

平成 30 年 5 月 31 日現在

機関番号：14501

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2016～2017

課題番号：16K13920

研究課題名(和文)電気推進プラズマエンジンのための可変ピッチヘリカルアンテナの研究

研究課題名(英文)Studies of variable-pitch helical antenna for plasma thruster

研究代表者

竹野 裕正 (Takeno, Hiromasa)

神戸大学・工学研究科・教授

研究者番号：90216929

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,700,000円

研究成果の概要(和文)：研究代表者等は、推力・比推力を独立制御する単一ヘリカルアンテナ型電気推進用プラズマエンジンを提案した。単一アンテナのため、必ずしも効率が良くない。研究代表者は、アンテナの軸方向長を変化できる可変ピッチヘリカルアンテナを改善策として着想した。この課題の目的は、その有用性を実験的に調べることにある。

模擬実験装置用に実際に可変ピッチヘリカルアンテナを試作した。アンテナ長変化に対して、プラズマ生成密度の高周波電力・磁場依存性は変化し、アンテナ長の効果を示唆する結果が得られた。しかし、高周波磁場計測では波動の励起は確認されなかった。今後、効果の物理機構を追及する必要がある。

研究成果の概要(英文)：The group of the researcher proposed a plasma thruster with a single helical antenna in which thrust and specific impulse could be controlled independently. As it consists of a single antenna, efficiency is not necessarily high. The researcher inspired an idea of a variable-pitch helical antenna which had a function of variable axial length to improve the efficiency. The purpose of the project is to examine the effectiveness of the antenna.

A prototype antenna was manufactured to be applied to an experimental simulator. The dependence of produced plasma density on rf power or external magnetic field varied according to antenna length, suggesting an effect of variable antenna length. An excitation of waves, however, was not found by rf magnetic field measurement. The physical mechanism of the effect should be examined in the future.

研究分野：プラズマ工学

キーワード：ロケット プラズマ推進 ヘリカルアンテナ

1. 研究開始当初の背景

近年の宇宙探査では、惑星間などの長距離を航行する必要も多い。この場合、航行機に求められる性能では比推力の比重が増す。搭載する燃料を効率的に使用するため、エンジンの形式として、推力と比推力とを独立制御することが求められる。プラズマ推進エンジンは有望で、典型的な推力・比推力独立制御型として VASIMR がある。

VASIMR では、推力および比推力の制御に、プラズマ密度およびイオン温度をそれぞれ用いている。これらの制御には、プラズマ生成およびイオン加熱専用の高周波電力系を用いており、装置が大型になる。研究代表者のグループでは、推力・比推力独立制御型のエンジンを、周辺機器を含めて小型軽量化する研究を進めている。その成果の一つとして、単一のヘリカルアンテナおよび高周波電力系での推力・比推力独立制御システムを着想した。これは、ヘリカルアンテナの双方向励起特性に着目して、プラズマの生成と加熱に有用な電磁波を単一のアンテナから放射するものである。

2. 研究の目的

推力・比推力独立制御型プラズマエンジンでは、プラズマ生成および加熱は、それぞれに適したプラズマ中の電磁波を介して電力注入して実現する。単一ヘリカルアンテナ型プラズマエンジンでは、推力および比推力の絶対量を高周波電力で、両者の比を外部磁場強度で、それぞれ制御することを想定している。外部磁場強度の条件が両者の比の制御に用いられるので、アンテナの放射スペクトルが励起される電磁波に必ずしも適合せず、励起効率が必ずしも十分でない。

本研究では、この問題に対して、斬新な着想：アンテナ自体の物理サイズを変化させること（可変ピッチヘリカルアンテナの構成）を提案する。放射アンテナは金属製のリジッドな構造物であるという既成概念を破り、波動励起効率を改善するよう、その軸方向長を変化できるように、構成する。図 1 に軸方向長可変機構の概念図を示す。アンテナストラップを蛇腹状金属板で構成し、その曲げ伸ばしで軸方向長を変化させる。

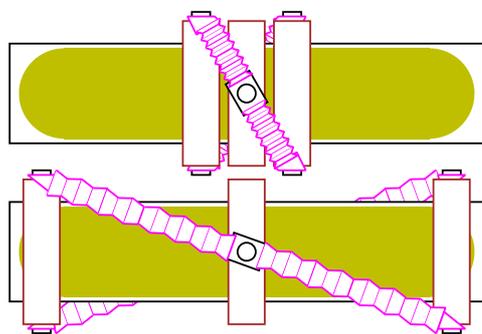


図 1 軸方向長可変機構の概念図

単一ヘリカルアンテナ型プラズマエンジンでは、高周波電力および外部磁場強度でプラズマ中の電磁波の波長が決まる。これに合わせて適切な放射スペクトルとなるよう、アンテナ長を制御することにより、装置の高効率動作を助けることができる。

