

平成21年 5月28日現在

研究種目：基盤研究 (c)
 研究期間：2007～2008
 課題番号：195405222
 研究課題名 (和文) 高ベータ磁気流体プラズマの流れが関与する2流体緩和構造形成の実験的検証
 研究課題名 (英文) Experimental verification of two-fluid relaxed structure formation related to high-beta magnetohydro-plasmas
 研究代表者
 永田 正義 (NAGATA MASAYOSHI)
 兵庫県立大学・大学院工学研究科・教授
 研究者番号：00192237

研究成果の概要：

本研究では磁化同軸プラズマガンを用いた磁気ヘリシティ入射法により、プラズマ中に駆動される高速イオン流の特性について各種流速計測法（マッハプローブやイオンドップラー分光法等）を用いて調べながら、電子流体だけでなく、イオンの流れが強く関与する高ベータ磁気流体プラズマの自律的磁場構造形成について解明を行い、2磁気流体緩和物理について理解を深めた。

交付額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2007年度	2,200,000	660,000	2869,000
2008年度	1,300,000	390,000	1690,000
年度			
年度			
年度			
総計	3,500,000	750,000	4,250,000

研究分野：プラズマ科学

科研費の分科・細目：プラズマ科学

キーワード：球状トーラス、スフェロマック、2流体MHD緩和、磁気ヘリシティ入射

1. 研究開始当初の背景

近年、実験室内で作られる磁気プラズマが自発的に流れを生み出し、電磁場との相互作用によって豊かな構造を生み出していることがわかってきた。トカマクの閉じ込め特性の改善に寄与する帯状フローもその一つの典型例である。また、スフェロマック、球状トーラスや逆磁場ピンチプラズマ(RFP)など、自己組織化機能の強い高ベータ磁気流体プラズマのダイナミックな磁場構造形成は、太陽コロナの間欠的爆発的現象（フレアー）にみられる磁気リコネクション、粒子加速、衝

撃波発生などと共通の物理機構が内在していることが明らかにされている。このように、実験室プラズマと天体宇宙プラズマとのアナロジーが議論され始め、「プラズマの流れ」の重要性が強く認識されるようになって来た。現在、高ベータ磁気流体プラズマ研究は、一磁気流体モデルによる諸現象の理解ではなく、イオン流体と電子流体を分離して取り扱う2磁気流体モデルを取り入れた電磁流体理論に基づく解析が主流となりつつある。

2. 研究の目的

本研究ではイオンの流れが強く関与する高ベータ磁気流体プラズマの自立的磁場構造形成について各種流れの計測法を用いて解明し、さらにそれを能動制御しながら、2磁気流体緩和物理について理解を深めることを目的としている。

3. 研究の方法

既存の HIST 装置を用いて、スフェロマック、Low-q&High-q 低アスペクト比トカマク、球状 RFP プラズマ生成を実施し、ヘリシティ入射電流駆動現象を観測するための計測装置を構築する。そのために、マッハプローブとイオンドップラー分光計測装置を製作する。また、ダイナモ乱流の計測として、静電プローブとマッハプローブを複合したプローブを新規に開発し、新規のプラズマ計測として適応する。

4. 研究成果

(1) マッハプローブによる流れ計測

今回作成したマッハプローブの先端部の概観を図 1 に示す。作成したマッハプローブは up-down タイプを採用している。露出長さ 1.2 mm 直径 0.8 mm の電極 9 本を有し、高さ 3 mm の壁を隔てて対向するように設置された 2 組の電極によりトロイダル方向、ポロイダルの両方向の流れを同時計測できる構造となっている。

