

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 5 月 6 日現在

機関番号：14501

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2012～2014

課題番号：24654196

研究課題名(和文) 高周波回転電磁界を用いた電磁プラズマ推進機の先進制御に関する研究

研究課題名(英文) Novel Control of Magnetoplasma Thruster Using Rotating Electromagnetic Fields

研究代表者

八坂 保能 (Yasaka, Yasuyoshi)

神戸大学・工学(系)研究科(研究院)・教授

研究者番号：30109037

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)： 中温域プラズマの応用としての高周波励起電磁プラズマ推進機においては、従来、プラズマ生成とイオン加熱を周波数の異なる個別の高周波源で行っている。さらに、高周波電磁界の励起機構などについて、より精密な理論検討の必要性が認識されてきている。本研究では、励起モードの選択性に優れた回転電磁界を用いた高周波励起電磁プラズマ推進機を試作するとともに、ヘリカルアンテナが単一周波数高周波源でモードの異なる回転電磁界を双方向に励起可能なことを実験的、理論的に示した。それら2つのモードの波により、プラズマ生成とイオン加熱を同時に達成でき、磁場強度を調整することで高効率な可変比推力が実現できることを実証した。

研究成果の概要(英文)： Usually, in magnetoplasma thrusters, two helical antennas are equipped to produce and heat plasmas with separate radio frequency (RF) sources. It is also necessary to analyze precisely wave excitation and propagation in a realistic situation including non-uniformity and finite temperature. In this research, a RF-driven magnetoplasma thruster is constructed with utilization of rotating RF fields. It is found experimentally and theoretically that a helical antenna exhibits bi-directional nature, where the waves with different mode numbers are launched and couple with electrons and ions selectively in opposite directions. These two waves are observed to produce high-density plasmas and to heat ions simultaneously, indicating that a specific impulse can be adjusted by changing the strength of the magnetic field.

研究分野：数物系科学

キーワード：プラズマ 宇宙推進 高周波 回転電磁界

1. 研究開始当初の背景

高温プラズマの研究が核融合発電を目指し、低温プラズマの研究が LSI 製造や医療応用などの発展を促しているとするれば、中温プラズマという研究領域があるはずである。その代表的なものがプラズマを利用する宇宙電気推進であろう。米国では各種電気推進の研究の中で、長年に渡る比推力可変マグネトプラズマロケット (VASIMR) の開発が 100kW オーダーの入力レベルに達している。VASIMR はヘリコン波(HW)プラズマ生成とイオンサイクロトロン波(ICW)加熱を組み合わせ中温高密度プラズマを噴出し推進するものである。これらの物理機構は既に十分解明されている、と思われがちであるが、HW によるパワー吸収機構に諸説があり検証されていないこと、ICW 加熱もトーラスやミラーでのそれと異なり、強い不均一磁場のもとでの波の伝搬・吸収特性が問題となること、など本質的な点で未解明の課題を多く含んでいる。さらに、テクニカルな観点で見ても、VASIMR が周波数の異なる 2 系統の高周波源を必要とすることは重量の増加、効率の低さを招いている。

2. 研究の目的

本研究では励起波動モードの選択性に優れた回転電磁界アンテナを用いた高周波励起電磁プラズマ推進機を試作する。VASIMR が生成と加熱に周波数の異なる 2 系統の高周波源を必要とする点を大きく改善し、単一周波数の高周波源のみで HW プラズマ生成と ICW によるイオン加熱を行い、しかもそれらの比率を任意に変化可能な電磁プラズマ推進機の原型を構築する。これにより単一周波数高周波源で高効率な可変比推力が実現できることを示す。その過程で、強い不均一性を持つ磁場における波動の伝搬と吸収の理論的解析を行い、電子やイオンへのエネルギー伝達特性についての機構解析を行う。

3. 研究の方法

既設実験装置では磁場強度が 1.3 kG、使用ガスが H<sub>2</sub> であり、1.9 MHz 仕様の回転電磁界アンテナに供給可能な電力が 1kW 程度となっているため、その印加だけではプラズマは点火しない。そのため実際には 13.56 MHz、500W のループアンテナを用いて初期点火を行っている。これに基づく影響を回避するため、1.9 MHz C 級アンプのパルス電力を増強する。高周波電源の増強によりプラズマの自己点火が可能であることを確認するとともに、回転電磁界アンテナの調整を行う。

