

**科学研究費助成事業 研究成果報告書**

平成 28 年 5 月 30 日現在

機関番号：82110

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2012～2015

課題番号：24760706

研究課題名(和文) 装置間比較による運動量輸送と自発回転の理解と将来予測に向けた研究

研究課題名(英文) Study of momentum transport and intrinsic rotation using multi-machine data comparison

研究代表者

吉田 麻衣子 (Yoshida, Maiko)

国立研究開発法人日本原子力研究開発機構・核融合研究開発部門 那珂核融合研究所・研究員

研究者番号：20391261

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,500,000円

研究成果の概要(和文)：ITERに近いプラズマ形状でのHモードプラズマにおいて、運動量輸送係数(拡散項と対流項)と、プラズマ乱流に関するデータを、摂動実験で取得した。電子加熱割合、プラズマ電流、加熱パワー、プラズマの密度、プラズマ回転を各々スキャンした。DIII-D装置において、定常・摂動輸送解析手法や様々な実験条件を用いて、ECHと個々の項(運動量輸送、自発回転、イオン温度、密度)の関係を調べた。また、自発回転に係わると想定される乱流計測(BES計測等)を行い、特に、ECH入射時の自発回転の発生と高波数領域の乱流強度の増加する関係を明らかにした。

研究成果の概要(英文)：An impact of electron heating on momentum transport and intrinsic rotation has been studied in ITER-like scenario in DIII-D. Dependences of the momentum transport diffusivity, the momentum pinch velocity and intrinsic torque on electron heating ratio (resulting in  $T_e/T_i$  and  $R//LTe$ ) were investigated. Based on the comparisons, this study was expanded to develop empirical scalings and theoretical models of momentum transport and intrinsic rotation under electron heating. The results in DIII-D will be compared to GK simulations.

研究分野：プラズマ科学

キーワード：プラズマの自発回転 運動量輸送 電子加熱 ITER

### 1. 研究開始当初の背景

核融合炉の実現には、エネルギー閉じ込め劣化やプラズマ内の不安定性の発生を回避すること、プラズマ・コア部での不純物の蓄積を抑制すること、また、Edge Localized Mode (ELM)による熱束の大きさを制御して、ダイバータ板の損耗を避けることが必須であり、現に国際熱核融合実験炉 (ITER) や原型炉での最重要課題としてあげられている。プラズマ回転やその空間勾配が、これらの制御性に密接に関わっていることが、世界の様々なトカマク装置で観測されている。そのため、国内・国外の様々な実験装置においてプラズマ回転分布の決定機構や、運動量輸送の特性に関する研究がなされており、また、国際トカマク物理活動の複数のグループで最も重要な研究課題に挙げられている。特に、自発回転は、外部から運動量入力の小さい ITER や原型炉において、プラズマ回転分布の主要素となりえるため、自発回転の理解の必要性が強く認識されている。

### 2. 研究の目的

本研究では、ITER や原型炉で課題となる、プラズマ回転分布の決定機構の解明、将来の装置でのプラズマ回転予測と制御手法の開発を目指し、プラズマ回転分布の要素となる運動量輸送 (拡散項と対流項) と回転駆動機構 (残留応力による自発回転、磁場リップルによる粘性など) に着目し、これら個々の特性を解明することで回転分布の決定機構を理解することを目的とする。目的達成に向けて、様々な解析手法 (定常及び摂動輸送解析、応答特性等) と、異なる運転領域・輸送領域 (イオン系乱流、電子系乱流等) を持つ複数の装置を活用し、個々の回転分布へ効果を切り分けて評価し、広いダイナミックレンジにおけるパラメータ・スキャンにより、運動量輸送と自発回転の特性を明らかにする。

### 3. 研究の方法

本研究目的を達成するのに不可欠な、摂動輸送実験・解析や自発回転の実験・理解に適した加熱と計測を備え、ITER や原型炉で課題となる強電子加熱の運転領域を有する DIII-D 装置 (米国) において、他のトカマク装置では不可能な新たな輸送領域 (低衝突周波数、且つ強電子加熱下) での運動量輸送と自発回転のデータを取得する。取得したデータを研究代表者が纏めてきた国際データベースに加え、運動量輸送の拡散項と対流項、自発回転の広いダイナミックレンジでのパラメータ依存性を明らかにし、ITER や原型炉に向けたスケーリングを構築する。以上の実験結果を理論モデルと比較することで物理の理解を行うとともに、最終的にそれぞれの項 (運動量輸送、自発回転、周辺部の回転) が合わさったプラズマ回転分布の決定機構を解明するアプローチをとる。

