

シートプラズマを用いたプラズマ推進機の基礎研究

前川堯史 (東海大学), 萩原聡 (東海大学), 飯島貴朗 (東海大学)
利根川昭 (東海大学), 河村和孝 (東海大学), 佐藤浩之助 (中部電力)

背景

現在、次世代宇宙推進機として電気推進機 (プラズマエンジン) の開発が進められている。その規模は、大型化と小型化に2分する傾向があり、特に大型化の電気推進機では、プラズマ生成機構と加熱・加速機構を組み合わせることにより、推力と比推力を独立に制御できるVASIMR (Variable Specific Impulse Magneto plasma Rocket) 等の電気推進機が注目されている。VASIMRが目標としている推力、比推力の位置と各エンジンの推力、比推力の現状をfig. 1に示す。

VASIMR (VX-200) は200kWの高周波電力で50eVほどのイオン温度を得ることができるが、放電時間は数秒で定常運転には至っていない。本研究室のシートプラズマ生成装置 (TPD-SheetIV) は、定常かつ高密度・大面積のプラズマ生成と、低電力でより効率的なイオン加熱が可能であるため、電気推進機としての応用が期待できる。

本研究室では、シートプラズマを用いて、イオンサイクロトロン共鳴 (ICR) 法でイオンを加熱し、発散磁場により粒子を加速させる研究を行なっている。

本研究の目的は、定常で高密度のシートプラズマに対し、平行平板電極によるイオンサイクロトロン共鳴 (ICR) 法と発散磁場を用いて、低電力でイオンの加熱・加速実験を実証することである。

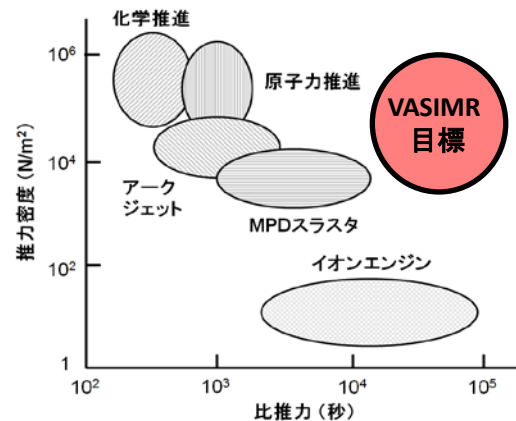


fig.2 推力、比推力とエンジンの関係

本実験ではイオンにサイクロトロン周波数と同程度の高周波電場を印加することで共鳴現象を起こしイオンを加熱させるイオンサイクロトロン共鳴 (ICR) 法を用いている。また、磁気モーメント保存則とエネルギー保存則に従い ICR 法により磁力線に対して垂直方向に加熱した後、垂直方向のエネルギーを磁力線に対して平行方向に変換することで加速させる。

平行平板高周波電極を用いて、高周波電場を印加し、イオン加熱を行う際にイオンは共鳴現象を起こし、イオンのラーマ半径が次第に大きくなる。ラーマ半径の式は下式の通りである。

$$r = \frac{mv_{\perp}}{qB} \quad (1)$$

(1)式から分かるように、ラーマ半径が大き

くなるとイオンは磁場に対して垂直方向成分の速度が大きくなり、下式の運動エネルギーの式により垂直方向成分の速度増加がイオン温度増加に繋がる。

$$\frac{1}{2}mv_{\perp}^2 = k_B T_{i\perp} \quad (2)$$

ICR 法で垂直方向に増加したエネルギーは磁気モーメント保存則とエネルギー保存則に従い下式のように平行方向成分に変換される。

$$\Delta T_{i//} = T_{i\perp(i)} \left(1 - \frac{B_{(f)}}{B_{(i)}}\right) \quad (3)$$

