

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 6 月 11 日現在

機関番号：12601

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2013～2014

課題番号：25630387

研究課題名(和文) 電磁誘導推力による高密度プラズマの連続パルス加速の研究

研究課題名(英文) Study of RF-Inductive-Acceleration of Low Aspect Ratio Helicon Plasma using the Cusp Magnetic Field

研究代表者

小泉 宏之(koizumi, hiroyuki)

東京大学・先端科学技術研究センター・准教授

研究者番号：40361505

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,000,000円

研究成果の概要(和文)：本研究は、将来の大型ミッションにおいて、大規模物資輸送を担う100kW級の大電力電気推進機に対して新しい推進機を提案するものである。このために、本研究は、電気推進に適した無電極高密度プラズマの実現と、外部磁場を用いない電磁誘導加速の基礎研究を行い、以下の成果を得た。1) 低アスペクト比容器において、永久磁石によるカusp磁場を利用してヘリコン波による高密度プラズマの生成に成功した。300 Wの最大電力においてプラズマ密度は10の19乗/立方mに達した。2) パルスフォーミングネットワークを用いてパルスの電磁誘導加速の基礎実験を行いプラズマインピーダンスの推定に成功した。

研究成果の概要(英文)：This research is to propose a new, high-power electric propulsion system for the future advanced missions such as manned Mars exploration and asteroid exploration. We studied the feasibility and fundamental research as to the combination of high-density plasma by helicon-wave and inductive acceleration without applied magnetic fields and obtained the following results. 1) We succeeded to generate high-density plasma using a cusped-magnetic field in a low-aspect-ratio chamber, which is suitable for the electric propulsion application. The maximum density reached to 10 to the 19th power in cubic meters. 2) We simulated the final configuration of our proposal by a pulsed acceleration using a pulsed forming network, and we succeeded to estimate the plasma impedance which is inevitable for the steady state acceleration.

研究分野：宇宙推進工学

キーワード：電気推進 大電力 プラズマ 無電極

1. 研究開始当初の背景

近年、世界の宇宙開発は 2030 年前後を目標とした有人の小惑星/火星探査へと機運が高まっており、ここで要となる技術の1つが大規模物資輸送に必要な大電力の電気推進である。高い比推力を有する電気推進 (EP: Electric Propulsion) は、0.1-10 kW レベルでは成熟期に入ったが、10kW を超える大電力 EP は研究途上にある。現状で候補となっている大電力 EP には、それぞれ一長一短があり決め手にかけており、新しい大電力 EP の登場が期待されている。

2. 研究の目的

本研究は、将来の有人火星/小惑星探査ミッションにおいて、大規模物資輸送を担う 100kW 級の大電力電気推進機に対して、新しい方式/組合せの推進機を提案するものである。研究代表者は、大電力電気推進機には完全無電極型のプラズマ加速が必須と考え、高周波磁場と誘導電流によって生じる電磁力による加速 (誘導加速) に着目した。この方式を利用した推進機の1つは 1960 年代に研究が行われ良好な性能を出したが、当時のより高性能な他推進機に劣り終了した。また、もう1つ別の推進機は高い性能を有するものの宇宙実用には不向きな方式である。本研究は、この2つの推進機をベースに、近年大きく発展を遂げたヘリコン波プラズマと、近年の電気推進設計方針を取り入れることで、新しい大電力電気推進を提案し可能性を検証する。

3. 研究の方法

本研究では「ヘリコン波プラズマ+高周波電流による誘導加速」を用いた推進機を提案する。想定する加速原理は次の通りである。永久磁石による定常カスプ磁場とヘリコン波プラズマ生成用のスパイルアンテナによってヘリコン波プラズマの生成を行う。次に、加速用高周波コイルによって高周波磁場を印加する。高周波磁場と同磁場によってプラズマ中に流れる誘導電流とのローレンツ力によってプラズマが加速される。

この新しい加速方式の可能性を検証するために、カスプ磁場+低アスペクト比形状容器における高密度プラズマの生成、パルスフォーミングネットワークを用いた加速模擬試験を行う。

4. 研究成果

1) 実験装置

本研究における無電極加速機構は、独立したプラズマ源において生成されたプラズマを高周波で作動する誘導磁場によって加速するというものである。誘導磁場型の加速方式には、過去に研究が進められた TWPA (Traveling Wave Plasma Acceleration) と PIA (Pulsed Inductive Acceleration) が

ある。本研究の加速方式は、高周波磁場の連続作動によりプラズマの加速を試みた TWPE (Traveling Wave Plasma Engine) とパルス作動で 50% という非常に高い推進効率を達成した PIT (Pulsed Inductive Thruster) を参考に設計を行った。

