

平成 30 年 6 月 12 日現在

機関番号：63902

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2014～2017

課題番号：26820399

研究課題名(和文)閉じ込め改善モード遷移に対する新古典イオン粘性の役割の解明

研究課題名(英文)Clarification of role of neoclassical ion viscosity on confinement transition to improved mode

研究代表者

高橋 裕己(Takahashi, Hiromi)

核融合科学研究所・ヘリカル研究部・准教授

研究者番号：00462193

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)：トロイダルプラズマの閉じ込め改善モード遷移に対する新古典イオン粘性の役割を解明するために、磁場リップル構造の異なるヘリカル型装置である、LHD, Heliotron J, TJ-IIにおいて電極バイアス実験を行なった。LHDでは従来よりも粘性の大きい磁場配位で実験を行い、実験と理論で遷移条件が整合することを示した。Heliotron Jでは衝突周波数が小さく、粘性の影響が現れやすい実験を実施するために、より耐熱性の良好な電極システムを導入して実験を行うことに成功した。TJ-IIでは既設のシステムを利用した初期的な電極バイアス実験を行なった後、従来よりも適切な実験環境の構築を行なった。

研究成果の概要(英文)：In order to clarify the role of neoclassical ion viscosity on confinement transition to improvement mode in toroidal plasma, electrode biasing experiments were carried out in the LHD, the Heliotron J, and the TJ - II, which are the helical-type devices with different magnetic field ripple structure. In the LHD, electrode biasing experiments were conducted with magnetic configuration with large viscosity, and then that the transition condition was consistent between the experimental results and the theoretical prediction. In the Heliotron J, we succeeded in constructing an electrode biasing system with better heating property and conducting experiments with a low collisionality condition, where the influence of viscosity is dominant in the momentum drag force. In the TJ-II, we conducted initial electrode biasing experiments using existing systems, and then constructed a more appropriate experimental environment than before.

研究分野：プラズマ加熱・閉じ込め

キーワード：新古典ポロイダル粘性 径電場 ポロイダル回転 電極バイアス 閉じ込め改善 トロイダルプラズマ

1. 研究開始当初の背景

1982年、ドイツのトカマク装置 ASDEX において、プラズマ中への追加加熱がある臨界値を越えるとプラズマの閉じ込めが改善される H モードと呼ばれる現象が発見された。この閉じ込め改善モードを解釈するために、ポロイダルフローの増加による乱流抑制のシナリオが提唱された。以来、フローと閉じ込めの関係を解明するために盛んに研究が行われてきたが、一方で、ポロイダルフロー駆動力の直接的な評価は困難であり、これまでほとんど行われていない。ポロイダルフローがどのような物理機構で駆動され、閉じ込めの遷移に影響を与えているのかを明らかにするためには、フロー駆動力の直接評価が必要である。

閉じ込め改善モードへの突然の遷移に対して、新古典イオン粘性による寄与が指摘されている。プラズマ中では、ポロイダル方向の運動量は駆動力であるローレンツ力と、ダンピング力として働くイオン粘性力と摩擦力によりバランスしている。新古典理論ではポロイダルフロー流速に対して、イオン粘性に極大値が存在し、駆動力がその値を超えると瞬間的に流速が増大し、閉じ込め改善モードに遷移すると考えられているが、実験的に粘性を評価し、遷移理論との比較検証を行った例は非常に少ない。遷移に対する粘性の役割を明らかにするためには、磁場リップルが大きく異なる磁場配位で、閉じ込めの遷移が粘性の非線形性によって統一的に説明できるかどうかを検証しなければならない。

2. 研究の目的

ポロイダルフローの制御手法の一つとして電極バイアス実験が挙げられる。電極バイアス実験では、プラズマ中に挿入した電極を真空容器に対してバイアスする。電極バイアス実験は、(1) 電極電圧および電極電流を変化させることにより、外部からポロイダルフローを形成することができる、(2) 電極電流の値からポロイダルフロー駆動力を実験的に評価できる、という利点をもつ。

