

機関番号：24506

研究種目：若手研究（B）

研究期間：2008～2010

課題番号：20760579

研究課題名（和文） 外部回転磁場を用いたヘリシティ駆動球状トーラスプラズマの自己組織化機能の制御

研究課題名（英文） Control of self-organization of helicity-driven spherical torus plasmas by externally applied rotating magnetic field

研究代表者

菊池 祐介（KIKUCHI YUSUKE）

兵庫県立大学・大学院工学研究科・准教授

研究者番号：00433326

研究成果の概要（和文）：兵庫県立大学の球状トーラスプラズマ装置 HIST における MHD 緩和現象（自己組織化現象）の観測と外部回転磁場を用いた制御に関する研究を行った。HIST 装置のフラックスコンサーバ内に回転磁場コイルを2組設置し（トロイダルモード数  $n=1$ ）、90度位相差の交流電流を流すことで回転磁場を印加した。その結果、回転磁場に対するプラズマ応答はプラズマフローと回転磁場の相対速度によって決まることを見出した。また、MHD 不安定モード制御用のデジタルフィードバック制御系を構築した。

研究成果の概要（英文）：Application of an externally applied rotating magnetic field (RMF) for control of MHD relaxation phenomena driven by a coaxial helicity injection has been proposed in the HIST spherical torus device. As the results, it was clarified that the plasma responses to the RMF depend on not only the driving frequency of the RMF but also the toroidal plasma rotation. In addition, a digital feedback control system has been developed for control of MHD instabilities in the ST devices.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2008年度	1,600,000	480,000	2,080,000
2009年度	1,000,000	300,000	1,300,000
2010年度	600,000	180,000	780,000
年度			
年度			
総計	3,200,000	960,000	4,160,000

研究分野：プラズマ理工学

科研費の分科・細目：総合工学・核融合学

キーワード：球状トーラス，回転磁場，MHD 緩和現象

## 1. 研究開始当初の背景

将来の磁場閉じ込め核融合発電炉の実現へ向けて、トカマク方式を採用した国際熱核融合実験炉 ITER 計画が開始されようとしている。一方、球状トーラス (Spherical Torus: ST) はコンパクトで高い閉じ込め性能が得られることから、核融合炉の経済性向上に対して極めて有望な方

式として近年特に注目を集め、各国で精力的に研究が進められている。しかし、ST 装置は低アスペクト比のため装置中心部のオーミック加熱 (Ohmic Heating: OH) コイルのフラックスが十分とれず、電流立ち上げが困難なことが大きな課題の一つである。様々な電流駆動方式が研究されている中で、同軸ヘリシティ入射を用いた電

流駆動が中型 ST 装置で成果を挙げており、その電流駆動メカニズムを調査し、より性能を向上させることが課題となっている。

## 2. 研究の目的

兵庫県立大学の HIST 球状トーラス装置では同軸プラズマガンを用いてプラズマを生成し、同軸ヘリシティ入射(Coaxial Helicity Injection: CHI)によってトロイダルプラズマ電流が駆動されている。CHI は MHD 緩和現象を用いた電流駆動法であり、HIST 装置におけるスフェロマック運転(外部トロイダル磁場がゼロ)では、MHD 不安定モードの一つであるキンクモードがトロイダル方向に 10-20 kHz 程度の周波数で回転していることが計測されている。CHI 電流駆動の説明としてエレクトロンロッキングモデルが提唱されており、回転するキンクモードに電子が凍り付いてトロイダル回転することによりプラズマ電流が駆動されると考えられている。そこで、ST プラズマに外部からトロイダル方向に時間的に回転する回転磁場(Rotating Magnetic Field: RMF)を印加することにより、キンクモードを制御することができれば、CHI 電流駆動の制御が期待できる。

