

**科学研究費助成事業 研究成果報告書**

平成 29 年 6 月 12 日現在

機関番号：63902

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2011～2016

課題番号：23561002

研究課題名(和文)ヘリカルプラズマにおける電場の自律的振動と輸送障壁に関するダイナミクス解析研究

研究課題名(英文) Dynamics study of self-generated oscillation for the radial electric field and the transport barrier in helical plasmas

研究代表者

登田 慎一郎 (Shinichiro, Toda)

核融合科学研究所・ヘリカル研究部・准教授

研究者番号：60332186

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,300,000円

研究成果の概要(和文)：核融合発電には、高温、高密度プラズマ状態が必要であり、閉じ込め性能が高いことが重要である。トロイダルプラズマの中で特に、ヘリカルプラズマにおいて、電場はプラズマ閉じ込めに重要な役割を果たす。その電場の時間発展や空間分布について、実験結果と比較を行った。時間発展においてプラズマダイナミクス物理現象である電場の振動現象を、シミュレーション結果により予測することができた。

研究成果の概要(英文)：The high-temperature and high-density state are necessary and the high performance plasma is needed. In toroidal plasmas, especially helical plasmas, the electric field plays the important role in the plasma confinement. The dynamics and the spatial structure of the electric field as the simulation results are compared with the experimental results. The self-generated oscillation of the electrostatic potential in the plasma physical dynamics is predicted.

研究分野：プラズマ物理

キーワード：plasma transport turbulence dynamics

## 1. 研究開始当初の背景

熱核融合反応をめざした磁気プラズマ閉じこめ研究において、ブレークスルーは閉じこめ時間が長いHモードを初めとする多彩な閉じこめ改善モードの発見である。トロイダルプラズマ装置では、閉じこめ改善モードとして多くの種類の輸送障壁が観測されていて、その形成機構の解明が急務である。その中でヘリカル装置LHDやCHSにおいて、電場と流束のダイナミクスの相関を研究することにより、電子内部輸送障壁と関連する電場構造形成の物理解明が大きく進展している、そのさらなる理解が強く求められている。また最近LHDにおいて密度分布に内部拡散障壁(超高密度コアプラズマ)が得られている(N. Ohyabu et al., Phys. Rev. Lett. Vol. 97 (2006) 055002)。電子内部輸送障壁は低衝突領域(バナナ領域)で、内部拡散障壁は高衝突領域(プラトー領域やフィルシュ・シュルター領域)でそれぞれ観測されている。そしてプラズマ揺動により生成される帯状流というメゾスケールの構造の重要性が示されている(A. Fujisawa et al., Phys. Rev. Lett. Vol. 98, (2007) 165001)。帯状流は衝突や電場構造の非線形性から励起されるかどうか決まり、乱流輸送に影響を与えるからである。従って電場構造に関する輸送解析が今後も必要である。また、電子内部輸送障壁に関するヘリカルプラズマの電場構造の定常状態の理論研究が行われてきた。従来の研究は定常分布の理解を大きく進展させたが、まだ大きな課題が残されている。まず内部拡散障壁の持続時間を予測するにはダイナミクスの解析が必要である。またCHS装置ではプラズマ中心付近で静電ポテンシャルの時間的な振動現象(電場の遷移が繰り返し起こっている)が観測されている(A. Fujisawa et al., Phys. Rev. Lett. Vol. 79 (1997) 1054)。ヘリカルプラズマでの理論研究における電場や輸送障壁のダイナミクスに関する理解が不十分である。この急務に応えるためにも帯状流の効果を取り入れるなど理論解析における方法論を拡張してヘリカル系プラズマの改善閉じ込めの学術的理解を広げていく必要がある。

## 2. 研究の目的

ヘリカル系プラズマの輸送障壁に関する改善モードのプラズマダイナミクス解析を行う。帯状流を含めたダイナミクス解析結果から電場の自律的振動現象の理論予測を行う。電場の大規模な振動現象が起こる発現領域を求める。輸送障壁(プラズマ改善モード)の得られる実験シナリオ(加熱入力の順序等)を提言する。

また、ジャイロ運動論方程式の解析結果を反映した輸送係数を、プラズマ輸送ダイナミクスに取り入れる。得られたプラズマ分布に関する定常解と実験結果の比較を行い、輸送係数モデルの改善を行う。

