科研費
KAKENHI

科学研究費助成事業（学術研究助成基金助成金）研究成果報告書

平成２５年５月３１日現在

機関番号：１４３０１
研究種目：若手研究（Ｂ）
研究期間：20011～2012
課題番号：２３７６０７６９
研究課題名（和文）　高周波放電式マイクロイオン推進機の放電特性および
イオンビーム引き出し機構の解明
研究課題名（英文）　Elucidation of Plasma-Discharge Characteristics and Ion-Beam Extraction Mechanism for Micro RF Ion Propulsion
研究代表者
鷹尾　祥典（TAKAO YOSHINORI）
京都大学・大学院工学研究科・助教
研究者番号：８０５５２６６１

研究成果の概要（和文）： 高周波放電式マイクロイオン推進機に対して回路モデルと粒子計算モデルを用いた数値計算，および，イオン源のプラズマ密度測定とイオンビーム電流測定を行うことでイオン源の放電特性およびビーム引き出し機構の解析を行った．その結果，低電力で高いプラズマ密度を得るには RF 周波数 200–300 MHz での放電が適当であり，容量結合の効果が無視できないこと，また，イオンビームを引き出すのに最適な流量が存在し，これらの傾向は数値解析結果と合致することが分かった．

研究成果の概要（英文）： We have conducted numerical and experimental research of micro RF ion thruster to investigate plasma-discharge characteristics and ion-beam extraction mechanism by using a numerical model, which consists of an external circuit model and a particle model, and by measuring the plasma density and the ion beam current. As a result, we have found that the optimum RF frequency range is 200-300 MHz to obtain high plasma density at low RF power, the effect of capacitive coupling is not negligible, and there is an optimum flow rate condition to extract ion beam. These results are in reasonable agreement with the numerical calculations.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合　計
交付決定額	2,600,000	780,000	3,380,000

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：プラズマ，推進機，高周波，マイクロ，人工衛星，モデリング，イオンエンジン

１．研究開始当初の背景

宇宙開発において人工衛星など宇宙機の小型・軽量化，低消費電力化は多種多様なミッションにとってコスト削減という経済性の面から大変重要である．近年，この低コストという利点を生かし，大学や中小企業における衛星開発が非常に盛んであり，日本においても既に 10 機以上の超小型衛星が H-IIA ロケットの相乗り小型副衛星として宇宙に打ち上げられている．しかしながら，これらはいずれも地球の重力や磁力を利用した受動的な姿勢制御に留まっている．このように，小型衛星はまだ産声を上げたばかりであり，複数の衛星が協調して観測を行うような編隊飛行（フォーメーションフライト）等，機動的に小型衛星を運用して，その有用性を高めるためにも，軌道・姿勢制御を行う超小型推進機（マイクロスラスタ）の更なる研究開発が不可欠である．

推進機には化学推進と非化学推進があるが，宇宙空間においては燃料搭載量の制限から比推力の高い（燃費の良い）非化学推進である電気推進が適しており，その小型化に関する研究が国内外ともに盛んである．しかし，電

熱加速型から静電加速型まで様々なタイプのマイクロスラスタが提案され研究開発が進められているものの，それらは実機作成および動作検証が多くを占め，マイクロスラスタの物理現象を深く理解し，その理論体系を構築しようとするものは極めて乏しい．マイクロスラスタの性能向上のためには，微小空間内におけるプラズマ物理の理解が重要であるが，観測行為そのものがプラズマに大きな擾乱を与えたり，空間分布を高精度に測定するのが困難であったり等，実験的手法だけでは得られる情報に限りがあるため，数値シミュレーションが強力な解析ツールとなり得る．マイクロスラスタを対象とした数値計算による研究は，国内はもとより国外でもほとんど行われておらず，今後の発展が求められる領域である．

また，近年，大型のイオンエンジンにおいて開発期間の多くを占める寿命評価試験を数値解析によって効率化する試みが精力的に進められている．このように，従来のイオンエンジンが数値解析ツールによる信頼性試験の効率化を進めているのに対して，マイクロスラスタはまだ開発途上ということもあり，その動きは皆無である．しかしながら，信頼性が重要となる宇宙開発においてはマイクロスラスタにとっても信頼性試験は不可欠であり，同様の数値解析ツールが将来求められるはずである．

