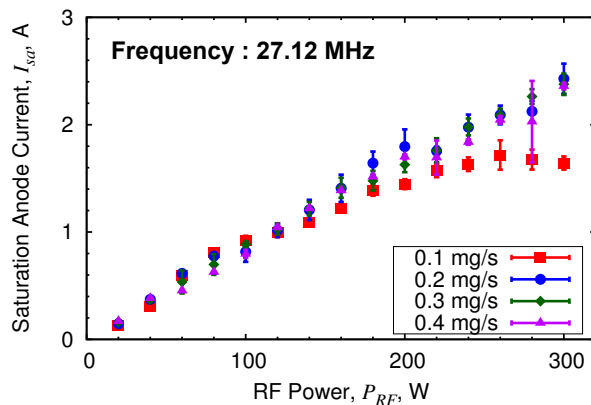


図 7 流量、高周波電力と飽和アノード電流 @ 27.12 MHz.

抽出される電子電流である飽和アノード電流は、高周波電力の増加に伴って、増加することが明らかになった。すなわち、流量に依存する影響は小さく、高周波電力に依存する影響が大きい。加えて、放電周波数における傾向を比較すると、互いに高周波電力の増加に伴い、飽和アノード電流が増加するため、高周波電力に影響される同様な電子放出特性の傾向を示した。

また、互いに流量 0.1 mg/s では、他の流量に比べて、飽和アノード電流が不足し、それを除いた流量 0.2 mg/s 以上においては、飽和アノード電流に差異が生じず、流量によって、電子放出特性が影響されない同様の傾向が示された。

よって、放電周波数によって、飽和アノード電流が影響される電子放出特性が大きな変化を生じることはない。

次に、図 6 と図 7 を比較すると、高周波電力 140 W を境に、電子放出特性に変化が生じた。高周波電力 140 W 未満では、飽和アノード電流は等しい。しかし、それ以上の高周波電力において、放電周波数 13.56 MHz では、高周波電力の増加に伴い、飽和アノード電流が一定の高周波電力まで線形に増加し、その後、多少湾曲して、飽和する傾向にある。それに対して、放電周波数 27.12 MHz では、全く湾曲せずに、線形に増加する傾向がみられた。

そのため、抽出することができる飽和アノード電流に差異が生まれた。高周波電力に大きく依存するため、高周波電力 300 W の場合を比較した。流量 0.2 mg/s、高周波電力 300 W において、放電周波数 13.56 MHz の際の飽和アノード電流は 1.8 A、放電周波数 27.12 MHz の際の飽和アノード電流は 2.5 A が得られた。そのため、後者が大きな飽和アノード電流を抽出でき、1.4 倍に増加することが明らかになった。

3.3 放電周波数が飽和アノード電圧に与える影響

図 8 および図 9 に放電周波数 13.56 MHz と 27.12 MHz を用いた際の流量、高周波電力が飽和アノード電圧に与える影響を示す。

電子電流を抽出する際のイオンビームとの接触電圧である飽和アノード電圧は、放電周波数によって、互いに示す特性に差異が生じず、同様の傾向が得られた。

まず、流量の増加に伴い、飽和アノード電圧が減少し、高周波電力の増加に伴い、飽和アノード電圧が増加した。H/C では、流量の増加によって接触電圧が減少することが知られており、電子源として同様の電子放出特性を示すことが明らかになった¹⁴⁾。

また、流量 0.2 mg/s、高周波電力 300 W において、放電周波数 13.56 MHz、飽和アノード電流 1.8 A の際の飽和アノード電圧は 111 V、放電周波数 27.12 MHz、飽和アノード電流 2.5 A の際の飽和アノード電圧は 50.8 V となり、後者が低い飽和アノード電圧を用いて、大きな飽和アノード電流を抽出できるため、電子放出特性の優位性が示された。

さらに、1 kW 級ホールスラスタに 1.5 A の電子を供給することを検討した場合、放電周波数 13.56 MHz での飽和アノード電圧は 112 V、放電周波数 27.12 MHz での飽和アノード電圧は 44.9 V となり、後者を用いると、ホールスラスタから噴出されるイオンビームと電子源との間隙に生じる接触電圧を大幅に削減することができる。放電周波数 13.56 MHz において、放電周波数 27.12 MHz と同様の飽和アノード電圧の削減を実現するには、流量を 0.2 mg/s から 0.4 mg/s に増加させる必要があり、ガス利用効率の低下を招くことになる。

