

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 6 月 18 日現在

機関番号：63902

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2011～2013

課題番号：23760812

研究課題名(和文)トロイダルプラズマにおける閉じ込め改善モード遷移に対する新古典粘性の役割の検証

研究課題名(英文)Verification of role of neoclassical poloidal viscosity on transition to improved confinement mode in toroidal plasma

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・助教

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、(間接経費) 960,000円

研究成果の概要(和文)：LHD、並びにヘリオトロンJにおいて磁場リップル構造の異なる、広範な磁場配位で電極バイアス実験を行い、ポロイダル粘性を理論的・実験的に評価した。また、LHDではイオンのラーマ半径効果まで考慮に入れたFORTEC-3Dコードを用いた粘性シミュレーションを行い、従来のモデルよりも精度の高い粘性の評価が可能となった。これまでにTU-Heliac、CHSで行われた電極バイアス実験で得られた粘性の値と比較した結果、実験と理論が良く整合することがわかった。また、ヘリオトロンJでは、マージナルなバイアス条件下において、放電中に間欠的な閉じ込め遷移現象が観測され、当初計画になかった新たな物理現象を発見した。

研究成果の概要(英文)：The electrode biasing experiments were carried out in various magnetic configurations in the Large Helical Device (LHD) and the Heliotron J. The neoclassical poloidal viscosity was evaluated from the theory and the experiments. Especially in the LHD, the neoclassical poloidal viscosity was calculated using FORTEC-3D code, which includes the finite Larmor radius effect. The simulation enabled us to calculate the neoclassical poloidal viscosity with high accuracy. Both the experimental and theoretical viscosities obtained in the LHD and the Heliotron J were compared with those previously evaluated in TU-Heliac and the CHS. Consequently the experimental results show good agreement with the theoretical prediction. In addition to those results, we unexpectedly observed the burst like transition under the marginal biasing condition in the Heliotron J, which is new interesting physical phenomenon.

研究分野：工学

科研費の分科・細目：総合工学・核融合学

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

磁場閉じ込めトロイダル装置における閉じ込め改善現象に関して、『プラズマ中に径電場が形成され、それによって流れる径電流と閉じ込め磁場によってローレンツ力が誘起され、ポロイダルフローが駆動される。径電場にシアがあるとポロイダルフローは径方向で流速の異なるシアフローとなりプラズマ中の揺動が抑えられ、結果として異常輸送が低減し、閉じ込めが改善される』というシナリオが考えられている。また閉じ込め改善モードへの突然の遷移に対して、新古典理論の見地からイオン粘性の影響が指摘されている。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、図1に示すように、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。

2. 研究の目的

本研究ではヘリカル型装置である大型ヘリカル装置(LHD)、ヘリオトロンJに対し、電極バイアスによる径電場制御を行う。これによりポロイダルフロー駆動力を実験的に評価し、径電場の形成機構、並びに遷移に対する新古典粘性の役割を明らかにすることを目的とする。

LHD, ヘリオトロンJでは平成22年度までに、標準的な磁場配位において電極バイアス実験が行われており、非線形プラズマ抵抗を伴う閉じ込め改善モードへの遷移が実現されている。本研究ではLHD, ヘリオトロンJにおける閉じ込め改善モードへの遷移に対するイオン粘性の役割を明らかにすることを目的としている。この目的を達成するため、以下のマイルストーンを定める。(1) LHD, ヘリオトロンJでの電極バイアスによる閉じ込め遷移条件と、新古典理論から予測されるイオン粘性の臨界条件(粘性の極大値)との整合性を検証する、(2) 複数の磁場配位で実験を

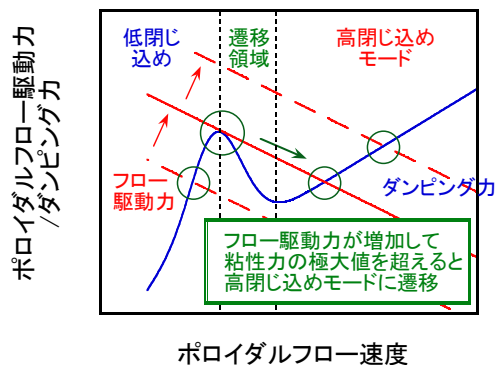


図1. ポロイダルフロー駆動力、ダンピング力のポロイダルフロー速度に対する依存性

実施し、イオン粘性のポロイダルフロー依存性、遷移駆動力・臨界イオン粘性の磁場リップル構造に対する依存性を取得する、(3) 実験結果と新古典理論の計算結果を、磁場構造が大きく異なる LHD, ヘリオトロン J, CHS, TU-Heliac の 4 装置間で比較し、閉じ込め遷移条件のデータベースを構築する。