２．研究の目的

本研究は，マイクロスラスタの中でも無磁場で比較的構造が単純ゆえに数値解析モデルを作成しやすい高周波放電を用いた静電加速型のマイクロイオン推進機を対象とし，その実機作成および実験による研究とともに詳細な計算モデルを構築し，両者の比較を行うことでマイクロスラスタの物理現象解明を目指すものである．

３．研究の方法

2 年間で行う本研究では以下の 2 点に焦点を絞り，イオンビームの中和器は研究対象に含まない．

(1) プラズマ源の放電特性の把握

マイクロプラズマ源は放電体積に対してプラズマの損失となる壁などの表面積が大きいため，プラズマと壁との相互作用およびシースの理解が重要となる．従来のイオン推進機では計算コストの問題からシースを簡易なモデルで表現しているが，本研究ではサイズが小さいことを逆に利用してシースをモデル化せず，荷電粒子（イオン・電子双方）のみを粒子として扱う PIC-MCC（Particle-in-Cell plus Monte Carlo collisions）法で直接解き，プラズマと壁の境界領域における物理現象を

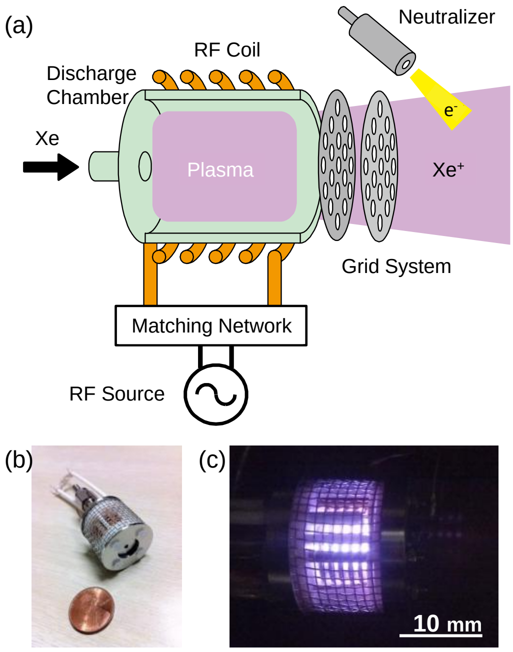

図 1. (a) 高周波放電式マイクロイオン推進機の概念図，および，(b) 作成した実機と (c) 作動中の Xe 放電の様子を捉えた写真．

明らかにする．

高周波電力とプラズマとのカップリングをより詳細にモデル化するため，電力投入回路方程式を解くモジュールを追加する．誘導結合型プラズマ源（ICP）では，周方向の誘導電場を考慮するだけでは分からない容量結合成分（完全にゼロにはできない）を考慮するモデルを構築し，その影響を明らかにする．

上記 2 点を考慮して，プラズマ放電特性の圧力依存性，電力依存性，周波数依存性を明らかにする．

(2) イオンビーム引き出し機構の把握

マイクロイオン推進機においては，パッシェンの法則上プラズマ源の圧力が大型のものよりも高くなり，中性粒子の流れも推進性能に大きく影響を与えると考えられる．よって，現状の粒子モデルに中性粒子の流れを扱えるよう DSMC（Direct Simulation Monte Carlo）法を組み込み，その影響を明らかにする．

４．研究成果

図 1 に本研究が対象とする高周波放電式マイクロイオン推進機の概念図およびその試作機の写真を示す．イオン源には誘導結合式プラズマ源を用い，加速電極グリッドによってイオンビームを引き出す機構である．一般にイオンスラスタでは，イオンビーム電流を稼ぐためにも加速電極グリッドには多数の孔を開けるが，ここでは 2 次元軸対称モデルで表現できるように中心部に一つだけ孔を設けている（図 2）．なお，推進剤には Xe ガスを用

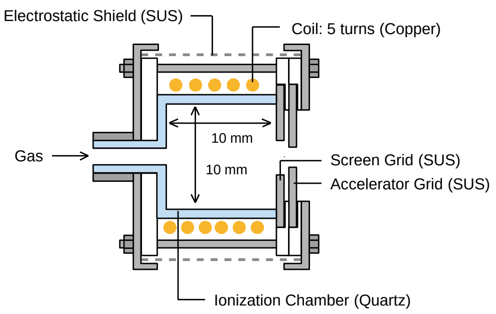

図 2. 作成した高周波放電式マイクロイオン推進機の断面図.

