

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

○阪本 将隆 (京大工・院), 鷹尾 祥典, 江利口 浩二, 斧 高一 (京大工)

1. はじめに

近年, 大学や中小企業でも運用可能な人工衛星として超小型衛星の研究開発が盛んである. より高性能な超小型人工衛星を実現するため, これに対応する超小型推進機 (マイクロスラスタ) が求められる. このような要求を満たすマイクロスラスタとして, 著者らは図 1 に示すような高周波誘導プラズマ源 (ICP: Inductively Coupled Plasma) を利用した超小型高周波イオン推進機 (mRIT: micro RF Ion Thruster) を提案し, 数値計算および実験の両面から研究開発を行っている¹⁾⁻³⁾.

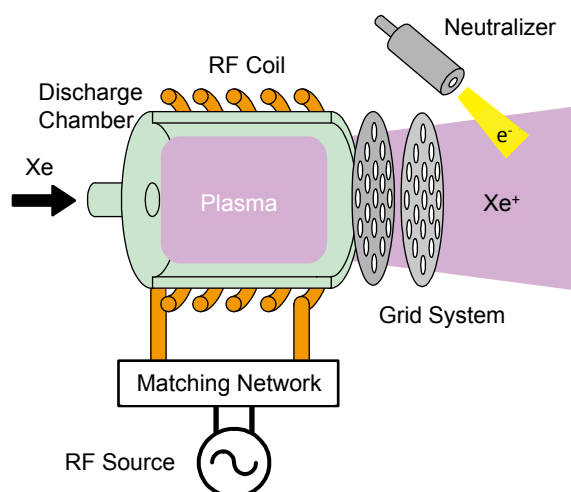


図 1: 超小型イオン推進機 (mRIT) 概念図.

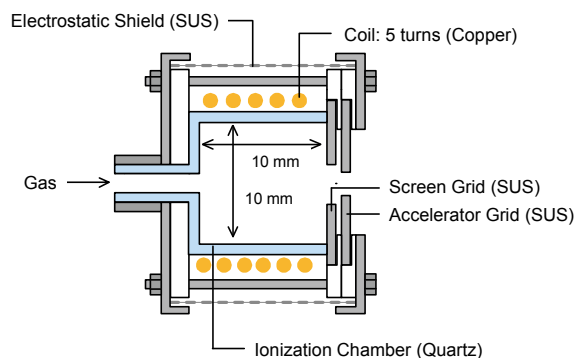


図 2: mRIT 断面図.

一般に高周波 (RF) 誘導放電には高電力でプラズ

マ密度が高い誘導結合放電領域 (H モード), 低電力でプラズマ密度が低い容量結合放電領域 (E モード) の存在が知られている⁴⁾. イオンスラスタの推進効率, 推力の向上のためには高いプラズマ密度を得る必要があるため, H モードでの放電を行うことが望ましい. 一方でマイクロスラスタで利用できる電力には制限がある. そこで, 本研究は mRIT のイオン源について低電力で高密度プラズマが得られる条件を探索することを目的とし, つぎのを行う. まず, イオン源の外部回路までを含んだ回路モデルを構築し, 周波数特性を調べる. つぎに, 電子密度の測定, プラズマ維持に必要な最小電力の測定などのイオン源の特性を実機実験により調べ, 計算との比較を行う. なお, 予備実験としてビーム電流測定も行ったので, その結果についても報告する.

本研究で使用する mRIT は図 2 のように石英管放電室, RF 導入コイル, アクセル電極, スクリーン電極から構成される. 放電室は直径 10 mm, 長さ 10 mm の円筒形であり, コイルを周囲に 5 周巻いている. スクリーン電極, アクセル電極は厚さ 1 mm の円板形で, 中央に直径がそれぞれ 3.0 mm, 1.8 mm の孔を 1 つ開けた形状である. 電極間の間隙は 0.5 mm である. 推進剤として Xe を用いる.