3. 研究の方法

平成23年度

平成22年度までのバイアス実験で最適化されたプラズマパラメータを用いてイオン粘性のポロイダルフローに対する依存性を再計算し、実験結果との整合性を確認する。計算には Shaing によって提案されている新古典イオン粘性モデルを使用する。Shaing のモデルは、ヘリカル系装置に特有のヘリカルリップルの効果も含まれるため、本研究における粘性の評価モデルとして妥当である。その後、LHDにおける代表的な幾つかの磁場配位に対して、同一のプラズマパラメータでの仮定の下、Shaing モデルを用いたイオン粘性の予備計算を行い、臨界イオン粘性を評価することにより、各磁場配位で遷移に要求される電極電流がどの程度であるかを見積もる。

電極は最外殻磁気面の内側まで挿入されるため、実験中はプラズマから大きな熱負荷を受ける。平成22年度は耐熱性の良好な非等方性黒鉛を材料として、直径100mm、長さ40mmの単純な円盤型電極を使用した。平成23年度は、加工が容易な同材料を用いて、①表面積の増大による径方向電流増加、②電極挿入によるプラズマへの擾乱の低減を目的として、磁気面の表面形状と電極形状を整合させた湾曲型電極を製作し実験に供する。さらに、電極電流制御下でのバイアス実験も実施し、電極電圧制御下におけるバイアス実験でのプラズマの振る舞いと比較する。

平成24年度

(1) 高出力バイアス電源の導入

LHDではイオン粘性力のポロイダルフロー依存性は磁場配位(磁気軸位置, R_{ax})によって大きく変化する。平成22年度の実験では $R_{ax} = 3.6$ mの磁場配位において650V/23A出力の直流電源を使用し、電極電圧ランプアップ/ランプダウン実験が行われ、ヒステリシスを有するプラズマ閉じ込めの遷移が実現された。しかしながら、電源の定格電圧650Vに対して、遷移領域に相当するバイアス電圧は420-600Vと高く、高閉じ込め領域ではマージナルな条件でのデータ取得に留まっている。さらに、外寄せの磁場配位では遷移電圧は $R_{ax} = 3.6$ mの磁場配位よりも大きくなると予想される。従って、高閉じ込め領域のプラズマ閉じ込め特性評価、並びに、遷移閾値の磁場配位依存性の取得のためには、より高電圧出力の電源の導入が必要不可欠である。平成24年度は電圧/電流制御の切り替え可能、且つ、LHD電極バイアス実験の条件において、

十分な電圧裕度を有する 1000 V/ 15 A の直流フローティング電源(松定プレジジョン, PRH1000P-15)を導入し、実験に供する。また、電源のデジタル制御システムの構築を行う。

(2) バイアス電極の再検討

バイアス電極は表面積が大きい程、同一のバイアス電圧に対して大きな電極電流の駆動が期待できるが、電極挿入によってプラズマに与える擾乱の観点からは、極端な大型化は困難である。より小さな表面積で大きな電極電流を実現するためには、電極の材質としてタングステン(W)やランタンヘキサボライド(LaB₆)を選択し、負バイアス印加による電子エミッションにより、大きな電極電流を実現させる手法が有力である。以上の点を検討し、遷移電流を実現し得る適切な電極素材・表面積の電極の設計・製作の再検討を行う。

(3) イオン粘性の磁場配位依存性取得・遷移の履歴特性評価

再検討した電極、新規導入した直流電源を用いて、LHD の複数の磁場配位で電極バイアス実験を行い、ポロイダルフロー駆動力(電極電流)に関する遷移条件のリップル構造依存性を取得する。得られたフロー駆動力の閾値の磁場配位依存性と、Shaing のモデルから評価した臨界粘性力の磁場配位依存性を比較し、整合性の検証を行う。

