

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 6 月 11 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：24760708

研究課題名(和文) 高ベータ・プラズマにおける抵抗性壁モードに対する運動論効果の解明

研究課題名(英文) Impact of kinetic effects on resistive wall modes in high-beta plasmas

研究代表者

白石 淳也 (Shiraishi, Junya)

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 那珂核融合研究所・研究員

研究者番号：60513223

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,000,000円

研究成果の概要(和文)：高性能トカマクでは、抵抗性壁モード(RWM)と呼ばれる不安定性により到達ベータが制限されるため、その安定化研究は喫緊の課題である。本研究では、プラズマ回転によるRWM安定化機構に関して、以下のことを明らかにした。(1) 回転に伴う遠心力によって平衡分布が変化することにより、RWMが安定化される。(2) 回転プラズマでは運動論的電磁流体力学(MHD)モデルは一般化される。拡張した運動論的MHDモデルでは、回転シアによりRWMが安定化され、これは実験結果と定性的に一致している。

研究成果の概要(英文)：Stabilization of Resistive Wall Modes (RWMs) is a critical issue for advanced tokamaks since they limit the achievable beta value. In this study, we focus on the RWM stabilization by plasma rotation, and obtained the following findings: (1) centrifugal modification to MagnetoHydroDynamic (MHD) equilibrium brings about the RWM stabilization. (2) In rotating plasmas, the kinetic-MHD model should be generalized. The generalized kinetic-MHD model indicates that the rotation shear stabilizes the RWMs, which is qualitatively consistent with experimental results.

研究分野：プラズマ物理

キーワード：抵抗性壁モード

1. 研究開始当初の背景

核融合出力はプラズマ圧力の二乗に比例する。したがって、経済的な核融合発電炉を実現するためには、プラズマの高ベータ化が必要である。ベータとは、プラズマの圧力を磁場の圧力で規格化したもので、プラズマ性能を示す指標の一つである。高ベータ・プラズマでは、プラズマが高い圧力を有するため、外部キックモードと呼ばれる、巨視的な電磁流体 (MHD : MagnetoHydroDynamics) 的不安定性が出現して、プラズマ崩壊へ導く。外部キックモードは、導体壁をプラズマに近づけることで安定化できる。導体壁が理想的な場合 (電気抵抗ゼロ) の場合、プラズマ表面と導体壁の間にある真空領域の安定化効果によって、外部キックモードを完全に安定化できる。ところが、現実には導体壁は有限な抵抗をもつため、外部キックモードは完全に安定化されず、壁の電気抵抗率で定まる時定数程度のゆっくりとした時間スケールで成長する抵抗性壁モード (RWM : Resistive Wall Mode) と呼ばれる不安定性が現れる。RWM により、プラズマの到達ベータが制限されるため、その安定化手法の確立が喫緊の課題となっている。

過去の実験的・理論的研究により、プラズマ回転が RWM の安定化に有効であることが示され、完全に RWM を安定化するために要する回転速度はアルフベン速度 (MHD 波の速度) の数%程度であると考えられてきた。理論的には、理想 MHD モデルに基づいた解析により、実験結果をある程度説明することに成功した。しかし、近年の実験の発展に伴い、それまでの理論値より一桁小さい回転速度でも RWM が安定化されることが示された。新たな実験結果を説明するために RWM 理論の見直しが近年活発に行われ、これまで考慮されてこなかった、運動論効果 (特にバルクプラズマの補足イオン粒子の歳差ドリフト運動との共鳴) が重要であることが示唆された。運動論効果を取り入れた数値解析により、遅い回転でも RWM が安定化されることが示された。しかし、バルクプラズマの補足イオン粒子の運動論効果を含んだ理論モデルを用いても、回転シアによる RWM 安定化など、実験結果を説明するには至っていない。

2. 研究の目的

(1) 先ず、理想 MHD モデルによる解析から出発し、回転の効果を自己無撞着に取り入れる。これまでの研究では、回転が平衡分布に与える影響は小さく、線形モードのダイナミクスにのみ影響を与えると仮定していた。しかし、回転に伴う遠心力によって密度分布が影響を受ければ、それに伴い MHD 安定性に重要な役割を果たす電流密度分布も影響を受けるはずである。本研究では、回転による平衡分布の変化が RWM 安定性に及ぼす影響

