

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 31 年 2 月 27 日現在

機関番号：17102

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2016～2017

課題番号：16K14506

研究課題名(和文) レーザーレイリー散乱法を用いた中性粒子密度計測法の確立

研究課題名(英文) Rayleigh Scattering Measurement of Neutral Atom Number Density Downstream of an Electric Propulsion

研究代表者

山本 直嗣 (YAMAMOTO, NAOJI)

九州大学・総合理工学研究院・教授

研究者番号：40380711

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,800,000円

研究成果の概要(和文)：地上実験設備において、中性粒子が電気推進機に及ぼす影響を調査することが可能にする中性粒子密度計測技術を確立した。レイリー散乱法を用いて高真空環境下の中性原子数密度を測定した。窒素ガスでの計測を行い、感度向上を確認した後に、プラズマをつけない状態ではあるが、小型ホールスラスタの下流でのキセノン中性数密度を測定した。キセノン質量流量が0.2mg/sの時のキセノン原子の数密度は $(4 \pm 1.5) \times 10^{19} \text{m}^{-3}$ であり、この結果は一次元計算とよく一致した。さらに、計測用レーザーのパルス幅を短縮することによりSN比向上を確認した。

研究成果の概要(英文)：Neutral atom number density was measured in high vacuum using the Rayleigh scattering technique, in order to elucidate facility effects on electric propulsion devices. Nitrogen molecular number density was measured to show the validity of the Rayleigh scattering technique. Xenon neutral number density was measured downstream of a miniature Hall thruster. The number density of xenon atoms was estimated to be  $(4 \pm 1.5) \times 10^{19} \text{ m}^{-3}$  at mass flow rate of 0.2 mg/s. The results are in good agreement with 1D calculations.

We confirmed that using a laser with shorter wavelength and pulse width improved the detection limit.

The present results show that the Rayleigh scattering method will be useful for measurement of the neutral atom number density in the plume region, with further improvement of the detection limit. This method could be used to reveal vacuum facility effects on electric propulsion system performance, and further illuminate the physics behind electric propulsion.

研究分野：航空宇宙工学

キーワード：電気推進 中性粒子密度計測 地上設備の影響 レイリー散乱 光学計測

### 1. 研究開始当初の背景

小惑星探査機「プロキオン」は超小型探査機でありながら、小惑星ランデブーを目指した探査機であり、これを可能にしたのは、小型イオンエンジンである。このように、超小型衛星の能力を飛躍的に向上させる小型の電気推進器の開発が、様々な研究機関において進められている。残念ながら「プロキオン」のイオンエンジンは不具合が発生してしまい、予定の軌道投入を断念したが、そのインパクトは、世界中の宇宙開発者の心に刻み込まれた。今後、小型電気推進器が超小型衛星の標準要素となるためには、信頼性の向上が必要不可欠である。

信頼性向上を阻害する要因のひとつとして、地上試験において宇宙空間を完全に模擬できていないことが挙げられる。特に大学が保有する実験設備では、真空容器の大きさやポンプの排気量が十分ではなく、真空容器内に滞在する中性粒子の影響で性能を過大評価してしまう。申請者が宇宙科学研究所の大型真空設備で行った実験 (<math>10^{-3}</math> Pa) と現有の小型設備で行った実験 (<math>10^{-2}</math> Pa) においてはエンジンの推進効率に 1.5 倍の差が生じた。これまでは真空設備に設置した真空計で中性粒子の影響を評価してきたが、ポンプの位置などにより真空容器内の中性粒子密度は不均一となるため、従来の判定法では不十分であり、エンジン近傍での中性粒子密度の計測が必須となってきた。しかしながら現状の技術ではプラズマ中の中性粒子密度の正確な計測は困難であった。

③ 当該分野における本研究の学術的な特色及び予想される結果と意義

中性粒子密度の計測に関しては、各国の研究機関も取り組み始めているが、プラズマ環境下における計測はどの研究機関もまだ成功していない。本研究の成果により、残留中性粒子が電気推進の作動に及ぼす影響の定量的な評価が可能となり、地上試験設備の基準策定に大きく貢献し、地上試験設備の効率化につながるため、本研究の意義は大きい。

### 2. 研究の目的

そこで、プラズマ環境下で  $10^{-2}$  Pa の領域の希薄な中性粒子密度が計測可能なシステムを構築することが本研究の目的である。達成目標である  $10^{-2}$  Pa での密度計測に成功した後、電気推進器を作動させて、中性粒子密度を計測し、地上実験設備の基準策定に貢献するデータを取得する。