本研究では、まず、HIST 球状トーラス装置に適用する RMF コイルシステムの構築および生成される RMF の空間分布(モード構造)を解析した。次に MHD 不安定モードが発生していない ST プラズマに RMF を印加することにより、RMF に対する ST プラズマの応答を評価した。また、MHD 不安定モード制御に向けたデジタルフィードバック制御系をワシントン大学の HIT-SI グループと協力して構築した。

## 3. 研究の方法

### (1) RMF システムの構築と HIST 装置への適用

HIST 装置は真空容器(SUS304 製、肉厚 5 mm、カットオフ周波数 7.1 kHz)の内部にフラックスコンサーバー(Flux Conserver: FC、銅製、肉厚 5 mm、カットオフ周波数 174 Hz)が設置されているため、装置外部から交流磁場を印加してもプラズマ内部へ浸透させることは困難である。そこで本研究では図 1 に示すように、FC 内部に RMF コイルを設置した。RMF コイルは  $\phi 1.4$  mm の丸型エナメル線を 90 mm  $\times$  173 mm の SUS304(肉厚 0.5 mm、カットオフ周波数 710 kHz)の枠に 16 ターンさせて製作した。図 1 中のコイル 1 セット(コイル 1~4)には上記したコイルが 2 つセットされている。コイル 1, 3 とコイル 2, 4 には 90° 位相差の交流電流(10~30 kHz)を印加することで RMF を生成する。RMF と ST プラズマの相互作用はプラズマ中に設置された磁気プローブの信号から評価する。

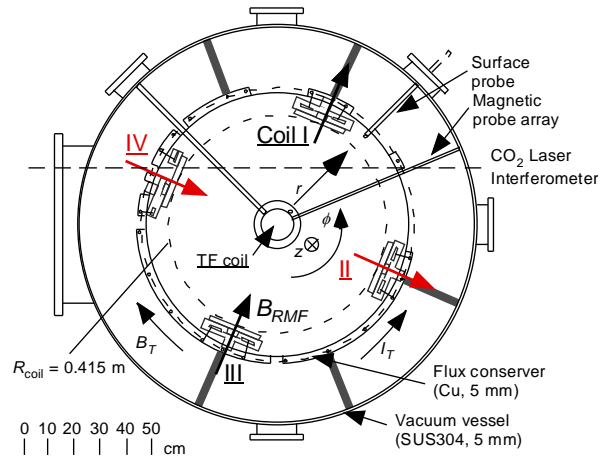


図 1 HIST 装置における RMF コイル

### (2) Black-fin ボードを用いたデジタルフィードバック制御系の構築

近年の IGBT をはじめとする半導体パワーデバイスの大容量化の進展は目覚ましく、核融合プラズマ実験装置におけるスイッチング電源(Switching Power Amplifier: SPA)にも適用が可能となっている。ワシントン大学の球状トーラス装置 HIT-II では SPA を用いた磁場コイル電源にアナログフィードバック制御系を適用することでプラズマの制御性を高めてきた。一方、ワシントン大学の新しいスフェロマック装置 HIT-SI をはじめとした新規実験装置にこれらのフィードバック制御系を広く適用するためには制御性および自由度の高いデジタルフィードバック制御系を構築する必要がある。ワシントン大学との共同研究を実施し、最終目標としてのプラズマ性能改善を視野に入れながら、安価で汎用性が高く、日米の革新的閉じ込め配位実験装置に適用可能なデジタルフィードバック制御系を構築した。

## 4. 研究成果

### (1) RMF と ST プラズマの相互作用

HIST 装置において、トロイダル磁場を印加せずに ST プラズマを生成すると(スフェロマック運転)、MHD アクティブなプラズマが形成される。一方、トロイダル磁場を印加すると、キンク不安定モードは安定化され、MHD 的に安定な ST プラズマが形成される。この時の ST プラズマの時間発展を図 2 に示す。図 2 中に点線で示した時間領域においては磁場揺動が非常に小さく(MHD 的に安定と考えられる)、RMF 磁場に対する ST プラズマの応答を純粹に検出できると考えられる。