平成 25 年度

イオン粘性の磁場リップル構造依存性を解明し、遷移に対する粘性の役割を明らかにするために、LHD 並びに、LHD とは装置サイズ・磁場構造の大きく異なるトロイダル装置である TU-Heliac、CHS、ヘリオトロン J での粘性の振舞いを規格化したパラメータで整理し、データベース化する。最終的には実験的に得られた遷移閾値の実験データ群と理論予測との整合性を評価し、閉じ込め改善現象の新古典理論による解釈の検証へと

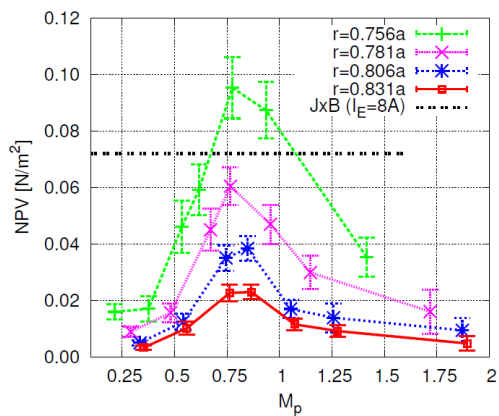


図 2. LHD での電極バイアスプラズマにおいて、FORTEC-3D コードによって計算された新古典ポロイダル粘性 (NPV) のポロイダルマッハ数依存性

発展させる。

4. 研究成果

平成 23 年度

平成 23 年度の LHD での電極バイアス実験では、電極バイアスによる閉じ込め状態の遷移前後の径電場の変化を計測することを目的として、重イオンビームプローブ計測で高い S/N を得られる磁場条件を検討し、実験を行った。これにより、閉じ込めの遷移後は、プラズマコア領域では大きな電場の変化はないこと、一方、プラズマ周辺部では正電場が増大することがわかった。

遷移に対するイオン粘性の役割を検証するために、理論モデルとの比較研究を進めた。電極バイアスによる閉じ込め遷移条件のリップル構造依存性を実験的に評価するために、磁気軸位置の異なる二種類の磁場配位で実験を行った結果、磁気軸外寄せの磁場配位であるほど、遷移に要求されるフロー駆動力が大きくなることが分かった。また、イオンのラーマー半径効果まで考慮に入れた FORTEC-3D コードを用いた電場・粘性のシミュレーションを開始し、遷移に要求される電極電流や電極電圧が実験と矛盾しないという初期結果を得た (図 2)。

ヘリオトロン J では、低磁場実験条件において、装置の磁場コイル電流を任意に制御できるように、定電流・定電圧電源を整備し、実験対象の磁場配位を飛躍的に増加することに成功した。当該年度は 3 種類の磁場配位で実験を行い、バイアスによる電場の変化、遷移条件の系統的なデータを取得することができた。

平成 24 年度

LHD における閉じ込め状態の遷移に要求される、ポロイダルフロー駆動力の磁場リップル構造依存性のさらに詳細なデータを取得するために、4 種類の磁場配位で生成されたプラズマを対象にして電極バイアス実験を実施した。実験には従来よりも高電圧出力が可能な電源(1000 V/15 A)を新規に導入し、さらに、電極挿入によるプラズマへの擾乱の

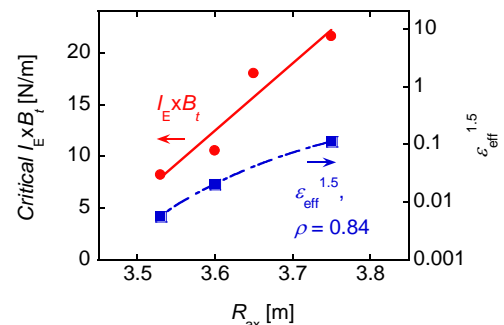


図 3. LHD における電極バイアスによる遷移駆動力と実効ヘリカルリップルの磁場配位依存性

低減のために、従来よりも小型化した電極 ($\phi 80 \times L30$) を用いた。

新古典イオン粘性の絶対値、並びに、ポロイダルフローに対する振る舞いは、閉じ込め磁場のリップル構造に大きく依存する。外寄せの磁場配位では実効的ヘリカルリップルは大きくなり、新古典イオン粘性も大きくなることが予測される。実験の結果、新古典イオン粘性の遷移駆動力は、磁気軸外寄せの磁場配位において大きくなることが分かった (図 3)。この結果は、従来、比較対象として用いてきた Shaing のイオン粘性モデルの傾向と定性的に一致するが、定量的な一致は見られなかった。そこで、FORTEC-3D コードによる粘性の評価を行ったところ、実験と定量的に良く一致する結果が得られた。

