

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 6 月 11 日現在

機関番号：14301

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2011～2013

課題番号：23561000

研究課題名(和文) 磁気面破壊を含む3次元摂動磁場の新古典トロイダル粘性への影響

研究課題名(英文) Estimation of neoclassical toroidal viscosity in the three dimensional magnetic configurations

研究代表者

村上 定義 (Murakami, Sadayoshi)

京都大学・工学(系)研究科(研究院)・准教授

研究者番号：40249967

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 4,000,000円、(間接経費) 1,200,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、トカマクプラズマにおけるリップル磁場、誤差磁場、ELM制御コイル磁場などによる3次元磁場摂動がある場合の新古典トロイダル粘性への影響について、3次元磁場配位におけるドリフト運動論方程式解析コードDCOM/GNETを用いて研究を行った。まず基盤コードであるGNETコードの改良を進め、より進んだ並列化や新古典粘性の評価に重要なトロイダル方向の運動量を保存するクーロン衝突項を導入した。次に、低 n や中 n 摂動磁場が存在する場合の新古典トロイダル粘性の摂動磁場強度依存性や衝突頻度依存性などを評価し、モード数依存性や衝突周波数依存性などが得られた。

研究成果の概要(英文)：The neoclassical toroidal viscosity is investigated in the three dimensional magnetic configurations; tokamaks with ripple field, error field, ELM control field and etc. First, we improve the GNET code to increase the efficiency of the parallel computing and to introduce the toroidal momentum conserving collision operator. Next, we study the neoclassical toroidal viscosity with the magnetic perturbation of low to middle mode number and make clear the dependencies of the viscosity on the mode number and the collision frequency.

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：新古典粘性 数値解析 トカマク 摂動磁場 リップル 磁気島

1. 研究開始当初の背景

プラズマ流やその速度シアなどが、Hモード遷移、輸送障壁の形成など閉じ込め改善モードにおいて非常に重要な働きをすることが示唆されて来ている。一方、プラズマ流は、プラズマ流を駆動するトルクと流れを減衰させる粘性が釣り合うことにより、定常的な流れが決まると考えられる。トカマク磁場配位ではトロイダル方向に対称性があり、新古典的なトロイダル粘性がほとんどなく、異常輸送と関連する粘性やポロイダル回転との結合によりトロイダル流が決まると考えられている。しかしながら、トカマク磁場配位は、基本的には軸対称磁場配位であるが、有限個のトロイダルコイルによるリップル磁場が存在する場合、新古典トロイダル粘性が発生し、トロイダル流の釣り合いに重要な働きをすることがJT-60U等で実験的に調べられた。また、この他にもコイル等の精度から生じる誤差磁場、周辺局在モード (ELM) を制御するために導入されたヘリカル磁場や電磁流体 (MHD) 的な不安定性と関連する磁場など、 $\delta B/B_0$ 小さいが様々な3次元摂動磁場が存在する。

Shaing 博士等は、ヘリカル系プラズマで構築された3次元磁場配位における新古典輸送の解析手法を用いて、3次元磁場トカマクにおける新古典トロイダル粘性を解析的に導出した。また、摂動ヘリカル磁場を印加した実験がNSTXやDIII-Dにおいて行われ、3次元磁場を含むトカマクにおけるトロイダル新古典粘性の検証が行われた。結果として、3次元摂動磁場による新古典トロイダル粘性理論と考えられるトロイダル粘性が存在することが分かった。これらの理論・実験研究により、比較的小さな大きさであっても3次元磁場の摂動が、トロイダル粘性という形で、実際のトカマクプラズマの閉じ込めにおいて、重要な働きをする可能性があることが示された。

リップル磁場など簡単な3次元摂動磁場による新古典トロイダル粘性については、解析が進められているが、その径電場依存性やリップル磁場とELM制御ヘリカルコイル磁場が同時に存在する場合など、未だ評価が行われていない多くの場合が存在する。これらを実験的に評価するためには正確な運動論的シミュレーションが必要不可欠である。

2. 研究の目的

本研究では、トカマクプラズマにおけるリップル磁場、コイルの誤差による誤差磁場、ELM制御コイル磁場などによる3次元磁場摂動がある場合の新古典トロイダル粘性への影響について研究を行う。これまで開発を行って来た新古典輸送解析コー

