# RF カソードの大電力作動特性

佐藤 潤, 鳥井 夏実, 笠上 聡志, 太田 知里 1), 青柳 潤一郎, 竹ヶ原 春貴 2)

1) 首都大学東京大学院, 2)首都大学東京

# 1. 研究背景

探査機の主推進や人工衛星の南北制御において, 静電加速型の電気推進機であるホールスラスタが用 いられている. 近年, 軌道間輸送や深宇宙・惑星に おける有人・無人探査機への適用を目的とした電気 推進機の大推力化が世界的に研究されており、その 際に主陰極・中和器として用いる 100 A 級電子源の 開発, および大電流化が課題となっている 1). 現在, 静電加速型電気推進機の電子源としては一般的にホ ローカソード (Hollow Cathode: H/C) が使用され ている. 図1として H/C の概略図を示す. H/C は内 部に熱電子放出のための多孔質タングステンなどで 製作されているインサートが挿入されており、酸化 バリウム等の活性剤が含浸されている. このインサ ートをヒーターで温めることで熱電子を放出・プラ ズマ生成を行うことで低ガス流量, 低電力で大電子 電流を得ることができる 2),3) しかし、活性剤の劣 化・摩耗に伴う寿命制限や酸化物陰極の活性ガスに よる劣化を防ぐために地上での厳重な管理を要求す るなどの問題点が挙げられる. 近年. H/C のような 欠点を持たない電子源としてマイクロ波放電 4)5)や ヘリコン波 6, 高周波放電を用いた電子源が注目さ れており、本研究では高周波放電によって生成され る誘導結合プラズマを用いた電子源(Radio Frequency Plasma Cathode: RF/C) を用いた. RF/C は無磁場で高密度のプラズマを得ることがで き,ホールスラスタの陰極への適用を実証している 7). しかし、H/C に比べ消費電力が高く、得られる電 子電流が低いのが現状である. そこで, RF/C の性能 向上を目的として Breadboard Model を製作し, 形 状変更試験を行うことで電子放出用のオリフィス形 状, イオンを捕集用の内部電極形状, 外部コイルの 巻き数の変更によるプラズマ点火性能と電子放出性 能の向上に対する設計指針を得た8)。また、その際 の最大飽和電子電流は 4 A を確認した 9. しかし, 4 A では前述した大型の電気推進機の電子源として用 いるには H/C と比べ電子電流が低い. H/C と RF/C の性能を表 1 として示す. それゆえ, 本実験におい て投入電力に対する線形的な電子電流の増加を確認 する必要がある.

# 2. 研究目的

本研究では、RF/C Engineering Model を使用し、その電子放出特性を取得した。その際、RF/C へ投入する電力を 0~400 W まで変更し、電力に対する電子電流の線形性を確認すること、および高周波電力の周波数を 8 MHz に変更した際、表皮効果によって径方向の加熱領域が拡大し、プラズマ密度が向上すると考えられるため、電子電流の変化を確認し、RF/C の電子放出性能の向上を目的とする.

## 3. 実験装置・方法

## 3.1 高周波を用いた電子源 (RF/C)

RF/Cの放電室を絶縁物であるアルミナ(99.9%)で製作した RF/C Outer Coil (RF/C OC) と放電室を導体である SUS304 で製作した RF/C Inner Coil (RF/C IC) の構造をそれぞれ図 3, 図 4 として示す.プラズマの生成・維持をする放電室はそれぞれ円筒形状で、その下流に電子放出用のオリフィスがある.RF/C OC には放出した電子と等量のイオンを捕集するための電極が挿入されており、RF/C IC では放電室内壁がその役割を持つ.RF/C OC の放電室外部には高周波導入のための銅製のコイルが巻いてあり、RF/C IC はコイルが放電室内に挿入されている.RF/C において、オリフィスは電子放出に最適な直径が 1.0~2.0 mm にあると考えられているためオリフィス直径は 1.7 mm とした.オリフィス長さは短いほど電子放出性能は向上するため 0.5 mm とした.

