

令和 6 年 5 月 24 日現在

機関番号：34316

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2021～2023

課題番号：21K04485

研究課題名（和文）狭領域プラズマ計測手法の確立と超小型RFプラズマスラスタへの応用

研究課題名（英文）Narrow region plasma measurement method and application to miniature RF plasma thrusters.

研究代表者

大塩 裕哉（Oshio, Yuya）

龍谷大学・先端理工学部・助教

研究者番号：80711233

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,200,000円

研究成果の概要（和文）：超小型衛星用の推進機として超小型プラズマスラスタの開発が進められているものの、数mmサイズとなる狭領域のプラズマ特性の計測が課題であった。本研究では、超小型RFプラズマスラスタを対象として、狭領域のプラズマの輝線輝度分布を計測する光学計測システムを開発し、狭領域のプラズマ特性の理解に向けたプラズマ分布計測を実施した。10 mm×10 mmの領域を0.026 mmの空間分解能で相対的な電子数密度ならびに中性粒子密度分布を計測することに初めて成功した。更に、狭領域特有の放電管内のプラズマ現象を確認し、放電管長さや径に対しての影響を明らかにし、超小型プラズマスラスタの最適化に向けた知見を得た。

研究成果の学術的意義や社会的意義

超小型衛星の打ち上げ数は年々増加しており、それに伴い超小型スラスタへの要求も高まっている。特にプラズマスラスタの性能向上は超小型衛星ミッションの高度化に重要である。超小型プラズマスラスタの対象となる狭領域のプラズマ現象は計測の難しさから未だ未解明な部分が多い。本研究の成果であり、狭領域のプラズマ計測手法を応用することで、狭領域のプラズマ現象の解明、それに伴う超小型プラズマスラスタの性能向上へつながることが期待できる。

研究成果の概要（英文）：Miniature plasma thrusters have been developed as propulsion systems for miniature satellites. The one of the issue of them has been to measure the plasma characteristics in a narrow region, which can be several millimetres in size. In this study, an optical measurement system was developed for a miniature RF plasma thruster of 3.4 mm diameter to measure the plasma distribution by measuring the emission line brightness distribution in narrow plasma regions for understanding the plasma characteristics in narrow regions. The relative electron number density and neutral number density distribution of a 10 mm x 10 mm region with a spatial resolution of 0.026 mm was successfully measured for the first time. In addition, the plasma phenomena in the discharge tube peculiar to the narrow region were observed and the effects on the length and diameter of the discharge tube were revealed. From these results provided knowledge for the optimisation of miniature plasma thrusters.

研究分野：航空宇宙工学

キーワード：電気推進 プラズマ計測 超小型衛星

1. 研究開始当初の背景

1 辺 10 cm 級の超小型人工衛星は政府機関や大企業に限らず、中小規模の企業や大学でも設計・製作が可能であり、宇宙開発のハードルを大きく下げることには貢献している。しかし、衛星サイズと発電能力の制約から推進機(スラスタ)の搭載は遅れている。スラスタを搭載することで、軌道遷移による投入軌道の制約の改善や、月探査などの野心的なミッションなど利用範囲を大きく広げることが可能となる。その中で、プラズマを生成、高速に噴射することで推力を得るプラズマスラスタは燃費性能が高く、超小型人工衛星に搭載する試みが進められ、いくつかの宇宙実証が行われてきた。今後の超小型人工衛星の利用範囲の拡大に対応するために、超小型プラズマスラスタの更なる高性能・高信頼性化が要求されている。

