

平成 30 年 6 月 11 日現在

機関番号：63902

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2013～2017

課題番号：25420890

研究課題名(和文) 乱れた磁力線領域を含む3次元MHD平衡計算へのプラズマ回転の導入とその実験的検証

研究課題名(英文) Implementation of plasma rotation into 3D MHD calculation with stochastic magnetic field and its validation on experiments

研究代表者

鈴木 康浩 (SUZUKI, Yasuhiro)

核融合科学研究所・ヘリカル研究部・准教授

研究者番号：20397558

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,800,000円

研究成果の概要(和文)：3次元MHD平衡計算コードを改良し、ストカステックな磁力線上での圧力のより物理的な定式化とプラズマ回転を導入した。ストカステックな磁力線上のプラズマ圧力は磁力線に平行方向と垂直方向の輸送を考慮した非等方熱輸送モデルを導入した。また、プラズマ回転の導入により、共鳴摂動磁場とプラズマ回転の相互作用を考察した。

改良された3次元MHD平衡計算コードを用いた解析結果を実験結果と比較し、モデリングの妥当性を検証(validation)した。実験では、ポロイダル粘性の大きさに応じて、磁気島の位相がポロイダル方向にスリップすることが観測されているが、この結果を再現できた。

研究成果の概要(英文)：3D MHD equilibrium calculation code was improved by a model of the plasma pressure on the stochastic magnetic field and the plasma rotation. The pressure distribution on the stochastic magnetic field is modeled by an anisotropic heat diffusion of the plasma pressure in parallel to the magnetic field and perpendicular to the magnetic field. In addition, an interaction of the magnetic island and the plasma rotation is considered by an improved 3D MHD calculation code.

Using the improved code, the simulation is validated by comparing with the experimental result. In the experiment, the slip of the magnetic island poloidally depending on the viscosity is observed. The improved code can successfully reproduce this observation.

研究分野：核融合プラズマ

キーワード：MHD平衡 プラズマ回転 磁気島

## 1. 研究開始当初の背景

我が国の大型ヘリカル装置(LHD)のようなヘリオトロン磁場配位は、真空中で周辺領域にストカスティックな磁力線構造を持つ。従って、現実的な磁場配位に対して矛盾なく3次元MHD平衡を求めめるためには、入れ子状の磁気面を仮定しない3次元MHD平衡計算コードが必要であることを意味する。一方、トカマクは軸対称性を仮定して2次元でMHD平衡解析が行われる。しかし、周辺局在化モード(ELM)や抵抗性壁モード(RWM)の低減・抑制のため、共鳴磁場摂動(RMP)をプラズマに重畳する実験が盛んに行われている。この時、有理面付近の磁力線構造は変化し、磁気島の生成や磁力線構造のストカスティック化が予想される。つまり、トカマクにおいても2次元ではなく3次元かつ入れ子状の磁気面を仮定しないMHD平衡解析が重要である。

核融合科学研究所・京都大学の共同研究により入れ子状の磁気面を仮定しない3次元MHD平衡計算コードHINTが開発されている[1]。HINTコードは実座標形状で緩和法により3次元MHD平衡を計算するので、入れ子状の磁気面構造を仮定しない3次元MHD平衡計算が可能である。HINTコードによる3次元MHD平衡計算の結果、LHDプラズマの高ベータMHD平衡特性やトカマクの3次元MHD平衡による磁力線構造の変化が明らかになった[2]。

一方、最近のLHD実験にて熱パルスの輸送や電場構造を計測することにより、周辺磁場構造や実効プラズマ境界を同定することが試みられている。初期的な結果として、これらの計測とHINTによる3次元MHD平衡解析結果が比較され、定性的に一致した[3]。しかし、HINTは等方圧力を仮定した静止平衡を計算する3次元MHD平衡を計算するコードであり、ストカスティック領域での圧力分布のモデル化に改良の余地がある。より実験に近いプラズマの3次元MHD平衡解析を行う場合には以下のことを検討する必要がある。

- ストカスティック領域での圧力分布のより物理的なモデル化:HINTを含む等方圧力を仮定したMHD平衡計算コードはすべて $\mathbf{B} \cdot \nabla p = 0$ を満足する圧力分布を計算する。この条件を完全に満足するためにはストカスティック領域では圧力勾配が0でなければならない。しかし、実験結果はストカスティック領域に有限な圧力勾配が存在する可能性を示している。HINTの計算結果では、ストカスティックな磁力線の拡散を数値的に考慮することでストカスティック領域に有限な $\nabla p$ を残すことができるが、実験結果を完全に再現できない可能性が指摘されている[4]。従って、輸送を考慮することで、ストカスティック領域

での圧力分布をより物理的にモデル化する必要がある。

- プラズマ回転の導入:LHD実験をはじめとする、実際のプラズマではプラズマ回転が観測されている。また、トカマクでRMPが重畳されるプラズマはHモードであるので、強いトロイダル回転とポロイダル回転が計測されている。プラズマ回転は磁気島やストカスティックな磁力線構造に影響を与えると考えられるので、この効果を平衡計算に取り込む必要がある。