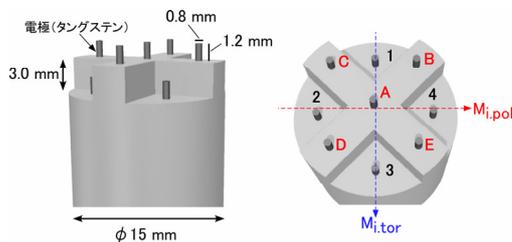


図 1 マッハプローブの構造

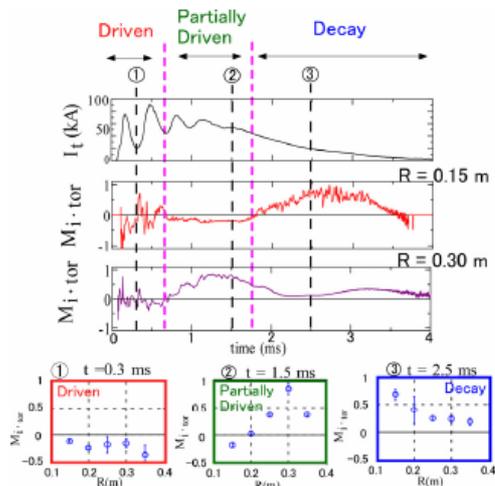


図 2 イオン流速の空間分布

図 2 にマッハプローブを用いてトロイダルイオンフローの径方向分布を計測した結果を示す。 $M_{i, \text{tor}}$ はトロイダルイオンマッハ数を表している。HIST 装置で生成される ST プラズマの時間発展はヘリシティ駆動過程 (Driven-phase, Partially driven-phase) と抵抗減衰過程 (Decay-phase) に区別される。プラズマ電流が駆動されている Driven-phase においては Inboard 側、Outboard 側共にプラズマ電流 I_t と反対方向のフローが駆動されている。その後プラズマ電流の減衰によって、プラズマが完全な Decay-phase に移行するとすべての径においてトロイダルイオンフローの向きが I_t と同じ向きに反転することが分かった。さらに今回の計測でこの Driven-phase から Decay-phase へ移行する際に、中心コラム(中心柱)のフローだけ I_t と反対方向になる分布を経由する事が新たに確認された。

(2) イオンドップラー分光による流れ計測

イオンドップラー分光 (Ion Doppler Spectroscopy: IDS) システムは、バンドル光ファイバを使用した集光系、1m 回折格子分光器、および 16 チャンネルマルチアノード光電子増倍管 (PMT) を使用した検出系によって構成される。また、集光系における光ファイバ挿入用ガラス管の先端には反射ミラーを設置しており、ガラス管の挿入深さを変えることでプラズマ回転の径方向分布を計測することができる。

IDS 計測によるトロイダルフローの径方向分布計測結果を図 3 に示す。図 3 においては、プラズマトロイダル電流の方向を正としている。時間帯によってトロイダルフローがプラズマ電流と逆向きになっている領域が存在することが確認できる。 $t = 0.4$ ms までの時間帯においては、すべての位置

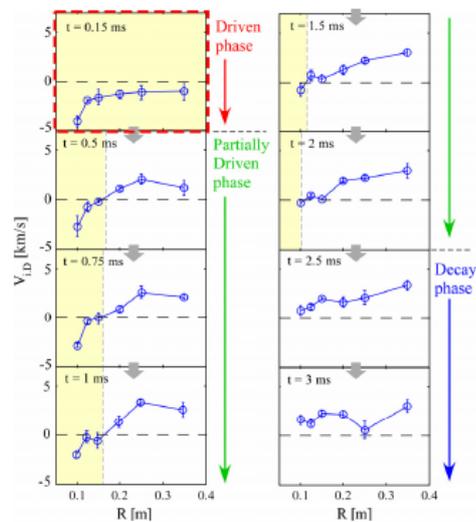


図 3 IDS 計測

でトロイダルフローが反転することがわかった。その後、時間変化とともにトロイダルフローの方向が外側から順にプラズマ電流と同方向へと変化し、 $t = 0.5 \sim 2.0$ ms の時間帯では内側領域と外側領域で反対方向のフローが混在する分布となっている。この流れの特性はマッハプローブ計測結果と良く一致する。

(3) ダイナモ計測結果

一般化されたオームの式は次式で表される。

$$\begin{aligned} \eta \mathbf{j} &= \mathbf{E} + \mathbf{v} \times \mathbf{B} - \frac{1}{en} \mathbf{j} \times \mathbf{B} + \frac{1}{en} \nabla p_e \\ &= \mathbf{E} + \mathbf{v}_e \times \mathbf{B} + \frac{1}{en} \nabla p_e \end{aligned} \quad (1)$$

