

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和元年5月28日現在

機関番号：32675

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2016～2018

課題番号：16K18337

研究課題名(和文) 共鳴磁場摂動によって駆動される強制磁気再結合の非線形挙動の解明

研究課題名(英文) Understanding of nonlinear behavior of forced magnetic reconnection driven by resonant magnetic perturbation

研究代表者

西村 征也 (NISHIMURA, Seiya)

法政大学・理工学部・准教授

研究者番号：70548544

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,300,000円

研究成果の概要(和文)：磁場閉じ込め核融合プラズマにおいては、共鳴磁場摂動がどのようにプラズマの安定性や輸送に影響を与えるかが重要な研究課題となっている。本研究においては、共鳴磁場摂動と圧力駆動型不安定性が共存する場合の磁気島の非線形挙動について調べた。インターチェンジモードの存在下においては、共鳴磁場摂動によって駆動される磁気島の最大飽和幅が促進されることが分かった。摂動ブートストラップ電流の存在下においては、共鳴磁場摂動のしみ込みと同時に新古典テアリングモードが誘発される機構が存在することが分かった。共鳴磁場摂動によって形成される種磁気島は、効率の良い新古典テアリングモードのトリガ機構であることが結論された。

研究成果の学術的意義や社会的意義

磁場閉じ込め方式による水素同位体の熱核融合の研究は、トカマクやヘリカル系の装置で進められている。これらの装置においては、磁気再結合によって共鳴面に磁気島が形成されると、プラズマの閉じ込め性能や輸送特性に大きな変化が生じる。近年、共鳴面とヘリシティの一致する磁場摂動(以下、共鳴磁場摂動)を外部から印可して強制的に磁気再結合(以下、強制磁気再結合)を起こす手法が研究されている。その主な動機は、磁気島を発生させることにより磁場構造やプラズマ乱流を能動的に制御できる点にある。本研究によって得られた知見は、共鳴磁場摂動による磁気島の形成機構の一端を解明するものであり、核融合研究に貢献するものである。

研究成果の概要(英文)：In magnetically confined fusion plasmas, how resonant magnetic field perturbations affect plasma stability and transport is an important research issue. In this study, we investigate the nonlinear behavior of magnetic islands in the presence of resonant magnetic field perturbations and pressure-driven instabilities. It is found that in the presence of the interchange mode, the maximum saturation width of the magnetic island driven by the resonant magnetic field perturbation is enhanced. It is also found that in the presence of a perturbation bootstrap current, a mechanism exists in which the neoclassical tearing mode is induced simultaneously with the penetration of the resonant magnetic field perturbation. It is concluded that the seed magnetic island formed by the resonant magnetic field perturbation is an efficient triggering mechanism of the neoclassical tearing mode.

研究分野：核融合プラズマ

キーワード：共鳴磁場摂動 強制磁気再結合 簡約化MHDモデル インターチェンジモード 摂動ブートストラップ電流 新古典テアリングモード

様式 C-19, F-19-1, Z-19, CK-19 (共通)

### 1. 研究開始当初の背景

トラス型の磁場閉じ込め方式による水素同位体の熱核融合の研究は、トカマクやヘリカル系の装置で進められている。これらの装置においては、磁気再結合によって共鳴面に磁気島が形成されると、プラズマの閉じ込め性能や輸送特性に大きな変化が生じる。近年、共鳴面とヘリシティの一致する磁場摂動(以下、共鳴磁場摂動)を外部から印可して強制的に磁気再結合(以下、強制磁気再結合)を起こす手法が研究されている。その主な動機は、磁気島を発生させることにより磁場構造やプラズマ乱流を能動的に制御できる点にある。磁場閉じ込め装置における強制磁気再結合はプラズマフローの影響を強く受けることが知られている。共鳴磁場摂動に起因する磁気島がどのような条件下で発生・消滅するかについて、実験・理論の双方から研究が行われている。

### 2. 研究の目的

本研究においては、共鳴磁場摂動と圧力駆動型不安定性が共存する場合に、磁気島がどのように非線形発展するか、磁気島が圧力駆動型不安定性にどのような影響を与えるか、について簡約化 MHD シミュレーションを用いて調べることを目的とするものである。