プラズマスラスタの高性能化には、効率よくプラズマを生成し加速する必要がある。そのため、プラズマの状態の把握と現象の理解が不可欠である。しかし、超小型プラズマスラスタでは主要なプラズマ領域が数 mm 以下の狭領域となる。既存の主要な計測法であるプローブ計測や光学計測では、このような狭領域のプラズマの空間的特性は十分に得られず、限られたデータからの推測を基に研究が進められている。数値解析の精度も向上してきたが、実験データとの校正は必要不可欠である。そのため、狭領域でのプラズマの空間的分布を計測可能な手法を確立することで研究開発を大きく前進させることが期待される。超小型プラズマスラスタの1つとして、電子源が不要な簡便な構造かつ、定常動作可能で高い信頼性が期待できる高周波(RF)プラズマスラスタがある(図1)。RFプラズマスラスタは、高周波プラズマを生成し、磁気ノズルという発散磁場を用いてプラズマを加速排気する。RFプラズマスラスタの性能は、磁場形状やRFアンテナ位置などに対して高い感度を持つことが中型のスラスタにおいて明らかになっている。しかし、超小型スラスタにおいては限られた領域の計測しか行われず、どのようにプラズマが生成され加速されているかは明らかになっておらず、性能最適化に向けた指針は得られていない。

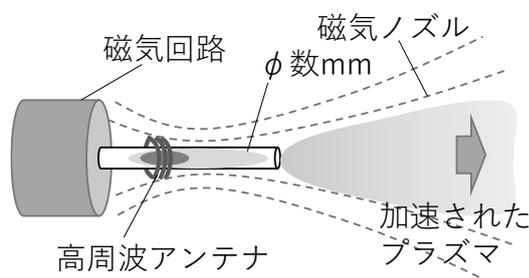


図1 超小型 RF プラズマスラスタの概略図。

2. 研究の目的

本研究では、超小型プラズマスラスタのプラズマの空間特性を計測可能な計測手法の確立と超小型 RF プラズマスラスタの狭領域でのプラズマ特性調査を行うことにより、以下を研究目的とする。

1. 超小型プラズマスラスタの内部ならびに近傍でのプラズマ空間分布特性を計測可能な新しい光学的手法を確立する。
2. 上記の手法を用いて、超小型 RF プラズマスラスタのスラスタ内外のプラズマ計測を行い、プラズマ特性を明らかにし、性能最適化のための指針を得る。

3. 研究の方法

3.1 狭領域光学的プラズマ計測

プラズマの計測は、電圧を印可した金属電極を挿入して流れる電流特性を利用するプローブ計測が広く普及しているが、数 mm サイズの狭領域への挿入はサイズ的に困難である。更に空間分布の取得はより難しい。本研究では、光学的手法での相対電子数密度ならびに相対中性粒子密度を計測した。

電子のエネルギー分布が、マクスウェル分布であるとすると RF プラズマスラスタのプラズマ条件下では CR モデルより中性粒子の発光である ArI と一価イオンの発光である ArII の基線輝度強度はそれぞれ

$$I_{ArI}(i \rightarrow j) \propto A_{ij} N_{i_i} \propto n_0 S_{i_i}(T_e, n_e), \quad (1)$$

$$I_{ArII}(i' \rightarrow j') \propto A_{i'j'} N_{i'j'} \propto n_e S_{i'j'}(T_e, n_e), \quad (2)$$

と表される。 I_{ArI} 、 I_{ArII} はそれぞれ ArI と ArII の輝度強度である。 T_e の影響が小さいとするとそれぞれの輝度強度と電子数密度 n_e と中性粒子数密度 n_n との関係は

$$I_{ArI} \propto n_0 n_e, \quad (3)$$

$$I_{ArII} \propto n_e^2, \quad (4)$$

と表すことができる。ArI と ArII の 2 波長の 2 次元輝度強度分布を計測することで、電子数密度と中性粒子数密度の 2 次元分布を求めることができる。

計測装置の概略図を図 2 に示す。真空チャンバ内の RF プラズマスラスタを壁面のビューポートから撮影を行う。スラスタから計測装置までの距離は 350 mm とした。計測システムは、対物レンズ、ビームスプリッタ、ArI と ArII に対応するバンドパスフィルタ、2 台のカメラから構成される。プラズマからの発光は対物レンズで拡大され、ビームスプリッタで 2 つに分けられ、それぞれのバンドパスフィルタを通してカメラで撮影される。ArI と ArII はそれぞれ 420 nm と 488 nm を採用した。両波長は、事前に分光計測を行い目的の輝線の発生と、フィルタの半値幅内に有意な強度の対象外の輝線は存在しないことを確認している。このシステムで計測されるデータは視線方向の積分値である。そこで、プラズマ流を軸対称と仮定し Hansen 法を用いて、PyAbel という Python パッケージを利用して逆アーベル変換を行った。得られたデータの妥当性は、スラスタ下流部 10 mm 位置に設置したプローブ計測結果と比較して確認した。