## 3. 研究の方法

ヘリカルプラズマで数多くある改善モードに関係する輸送障壁(電子内部輸送障壁,内部拡散障壁,イオン内部輸送障壁)からここでは電子内部輸送障壁を取り上げる。これまでに作成済みの帯状流の効果を含めた密度,温度(電子,イオン),電場の1次元輸送方程式系のプラズマダイナミクス解析を行う。異常輸送については電流拡散インターチェンジモードのもの(K. Itoh et al., Plasma Phys. Control. Fusion Vol. 36 (1984) 123)を初めに用いている。その異常輸送係数の値は電場の勾配(シア)によってその値が低減する。帯状流の減衰率は、乱流輸送の一因となっているドリフト波の強さに大きく影響を与える。電場構造のスケール長(長スケール)と帯状流のスケール長(メゾスケール)を、同時に輸送モデル方程式系で解析できるようにすでに定式化を行っている。その解析結果からヘリカルプラズマ内部領域での熱拡散係数の低減を予測する。つまり電場自体のシアと電場構造により励起される帯状流の2つの物理過程により、電子内部輸送障壁を示す。初期値問題として解析し、物理量のダイナミクスやその最終状態について考察する。そして実験で観測されている静電ポテンシャルの振動現象に対応する電場の大規模な振動現象の理論予測を行う。さらに電場のダイナミクス(自律的振動現象)における電場分布での遷移点の時間発展や、密度と電場の位相差などを調べる。電場の自律振動現象の中で、温度分布に見られる電子内部輸送障壁の特性(幅やその勾配)について研究する。得られる解析結果が定常になるか、または振動現象になるかを考察する。理論解析結果により電場の自律的振動の起源やプラズマ全体の閉じ込めへの影響について調べる。外部入力を固定した上で初期値を変えた解析を行い、得られた解の初期値依存性を考察する。この解析は実験シナリオを考えるとときに必要である。ここまでは今までに作成済みのコードを使用する。外部入力を変化させた計算を行い、電場の振動現象の予測できる領域や解が定常になる領域を理論解析で用いたパラメータ平面内で調べる。電子内部輸送障壁が再現できる領域を、理論解析で用いているパラメータ平面上で導く。さらに実験で用いるパラメータ(粒子源,加熱入力等)の平面で定常解になる領域と、自律的な振動解が得

られる領域を示す。初期値からのプラズマダイナミクスの解析を行っているので、プラズマの数多くの制御パラメータの中から実験の効率を上げるのに最適な制御パラメータやシナリオを理論的に指摘する。電場の遷移現象、輸送障壁や物理量のダイナミクスに関する実験結果の説明できる部分とできない部分を、本研究の理論解析結果を用いて調べていく。また他の不安定性モードによるモデルや、乱流を運動論的に取り扱った研究から導かれた輸送係数の導入についても考察する。さらに他の種類の輸送障壁(内部拡散障壁,イオン内部輸送障壁)についてのプラズマダイナミクス解析を行う予定である。非常に広いパラメータ領域での計算が必要になるため既存のコードの改良,高速化を行う。

#### 4. 研究成果

輸送障壁の形成機構はトロイダルプラズマにおいて改善モードを実現するのに重要な課題である。輸送障壁を説明する一つの考え方は径電場の構造形成とそのシアによる乱流抑制である。トロイダルプラズマでは電場分布は閉じ込め特性に強く影響を与える。プラズマエッジでの密度や温度の時間発展に自励振動が現れている。ヘリカルプラズマにおいて、径電場が形成されるときにヘリカルリップルに関係した新古典輸送が優位な役割を果たす。粒子新古典輸送流束と密度,温度勾配との間の非線形関係によって局所的な径方向の点で、しばしば径電場の複数解が得られる。ヘリカルプラズマで径電場の分岐が起こり、結果として得られた径電場における強いシアによって輸送障壁が形成される。径電場の時間発展においてリミットサイクル現象がヘリカルプラズマにおいて実験観測されている。正電場と負電場の時間的な繰り返しの変化がコア領域で起こることが発見されている。コア領域で正電場が観測されているときに、電子内部輸送障壁が観測されている。用いた輸送モデルは密度,電子温度,イオン温度と径電場の時間発展拡散方程式からなる。二つのプラズマ状態の間を振動する径電場のリミットサイクルをシミュレーション結果として示した。ヘリカルプラズマにおいて径電場のリミットサイクル(自励振動)が、粒子,熱流束の条件のもとで、両極性条件によって導かれる電場の複数解により導かれた(図1)。コア領域において粒子,熱流束に関係する密度,温度の自励振動が起こす。この計算結果はヘリカルプラズマでの実験結果に対応するものである。径電場の振動現象には二つの時間スケールがあり、典型的な輸送時間スケールと遷移が起こるときの非常に速い時間スケールであ