ゆえに、放電周波数 27.12 MHz は、放電周波数 13.56 MHz と比較して、飽和アノード電圧を削減できる利点が存在すると考えられる。

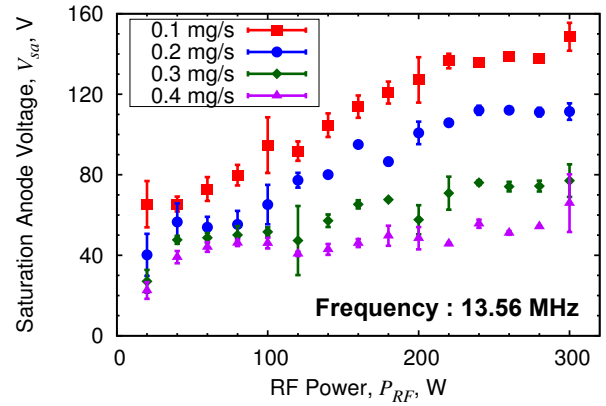


図 8 流量、高周波電力と飽和アノード電圧 @ 13.56 MHz.

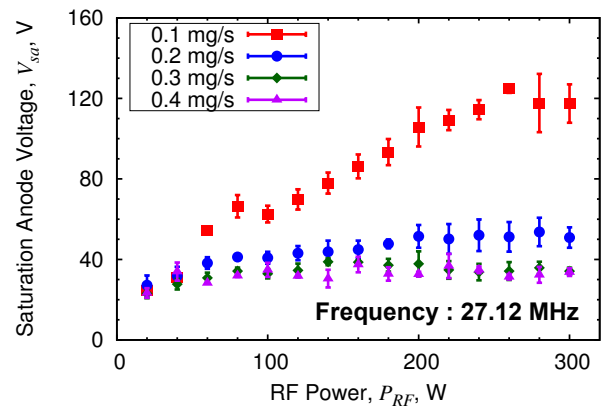


図 9 流量、高周波電力と飽和アノード電圧 @ 27.12 MHz.

3.4 放電周波数による電子生成コストの内訳

図 10 および図 11 に放電周波数 13.56 MHz と 27.12 MHz を用いた際の高周波電力と電子生成コストの内訳の関係を示す。流量 0.2 mg/s を用いた際の内訳を抜き出した。

電子生成コストは、1 A の電子電流を得るのに必要な電子源の電力を表しており、RF/C の場合には、次の式で定義される。

$$C_e = \frac{I_a V_a + P_{RF}}{I_a} \quad (3)$$

ここで、 I_a は飽和アノード電流、 V_a は飽和アノード電圧、 P_{RF} は高周波電力である。このとき、電子生成コストの内訳から消費電力の割合を算出するため、次のように分割する。

$$C_e = \frac{I_a V_a}{I_a} + \frac{P_{RF}}{I_a} \quad (4)$$

このときの第 1 項を電子引出しに要する電力、第 2 項をプ

ラズマ生成に要する電力と定義し、図 10、図 11 に示した。

まず、プラズマ生成に要する電力に着目し、図 10 と図 11 を比較した。放電周波数 13.56 MHz においては、高周波電力の増加に伴い、飽和アノード電流が飽和する傾向にあるため、電子生成コストが増加するのに対して、放電周波数 27.12 MHz においては、高周波電力の増加に従い、飽和アノード電流が線形に増加するため、平坦であるような傾向が僅かに示された。しかし、放電周波数によって、互いにプラズマ生成に要する電力が 150 W/A 付近に留まっており、プラズマ生成に消費される電力は、放電周波数によって、それほど変化しないものと考えられる。

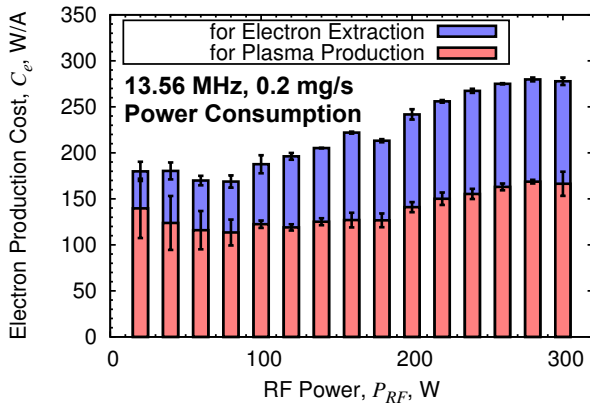


図 10 電子生成コストの内訳 @ 0.2 mg/s, 13.56 MHz.

