

## 科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成24年6月8日現在

機関番号：63902

研究種目：若手研究（B）

研究期間：2008～2011

課題番号：20760585

研究課題名（和文） 動的エルゴディックダイバータに対する有限ベータ効果の影響

研究課題名（英文） Finite Beta Effects on Dynamic Ergodic Divertor

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・助教

研究者番号：20397558

研究成果の概要（和文）：

最近のトカマク実験では、ストカスティックな磁力線が周辺局在化モード（ELM）によるダイバータ板への熱負荷を低減することが注目されている。ストカスティックな磁力線構造は動的エルゴディックダイバータと呼ばれる外部摂動磁場コイルにより生成される。高ベータステラレータ物理の観点からは、3次元効果が非常に重要である。なぜなら、有限ベータ効果による圧力駆動摂動磁場がグローバル効果によりプラズマ周辺領域で磁力線構造のさらなるストカスティック化をもたらすからである。しかし、トカマクでは真空近似と呼ばれる2次元磁場に3次元真空摂動磁場を重畳した磁場配位がモデル磁場として使われている。このことは、モデル磁場にプラズマ応答が含まれていないことを意味しており、プラズマ応答の効果をモデル磁場に含めることとそのインパクトを考察することは緊急かつ重要な課題である。

本研究では、プラズマ応答がストカスティックな磁力線構造に与える影響を考察する第1段階としてトカマクの完全3次元MHD平衡解析を行い、プラズマの平衡応答がストカスティックな磁力線構造に与える影響を考察した。その結果、有限ベータ効果が磁力線構造を変化させ、さらなるストカスティック化をもたらすことがわかった。このことは真空近似では表れない効果であり、3次元MHDモデリングの重要性を示した。

研究成果の概要（英文）：

In recent tokamak experiments, it is noted that stochastic field lines reduce strong heat load driven by the edge localize mode (ELM) to the divertor plate. Stochastic field lines are produced by the external perturbed field and it is called the Resonant Magnetic Perturbation (RMP) by Dynamic Ergodic Divertor (DED). From the viewpoint of high- $\beta$  stellarator equilibrium, 3D effects on the DED field are very important because pressure-induced perturbed field makes further stochasticity of magnetic field lines in the peripheral region. However, in present analysis of RMP fields, a vacuum helical perturbed field superimposed on a 2D MHD equilibrium, a so-called vacuum approximation, is widely used. Since the vacuum approximation does not include the plasma response, considerations including the plasma response and its impact are critical and urgent issue.

In this study, as a first step of 3D MHD modeling, the fully 3D MHD equilibrium of non-axisymmetric tokamak is solved numerically and equilibrium responses are studied. For this study, we use a 3D MHD equilibrium code HINT2, which is widely used to analyze the 3D equilibrium of helical system plasmas. Analyzing 3D MHD equilibrium, change of the magnetic topology was found. This does not appear in the vacuum approximation. This is an important point between the 3D MHD modeling and the vacuum approximation.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2008年度	1,500,000	450,000	1,950,000
2009年度	600,000	180,000	780,000
2010年度	600,000	180,000	780,000
2011年度	600,000	180,000	780,000
年度			
総計	3,300,000	990,000	4,290,000

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：プラズマ核融合、シミュレーション

1. 研究開始当初の背景

トカマク実験において Edge Localize mode(ELM)の発生により大規模な粒子束の吐き出しが起こった場合、ダイバータ部分に致命的な損傷をもたらすと予想されている。ELM による大規模な粒子吐き出しを制御する目的で、動的エルゴディックダイバータ (DED) が提案され、中型・大型トカマク装置で実験がおこなわれている。しかし、DED の理論的考察や実験データの解釈には、2次元 MHD 平衡計算コードから得られた有限ベータ平衡磁場に外部ヘリカルコイルが作る真空摂動磁場を重畳した「真空近似」のもとで、乱れた磁力線領域の輸送解析が行われている。従って、これらの研究では、有限ベータ効果がプラズマを変形させ、エルゴディシティの大きさそのものが変わることは想定されていない。もし、有限ベータ効果がエルゴディックな磁力線構造を変化させるとすれば、これまでの真空近似を用いた解析では動的エルゴディックダイバータによる ELM 緩和メカニズムを正しく評価できない可能性がある。

2. 研究の目的

研究の背景で述べたように、トカマク実験の解析で用いられる真空近似はプラズマが存在による磁場構造の変化、いわゆるプラズマ応答が含まれていない。また、収束した 2次元プラズマに 3次元の真空摂動磁場重畳したものであるため、磁場の発散が 0 でなければならないという条件が満たされていない。このことは、非線形 MHD 計算や周辺粒子輸送をシミュレーションする際に計算精度に影響をもたらす可能性がある。