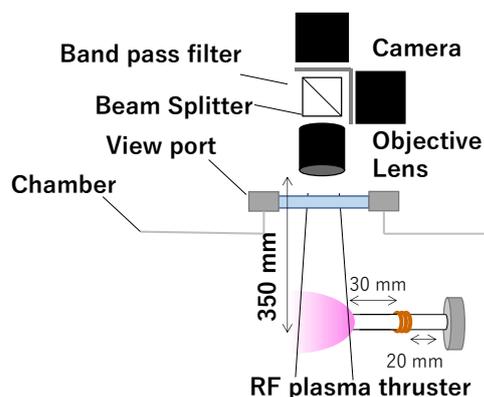


図 2 光学系と超小型 RF プラズマスラスタ。

3.2 RF プラズマスラスタの計測実験

3.2 RF プラズマスラスタの計測実験

実験装置の概略図を図 3 に示す。計測は長さ 700 mm、直径 400 mm の真空チャンバを用いて行われた。チャンバ内部に RF プラズマスラスタを設置している。推進剤は Ar を用いてマスフローコントローラを通して流量調整をしている。高周波の周波数は 60 MHz で最大 200 W を印可可能である。チャンバ横の窓から光学系で輝線輝度分布を取得する。

超小型 RF プラズマスラスタは、放電管と RF アンテナと磁石からなるシンプルな構造としている。図 4 に基準サイズである長さ 60 mm、内径 3.4 mm の RF プラズマスラスタの概略図を示す。RF アンテナには、3 ターンのループアンテナを採用している。本研究では、放電管長さを 40 から 80 mm、放電管内径を 2 mm から 6 mm の範囲で変えた際のプラズマ分布を取得して超小型 RF プラズマスラスタの特性を調査した。光学計測の妥当性検討のために、スラスタ下流 10 mm 位置に 4 本のプローブを設置し、プラズマの計測を行い光学計測結果との比較を行う。

