

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成 24 年 5 月 24 日現在

機関番号：22604

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2010～2011

課題番号：22760625

研究課題名（和文）高周波放電を利用した電子源の性能向上とイオン推進機適用に関する研究

研究課題名（英文）Improvement of Radio Frequency Plasma Cathode and its Application to Ion Thruster

研究代表者

青柳 潤一郎 (AOYAGI JUNICHIRO)

首都大学東京・システムデザイン研究科・助教

研究者番号：10453036

研究成果の概要（和文）：高周波放電プラズマを利用した電子源の性能向上指針を得るために、様々な条件で点火性能と電子放出能力を取得した。また電子源内部プラズマ物性をプローブ法により取得して、電子放出能力との関係性を評価した。その結果、プラズマの点火には放電室内圧とイオン捕集電極が形成する電界が影響することを明らかにした。また、電子放出能力が最大となる条件を明らかにした。これらの結果に基づき製作した高周波放電式電子源は、必要電力が半分となり、イオン推進機および中和器での適用有効性を向上させる成果を得た。

研究成果の概要（英文）：In order to improve performances of radio frequency plasma cathode, ignition capability and electron emission characteristics were investigated, parametrically. Moreover, plasma diagnostic in a cathode chamber was carried out. It was cleared that the pressure in the chamber and the electric field formed by an electrode for ion collection were dominant to the ignition. In addition, it was also revealed that there exists an optimum pressure for electron emission, where depends on saturation current of ion and/or electron. On the basis of the results, a new cathode was designed, constructed and demonstrated. As the result, electric power consumption was reduced by half for equivalent electron emission. This study will be valuable for practical application to the ion thruster or its neutralizer.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2010年度	2,000,000	600,000	2,600,000
2011年度	1,200,000	360,000	1,560,000
総計	3,200,000	960,000	4,160,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：総合工学・航空宇宙工学

キーワード：高周波放電プラズマ、電子源、中和器、点火特性、電子放出特性、イオン推進機

1. 研究開始当初の背景

静電加速型イオン推進機の性能は電子源プラズマからの電子放出能力に大きく影響する。プラズマ生成の方法は、大別して「直流放電式」、「高周波放電式」、「マイクロ波放電式」の3種類である。それぞれの方法で生成するプラズマを使った電子源の長所、短所は表1に示すとおり。

現在の主流は直流放電式の電子源を用いたイオン推進機であり、優れた推進性能を有するが、熱的、化学的に様々な制約があり、取扱が困難である。

高周波放電はプラズマの自己点火が困難で、中和器プラズマへの適用例はこれまで無かった。よって、高周波放電プラズマを使った中和器または電子源の電子放出特性に関

する研究も報告が非常に少ない。以上より、高周波放電プラズマの課題として「自己点火を可能にすること」および「十分な電子放出性能を達成すること」が克服できれば、高い動作性能のみならず長寿命化、高信頼性を有するイオン推進機システムの構築が期待できる。

申請者らはこれまでの研究において、高周波放電プラズマを用いた電子源を試作し、自己点火性能と電子放出能力の基礎試験を実施した。その結果、以下のことが明らかになった。

- ・ 実用的な範囲で自己点火が可能である。
- ・ 電子放出量はイオン推進機の中和器に要求される値を満たしていた。
- ・ 直流放電式イオン推進機における主放電プラズマ生成用電子源としても十分な電子放出量が得られた。

よって、高周波放電プラズマを用いた電子源は、イオン推進機への適用するための十分な電子放出が可能である事を確認した。ただし、実用化には「電子源の投入電力と作動ガス流量の低減」を実現する必要がある。

2. 研究の目的

高周波放電プラズマを用いた電子源について、次の項目を達成し、実用的性能を得る。

- (1) 投入電力と作動ガス流量を抑えて作動する、電子源の実験室モデルを実現する。
- (2) イオン推進機に搭載し、作動実証を行うことで、有用性を明らかにする。