### 4. 研究成果

DIII-D 装置において、自発回転と運動量輸送に関する実験を提案し、採択された後 (採択率

10%程度)、DIII-D チームメンバーとともに詳細実験計画を検討した。ITER に近いプラズマ形状での H モードプラズマにおいて、電子加熱割合、プラズマ電流、加熱パワー、プラズマの密度、プラズマ回転を各々スキャンし、摂動輸送実験を行う計画を立て、予定通り運動量輸送係数 (拡散項と対流項) と、プラズマ乱流に関するデータを取得した。

DIII-D 装置で新たに取得した一部のデータを用いて (他のデータは現在再計算中である)、今まで検討代表者がまとめてきた、国際データベースに加え、より広いダイナミックレンジの実験領域での運動量輸送係数のパラメータ依存性について調べた。無次元量 (電子温度/イオン温度、規格化衝突周波数、規格化ラーマ-半径等) を用いた運動量輸送係数のスケーリングを構築し、ITER に外挿した。

DIII-D 装置において、定常・摂動輸送解析手法や様々な実験条件を用いて、電子サイクロトロン周波数帯 (ECRF) 加熱と個々の項 (運動量輸送、自発回転、イオン温度、密度) の関係を調べた。また、自発回転に係わると想定される乱流計測 (BES 計測等) を行い、特に、ECRF 入射時の自発回転の発生と運動量輸送の劣化、高波数領域の乱流強度の増加する関係を調べた。ECRF 入射により、イオン温度勾配不安定性と捕捉電子不安定性に特徴的な周波数領域での密度揺動 (乱流) が増加していることが分かった。一方で、磁気シアを正磁気シアから負磁気シアに変化させると、ECRF 入射に伴う密度揺動の増加が抑えられる傾向にあることが分かった (図 1)。これは、世界のトカマク装置で初の結果であるため、本研究内容は、2016 年 IAEA 核融合エネルギー会議にて口頭発表として採択された。

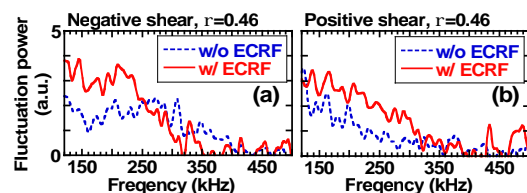


図 1 電子サイクロトロン周波数帯 (ECRF) 加熱前 (点線) と加熱中 (実線) の密度揺動スペクトル。(a) 負磁気シア放電と (b) 正磁気シア放電の比較。

実験的に得られた運動量輸送や自発回転の変化と乱流計測について、乱流理論モデルと比較することで、乱流と運動量輸送および自発回転の関係に解釈を与えた。すなわち、ECRF 入射時に伴う自発回転の発生と運動量輸送の劣化は、捕捉電子不安定性に起因するものと考えられる。

運動量輸送と強い関係にある熱輸送について、DIII-D 装置と JT-60 装置の正磁気シア、負磁気シア、弱磁気シア放電を用いてその特性を調べ

た。装置に依存せず、電子加熱による粒子及び

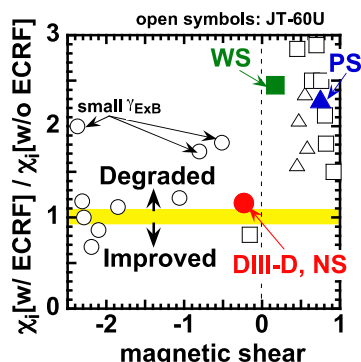


図2 ECRF 加熱によるイオン熱輸送変化の磁気シア依存性。塗りつぶしが DIII-D 装置、白抜きが JT-60 装置のデータを示す。

エネルギー閉じ込め劣化を緩和できる運転領域を見出した。今回新たに得られた DIII-D の結果と、すでに得られている JT-60U の結果を比較することで、装置依存しない共通の特性を抽出した。即ち、磁気シアが負でありトロイダル回転シアが負の大きい値をとる条件では、ECRF によるイオン熱輸送の上昇が抑えられる(図2)。