回転電磁界アンテナにはいくつかの方式があるが、ここではヘリカルアンテナを採用する。ヘリカルアンテナは、これまで、軸に沿った一方向のみに波を励起するために使われており、一つのアンテナで単一の波を利用するのが常識であった。VASIMR もこの考えに基づいて設計されている。これに対し

我々は、ヘリカルアンテナの特性として逆方向に伝搬する波動も励起しており、しかもこれらが異なる回転モードを持つはずである、と考え、従来顧みられなかったヘリカルアンテナの双方向励起特性に着目し、その波動伝搬を検証するとともに、異なる回転モードの同時励起を行う。

続いて、HW プラズマ生成や ICW イオン加熱において、ヘリカルアンテナによる双方向異モード励振を実現し、プラズマ生成・イオン加熱に対するパワー吸収の能動的制御を実証する。シミュレーションも併用して、空間的不均一性の強い条件における ICW の伝搬、吸収に関する物理機構を究明することで、実験結果の解釈を行い、新しいタイプの高周波励起電磁プラズマ推進機を提案する。

4. 研究成果

ヘリカルアンテナを用いた高周波励起電磁プラズマ推進機の装置構成と形成される磁場配位を図 1 に示す。

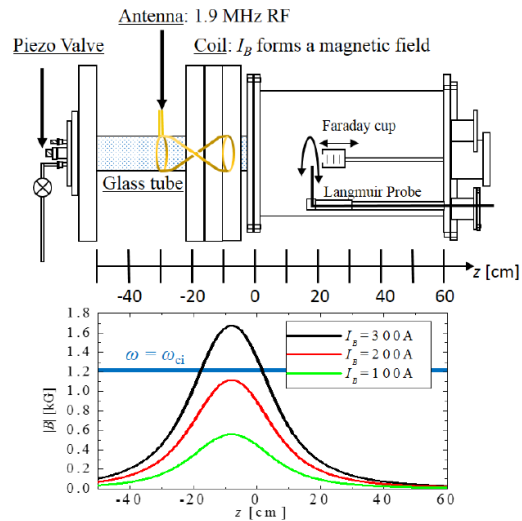


図 1 実験装置と磁場配位

実験装置は直径 10 cm、長さ 50 cm のガラス管が  $-50 < z < 0$  cm に、直径 35 cm、長さ 60 cm の真空容器が  $0 < z < 60$  cm に設置されている。ヘリカルアンテナはガラス管に取り付けられている。使用するガスは H<sub>2</sub> であり、ピエゾバルブを経由してガスを任意のタイミングでパルスの供給することが可能である。磁場コイル電流 I<sub>B</sub> により形成される磁場強度分布を図 1 下部に示す。ω/2π = 1.9 MHz がイオンサイクロトロン周波数 ω<sub>ci</sub> に一致する磁場強度を直線で表している。磁場の向きが z 軸正方向のときを B // +z、磁場の向きが z 軸負方向のときを B // -z と表す。本研究で使用したライトヘリカルアンテナは長さ 20 cm、直径 10 cm の 3 回巻であり、そのインダクタンスは L = 11.8 μH である。このヘリカルアンテナは z = -2.5 cm の位置に取り付けられている。

磁場中の波動の電界は、円筒座標において

方位角方向モード数を $m$ 、軸方向波数を $k$ 、振幅を $E_0$ とすると、

$$\mathbf{E} = E_0 \exp[i(m\theta + kz - \omega t)]$$

で表される。 $m=+1$ の場合、中心軸付近の電界の垂直成分が磁場方向に見て右回りに回転していることから、それを右旋円偏波電界 $E_R$ とよび、 $m=-1$ の場合を左旋円偏波電界 $E_L$ とよぶ。図1上図の配置を模擬した2次元領域において、アンテナの位置に3個の電流ループを置き、それらの電流の位相を90度ずつずらすことでヘリカルアンテナを近似したモデルを用いて次の波動方程式を解く。

$$\nabla \times \nabla \times \mathbf{E} - \frac{\omega^2}{c^2} \tilde{\epsilon} \mathbf{E} = i\omega\mu_0 \mathbf{J}_{ext}$$