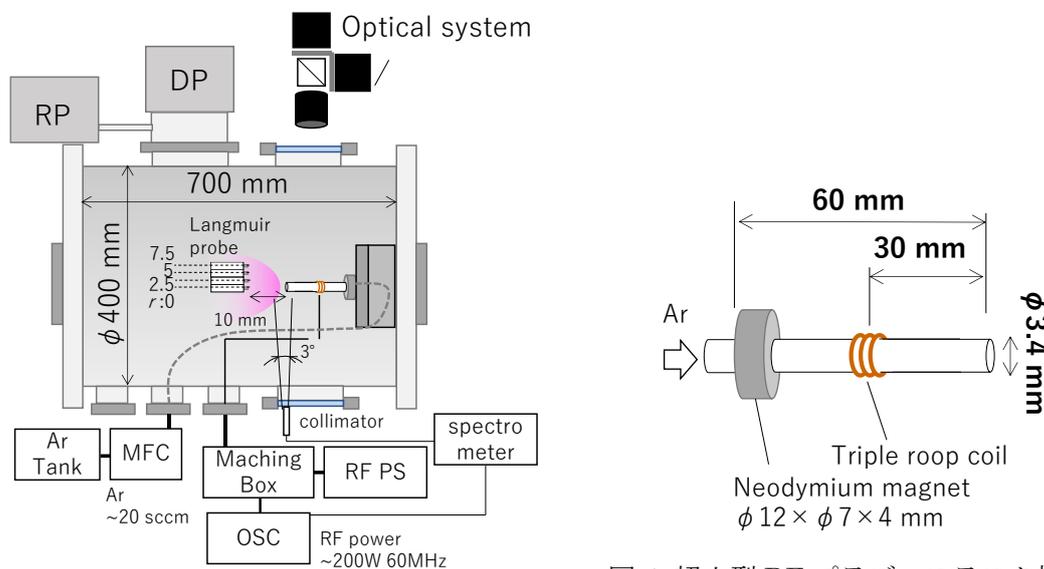


図 3 実験装置概略。

図 4 超小型 RF プラズマスラスタ概略。

4. 研究成果

4.1 狭領域のプラズマ計測手法の確立

図 5 に本研究で開発した 488 nm での RF プラズマスラスタの 2 次元輝線輝度分布を示す。RF プラズマスラスタの下流側を示しており、左の暗い領域が RF アンテナ、発光している管が放電管である。プラズマは左側から右側へと流れている。計測結果の妥当性検討のために、放電管下流のプルーム領域のスラスタ出口から軸方向 10 mm×径方向 10 mm の範囲の計測結果について示す。図 6 に相対電子数密度と相対中性粒子数密度の 2 次元分布を示す。z=0 mm の r=0-1.7 mm が放電管出口であり、r=0 mm を対称軸とした軸対称 2 次元の断面図となっている。放