本研究では、以上の着想の有効性を模擬実験で確認することを目的としている。実際に可変ピッチヘリカルアンテナを製作し、既設の模擬実験装置において、その有用性を実験的に確かめる。

3. 研究の方法

(1) 模擬実験装置

図 2 に、既設の電気推進プラズマエンジン模擬実験装置の概略構成図を示す。

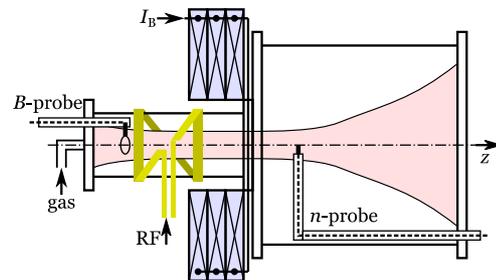


図 2 模擬実験装置概略構成図

真空容器は、プラズマ源部である 100mmφ のガラス管と、噴射（磁気ノズル）部である 350mmφ のステンレス管とで構成される。ガラス管に巻き付けるようにヘリカルアンテナを設置する。本研究で導入した 13.56MHz の高周波増幅器を含む高周波系より高周波電力が供給される。 I_B はガラス管領域に配置したソレノイドコイルに流す電流で、向きも含めて外部磁場強度を制御する。以下では、磁場が装置下流側および上流側に向けた状態を、それぞれ $B_{//+z}$ および $B_{//-z}$ の記号で示す（ z 軸は図 2 右向き）。ガラス管の上流部にガス導入口があり、ピエゾバルブで圧力調整を行う。本研究では、専らアルゴンをを用いた。

生成プラズマの密度を、ステンレス管部に設置した静電プローブで測定する。本研究では、励起波動を測定するために、ガラス管のプラズマ源部に高周波磁気プローブを設置した。一巻コイルの構成で、高周波磁場の軸方向成分を検出する。磁気プローブは、軸方向および径方向に可動である。

(2) 可変ピッチヘリカルアンテナ

図 3 に試作した可変ピッチヘリカルアンテナの外観を示す。

本体の電流経路は全て銅板である。ライトヘリカルアンテナで、外部磁場方向に左旋偏波を、外部磁場反対方向に右旋偏波を、それぞれ放射する。ヘリカルストラップを蛇腹状銅板としている。軸方向両端と中央部を絶縁物製の枠で固定している。三つの絶縁枠は金