一方、高ベータステラレータ研究の観点からは、3次元磁力線構造がもたらす自発的な磁力線構造の乱れがトカマクにおいても観測されるかどうか注目される。高ベータステラレータの 3次元 MHD 平衡解析では、磁

力線の 3次元構造に沿った平衡電流の流れが真空磁場に重畳されることにより、テアリングモードのような抵抗性 MHD 不安定性が存在しないにもかかわらず、磁気島や磁力線のストカスティック化をもたらす可能性が指摘されている。このことは、有界面上での局所的な磁力線のつなぎ替えが起こるとするローカル効果に対し、プラズマ応答を全体積に渡って積分した効果が重要であるという意味でグローバル効果と呼ぶ。このことは DED 磁場によりストカスティックな磁力線構造を作り出されたトカマク配位においても現れると予想され、グローバル効果がどの程度現れるかを調べることは緊急かつ重要なことである。

本研究では主にヘリカル系プラズマの解析に応用されてきた 3次元自由境界 MHD 平衡計算コードを DED 磁場を含むトカマクプラズマの解析に応用し、グローバル効果により磁力線構造が変化するかを考察する。使用する 3次元 MHD 平衡計算コードはステラレータ平衡解析の標準コードである HINT2 コードを用いる。トカマク DED 配位の 3次元自由境界 MHD 平衡を考察し、3次元効果の DED に与える影響とその熱・粒子輸送への影響を考察する。

3. 研究の方法

ヘリカル系プラズマのための 3次元 MHD 平衡計算コード HINT2 を改良し、現実的なコイル配位をもつトカマクプラズマを考察できるように改良した。その際、計算時間を短縮するために 3次元 MHD 平衡計算の初期推量として収束した 2次元 MHD 平衡を使用できるように 2次元 MHD 平衡計算コードと HINT2 の接続プログラムを製作した。

4. 研究成果

本研究で製作したコードをドイツ・TEXTOR

トカマク装置に応用し、完全3次元MHD平衡解析を行った。その結果、これまで動的エルゴディックダイバータの解析に用いられていた真空近似(2次元MHD平衡+3次元真空摂動磁場)と異なる結果が得られた。3次元MHD平衡と真空近似の磁力線構造を比較した結果、プラズマ周辺部分の磁力線結合長の分布が変わることがわかった。また、 $m/n=3/1$ のDED磁場を重畳した場合、DED磁場により生成された磁気島のセパトリックス付近で磁力線構造に差が出ることもわかった。真空近似ではセパトリックス構造がきれいに表れるのに対し、3次元MHD平衡ではセパトリックス付近の磁力線がストカスティックになることがわかった。このような磁力線構造は巨視的な圧力分布の変化を引き起こす。このことはつまり、有理面位置の変化や平衡特性の変化をもたらすことが予想できる。この作業仮説をサポートするものとして、真空近似により得られた3次元磁場配位では、安全係数分布が1を下回ることはなかったが、実際の実験では $m=1$ のテアリングモードによりディスラプションが発生していた。HINT2の解析結果は、磁気軸上の安全係数が1を下回っており、実験結果と定性的に一致する。このことは、プラズマ応答を正しく考慮した3次元MHD平衡解析がより、実験結果を反映したと考えられる。

改良した方法をDED磁場を重畳したTEXTORトカマクに応用することで3次元MHD平衡解析の有用性を示せたと考えられるので、JET(Joint European Tokamak)に応用し、ELM低減実験の解析を行った。実験結果との比較の結果、これまで真空近似で説明できなかった現象が3次元MHD平衡解析で説明できる可能性が明らかになった。高速カメラによるダイバータ領域の輻射計測によると、セパトリックス付近の磁力線構造がスプリットし、ダイバータ版に対し非一様な熱負荷を与えることがわかった。しかし、2次元平衡に3次元の真空摂動磁場を重畳した真空近似では、セパトリックスのスプリッティングは現れない。一方、HINT2による3次元MHD平衡解析を行ったところ、セパトリックス付近の磁力線構造のスプリットを再現することができた。また、磁力線の結合上の分布に注目すると、真空近似に対して明確な差が現れ、短い結合長を持つ磁力線が増えることがわかった。一方、真空近似ではセパトリックス付近の磁力線の結合長が一様に短くなるのに際し、HINT2による3次元MHD平衡解析の結果では、短い結合長の磁力線が増える一方、磁気島や有理面上の結合長は真空近似よりも長くなることがわかった。このことは、3次元効果による磁力線構造のストカスティック化が、短い結合長をもたらすと言った単純な性質ではないことを示している。