トロイダルプラズマにおいて、新古典ポロイダルイオン粘性の非線形性が閉じ込め改善モード遷移に対して担う役割を解明する。そのため、大型ヘリカル装置(LHD)と、TJ-II 装置において電極バイアス実験を行う。イオン粘性は磁場リップルとともに増加するが、TJ-II 装置はLHD に比べて、実効ヘリカルリップルが10倍大きいため、粘性のフロー依存性や遷移に必要な駆動力に明確な違いが得られる。本研究ではさらに、東北大学ヘリアック装置(TU-Heliac)、コンパクトヘリカル装置(Compact Helical System, CHS)、ヘリオロンJ装置での電極バイアスHモード遷移との比較を行い、イオン粘性のリップル構造依存性を明らかにする。

3. 研究の方法

平成 26 年度

LHD においては、粘性の大きい磁場配位での、電極バイアスによる遷移条件と粘性のフローに対する依存性を明らかにする。また、TJ-II において、電極バイアスによって閉じ込め改善を実現する。

平成 27 年度

TJ-II 装置において、電極バイアスによる閉じ込めの遷移を実現し、さらに、複数の磁場配位で実験を行い、遷移条件に対する磁場リップル依存性を取得する。

平成 28 年度

TJ-II 装置を対象として、複数の磁場配位で電極バイアス実験を行い、イオン粘性のリップル構造依存性を取得する。

平成 29 年度

高出力かつ制御性の高い電源を、電極バイアス用電源として、TJ-II 装置に導入し、径電場の詳細制御を行い、閉じ込め遷移時のポロイダルトルク、ポロイダルフローの振る舞いを明らかにする。

4. 研究成果

平成 26 年度

LHD では、平成 25 年度までの実験で対象とした $R_{ax} = 3.53\text{-}3.75\text{ m}$ よりも磁気軸外寄せの磁場配位 ($R_{ax} = 3.9\text{ m}$) を対象に実験を行い、実効ヘリカルリップルが大きい外寄せの条件に置いて、粘性が大きくなり、遷移に必要なポロイダルトルクが大きくなることを示した。また、HIBP とドップラー反射計を用いることで、コア領域、周辺領域で、粘性のポロイダルフロー(径電場)依存性を取得することができた。

TJ-II の実験については、先方研究所(CIEMAT)との協力体制の強化、装置の整備状況の把握に注力し、まずは、実験ができる環境を構築した。平成 26 年度は、NBI プラズマを対象に電極バイアス実験を行い、初期的な結果を取得した。TJ-II の実験で使用したバイアス電源の出力電圧では閉じ込めの遷移は実現できなかったものの、正・負バイアスの両方で、電極バイアス時におけるプラズマの電圧-電流特性曲線を調べ(図 1)、プラズマの径方向の電気抵抗率を評価することができた。

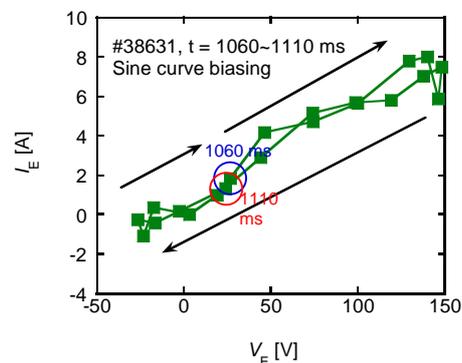


図 1. TJ-II の NBI プラズマへの電極バイアス時における電圧-電流特性曲線。

これにより、今後の実験で、どの程度の電極バイアス電圧を印加することによって閉じ込め状態を遷移させることができるのかの見通しを得た。

これらに加え、京都大学との共同研究として、京都大学の Heliotron J での電極バイアス実験を行った。平成 26 年度は、耐熱性の良好な黒鉛性の電極を新規に導入することで、1 T 程度の強磁場条件で、ジャイロトロン ECH, NBI プラズマをターゲットとした実験を行い、摩擦による運動量ダンピングが小さい条件でのバイアスデータを取得した。これにより運動量ダンピングに対する粘性の効果をこれまでよりも精度良く評価することが可能となった。

平成 27 年度

TJ-II サイトにおけるバイアス電源の出力が見込みよりも小さかったこと、電極-真空容器-バイアス電源間の電気回路構成が不適切であったことにより、十分なバイアス電圧の印加ができず、閉じ込めの遷移を実現することができなかった。しかしながら、定電圧の電極バイアス下での、密度ランプアップ実験において、プラズマの閉じ込め状態が電子ルートからイオンルートに遷移する際に、電極電流が明確に減少する現象が観測された (図 2)。これはイオンルートに遷移した際に粒子閉じ込めが改善したことを示している。この電極電流の振る舞いは、広範な密度条件で観測された。