装置に依存しないこれらの実験結果は、ITER や原型炉に向けた ECRF によるプラズマ回転制御、閉じ込め改善の指針を与える重要な知見である。

#### 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7件)

- (i) M. Yoshida, Effects of toroidal rotation shear and magnetic shear on thermal and particle transport in plasmas with electron cyclotron heating on JT-60U, Nuclear Fusion, 査読有, 55, 2015, 073014, doi:10.1088/0029-5515/55/7/073014
- (ii) M. Honda, S. Satake, Y. Suzuki, M. Yoshida, Integrated modelling of toroidal rotation with the 3D non-local drift-kinetic code and boundary models for JT-60U analyses and predictive simulations, Nuclear Fusion, 査読有, 55, 2015, 073033, doi:10.1088/0029-5515/55/7/073033
- (iii) H. Urano, M. Nakata, N. Aiba, H. Kubo, M. Honda, N. Hayashi, M. Yoshida, Roles of argon seeding in energy confinement and

pedestal structure in JT-60U, Nuclear Fusion, 査読有, 55, 2015, 033010, doi:10.1088/0029-5515/55/3/033010

- (iv) M. Honda, S. Satake, Y. Suzuki, G. Matsunaga, K. Shinohara, M. Yoshida, Experimental analyses and predictive simulations of toroidal rotation driven by the neoclassical toroidal viscosity in rippled tokamaks, Nuclear Fusion, 査読有, 54, 2014, 114005, doi:10.1088/0029-5515/54/11/114005
  - (v) M. Yoshida, Temporal and spatial responses of temperature, density and rotation to electron cyclotron heating in JT-60, Nuclear Fusion, 査読有, 53, 2013, 083022, doi:10.1088/0029-5515/53/8/083022
  - (vi) M. Honda, S. Ide, T. Takizuka, N. Hayashi, M. Yoshida, Development of the transport-code framework for self-consistent predictions of rotation and the radial electric field, Nuclear Fusion, 査読有, 53, 2013, 073050, doi:10.1088/0029-5515/53/7/073050
  - (vii) M. Osakabe, K. Shinohara, M. Yoshida, A Plan for a Fast-Ion D-Alpha (FIDA) Measurement for JT-60SA, Plasma and Fusion Research: Regular Articles, 査読有, 8, 2013, 2402108
- [学会発表](計5件)
- (i) J. Shiraishi, N. Miyato, G. Matsunaga, M. Toma, M. Honda, T. Suzuki, M. Yoshida, Impact of Kinetic Effects of Energetic Particles on RWM Stability in Rotating High- Plasmas, 16 Joint Meeting of US-Japan MHD Workshop and ITPA MHD Stability Topical Group, National Institute for Fusion Science (Toki-shi, Gifu), March 7-11, 2016

- (ii) M. Yoshida, Response of ion and electron temperatures, electron density and toroidal rotation to electron cyclotron heating in JT-60, Proceedings of 25th IAEA Fusion Energy Conference, Hotel Park Inn Pribaltiyskaya (St. Petersburg, Russia), October 13-18, 2014,
- (iii) M. Yoshida, Progress in JT-60SA Construction, Research Plan and Research Activities, 24th International Toki Conference, Ceratopia Toki (Toki-shi, Gifu), November 4-7, 2014
- (iv) M. Yoshida, Responses of electron and ion channels to electron cyclotron heating in JT-60U H-mode and ITB plasmas, The 14<sup>th</sup> International Workshop on H-mode Physics and Transport Barriers, Kyushu University Chikushi campus (Kasuga-shi, Fukuoka), October 2 - 4, 2013
- (v) M. Yoshida, Responses of ion and electron channels to electron cyclotron heating in JT-60U, 30<sup>th</sup> JSPF Annual Meeting, Tokyo Institute of Technology Ookayama campus (Meguro-ku, Tokyo), December 3-6, 2013

## 6 . 研究組織

### (1)研究代表者

吉田 麻衣子 (YOSHIDA, Maiko)

国立研究開発法人日本原子力研究開発機構・核融合研究開発部門 那珂核融合研究所・研究員

研究者番号：2039126