ここで、 \mathbf{j} 電流密度、 \mathbf{E} 電場、 \mathbf{B} 磁束密度、 p_e 電子圧力、 \mathbf{v}_e 電子速度、 η 抵抗である。各項の揺動成分を考慮し、平均化すると、MHD ダイナモ項は、

$$\langle \tilde{\mathbf{v}} \times \tilde{\mathbf{B}} \rangle_{\parallel} \cong \langle \tilde{\mathbf{E}}_{\perp} \cdot \tilde{\mathbf{B}}_{\perp} \rangle / \bar{\mathbf{B}} \quad (2)$$

と表すことができる。このダイナモ電場を計測するための新しいプローブを製作した。

図4に今回作成したダイナモプローブの概観を示す。作成したプローブは3軸マッハプローブの内部に3軸磁気プローブを配置した構造となっている。これにより同じ場所において3軸方向の流速と磁場を同時計測可能である。また基準電極 B-C, C-D 間の電位差を計測する事で同時にトロイダル、ポロイダル方向の電場も計測可能である。電極にはマッハプローブ同様タングステンを採用している。流速を計測する3軸マッハプローブは、全て同じ条件のように壁の形状、電極間の距離などの条件をすべて同じにしている。

図5に、計測結果を示す。プラズマ電流に明確な揺動が観測され、磁気軸付近の電流密度の時間変化からわかるように、間欠的に繰

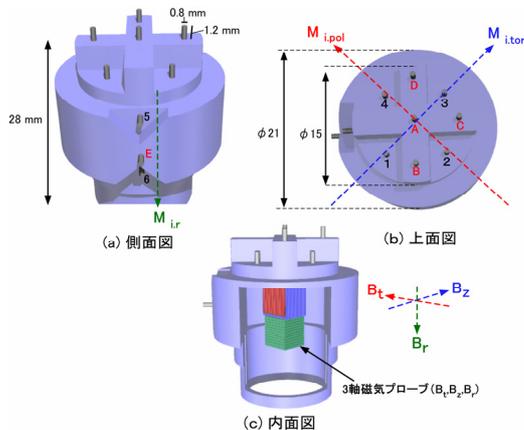


図4 ダイナモプローブの構造

り返される増幅は、速度と磁場揺動から計算されるダイナモ電場と呼応している。

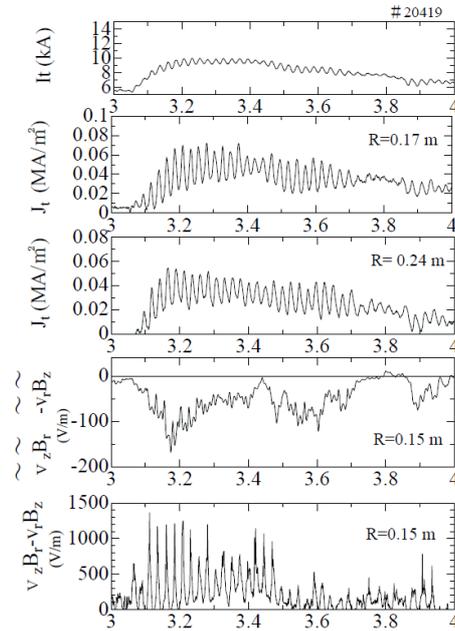


図5 電流駆動とMHDダイナモ電場

(4) まとめ

HIST 装置において磁気ヘリシティ入射で生成駆動される球状トーラスプラズマにおいて、マッハプローブおよびIDSを用いてプラズマフロー計測を行った。また、速度と磁場揺動の3方向成分を同時に計測できるダイナモプローブを製作し、ダイナモ電場の計測を行った。得られた結果は以下の通りである。

(a) ST 配位 ($q > 1$) の時間発展において、ヘリシティ駆動過程 (Driven Phase, Partially Driven Phase) と抵抗減衰過程 (Decay Phase) に区別され、各過程でのイオン流の大きさや方向の空間分布の時間発展を調べた。駆動過程では、ガンからのイオン流は内側のオープンコラム上で電子と同じ方向に向いており、減衰過程に移行するとその方向を反転させる。