RMF を印加したときの磁場計測結果を図 3 に示す。磁気プローブは RMF コイルから空間的に離れた位置に存在するために、真空中

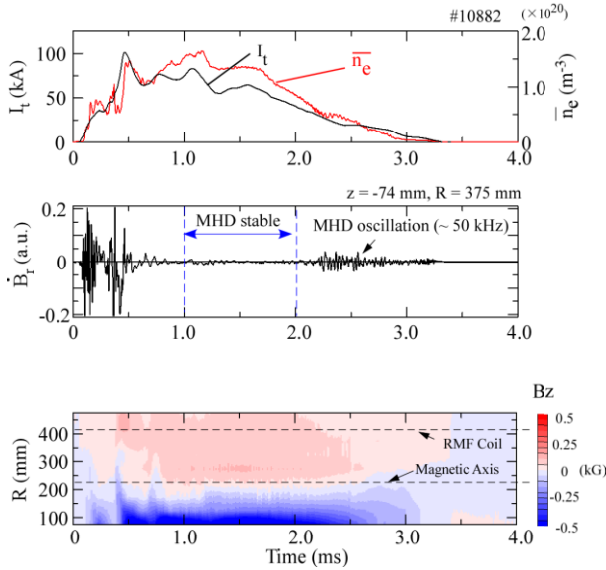


図 2 HIST 装置における ST プラズマの時間発展。上段：プラズマ電流，線平均電子密度，中段：磁場揺動信号，下段： $z$  方向磁場分布。

では非常に小さな信号を出力している。そのため、プラズマ中に RMF を印加したときの磁場信号は RMF に対するプラズマ応答を主に反映していると考えられる。実際に、30 kHz, Ctr-RMF では RMF 周波数成分の磁場信号が真空中のそれに比べて大きく増幅される結果を観測した (図 3)。

図 4 に RMF に対する ST プラズマ応答の周波数および回転の向き依存性を示す。ここで、プラズマ応答とはプラズマ中にて計測された磁場揺動強度を真空中のそれで規格化したものである。図 4 より、プラズマ応答は周波数だけでなく回転の向きにも強く依存することが分かる。

上記のようなプラズマ応答の RMF 周波数および回転の向きの依存性はプラズマ回転と RMF の間に発生する相対速度を用いて次のように考察される。HIST 装置におけるマッハプローブを用いたイオン流速計測から、ST プラズマはプラズマ電流と同じ方向に約 20 km/s 程度で回転していることが明らかにされている。プラズマ回転速度を  $v_{plasma}$ 、RMF の位相速度を  $v_{RMF}$  とすると、両者の相対速度  $v_{RMF}'$  は次のように表される。

$$v_{RMF}' = v_{plasma} - v_{RMF} = v_{plasma} - f_{RMF} \cdot 2\pi R / n$$

上記より、Co-RMF の 10~20 kHz 程度にて  $v_{RMF}'$  がゼロになることが分かる ( $R = 0.3$  m,  $n = 1$ )。そのような状況においては、プラズマは RMF を直流磁場のように感じ、プラズマ中に誘導電流は形成されにくくなり、プラズマ応答は非常に小さくなると考えられる。この条件から遠ざかるにつれて、誘導電流がプラズマ中に形成され、プラズマ応答が強くなっていく。このようにプラズマと RMF の

