

令和 3 年 5 月 31 日現在

機関番号：33910  
研究種目：若手研究  
研究期間：2019～2020  
課題番号：19K14683  
研究課題名(和文)RFプラズマスラスタにおける中性粒子供給位置によるイオン・中性粒子挙動の解明  
  
研究課題名(英文)Clarification of ion and neutral particle behavior in RF plasma thruster depending on the neutral particle supply position  
  
研究代表者  
桑原 大介 (Kawahara, Daisuke)  
  
中部大学・工学部・講師  
  
研究者番号：60645688  
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)：高周波プラズマを用いる宇宙用電気推進機である高周波プラズマスラスタの性能向上研究のため、推力向上が報告されている中性粒子供給法におけるプラズマの振る舞いを把握し、機解明を行う必要がある。このため、イオン・中性粒子の速度分布関数計測が可能なレーザー誘起蛍光法(LIF)、電子密度分布計測が可能なマイクロ波干渉計測といった複数の計測を同時に実施できる実験環境整備を行った。LIFについては計測感度を従来比で10倍程度に高め、計測速度の向上による空間計測を可能とし、マイクロ波計測においては安価かつ取り扱いが容易な送受信機の方式を開発し、多チャンネル計測による空間同時計測を可能とした。

#### 研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究は電気推進機の性能向上を大目的としているが、高周波プラズマに限らず多くのプラズマ応用研究においてプラズマを構成する粒子である電子、イオン、中性粒子の空間分布計測は極めて重要だが、イオン、特に中性粒子計測は困難であり、これらの計測を備えた装置は多くない。また、これらの計測器が一つの装置の一点を計測できるように整備されている例は、多くの計測器を備える大型核融合装置でも例がない。本研究ではこれらの計測器を一つの装置において、同一点で同時に計測でき、また空間分布計測が可能なものとして利用できる方法を研究したもので、他のプラズマ研究でも大いに役立つものと言える。

研究成果の概要(英文)：In order to improve the performance of Radio-frequency plasma thrusters, it is necessary to understand the behavior of plasma using the neutral fueling method, which has been reported to improve the thrust.

For this purpose, we have developed an experimental environment in which multiple measurements can be performed simultaneously, such as laser induced fluorescence (LIF), which can measure the velocity distribution function of ions and neutrals, and microwave interferometry, which can measure the electron density profile.

In the LIF method, the measurement sensitivity has been increased by a factor of about 10 compared to the conventional method, enabling spatial measurement by increasing the measurement speed. In the microwave measurement method, an inexpensive and easy-to-handle transmitter/receiver system has been developed, enabling simultaneous spatial measurement by multi-channel measurement.

研究分野：プラズマ工学、電気推進機工学、マイクロ波工学

キーワード：電気推進機 高周波プラズマ プラズマ工学 レーザー誘起蛍光法 マイクロ波干渉計 中性粒子

### 1. 研究開始当初の背景

現在、イオンエンジンやホールスラスタ等の電気推進機の実用化が進んでおり、宇宙探査機や商用人工衛星等で利用が進んでいる。しかしながらこれらの推進機はプラズマと接触する電極を有するため、寿命制限、推力制限があり大推力化や小型化には困難が伴う。この解決のため考案された、非接触電極(アンテナ)からの高周波電力によりプラズマ生成・加速し排気する RF プラズマスラスタは高効率・大推力・長寿命であることが求められる深宇宙探査機や有人宇宙機用として特に期待されている。しかしながら、RF プラズマスラスタの推進性能は推力、比推力、推力電力比などでイオンエンジン、ホールスラスタなどと比べ 2 倍から 3 倍の性能向上が必要であり、様々な研究が行われている。