いる.

(1) イオン源の回路モデル計算

図 3 に示すようなプラズマ, 放電室石英管, RF 電力導入コイル, 整合回路, 電源を含んだ回路モデルを構築する. プラズマ放電を模擬する回路は誘導結合放電と容量結合放電で電流経路を分離して考える. 図 4 にモデル化した等価回路の詳細を示す. 誘導結合放電は電子の周方向の挙動を模擬したドーナツ状のプラズマリングと RF コイルの相互誘導により表現される. 一方, 容量結合放電は誘電体容器, プラズマ, シースを介して金属壁へ流れる電流経路で表現される.

計算対象の幾何条件は実験で用いるイオン源と同じものとする. 放電室である石英管の厚さは 1.0 mm とする. 電子と中性粒子の衝突周波数 ν_{me} は圧力に依存するとし, ν_{me} = 1.0×10^7 /s と ν_{me} = 5.0×10^7 /s (それぞれ Xe において 1.3 mTorr, 6.7 mTorr に対応する)の 2 パターンの値を仮定する. 電子密度は n_e = 3.0×10^{16} /m^3, 相互インダクタンスの結合係数は 0.2 を仮定する. プラズマ吸収電力 P_{abs} は 100 mW で一定とし, 2 MHz から 500 MHz の周波数に渡って解析を行った.

図 5 にプラズマ吸収電力 P_{abs} = 100 mW に必要な電源電力 P_g の周波数依存性を示す. 低周波側は誘導結合成分の電流が多く必要になり, 大きな電源電力が必要になる. これはコイル抵抗 R_0, 送電線抵抗 R_l において電力が大きく消費されているためである. 高周波側では必要とする電力は小さくなり, 200 MHz から 300 MHz においてほとんどプラズマ吸収電力の値 (P_{abs} = 100 mW) と変わらない値をとる. さらに高周波になるとコイルおよび送電線の抵抗が増加するため, これらでの電力消費が増大するはずだが, 容量結合回路へ流れる電流が大きくなるため電源電力は若干量しか増加しない. 本稿におけるモデルでは

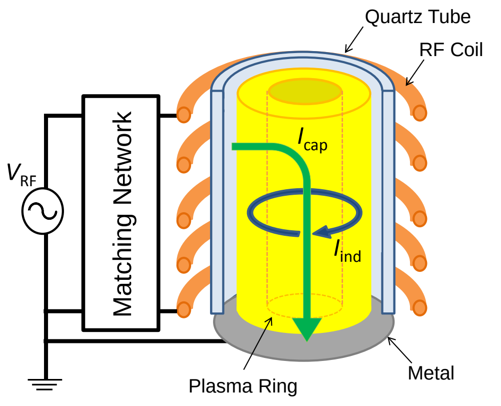

図 3. 外部回路を考慮した高周波プラズマ源の簡易モデル.

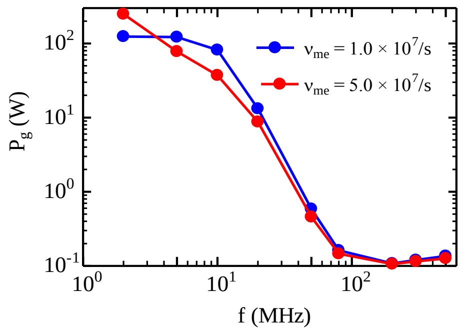

図 5. プラズマ源に 100 mW 吸収させるのに必要な RF 電力の周波数依存性.

容量結合回路における電力損失を考慮していないため, 高周波における損失が小さく見積もられていると考えられる. 高周波において容量結合回路に誘電損失などのプラズマに吸収されない電力損失を考慮することが今後の課題である.

