

令和 4 年 6 月 3 日現在

機関番号：13901

研究種目：若手研究

研究期間：2020～2021

課題番号：20K14949

研究課題名（和文）プラズマ磁場閉じ込めの緩急を利用した超小型無電極電気推進機の原理実証

研究課題名（英文）Small electrodeless electric propulsion system with ECR plasma and fluctuating magnetic field

研究代表者

中村 友祐（Nakamura, Yusuke）

名古屋大学・工学研究科・特任助教

研究者番号：10847685

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,300,000円

研究成果の概要（和文）：本研究では新たに提案した、プラズマ磁場閉じ込めの緩急を利用した宇宙用の無電極電気推進機の実証を目指す。この推進機は、管内にコイルと永久磁石で作った閉じ込め磁場中にGHz帯の高周波を印加し、ECR放電によりプラズマを生成し、この状態で閉じ込め磁場を一時的に弱めることでプラズマを排出し、推力を生む。周波数2 GHz～4 GHzの範囲で最大出力およそ15 Wの高周波を放射出来るシステムを完成させ、永久磁石のみで閉じ込め磁場を作った直径10 mmの管内にECR放電プラズマを目標エネルギー範囲内で生成することに成功したが、コイルによる磁場中でのプラズマの安定生成には成功しておらず、形状を模索中である。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究で実証を目指す推進機は、長寿命、高燃費な超小型衛星向けの推進機であり、これが実現されれば、超小型衛星によるミッションの幅が大きく広がることが期待される。近年、超小型人工衛星は学術、産業双方の観点から注目を集めており、このことには大きな社会的な意義がある。現在、本推進機の実証にまでは至っていないが、推進機の放電室を模した管内において目標電力内でのプラズマ生成には成功しており、実現に向けた多くの知見を得ることが出来た。今後、加速用のコイルや、さらに安定したプラズマ生成を実現する放電室形状の検討を進め、実現を目指す。

研究成果の概要（英文）：In this research, I aim to demonstrate a newly proposed electrodeless electric propulsion system for space craft. In this propulsion system, plasma generated with electron cyclotron resonance (ECR), which is the interaction between electrons in magnetic field with specific strength and high-frequency (GHz band) electro-magnetic wave, is accelerated by controlling the magnetic field by a coil. A system capable of radiating a high frequency with a maximum output of about 15 W in the frequency range of 2 GHz to 4 GHz was completed. ECR discharge plasma was successfully created in a tube with a diameter of 10 mm within the target energy range using only permanent magnets. However, the stable generation of plasma in the magnetic field by a coil and a magnet was not successful. Therefore, farther researches are needed to demonstrate this propulsion.

研究分野：電気推進機

キーワード：無電極電気推進機 高周波プラズマ

1. 研究開始当初の背景

近年、100 kg 以下の超小型人工衛星が学術、産業双方の観点から注目を集めており、特に 1-50 kg の衛星についてはここ 5,6 年ほどで爆発的に打ち上げ数を増加させている。現在打ち上げられている超小型衛星の大半は軌道遷移用の推進機を搭載しておらず、投入された軌道を回るのみであるが、推進機を搭載することでミッションの幅を広げようという試みもなされている。このような中、低燃費な推進機である電気推進機を超小型衛星に搭載することで深宇宙探査ミッションを行うことも考案されている。電気推進機を超小型衛星に搭載する場合、超小型衛星で発電可能な電力からくる制約から 100 W 程度以下での動作が必要であり、また、深宇宙探査ミッションに要求される高い低燃性能を実現するには 10 km/s を超える排気速度が必要である。実際に JAXA、東京大学などで共同開発された超小型深宇宙探査衛星である”PROCYON”ではこれらの条件を満たす電気推進機の一つであるイオンスラスタを超小型衛星として世界で初めて深宇宙において作動させることに成功している。しかしながら、”PROCYON”では目標としていた増速度を得られる前にイオンスラスタが故障してしまい、連続運転時間も 200 時間程度にとどまっている。深宇宙探査ミッションでは数年間に及ぶ電気推進機の実作を必要とすることが多く、寿命の面において大きな課題を残している。イオンスラスタ等電極を用いた推進機の寿命を決定する最も大きな要因は電極損耗である。電極が存在すると、その電位差によって加速された一部荷電粒子が高速で電極に衝突するため電極損耗が生じる。このような損耗は電位分布の変化による効率低下をもたらすだけでなく、電極が削れることで飛散する導電性の粉末により電極間導通など深刻な問題をも引き起こすことが知られている。さらに、電極電位やプラズマ密度など性能に係るパラメータを保ったまま小型化を行う場合には、電極に衝突する粒子の数量とエネルギーは変わらず電極損耗速度に変化がない一方、電極等の構造は小さくなるため、結果として更に寿命が短くなってしまふ。このことから、特に小型の推進機において長い寿命を得るには無電極で作動する電気推進機の方が適していると考えられる。