本研究におけるプラズマ加速方式の概略を図 1 に示す。図 1(a) はプラズマ生成用のカスプ磁場形状およびガスの流れを示す。この配置とプラズマ励起用コイルにより高密度プラズマを生成する。図 1(b) はプラズマ加速用の加速コイルに大電流を流した際の磁場を示す。このとき、加速コイルの磁場が支配的となり、変動磁場による誘導加速によってプラズマを外部へ押し出す。最終的には、この磁場の変動を高周波で作動させることで高推進効率を得ることが目標である。実際の実験装置の写真を図 2 に示す。

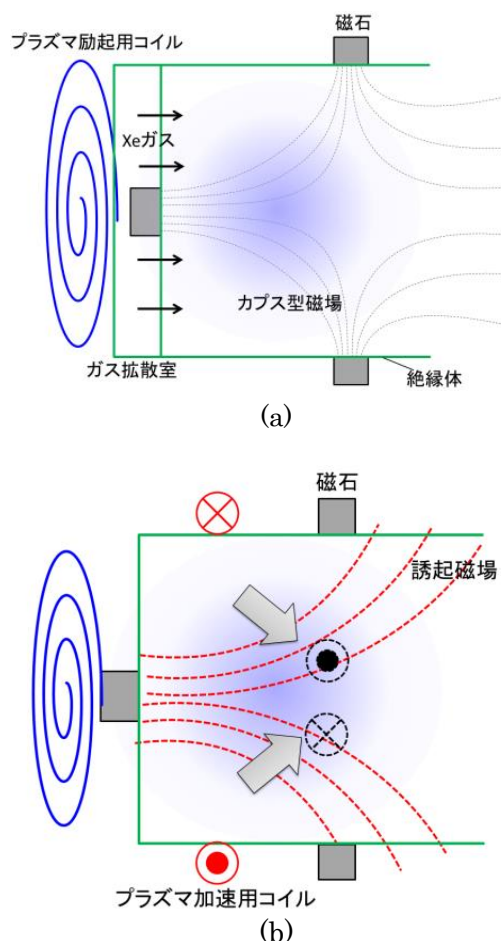


Figure 1. Schematic diagram of the plasma chamber and the acceleration coil; (a): cusped-magnetic field to generate plasma and (b) dashed red lines are the field applied by the acceleration coil.

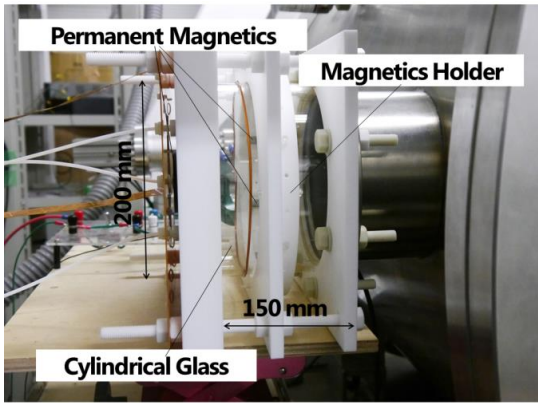


Figure 2. Side view of the fully assembled FLAP.

2) 高密度プラズマ生成

プラズマ励起用アンテナに 13.56 MHz の高周波を最大 300 W 投入することにより高密度プラズマの生成に成功した。図 3 はプラズマ着火時の様子を写した写真である。プラズマの着火特性は、プラズマ励起用アンテナおよびカスプ磁場生成用磁石の配置により大きな影響を受けた。

安定したプラズマ着火条件において、プラズマ密度の測定を行った。プラズマの測定にはダブルプローブを用いた。プローブ位置を変化させて測定を行った結果を図 4 に示す。この測定においては最大 10^{18} m^{-3} のプラズマ密度を得た。測定における最大プラズマ密度は 10^{19} m^{-3} であった。

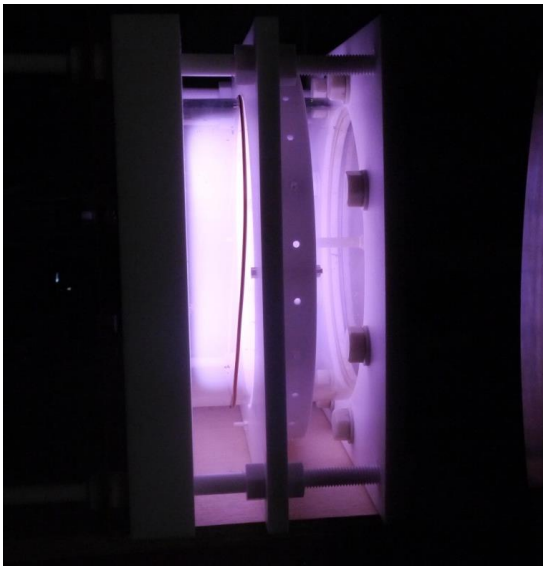


Figure 3. Photograph of plasma generated in FLAP experimental operation.