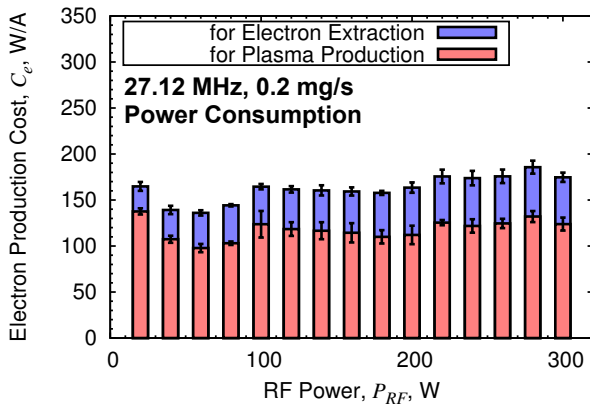


図 11 電子生成コストの内訳 @ 0.2 mg/s, 27.12 MHz.

次に、電子引出しに要する電力に着目した。流量、高周波電力の増減に伴い、放電周波数 13.56 MHz および 27.12 MHz は、電子引出しに要する電力が変化することで、電子生成コストに影響を与えていることが示された。すなわち、プラズマ生成に要する電力の変化よりも電子引出しに要する電力の変化に依存する傾向が明らかになった。これは、放電周波数 13.56 MHz と 27.12 MHz を比較した場合の飽和アノード電圧での電子放出特性に由来しているものと考えられる。

よって、電子生成コストでは、電子引出しに要する電力が支配的となっており、放電周波数 13.56 MHz に対して、放電周波数 27.12 MHz を用いた際の電子生成コストが減少する傾向が明らかになることで、消費電力を削減できることが示された。

放電周波数 27.12 MHz は、放電周波数 13.56 MHz に対して、電子を引き出すのに、低い飽和アノード電圧で済むことに由来して、電子引出しに要する電力を低く済ませることができる。これは、中和のための電力の削減となり、ホールスラストのシステムの電力効率の向上に貢献する。加えて、放電周波数 13.56 MHz では、27.12 MHz に比べて、大きな接触電圧が必要なので、電子源が接触電圧に対応するイオン衝撃を受け、スパッタリング損耗を起こしやすいものと考えられる。そのため、耐久性の観点からも放電周波数 27.12 MHz を用いることで、スパッタリング損耗を低減し、長寿命化が図れるものと考えている。

ゆえに、飽和アノード電圧に起因した電子引出しに要する電力が電子生成コストにおいて、支配的となることが明らかになった。そのため、放電周波数 13.56 MHz に対して、放電周波数 27.12 MHz を用いた際の電子生成コストが削減されることが示された。

3.5 放電周波数が電子放出性能に与える影響

図 12 および図 13 に放電周波数 13.56 MHz と 27.12 MHz を用いた際の流量、高周波電力がガス利用効率に与える影響を示す。

ガス利用効率は、電子源に投入された作動ガスが電離と再結合を繰り返すことで、放出される電子電流に作動ガスが寄与する割合を表しており、次の式で定義される。

$$U_e = \frac{I_a}{\dot{m}_{Aeq}} \quad (5)$$

ここで、 I_a は飽和アノード電流、 \dot{m}_{Aeq} はキセノンが 1 価のイオンに電離したと仮定して電流換算した値であり、 $1 \text{ SCCM} = 0.0977 \text{ mg/s} = 0.0718 \text{ A-eq}$ である。

放電周波数において、互いに比較すると、高周波電力 140 W を境に飽和アノード電流に優位性のある放電周波数 27.12 MHz のガス利用効率が高い傾向にある。

