

平成 27 年 5 月 10 日現在

機関番号：17102

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2013～2014

課題番号：25800306

研究課題名(和文) 回転するプラズマの流れ構造形成に関する実験的研究

研究課題名(英文) Experimental Study on Flow Structure of Rotating Plasma in an Inhomogeneous Magnetic Field

研究代表者

寺坂 健一郎 (Terasaka, Kenichiro)

九州大学・総合理工学研究科(研究院)・助教

研究者番号：50597127

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,200,000円

研究成果の概要(和文)：本課題では同心円筒電極を用いて磁化プラズマの回転流れを変化させることで、不均一磁場領域の回転するプラズマの流れ構造形成を能動的に調べた。特に、磁化領域からイオン非磁化領域までの大域的な流れ構造を、様々な回転流で調べることを目的に研究を行った。回転電極へのバイアス条件を変化させることで、回転の向きや回転強度・分布を選択可能であることを示した。プラズマの回転を強くした時、中心領域の主流の反転が生じる反転流が観測された。沿磁力線プラズマ加速や回転の有無によるイオン非磁化領域の電場構造の変化など、回転が流れ場全体に及ぼす影響について実験的データを基にした議論を展開することが出来た。

研究成果の概要(英文)：Flow structure of rotating plasma in an inhomogeneous magnetic field was studied with the HYPER-II device. We developed a multi-cylindrical electrode to control the angular momentum of plasma. In order to understand the effect of plasma rotation on flow and electric field structures in the ion-unmagnetized plasma region. The electrode produces a radial electric field (typically 1 V/cm), and its direction and spatial profile are controlled by changing the bias pattern. It was confirmed that the azimuthal plasma rotation due to the ExB drift is produced in the magnetized region. When the angular velocity increased, a reversal flow configuration was found. In addition, the characteristics of reversal flow structure observed in the magnetized region tends to change in the ion-unmagnetized region. This indicates that the effect of plasma rotation on the ion acceleration along the magnetic field line is important.

研究分野：プラズマ物理学

キーワード：プラズマ物理 不均一磁場 角運動量

1. 研究開始当初の背景

磁場環境下のプラズマを知ることは、恒星や惑星磁気圏プラズマといった天体プラズマ現象の理解や、磁場印加型プラズマ推進機の効率化など学理的・工学的に重要な意味を持つ。一般に、磁化されたプラズマは加速を伴いながら弱磁場領域側へ沿磁力線方向の加速を受けて流れる性質がある。このプラズマが弱磁場・強発散磁場領域に侵入するとイオンが非磁化、電子は磁化されているというイオン非磁化プラズマ状態が実現される。従来の実験研究は殆どが磁化領域に限定されており、イオン非磁化領域を含めた大域的な流れ構造形成は十分に理解されていない。

我々は核融合科学研究所の HYPER-I 装置を用いた先行研究で、発散磁場領域におけるイオン流線の磁力線の乖離(デタッチメント)を直接観測した。デタッチメント発生領域ではプラズマの回転駆動や直進性の発現といった磁化領域のプラズマとは異なる流れ構造形成の性質が観測され、非一様磁場中の流れ構造形成の理解にはイオン非磁化領域を含めた議論が重要であることが分かってきた。

一方、先行研究では装置の構造上、計測がデタッチメント発生領域に限定される問題があった。そこで、九州大学にイオン非磁化領域を含めた大域的な流れ構造を調べることが可能な遷移プラズマ実験装置(HYPER-II) [図 1(上)] を設計し、不均一磁場猟奇の流れ構造形成を詳細に調べることが目的とした実験を計画した。特に、プラズマの持つ角運動量に着目し、回転するプラズマの流れ構造形成を能動的に調べることが目的とした。

2. 研究の目的

本研究の目的は、強発散磁場領域におけるプラズマの流れ構造に対する回転の効果を実験的に明らかにすることである。本研究では同心円筒電極を用いて分布や極性の異なるを持つ回転流を生成し、磁化プラズマ領域