ここで、 $\mathbf{J}_{ext}$  は電流ループの電流密度であり、その $\theta$ 成分を

$$J_\theta = \sum_m \sum_{k=1}^3 J_k \delta(r-r_k) \delta(z-z_k) \exp[i(m\theta - \phi_k) - \omega t]$$

とする。比誘電率 $\tilde{\epsilon}$ は熱いプラズマ理論に基づいた要素を与え、Z関数の引数中の $k$ には冷たいプラズマ近似の局所分散式の解を用いる。パラメータとして、 $z_1 = -250$ 、 $z_2 = -200$ 、 $z_3 = -150$  mm、 $r_k = 25$  mm、 $\phi_1 = -\pi/2$ 、 $\phi_2 = 0$ 、 $\phi_3 = \pi/2$ とし、(a)  $B // +z$ の場合と(b)  $B // -z$ の場合についての計算結果を図2に示す。

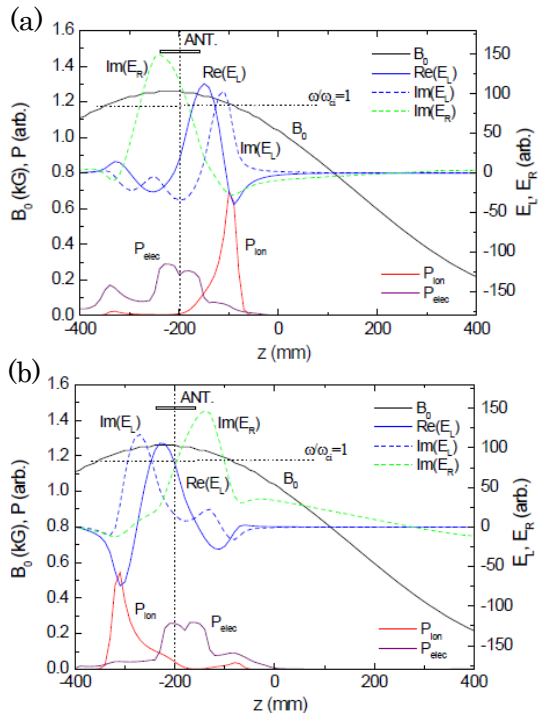


図2 波動成分の計算結果

図中の各曲線は、仮定した $|B_0|$ (黒線)、 $E_L$ の実数(Re)、虚数(Im)成分(青実線、破線)、 $\text{Im}(E_R)$ (緑破線)、イオンの電力吸収 $P_{ion}$ (赤線)、および電子の電力吸収 $P_{elec}$ (紫線)を表している。図2(a)によると、 $E_L$ はアンテナ(ANT)の右側で大きく、 $z$ の正方向に伝搬していることが分かる。 $\text{Re}(E_L)$ と $\text{Im}(E_L)$ の振幅はイオンサイクロ

トロン共鳴点(黒実線と黒水平点線の交点)において強く減衰しており、結果として、その点で $P_{ion}$ がピークを示しイオンに大きい電力を与えていることが分かる。 $\text{Im}(E_R)$ の振幅はアンテナの $-z$ 側で大きくなっており、定在波の様相を示す。 $P_{elec}$ の値はアンテナの $-z$ 側の方が $+z$ 側よりも多少大きい。これらのことは、ヘリカルアンテナが双方向に異なるモードの波動を励起し、 $+z$ 側ではイオンに電力を与え、 $-z$ 側で電子に電力を与えることを示している。

$B // -z$ の場合は、図2(b)に示すように、波動電界の伝搬姿態は(a)と比べて全く逆の様相を呈する。 $\text{Re}(E_L)$ と $\text{Im}(E_L)$ の振幅は $-z$ 側のイオンサイクロトロン共鳴点で強く減衰し、 $P_{ion}$ のピークが観測される。 $\text{Im}(E_R)$ はアンテナの $+z$ 側でより大きく、 $P_{elec}$ も同じ側で増大している。以上から、ヘリカルアンテナが、軸方向磁場の正方向と逆方向に、イオンと電子にそれぞれ作用する異なるモードの波動を励起するという双方向性が示された。