以上の2点を考慮することで、LHD実験やトカマクのRMP実験をはじめとする、ストカスティックな磁力線構造を持つ3次元MHD平衡をより物理的に正確に考察することが可能となる。

## 2. 研究の目的

本研究では3次元MHD平衡計算コードを改良し、ストカスティックな磁力線領域での圧力分布のモデル化を改良し、プラズマ回転を導入する。それにより、ストカスティックな磁力線構造を持つ3次元MHD平衡をより実験に即した条件で求めることを目指す。前節で述べた背景を踏まえ、以下の点を考察する。

3次元MHD平衡計算コードHINTに改良を加え、輸送を考慮したストカスティック領域での圧力分布のモデル化とプラズマ回転の導入を行う。

改良したHINTコードを用いて、ストカスティック領域での圧力分布を考察する。特にこれまでのモデルと比べ、圧力分布がどのように変化するかを考察する。また、ストカスティック領域での圧力分布の変化が、磁気面形状やシャフラノフシフトにどのように影響するかを考察する。

マッハ数が1より小さいプラズマ回転を含む3次元MHD平衡計算し、プラズマ回転が平衡に与える影響を考察する。特にプラズマ回転が磁気島構造やストカスティックな磁力線構造に対する影響に注目する。

改良したHINTコードによる3次元MHD平衡をLHD実験やトカマクのRMP実験の結果と比較し、改良したモデルの検証を行う。

## 3. 研究の方法

本研究では、入れ子状の磁気面構造を仮定しない3次元MHD平衡計算コードHINTを改良し、ストカスティックな磁力線上でのプラズマ圧力のより物理的なモデル化とプラズマ回転の導入を行う。改良は3段階に分けて行う。

まず、磁力線に平行方向と垂直方向の輸送係数、 $\kappa_{\parallel}$ と $\kappa_{\perp}$ を導入しストカスティック領域での圧力のモデル化を改良する。次に、トロイダル方向のプラズマ回転をMHD平衡方程式に導入する。

最後に、開いた磁力線上で $v_{\parallel p}$ を考慮できるように、MHD平衡方程式を磁力線に平行方向と垂直方向に分けて解くよう改良する。

改良した HINT コードで得られた 3 次元 MHD 平衡計算は LHD 実験やトカマクの RMP 実験と比較・検討し、モデルの検証 (validation) を行う。

#### 4. 研究成果

まず、HINT コードにプラズマ回転を導入するための改良と乱れた磁力線領域での非等方熱輸送の考察を行った。

これまで、磁力線に平行方向と垂直方向の圧力勾配を有限差分法により求めていたが、磁力線に平行方向の圧力勾配の計算方法を磁力線追跡法に変更した。このことにより、磁力線に平行方向の圧力勾配の計算精度が向上した。また、非等方熱輸送方程式を陰的に解くための数値スキームの開発は、3次元で効率よく行列を解くことができず、陽的スキームに変更した。陽的スキームで実装した圧力緩和ルーチンにより乱れた磁力線領域での非等方熱輸送を考察した結果、乱れた磁力線領域中に存在する KAM 面が熱輸送障壁として働き、乱れた磁力線でも有限の温度勾配を維持できることが分かった。

次に、HINT コードで緩和法により解かれる散逸 MHD 方程式を改良し、入力として与えられるトロイダル回転を含むように改良した。このことにより、有限なプラズマトロイダル回転を含む 3 次元 MHD 平衡を計算することが可能になった。

改良された HINT コードを用いて、円形断面形状のトカマクプラズマの 3 次元 MHD 平衡を考察した。このとき、安全係数分布は  $q=2$  有理面を含み、 $n=1$  の RMP 磁場により  $m=2$  の磁気島を持つ。また、プラズマのトロイダル回転として、トロイダルマッハ数  $M$  は 0.2、トロイダル回転速度は  $(1-\rho^2)^2$  に比例する速度シアがある分布を仮定した。解析の結果、プラズマのトロイダル回転により、あるポロイダル断面上での磁気島の位相がポロイダル方向に変化することが分かった。

プラズマ回転の大きさと粘性のバランスにも注目し、プラズマ回転のトルクがある閾値を超えると、磁気島がポロイダル方向へ回転し、自発的縮小が合われることが分かった。これは、理論予測と一致しており、現実に発生することが数値シミュレーションで確認された。粘性 $\nu$ が(a) $10^{-6}$ と(b) $10^{-2}$ との2ケースについて考察した。(a)の場合、プラズマの粘性が小さく、磁気島の位相はポロイ

ダル方向へ回転したままである。しかし、(b)の場合、磁気島の位相がポロイダル方向にスリップして回転が0の場合の位相へ戻ると同時に、磁気島の幅が小さくなることが分かった。このことは、プラズマの粘性が磁気島幅に影響を与え、磁気島幅が自発的に縮小することを示している。この現象は、実験でも観測されており、改良した HINT コードの解析により、初めて実証された。

#### <引用文献>

- [1] Y.Suzuki, et al., Nucl.Fusion, 46, L19, (2006).
- [2] Y.Suzuki, et al., Plasma Fusion Res., 4, 0361, (2009).
- [3] Y.Suzuki, et al., Proc. 24th Fusion Energy Conf., San Diego, 2012, EX/8-1, International Atomic Energy Agency (2102).
- [4] K.Y.Watanabe, Y.Suzuki, et al., Plasma Phys. Control. Fusion, 49, 605, (2007).