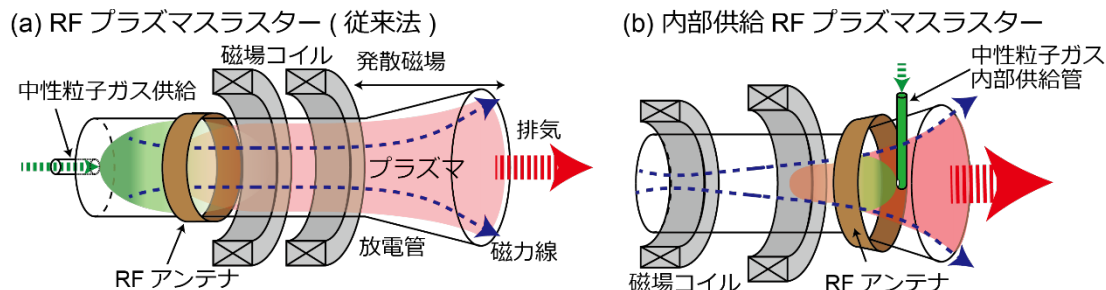


図1 RF プラズマスラスタの原理図 (a)従来法, (b)内部供給法

これまでアンテナや磁場形状の最適化研究が広く行われてきたが、近年ガス供給法の改善による性能向上の可能性が研究代表者含め国内外の研究から示唆されており、プラズマ中心や放電管下流部における中性ガス供給法は従来の放電管上流からのガス供給と比較して約 1.5 倍の推力増加が確認されている。しかしながら推力増加の機構については理解が進んでおらず、この解明は急務と言える。これまでの研究では主に静電・マッハプローブ計測による電子密度・電位分布から現象の観測が行われてきたが、本件のような中性粒子に掛かる現象においては中性粒子・イオン・電子というプラズマを構成する全ての粒子の分布関数が得られる計測が必要不可欠となる。しかしながら、これらの粒子の密度や流速をプラズマに影響を与えず空間分布する計測は困難なため、一つのプラズマ装置に全粒子の諸量を計測する装置が整備された例はほぼ見られなかった。

### 2. 研究の目的

上述の考えから、中性粒子・イオン・電子というプラズマを構成する粒子全ての密度・速度分布関数を空間分布計測することが中性粒子供給法の特長改善に繋がると考え、これらの計測系の開発を行い、RF プラズマスラスタの性能向上を目指すことを目的とする。

本課題では、これらの計測のために 2 つの非接触計測器を用いる。中性粒子・イオンの速度分布関数の空間分布取得のためにレーザー誘起蛍光(Laser Induced Luminescence: LIF)法を用いる。LIF 法はプラズマ中のイオン、中性粒子等の各励起準位に合った波長のレーザーを照射して標的粒子を励起し、脱励起光(LIF)を観測する方法である。粒子の励起波長は速度・温度によるドップラー効果を受けるため、励起レーザーの波長を掃引して LIF 強度を計測すれば、照射レーザー軸方向の速度分布関数が得られる。特徴として、透明な真空窓・放電管を用いれば光学系などを大気中に置くことが出来るので、プラズマに影響を与えない非接触計測と出来ること、マッハプローブのような相対速度計測と異なり絶対値計測が可能となる点が挙げられる。照射レーザーをプラズマの径・軸方向の 2 方向に設置してそれぞれ走査を行い、受光光学系をレーザー照射方向に掃引またはアレイ化して設置すれば、プラズマ中の速度分布関数の 3 次元計測が容易に行える。

一方、電子密度空間分布計測については多チャンネルマイクロ波干渉計を用いる。マイクロ波干渉計はプラズマ中でマイクロ波の波長が変わることを利用したもので、照射アンテナからマイクロ波をプラズマに照射し、透過波を受信アンテナで受信し、その位相変化から電子密度を算出するものである。特徴として、マイクロ波が石英放電管を透過できることを利用した非接触計測であること、

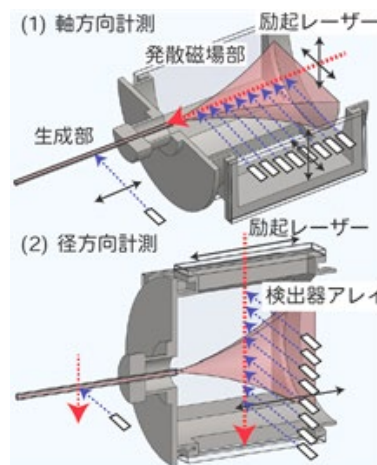


図2 多チャンネル LIF 法

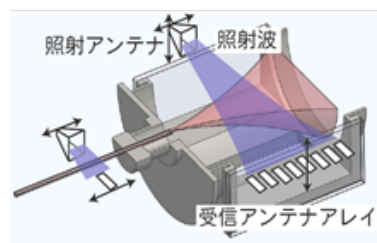


図3 多チャンネルマイクロ波干渉計

密度の絶対値計測が可能なことである。また、電子密度は視線積分されているが、多視線を用いた断面再構成法を用いて局所電子密度とすることが可能である。

これらの他、中性粒子の局所供給法として開発を進めている超音速ガスパフによる中性粒子ガスビーム形状計測としてシュリーレン法やシャドウグラフ法の開発も併せて進め、電気推進機研究のための計測環境構築のための研究を行う。