### 3. 研究の方法

内野らの計測において、計測限界が  $10^{-2}$  torr に留まったのは、使用したレーザーが 10 ナノ秒のパルスレーザーであったため、レイリー散乱による光と、数十センチ離れた物体から乱反射した光を区別できなかった。そこでパルス幅をピコ秒まで圧縮し、レイリー散乱による光と物体表面での乱反射された光を分別することが可能なシステムを構築し、検

出感度の向上を図る。

はじめに現有のパルスレーザーを用いて、実験を行い、内野らが到達した  $10^{-2}$  torr 以下の真空度まで計測可能なシステムを構築する。内野らの計測システムと同様にブリュースター窓やフォトカウンティングを採用するとともに、更なる感度向上のために、プローブ用レーザーの形状を最適化する。

並行してパルス幅の短縮による SN 比の改善を目指す。改善されたシステムを用いて、 $10^{-2}$  Pa の領域で計測できることを示す。並行して、レイリー散乱強度が波長の 4 乗に比例することを利用して、波長が 2/3 の 355 nm にして計測を行う。

### 4. 研究成果

内野らと同等のシステムを構築し、信号のカウント数と圧力の関係を調査した。図 1 に示す通り、圧力と信号のカウント数が線形の関係にあることが分かる。次に観測側からの視線方向に設置したダンパーの位置を変化させて、SN 比の改善を試みた。結果として、計測地点から 60 mm 離れた位置に設置したときに最小となり、この時 0.08 Pa と目標の  $10^{-2}$  Pa の計測に成功した。

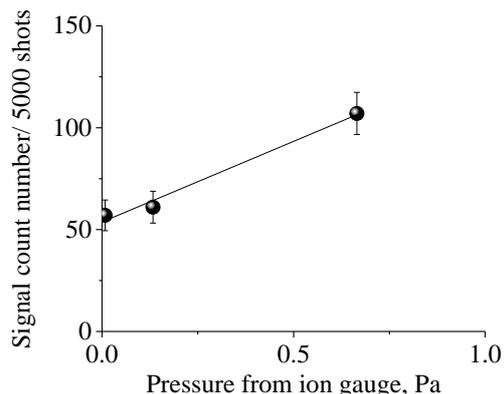


図 1 圧力とレイリー散乱信号強度の関係

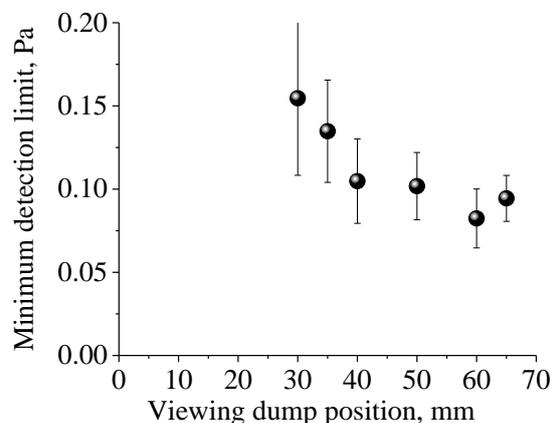


図 2 ダンパーの位置と最小感度の関係

そこで、パルス幅を 6 ns から 3 ns に短縮して

計測を実施した。図3にその結果を示す。レーザーの変更に伴い、アライメントが改善され、光の集光効率が改善されているため、信号強度が増えているが、どちらも一発あたりのレーザーのエネルギーは10 mJで同じである。

結果として、パルス幅の短縮により最小計測感度は $8 \times 10^{-2}$  Paから $5 \times 10^{-2}$  Paと1.6倍改善した。パルス幅が1/2になったが、計測側の問題から5 nsのbinで計測しているため、半分とはならなかったが、それでも大幅な改善が確認された。

そこで、小型のホールスラストからキセノンガスを噴出してキセノンガスの密度を計測したところ、図4に示す通り、エラーバーは大きいですが、ガス流量の増加に伴い、密度は増加し、またその値は1次元計算と矛盾しない値であり、希薄密度領域での中性粒子密度計測が可能であることを実証した。

さらに、感度向上を目指して、レーザーの波長を355 nmに変更すると共に、パルス幅を35 psに短縮して計測を行った。図5にレーザー発振からの時間に対して、高真空(1 Pa)と低真空(400 Pa)における計測された信号数を示す。図に示すとおり、レーザー発振後27.7 ns以降はノイズである壁面等から反射されてきた迷光であり、27.5 nsにおいては信号と一部迷光が混ざっているが、大部分の迷光と信号を分別できることが示された。現状として、使える計測器の問題上200 ps以下で分けることは出来なかったが、これを1.5 psの分解能で計測できるシステムを用いることにより、35psの範囲、すなわち1 cm以内の光路差がある迷光と信号は分別できることが示唆された。今後はこのシステムを用いてホールスラスト内部および外部の中性粒子密度計測を行い、ホールスラストの内部物理現象を解明すると共に、残留中性粒子が電気推進の作動に及ぼす影響の定量的な評価を行い、地上試験設備の基準策定に大きく貢献し、地上試験設備の効率化につなげたい。