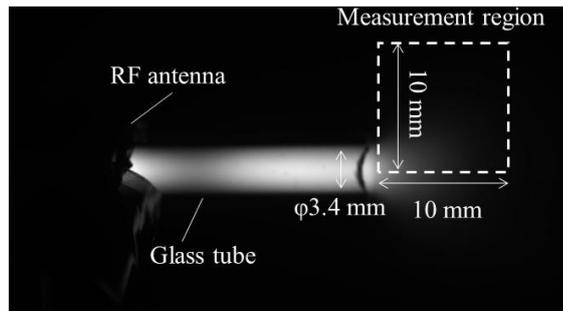


図5 ArII の2次元輝線輝度分布。
(200 W、488 nm)。

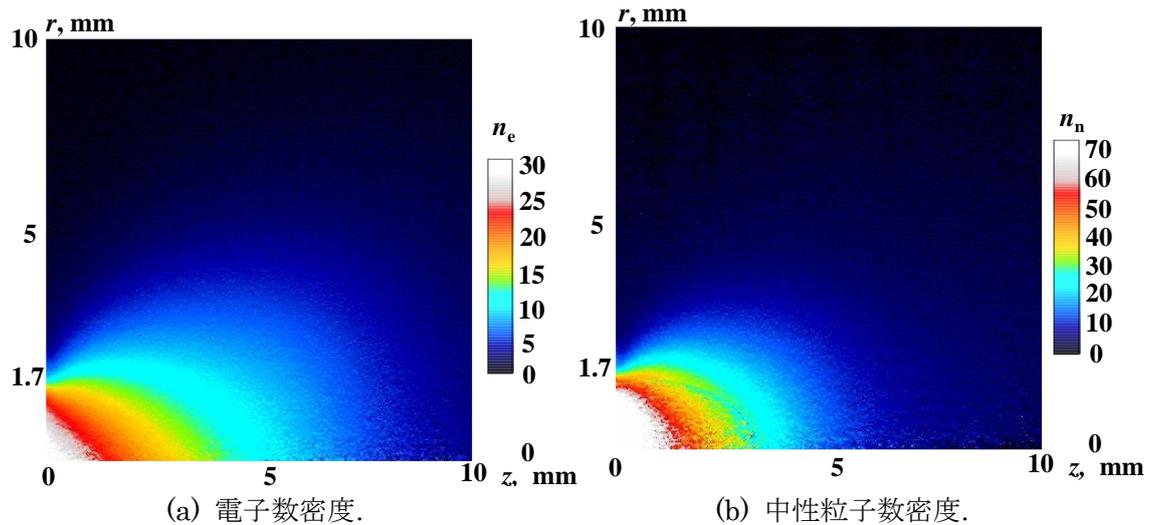


図6 電子・中性粒子数密度の相対2次元分布。

電管出口近傍の密度が高く、プラズマ流が下流へと広がって密度が低下していく計測が計測されている。

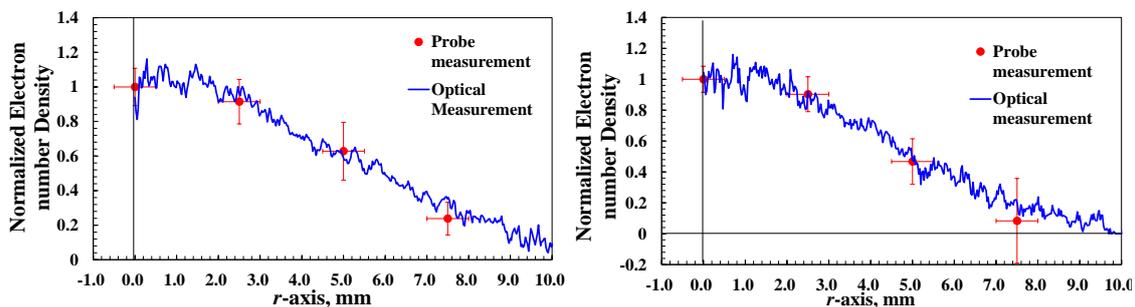
次に、プローブ計測との比較を行った結果を図7に示す。プローブ計測は、 $z=10$ mm 位置に $r=0, 2.5, 5.0, 7.5$ mm に配置いた電極を用いて計測した。 $z=10$ mm 位置での光学計測とプローブ計測による相対電子数密度の径方向分布を図7(a)、(b)に示す。(a)はRF電力200 W、(b)は150 Wの結果となっている。青い線が光学計測で得られた相対電子数密度、赤い点が、プローブ計測で得られた電子数密度である。どちらも中心軸上の値で規格化されている。エラーバーは時間変動の標準偏差を表している。図7(a)、(b)を見ると光学計測とプローブ計測の相対値はよく一致していることが分かる。図7(c)には $z=0$ mm 位置でRF電力を変えた際のプローブ計測と光学計測結果を示している。プローブ計測が行われた70-200 Wまで両者はよく一致している。この結果より、本研究で開発した光学計測手法は、狭領域の相対電子数密度分布の妥当性が示され、mmサイズの狭領域のプラズマ分布を計測可能なシステムが確立されたといえる。本計測手法は、空間分解能0.026 mmを達成している。

4. 2 超小型RFプラズマスラストのプラズマ計測

本研究で開発した非接触の狭領域プラズマ計測手法を用いて、超小型RFプラズマスラストの放電管内外のプラズマ計測を実施した。超小型RFプラズマスラストの課題の1つはプラズマの生成領域の制御ができていないことが挙げられる。図8に相対電子数密度分布の流量依存性を示す。図8(a)や(b)のような低流量ではプラズマはアンテナより上流側のみに生じており、下流側には存在しない。図8(c)の大流量条件において下流域でプラズマが生成され多くのプラズマが下流に排気されている。高い性能を得るためには、後者の下流域でのプラズマ生成が適している。本研究では、図8を1例として10-200 Wの電力と0.3-10 sccmの流量おいてのプラズマ分布を調査し、プラズマ生成位置が電力には依存せず、流量に影響を受けることを明らかにした。

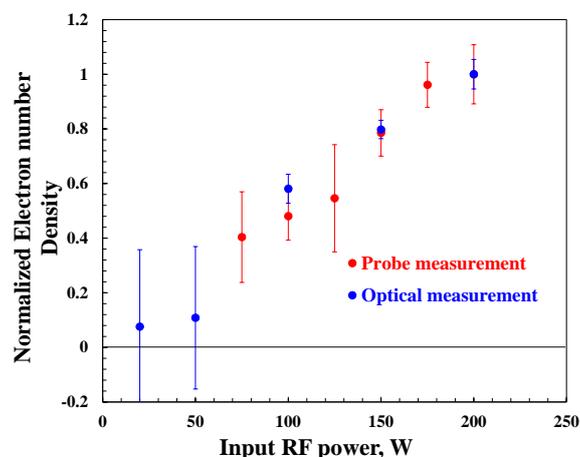
図9には放電管長さを40、60、80 mmの3条件で変化させた際の相対電子数密度分布を示す。本研究では、放電管の径や長さなどの形状が放電特性に与える影響を調査した。図9はすべて5 sccmの結果であり下流でプラズマ生成されている条件である。スラスト外