以上の結果により, 超小型高周波イオン源において低電力で高いプラズマ密度を得るには 200 MHz から 300 MHz の RF 周波数での放電が適当であることが分かった.

(2) イオン源の粒子モデル計算

本研究では以下の仮定の下で計算を行った. (i) 座標は 2 次元軸対称 (r,z) とする. (ii) 作動ガスは Xe とする. (iii) 電子と 1 価のイオンのみを粒子として扱う. (iv) 中性粒子は粒子として取り扱わず, プラズマ源内でその密度は空間的・時間的に一定とする. (v) 荷電粒子と中性粒子との衝突では, 電子は弾性・励起・電離の各衝突を, イオンは弾性と電荷交換の各衝突を考慮する.

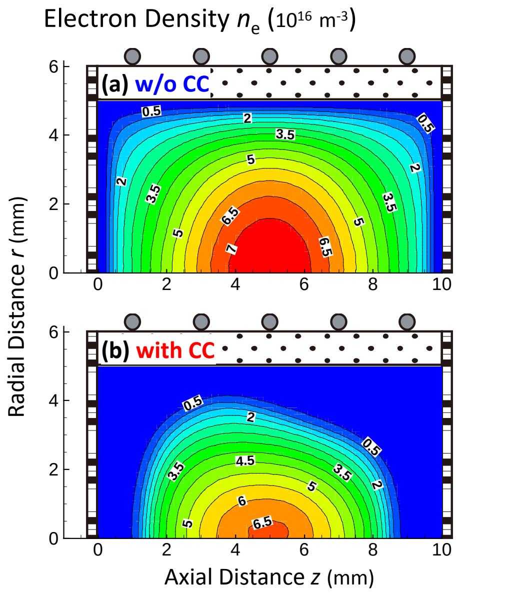

図 6. 時間平均した電子密度 ne の空間分布(P_{abs} = 0.1 W, f = 100 MHz, p = 5 mTorr, L = 200 nH). (a)容量結合考慮無し，(b)容量結合考慮有り.

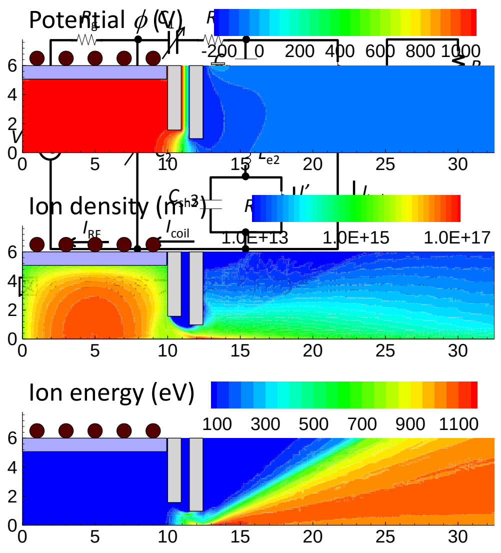

図 7. プラズマ源からイオンビーム引き出し解析例．上からポテンシャル，イオン密度，イオンエネルギーの各分布．RF 周波数 160 MHz, 流量 0.2 sccm.

本計算モデルは，荷電粒子の分布から生じるポテンシャルを求めるポアソン方程式，コイル電流により生じる誘導電磁場を求める支配方程式，そして荷電粒子の運動方程式と MCC からなる．なお，MCC には計算時間の省力化のため null collision 法を用いている．イオンスラスタで利用される低圧プラズマにおいては，無衝突加熱機構が電力吸収において重要な役割を果たすことが知られている．この無衝突加熱を考慮するためには，電子群の運動を追跡することにより直接プラズマ電流を求めればよい．

容量結合の効果を調べるため，ポテンシャル計算にはプラズマが存在する領域に加えて，誘電体領域も考慮している．ここでは，ポアソン方程式の境界条件として 2 つの方式を用いた．一方は，コイルと誘電体の間にファラデーシールドが挿入されており，そこでの電位は常にゼロとしたもの．もう一方は，コイルの接地側（z = 1 mm）から高電位側（z = 9 mm）にかけて線形に電位振幅が上昇するものである．実際には，容量結合が生じると各コイルに流れる電流は容量結合成分だけ徐々に減少するため，今回の計算ではやや過剰な見積もりになる．この効果の考慮については今後の課題である．