3. 研究の方法

(1) 点火特性・電子放出特性評価

電子源の詳細な点火および電子放出特性を評価するための電子源を作成した。図1に電子源概要を示す。イオン捕集電極の影響を評価するため、形状および表面積の異なる電極を製作し、その影響を評価した。図2に代表的なイオン捕集電極形状を示す。この電極の捕集面積はCylindrical形状とPole形状でそれぞれ2,960cm²、3,860cm²である。また、オリフィス形状の影響を評価するため、複数の仕様のオリフィスを作成し、その影響を評価した。表1にオリフィス形状仕様を示す。

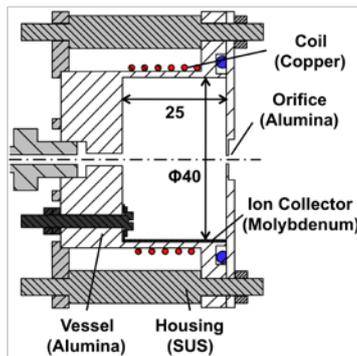


図1 高周波放電式電子源実験室モデル

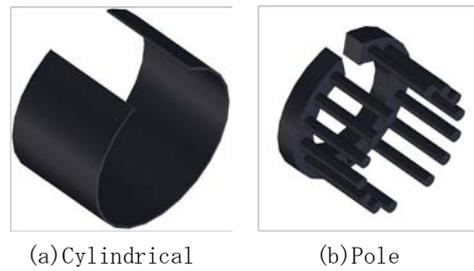


図2 イオン捕集電極

表1 オリフィス形状と呼び値

	L=0.5mm	L=1mm	L=2mm
D=1mm	D1_L0.5	N. A.	N. A.
D=2mm	D2_L0.5	D2_L1	D2_L2
D=3mm	D3_L0.5	N. A.	N. A.

(D: Orifice diameter, L: Orifice length)

電子放出特性は図3で示す構成で取得した。電子源のオリフィス下流に電極板を設置し、そこに印加する電圧をアノード電圧と定義した。アノード電圧によって電子源はオリフィスから電子を放出する。放出された電子は電極板に収集され、アノード電流(I_a)として観測される。イオン捕集電極にはアノード電流と等量の電流(I_c)が流れ、実験回路内で電流ループが形成されていることを確認する。

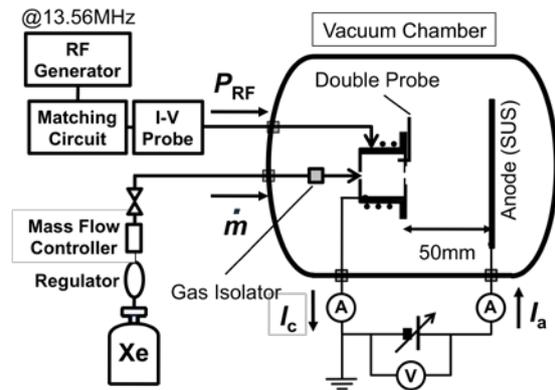


図3 電子放出特性試験構成

(2) 電子源内部プラズマの診断

電子源内部のプラズマ物性と放出電子電流の関係性を明らかにするために、静電プローブによるプラズマ診断を実施した。ダブルプローブ法により電子密度と電子数密度を、シングルプローブ法により浮動電位の計測を行った。

(3) イオン推進機への適用検討

① 高周波放電式イオン推進機の中和器適用検討

高周波放電式イオン推進機に、図1に示した電子源を中和器として設置した。この実験は予備的にイオン推進機の主放電プラ

ズマの点火と推力発生を確認するもので、イオン推進機と中和器の位置関係が作動に与える影響を調査した。

② イオン推進機の放電室プラズマ診断とグリッド電極設計

(4) 性能向上指針をもとにした電子源作成と性能評価

上記(1)および(2)の結果をもとに、電子源の性能向上と、将来的なイオン推進機への適用を目的として電子源を設計・製作した。この電子源の性能取得実験を行い、設計指針の有効性を評価した。