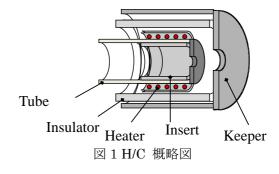


表 1 RF/C と H/C の性能

	RF/C	H/C
Anode Current	4	180
Xenon Mass Flow Rate, mg/s	0.2	1
RF Power, W	140	0
Anode Voltage, V	38	19
Electron Production Cost, W/A	73	19
Gas Utilization Factor, -	27	243

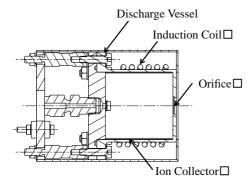


図 2 RF/C OC 断面図

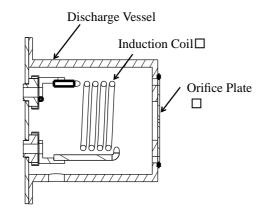


図 3 RF/C IC 断面図

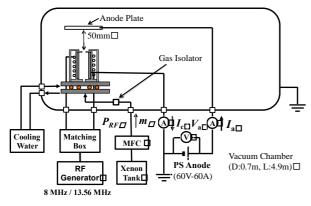


図4 実験装置概要 RF/C OC

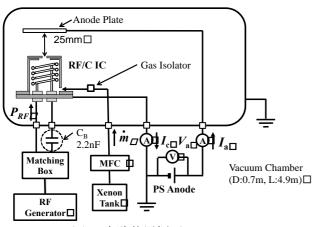


図 5 実験装置概要 RF/C IC

#### 3.2 実験装置概要

実験装置の概要を図 5, 図 6 に示す. なお実験は 宇宙科学研究所の磁化チプラズマャンバーを用いて, 2 種類の RF/C を用いて実験を行った. インピーダンスのマッチング回路は, 2 個の可変コンデンサに よって構成されている. すべての実験条件においてマッチングをとることで反射電力は 0 W となっており, 高周波電力と進行電力は等しくなっている.

RF/C IC の特徴として高周波経路の GND 側に阻止コンデンサ (Blocking Capacitor:  $C_B$ ) が挿入された状態で実験を行った. これは、コンデンサの挿入によってコイルとプラズマの静電結合を妨げてプラズマ電位を下げる役割を意図して用いている 100. また、コイルの両端にキャパシタが挿入されているためコイルは浮遊電位となっており、アノードとの結合によって正にバイアスする. そのため、イオンが正の電場によって反発することも考えられる.

実験において、直流安定化電源 (PS Anode) によってアノード電極に電圧を印加し、RF/C から電子を引き出している. レギュレーションモードをConstant Voltage(CV)にして動作させ、イオンコレクタは電流計を介してグランドに接続している.

# 3.3 電子放出実験手順

次に実験手順について示す。実験は電子放出特性の電力に対する線形性と周波数を変更の影響について調べた。RF/C OC を用いた実験ではガス流量を $\dot{m}=0.2$  mg/s,アノード印加電圧  $V_a=80$  V に固定し,RF/C への投入電力を Constant Wattage 操作することによって電子を放出させ,そのときのアノード電流  $I_a$ とイオンコレクタ電流  $I_c$ を記録した。このアノード電流は RF/C から放出された電子電流であり,イオンコレクタ電流はイオンコレクタによって収集されたイオンの電流値であり,アノード電流と同じ電流値となる。また,RF/C IC の実験ではス流量を $\dot{m}=0.8$  mg/s, $P_{RF}=300$  W で固定し,アノード印加電圧を CV で変化させた。そのときのアノード電流とアノード電圧を記録した。

# 4. 実験結果

まず、RF/C OC の電力に対する線形性について述べる. 典型的な RF/C の電流電圧特性を図 6 として示すように、RF/C はあるアノード電圧においてアノード電流は最大値を取り、以降は電圧に関わらず一定となる. この飽和点でのアノード電流を  $I_{sa}$ 、アノード電圧を飽和アノード電圧  $V_{sa}$  として述べる. 図 7 はガス流量  $\dot{m}=0.2$  mg/s の時に高周波電力  $P_{RF}=0\sim400$ W において変化させたものである. こ