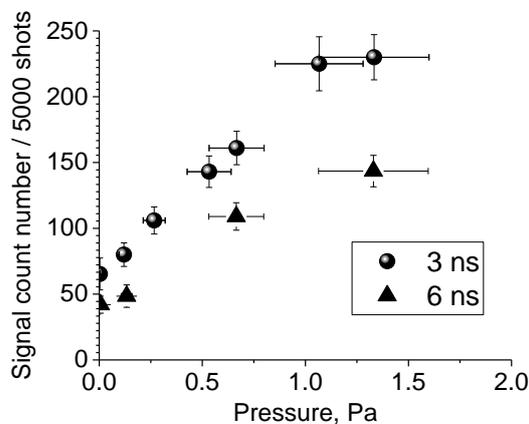


図3 パルス幅が異なる二つのレーザーにおけるレイリー散乱信号と圧力の関係

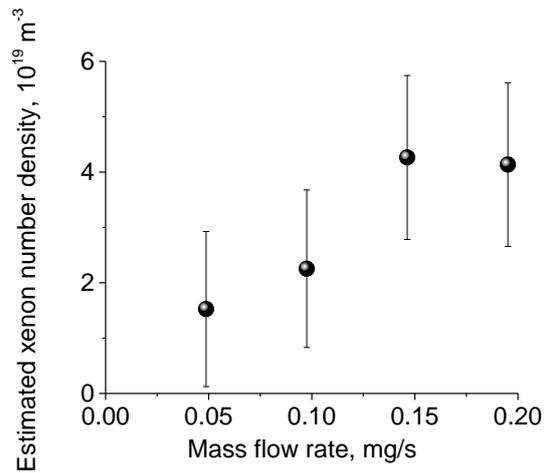


図4 ホールスラスト下流6 mmにおけるガス流量とキセノン密度の関係

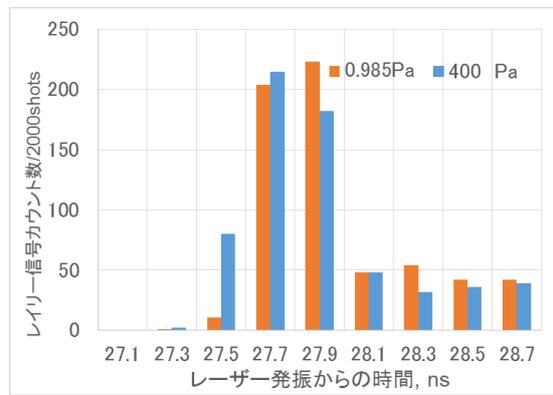


図5 レーザー発振後の信号カウント数

## 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)

M. Iwamoto, N. Yamamoto, T. Morita, H. Nakashima, K. Tomita, K. Uchino, “Rayleigh Scattering Measurement of Neutral Atom Number Density Downstream of a Hall Thruster under Cold Flow Conditions”, Transactions of the Japan Society for Aeronautics and Space Sciences, No.60, Issue 5, 2017, pp.327-330.

DOI <https://doi.org/10.2322/tjsass.60.327>

[学会発表] (計 2 件)

- ① 岩本政隆, 山本直嗣, 森田太智、中島秀紀、電気推進機のブルーム領域の物理量測定, 日本航空宇宙学会, 第57回航空原動機・宇宙推進講演会, 沖縄県市町村自治会館, 沖縄 2017, 3月
- ② N. Yamamoto, M. Iwamoto, T. Morita and H. Nakashima, Measurement of Electron and Neutral Atom Density Downstream of an Electric Propulsion, 52<sup>nd</sup> AIAA/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference, Salt Lake City, USA, 2016年7月

[その他]  
ホームページ等  
[http://art.aees.kyushu-u.ac.jp/research/Hall/Hall\\_j.html](http://art.aees.kyushu-u.ac.jp/research/Hall/Hall_j.html)

## 6. 研究組織

### (1)研究代表者

山本 直嗣 (YAMAMOTO NAOJI)  
九州大学・総合理工学研究院・教授  
研究者番号：40380711