### 3. 研究の方法

#### (1) レーザー誘起蛍光法による粒子流速分布計測

レーザー誘起蛍光法は計測対象の粒子の吸収波長のレーザーを照射し、励起された粒子からの蛍光を観測し、その強度から粒子の存在量を計測する方法である。計測粒子が速度を持っていた場合に吸収波長がドップラーシフトするため、照射レーザーの波長を掃引し、波長ごとの蛍光強度を計測することでレーザー照射軸における速度分布関数が得られ、その分布から粒子流速が得られる。

この計測の難しい点は、蛍光と同じ波長でプラズマが発光しており、この中からレーザーで励起された微弱な蛍光を分離して検出しなければならないことである。このような微弱光の計測として一般的な手法に用いられる方法はチョッピング法で、励起レーザーを高速にオンオフすることで励起光も交流成分を持つこととなり、直流の背景光から交流の蛍光成分を分離するものである。従来は励起レーザーを電気光学素子を用いて 455 kHz でチョッピングして照射し、マルチピクセルフォトンカウンタ (MPPC) により検出した発光をオシロスコープで計測し、その波形を 75 ms のプラズマ放電において 16 回程度積算・平均処理したのちに 455 kHz 成分を高速フーリエ変換 (FFT) により検出し、励起レーザー波長を変化させながら蛍光強度を計測して速度分布関数を得ていた。この方法では 1 点の速度分布関数を得るのに 15 分程度掛かってしまうため、空間分布計測には膨大な時間が掛かってしまう問題があった。

このため、検出法を改善して計測速度を向上させ分布計測を可能にする必要があり、検出器や回路の開発を行った。具体的には図 3 に示す MPPC 部、低雑音オペアンプを用いたアンプ部、ロックインアンプ部である。図 3 は検出光を電気回路に変換する MPPC をチューブ光学系に装着する光学部品と、MPPC からの高速パルスを高損失で伝送する回路である。アンプ部は後続のロックインアンプに十分な信号を伝送するため 40~60 dB 程度の増幅率が求められ、初段アンプは十分に低雑音である必要がある。このため、低雑音オペアンプによる 455 kHz アンプを製作した。ロックインアンプは対象の周波数・位相成分の交流信号を直流信号として出力する回路で、これを用いることで従来の FFT 計測では難しかった 75 ms の放電の中でレーザー波長を掃引する計測が可能になる。将来の検出器多チャンネル化を考慮し、ロックインアンプ回路は内製で整備した。

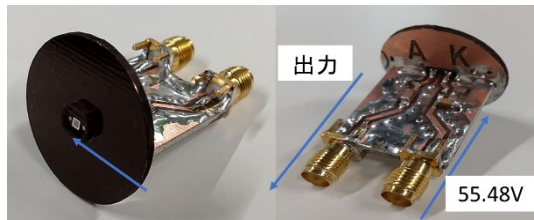


図 4 MPPC および出力回路

#### (2) マイクロ波干渉計による電子密度分布計測

マイクロ波干渉計はプラズマの電子密度により電磁波の屈折率が変化することを利用し、電磁波の位相変化から電子密度を計測する計測器である。利点としては電子密度の絶対値が得られること、プラズマと非接触で計測できることが挙げられる。静電プローブ計測では電子密度絶対値の計測が難しく、プラズマとの接触は避けられない。欠点としては RF プラズママスターの電子密度において干渉計を行う場合、電磁波の周波数は数十 GHz のマイクロ・ミリ波帯となるが、この帯域の発振器やミキサ、アンプ、検出器等のマイクロ波回路素子は極めて高価で、伝送のための導波管は真空容器内での取り回しが難しい。以上の性質から干渉計は電気推進機計測ではあまり用いられてこなかった。この問題の解決のため、代表者は安価かつコンパクトなマイクロ波モノリシック IC (MMIC) のミキサ・通倍器を利用したコンパクトな送受信機を用いた通倍スーパーヘテロダイン式位相検出システムを開発してきた。このシステムは数十 GHz の扱いが難しい高周波数帯の信号の区間を送受信機間のみとし、送受信機までの信号は同軸線でフレキシブルに伝送でき、増幅、ミキシング等の信号処理も容易な十数 GHz とするもので、ヘテロダイン方式と直交位相検出器による高感度な密度計測が可能なものである。また、送受信機は真空容器内に設置可能なものとして開発しているため、観測のための大型観測窓も不要である。送受信機は MMIC 以外すべて安価に内製できるもので、多チャンネル計測のための送受信機セットの開発を行った。