2. イオン源の回路モデル計算

2.1. 回路モデルの構築

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. プラズマリングの厚さ δ はプラズマ中の電磁場の空間的な減衰定数であるスキン長を用いる. コイルは抵抗 R_0 とインダクタンス L_0 を持ち, それぞれの値を実測値に基づいて与える. 具体的には, RF 周波数 1 MHz から 10 MHz において R_0, L_0 を実測し, 10 MHz 以上の周波数については, 外挿により求める. プラズマリングの形状によ

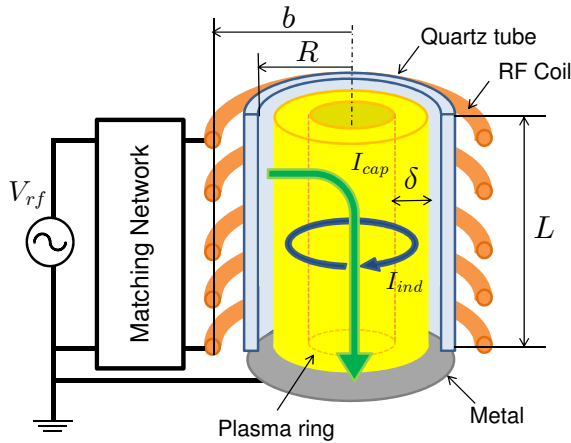


図 3: 外部回路を考慮した高周波プラズマ源の簡易モデル。

るインダクタンスを L_2 とし, L_0, L_2 間の相互インダクタンス $M = k_M \sqrt{L_0 L_2}$ を考える. ここで k_M は結合係数を表す. 相互誘導部の回路は図 4(b) のように簡略化できる. 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. プラズマは抵抗 R_2, R_{p2} , 電子の慣性から生じるインダクタンス L_e, L_{e2} , シースキャパシタンス C_{sh1}, C_{sh2} , シース抵抗 R_{sh} でモデル化する. 誘電体容器のキャパシタンス C_q や送電線 (同軸は含まない) の抵抗 R_l も考慮する. コイル電流の誘導結合成分を I_{ind} , 容量結合成分を I_{cap} とする. 整合回路には可変容量 C_1, C_2 を直列, 並列に接続した Γ 型を用いる. 各回路素子の詳細な導出については参考文献に委ねる⁵⁾⁻⁶⁾.

解析は回路方程式を数値的に解くことによって行う. 各素子に流れる電流, 生じる電位差, 消費電力が計算される. 抵抗 R によって吸収される電力 P はその抵抗を流れる電流の実効値 I を用いて $P = RI^2$ で表される. プラズマに吸収される電力 P_{abs} は誘導結合成分 P_{ind} と容量結合成分 P_{cap} に分離される. P_{ind} は ρ , P_{cap} は R_{p2}, R_{sh} で消費される電力とする. プラズマに吸収されない電力損失は R_0, R_l で消費された電力とする.

2. 2. 計算結果および考察

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, $\nu_{me} = 1.0 \times 10^7 / s$ と $\nu_{me} = 5.0 \times 10^7 / s$ (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 $n_e = 3.0 \times 10^{16} / m^3$, 相互インダクタンスの結合係数

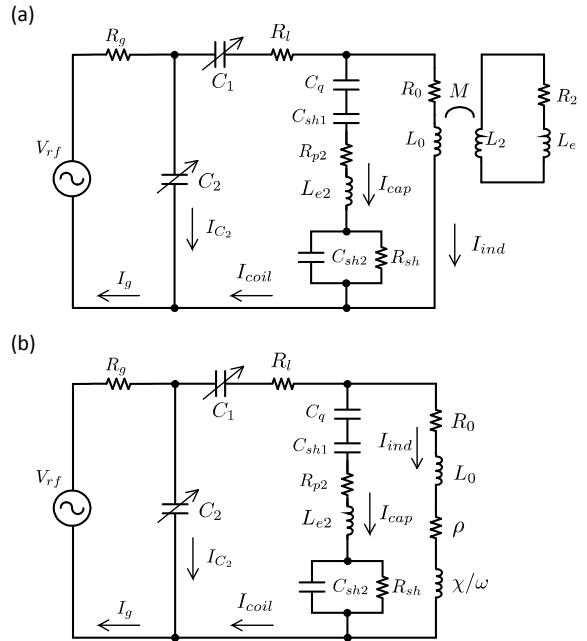


図 4: (a) 図 3 の等価回路モデル, および, (b) その誘導結合部の簡略化.