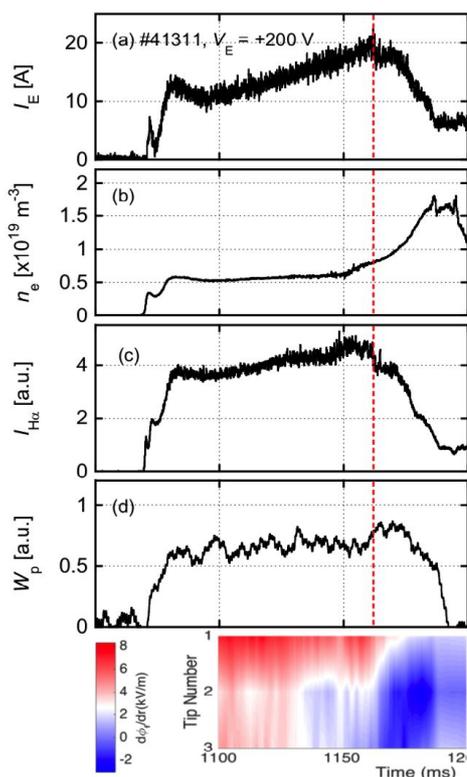


図 2. TJ-II の ECRH プラズマへの電極バイアス時での電子密度ランプアップ時におけるプラズマパラメータの時間発展波形。放電に渡って、電極に 200 V の一定の電圧を印加している。1170 ms 近傍でのイオンルートへの遷移時に電極電流がドロップする。

平成 28 年度

当該年度初頭に TJ-II 本体の磁場コイル通電用の電動発電機が故障し、割り当てられた実験時間が平成 29 年度に変更された。このため、平成 28 年度は実験を行わず、実験準備として以下を行った。TJ-II のバイアス回路では、プラズマ中に挿入された電極とリミターとの間にバイアス電圧を印加しているため、回路はダブルプローブの呈をなしており、電極-リミター間の電位差を制御していることになっている。平成 28 年度はこのバイアス回路構成を変更した。すなわち、バイアス回路からリミターを除外し、代わりに真空容器に接続することで、電極-真空容器間でのバイアスが可能となった。これにより、電極電位を直接的に制御できるようになり、電極-プラズマ間の電位差 (径電場) の制御が可能となった。

平成 29 年度

従前、TJ-II 装置で使用されていた電極バイアス用電源は、外部制御が不可能であり、プラズマ放電中の適当なタイミングで電圧印加を行うことが不可能であった。このため、平成 29 年度は、核融合科学研究所から外部トリガー、外部参照入力波形によって、出力タイミングと出力波形を任意に制御可能な電源 (松定プレジジョン, 500 V / 30 A) を TJ-II 装置に持ち込み、インストールを行った。本電源は外部制御が可能であることに加えて、定電圧運転モードと定電流運転モードを切り替え可能であり、実験の目的に応じて、プラズマ中の電場制御、あるいは、プラズマに与えるポロイダルトルク制御の両方を行うことが可能である。TJ-II サイトにおいて、本電源のセットアップを行い、外部信号によって電源が適正に動作することを確認した。平成 29 年度は TJ-II のメンテナンス等のスケジュールの都合により、プラズマ実験を実施することはできなかったが、平成 30 年度以降に、本電源を用いた実験を、継続した共同研究として行う予定である。

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 4 件)

- [1] K. Shimizu, S. Kitajima, A. Okamoto, Y. Sato, J. Tachibana, T. Oku, M. Takayama, F. Sano, T. Mizuuchi, K. Nagasaki, H. Okada, S. Kado, S. Kobayashi, S. Yamamoto, S. Ohshima, Y. Suzuki, M. Yokoyama and H. Takahashi, "Observation of Intermittent Transition by Electrode Biasing in Heliotron J," Plasma Fusion Res. **10**, 3402061 (2015) 査読有。
- [2] S. Koike, S. Kitajima, A. Okamoto, K. Ishii, Y. Sato, J. Tachibana, T. Oku, K. Shimizu, S. Inagaki, Y. Suzuki, H. Takahashi and M. Takayama, "Bursting high-frequency fluctuation observed in biased plasma in

TU-Heliac,” Nucl .Fusion **54**, 114013 (2014) 査読有.