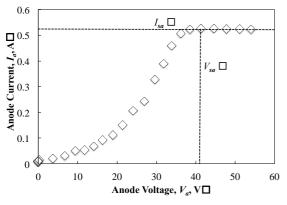


図 6 RF/C の電流電圧特性例

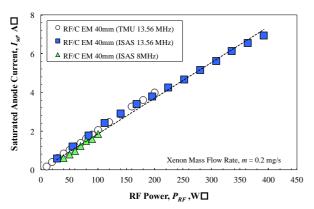


図 7 RF/C OC における高周波電力に対する 飽和アノード電圧



相助リング

放電室外観 放電室破損時內部 図 8 RF/C OC 放電室破損時写真

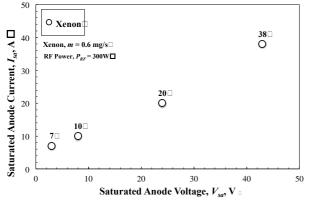
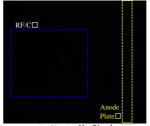
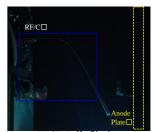


図 9 RF/C IC における飽和アノード電圧に対する 飽和アノード電流





LCM 作動時

HCM 作動時

図 10 LCM/HCM 作動時写真

の際, 周波数は8 MHz と 13.56 MHz で実験を行っ た. 図7において縦軸は飽和アノード電流 Isa、横軸 には高周波電力  $P_{RF}$ としている.図 7 に示す通り  $P_{RF}$ = 0~400W においてアノード電流の線形性を確認し た.  $P_{RF}$  = 400W の時の飽和アノード電流  $I_{sa}$ は 7 A を達成し、図7に示す首都大学東京で行った実験の 電流値の2倍程度の電流を取得することができた. 首都大学東京で行った実験のコンフィグレーション は真空装置を除いて本実験と同様のものである.ま た, 周波数 8 MHz においても電力に対する線形性 を確認することができた.しかし、本実験後,RF/C OC の放電室の破損を確認した. 破損後の放電室の 写真を図8として示す.この原因として放電室内部 に挿入されているイオンコレクタの加熱に伴う膨張 による破損が考えられる. イオンコレクタの加熱は イオンコレクタにイオンが衝突することによるもの と、プラズマ生成に用いた高周波の変動磁場による 誘導加熱であると考えられる.しかし、イオンコレ クタ本体はタングステン製でるため透磁率は低く, ほとんど誘導加熱されないが本実験においては,放 電室にイオンコレクタを固定する部分が破損したた めSUS304製の補助リングが放電室内部に設置され ていた. そのため、加熱されたのは SUS304 製の補 助リングであり、その熱でイオンコレクタ本体及び 補助リングが膨張し、破損に繋がったと考えられる. そこでコイルを放電室内部に挿入し、放電室が金属 製のRF/COCの製作し、実験を行った. RF/COCで の実験結果を図9に示す. 図9は $\dot{m}$  =0.6 mg/s,  $P_{RF}$ = 300W, 周波数 13.56 MHz として実験を行ったも のである. 縦軸を  $I_{sa}$ , 横軸を  $V_{sa}$  としている. 本実 験において最大アノード電流 20 A を達成した. 20 A 達成の際に RF/C OC とは異なる電子放出モード を確認した. 今回確認されたこのモードを大電流作 動モード (High Current Mode: HCM), 従来まで の RF/C の作動モードを低電流作動モード (Low Current Mode: LCM) と呼称する. HCM および LCM 時の RF/C の作動状態の写真を図 10 として示 す. 従来の RF/C は LCM であり, 放電室内部のプラ ズマからイオンを捕集し、電子を放出していた. 一

方, HCM 時は, 放電室外部で直流放電プラズマを生成し, そこからイオンを捕集することで LCM よりも大電子電流を得ていると考えられるが, 現状では作動原理は不明である.