は $k_M = 0.2$ を仮定する⁷⁾. プラズマ吸収電力 P_{abs} は 100 mW で一定とし, 2 MHz から 500 MHz の周波数にわたって解析を行った.

図 5 に I_{ind}, I_{cap} の振幅の周波数依存性を示す. 低周波側では I_{ind} が I_{cap} に比べ大きくなる. 周波数が増加すると I_{ind} は急激に減少し, I_{cap} が増加, 両者同じオーダーの値に落ち着く. これは, 誘導結合回路をインダクタ, 容量結合回路をコンデンサとおおまかにとらえることで定性的な評価ができる. 低周波ではインダクタに電流が流れやすく, コンデンサには流れにくいことにこの結果は対応している.

図 6 にプラズマ吸収電力 $P_{abs} = 100$ mW 中の誘導結合成分 P_{ind} , 容量結合成分 P_{cap} の周波数依存性を示す. 10 MHz 以下の周波数では誘導結合での電力吸収がほとんどであり, 20 MHz 以上の高周波では容量結合での電力吸収がほとんどであることが分かる. これより, 低周波では誘導結合が, 高周波では容量結合が支配的であることが確認できた.

図 7 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 R_0, R_l が増加するた

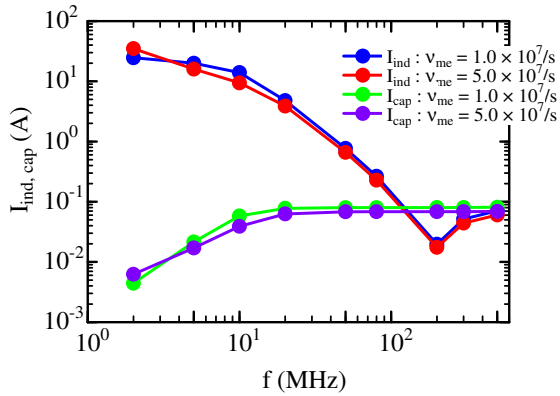


図 5: 電流の誘導結合成分 I_{ind} と容量結合成分 I_{cap} の周波数依存性.

め R_0, R_l 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.

3. 実験装置・測定装置

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、背圧を 3.0×10^{-4} Pa 程度にした後、実験を行う. 推進剤の Xe は流量計 (Alicat Scientific, MCV-0.5SCCM-D, 図 8 中 MFC) で流量を調整し供給する. 信号発生器 (Agilent Technologies, E8257C, 図 8 中 SG) によって発信した高周波を増幅器 (THAMWAY, T142-432AA, 図 8 中 Amp) 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

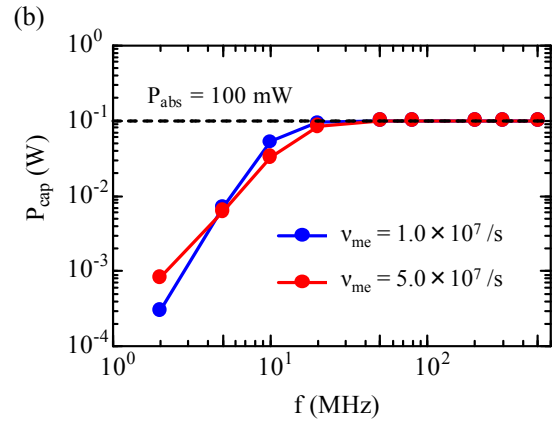
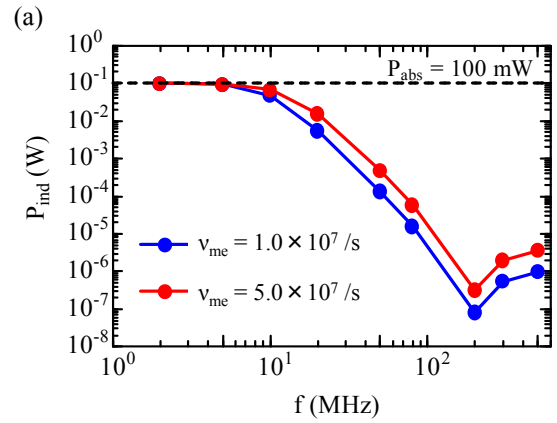


図 6: RF 周波数に対する吸収電力の (a) 誘導結合成分 P_{ind} , および, (b) 容量結合成分 P_{cap} .