4. 研究成果

(1) 点火特性・電子放出特性評価

① 点火特性

実験設定値のXe流量と高周波電力から、それぞれ電子源内圧と高周波コイル間に生じる電圧ピーク値を推算した。

各イオン捕集電極を挿入した場合の電子源内圧と点火時の電圧ピーク値の関係を図4に示す。内圧が高いほど点火に必要な電圧は低下するが、ある圧力以上になると点火電圧の低下が緩やかとなる。また、イオン捕集電極の種類によって点火電圧に変化が生じることが分かった。

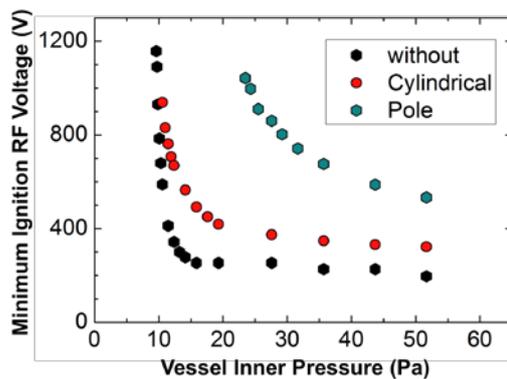


図4 各イオン捕集電極のプラズマ点火特性

次にオリフィス形状を変更した場合の電子源内圧と点火時の電圧ピーク値の関係を図5に示す。オリフィス形状に関係なく、同じイオン捕集電極のときには、点火に必要な電圧は内圧によって一意的に決まることが分かった。

したがって、高周波プラズマの点火には、イオン捕集電極により形成される電子源内部の電界形状と、ガス供給量とオリフィス形状によって決まる内部圧力が影響することが分かった。

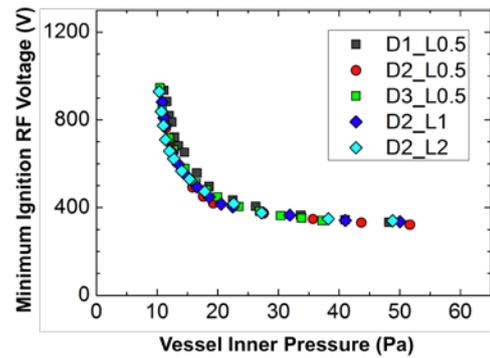


図5 オリフィス形状のプラズマ点火特性

② 電子放出特性

代表的な電子放出特性をアノード電圧とアノード電流図6に示す。アノード電圧の上昇に伴ってアノード電流が急増する領域が存在し、あるアノード電圧を越えるとアノード電流が一定値になる。このアノード電流の上限を飽和アノード電流とし、飽和アノード電流が流れるときのアノード電圧の最低値を飽和電圧と定義する。

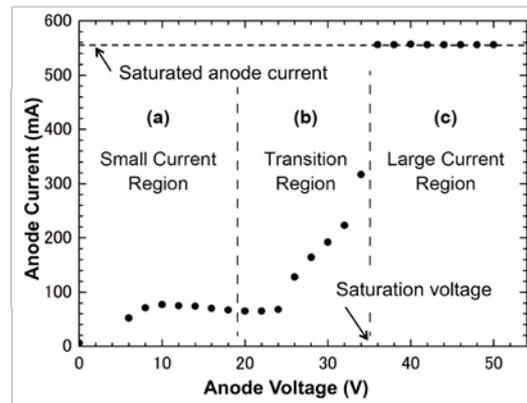


図6 典型的な電流-電圧特性

各イオン捕集電極を挿入した場合の飽和アノード電流を図7に示す。イオン捕集電極の表面積増加によって、飽和アノード電流は増加した。ただし、飽和電圧も上昇した結果が得られ、さらに表面積を大きくした場合には飽和アノード電流の低下も確認された。