次に、国際熱核融合実験炉ITERを模擬したプラズマの完全3次元MHD平衡解析を行い、テストブランケットモジュールが設置された場合の誤差磁場成分がプラズマ中心部に磁気島構造を作る可能性があることがわかった。テストブランケットモジュールはフェライト鋼により遮蔽されているために、それ自身が誤差磁場源となり得る。アルファ粒子閉じ込めの観点からは、局所的な熱負荷の増大をもたらすものとして重要視されるが、磁気島を発生させる誤差磁場源としての考察はほとんど行われていない。そこで、テストブランケットモジュールにより生成される誤差磁場を含む3次元MHD平衡解析を行った。その結果、安全係数が比較的大きめの定常運転シナリオでは問題ないが、安全係数が1を下回る可能性のある、オーミック加熱シナリオでは、 $q=1$ 有理面上に磁気島構造を作ることがわかった。このことは、入れ子上の磁気面を仮定したVMECコードの解析では表れない効果である。

最後に、真空容器何設置された外部コイルにより駆動されるRMP磁場が重畳されたDIII-Dトカマクの3次元MHD平衡解析を行った。DIII-D実験では、周辺局在化モード(ELM)の抑制のため、Iコイルと呼ばれる真空容器内コイルが設置されている。Iコイルは合計12個、装置上部、中部、下部と設置され、全体として大きな $n=3$ 成分の摂動磁場をプラズマに重畳することができる。これまで、入れ子の磁気面を仮定した3次元MHD平衡解析により、 $n=3$ のRMP磁場成分がプラズマ応答で変化する可能性が示唆されているが、 $\delta B/B_0 \sim 10^{-4}$ 程度の誤差磁場が磁気島構造を出現させる可能性については、ほとんど考察されていない。そこで、本研究では入れ子の磁気面を仮定しない3次元MHD平衡計算コードHINT2を用いてDIII-Dトカマクの3次元MHD平衡解析を行った。その結果、RMP磁場を作る共鳴磁場摂動がプラズマ内部にストカスティックな磁力線構造を出現させることがわかった。また、真空近似と3次元MHD平衡を比較するとプラズマ応答によりセパトリックス付近の磁力線構造がよりストカスティックになることがわかった。得られた3次元MHD平衡を元に非線形MHD不安定性解析を行い、ELMが発生しないことを確認した。

なお、本研究で開発した手法、本研究で得られた結果を基に現在運転中の多くのトカマク装置での解析に応用する試みも始まっており、HL-2Aトカマクとの共同研究では、3次元MHD平衡解析の結果と、接線軟X線カメラとの画像を比較することにより、3次元MHDモデリングの妥当性の検証を行う試みを始めている。本研究で開発した手法は実験結果をよく説明できるものであるが、3次元磁力線構造を実験的に見ることは難しいため、数

値モデリングの妥当性の検証は遅れている分野の一つである。今後は数値モデリングの妥当性の検証に比重を置いた、研究計画を立てる必要がある。

#### 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 3 件)

- ① Y.Suzuki, S.Sakakibara, K.Y.Watanabe, Y.Narushima, S.Yamamoto, H.Okada and LHD experiment group, ” Study of Magnetic Island Using a 3D MHD Equilibrium Calculation Code ”、Plasma and Fusion Research, 6, 2011、2402134-1~2402134-6、査読有り
- ② Y.Suzuki、J.Geiger、C.Wiegmann、Y.Liang、N.Ohyabu、” Three-Dimensional Effects on Stochasticity in Non-Axisymmetric Tori ”、Contoribution to Plasma Physics、50、2010、576-581、査読有り
- ③ ④ Y.Suzuki、K.Y.Watanabe、H.Funaba、S.Sakakibara、N.Nakajima、N.Ohyabu and LHD experiment group, ” Effects of the Stochasticity on Transport Properties in High-Beta LHD ”、Plasma and Fusion Research、4、2009、036-1~036-6、査読有り

[学会発表] (計 4 件)

- ① ② 鈴木康浩、” 3D MHD Equilibrium Analysis in ITER Plasmas、13<sup>th</sup> International Workshop on H-mode Physics and Transport Barriers ”、2011年10月10日、イギリス・オックスフォード
- ② 鈴木康浩、” 3D MHD Equilibrium with Stochastic Field in Tokamaks、38th EPS Conference on Plasma Physics ”、2011年7月1日、フランス・ストラスブール
- ③ 鈴木康浩、” Three-dimensional effects on MHD equilibrium in tokamaks、37th EPS Conference on Plasma Physics ”、2010年6月24日、アイルランド・ダブリン
- ④ 鈴木康浩、” 3D effects to stochasticity in non-axisymmetric tori ”、17th International Stellarator/Heliotron Workshop、2009年9月16日、アメリカ・プリンストンプラズマ、招待講演
- ⑤ 鈴木康浩、” Equilibrium response on the stochasticity in non-axisymmetric torus ”、4th International Workshop of Stochasticity in Fusion Plasma、2009年3月3日、ドイツ・ユーリッヒ

#### 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・助教  
研究者番号：20397558

##### (2) 研究分担者

( )

研究者番号：

##### (3) 連携研究者

( )

研究者番号：