以上の背景から超小型衛星による深宇宙探査に向けて、「使用電力 100 W 以下」であること、「排気速度 10 km/s 以上」であること、「無電極」であることの3つの条件を満たす推進機の実現を目指す。

2. 研究の目的

本研究の目的は申請者が新しく提案する超小型無電極推進機を製作し、使用電力 100 W 以下で排気速度 10 km/s を達成する作動点を探すことである。本研究で提案する推進機は繰り返しパルス加速であり、図 1 に示すような3つのステップを繰り返すことで作動する。ステップ1ではプラズマの生成を行う。プラズマ生成用アンテナからの電磁波を用いてプラズマを生成し、推進機の奥に設置した磁石と出口付近に配置したコイルによりミラー磁場を生成しプラズマを閉じ込める。このとき用いる電磁波には GHz 帯のものを用い、電磁サイクロトロン共鳴(ECR)と呼ばれる現象を利用する。この生成方法を用いると、周波数に対応する磁場強度の領域に選択的にプラズマを生成することができる。プラズマ生成領域を壁面から離れた位置に設定することで、プラズマの壁面への損失が少なくなり、プラズマ生成電力を小さくすることができる。ステップ2では閉じ込めたプラズマの開放、及びプラズマの加速を行う。ミラー磁場を保ったままでは閉じ込めが強すぎプラズマを排気することができないため、出口付近の加速用コイルを流れる電流値を 0 まで下げることで発散磁場形状に変化させ、プラズマを開放する。このときの磁場の変動による電磁誘導でプラズマ中に渦電流が生じ、この渦電流と磁力線の相互作用によりプラズマ