属ロッドで連結され、軸方向に可動である。枠に固定されたヘリカルストラップは、枠の移動に合わせて伸縮し、全体としてアンテナ長 L_a が変化する。

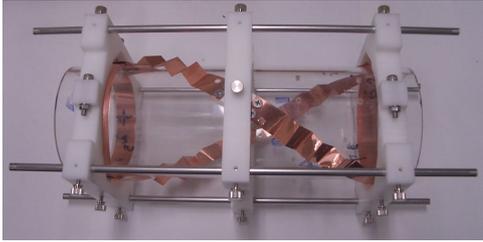


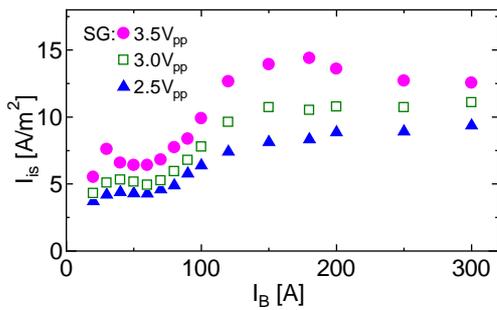
図3 試作可変ピッチヘリカルアンテナ

4. 研究成果

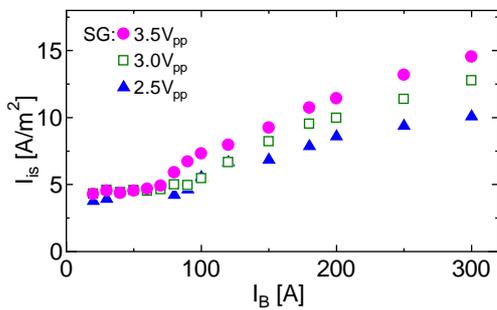
(1) プラズマ生成実験

前節の実験装置で、プラズマ生成実験を行った。ヘリカルアンテナの双方向励起特性に着目して、磁場の向きを下流向き/上流向き（前節で記号を定義）で変化させた。

図4は、 $L_a = 24$ cmでの結果で、縦軸は静電プローブで測定したイオン飽和電流、横軸は磁場コイル電流 I_B である。高周波発振器 (SG) の出力で高周波電力を変化させた。(a) $B//+z$, (b) $B// -z$ のいずれにおいても、高周波電力の増大に対して密度は増加するが、磁場に対する依存性は異なる $I_B > 100$ Aにおいて、(b) $B// -z$ では磁場に比例して密度が増大するが、(a) $B//+z$ では一定に近く、SGが 3.5 V_{pp} では $I_B = 150-200$ A に密度の増大が見られる。



(a) $B//+z$

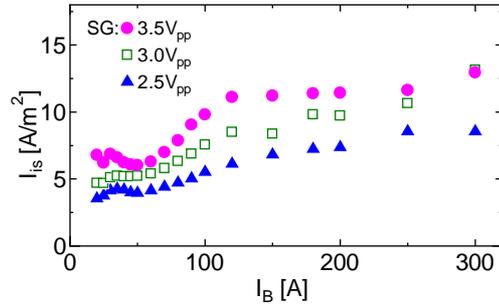


(b) $B// -z$

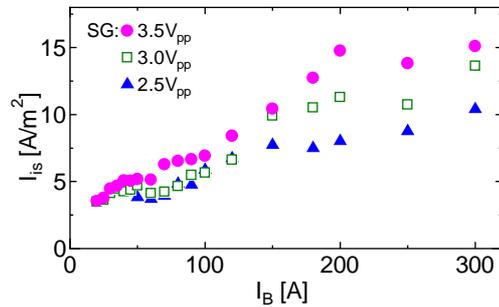
図4 $L_a = 24$ cm での生成密度磁場依存性

図5は、同様に示した $L_a = 18$ cm での結果である。図4と比較して、(a) $B//+z$ のSGが

3.5 V_{pp} での $I_B = 150-200$ A に対する密度の増大は見られない。また、(b) $B// -z$ での磁場に対する密度の比例的増加は図4ほど明確でなく、SGが 3.5 V_{pp} では $I_B = 200$ A で極大を示す。



(a) $B//+z$



(b) $B// -z$

図5 $L_a = 18$ cm での生成密度磁場依存性

以上のように、異なったアンテナ長では、生成密度の磁場依存性・高周波電力依存性が異なった。本研究の着想である、アンテナ長の変化による放射スペクトルの変化が、プラズマ生成効率の変化として、生成密度の依存性に現れているものと期待される。

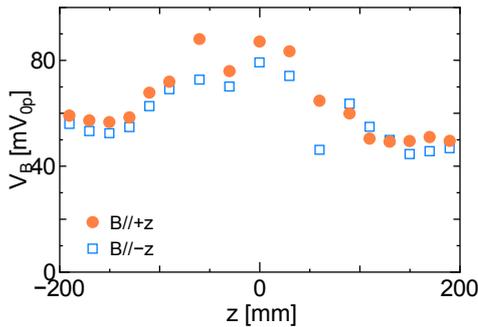
(2) 波動計測

プラズマ源部に配置した高周波磁気プローブで、プラズマ中の高周波磁場の軸方向成分を計測した。 $L_a = 18$ cm および $I_B = 150$ A で、 $B//+z$, $B// -z$ の両条件で行った。

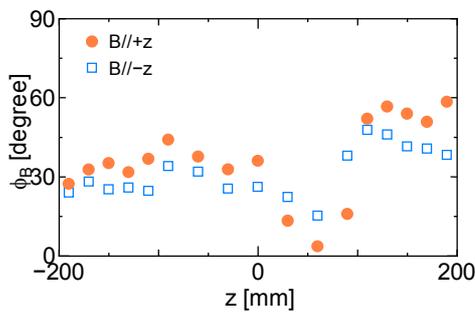
図6は、中心軸上で軸方向(z)分布を調べた結果である。アンテナは -90 mm $< z < 90$ mm に配置されている。(a)の振幅の分布では、アンテナ配置領域で増大が見られるが、測定範囲全域で大きくは変わらない。また、 $B//+z$, $B// -z$ の間でも大きな違いは見られない。一方、(b)の位相の分布によると、 0 mm $< z < 100$ mm の範囲で位相が低下している。 $B//+z$, $B// -z$ の間の違いは、やはり大きくない。