それぞれの放電周波数に着目すると、0.1 mg/s を除いて、飽和アノード電流が変化しない。そのため、流量の増加に伴い、ガス利用効率の低下が示される。

また、高周波電力の増減に飽和アノード電流が大きく依存するため、高周波電力の増加に伴い、ガス利用効率は向上する。

ゆえに、放電周波数が飽和アノード電流に影響を及ぼし、その飽和アノード電流に依存して、ガス利用効率が変化することが明らかになった。

図 14 および図 15 に放電周波数 13.56 MHz および 27.12 MHz を用いた際の流量、高周波電力が電子生成コストに与える影響を示す。

図 10 と図 11 に電子生成コストの内訳を示したが、放電周波数 13.56 MHz と 27.12 MHz において、互いに電子生成

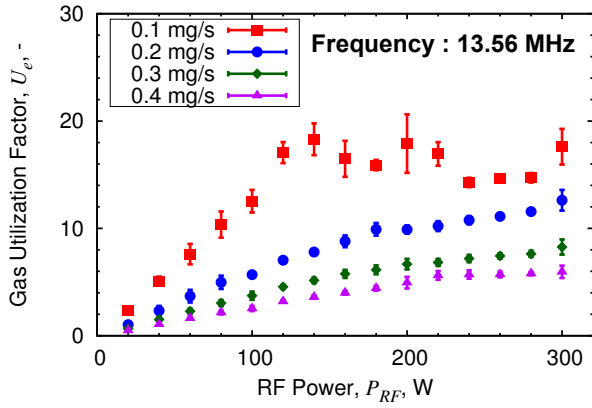


図 12 流量，高周波電力とガス利用効率 @ 13.56 MHz.

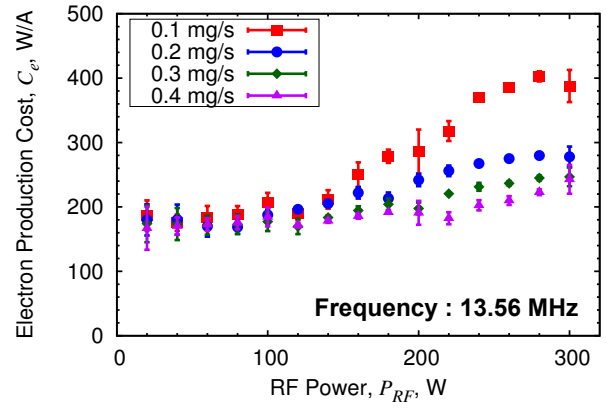


図 14 流量，高周波電力と電子生成コスト @ 13.56 MHz.

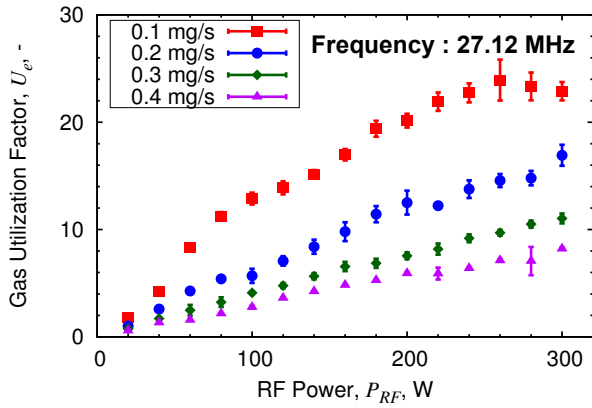


図 13 流量，高周波電力とガス利用効率 @ 27.12 MHz.

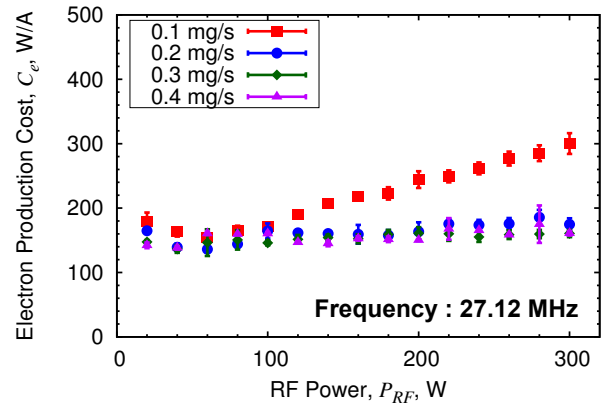


図 15 流量，高周波電力と電子生成コスト @ 27.12 MHz.