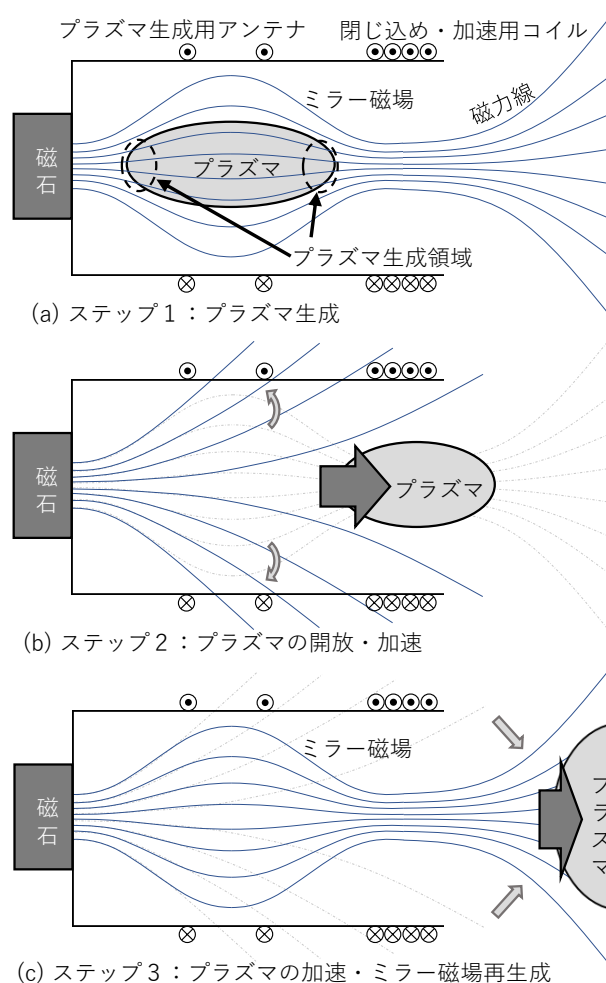


図 1 提案する推進機の模式図

が排気方向へと加速されることで推力が生まれる。ステップ3ではプラズマの押し出しとミラー磁場の再生成を行う。加速用コイル電流を再び上げて元のミラー磁場に戻す。このときの磁場変動は推進機外部に排出されたプラズマに対して押し出す方向の力を与えるため、ここでも推力の生成が期待できる。この3ステップを1 kHzの周波数で繰り返すことで断続的に推力を生成する。

3. 研究の方法

この推進機を作動させるには直径1 cm程度の細い管内において、効率よく高周波によるプラズマ生成を行う必要がある。推進機を作る前に、管内にプラズマ生成を行う実験を行った。発振器で生成した最大1 mWの高周波をアンプにより最大16 Wにまで増幅し、10 mPa以下に引いた真空チャンバ内の放電室内アンテナへと供給した。高周波のパワーはアンプから真空チャンバまでの導線で減衰し、チャンバに入る部分で8 W程度である。周波数は2 GHz~4 GHzの範囲で調整が可能である。真空チャンバ内に配置した放電室の模式図を図2に示す。直径6 mm穴の開いた永久磁石を直径1 cmの管の両端にはめ込むことで閉じ込め磁場を作った。高周波用のアンテナは永久磁石に空いた穴から導入し、また、同じ穴からアルゴンを流した。アルゴンは反対側の磁石に空いた穴から排気される。流量は0.5 SCCMとした。

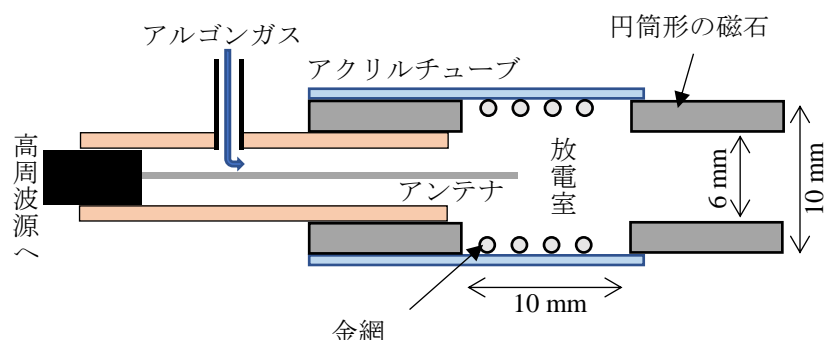


図2 放電実験に用いた放電室の模式図

4. 研究成果

実験の結果、図3に示すようにプラズマを着火することに成功した。プラズマは印加する高周波のエネルギーを3 W程度に落としても着火し、実用化の上で目標としていたエネルギー範囲内の着火に成功した。

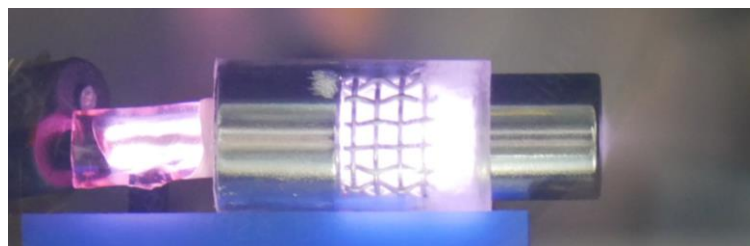


図3 実験で観測されたプラズマ

なお、推進機本体については、磁場形状を有限要素法で計算することで、理想的な磁場形状の変化をもたらすコイルを設計、製作し、実験を行ったが、未だコイルによる閉じ込め磁場内でのプラズマの安定生成には成功していない。今後、さらに検討を行い、推進機の実証を目指す。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計0件

〔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
---------	---------