ヘリカルアンテナの励起特性を考慮すれば、 $B//+z$ および $B// -z$ で、それぞれ上流(- z) および下流(+ z) 方向への進行波のもつ高周波磁場の存在が期待できる。進行波の場合、位相が(波長に応じて)位置に比例して変化するが、この測定結果では確認できない。 $B//+z$ での上流(- z)方向の励起では、プラズマ

源端部の金属壁で反射され、定在波が形成される可能性があるが、 $B//+z$, $B// -z$ の間の違いが大きくなり、この現象も見いだせない。

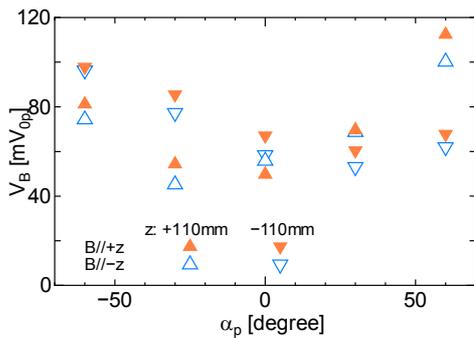


(a) 振幅

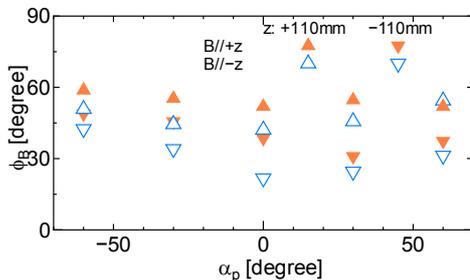


(b) 位相

図6 高周波磁場の軸方向分布



(a) 振幅



(b) 位相

図7 高周波磁場の径方向分布

プローブは、シャフトを軸として回転可能(回転角を α_p とする)で、これにより、径方

向(r)の変化を測定できる。

図7は径方向分布の測定結果である。使用しているヘリカルアンテナは、方位角方向(θ)モード数は1であり、励起される波動の軸方向磁場成分は $J_1(r)\cos\theta$ に比例する(J_1 は1次の第1種ベッセル関数)。よって、振幅の径方向分布は軸上で小さく、また α_p の正負で位相が反転することが期待される。図7の結果は期待とは異なっており、伝搬波動の高周波磁場が見いだせない。測定されたものは、アンテナの近傍電磁界と考えられる。

高周波磁場の計測結果からは、波動の励起は確認できなかった。生成されたプラズマの密度がアンテナ長に対して異なった外部磁場や高周波電力依存性となる現象は、その物理機構の追及が必要である。

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)

〔学会発表〕(計 5 件)

- (1) 乾健人, 来田真之, 清水祐樹, 中本聡, 市村和也, 竹野裕正, 単一ヘリカルアンテナ型電気推進エンジンにおける生成プラズマの径方向分布に関する研究, 平成29年電気関係学会関西連合大会, 2017
- (2) 来田真之, 乾健人, 中本聡, 市村和也, 竹野裕正, 単一ヘリカルアンテナ型電気推進エンジン模擬実験におけるイオンエネルギー分布の径方向依存性, Plasma Conference 2017, 2017
- (3) 清水祐樹, 中本聡, 市村和也, 竹野裕正, 単一ヘリカルアンテナ型電気推進エンジンのアンテナ長変化によるプラズマ生成の制御に関する研究, Plasma Conference 2017, 2017
- (4) 倉下典也, 来田真之, 清水祐樹, 中本聡, 市村和也, 竹野裕正, 単一ヘリカルアンテナを用いた電気推進エンジンにおけるイオン加熱効果の測定, プラズマ・核融合学会第33回年会, 2016
- (5) 来田真之, 倉下典也, 中本聡, 市村和也, 竹野裕正, 単一ヘリカルアンテナ型電気推進エンジンのガス圧力制御によるプラズマ生成量の変化に関する研究, 平成28年電気関係学会関西連合大会, 2016

6. 研究組織

(1)研究代表者

竹野 裕正 (TAKENO, Hiromasa)
神戸大学・大学院工学研究科・教授
研究者番号: 90216929