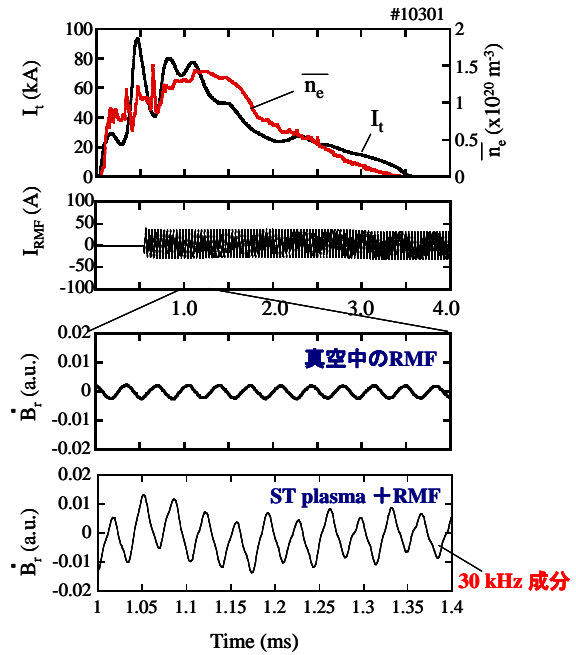


図 3 RMF に対する ST プラズマ応答計測結果

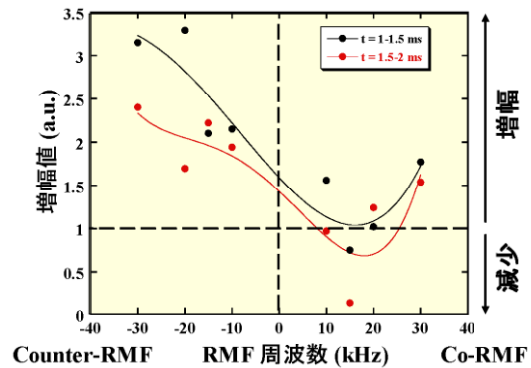


図 4 RMF に対する ST プラズマ応答の RMF 周波数および回転の向きに対する依存性

相対速度を考慮することで、図 4 の実験結果を説明することができる。

#### (2) デジタルフィードバック制御系の ST プラズマへの適用

HIT-SI では図 5 のように 2 つのインジェクター (X, Y) にて RFP プラズマをそれぞれ生成し、閉じ込め領域にて磁気リコネクションを利用してプラズマ電流を駆動しスフェロマックプラズマを生成する。インジェクター (プラズマ) 電流生成用の Voltage coil と Flux coil には 5.8 kHz の交流電流を SPA により供給している。両者のコイル電流の位相差はインジェクタープラズマの性能に大きな影響を与えることから、プラズマ生成時の負荷変化に応じたコイル電流のフィードバック制御が必要となる。構築した制御系は uClinux ベースのマイクロコントローラ (Blackfin BF537) を用いており、主なスペックはクロ

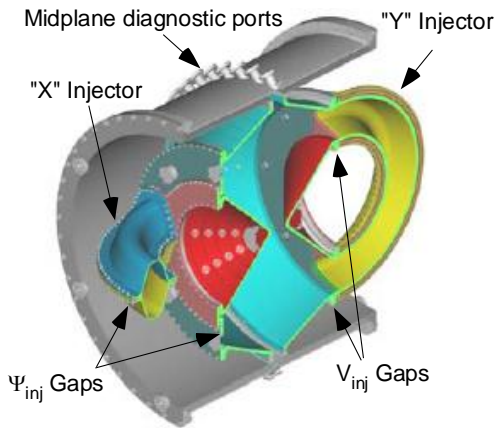


図5 HIT-SI スフェロマック装置

ック周波数 500 MHz, SDRAM が 64 MB, 8 ヶのプログラムタイマーであり, 12 ビット・1 MHz のディジタイザを有している。これらのコストは\$300 程度と安価である。また, フーリエ解析のような計算が必要な場合には別途 Digital Signal Processor (DSP) も Blackfin では用意されており, 高い拡張性を有している。