ドDCOMやドリフト運動論解析コードGNETを拡張することにより、3次元摂動磁場が存在する場合の新古典トロイダル粘性を評価する。具体的には、まず低 n 摂動磁場 (ELM制御コイルなど) や中 n 摂動磁場 (リップル磁場) が存在する場合の新古典トロイダル粘性の摂動磁場強度依存性や衝突頻度依存性などを評価する。これまで理論では、異なる衝突領域でそれぞれ解析解を求め、それらを接続した近似式が導出されているが、得られた結果をこれらの解析解と比較・検討する。

また、低 n および中 n が同時に存在する場合についても検証する。次に、これまでの理論解析では、十分解明されていない径電場の影響を考える。有限の径電場を考慮に入れた解析を行い、電場依存性を明らかにし、Shaing等の理論と比較・検討を行う。また、さらに摂動磁場が大きくなった場合におけるトロイダル粘性についても評価を行う。

3. 研究の方法

まず局所輸送を仮定した新古典トロイダル粘性の解析を進める。3次元摂動磁場がある場合、新古典トロイダル粘性によりトロイダル方向のトルク T_ζ が発生する。このトルク T_ζ は3次元磁場による非両極性粒子束 Γ と以下の関係がある。

$$T_\zeta = - \langle e_\zeta \cdot \nabla \cdot \bar{\pi}_{\parallel}^{3D} \rangle = -q \langle \Gamma \cdot \nabla \psi \rangle$$

すなわち、3次元摂動磁場による非両極性粒子束 Γ を求めることにより、新古典トロイダル粘性 $\bar{\pi}_{\parallel}^{3D}$ の影響を評価することが出来る。モンテカルロ法により局所輸送係数を求めることが出来るDCOMコードを用いることにより、3次元摂動磁場が存在する場合の粒子輸送係数を高精度で求めることが出来る。まずは、簡単な円形トカマクに対して、低 n 摂動磁場 (ELM制御コイルなど) および中 n 摂動磁場 (リップル磁場) をそれぞれ仮定し、新古典トロイダル粘性の評価を行う。得られた結果は、Shaing等による解析的理論結果との比較・検証を行う。

次に、低 n 摂動磁場 (ELM制御コイルなど) および中 n 摂動磁場 (リップル磁場) をそれぞれ仮定し、新古典トロイダル粘性の評価・検討を行う。また、JT-60UやJETなど実際の平衡磁場配位やプラズマパラメータを用いて、実験結果との比較を行う。JT-60UやJETでは、3次元摂動磁場の効果を実験的に検証しており、摂動磁場強度依存性など実験結果との定量的な比較・検討を行う。さらに低 n 摂動磁場および中 n 摂動磁場が同時に存在する場合について検証を行う。また、摂動磁場が大きくなった場合におけるトロイダル粘性についても評価を行う。

4. 研究成果

(1) 主な成果

本研究では、トカマクプラズマにおけるリップル磁場、誤差磁場、ELM 制御コイル磁場などによる 3次元磁場摂動がある場合の新古典トロイダル粘性への影響について、3次元磁場配位におけるドリフト運動論方程式解析コード DCOM/GNET を用いて研究を行う。摂動磁場強度や衝突頻度依存性などについて、これまでの解析的理論と比較を行うと同時に、これまで理論解析が不十分な径電場の影響などを考慮に入れ解析を行いその影響を明らかにする。また、さらに摂動磁場が大きくなり、磁気島が発生した場合やストキャスティック磁場となった場合における新古典トロイダル粘性についても評価を行うことを目的としている。

まず、今回の研究において基盤コードである GNET コードの改良を進めた。具体的には、コードのより進んだ並列化や新古典粘性の評価に重要なトロイダル方向の運動量を保存するクーロン衝突項の開発を行った。高速極限における運動量保存モデルを導入し、GNET による計算を複数回行う反復法を用いることにより、トロイダル運動量を保存するドリフト運動論方程式の解を求めることが可能となった。実際に GNET コードに組み入れ、まずヘリカルプラズマにおける電子サイクロトロン加熱による電流駆動 (ECCD) の問題に適用し、運動量が保存することを確認した。図 1 は、ECCD 計算におけるトロイダル運動量の衝突項による損失率と反復回数の依存性を示す。この場合、4 回程度の反復により、数%以下の精度でトロイダル運動量が保存すること分かった。これにより、初めて有限軌道幅の効果を含み、トロイダル運動量も保存するコードを完成させることができた。