### 3. 研究の方法

流体シミュレーションのために、研究代表者らがこれまで用いてきた簡約化 MHD 方程式系を用いる。本研究では2次元平板系で記述されたものを用いる。これによりコーディングコストを下げ、解析解との比較などの素過程の解析を容易にする。

### 4. 研究成果

(1) 強制磁気再結合をシミュレーションするためのコードの開発を行った。2次元非圧縮性流体を記述する渦度方程式を差分法で解くコードをベースにして、これをプラズマのシミュレーションが可能なものへと拡張した。渦度から流れ関数を計算するポアソンソルバが最も数値負荷の大きなルーチンであったため、ポアソンソルバを高速に処理するアルゴリズムを導入した。

(2) シミュレーションコードに一般化されたオームの法則を実装した。強制磁気再結合を発生させるためにプラズマ-真空境界に共鳴磁場摂動を導入し、さらにプラズマフローの存在する状況を考えてシミュレーションを行った。シミュレーションの結果、強制磁気再結合によって磁気島が形成される様子が観察された。図1に磁気島の形成される典型的な場合のヘリカル磁束関数の等高線図を示す。また、プラズマフローの遮蔽効果によって磁気島の飽和幅が抑制されることが確認された。磁気島の抑制される状態は、電気抵抗とプラズマ粘性によって決まる線形層の幅に強く依存することが確認された。線形層の幅が磁気島の飽和幅と同程度の場合、プラズマフローへの依存性は準線形的であるが、線形層の幅が磁気島の飽和幅より十分に薄い場合には非線形分岐が生じることが分かった。

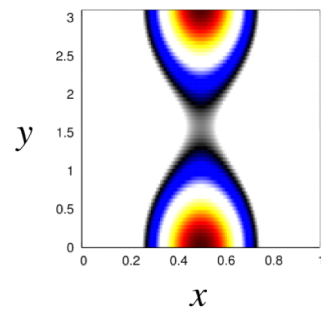


図1 磁気島の形成

(3) シミュレーションコードにプラズマ圧力の方程式を実装した。インターチェンジモードが不安定となる条件で上記と同様のシミュレーションを行った。強制磁気再結合によって形成される磁気島の最大飽和幅は、インターチェンジモードによって促進されることが確認された。これは、曲率の磁気島への影響である Glasser 効果として定性的に理解できる。また、プラズマフローによる飽和幅の非線形分岐における閾値に対しても、インターチェンジモードが影響を与えることが観察された。

(4) 乱流状態にあるインターチェンジモードが強制磁気再結合に及ぼす影響について調べた。インターチェンジモードが高波数側で不安定になるような条件でシミュレーションを行った。しかし、高波数側のモードは期待したような強制磁気再結合の促進を起こさず、結局、(1)で調べた Glasser 効果が最も重要であるとの結論に至った。

(5) シミュレーションモデルに摂動ブーツトラップ電流を加え、圧力駆動型モードとして新古典テアリングモードを考えた。新古典テアリングモードが安定なパラメータを選択し、共鳴磁場摂動との共存状態についてシミュレーションを行った。その結果、強制磁気再結合が磁気島を形成すると同時に、新古典テアリングモードが不安定化し、磁気島の飽和幅が大きく増大することが観察された。この結果を受けて修正ラザフォード方程式を用いた理論解析を行った。図2に磁気島幅に対する磁気島の成長率の依存性に関する理論解析の結果を示す。共鳴磁場摂動のみが存在する場合(黒線)に対して摂動ブーツトラップ電流が存在する場合(赤線)の方が、はるかに飽和幅が大きいことが分かる。このとき、新古典テアリングモードは安定である(青線)。

以上より、共鳴磁場摂動が存在することによって新古典テアリングモードの不安定領域が拡大することが明らかになった。このような現象は、本研究において初めて見出されたものである。