ヘリオトロン J における電極バイアス実

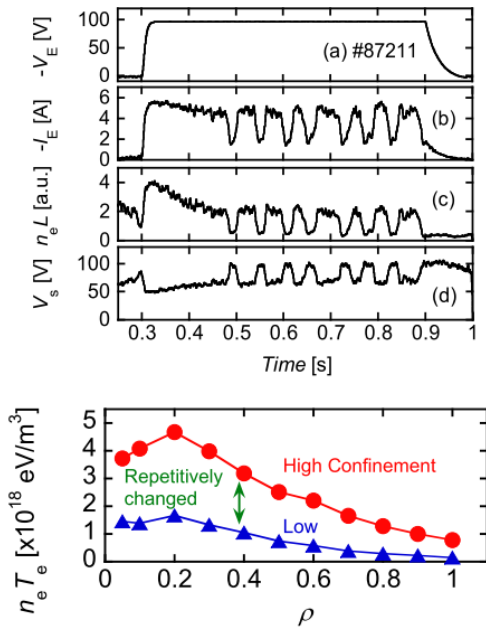


図 4. ヘリオトロン J においてマージナルなバイアス条件下で観測された間欠的な遷移現象

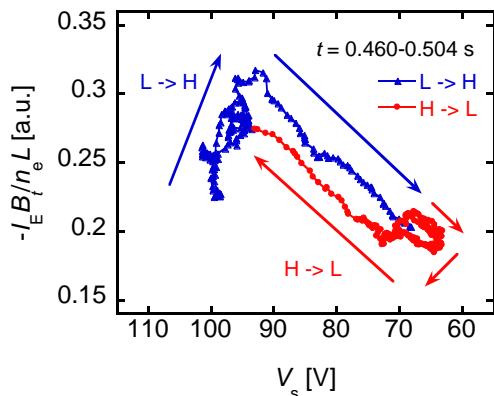


図 5. ヘリオトロン J の間欠的な遷移時におけるポロイダルフロー駆動力の自発的な変化

験では、閉じ込め状態の遷移に必要なバイアス電圧/電流をわずかに下回るマージナルなバイアス条件下に置いて、放電中に自発的な遷移/逆遷移を繰り返す、間欠的な閉じ込め改善現象を発見した (図 4)。これは電極バイアスによるマージナルな外部ポロイダル駆動力作用下において、自発的な密度減少によって規格化トルクが増加し、ポロイダル粘性の極大値を上回ったことによって閉じ込め改善モードへの遷移が起こり、また、閉じ込め改善モードへの遷移後は、電子密度の増大により、規格化ポロイダル回転トルクが減少した結果、通常の閉じ込め改善モードへの逆遷移が発生していることを示している (図 5)。

平成 25 年度

LHD での電極バイアス実験において、これまでに行われている磁場配位よりもさらに磁場リップルの大きい磁場配位を対象とした。このターゲットプラズマでは、

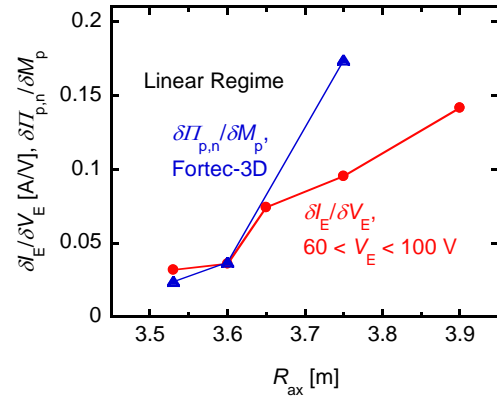


図 6. LHD の電極バイアスプラズマの径方向電気伝導率 ($M_p < 1$ の領域) の磁場配位依存性。丸は実験結果、三角は FORTEC-3D の計算結果

