

**科学研究費助成事業 研究成果報告書**

平成 27 年 5 月 15 日現在

機関番号：82110

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2012～2014

課題番号：24760712

研究課題名(和文) 拡張MHDモデルに基づくエッジローカライズモード安定化・抑制に向けた理論数値研究

研究課題名(英文) Theoretical and numerical researches for ELM suppression/mitigation with extended MHD model

研究代表者

相羽 信行 (Aiba, Nobuyuki)

独立行政法人日本原子力研究開発機構・核融合研究開発部門 六カ所核融合研究所・研究副主幹

研究者番号：20414584

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,900,000円

研究成果の概要(和文)：拡張MHDモデルの開発・定式化，および高精度数値計算技法開発を完了し，エッジローカライズモード(ELM)の抑制・小振幅化につながる理論・数値解析研究を進めた．具体的には，拡張モデルに基づいて導出した分散関係式や開発した数値コードを用いた解析により，拡張MHD効果を考慮すると短波長MHDモードが小振幅ELMの原因となり得ることや，同モードの安定性がプラズマ回転の向きに依存するという実験結果と定性的に一致する結果を得た．さらに，この数値コードを応用し回転プラズマ中における抵抗性壁モードの解析を行うことで，同モードと安定な理想MHDモードとの共鳴によりプラズマが不安定化するという新たな知見を得た．

研究成果の概要(英文)：By developing extended MHD model and new numerical technique for MHD stability analysis with high accuracy, we analyzed the physics related to suppress and/or mitigate edge localized mode (ELM) analytically and numerically. It is found that mitigated ELM can be regarded as the short wavelength MHD mode which can become unstable by taking into account non-ideal MHD effect, and the stability of this short wave length MHD mode depends on the direction of plasma rotation. These results are qualitatively consistent with the observation in experiment. In addition, by using the newly developed numerical code based on extended MHD model, we clarified that resistive wall mode can be excited due to coupling with stable ideal MHD mode.

研究分野：核融合プラズマ物理

キーワード：核融合 MHD安定性 エッジローカライズモード

## 1. 研究開始当初の背景

ITER での標準運転モードとされるトカマクプラズマの高閉じ込め運転 (H モード) では、エッジローカライズモード (ELM) と呼ばれる表面付近の高閉じ込め領域 (ペダスタル) が間欠的に崩壊する現象がしばしば観測される。ITER 等の大型反応炉では振幅の大きい ELM による熱・粒子放出量が多く、ダイバータ板等への熱負荷の増大が懸念されており、この ELM による熱・粒子放出量を減少 (ELM を抑制・小振幅化) させる方法を確立することは、現在の炉心プラズマ研究開発における最大の課題である。

ELM のうち振幅の大きい type-I ELM は、これまでの実験研究および理論・数値解析研究により、プラズマ周辺領域に局在した比較的波長の長い理想電磁流体 (MHD) モードであることがほぼ特定され、同モードが発生する運転領域の予測は定量的な数値解析により実現している。しかし、前述の課題である type-I ELM による熱・粒子放出量を減少させる方法に関しては、実験的には外部誤差磁場印加や外部からの粒子補給制御、プラズマ回転制御などによる ELM 抑制・小振幅化が提案されているが、それらの影響に関する物理機構の解明を含めて理論的には多くが未解明である。そのため、ITER や将来の核融合発電炉において、それらの制御手法の有効性の検討や、大型炉の特性を生かした制御手法の開発が不十分な状態にある。

近年、日本原子力研究開発機構 (以下、JAEA) の JT-60U 装置において、小振幅 ELM の 1 つである grassy ELM に関する実験結果の数値解析で、同 ELM の運転領域が type-I ELM の領域とは大きく異なり、短波長 MHD モードである理想バルーニングモードの安定限界近傍であることが示された。しかし、従来の理論解析では、イオン反磁性ドリフト効果と呼ばれる運動論に基づいた安定化効果により、短波長極限のバルーニングモードは発生しないとされていた。一方、近年では、この安定化効果は他の運動論効果を考慮することで消失することが示されるなど、前述の矛盾の原因解明を含めて、理論研究のさらなる進展が急務である。

## 2. 研究の目的

本研究では、小振幅エッジローカライズモード (ELM) の発生条件に関する物理機構の解明することを目的として、波長の短い周辺局在電磁流体 (MHD) 安定性解析を行うための物理モデル及び数値コード開発を進め、これを用いた数値解析を行う。特に、研究代表者がこれまでに理論・数値的に明らかにしてきた、ELM の原因となる周辺局在理想 MHD 安定性に対するプラズマ回転の影響に加え、波長の短い不安定性に対して影響を与える運動論効果に着目し、その影響を評価する。また、新たな数値モデル・コードの開発に際しては、本研究の目的に適した数値計算