(6) 新古典テアリングモードが非線形不安定な状態に焦点を当てて研究を行った。新古典テアリングモードは非線形不安定性であるため、その励起には有限のサイズの種磁気島が必要となる。図3にプラズマフロー速度に対する磁気島飽和幅の依存性を示す。共鳴磁場摂動のみが存在する場合(青)に比べ、摂動ブートストラップ電流が存在する場合には、磁気島飽和幅が大きく増大することが分かる。パラメータサーベイの結果、共鳴磁場摂動が種磁気島を形成する場合、新古典テアリングモードの励起に必要な種磁気島のサイズが大幅に引き下げられることが明らかになった。これは、他の種磁気島の形成機構と比べて、共鳴磁場摂動が効率の良い新古典テアリングモードの励起機構であることを意味している。この傾向は既存の理論によって示唆されていたが、プラズマフロー、新古典テアリングモード、共鳴磁場摂動を無矛盾に含んだシミュレーションを用いて立証されたのは初めてのことである。

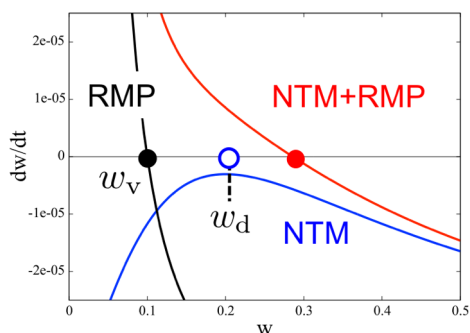


図2 磁気島幅 vs 磁気島の成長率

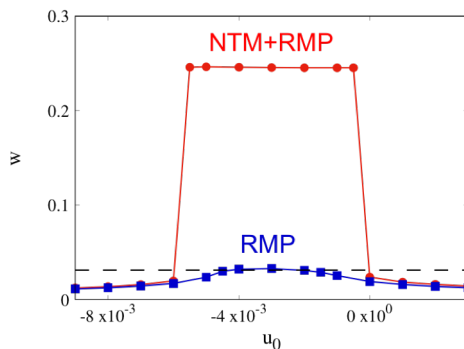


図3 プラズマフロー速度 vs 磁気島幅

## 5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計3件)

- ① S. Nishimura and R. Numata, *Magnetic Island Formation in Coexisting System of Resonant Magnetic Perturbation and Perturbed Bootstrap Current*, Journal of the Physical Society of Japan, 査読有 (印刷中)
- ② S. Nishimura and R. Numata, *Triggering of Neoclassical Tearing Mode by Error Field Penetration*, Plasma and Fusion Research, 査読有, Vol. 13, 2018, 1203104 1-3  
DOI: 10.1585/pfr.13.1203104
- ③ S. Nishimura and R. Numata, *Neoclassical tearing mode induced by error field penetration*, Proceedings of the 45th European Physical Society Conference on Plasma Physics, Vol. 42A, 2018, P1.1038 273-276

[学会発表] (計8件)

- ① 西村征也, 沼田龍介, 誤差磁場による新古典テアリングモードの誘発機構, 第35回プラズマ・核融合学会年会, 2018
- ② S. Nishimura and R. Numata, Born-locked neoclassical tearing mode triggered by error field penetration, 60th Annual Meeting of the APS Division of Plasma Physics, 2018
- ③ 西村征也, 沼田龍介, 誤差磁場のしみ込みによって引き起こされる新古典テアリングモード, 日本物理学会 2018 年秋季大会, 2018
- ④ S. Nishimura and R. Numata, Neoclassical tearing mode induced by error field penetration, 45th European Physical Society Conference on Plasma Physics, 2018
- ⑤ 西村征也, 共鳴磁場摂動のしみ込みによって誘発される新古典テアリングモード, 日本物理学会第73回年次大会, 2018
- ⑥ 西村征也, 外部印可磁気島と圧力駆動型モードの非線形相互作用, Plasma Conference 2017, 2017
- ⑦ 西村征也, 共鳴磁場摂動のしみ込みに対するインターチェンジモードの影響, 第33回プラズマ核融合学会, 2016
- ⑧ 西村征也, 共鳴磁場摂動によって駆動される強制磁気再結合, 日本物理学会 2016 年秋季大会, 2016

## 6. 研究組織

### (2) 研究協力者

研究協力者氏名：沼田 龍介

ローマ字氏名：(NUMATA, ryusuke)

※科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。