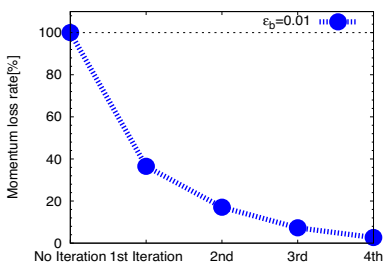


Figure 1: トロイダル運動量損失率の反復回数依存性

一方、高速極限モデルではトロイダル運動量は保存されるが、背景プラズマの有限速度の効果が無視されており、より正確な運動量保存を考えた場合、不十分であることが分かった。このためには、背景プラズマの有限速度の効果を含む速度依存型モデルを開発する必要がある。このためマックスプランク・プラズマ物理研究所 (ドイツ) との

共同研究により、新古典粘性の正確な計算のできる新たなモデルの開発を進めた。さらに、これらから得られた知見を発展させ、高エネルギー粒子間の非線形なクーロン衝突の効果を取り入れた GNET コードの開発を進めることができた。

次に、低 n 摂動磁場 (ELM 制御コイルなど) や中 n 摂動磁場 (リップル磁場) が存在する場合の新古典トロイダル粘性の摂動磁場強度依存性や衝突頻度依存性などを評価することを行った。DCOM コードでトカマク配位にリップル磁場を加え、近似式から求められる新古典粘性の計算を行った。結果として、モード数依存性や衝突周波数依存性などが得られた。

(2) 成果の国内外での位置付けとインパクト

本研究により、3次元トロイダル磁場配位における複雑な粒子軌道を含むドリフト運動論方程式の解を求める GNET コードを拡張し、トロイダル運動量を保存するクーロン衝突項の開発に成功した。これまで径方向の運動を無視した磁気面内の運動のみを考慮した方程式により解析が行われてきており、本研究により、世界的に見ても初めて径方向の拡散が正しく考慮された新古典粘性や電流駆動なので評価が行うことが可能となった。また、本研究を基礎として、高エネルギー粒子間の非線形衝突の効果を含む GNET コードの開発も進めることができた。

(3) 今後の展望

低 n 摂動磁場 (ELM 制御コイルなど) や中 n 摂動磁場 (リップル磁場) が存在する場合の局所解析コード DCOM を用いた新古典粘性の解析については、未だ検証が十分終わっていないため、今後さらに解析を進め結果をまとめる予定である。これらの結果は、国際的なジャーナルに投稿する予定である。また、低 n 摂動磁場および中 n 摂動磁場が同時に存在する場合や摂動磁場が大きくなった場合におけるトロイダル粘性についても今後に評価を行う予定である。

一方、開発されたトロイダル運動量を保存するコードについては、今後、電流駆動などの物理的問題に適用し、これまで明らかにされていない、径方向拡散の効果などを評価する予定である。

5. 主な発表論文等

① 【雑誌論文】 (計 9 件)

- [1] S. Murakami, S. Hasegawa and Y. Moriya, Development of momentum conserving collisional operator for Monte Carlo simulation code, Proc. 40th EPS Conf. Plasma Phys., 査読無, 2013, **P1.144**, <http://ocs.ciemat.es/EPS2013PAP/html/>
- [2] Y. Masaoka and S. Murakami, Study of alpha-particle confinement in an LHD-type heliotron reactor, Nuclear Fusion, 査読有, **53**, 2013, 093030, DOI:10.1088/0029-5515/53/9/093030
- [3] Y. Masaoka and S. Murakami, Development of a Nonlinear Collision Operator for GNET Code, Plasma Fusion Res., 査読有, **8**, 2013, 2403106, DOI: 10.1585/pfr.8.2403106
- [4] H. Yamaguchi, S. Murakami, A. Wakasa, A. Sakai, A. Fukuyama, M. Osakabe, H. Takahashi, I. Yamada and LHD Exp. Group, NBI Heating Analysis of Time-Development Plasma in LHD, Plasma Fusion Res., 査読有, **8**, 2013, 2403099, DOI: 10.1585/pfr.8.2403099
- [5] S. Hasegawa, S. Murakami and Y. Moriya, Simulation Study of ECCD by GNET with Momentum Conserving Collisional Operator, Plasma Fusion Res., 査読有, **8**, 2013, 2403083, DOI: 10.1585/pfr.8.2403083
- [6] Y. Masaoka and S. Murakami, A formulation of nonlinear collision operator for the Monte Carlo code in toroidal plasmas, Zero-Carbon Energy Kyoto 2012, 査読有, Springer, 2012, 253.
- [7] S. Murakami, K. Itoh, L. J. Zheng, J. W. Van Dam, P. Bonoli, J.E. Rice, C.L. Fiore, C. Gao, and A. Fukuyama, Study of Toroidal Flow Generation by the ICRF Minority Heating in the Alcator C-Mod Plasma, Proc. 24th IAEA Fusion Energy Conference, 査読無, 2012, **TH/1-1**.
- [8] S. Murakami, K. Itoh, L. J. Zheng, J. W. Van Dam, P. Bonoli, J.E. Rice, C.L. Fiore, C. Gao, and A. Fukuyama, Toroidal Flow Generation by the ICRF Minority Heating and