#### 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 2 件)

- Predebon, B. Momo, Y. Suzuki, F. Auriemma, " Reconstruction of flux coordinates from discretized magnetic field maps "、Plasma Physics and Controlled Fusion、査読有、Vol.60、No.4、2018、045003  
DOI: 10.1088/1361-6587/aaaa49
- Y. Suzuki、" HINT modeling of three-dimensional tokamaks with resonant magnetic perturbation "、Plasma Physics and Controlled Fusion、査読有、Vol.59、No.5、2017、054008  
DOI: 10.1088/1361-6587/aa5adc

##### [学会発表](計 9 件)

- Y. Suzuki、S. Sakakibara、K. Y. Watanabe、S. Ohdachi、M. Kobayashi、S. Masuzaki、H. Tanaka、G. Kawamura、J. Morimoto、R. Seki、P. Drews、Y. Liang、T. Morisaki and LHD experiment group, " Quantitative estimation of beta-sequence effects on edge magnetic topology and its impact of divertor heat flux in LHD "、21st International Stellarator-Heliotron Workshop、京都大学芝蘭会館、2017年
- Y. Suzuki、C. Hegna、Y. Nakamura、" Impacts of plasma rotation on magnetic islands in 3D equilibrium of a D-shaped tokamak "、The 44th European Physical Society Conference on Plasma Physics、Queen's University Belfast、2017年

Y. Suzuki, S. Sakakibara, K. Y. Watanabe, M. Kobayashi, S. Masuzaki, S. Dai, G. Kawamura, H. Tanaka, T. Morisaki and LHD experiment group, "Plasma equilibrium and core confinement on LHD with different magnetic configuration", 643rd Wilhelm and Else Heraeus Seminar "Impact of 3D magnetic fields on hot plasmas", Bad Honnef, 2017 年

Y. Suzuki, C. Hegna, Y. Nakamura, "Impacts of sheared toroidal rotation on magnetic island in 3D MHD equilibria", 43rd EPS Conference on Plasma Physics, KU Lueven, 2016 年

Y. Suzuki, G. Matsunaga, H. Urano, M. Honda, N. Aiba, K. Shinohara, S. Ide, K. Ichiguchi, T. Nicolas, Y. Todo, "Nonlinear MHD simulations of ELMs in a JT-60SA plasma" 22nd International Conference on Plasma Surface Interactions in Controlled Fusion Devices, Pontifical Urbaniana University, 2016 年

Y. Suzuki, C. Hegna, Y. Nakamura, "Impacts of sheared toroidal rotation on magnetic island in 3D MHD equilibria", 42nd EPS Conference on Plasma Physics (Centro Cultural de Bele'm (CCB) Conference Centre, Lisbon, 2015 年

Y. Suzuki, G. Matsunaga, H. Urano, K. Shinohara, M. Honda, S. Ide, "3D plasma response to resonant external magnetic perturbation and its impact on fast ion confinement in JT-60SA plasmas", 25th IAEA Fusion Energy Conference, Hotel Park Inn Pribaltiyskaya, 2014 年

Y. Suzuki, C. Hegna, Y. Nakamura, "Impacts of plasma rotation on 3D MHD equilibrium in tokamaks", 41st EPS Conference on Plasma Physics, Berlin Congress Center, 2014 年

Y. Suzuki, "Nonlinear MHD simulations of ELM events", 21st International Conference on Plasma Surface Interactions, 石川県音楽堂, 2014 年

京都大学・エネルギー科学研究科・教授  
研究者番号：20198245

居田 克己 (IDA, Katsumi)  
核融合科学研究所・ヘリカル研究部・教授  
研究者番号：00184599

### (3) 研究協力者

松永 剛 (MATSUNAGA, Go)  
量子科学技術研究開発機構・先進プラズマ  
研究部・上席研究員  
研究者番号：10391260

EVANS, Todd  
ジェネラルアトムクス社・研究員

SCHMITZ, Oliver  
ウィスコンシン州立大学・准教授

LIANG, Yunfeng  
ユーリッヒ中央研究機構・主席研究員

KOSLOWSKI, Hans Rudolf  
ユーリッヒ中央研究機構・研究員

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

鈴木 康浩 (SUZUKI, Yasuhiro)  
核融合科学研究所・ヘリカル研究部・准教授  
研究者番号：20397558

### (2) 連携研究者

中村 祐司 (NAKMURA, Yuji)