今回の実験ではインジェクターフラックスを制御対象とした。Flux coil にはパルス幅変調された電圧が印加され, 測定されたフラックスと目標値を比較し, そのフィードバック量をもとに電圧のパルス幅を決定する。制御結果例を図6に示す。ここでは比較のために X インジェクターフラックスには従来のアナログフィードバック制御を適用している。X サイドではパルス幅変調されたフラックスコイル電圧が正負に不規則に印加されており, フラックス波形が振動している。これはフィードバックゲインが過剰であることを示している。一方, Y サイドでは制御プログラム中でフィードバックゲインを調整しており, フラックスの振動は見られない。プラズマ生成後にフラックスが目標値より大きいのは, フラックスコイルのインダクタンスがプラズマ生成後に低下していることから, コイル電流が増大したためである。プラズマ生成前後のフィードバック量の調整も今後の課題となる。

### (3) 研究のまとめ

ヘリシティ駆動 ST プラズマ装置 HIST に外部回転磁場コイルを設置し, 回転磁場に対する ST プラズマの応答を評価した。今後, 外部回転磁場強度を増大させることで, MHD 緩和現象の制御が期待される。また, ワシントン大学の HIT-SI グループと協力することで安価なデジタルフィードバック制御系を構築することができた。これらの成果を国内外の革新的プラズマ閉じ込め実験装置に適用することを検討している。

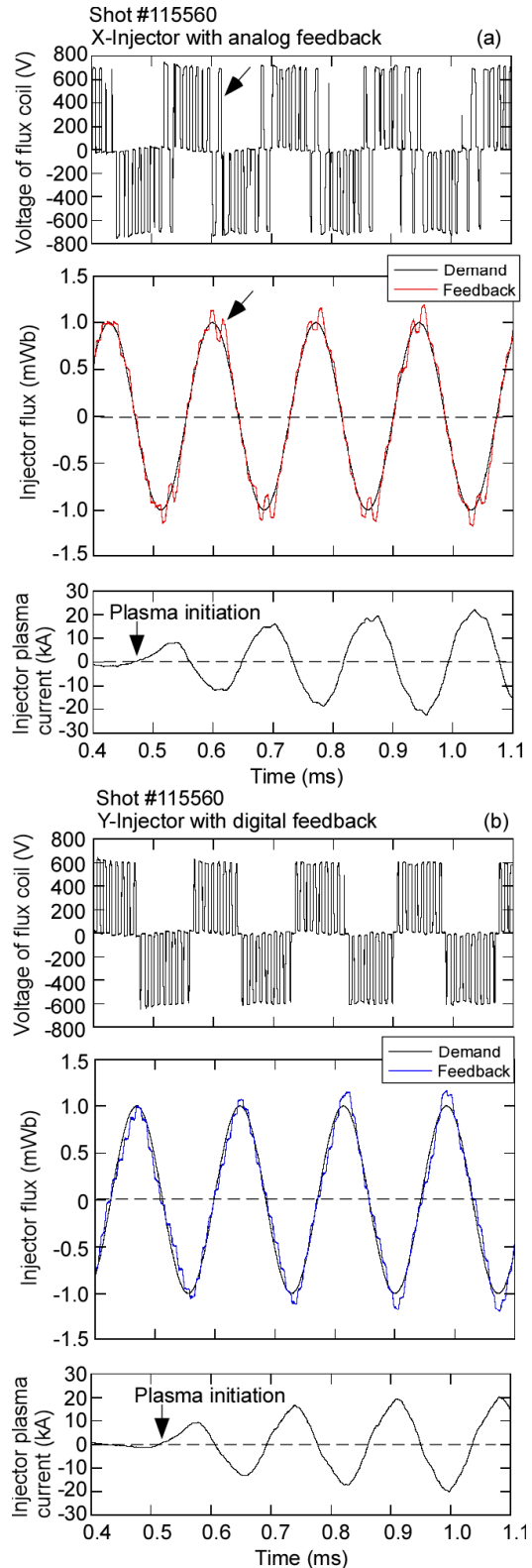


図6 インジェクターフラックスのフィードバック制御結果。(a) X インジェクター (アナログフィードバック), (b) Y インジェクター (デジタルフィードバック)。