RF Wave Field Profile Dependence, Proc. 39th EPS Conf and 16th Int. Cong. Plasma Phys., Stockholm, 査読無, 2012, **O5.119**, <http://ocs.ciemat.es/epsicpp2012pap/html/>

- [9] Y. Masaoka and S. Murakami, Evaluation of Monte Carlo Calculation Accuracy for α Particle Confinement Analysis in Heliotron Reactors, Plasma Fusion Res., 査読有, **6**, 2011, 2403129, DOI: 10.1585/pfr.6.2403129

② 【学会発表】 (計 12 件)

- [1] S. Murakami, Y. Masaoka, S. Hasegawa, Y. Moriya, Development of momentum conserving Monte Carlo simulation code for ECCD study in helical plasmas, 18th Joint Workshop on ECE and ECRH, 奈良, 2014.4.18, **P29**.
- [2] 村上定義, 政岡義唯, 長谷川聡一郎, 守屋要兵, 運動量保存および非線形衝突を考慮にいれた GNET コードの開発, プラズマ・核融合学会第 30 回年会, 東京, 2013.12.05, **05pE37P**.
- [3] S. Murakami, Y. Masaoka, S. Hasegawa, Y. Moriya, Development of 5D drift kinetic equation solver with momentum conserving and nonlinear collisional operator in the toroidal plasmas, 12th Asia Pacific Physics Conf., 幕張, 2013.7.17, **D1-PWe-10**.
- [4] S. Murakami, S. Hasegawa, Y. Moriya, Development of momentum conserving collisional operator for Monte Carlo simulation code, 40th EPS Conf Plasma Phys., Espoo, 2013.7.2, **P1.144**.
- [5] S. Hasegawa, S. Murakami and Y. Moriya, ECCD simulation by GNET with momentum conserving collisional operator, 22nd International Toki Conf., Toki, 2012.11.21, **P3-9**.
- [6] Y. Masaoka and S. Murakami, Study of nonlinear collision effect on high-energy ion confinement in the LHD plasma, 22nd International Toki Conf., Toki, 2012.11.21, **P3-45**.
- [7] S. Murakami, K. Itoh, L. J. Zheng, J. W. Van Dam, P. Bonoli, J.E. Rice, C.L. Fiore, C. Gao, and A. Fukuyama, Study of Toroidal Flow Generation by the ICRF Minority Heating in the Alcator C-Mod Plasma, Proc. 24th

IAEA Fusion Energy Conference, San Diego, 2012.10.9, **TH/1-1**.

- [8] S. Murakami, K. Itoh, L. J. Zheng, J. W. Van Dam, P. Bonoli, J.E. Rice, C.L. Fiore, C. Gao, and A. Fukuyama, Toroidal Flow Generation by the ICRF Minority Heating and RF Wave Field Profile Dependence, 39th EPS Conf and 16th Int. Cong. Plasma Phys., Stockholm, 2012.7.5, **O5.119**.
- [9] Y. Masaoka and S. Murakami, Nonlinear collision effect on energetic particle confinement in LHD plasmas, 21st International Toki Conf., Toki, 2011.11.29, **P2-78**.
- [10] S. Murakami, K. Itoh, L.J. Zheng, J.W. Van Dam, P. Bonoli, J.E. Rice, C.L. Fiore, A.

FUKUYAMA, Simulation study of toroidal flow generation by ICRF minority heating in Alcator C-Mod plasma APS-DPP 2011, Salt Lake City, USA, 2011.11.15, **UP9.00029**.

- [11] Y. Masaoka, S. Murakami, Nonlinear collision effect on alpha-particle confinement in toroidal plasmas, APS-DPP 2011, Salt Lake City, USA, 2011.11.17, **GP9.00086**.

6. 研究組織

(1) 研究代表者

村上 定義 (Sadayoshi Murakami)
京都大学・工学研究科・准教授
研究者番号 : 40249967