ここで、 r はラーマ半径[m]、 m はイオン質量[kg]、 v_{\perp} は垂直方向速度[m/s]、 q は電荷[C]、 B は磁場強度[T]、 k_B はボルツマン定数、 T_i はイオン温度 [eV]、(f)は発散後、(i)は発散前を表している。(3)式より、発散前の磁場よりも発散後の磁場が小さい値のとき平行方向のイオン温度は増加する。fig.3 に理論式による磁場強度に対するイオンエネルギーの変化量を示す。磁場を発散させることにより平行成分のイオンエネルギーは増加していることを示している。また、垂直方向のイオン温度が高い程、より平行成分のイオンエネルギーが大きな値を示している。イオン温度測定には 2 枚のグリッドと 1 枚のコレクタから構成された Fraday-cup を使用し、イオン温度は

$$T_i = \frac{\int_0^{\infty} V_p \left(\frac{dJ_i}{dV_p}\right) d\sqrt{V_p}}{\int_0^{\infty} \left(\frac{dJ_i}{dV_p}\right) d\sqrt{V_p}} \quad (4)$$

上式より求めることが可能である。

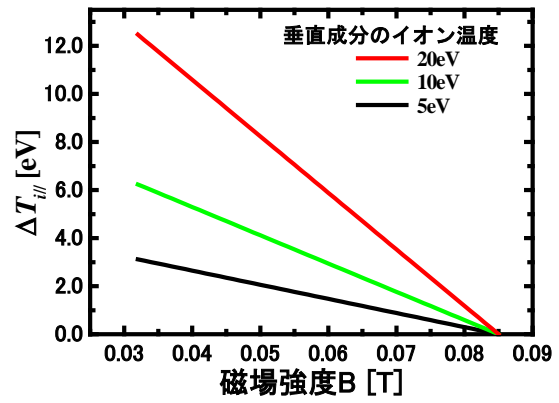


fig.2 磁場強度変化に対する平行方向のイオンエネルギー変化量

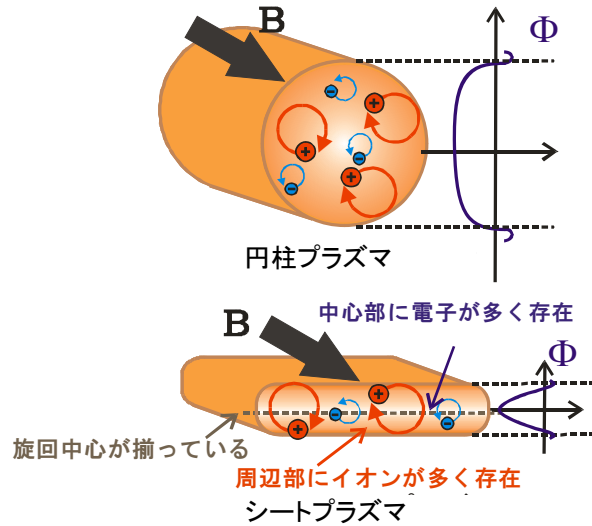


fig.3 円柱プラズマとシートプラズマの比較

円柱プラズマとシートプラズマの比較を表した図を fig.3 に示す。

シートプラズマとは、イオンのラーマ半径の 2 倍程度の厚さを有し、中心部に電子、周辺部にイオンが多く存在する境界上のプラズマである。円柱プラズマに比べ加熱効率の向上が期待でき、高周波電極も平行平板の様な簡易的な形状を用いた加熱が可能である。