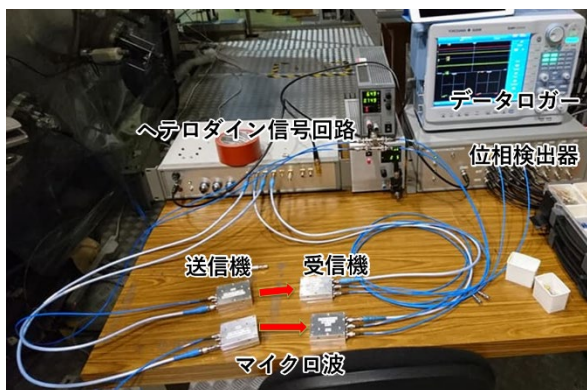


図 5 70-80 GHz マイクロ波干渉計(2 ch)

### (3) シュリーレン法による中性粒子流分布計測

代表者はRFプラズマスラスタへの中性粒子供給法として、ラバールノズルより噴射した発散角が極めて狭い中性粒子ガスビームを用いる超音速ガスパフ法を提案し、その開発研究を行っているが、このビームは圧力が数Pa程度、直径数mm～数cmの局所流であり、既存の真空・圧力計での空間分布計測は不可能である。これまでに自製の小型ピラニゲージによる計測などを行ってきたが計測加減が0.1～1 Pa程度であること、単点計測なので空間分布計測に時間が掛かるなどの難点があった。このため、画像的に計測が可能なシュリーレン法によるビーム分布計測を試みた。図5はシュリーレン法の原理図である。点光源からの光を凹面鏡で平行光に変換して計測対象のガスビームを通す。透過光を凹面鏡で集光し、焦点にナイフエッジを置き、ガスビームの濃淡による屈折率分布で屈折した非平行光成分を遮蔽したのちにカメラで撮像する。これにより、屈折率分布が光の明暗として観測できる。本手法は熱による大気揺らぎや気流の計測としてよく用いられるが、 $10^{-4}$  Pa程度の高真空下で数Pa程度のガスビームに対して計測が試みられた例は無い。問題として、真空容器外に設置した光源、凹面鏡、カメラから真空窓を通して真空容器内を観測する際の真空窓の歪みによる像の乱れが考えられるが、この効果の有無と実際にガスビームが計測できるかの試験を行った。

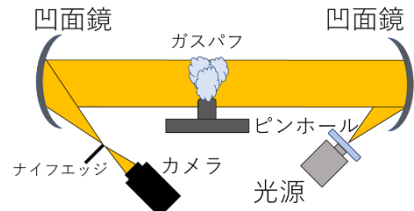


図6 シュリーレン法原理図

## 4. 研究成果

### (1) レーザー誘起蛍光法による粒子流速分布計測

製作した検出装置と従来型装置を用いて検出感度の比較実験を行った。図7は横軸が積算回数、縦軸が信号雑音比である。新型と旧型で10 dB程度感度を向上することに成功した。新検出回路では積算無しでもS/N比が15 dB程度となっており、積算無しでの計測も可能となっている。今後はロックインアンプによる直流信号としての計測やレーザー波長の掃引計測、また光学系側は流速3軸計測および空間3軸計測が可能な真空容器内の照射・受光光学系の構築を進める。

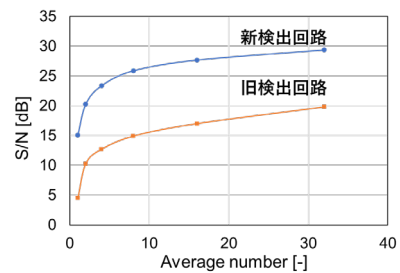


図7 LIF 検出感度

### (2) マイクロ波反射計による電子密度分布計測

RFプラズマスラスタの $10^{17} \sim 10^{19} \text{ m}^{-3}$ 程度の電子密度に対応するための70～80 GHz帯、空間分布のために8チャンネルの干渉計計測が可能な送受信機の開発を行った。送受信機はW60×D50×H20 mm、計測高周波の入出力はWR-15導波管、局発信号、中間周波数信号の入出力はSMAコネクタを使用している。既に本送受信機を使用した真空容器内での4チャンネルプラズマ計測実験を実施し、プラズマ放電下でも問題なく動作することが確認できている。