まず計算条件を，プラズマに吸収される電力 P_{abs} = 0.1 W，RF 周波数 f = 100 MHz，Xe ガス圧力 p = 5 mTorr，コイルの自己インダクタンス L = 200 nH と固定して計算を行った．図 6 に電子密度 n_e の空間分布を示す．各図の w/o CC は容量結合を考慮せず純粋な誘導結合のみを考慮した場合，with CC は誘導結合に加えて容量結合を考慮した結果である．図が示すように，低圧での拡散効果，および，系が小さいことに伴うプラズマ容器表面での大きな損失のため，円筒容器中心軸上において最大電子密度を取り，密度勾配の大きい分布となる．純粋な誘導結合のみを考慮した場合（w/o CC）は，完全に対称な分布となっている．一方，容量結合を考慮すると（with CC），電子密度の最大値は 7.5×10^{16} /m^3 から 6.6×10^{16} /m^3 へと 1 割強減少し，かつ，その分布も両者で大きく異なる．容量結合を考慮した場合はシースが厚くなることでより密度勾配が大きくなっている．特に，コイルの高電位側（z = 9 mm）においてシースが厚くなり，そこでの電子密度減少が顕著である．ここには図示していないが，イオン密度分分布も同様な形状となる．これは，電荷蓄積に伴い誘電体表面でポテンシャルが大きく負となりバルクのポテンシャルと大きな電位差が発生，その結果，電子ではなく主にイオンに RF 電力が吸収されることが原因であると考えられる．このプラズマ密度分布を見る限り，径方向になるべく一様なプラズマ分布を得るためには，加速グリッド電極の反対側にコイルの高電位側を配置する方が望ましいと考えられる．

図 7 にイオンビーム引き出し数値解析例を示す．流量は 0.2 sccm である．加速グリッド間の電位差によりイオンビームがスムーズに引き出されている様子が確認できる．ただし，一部のイオンが電極に衝突している様子も確認できる．表 1 にイオンビーム電流の流量依存性を示す．圧力増加とともにイオンビームが中性粒子と電荷交換衝突することで加速電極への電流が増加し，ビーム電流が減少している様子が分かる．

表 1. ビーム電流の流量依存性.

(sccm)	I_{beam} (μA)	I_{screen} (μA)	I_{accel} (μA)
0.1	32.1	33.8	1.7
0.2	29.9	33.2	3.3
0.5	23.8	32.1	8.3

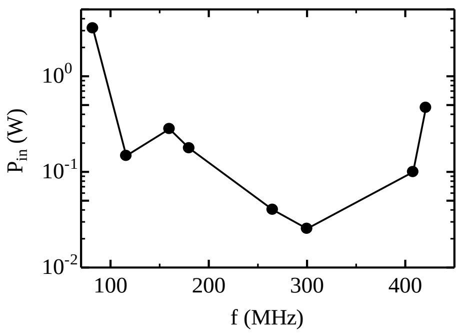

図 9. 最小プラズマ維持電力の周波数依存性.