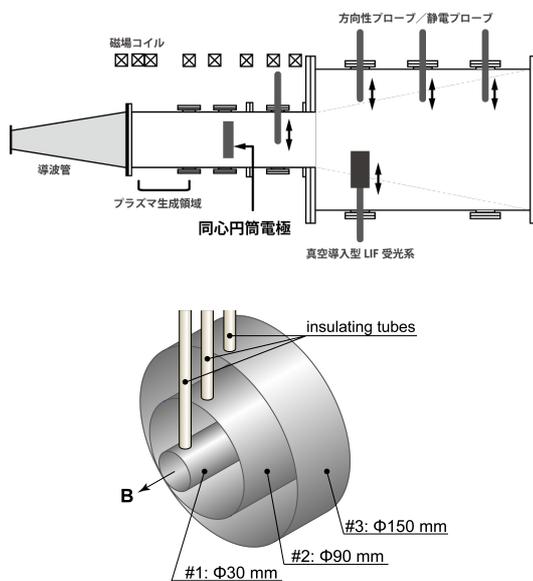


図 1 (上)HYPER-II 装置の概略図と計測器の配置例。(下) 同心円筒電極の概念図。

で初期角運動量を制御して回転するプラズマの流れ構造形成を調べる。

磁力線からのイオン流線の乖離が生じる磁化 - 非磁化遷移領域を含む広い領域を実験対象とし、大域的な流れ構造を精密に計測する。また、流れ形成に対する電磁場の担う角運動量の役割に着目して電磁場とプラズマ(物質)の回転がどのように結びついているかを議論する。

3. 研究の方法

イオン非磁化領域を含む大域的な不均一磁場領域の流れ構造を調べるための HYPER-II 装置の概略図を図 1(上)に示す。HYPER-II 装置は直径 300 mm、軸長 950 mm のプラズマ生成チャンバーと弱磁場・発散領域の流れを調べることが可能な直径 760 mm、軸長 1250 mm の拡散チャンバーから構成される。拡散チャンバー内の磁場強度は 10 G から 300 G 程度となっており、先行研究に比べ桁程度小さな磁場強度まで流れ構造を

調べることが可能である。プラズマの生成には大容量の高電子密度・高電子温度プラズマを生成可能な電子サイクロトロン共鳴プラズマを用いた(入射マイクロ波周波数は 2.45 GHz)。

回転制御用の電極を設置可能な水冷式真空容器を製作し、HYPER-II 装置のプラズマ生成点(電子サイクロトロン共鳴点)近傍に設置した。また、流れ計測用のポートを併設することで、磁化プラズマ領域の角運動量の制御性をモニターした。

同心円筒電極は図 1(下)に示すように直径 30 mm、90 mm、150 mm の 3 個の円筒電極から構成される。電極形状に円筒構造を採用することによって、弱磁場側に流すプラズマの密度減少(プラズマへの擾乱)を最小限にしつつ十分なバイアスの効果を得ることが可能となるように工夫を行った。

4. 研究成果

同心円筒電極を用いた回転駆動の原理実証を行うために、電極への印加電位を変えながら、プラズマ中の電位分布を計測した。図 1 に典型的なバイアスパターンにおけるプラズマ電位の径方向分布を示す。バイアスの条件を変えることで、凸型分布から凹型分布まで電位分布を変化させられる事ができる。プラズマ断面に滑らかな電位勾配が形成され

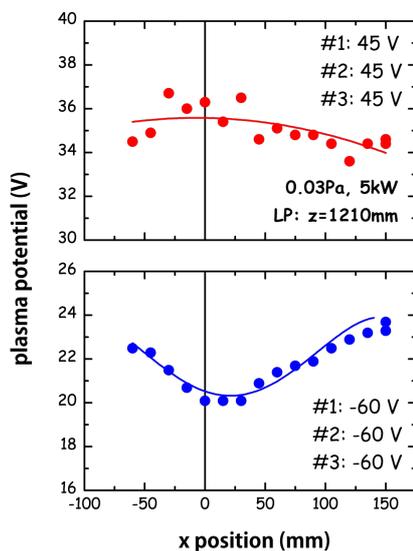


図 2 バイアスパターンを変えた場合のプラズマ電位の径方向分布。

ている。典型的な径方向電場の大きさは 1 V/cm 程度で、この電場による $E \times B$ ドリフト速度はイオン音波速度程度となる (E , B はそれぞれ電場と磁場)。沿磁力線方向の加速による主流の典型的な速度がイオン音速程度であることから、主流が支配的な状況から、回転と主流が同程度の速度を持つ旋回流までの流れ構造を能動的に作り出すことが可能であることを示した。