上の特性と精度を持ち合わせた数値解析技法の開発・実装を進める。

## 3. 研究の方法

研究代表者がこれまでに開発してきた数値安定性解析コードおよび解析的に導出されている分散関係式を用いて、簡易的に運動論効果を考慮した周辺電磁流体 (MHD) 安定性解析を行い、プラズマ回転や運動論効果が小振幅エッジローカライズモード (ELM) に与える影響について定性的・定量的に評価する。これにより、小振幅 ELM の発生条件に影響を与える物理量の同定を進め、その妥当性を実験結果との比較などにより確認する。その後、特に運動論効果について自己無撞着な取り扱いによる安定性解析を実現する数値解析モデル・コードの開発、およびこのような数値解析を可能にする高精度な数値解析技法の開発に着手する。これにより、先に進めた簡易モデルに基づいた解析の妥当性を確認するとともに、簡易モデルでは考慮できなかった物理量の重要性について評価・検討する。

## 4. 研究成果

2012 年度は、研究計画で実施する予定であった小振幅エッジローカライズモード (ELM) の原因の一つと考えられる短波長周辺局在 MHD モードの安定性解析を、研究代表者が開発した数値コード MINERVA、および運動論効果を考慮した分散関係式を用いた簡易モデルに基づいて行った。この結果、これまでイオン反磁性ドリフト効果と呼ばれる運動論効果は MHD モードの波長が短いほど強く安定化に寄与するため、小振幅 ELM の原因となる MHD モードの波長は注意深く評価する必要があるとされていたが、今回新たに電子ドリフト音波の効果を加えた解析を行うことで、特定の波長で前述の安定化効果が無効化されることを明らかにし、これにより小振幅 ELM として発生する MHD モードの波長の同定を可能にした (次頁の図参照)。これは、小振幅 ELM が得られる運転領域を数値計算により予測することを実現する重要な成果であり、Nuclear Fusion 誌に掲載された。

また、研究者がこれまで進めてきた“ELM を含む MHD モードの安定性に対するプラズマ回転の影響”について、特にプラズマのポロイダル回転を考慮することで実験的に観測されている小振幅 ELM の特徴である“プラズマのトロイダル回転の向きを変えることで小振幅 ELM が得られること”を説明できることを、ヴァレナ (イタリア) で行われた核融合プラズマの理論研究に関する国際ワークショップにおいて “Impacts of plasma rotation on linear MHD physics in tokamaks” という題名で招待講演として報告した。この講演では、ELM に関する研究報告と共に、抵抗性壁モード (RWM) に関する研究成果も報告し、これまでプラズマ回転は

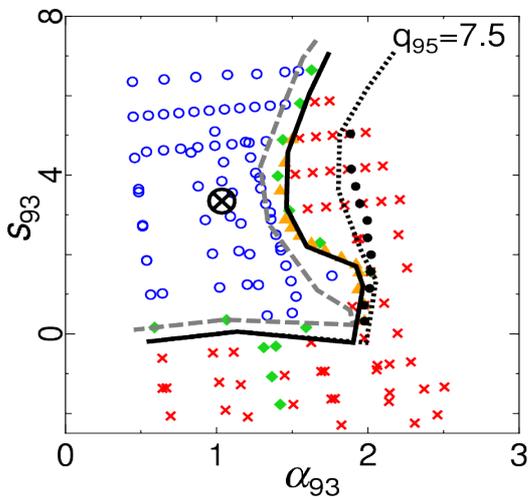


図:小振幅 ELM が発生するプラズマにおける周辺領域 MHD 安定性を数値解析した結果。縦軸は周辺領域の圧力勾配、横軸は同領域の磁場の捻じれ具合をそれぞれ表す。図中の線は、MHD 安定限界を示しており、青い印側が安定、赤い印側が不安定である。3本の線はそれぞれ理想 MHD モデル（灰色破線）、イオン反磁性効果のみを考慮したモデル（黒点線）、イオン・電子反磁性効果を考慮したモデル（黒実線）で解析した結果を示す。イオン反磁性効果のみを加えると、実験的に観測されたプラズマ（図中の黒い印）から大きくずれるが、イオン・電子反磁性効果を共に考慮することでそのずれが大幅に減少している。

RWM を安定化するとされていたが、負磁気シニアプラズマでは安定な MHD モードとプラズマ回転の共鳴と思われる効果により RWM が不安定化しうることを示した。

2013 年度は、研究計画で実施する予定であった、拡張した MHD 物理モデルに基づいた小振幅エッジローライズモード (ELM) の安定性解析を実現するための、新たな物理・数値解析モデルおよび数値コードの開発を進めた。特に、新たなモデルにおいてその影響を着目している“プラズマ圧縮性”は数値不安定性をしばしば発生することが知られていることから、この発生を完全に押さえるために“Gauss-Legendre 積分を用いた混成有限要素法”を新たに開発した。この手法を代表者が開発を進める数値解析コード MINERVA に実装し、またその数値特性・優位性などについて欧州物理学会 (プラズマ物理) において発表を行った。