を明らかにすることを目的とする。

(2) 次に、より実験に近い条件で解析を行うために、運動論的 MHD モデルを拡張する。既存の数値解析コードは、従来の運動論的 MHD モデルに基づいているが、これはもともと高エネルギー粒子が MHD モードに与える影響のために定式化されており、プラズマは回転していないと仮定している。従来の運動論的 MHD モデルでは、プラズマ回転の効果は、単純なドップラーシフトとして考慮されている。本研究では、プラズマ回転が粒子の運動論効果に与える影響を定式化し、s p の効果を明らかにすることを目的とする。

3. 研究の方法

(1) 回転による平衡分布の変化が安定性へ及ぼす影響を解析するためには、実形状トカマク配位において、回転の効果を含んだ平衡コード及び安定性コードが必要である。本研究では、抵抗性壁・真空解析コード RWMaC を、回転プラズマの理想 MHD コード MINERVA に組み込み、トカマクプラズマにおいて、理想 MHD モデルの枠組みで回転を含んだ RWM 解析が可能とした。本コードは、同種の既存コードとは異なり、回転による平衡分布の変化がもたらす効果を取り入れることができる。この MINERVA/RWMaC を用いた数値解析により、目的(1)に取り組む。

(2) 運動論的 MHD モデルの拡張に関しては、定式化を遡る必要がある。運動論的 MHD モデルでは、最終的に MHD モードと粒子運動との間のエネルギーのやりとりを表わす項 (しばしば δW_K とかかれる) を計算し、分散関係に代入することで安定性を決定する。 δW_K の定式化は、数十年前になされているが、回転の効果は考慮されてこなかった。定式化を再度考察することで、 δW_K へ回転の効果を導入し、目的(2)に取り組む。

(1) 研究成果

(1) MINERVA/RWMaC は、実形状トカマク配位において、プラズマ、真空、導体壁の複合系におけるモードのエネルギーバランスを解いて、RWM の安定性解析を行う。MINERVA/RWMaC は、回転により、電流分布が変化する効果を初めて取り入れたコードである。既存の実験装置で実現可能な回転パラメータ、JT-60SA (現在建設中の高性能トカマクプラズマ閉じ込め実験装置) の平衡、導体パラメータで数値計算を行った結果、図 1 に示すように、RWM 成長率の圧力依存性に、平衡の物理量の空間分布変化の大きな効果を見出した。平衡状態の変化により、RWM 成長率が小さくなり、安定な運転領域が広がるのが初めて明らかになった。これは、高ベータ領域におけるアクセスを考えると、望ま

しい結果である。また、回転がRWMの構造に影響を与えることによる効果と、回転が平衡分布を変化させる効果を切り分けて解析することに成功した。その結果、回転によって平衡分布が変化することが、RWM安定化に本質的であることを明らかになった。