方向性プローブを用いて電極バイアスによって生じる径方向電場によってプラズマの周方向回転が制御可能であることを調べた。図 3(上) は典型的なバイアス条件における周方向回転流速の径方向分布である。バイアス条件を調整することで、回転の方向や強度を選択可能であることが分かる。回転の向きおよび分布は電位分布から計算される $E \times B$ ドリフト速度の分布に一致している。本研究で扱うプラズマの支配的な回転駆動機構が $E \times B$ ドリフトであることから、同心円筒電極を用いた $E \times B$ ドリフト駆動による回転制御が可能であることを示した。また、バイアス実験時の電子密度は電極を挿入しない場合と同程度で円筒電極形状によるバイアスによって少ない擾乱で効率のよい回転駆動方式を実現したと言える。

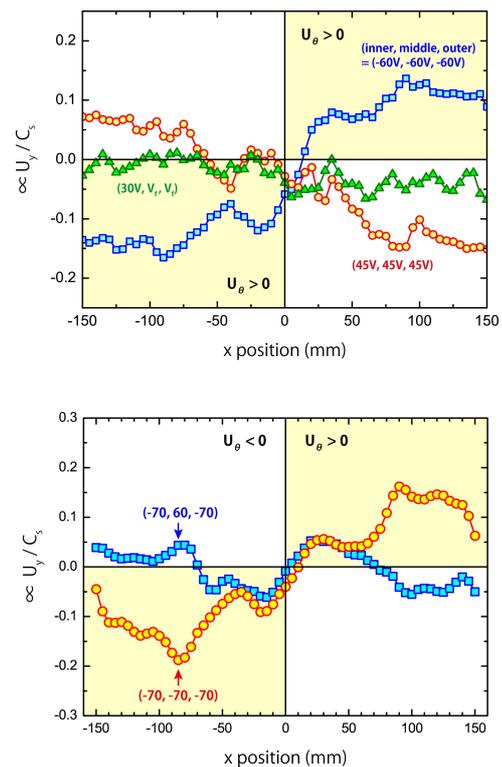


図 3 バイアスパターンを変えた場合の回転流速の径方向分布。(上): 回転の方向を変化させた場合。(下): 回転の分布を変化させた場合。

回転強度の径方向の勾配（径方向の速度シア）は天体における磁気回転不安定性や乱流プラズマの不安定性および輸送の改善とも密接に関係しており、回転の強さと並び構造形成を特徴づける重要な量である。したがって、回転流の径方向分布の制御は能動的な実験に求められる一つの課題である。図 3(下)は直径 90 mm の電極のバイアスのみを変えた場合の周方向回転の径方向分布である。半径 30 mm より内側の領域では同じ回転分布であるのに対し、半径 50 mm より外側の領域では分布が異なる。このことは、回転の向きや強度だけでなく分布も変えることが出来ることを意味している。

本研究の目的の一つは沿磁力線方向の流（主流）と回転流の関係を調べることである。旋回の強い軸対称流れにおいては主流の性質が変化することが知られている。図 4 は回転の強い条件における軸方向流速と回転流速の径方向分布である。半径が 50 mm より内側の領域で軸方向流速が周辺に比べ減少しており、この領域は回転が強い領域に対応している。特に、半径 30 mm 以内の領域では実験室系で見て強磁場側へプラズマが流れる反転流分布が形成されている。この結果は不均一磁場領域の流れ構造形成において、回転と主流（沿磁力線加速）に関係性があり、圧縮性や電磁力が重要と成るプラズマにおいても、加速の効率化に回転の制御が重要であることを示す興味深い結果である。