また、小振幅 ELM の発生要因を明らかにする物理解析として、欧州 JET 装置において重

要性が指摘されている“高プラズマポロイダルベータ”、“高内部インダクタンス”、“高周辺密度”が、小振幅 ELM の原因の一つと考えられる理想バルーニングモードの安定性を与える影響について数値解析を行った。その結果、前者 2 つはバルーニングモードを安定化する一方で、後者は大振幅 ELM の原因であるピーリング・バルーニングモードを安定化することを明らかにした。特に“高周辺密度”による大振幅 ELM の安定化は非常に重要であり、この安定化を保ちつつ、“高ポロイダルベータ”・“高内部インダクタンス”によってバルーニングモードの安定性もできる限り安定化することで、ペDESTAL 圧力の高い小振幅 ELM プラズマが実現していることを示した。この成果は、小振幅 ELM プラズマを実現するにはプラズマコア領域の分布制御も重要であることを示した重要なものであり、Nuclear Fusion 誌に掲載された

2014 年度は、MHD モデルの拡張として“イオンランダウ減衰効果”および“イオン反磁性ドリフト効果”を自己無撞着に取り入れるための定式化、および数値コードへの実装を行った。これにより、イオン反磁性ドリフト効果を考慮してエッジローライズモード (ELM) の安定性に対するプラズマ回転の影響を評価し、同効果の影響により ELM 安定性がプラズマの回転方向に依存することを明らかにした。実験的にも、プラズマ回転の向きによって ELM の性質が変化し、適切な方向を選ぶことで ELM 小振幅化が達成できていることから、このような実験観測結果を定性的に説明できる結果が得られたと考えられる。この成果については現在論文を執筆中である。

また、この拡張 MHD モデルに基づく数値解析として、イオンランダウ減衰効果を考慮して抵抗性壁モードの安定性に対するプラズマ回転の影響を評価し、同モードと安定な理想 MHD モードとの共鳴によってプラズマが不安定化しうることを明らかにした。この成果は Phys. Rev. Lett 誌に掲載された。

#### 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 6 件)

- (1) N. Aiba and M. Hirota, “Excitation of Flow-stabilized Resistive Wall Mode by Coupling with Stable Eigenmodes in Tokamaks”, Physical Review Letters, 査読有, Vol. 114, 2015, 65001  
DOI: 10.1103/PhysRevLett.114.065001
- (2) N. Aiba, M. Hirota, A. Matsuyama, J. Shiraishi, A. Bierwage, “MHD Instability Excited by Interplay between Resistive Wall Mode and Stable MHD Modes in Rotating Tokamak

Plasmas”、Proceedings of 25<sup>th</sup> IAEA Fusion Energy Conference、査読有、掲載決定、  
<http://www-naweb.iaea.org/napc/physics/index.html>

- (3) N. Aiba and H. Urano, “Impact of plasma core profiles on MHD stability at tokamak edge pedestal”、Nuclear Fusion、査読有、Vol. 54、2014、114007 (9pp)  
DOI: 10.1088/0029-5515/54/11/114007
- (4) N. Aiba, J. Shiraishi, M. Hirota, “Impact of plasma rotation on the linear physics of resistive wall modes in tokamaks”、Plasma Physics and Controlled Fusion、査読有、Vol. 55、2013、074002 (7pp)  
DOI: 10.1088/0741-3335/55/7/074002
- (5) N. Aiba and N. Oyama, “Numerical analysis of key factors for the appearance of grassy ELMs in tokamak plasmas”、Nuclear Fusion、査読有、Vol. 52、2012、114002 (8pp)  
DOI: 10.1088/0029-5515/52/11/114002

他

〔学会発表〕(計 10 件)

- (1) N. Aiba, M. Hirota, J. Shiraishi, “Excitation of Flow-stabilized Resistive Wall Mode in Rotating Tokamak Plasmas”、7<sup>th</sup> IAEA Technical Meeting on Theory of Plasma Instabilities、フラスカティ(イタリア)、2015/3/4-6、招待講演
- (2) N. Aiba, M. Hirota, A. Matsuyama, J. Shiraishi, A. Bierwage, “MHD instability excited by Interplay between resistive wall mode and stable MHD modes in rotating tokamak plasmas”、25<sup>th</sup> IAEA Fusion Energy Conference、サンクトペテルブルク(ロシア)、2014/10/13-18
- (3) 相羽信行、“トカマク回転プラズマ中における線形 MHD 安定性”、プラズマシミュレーションポジウム 2013、土岐(日本)、2013/10/2-4、招待講演
- (4) N. Aiba, J. Shiraishi, M. Hirota, M. Yagi, W. A. Cooper, R. Gruber, “Impact of plasma rotation on MHD physics in tokamaks - Theory and numerical applications - ”、ヴァレナ(イタリア)、2012/8/27-31、招待講演

他

〔図書〕(計 0 件)

〔産業財産権〕  
出願状況(計 0 件)

名称：  
発明者：  
権利者：  
種類：  
番号：  
出願年月日：  
国内外の別：

取得状況(計 0 件)

名称：  
発明者：  
権利者：  
種類：  
番号：  
出願年月日：  
取得年月日：  
国内外の別：

〔その他〕  
ホームページ等

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

相羽 信行 (AIBA, Nobuyuki)  
独立行政法人日本原子力研究開発機構・核融合研究開発部門・六ヶ所核融合研究所・研究副主幹  
研究者番号：20414584

### (2) 研究分担者

( )

研究者番号：

### (3) 連携研究者

( )

研究者番号：