#### 5. 結論

RF/C の大電力での電子電流の線形性の確認および周波数の影響の確認を目的とし, RF/C の大電力作動実験により電子放出性能を取得, 評価を行うことで以下の結論を得た.

- 1. RF/C OC 実験時, 高周波電力  $P_{RF}$ = 400 W に て飽和アノード電流  $I_{Sa}$ = 7 A を達成した.
- 2. 高周波電力  $P_{RF}$  = 0~400 W までの飽和電子電流の線形性を周波数 13.56 MHz において確認した.
- 3. RF/C IC 実験時, 高周波電力  $P_{RF}$  = 300 W において飽和アノード電流  $I_{Sa}$  = 20 A を達成した.

## 謝辞

本実験を行うに際して貴重なご助言やご指摘を頂いた ISAS 船木一幸先生と磁気チャンバーや電源などの装置をお借りしたスペースプラズマ共同研究設備にこの場を借りてお礼申し上げます.

#### 参考文献

- 山本直嗣,宮坂武志,トニーショーンヘル,横田茂,尾崎敏之,大須賀弘行,田原弘一,小紫公也,小泉宏之,船木一幸: In space propulsion としての大型ホールスラスタの検討,平成23年度宇宙輸送シンポジウム,STEP-2011-017,2012
- 2) Michele Colettil and Stephen B. Gabriel, Insert Temperature Measurements of a 180A Hollow Cathode for the HiPER Project, 48<sup>th</sup> AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference & Exhibit, AIAA-2012-4081, 2012
- 3) Dan M. Goebel and Emily Chu, High-Current Lanthanum Hexaboride Hollow Cathode for High-Power Hall Thruster, Journal of Propulsion and Power, Vol.30, No. 1, pp. 35-40, January-February 2014

- Hitoshi Kuninaka, Kazutaka Nishiyama, Ikko Funaki, Tetsuya Yamada, Yukio Shimizu, and Junichirou Kawaguchi, Powerd Flight of Electron Cyclotron Ion Resonance Engine on Hayabusa Explorer, Journal of Propulsion and Power, Vol. 23, No, 3, pp. 544-551, 2007
- 5) Brandon R. Weatherford and John E. Foster, Initial Performance of a ECR Waveguide Plasma Cathode with Permanent Magnet, 31st International Electric Propulsin Conference, IEPC-2009-211, 2009
- 6) B. Longmier, N. Hershkowitz: Improved operation of the nonambipolar electron source, Rev. Sci. Instrum., Vol. 79, 093506, 2008
- 7) Hiroki Watanabe, Takuya Nakabayashi, Satoshi Kasagami, Junichirou Aoyagi and Haruki Takegahara, Experimental investigation of Inductively Coupled Plasma Cathode for Application to Ion Thruster, 47th AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference & Exhibit, AIAA-2011-5989, 2011.
- 8) Satoshi Kasagami, Takuji Okuma, Naoji Yamamoto, Hiroki Watanabe, Hiroyuki Osuga, Junichirou Aoyagi and Haruki Takegahara: Feasibility Study on Hall Thruster with Inductively Coupled Plasma Cathode, Advances in Applied Plasma Science, No.8,pp27-30,2011
- 9) 鳥井夏実,渡邊裕樹,笠上聡志,太田知里,青柳潤一郎,竹ヶ原春貴:誘導結合プラズマを用いた電子源性能向上およびスケーリング則に関する研究,第56回宇宙科学技術連合講演会,2J03,2012
- 10) Dunksun Hanl, Hyo-Chang Leel, H J Kim, Chin-Wook Chung and Heesun Chae, "Effects of capacitor termination to an antenna coil on the plasma parameter in a radio frequency inductively coupled plasma," Plasma Sources Science and Technology, Vol. 22, 055011, 2013.