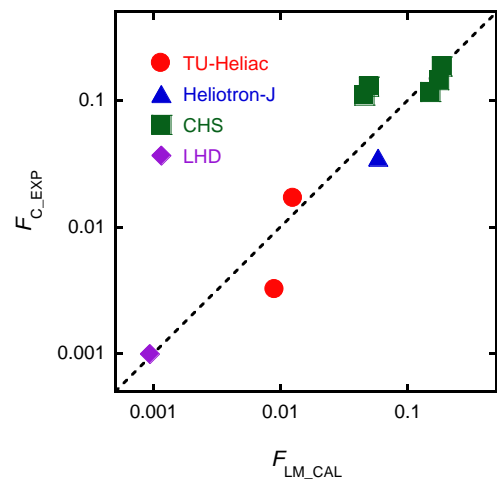


図 7. 4 種類のヘリカルプラズマ閉じ込め装置で得られた粘性の極大値 (F_{LM_CAL}) と遷移駆動力 (F_{C_EXP}) の関係

これまでの磁場配位のプラズマよりも電気伝導率が高い、すなわち、径電場形成に対して大きなトルクが必要であることがわかり(図 6)、実験で用いたバイアス電源の仕様の範囲内では遷移は実現されなかった。これは、実効的な磁場リップルが大きい磁場配位では、粘性が増大し、遷移が起こりにくくなることを示しており、理論予測を支持する結果である。

研究期間全体を通して、LHD、並びにヘリオトロン J で磁場リップル構造の異なる、広範な磁場配位で電極バイアス実験を行い、ポロイダル粘性を理論的・実験的に評価した。さらに、これまでに TU-Heliac、CHS で行われた電極バイアス実験で得られた粘性の値と比較した。この結果、図 7 に示すように、実験と理論が良く整合することがわかった。

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] H. Takahashi, S. Kitajima, K. Ishii, 他 15 名, “Study of Transition Mechanism Based on Ion Viscosity using Biasing Electrode in Heliotron J,” *proceedings of 40th European Physical Society Conference on Plasma Physics*, Espoo, Finland (Dipoli) (4pp), July 2013. 査読無.
- [2] S. Kitajima, H. Takahashi, K. Ishii, 他 20 名, “Transition of Poloidal Viscosity by Electrode Biasing in the Large Helical Device”, *Nucl. Fusion*. **53**, 073014 (6pp) (2013). 査読有.
- [3] H. Takahashi, S. Kitajima, K. Ishii, 他 12 名, “Configuration dependence of the transition criterion to an improved confinement mode using a biased electrode in the LHD”, *proceedings of Plasma Conference 2011* (石川県立音楽堂), November 2011, 23D07. 査読無.
- [4] S. Kitajima, H. Takahashi, K. Ishii, 他 25 名, “Electrode Biasing Experiment in the Large Helical Device”, *Nucl. Fusion* **51**, 083029 (2011). 査読有.

[学会発表] (計 6 件)

- [1] H. Takahashi, S. Kitajima, H. Utoh, 他 32 名, “Study of transition phenomena based on poloidal ion viscosity using a biasing electrode in helical system,” Joint 19th ISHW and 16th RFP workshop, Padova, Italy (Civic center of art and culture Altinate/San Gaetano), September 2013 (招待講演).
- [2] Hiromi Takahashi, Sumio Kitajima, Keiichi

Ishii, 他 13 名 “Study of Transition Mechanism Based on Ion Viscosity using Biasing Electrode in Heliotron J”, 40th European Physical Society Conference on Plasma Physics, Espoo, Finland (Dipoli), 1-5 July 2013 (ポスター発表).

- [3] H. Takahashi, “Review of Electrode Biasing Experiments in Helical Plasmas in Japan,” 11th Coordinated Working Group Meeting, Madrid, Spain (Ciemat), March 2013 (口頭発表).
- [4] S. Kitajima, H. Takahashi, K. Ishii, 他 20 名, “Transition of Poloidal Viscosity by Electrode Biasing in the Large Helical Device”, 24th IAEA Fusion Energy Conference, (Hilton San Diego Bayfront Hotel, San Diego, USA), October 2012 (ポスター発表).
- [5] S. Satake, H. Takahashi, S. Kitajima, 他 6 名, “Simulation Study on Neoclassical Poloidal Viscosity in Helical Plasmas”, 54th Annual Meeting of the American Physical Society Division of Plasma Physics, Providence, USA (Rhode Island Convention Center), October 2012 (招待講演).
- [6] H. Takahashi, S. Kitajima, K. Ishii, 他 12 名, “Configuration dependence of the transition criterion to an improved confinement mode using a biased electrode in the LHD”, *Plasma Conference 2011* (石川県立音楽堂), November 2011 (口頭発表).

[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

助教

研究者番号 : 00462193

(2) 研究分担者

無し

(3) 連携研究者

無し