コストに影響を及ぼす割合は，プラズマ生成に要する電力よりも電子引出しに要する電力が支配的であった．そのため，プラズマ生成に要する電力が流量，高周波電力，放電周波数に依存して，それほど変化しないのに対して，電子引出しに要する電力は大きく変化した．

電子引出しに要する電力は，飽和アノード電圧によって，決定付けられるため，その飽和アノード電圧の変化に依存した電子生成コストの傾向が示されることが明らかになった．そのため，放電周波数によって，互いに流量の増加に伴い，電子生成コストが減少し，高周波電力の増加に伴い，電子生成コストが増加する傾向が示されるものと考えられる．

図 16 に放電周波数 13.56 MHz および 27.12 MHz を用いた際の RF/C と酸化物陰極を用いた際の H/C の電子放出性能を示す¹⁵⁾．H/C の電子生成コストは次の式により，定義される．

$$C_e = \frac{I_a V_a + I_k V_k}{I_a} \quad (6)$$

ここで， I_k はキープ電流， V_k はキープ電圧である．

まず，放電周波数による RF/C の電子放出性能のみに着目

して，比較する．1 kW 級ホールスラストに 1.5 A の電子を供給することを仮定した際，放電周波数 13.56 MHz と 27.12 MHz において，互いに流量 0.2 mg/s を用いて，電子放出性能の比較を行った．このとき，ガス利用効率は，10 前後となるので等しく，電子生成コストを比較することとなる．図 16 のガス利用効率 10 付近において，電子生成コストは，放電周波数 13.56 MHz を用いた際の 267.3 W/A から放電周波数 27.12 MHz を用いた際の 158.6 W/A となることが示され，放電周波数によって，電子生成コストが大幅に削減できることを明らかにした．

また，図 16 には，過去の研究で用いられた熱電子放出源が酸化物陰極 (BaO-W) である H/C の電子放出性能を示しており，RF/C の電子放出性能と比較した¹⁵⁾．ガス利用効率では，RF/C が酸化物陰極を用いた H/C に比肩する電子放出性能を達成した．しかし，電子生成コストでは，RF/C が酸化物陰極を用いた H/C と比較して，6 倍から 10 倍の電子生成コストを示しており，消費電力が大きいことが明らかになった．

特に H/C は，内部に生成されたプラズマ中を流れる電子電流によるジュール加熱と酸化物陰極への電子衝撃やイオン衝撃による加熱を活用することで，熱電子放出源から熱

電子を放出するのに必要な高温環境を維持することができる。そのため、電子の放出を行うのに、キープ電力の他にヒータ電力やそれ以外の余剰電力を供給する必要がない。H/C から放出される電子電流は、70 %が熱電子放出源から放出される電子、30 %が内部に生成されたプラズマから抽出される電子が寄与すると報告されており、多くを自己発熱のみで維持できるため、高い電子放出性能を達成している²⁾。

それに対して、高周波放電やマイクロ波放電を用いる場合、中性粒子を電離させ、プラズマを生成するのに電力を奪われるため、自己発熱のみで温度を維持できる H/C の電子放出性能と比べ、電子生成コストの面で上回ることは難しい。

しかし、H/C の電子生成コスト 25 W/A に対して、過去の研究においては、高周波放電を用いた電子源が電子生成コストを 80 W/A に削減していることが報告されている。よって、さらなる電子生成コストの削減により、消費電力を改善することが必要かつ可能である¹⁶⁾。

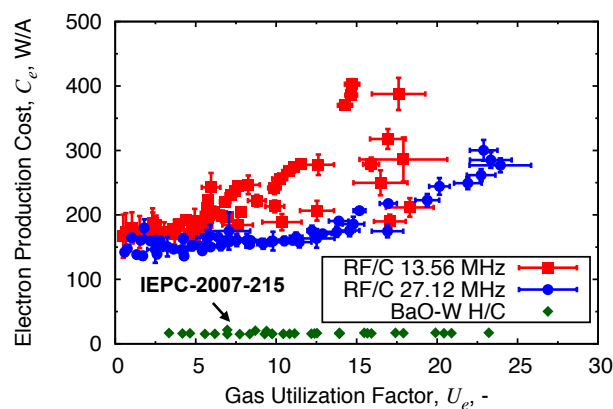


図 16 放電周波数による RF/C と H/C の電子放出性能¹⁵⁾。

4. まとめ

本研究では、熱電子放出源に依存しない RF/C の電子放出性能を改善するため、放電周波数による高周波放電プラズマの電力吸収に着目し、以下の結論を得た。

1. 流量 0.2 mg/s、高周波電力 300 W において、放電周波数 13.56 MHz を用いた際の飽和アノード電流 1.8 A、飽和アノード電圧 111 V が得られた。また、同様の流量、高周波電力において、放電周波数 27.12 MHz を用いた際の飽和アノード電流 2.5 A、飽和アノード電圧 50.8 V が得られた。それゆえ、放電周波数に依存した電子放出特性が示された。
2. 1 kW 級ホールスラスタに 1.5 A の電子を供給する場合、放電周波数 13.56 MHz を用いた際の飽和アノード電圧は 112 V、放電周波数 27.12 MHz を用いた際の飽和アノード電圧は 44.9 V となり、中和電力の削減や耐久性の向上が図れる。放電周波数 13.56 MHz において、同様の飽和アノード電圧に低減させるには、