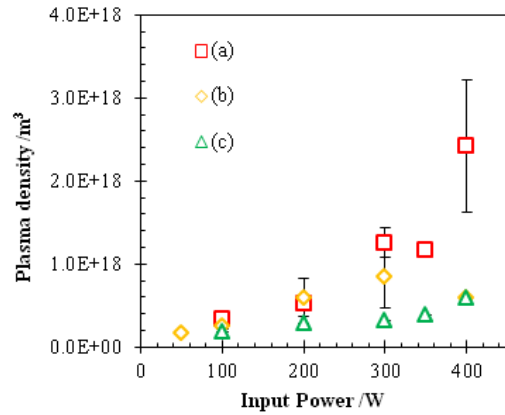


Figure 4. Plasma density as an input power of exciting coil with conditions of (a), (b) and (c).

2) パルス電流による模擬加速

パルスフォーミングネットワークを用いてパルスの高周波誘導磁場を模擬することでプラズマの加速実験を行い、本加速の有効性ならびにプラズマ特性の取得に成功した。400Hz に設計した LC 回路のキャパシタ充電電圧を 2000V として加速用コイルに高周波大電流を作動させた。

測定結果の一例を図 5 に示す。縦軸はプローブ電流、横軸時間の原点は加速用コイルに電流が流れはじめた時点とした。波形の極小極大点を図 5 に示すように第 1 ピーク、第 2 ピークと名付けた。0.0-2.0 $\mu \text{ sec}$ の間に立っている山は、発振回路駆動用のスイッチによるノイズであるため無視した。第 1 ピーク、第 2 ピークともに上流側から Probe0, Probe1, Probe2 の順にピークが立っている。ここからプラズマの加速が実現していることがわかる。

また、プラズマあり/なしの状態におけるパルスフォーミングネットワークの電流波形を比較することで、プラズマのインピーダンスを測定することに成功した。

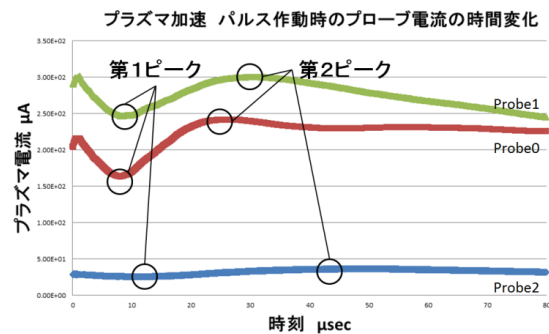


Figure 5. Time of flight Plasma density as an input power of exciting coil with conditions of (a), (b) and (c)

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)

なし

〔雑誌論文〕(計 0件)

(3)連携研究者
なし

〔学会発表〕(計 3件)

1) 柳沼和也, 井上雄喜, 小泉宏之, 小紫公也, "スパイラルアンテナを用いたヘリコン波プラズマの誘導パルス方式による加速実験," 第45期日本航空宇宙学会年会, JSASS-2014-1036, 2014

2) 柳沼和也, 井上雄喜, 小泉宏之, 小紫公也, スパイラルアンテナを用いたヘリコン波プラズマの誘導パルス方式による加速特性, 平成26年度宇宙輸送シンポジウム, 2015

3) Yaginuma, K., Koizumi, H., and Komurasaki, K., Fundamental Experiment of Rf-Inductive-Acceleration in Low Aspect Ratio Helicon Plasma Using the Cusp Magnetic Field, 34th International Electric Propulsion Conference, 2015.

〔図書〕(計 0件)

〔産業財産権〕

○出願状況(計 0件)

名称:
発明者:
権利者:
種類:
番号:
出願年月日:
国内外の別:

○取得状況(計 0件)

名称:
発明者:
権利者:
種類:
番号:
出願年月日:
取得年月日:
国内外の別:

〔その他〕

ホームページ:
http://www.al.t.u-tokyo.ac.jp/koizumi/html/htdocs/?page_id=78

6. 研究組織

(1) 研究代表者

小泉 宏之 (KOIZUMI, Hiroyuki)
東京大学・先端科学技術研究センター・准教授

研究者番号: 40361505

(2) 研究分担者