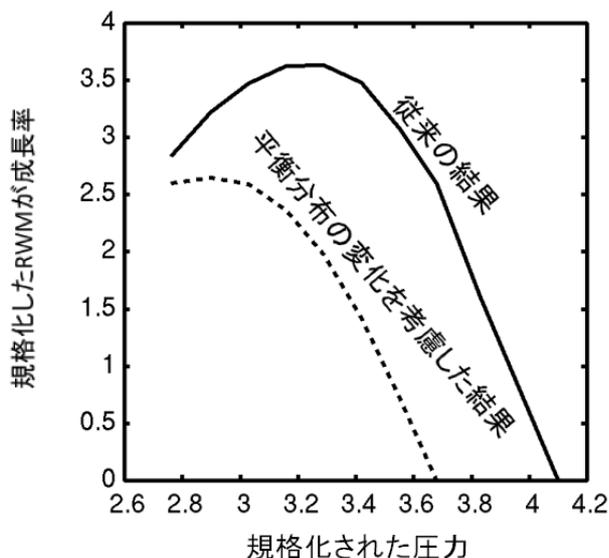


図1 RWM成長率の圧力依存性。回転に伴う平衡の空間分布変化による効果を考慮した計算では、従来の結果と比較して、安定な運転領域が大きくなる。

(2) δW_K の実体は圧力テンソルの揺動に関する二次形式であり、分布関数の揺動によって特徴付けられる。分布関数の揺動は、粒子運動のラグランジアンと、速度空間における平衡分布関数の積に比例する。従って、 δW_K は、本質的には、粒子運動のラグランジアンと平衡の分布関数によって決定される。本研究では、 δW_K の数理的構造に着目して、回転の効果を自己無撞着に導入した。従来の理論モデルでは、回転がない場合のラグランジアンと平衡分布関数を用いている。しかし、回転プラズマでは、粒子運動はコリオリ力と遠心力の影響を受けて、ラグランジアンが修正される。また、遠心力によって、速度空間の平衡分布関数も、影響を受ける。その結果、 δW_K は、以下の様に拡張されること明らかにした。

$$\delta W_K = \delta W_{K0} + \delta W_{K1} + \delta W_{K2} + \delta W_{K3}$$

ここで、 δW_{K0} は従来のモデルと同一であり、 δW_{K1} はコリオリ力に、 δW_{K2} は遠心力に関連するエネルギー項である。 δW_{K3} は、平衡分布関数が回転に依存する事に起因する項で、回転シアに陽に依存する。回転が無い場合には、 $\delta W_{K1} = \delta W_{K2} = \delta W_{K3} = 0$ となり、 $\delta W_K = \delta W_{K0}$ と従来の結果を得る。

新しく構築した運動論的MHDモデルに基づいて、大アスペクト比トカマクを対象に、RWM安定性を調べた。図2は、回転シアを変化させ、プラズマと導体壁との距離を変えて、RWM成長率を様々なモデルに対して調べた結果を表わしている。図2の矢印は回転シアの増加に対応しており、新しい運動論的MHDモデルでは、回転シアが増加することによりRWMが更に安定化されることが明らかになった。この傾向は、実験結果と定性的に一致している。

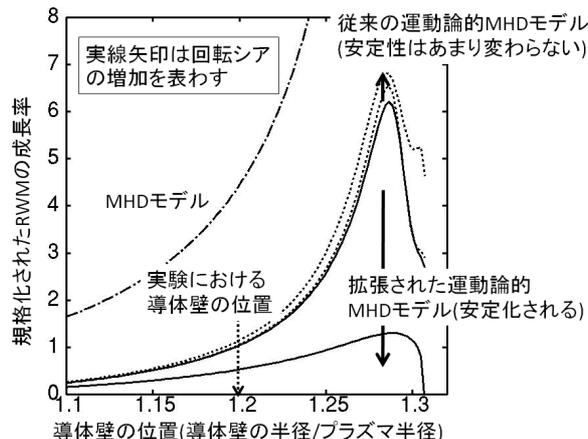


図2 様々なモデルによるRWM成長率の壁位置依存性。矢印は回転シアの増加を表わす。拡張されたモデルでは回転シアによりRWMが安定化される。

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4件)

- T. Wakatsuki, T. Suzuki, N. Hayashi, J. Shiraishi, S. Ide, and Y. Takase, Simulation of plasma current ramp-up in JT-60SA, Plasma Physics and Controlled Fusion, 査読有, 57巻, 2015, 065005 (12pp), DOI : 10.1088/0741-3335/57/6/065005
- J. Shiraishi, N. Aiba, N. Miyato, and M. Yagi, Effects of centrifugal modification of magnetohydrodynamic equilibrium on resistive wall mode stability, Nuclear Fusion, 査読有, 54巻, 2014, 083008 (8pp), DOI : 10.1088/0029-5515/54/8/083008

J. Shiraishi, N. Miyato, and G. Matsunaga, On kinetic resistive wall mode theory with sheared rotation, Plasma and Fusion Research, 査読有, 9 巻, 2014, 3403027 (4pp), DOI : 10.1585/pfr.9.3403027
N. Aiba, J. Shiraishi, and M. Hirota, Impact of plasma rotation on the linear physics of resistive wall modes in tokamaks, Plasma Physics and Controlled Fusion, 査読有, 55 巻, 2013, 074002 (7pp), DOI : 10.1088/0741-3335/55/7/074002

[学会発表](計 14 件)

白石淳也, 流れをもつプラズマに対する接続理論の構築, 日本物理学会第 70 回年次大会 (2015 年), 2015 年 3 月 22 日, 早稲田大学 (東京都・新宿区)