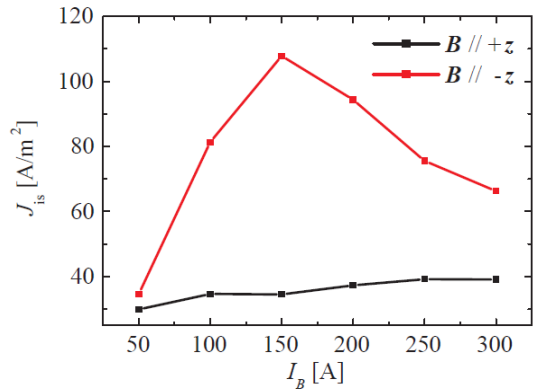


図3  $J_{is}$ の磁場強度(磁場コイル電流  $I_B$ )依存性

1.9 MHz RFによって生成されたプラズマの特性を評価するためプローブにより、 $z = 18$  cmでのイオン飽和電流密度 $J_{is}$ の $I_B$ 依存性を測定し、図3に示した。 $J_{is}$ はすべて $B // +z$ より $B // -z$ の時のほうが大きく、 $I_B = 150$  Aの時に最大で約3.5倍となっている。また、 $B // -z$ のとき $J_{is}$ は $B // +z$ に比べて磁場強度を変化させたときの変化が大きいことがわかる。

今プローブが設置してある $z > 0$ の領域について、 $B // +z$ の場合にその領域に励起されるのは $m = -1$ モードの $E_L$ 波(L波)である。しかし、この波の電子との相互作用は弱いので高密度プラズマの生成が行われずプラズマの密度も低いままである。 $B // -z$ の場合 $z > 0$ の領域に励起されるのは $m = +1$ モードの $E_R$ を持つR波である。これはL波とは異なり、プラズマ内を広く伝搬することができるためHWによる高密度プラズマの生成が行われる。つまり、 $B // +z$ と $B // -z$ のプラズマ生成量の差はHWによる高密度プラズマ生成の有無によるものである。図3で $B // +z$ において $J_{is}$ が磁場強度によって大きく変化するのはHWプラズマの密度が外部磁場に比例していることが

影響していると考えられる。

図1に示される $z = 10 \text{ cm}$ に設置したファラデーカップを用いて電圧電流特性を計測した。イオンエネルギー分布関数(IEDF)は、

$$f(V_2) \propto \frac{1}{\sqrt{V_2 - V_s}} \frac{dI_c}{dV_2}$$

と求められる。ここで、 $V_2$ はファラデーカップの第2グリッド掃引電圧、 $I_c$ はコレクター電流、 $V_s$ はプラズマの空間電位である。

図4は  $I_B = 100$  および  $220\text{A}$ のときの(a)  $B // +z$  と(b)  $B // -z$  におけるIEDFを示したものである。

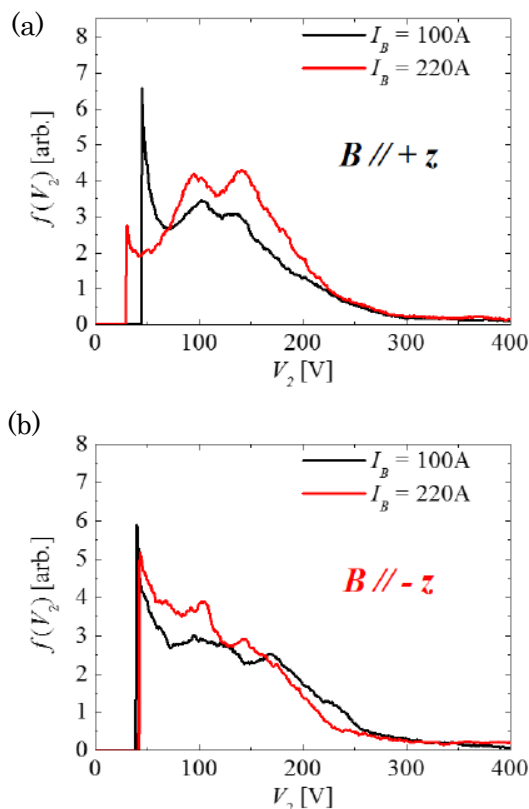


図4 イオンエネルギー分布関数

(a) において  $I_B = 220\text{A}$ のときは100Aに比べて、80-200V付近に多くの高エネルギーイオンがあり、かつ数10Vの空間電位近傍の熱イオンの数が減少している。図1に示すように、 $I_B = 220\text{A}$ の場合はイオンサイクロトロン共鳴が存在するが100Aのときはそれが無い。したがってIEDFの高エネルギー側へのシフトは、イオンサイクロトロン共鳴加熱に基づくものと言える。