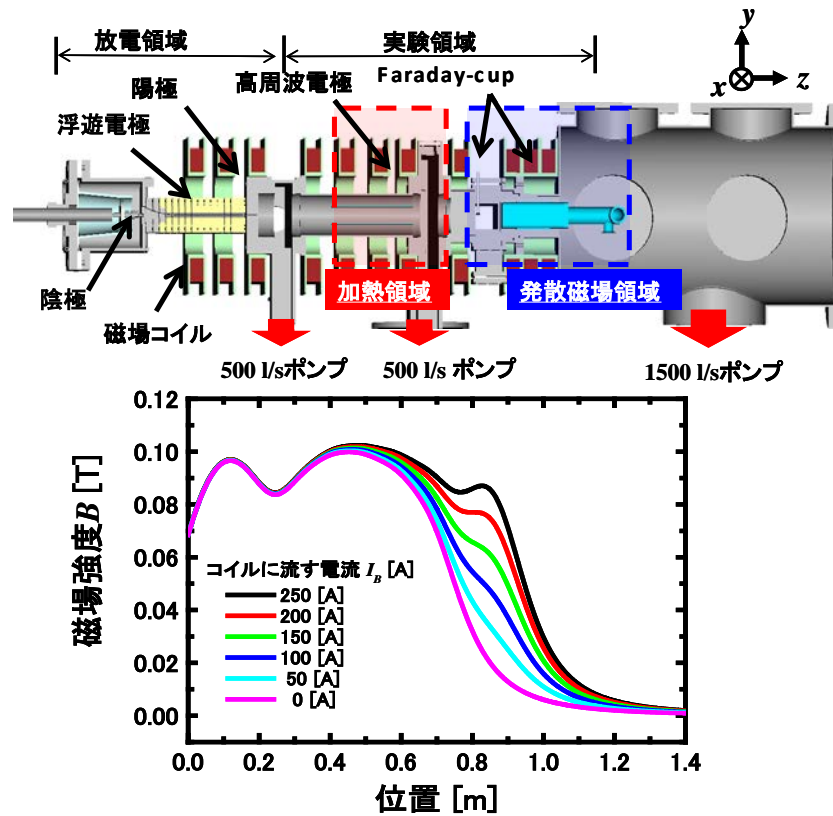


fig.4 TPD-SheetIV概念図と磁場分布

実験装置

fig.4 にシートプラズマ生成装置 (TPD-Sheet IV) の概念図と磁場分布を表した図を示す。本実験は放電電流 50A、ガス種 He、計測位置での磁場強度 0.03~0.09T 間で変化させた。放電領域でプラズマを生成させ浮遊電極と磁場によりシート状にしている。また、磁場と圧力差を利用してプラズマを測定位置まで引き伸ばしている。加熱領域に設置している平行平板高周波電極により最大 500W でイオンを加熱している。イオン温度測定には Faraday-cup を用いおり、1枚目のグリッドで電子の追い返し及びイオンの引き込み、2枚目のグリッドでバイアス電圧 (40V) を印加し、最後コレクタによってイオンの検出と 2次電子の追い返しを行なっている。測定を行なった。

垂直方向のイオン温度は圧空動作式 Faraday-cup により測定を行なっている。

また、発散磁場領域にあるコイルに流れる電流を変化させることで磁場を発散させイオン加速を行なっており、平行方向のイオン温度は水冷式 Faraday-cup で常時プラズマが照射している位置において測定している。

実験結果

fig.5 に He⁺イオンの共鳴周波数変化の結果を示す。He⁺のイオン温度 $T_{i\perp}$ は、イオンサイクロトロン共鳴周波数 390kHz の約 1.3 倍である 522kHz 程度で最大になった。fig.7 にイオン温度の空間分布 (厚さ方向) の結果を示す。高周波出力を印加しない場合、イオン温度 $T_{i\perp}$ は、中心から 5 mm 程度で最大 4.5eV となった。その後、高周波出力を 500W に増加させると、イオン温度 $T_{i\perp}$ は全体的に上昇し、最大で 7 eV 以上になった。fig.8 に電子密度の空間分布の結果を示す。磁場を発散させることにより電子密度は減少してい

く傾向がみられ、半分程度になったが $10^{18}[\text{m}^{-3}]$ 以上の値を示しており、高密度プラズマを維持することができた。fig.9 に発散磁場中でのイオン温度変化の結果を示す。磁場を発散させると、磁気モーメント保存則に従い垂直成分のイオン温度は減少し、平行成分のイオン温度は上昇した。これによりイオンは平行方向に加速された。ICR 法により、垂直方向のイオン温度 $T_{i\perp}$ は、4.4eV から 7.1eV まで上昇した。ICR 法と発散磁場により、平行方向のイオン温度は、6.1eV から 11.0eV に上昇し、定常かつ高密度プラズマでのイオンの加熱・加速に成功した。