(b) 電場と電位計測を流れ計測と同時に行い、プラズマ電流のホローからピーク分布への遷移と電場分布の時間発展とがよく相関していることがわかった。電場の径方向分布は磁場に垂直なイオン流による径方向電場形成が寄与している。

(c) 磁気揺動が観測される運転モード ($q < 1$) においてダイナモ電場を測定し、ダイナモヘリシティ電流駆動の機構関与していることが示唆された。

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 4 件)

- ① T. Kanki, L.C. Steinhauer, M. Nagata, Two-Fluid Flowing Equilibria of Helicity Injected Spherical Torus with Non-Uniform Density, Plasma Fusion Res. Vol.3, S1066-1-7, (2008). 査読有
- ② M. Nagata, R. Raman, V. Soukhanowskii, B.A. Nelson, T.R. Jarboe, D. Mueller and the NSTX Research Team Plasma and Fusion Research, ExB Plasma rotation and n=1 oscillation observed in the NSTX-CHI experiments, Rapid Communications Vol.2, 0035 (2007). 査読有

[国際会議発表] (計 16 件)

- ① M. Nagata, Y. Kikuchi, T. Kanki, N. Fukumoto, Y. Kagei, Experimental and Computational Studies of MHD Relaxation Generated by Coaxial Helicity Injection in the HIST Spherical Torus Plasmas, 22nd IAEA Fusion Energy Conference (FEC), Geneva, Switzerland, Oct. 13-18, 2008.
- ② M. Nagata, Y. Kikuchi, T. Nishioka, S. Hashimoto, T. Kanki, N. Fukumoto, Y. Kagei, Studies of helicity-driven MHD relaxation and its control by rotating magnetic field on HIST. Innovative Confinement Concepts Workshop and US-Japan Workshop on Improvement in the Confinement of Compact Torus Plasmas, Reno, Nevada, U. S. A, June 24-27, IP.001 (2008). (Invited)
- ③ Y. Kikuchi, S. Hashimoto, T. Nishioka, K. Ando, N. Fukumoto, M. Nagata, MHD relaxation and plasma flow driven by coaxial helicity injection in the HIST spherical torus device, 14th International Congress on Plasma Physics, Fukuoka, Japan, Sep. 8-12, P3. 093. (2008).

[解説発表] (計 3 件)

- ① 永田正義、スフェロマックの閉じ込め改善と新展開(小特集: ITER 時代における大学の革新的閉じ込め概念研究のあり方、2.2 章)、プラズマ・核融合学会誌、Vol. 84, No.11, pp.760-765 (2008).
- ② 永田正義、電磁加速パルスプラズマとスフェロマック形成(講座: 高速プラズマ流と衝撃波の研究事始め、5.5 章)、プラズマ核融合学会誌、Vol. 83, No. 5, pp.491-500 (2007).

[学会発表] (計 20 件)

- ① 橋本尚太郎、西岡勲、安藤来吏、菊池祐介、福本直之、永田正義、マルチマッハプローブを用いた球状トラス装置 HIST におけるフロー計測、第 25 回プラズマ・核融合学会年会予稿集 (CD-ROM)、5aB19P (2008).
- ② 西岡勲、橋本尚太郎、安藤来吏、菊池祐介、福本直之、永田正義、球状トラスプラズマ装置 HIST におけるイオンドップラー分光システムを用いたプラズマフロー計測、第 25 回プラズマ・核融合学会年会予稿集 (CD-ROM)、5aB18P (2008).

[その他]

http://www.eng.u-hyogo.ac.jp/eecs/eecs4/index_ja.html

6. 研究組織

(1) 研究代表者

永田 正義 (NAGATA MASAYOSHI)

兵庫県立大学・大学院工学研究科・教授
研究者番号: 00192237

(2) 研究分担者

福本 直之 (FUKUMOTO NAOYUKI)

兵庫県立大学・大学院工学研究科・准教授
研究者番号: 90275305

菊池 祐介 (KIKUCHI YUSUKE)

兵庫県立大学・大学院工学研究科・助教
研究者番号: 00433326