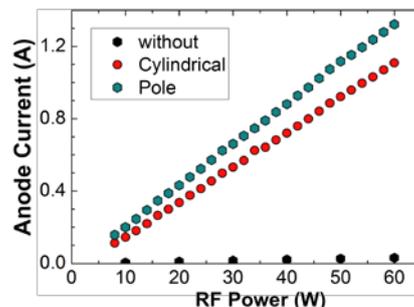


図7 各イオン捕集電極の飽和アノード電流

次にオリフィス形状を変更した場合の電子放出特性は、オリフィス長さが短い方が飽和アノード電流は大きく、飽和アノード電圧が低い傾向であることが判明した。また、オリフィス直径は小さすぎると十分な飽和アノード電流値を得ることが難しく、大きすぎても飽和電圧が高くなるため、最適なオリフィス直径が存在することが判明した。

(2) 電子源内部プラズマの診断

ダブルプローブ法による電子源内部のプラズマ物性測定結果を図8に示す。Xe流量が増えると電子数密度が上昇し、電子温度が低下する傾向であり、両者の変化量はXe流量が多い領域で鈍感になることが分かった。また、飽和アノード電流はある内圧で最大値を取ることが分かった。これらの値をもとにイオン捕集電極表面で形成されるイオンシースおよびオリフィスで形成される電子シースでの飽和電流密度を考察した。その結果、電子飽和電流とイオン飽和電流が一致する条件下で最大の電子放出電流が得られることを明らかにした。

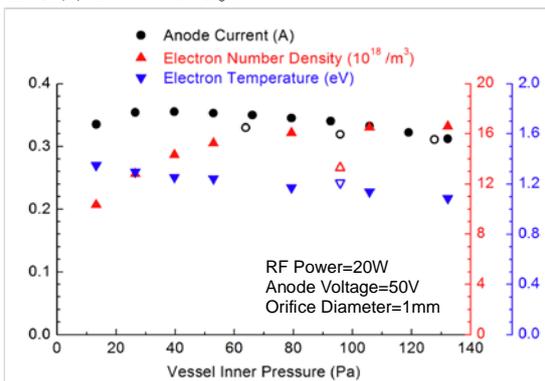


図8 放電室内圧に対する飽和アノード電流と電子温度、電子数密度

また、シングルプローブ法により電子放出時の電子源内部プラズマの浮動電位を測定したところ、飽和電圧より高い領域では、アノード電圧に比例して浮動電位が上昇することが分かった。

(3) イオン推進機への適用検討

① 中和器プラズマの点火の後、高周波放電式イオン推進機の主放電プラズマ点火に成功した。ただし、イオン推進機と中和器位置によってはプラズマが不安定となる現象も観測されたため、安定な設置位置関係に関する詳細検討が今後の研究課題として明らかとなった。

② 高周波放電式イオン推進機のグリッド電極を作成するために、主放電室のプラズマ診断を行った。そのプラズマ物性値をもとにグリッド電極のイオンビーム軌道解析を行い、電極設計の指針を求めた。

(4) 性能向上指針をもとにした電子源作成と性能評価

新たに製作した中和器用電子源の単体動作試験結果を図9に示す。これまでの実験室モデルと比較して、小型でありながら同等の電子放出能力を達成するための電力を半分に抑えられることを確認した。これは本研究の当初の目的である「投入電力の抑制」や「作動ガス流量の抑制」に対応する成果であり、本研究で得られた電子源設計指針の有用性が示された。