図8 70-80 GHz 送受信機

### (3) シュリーレン法による中性粒子流分布計測

図8に示す真空容器内に設置した超音速ガスパフ装置のガス流を計測するシュリーレン光学系を構築し、背景圧を大気圧から0.1 Paまで変化させて計測試験を行った。図9は撮像した結果である。大気圧においては乱流状にガスビームが発展しているが、背景圧1 kPaにおいてはビームが直線状に集束して流れていることが確認できた。この結果は小型ピラニゲージにより計測した結果と一致しており、シュリーレン計測によるガスビーム計測が可能であることが示された。しかしながら背景圧1 Paにおいては感度が落ちてしまい十分なSNが得られなくなった。ピラニゲージの計測では背景圧 $10^{-3}$  Paにおいても集束流が観測されたため、シュリーレン計測の感度が落ちていることが考えられる。今後はよりコントラストが高く取れると考えられるレーザーダイオード光源を用いたシャドウグラフ法の適用などを試みる。

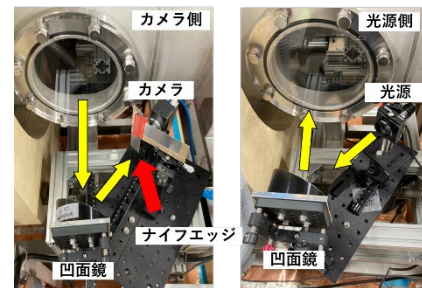


図9 シュリーレン計測装置

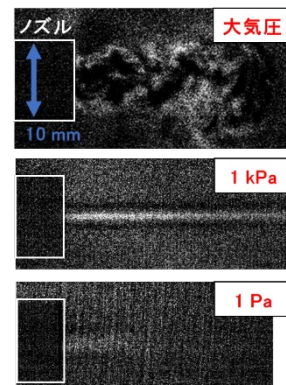


図10 シュリーレン計測結果

以上のように各計測器の整備は進んでおり、新たに導入予定の直径750 mm長さ1.5 mの電気推進機試験用真空容器において統合して設置できるよう整備を進めている。

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計2件（うち査読付論文 2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 Shinohara S., Kuwahara D., Ishigami Y., Horita H., Nakanishi S.	4. 巻 91
2. 論文標題 Extremely small-diameter, high-density, radio frequency, plasma sources and central gas feeding for next-generation electrodeless plasma thrusters	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Review of Scientific Instruments	6. 最初と最後の頁 073507 ~ 073507
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1063/5.0003387	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 -

1. 著者名 Kuwabara Naoya, Chono Masatoshi, Yamamoto Naoji, Kuwahara Daisuke	4. 巻 37
2. 論文標題 Electron Density Measurement Inside a Hall Thruster Using Microwave Interferometry	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Journal of Propulsion and Power	6. 最初と最後の頁 491 ~ 494
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.2514/1.B38163	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4件（うち招待講演 1件/うち国際学会 2件）

1. 発表者名 D. Kuwahara, T. Furukawa, K. Amma, Y. Ishigami, H. Horita, and S. Shinohara
2. 発表標題 Studies on Helicon Plasma Thruster and Measurement Methods
3. 学会等名 36th Internatinal Electric Propulsion Conference (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 高周波プラズマスラスタにおける中性粒子供給位置の検討
2. 発表標題 桑原大介, 古川武留, 石上雄一, 宮澤順一, 篠原俊二郎
3. 学会等名 第36回プラズマ核融合学会年会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 D. Kuwahara, T. Furukawa, Y. Ishigami, J. Miyazawa, T. Mutoh, and S. Shinohara
2. 発表標題 Study of advanced gas feeding methods for radio-frequency plasma thruster
3. 学会等名 4th Asia Pacific Conference on Plasma Physics (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 桑原大介, 服部公央亮, 石上雄一, 篠原俊二郎, 村瀬尊則, 宮澤順一, 坂本隆一, 小林進二, 竹田陽平, 吉川正志, 中嶋洋介
2. 発表標題 超音速ガスパフを利用した高周波プラズマスラスターの研究
3. 学会等名 第37回プラズマ核融合学会年会
4. 発表年 2020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
---------	---------