(b) においては  $I_B = 220\text{A}$ と100Aの場合でIEDFの形に大きな差がなく、両者とも加熱効果は認められない。これはファラデーカップのアンテナに対する位置がICWの励起方向と逆になるためであると考えられる。

以上の結果より、 $m = +1$ の波が磁場とは逆方向に励起され、 $m = -1$ の波が磁場方向に励起されるというヘリカルアンテナの回転電磁

界双方向励起性を実証した。また、ヘリカルアンテナの双方向性を用いることにより高密度プラズマの生成とイオン加熱を同時に行うことが可能であることを示した。さらに、イオン加熱においては磁場コイル電流 $I_B$ で磁場強度を変化させることによりイオンサイクロトロン共鳴加熱を制御できることを示した。つまり、単一のヘリカルアンテナを用いることにより、単一の電源系によるシンプルな高周波励起電磁プラズマ推進機が実現する見通しが得られた。

## 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 3件)

- ① T. Hamano, R. Kinoshita, Y. Nakatsuka, Y. Yasaka, S. Nakamoto, H. Takeno, Studies on Plasma Production and Ion Heating by Using Only a Single Helical Antenna for a Simple Thruster, Plasma Fusion Research, 査読有, Vol. 10, 2015, 3406032(4pp).
- ② Y. Yasaka, Y. Hayashi, H. Takeno, S. Nakamoto, Bi-Directional Excitation of Radio Frequency Waves Using a Helical Antenna in Non-Uniform Plasmas towards a Compact Magnetoplasma Thruster, Open Journal of Applied Sciences, 査読有, Vol. 4, 2014, pp. 523-532.
- ③ Y. Hayashi, R. Kinoshita, H. Wakabayashi, S. Nakamoto, H. Takeno, Y. Yasaka, Examination on Plasma Production and Ion Heating for Electric Propulsion Using a Single Helical Antenna, Trans. Fusion Sci. Technol., 査読有, 2013, Vol.63, pp. 389-391.

[学会発表] (計 8件)

- ① 中塚祐貴, 濱野剛, 八坂保能, 中本聡, 竹野裕正, 電気推進エンジンのためのガス圧力制御による高密度プラズマ生成と特性評価に関する研究, 電気関係学会関西連合大会, 2014. 11. 24, 奈良先端科学技術大学 (奈良県) .
- ② S. Nakamoto, R. Kinoshita, T. Hamano, Y. Yasaka, H. Takeno, Studies on Plasma Production and Ion Heating Using Bi-Directional Excitation of High Frequency Waves for Electric Propulsion, 10th Int'l. Conf. Open Magnetic Systems for Plasma Confinement, 2014, Aug. 27, Daejeon (Korea).
- ③ R. Kinoshita, T. Hamano, Y. Hayashi, S. Nakamoto, Y. Yasaka, H. Takeno,

Studies on Plasma Production and Ion Heating Using High Frequency for Electric Propulsion, 23rd Int'l. Toki Conf. on Large-Scale Simulation and Fusion, 2013, 11.20, Ceratopia Toki (Gifu pref.).

- ④ 濱野剛, 木下良佑, 八坂保能, 中本聡, 竹野裕正, 単一アンテナによるプラズマの生成と加熱に向けたプラズマスタートアップに関する研究, 電気関係学会関西連合大会, 2013. 11. 16, 大阪電気通信大学 (大阪府) .
- ⑤ Y. Yasaka, Y. Hayashi, H. Takeno, S. Nakamoto, Y. Kinoshita, Bi-Directional Excitation of ICRF Waves in Non-Uniform Plasmas Towards a Compact RF-Driven Magnetoplasma Thruster, 31st Int'l. Conf. Phenomena in Ionized Gases, 2013, July 15, Granada (Spain).

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

八坂 保能 (YASAKA, Yasuyoshi)  
神戸大学・大学院工学研究科・教授  
研究者番号：30109037