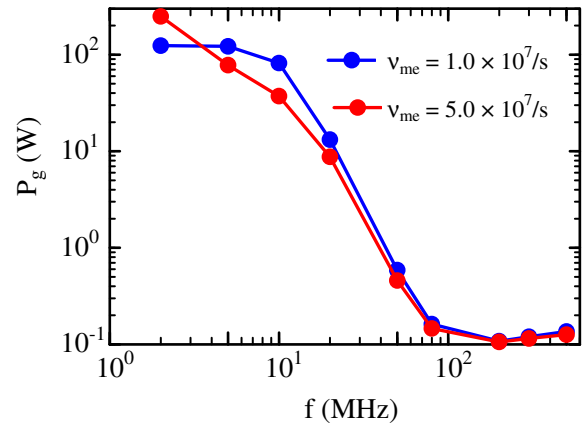


図 7: プラズマ源に 100 mW を吸収させるのに必要な RF 電力の周波数依存性.

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

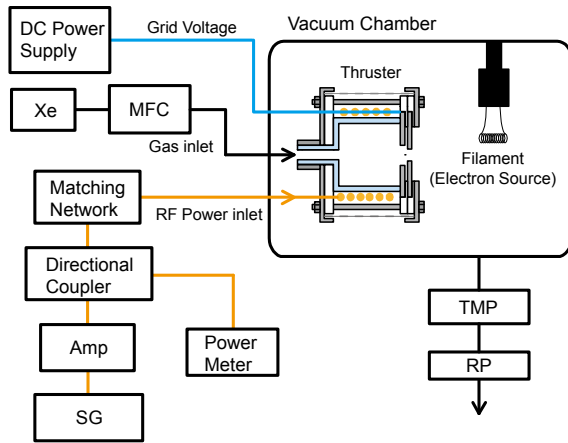


図 8: 実験装置概略.

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。

また、回路モデル計算との比較のために、コイルに流れる電流の測定を行う。同軸ケーブルのシールド外部からは内部を流れる電流が測定できないため、イオン源-整合回路間の同軸の中心導体と外部導体を一部分離し、カレントモニタ (Pearson Electronics, 2877) により中心導体に流れる電流を測定する。カレントモニタからは電流に比例した電圧が出力され、その電圧をオシロスコープ (Tektronix, DPO 4034) により測定する。

最後に、予備実験として、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 ($1\text{ k}\Omega$) 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。

4. イオン源の実験評価

4.1. 最小プラズマ維持電力測定

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

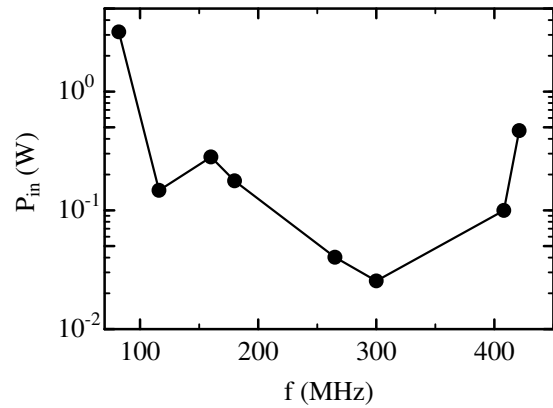


図 9: 最小プラズマ維持電力の周波数依存性.

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 7) 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。

4.2. プラズマ密度測定

図 10 に RF 周波数 117 MHz における電子密度の電力依存性を示す。このときの流量は 0.1 sccm であり、プロットは 1 回の測定値である。投入電力を 10 W から放電が消失する直前まで徐々に下げていき、そこから電力を 10 W まで増加させた。図において、電子密度が大きく増減する電力値があり、E モード、H モードのモード変化が生じているものと思われる。電子密度が大きく増減することに対応して、発光の強弱に大きな変化が観測された。しかし、一般的な誘導結合プラズマに見られる、一桁以上の密度変化は見られなかった。