反転流が観測される条件でより弱磁場領域の流れを計測した。イオンが非磁化となるような弱磁場領域では反転流の性質が解消

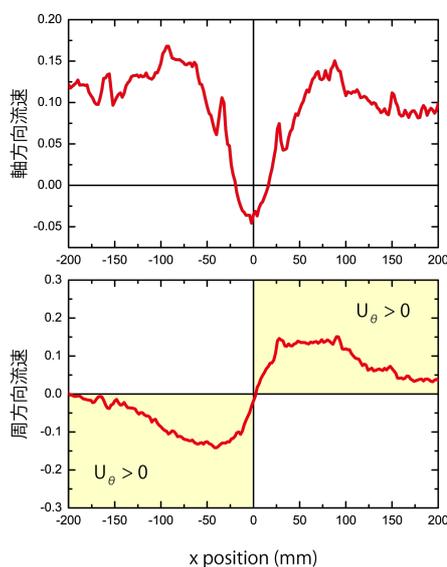


図 4 (上) 軸方向流速と (下) 回転流速の径方向分布。渦の中心領域で主流の反転が生じる。

される傾向も見られ、磁化・イオン非磁化領域を通じて特異な流れ構造が形成されることが実験的に見出された。

本研究では新たに同心円筒電極を開発し、プラズマの角運動量を制御することで、回転するプラズマの流れ構造について調べた。円筒形状を採用することで制御性の良い実験を実現することが出来、沿磁力線方向の流れ構造形成に回転が重要な役割を果たすことが分かった。また、イオン非磁化領域における反転流の解消など新しい性質も見られた。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(3件 査読有)

1. [K. Terasaka](#), M.Y. Tanaka, S. Yoshimura, M. Aramaki, Y. Sakamoto, F. Kawazu, K. Furuta, N. Takatsuka, M. Masuda and R. Nakano: “Flow structure formation in an ion-unmagnetized plasma: HYPER-II experiments”, *J. Plasma Physics* (2014) DOI:10.1017/S0022377814000695
2. S. Yoshimura, [K. Terasaka](#), E. Tanaka, M. Aramaki, A. Okamoto, K. Nagaoka, and M. Y. Tanaka: “Exploration of spontaneous vortex formation and intermittent behavior in ECR plasmas: The HYPER-I experiments”, *J. Plasma Physics* vol.81 (2015) 345810204, DOI:710.1017/S0022377814001147
3. [K. Terasaka](#), S. Yoshimura, Y. Kato, K. Furuta, M. Aramaki, T. Morisaki, and M.Y. Tanaka: “High-impedance wire grid method to study spatiotemporal behavior of hot electron clump generated in a plasma”, *Review of Scientific Instruments* 85, 113503-1-4(2014) DOI:10.1063/1.4901096

〔学会発表〕(計 8 件)

1. 寺坂健一郎, 吉村信次, 川頭史弥, 荒巻光利, 田中雅慶: “ Study on Flow Structure Formation in a Diverging Magnetic Field with the HYPER-II Device ”, International Congress on Plasma Physics, ICPP2014 (リスボン, ポルトガル, 2014 年).
2. 吉村信次, 寺坂健一郎, 田中瑛貴, 荒巻光利, 田中雅慶: “ Intermittent Generation of Localized Higher Electron Temperature Regions in a Weakly-ionized Electron Cyclotron Resonance Plasma ”, ICPP2014 (リスボン, ポルトガル, 2014 年).
3. 寺坂健一郎, 川頭史弥, 古田勘士, 中野陸, 吉村信次, 田中雅慶: “ Experimental Study on an Intermediate Plasma in the HYPER-II Device ”, 56th Annual Meeting of the APS Division of Plasma Physics (ニューオーリンズ USA, 2014).
4. 吉村信次, 荒巻光利, 寺坂健一郎, 戸田泰則, 鹿野豊, Uwe Czarnetzki: “ Plasma spectroscopy using optical vortex laser ”, 56th Annual Meeting of the APS Division of Plasma Physics (ニューオーリンズ USA, 2014).
5. 寺坂健一郎, 吉村信次, 川頭史弥, 古田勘士, 中野陸, 田中雅慶: “HYPER-II 装置を用いたプラズマダイナモ実験”, Plasma Conference (新潟, 2014).
6. 永岡賢一, 日高芳樹, 吉村信次, 寺坂健一郎, 政田洋平, 小林達也, 横井喜充, 久保雅仁, 石川遼子, 三浦英昭: “回転流体中の乱流輸送の基礎実験”, Plasma Conference (新潟, 2014).
7. 川頭史弥, 古田勘士, 中野陸, 寺坂健一郎, 吉村信次, 荒巻光利, 田中雅慶: “イオン非兎かプラズマにおける流れ構造形成”, Plasma Conference (新潟, 2014).
8. 寺坂健一郎, 川頭史弥, 古田勘士, 中野陸, 吉村信次, 田中雅慶: “円筒電極を用いた回転流制御と不均一磁場領域の流れ構造”, 日本物理学会 第 70 回年次大会 (早稲田大学, 2015).

〔その他〕

ホームページ等

<http://plasma.kyushu-u.ac.jp/>

6 . 研究組織

(1)研究代表者: 寺坂健一郎(九州大学)