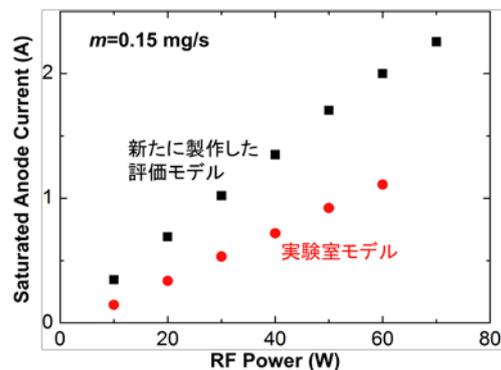


図9 電子源の性能比較

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計1件)

- ① 渡邊裕樹, 中林拓也, 笠上聡志, 大熊拓児, 青柳潤一郎, 竹ヶ原春貴, “イオンエンジンにおける誘導結合プラズマを用いた電子源の中和器作動特性”, プラズマ応用科学, 査読有, Vol. 18, No. 2, pp. 131-138, 2010.

[学会発表] (計8件)

- ① 中林拓也, 渡邊裕樹, 青柳潤一郎, 竹ヶ原春貴, “小型 RF スラスターへの C/C グリッド適用検討,” 平成 23 年度宇宙輸送シンポジウム, STEP-2011-048, 相模原, 2012 年 1 月.
- ② Takuya NAKABAYASHI, Hiroki WATANABE, Satoshi KASAGAMI, Junichiro AOYAGI and Haruki TAKEGAHARA, “Parametric Study on Shape Dependence of Inductively Coupled Plasma Cathode for Performance Improvement,” The 32nd International Electric Propulsion Conference, IEPC-2011-305, Wiesbaden, Germany, Sep. 11-15, 2011.
- ③ Hiroki WATANABE, Takuya NAKABAYASHI, Satoshi KASAGAMI, Junichiro AOYAGI and Haruki TAKEGAHARA, “Experimental Investigation of Inductively Coupled Plasma Cathode for

the Application to Ion Thrusters," The 47th AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference & Exhibit, AIAA-2011-5989, San Diego, USA, Jul. 31 - Aug. 3, 2011.

- ④ Hiroki WATANABE, Takuya NAKABAYASHI, Satoshi KASAGAMI, Junichiro AOYAGI and Haruki TAKEGAHARA, "Study on Ignition and Electron Emission Characteristics of Inductively Coupled Plasma Cathode," The 28th International Symposium on Space Technology and Science, ISTS-2011-b-35, Okinawa, Japan, Jun. 5-12, 2011.
- ⑤ Hiroki WATANABE, Takuya NAKABAYASHI, Satoshi KASAGAMI, Takuji OKUMA, Junichiro AOYAGI and Haruki TAKEGAHARA, "Effects of Orifice Dimension on Inductively Coupled Plasma Cathode Performance for Ion Thruster," The 4th International Workshop on Plasma Application and Hybrid Functionally Materials, B-2, Melbourne, Australia, March 11-13, 2011.
- ⑥ 渡邊裕樹, 中林拓也, 笠上聡志, 大熊拓児, 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の内部プラズマ診断," 平成 22 年度宇宙輸送シンポジウム, STEP-2010-055, 相模原, 1 月 20-21 日, 2011.
- ⑦ 渡邊裕樹, 中林拓也, 笠上聡志, 大熊拓児, 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の点火および電子放出性能における形状依存性", 第 54 回宇宙科学技術連合講演会, 1B15, 静岡, 11 月 17-19 日, 2010.

[産業財産権]

○取得状況 (計 1 件)

名称: 荷電粒子放出装置およびイオンエンジン

発明者: 竹ヶ原春貴、栗木恭一、青柳潤一郎、畠山智行、渡邊裕樹

権利者: 公立大学法人首都大学東京

種類: 特許

番号: 特許第 4925132 号

取得年月日: 平成 24 年 2 月 17 日

国内外の別: 国内

6. 研究組織

(1) 研究代表者

青柳 潤一郎 (AOYAGI JUNICHIRO)

首都大学東京・システムデザイン研究科・助教

研究者番号: 10453036