(3) イオン源の実験評価

実験装置はスラスタ，真空系，推進剤供給系，高周波供給系，グリッド回路系，電子源から構成される（図 8）．真空チャンバは低真空排気にロータリーポンプ，高真空排気にターボ分子ポンプを用い，推進剤の Xe は流量計（Alicat Scientific, MCV-0.5SCCM-D）で流量を調整し供給する．信号発生器（Agilent Technologies, E8257C）によって発信した高周波を増幅器（THAMWAY, T142-432AA）により増幅し，整合回路を介してイオン源に電力を供給する．信号発生器は 1 MHz から 500 MHz の周波数帯を使用する．増幅器のゲインは 43 dB であり，増幅後の電力は最大 25 W である．また，増幅器と整合回路の間に方向性結合器（1–200 MHz: R&K, DC070, 0.1–2.0 GHz: Agilent Technologies, 778D-012）を挿入し，パワーメータ（Hewlett Packard, 437B）で入射電力 P_{fwd}，反射電力 P_{ref} を測定する．これらの値からイオン源への投入電力 $P_{in} = P_{fwd} - P_{ref}$ を得る．スクリーン電極，アクセル電極への電圧印加には直流安定化電源（Ikegami Tsushinki, HD 2.5k-M，Kikusui Electronics, 7372A）を用い，それぞれ 0–1250 V，0–200 V の範囲で使用した．なお，フィラメントの加熱による熱電子放出を利用した簡易的な電子源を用いている．プラズマ診断にはシングルプローブを用いる．プローブ導体はタングステン製であり，長さが 1.4 mm，直径 0.05 mm の円筒形である．プローブ診断時はスクリーン電極をグラウンドに落とし，基準電位とする．半導体パラメータアナライザ（Hewlett Packard, 4145B）により電圧を印加し，プローブ電圧-電流特性を得る．そして，その特性から電子飽和電流を見積もり，電子密度を得る．なお，ローパスフィルタを用いて高周波による変動を補償している．最後に，推進性能値を得るためにグリッドからグラウンドに流れる電流を測定する．アクセルグリッドは電源の高電圧側，スクリーングリッドは電源のグラウンド側にそれぞれシャント抵抗（1 kΩ）を挿入し，抵抗にかかる電圧を測定することで算出する．電圧の測定はデジタルマルチメータ（Keithley, 2110），ハンディテスタ（Sanwa, RD 701）により行う．得られたスクリーングリッド電流 I_s，アクセルグリッド電流 I_a からイオンビーム電流 $I_b = I_s - I_a$ を得る．

図 9 にプラズマが維持できる最小の電力を測定した結果を示す．5 W 程度でプラズマを点火した後，電力を下げていき，プラズマが消えた直後の電力を測定した．10 MHz 程度の低周波数領域では点火が難しく，プラズマを維持するためにも 10 W 以上の電力が必要となった．周波数の増加に伴いプラズマの維持に必要な電力は小さくなり，300 MHz 付近で最小値をとる．周波数が 300 MHz 以上になると電力は増加する傾向にある．これは，モデル計算における一定吸収電力に必要な電力の特性（図 5）と定性的に一致している．低周波側ではコイル抵抗は小さいが必要な電流量が大きいため電源電力が大きくなる．一方，周波数が上がると容量結合が支配的になり，必要な電流量が小さくなるため電源電力は小さくなる．しかし，さらに高周波になるとコイル抵抗などの損失が増えるため必要な電力が増加し，結果として図 9 に示すような特性が得られると考えられる．

図 10 に RF 周波数の違いによる電子密度の変化を示す．RF 周波数は 117 MHz, 260 MHz であり，流量は 0.02 sccm である．プロットは 3 回の測定の平均値である．260 MHz の

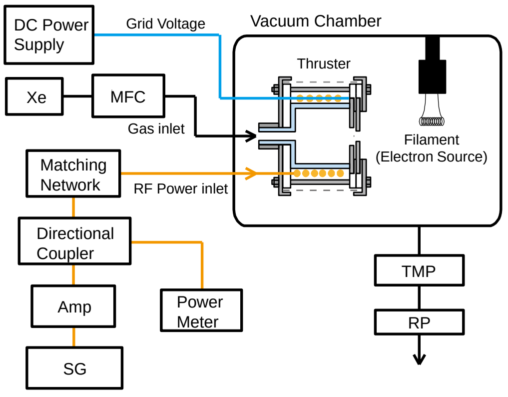

図 8. 実験装置概略図.

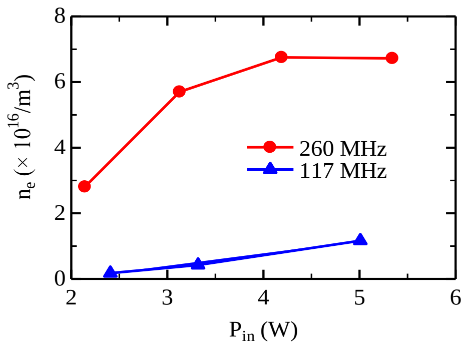

図 10. 電子密度の RF 電力依存性. 流量 0.02 sccm, RF 周波数 117 MHz, 260 MHz.