白石淳也, 宮戸直亮, 松永剛, 流れをもつプラズマに対する運動論的 MHD 理論について, 平成 26 年度核融合科学研究所共同研究研究会「MHD と流体力学における共鳴・分岐・構造形成の理論・シミュレーション研究」, 2014 年 12 月 26 日, 核融合科学研究所 (岐阜県・土岐市)

J. Shiraishi, N. Miyao, and G. Matsunaga, Analysis of JT-60U experiment by extended kinetic-MHD model, Plasma Conference 2014, 2014 年 12 月 18 日, 朱鷺メッセ (新潟県・新潟市)

J. Shiraishi, N. Miyato, and G. Matsunaga, Extension of kinetic-MHD model to include toroidal rotation shear effect and its application to stability analysis of resistive wall modes (招待講演), 19th Workshop on MHD Stability Control - A US-Japan Workshop, 2014 年 11 月 3 日, Auburn (United States of America)

J. Shiraishi, N. Miyato, G. Matsunaga, M. Honda, N. Hayashi, and S. Ide, Extension of kinetic-magnetohydrodynamic model to include toroidal rotation shear effect and its application to stability analysis of resistive wall modes, 25th IAEA Fusion Energy Conference, 2014 年 10 月 16 日, St. Petersburg (Russian Federation)

白石淳也, 宮戸直亮, 松永剛, 運動論的 MHD モデルへの回転シア効果の導入, 第 10 回核融合エネルギー連合講演会, 2014 年 6 月 20 日, つくば国際会議場 (茨城県・つくば市)

J. Shiraishi, N. Miyato, and G. Matsunaga, Extension of kinetic-MHD model to include toroidal rotation

shear effect and its application to stability analysis of RWMs, '14 Joint Meeting of US-Japan MHD workshop and ITPA MHD Stability Topical Group, 2014 年 3 月 10 日, 核融合科学研究所 (岐阜県・土岐市)

白石淳也, 本多充, 林伸彦, 井手俊介, プラズマ回転を含む MHD 安定性解析に基づいた高性能トカマク統合モデリング, 2013 年 12 月 4 日, 東京工業大学 (東京都・目黒区)

J. Shiraishi, N. Miyato, and G. Matsunaga, On kinetic resistive wall mode theory with sheared rotation, 23rd International Toki Conference, 2013 年 11 月 20 日, セラトピア土岐 (岐阜県・土岐市)

J. Shiraishi, N. Aiba, N. Miyato, and M. Yagi, Impact of Centrifugal Modification of Magnetohydrodynamic Equilibrium on Resistive Wall Mode Stability, 第 19 回 NEXT 研究会, 2013 年 8 月 30 日, 京都大学 (京都府・京都市)

白石淳也, 相羽信行, 宮戸直亮, 矢木雅敏, トロイダル回転による磁気流体力学平衡の変化がもたらす抵抗性壁モード安定化, 日本物理学会第 68 回年次大会, 2013 年 3 月 26 日, 広島大学 (広島県・東広島市)

白石淳也, 相羽信行, 宮戸直亮, 矢木雅敏, Stabilization of RWMs by MHD Equilibrium Change Induced by Plasma Toroidal Rotation, 平成 24 年度核融合科学研究所研究会「マルチスケール MHD 現象の理論・シミュレーション研究」, 2012 年 12 月 14 日, 核融合科学研究所 (岐阜県・土岐市)

J. Shiraishi, N. Aiba, N. Miyato, and M. Yagi, Stabilization of Resistive Wall Modes by Magnetohydrodynamic Equilibrium Change Induced by Plasma Toroidal Rotation, 24th IAEA Fusion Energy Conference, 2012 年 10 月 10 日, San Diego (United States of America)

J. Shiraishi, N. Aiba, and M. Yagi, Development of resistive wall mode analysis code for rotating plasmas : analysis of high-beta plasma in JT-60SA, 第 18 回 NEXT 研究会, 2012 年 8 月 2 日, 日本原子力機構青森研究開発センター (青森県・六ヶ所村)

6. 研究組織

(1) 研究代表者

白石 淳也 (SHIRAISHI, Junya)
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・那珂核融合研究所・研究員

研究者番号 : 6 0 5 1 3 2 2 3