へ廃棄される電子数密度を比較すると、60 mm が最も高くなっており短い 40 mm においても、80 mm においても電子数密度は低下している。これは、適切な放電管長さが存在していることを示している。本研究の結果より、超小型 RF プラズマスラスタの設計最適化に向けた知見を得ることができた。



(a) 200 W.

(b) 150 W.



(c) RF 電力を変えた際の電子数密度の比較。

図 7 プローブ計測結果との比較。

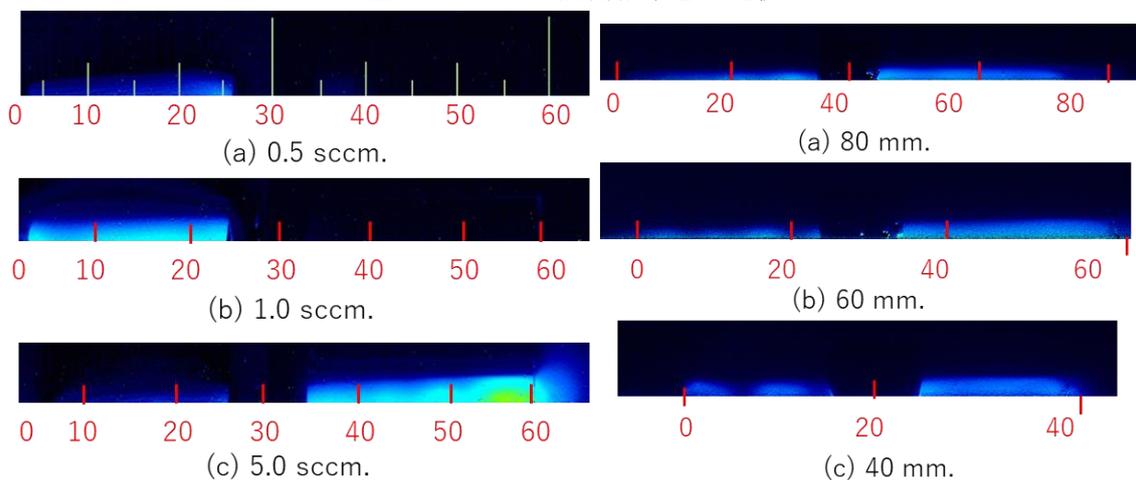


図 8 相対電子数密度分布(流量依存)。

図 9 相対電子数密度分布(長さ依存)。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計1件（うち査読付論文 1件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 Yuya OSHIO, Rin HIWATASHI, Hiroyuki NISHIDA, Hirotaka OTSU	4. 巻 -
2. 論文標題 Plasma Distribution Measurement of a Miniature RF Plasma Thruster by Narrow-band Imaging	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Journal of Evolving Space Activities	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計3件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 1件）

1. 発表者名 大塩裕哉, 清岡優翔, 大津広敬
2. 発表標題 超小型RFプラズマスラスタの放電管内外のプラズマ特性
3. 学会等名 第6回宇宙科学技術連合講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 大塩 裕哉 吉田 翔一 樋渡 倫
2. 発表標題 超小型 RFプラズマスラスタの動作特性に関する研究
3. 学会等名 第6回宇宙科学技術連合講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Yuya OSHIO, Rin HIWATASHI, Hiroyuki NISHIDA and Hirotaka OTSU
2. 発表標題 Plasma Distribution Measurement of Miniature RF Plasma Thruster
3. 学会等名 33rd International Symposium on Space Technology and Science (国際学会)
4. 発表年 2022年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
--	---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------