## 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 Y. Kikuchi, R. Nakanishi, M. Nakatsuka, K. Ando, N. Fukumoto, M. Nagata, "Characteristics of magnetized coaxial plasma gun for simulation experiment of thermal transient events in ITER", IEEE Transactions on Plasma Science, 査読有, Vol. 38, 2010, pp. 232-236.
- ② 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", J. Plasma Fusion Res. SERIES, 査読有, Vol. 8, 2009, pp. 1075-1078.
- ③ Y. Kikuchi, T. Yoshikawa, S. Hashimoto, T. Nishioka, N. Fukumoto, M. Nagata, "Application of an externally applied rotating magnetic field for control of MHD relaxation phenomena in the HIST spherical torus device", IEEJ Transactions on Fundamentals and Materials, 査読有, Vol. 129, 2009, pp. 616-617

[学会発表] (計 2 1 件)

- ① 菊池祐介, HIT-SI 装置におけるスフェロマックプラズマのデジタルフィードバック制御, 平成 21 年度日米科学技術協力事業核融合分野事業報告会資料, pp. 129-133, 平成 22 年 3 月 4 日, 東京ガーデンパレス.
- ② T. Higashi, M. Ishihara, Y. Kikuchi, N. Fukumoto, M. Nagata, "Flux amplification and sustainment of ST plasmas by multi-pulsed coaxial helicity injection on HIST", Bull. Am. Phys. Soc. (Program of the 52nd Annual Meeting of the Division of Plasma Physics, Chicago, IL, USA, Nov. 8-12, 2010), Vol. 55, No. 15, GP9-127, p. 144 (2010).
- ③ 東 大樹, 安藤来史, 中塚基晃, 菊池祐介, 福本直之, 永田正義, 球状トラス装置 HIST におけるダイナモプローブ計測, 第 26 回プラズマ・核融合学会年会予稿集, 4aE05P (2009), 京都市国際交流会館.
- ④ 菊池祐介, B.A. Nelson, A.S. Nelson, D.A. Ennis, J.S. Wrobel, T.R. Jarboe, 永田正義, HIT-SI スフェロマック装置におけるデジタルフィードバック制御システムの開発, 第 26 回プラズマ・核融合学会年会予稿集, 4aD16P (2009), 京都市国際交流会館.

- ⑤ Y. Kikuchi, B.A. Nelson, A.S. Nelson, D.A. Ennis, J.S. Wrobel, T.R. Jarboe, M. Nagata, "Implementation of digital feedback control system for switching power amplifiers on HIT-SI", Bull. Am. Phys. Soc. (Program of the 51st Annual Meeting of the Division of Plasma Physics, Atlanta, Georgia, USA, Nov. 2-6, 2009), Vol. 54, No. 15, UP8-24, p. 317 (2009).
- ⑥ K. Ando, T. Higashi, M. Nakatsuka, Y. Kikuchi, N. Fukumoto, M. Nagata, "Flow and dynamo measurements during the coaxial helicity injection on HIST" Bull. Am. Phys. Soc. (Program of the 51st Annual Meeting of the Division of Plasma Physics, Atlanta, Georgia, USA, Nov. 2-6, 2009), Vol. 54, No. 15, UP8-15, p. 315 (2009).
- ⑦ 菊池祐介, 橋本尚太郎, 西岡勲, 安藤来史, 福本直之, 永田正義, ヘリシティ駆動球状トラスプラズマの MHD 緩和現象とその制御, 第 25 回プラズマ・核融合学会年会予稿集 (CD-ROM), 5aB20P (2008), 栃木県総合文化センター.
- ⑧ 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, 2008, P3. 093.

[図書] (計 0 件)

[産業財産権]

- 出願状況 (計 0 件)
- 取得状況 (計 0 件)

[その他]

ホームページ等

URL:

<http://www.eng.u-hyogo.ac.jp/eecs/ykikuchi/kikuchi.html>

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

菊池 祐介 (KIKUCHI YUSUKE)

兵庫県立大学・大学院工学研究科・准教授  
研究者番号: 00433326