- [3] T. Oku, S. Kitajima, K. Ishii, Y. Sato, J. Tachibana, S. Koike, K. Shimizu, A. Okamoto, H. Takahashi, M. Takayama and S. Inagaki, “Direct Measurement of Ion Temperature and Poloidal Rotation Velocity with Doppler Spectroscopy during Bifurcation in Tohoku University Heliac,” Plasma Fusion Res. **9**, 3402051 (2014) 査読有.
- [4] S. Koike, S. Kitajima, A. Okamoto, K. Ishii, Y. Sato, J. Tachibana, T. Oku, K. Shimizu, S. Inagaki, Y. Suzuki, H. Takahashi and M. Takayama, “Development of a High CMRR Magnetic Probe for the Biased Plasma in TU-Heliac,” Plasma Fusion Res. **9**, 1202053 (2014) 査読有.

〔学会発表〕(計 5 件)

- [1] 清水洗佑, 北島純男, 坪田慎平, 立花丈, 中村大樹, 三浦隆嗣, 岡本敦, 高橋宏幸, 高山正和, 佐野史道, 水内亨, 長崎百伸, 岡田浩之, 門信一郎, 南貴司, 小林進二, 山本聡, 大島慎介, G. Weir, 鈴木康浩, 横山雅之, 高橋裕己, “ヘリオトロンJ装置における電極バイアス実験による間欠的な遷移現象に伴ったプラズマ揺動の解析,” 第 71 回日本物理学会年次大会, 宮城県仙台市 (東北学院大学泉キャンパス), 2016 年 3 月 (口頭発表).
- [2] 清水洗佑, 北島純男, 立花丈, 岡本敦, 高山正和, 佐野史道, 水内亨, 長崎百伸, 岡田浩之, 門信一郎, 小林進二, 山本聡, 大島慎介, 鈴木康浩, 横山雅之, 高橋裕己, “ヘリオトロンJ装置における電極バイアス実験による間欠的な遷移現象の観測,” 日本物理学会 2015 年秋季大会, 大阪府吹田市 (関西大学千里山キャンパス), 2015 年 9 月 (口頭発表).
- [3] 奥俊博, 北島純男, 岡本敦, 佐藤優, 清水洗佑, 立花丈, 稲垣滋, 高橋裕己, 鈴木康浩, 横山雅之, 高山正和, “東北大学ヘリアック装置におけるドップラー分光法を用いたイオン粘性の評価,” 第 70 回日本物理学会年次大会, 東京都新宿区 (早稲田大学早稲田キャンパス), 2015 年 3 月 (口頭発表).
- [4] K. Shimizu, S. Kitajima, A. Okamoto, Y. Sato, J. Tachibana, T. Oku, M. Takayama, F. Sano, T. Mizuuchi, K. Nagasaki, H. Okada, S. Kobayashi, S. Yamamoto, S. Ohshima, Y. Suzuki, M. Yokoyama, H. Takahashi, “Observation of Intermittent Transition by Electrode Biasing in Heliotron J,” 24th International Toki Conference, Toki-city, Gifu, Japan (Ceratoopia Toki), November 2015 (ポスター発表).

- [5] 佐藤優, 北島純男, 奥俊博, 清水洗佑, 岡本敦, 高山正和, 鈴木康浩, 横山雅之, 稲垣滋, 西村清彦, 高橋裕己, “東北大学ヘリアック装置におけるポロイダルフローと磁気島の相互作用,” 第 10 回核融合エネルギー連合講演会, 茨城県つくば市 (つくば国際会議場), 2014 年 6 月 (ポスター発表).

〔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

<http://www.nifs.ac.jp/index.html>

6. 研究組織

(1)研究代表者

高橋裕己 (TAKAHASHI HIROMI)

核融合科学研究所・ヘリカル研究部・准教授
研究者番号:00462193

(2)研究分担者

無し

(3)連携研究者

無し

(4)研究協力者

無し