図 11 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。

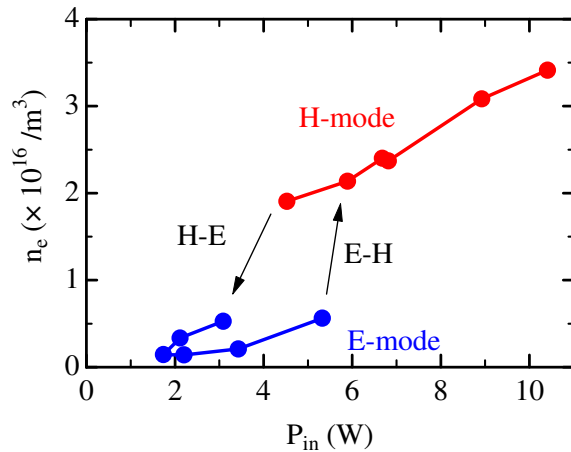


図 10: 電子密度の電力依存性, およびモード遷移の様子. 周波数 117 MHz, 流量 0.1 sccm.

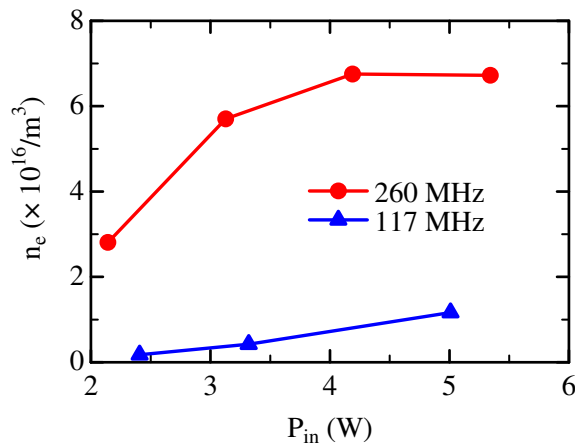


図 11: 電子密度の RF 電力依存性. 流量 0.02 sccm, RF 周波数 117 MHz, 260 MHz

なお, ここでは整合回路を通してイオン源へ供給される電力を投入電力として測定しており (図 8), これには整合回路における損失が含まれる. 電流が大きくなる低周波側で整合回路における損失が大きくなるため 260 MHz よりも 117 MHz においてイオン源に供給される電力が小さくなっていることが考えられる. 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.

4.3. コイル電流測定

図 12 に RF 周波数 160 MHz, 流量 0.1 sccm におけるコイル電流の実験値と計算値を合わせて示す. 計算値は誘導結合, 容量結合両方を考慮した場合と, 誘導結合のみを考慮した場合の結果を示している. なお, 計算においては $v_{me} = 1.0 \times 10^7 / \text{s}$ としている. 図より, 電源電力の増加に伴いコイル電流が増加することが確認できる. 誘導結合のみを考えた場合はかなり電流が大きく見積もられ, 容量結合を考慮すると, 実験値と同等のオーダーをとることが

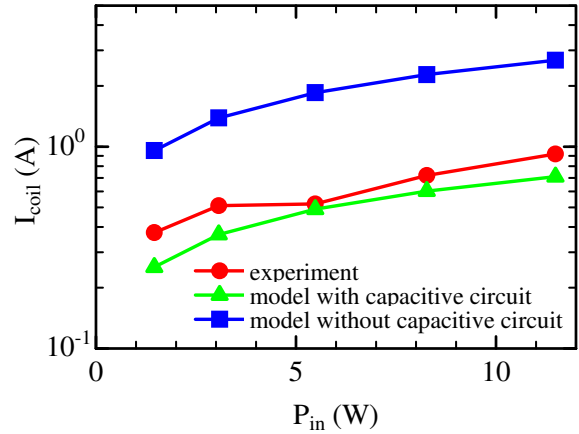


図 12: コイル電流の電力依存性. 実測値および回路モデルから算出した値との比較. RF 周波数 160 MHz, 流量 0.1 sccm.