今後は高周波電極の形状を変化させ加熱効率を向上を目指すと共に推力および比推力測定し、プラズマ推進機としての性能を検証することを考えている。

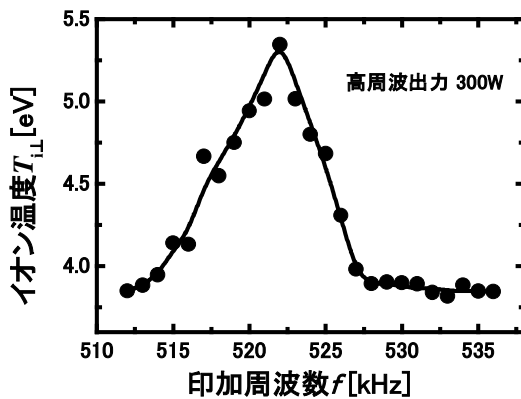


fig.6 He⁺イオンの共鳴周波数変化

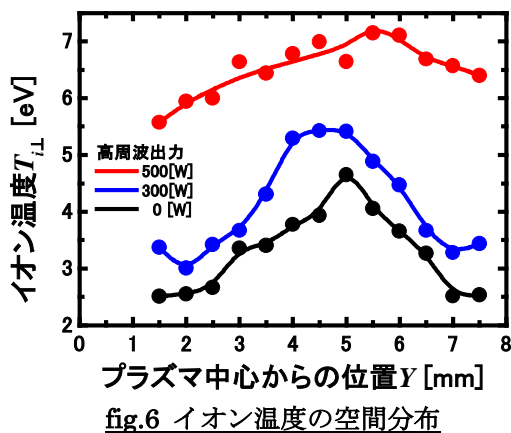


fig.6 イオン温度の空間分布

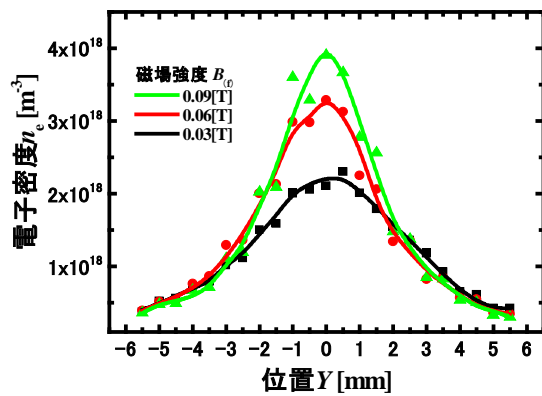


fig.7 電子密度の空間分布

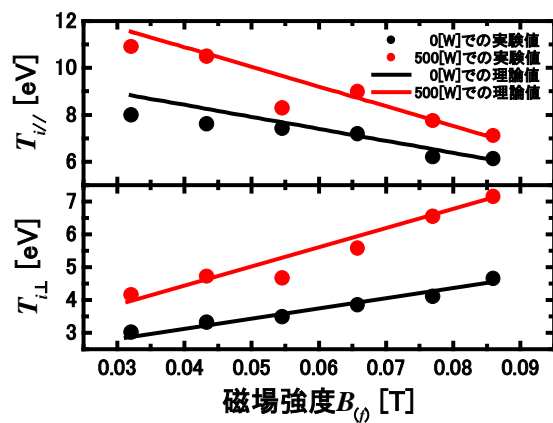


fig.8 磁場強度変化に対するイオン温度変化

参考文献

- 1) “Ion cyclotron resonance acceleration in nonuniform magnetic field on linear divertor simulator TPD-sheetIV”
T. Iijima, H. Hagiwara, S. Tanaka, A. Tonegawa, K. Kawamura, K.N. Sato
Fusion science and technology.
- 2) “Selective Heating of Helium Ion in a Magnetized Sheet Plasma”
Y.Ohara, S.Yasuda, M.Ono, A.Tonegawa, K.Kawamura
Department of Physics, School of Science, Tokai University
- 3) “高周波封じ込めとカスプ”, 佐藤照幸, 高山一男, 名古屋大学プラズマ研究所(1989)