流量を 0.4 mg/s に増加させる必要があり、ガス利用効率の劣化を招くことが明らかになった。

3. 1 kW 級ホールスラスタに 1.5 A の電子を供給する場合、電子生成コストが放電周波数 13.56 MHz を用いた際の 267.3 W/A から放電周波数 27.12 MHz を用いた際の 158.6 W/A に改善がみられ、H/C の電子生成コストに近づくことが示された。

以上により、課題であった高い電子生成コストを改善し、電子放出性能の向上を図ることができることを示した。

参考文献

- 1) 栗木恭一，荒川義博，“電気推進ロケット入門”，東京大学出版社，pp. 113 - 114, pp. 141 - 155, 2003.
- 2) 荒川義博，國中均，中山宜典，西山和孝，“イオンエンジンによる動力航行”，コロナ社，pp. 8 - 9, pp. 80 - 98, 2006.
- 3) Dan M. Goebel and Ira Katz, “Fundamental of Electric Propulsion : Ion and Hall Thruster,” JPL Space Science and Technology Series, John Wiley and Sons, pp. 243 - 323, pp. 337 - 341, 2008.
- 4) Robert G. Jahn, “Physics of Electric Propulsion,” McGraw-Hill, pp. 165 - 173, 1968.
- 5) John R. Brophy, Robert Gershman, Nathan Strange, Damon Landau, Raymond G. Merrill, Thomas Kerslake, “300-kW Solar Electric Propulsion Systems Configuration for Human Exploration of Near-Earth Asteroids,” 47th AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference and Exhibit, AIAA-2011-5514, 2011.
- 6) 窪田健一，大塩裕哉，渡邊裕樹，張科寅，大川恭志，船木一幸，“ホローカソードのプラズマ解析に向けた Hybrid-PIC コードの開発”，平成 26 年度宇宙輸送シンポジウム，STEP-2014-063, 2015.
- 7) 八坂保能，“放電プラズマ工学”，森北出版，pp. 70 - 75, 138 - 148, 2007.
- 8) 菅井秀郎，“プラズマエレクトロニクス”，オーム社，pp. 106 - 120, 2000.
- 9) Michael A. Lieberman and Allan J. Lichtenberg, “Principles of Plasma Discharges and Materials Processing Second Edition,” John Wiley and Sons, pp. 387 - 534, 2005.
- 10) Francis F. Chen, “Introduction to Plasma Physics,” Plenum Press, pp. 45 - 134, 1974.
- 11) 鷹尾祥典，阪本将隆，江利口浩二，斧高一，“誘導結合型プラズマを用いた超小型イオン推進機における容量結合の影響”，平成 24 年度宇宙輸送シンポジウム，STEP-2012-062, 2013.
- 12) 窪田健一，渡邊裕樹，山本直嗣，中島秀紀，宮坂武志，船木一幸，“マイクロ波放電式電子源のイオンスケール解析”，平成 25 年度宇宙輸送シンポジウム，STEP-2013-009, 2014.
- 13) 渡邊裕樹，窪田健一，山本直嗣，中島秀紀，宮坂武志，船木一幸，“マイクロ波放電式電子源内の電子加熱解析”，平成 25 年度宇宙輸送シンポジウム，STEP-2013-014, 2014.
- 14) 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.
- 15) Shunsuke Sakai, Toshiyuki Katayama, Junichiro Aoyagi and Haruki Takegahara, “Discharge Modes and Characteristics of Hollow Cathode,” 30th International Electric Propulsion Conference, IEPC-2007-215, Florence, 2007.
- 16) 渡邊裕樹，“誘導結合プラズマ電子源のイオンスラスタへの適用研究”，平成 23 年度首都大学東京大学院博士学位論文，pp. 63 - 105, 2011.