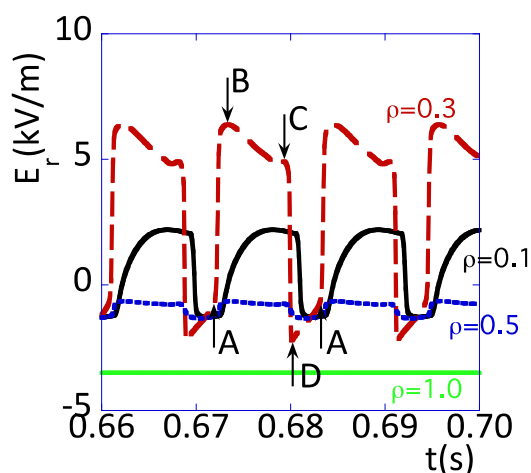


図1: 径電場の振動現象

る。電場の周期的な振動現象が起こるパラメータ領域についても調べた。そして自励振動を起こす物理機構を明らかにした。ジャイロ運動論方程式を解くGKVコードを用い、大型ヘリカル装置(LHD)でのイオン温度勾配不安定性(ITG)モードや帯状流について研究した。イオン熱拡散係数はジャイロ熱拡散係数とある関数の積とする。ある関数とは、ITG成長率の混合長概算、磁気シアパラメータと帯状流の特徴時間に依存する。イオンの熱拡散係数について、線形ジャイロ運動論解析から計算される混合長概算と帯状流の崩壊時間の関数が簡約化モデルとして導出される。時間発展を解く輸送コードの中で、時間ステップごとに、ジャイロ運動論線形解析を行うことは非常に計算コストがかかる。輸送コードで乱流輸送係数にどのモデルを選ぶか決めるために、多くの微視的不安定性からどのモードが不安定しているか、そしてその乱流レベルを評価する必要がある。最初のステップとして、LHDでの高イオン温度放電(ショットナンバー88343)におけるITGモードについて研究を行った。混合長概算の値を大半径のイオン温度勾配長に対する比に比例する形でモデル化する。径方向に安全係数、密度、電子イオン温度が変化する。従って、径方向に比例係数や、ITGモードが不安定化するイオン温度勾配長を求める。また帯状流崩壊時間の径方向依存性を調べる。このとき、磁場配位を時間的に固定する。さらなるモデル化によって、高速に簡約化モデルの値を十分な精度で再現することができた。モデル化したイオン乱流輸送係数を用いて、イオン温度のダイナミクスを輸送コードTASK3Dにより解析する。イオンの加熱入力分布はTASK3Dより求める。解析の結果、多重解が正の電場を選んだ際に、実験結果と矛盾のない結果を得ることができた(図2)。この時の計算コストは、輸送コ

ードの時間ステップごとにジャイロ運動論解析を行う場合と比べて非常に少ない。

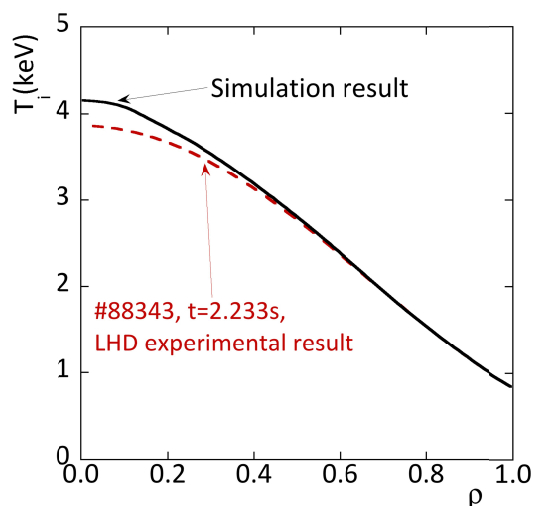


図2：イオン温度のシミュレーション結果と実験結果の比較

#### 5. 主な発表論文等 [雑誌論文] (計3件)

S. Toda, M. Nunami, A. Ishizawa, T. -H. Watanabe and H. Sugama, "How to apply a turbulent transport model based on a gyrokinetic simulation for the ion temperature gradient mode in helical plasmas", 査読有, Journal of Physics: Conference Series, Vol. 561 (2014) 012020, DOI: 10.1088/1742-6596/561/1/012020