放電の方が 117 MHz の放電に比べ電子密度が総じて高いことが分かる. 260 MHz の方が 117 MHz よりも効率的な電力供給が行われて電子密度が上昇していると考えられる. なお, この傾向は粒子モデル計算結果とも合致している(図 11). この周波数による電子密度の違いにより, 回路モデルによって見積もられた最適周波数帯(200–300 MHz)が妥当であることが分かった.

図 12 に RF 周波数 160 MHz, スクリーングリッド電圧 V_s = 1050 V, アクセルグリッド電圧 V_a = −200 V のときのビーム電流の電力依存性を示す. 電力増加に伴いビーム電流が増加することが確認された. また, 流量の違いによりビーム電流が変化し, イオンの引き出しに最適な流量があることが分かった. この結果は表 1 が示すように数値解析結果とも合致した.

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) Y. Takao, K. Eriguchi, and K. Ono, Effect of capacitive coupling in a miniature inductively coupled plasma source, J. Appl. Phys., 査読有, Vol. 112, No. 9, 2012, pp. 093306-1-10.
DOI: 10.1063/1.4764333.
http://hdl.handle.net/2433/161047

〔学会発表〕(計9件)

(1) 阪本将隆, 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, 2013 年 1 月 18 日, JAXA 宇宙科学研究所(神奈川県相模原市)

(2) 鷹尾祥典, 阪本将隆, 江利口浩二, 斧高一, 外部回路を考慮した超小型高周波イオン推進機の粒子シミュレーション, 第 56 回宇宙科学技術連合講演会, 2012 年 11 月 21 日, 別府国際コンベンションセンター(大分県別府市)

(3) Y. Takao, K. Eriguchi, and K. Ono, Miniature Ion Thruster using a Cylindrical Micro ICP, 48th AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference & Exhibit, July 31, 2012, Atlanta, GA, USA, AIAA-2012-3950.

(4) Y. Takao, K. Eriguchi, and K. Ono, Two-Dimensional Particle-in-Cell Simulation of a Micro RF Ion Thruster, 32nd International Electric Propulsion Conference, September 15, 2011, Kurhaus, Wiesbaden, Germany, IEPC-2011-076.

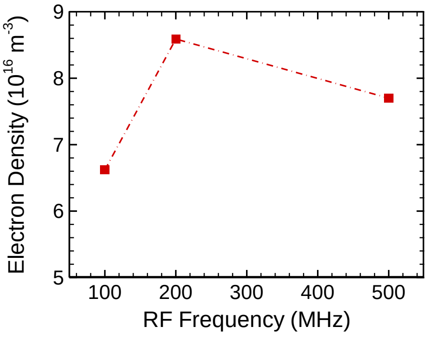

図 11. 電子密度の周波数依存性.

６. 研究組織

(1) 研究代表者

鷹尾　祥典 (TAKAO YOSHINORI)
京都大学・大学院工学研究科・助教
研究者番号：80552661

(2) 研究分担者

無し

(3) 連携研究者

無し

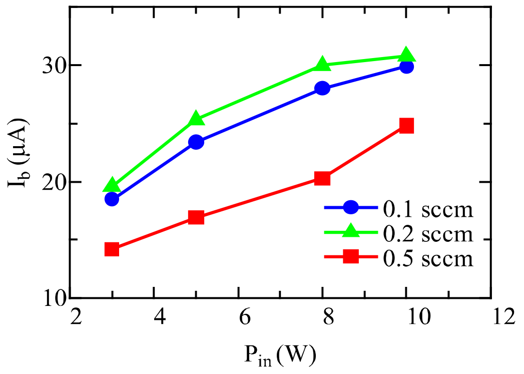

図 12. ビーム電流の RF 電力依存性. RF 周波数 160 MHz, 流量 0.1, 0.2, 0.5 sccm.