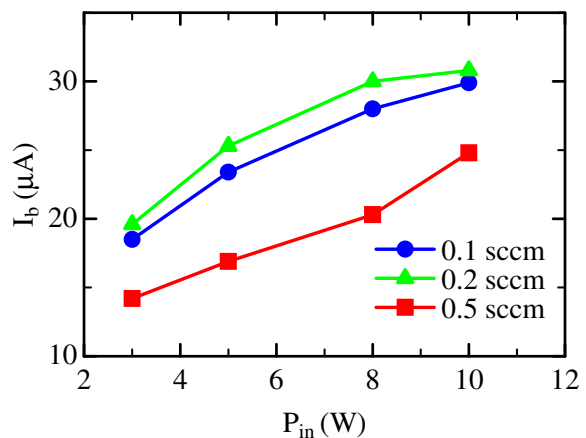


図 13: ビーム電流の RF 電力依存性. RF 周波数 160 MHz, 流量 0.1, 0.2, 0.5 sccm.

分かった. 容量結合を考慮した本稿のモデルの有用性が確認できた.

5. 推進特性評価

5.1. ビーム電流測定

図 10 に見られた H モード, E モードの放電のうち, グリッド電流が測定可能であったのは E モードのときのみであった. 放電が大きな発光を呈している H モードの場合には, グリッド電圧を印加すると電流値が安定しない, 放電が不安定になるといった問題が生じたためである.

図 13 に RF 周波数 160 MHz, スクリーニンググリッド電圧 $V_s = 1050 \text{ V}$, アクセルグリッド電圧 $V_a = -200 \text{ V}$ 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することが分かった. イオンの引き出しに最適な流量があることが示唆された.

5. 2. 推進性能の見積もりと考察

図 13 のうち, 0.2 sccm, 10 W の条件において, 推進性能を算出した (表 1). 電子密度が低い E モード放電であることが起因して低い推進性能が得られていると考えられる. 今後, H モード放電において安定的な測定, プラズマ維持をさせることが課題である.

表 1: 推進性能代表値

rf power input (W)	11
thrust (μN)	1.8
specific impulse (s)	10
propellant efficiency (%)	0.24
power efficiency (%)	8.3×10^{-4}

6. まとめ

本研究は超小型高周波イオン推進機に対して外部回路を含めた回路モデルを構築し, 実機実験により特性の評価を行った. まず, 超小型高周波イオン推進機のイオン源の外部回路を含めた回路モデルを構築し, 周波数特性を調査した. その結果, 低周波数 (< 20 MHz) で誘導結合による電力供給が支配的となり, 高周波数 (> 20 MHz) で容量結合による電力供給が支配的となることが分かった. 低周波数において必要な電源電力は大きくなり (> 10 W), 低電力で高プラズマ密度を得るためには 200 MHz から 300 MHz の周波数での放電が適していることが分かった. また, 実機においてイオン源の電気的特性, プラズマ密度測定を行い, モデルの妥当性を確認した. プラズマ密度測定を行い, 0.02 sccm, 260 MHz, 5 W の放電で $7.0 \times 10^{16} /\text{m}^3$ のプラズマ密度が得られることが分かった. グリッド電流を測定することにより推進性能が得られたが, プラズマ密度が低いことから実用的な性能値は得られなかった.

今後の課題としては, 回路モデルにおいては高周波で容量結合での回路損失を考慮すること, 実機においては高密度プラズマを安定的に得る条件を得ることが挙げられる.

参考文献

- 1) Y. Takao, N. Kusaba, K. Eriguchi, and K. Ono: J. Appl. Phys. **108** (2010) 093309.
- 2) 鷹尾祥典, 江利口浩二, 斧高一: ICP プラズマ源を用いたマイクロイオンスラスターの PIC/MC モ

デル構築, 第 53 回宇宙科学技術連合講演会講演集, 2009, pp. 892-897 (JSASS-2009-4196).

- 3) 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講演集, 2012 (JSASS-2012-4439).
- 4) 菅井秀郎: 応用物理 **63** (1994) 559.
- 5) M. A. Lieberman and A. J. Lichtenberg, *Principles of Plasma Discharges and Materials Processing* (New York: Wiley, 2005).
- 6) H. Yoshiki: Jpn. J. Appl. Phys. **39** (2000) 598.
- 7) F. Iza, and J. Hopwood: Plasma Sources Sci. Technol. **11** (2002) 229.