S. Toda and K. Itoh, "Transport Analysis of Oscillatory State for Plasma Dynamics in Helical Plasmas", 24th IAEA Fusion Energy Conference, 8-13 October 2012 San Diego, United States of America, 査読無, Vol. 1 (2012) 1-8

S. Toda and K. Itoh, "Study of electric field pulsation in helical plasmas", Plasma Phys. Control. Fusion, 査読有, Vol. 53 (2011) 115011 (14pp), DOI: 10.1088/0741-3335/53/11/115011

#### [学会発表] (計12件)

S. Toda, M. Nakata, M. Nunami, A. Ishizawa, T. -H. Watanabe and H. Sugama, "Construction of reduced

transport model by gyro-kinetic simulation with kinetic electrons in helical plasmas", 58th Annual Meeting of the APS Division of Plasma Physics, 2016.11.02, San Jose (USA)

S. Toda, M. Nunami, A. Ishizawa, S. Murakami, T. -H. Watanabe and H. Sugama, "Progress in applying gyrokinetic heat diffusivity model to transport simulations for helical plasmas", 20th International Stellarator-Heliotron Workshop, 2015.10.06, Greifswald (Germany)

S. Toda, M. Nunami, A. Ishizawa, T. -H. Watanabe, H. Sugama, "How to apply a turbulent transport model based on a gyrokinetic simulation for helical plasmas", Plasma Conference 2014, 2014.11.04, Toki Messe (Niigata, Niigata)

S. Toda, M. Nunami, A. Ishizawa, T. -H. Watanabe, H. Sugama, "How to apply a turbulent transport model based on a gyrokinetic simulation for helical plasmas", 2014. 56th Annual Meeting of the APS Division of Plasma Physics, 2014.10.27, New Orleans (USA)

S. Toda, M. Nunami, A. Ishizawa, T. -H. Watanabe, H. Sugama, "How to apply a turbulent transport model based on a gyrokinetic simulation for helical plasmas", THEORY OF FUSION PLASMAS JOINT VARENNA - LAUSANNE INTERNATIONAL WORKSHOP, 2014.09.02, Varenna (Italy)

S. Toda, M. Nunami, A. Ishizawa, T. -H. Watanabe and H. Sugama, "Modeling of Heat Diffusivity for Ion Temperature Gradient Turbulence in Helical Plasmas", 14th International Workshop on H-mode Physics and Transport Barriers, 2013.10.02, Kyushu University (Fukuoka, Kasuga)

S. Toda, K. Itoh and A. Wakasa, "Transport Analysis of Density Limit for the Plasma Dynamics in Helical Plasmas", 22nd International Toki

Conference (ITC22), 2012.11.21,  
Ceratopia Toki (Gifu, Toki)

S. Toda and K. Itoh, "Transport  
Analysis of Oscillatory State for  
Plasma Dynamics in Helical Plasmas",  
24th IAEA Fusion Energy Conference,  
2012.10.09, San Diego (USA)

S. Toda, K. Itoh and A. Wakasa,  
"Analysis of transport barriers with  
the oscillatory state for plasma  
dynamics in helical plasmas", The  
39th European Physical Society  
Conference on Plasma Physics and 16th  
International Congress on Plasma  
Physics, 2012.07.06, Stockholm  
(Sweden)

S. Toda and K. Itoh, "Oscillation  
Phenomena of Electric Field in Helical  
Plasmas", 18th International  
Stellarator/Heliotron Workshop & 10th  
Asia Pacific Plasma Theory Conference,  
2012.02.02, Murrumbidgee (Australia)

S. Toda and K. Itoh, "Transport  
Analysis Study of Oscillation  
Phenomena for the Electric Field in  
Helical Plasmas", Plasma Conference  
2011, 2011.11.23, Ishikawa Ongakudo  
(Ishikawa, Kanazawa)

S. Toda and K. Itoh, "Study of  
Electric Field Pulsation in Helical  
Plasmas", 1st Asia-Pacific Transport  
Working Group Meeting, 2011.06.15,  
National Institute for Fusion Science  
(Gifu, Toki)

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

登田 慎一郎 (TODA, Shinichiro)  
核融合科学研究所・ヘリカル研究部・准  
教授  
研究者番号： 6 0 3 3 2 1 8 6