

機関番号： 12601
 研究種目： 若手研究 (B)
 研究期間： 2007 ~ 2010
 課題番号： 19760595
 研究課題名 (和文) 流れをもつ核融合プラズマ中の磁気流体波に関する過渡現象と漸近挙動の解析
 研究課題名 (英文) Transient and asymptotic behavior of magnetohydrodynamic waves in flowing fusion plasmas
 研究代表者
 古川 勝 (FURUKAWA MASARU)
 東京大学・大学院新領域創成科学研究科・准教授
 研究者番号： 80360428

研究成果の概要 (和文)： 円柱プラズマを用いた抵抗性壁モード不安定性および不整磁場の効果に関して、漸近接続法に基づく簡約モデルと非線形シミュレーションの両面から研究を行った。プラズマ流は波の周波数を Doppler シフトさせるため、有理面と Alfvén 共鳴面が分離する。プラズマ流が十分に速ければ Alfvén 共鳴面に流れる電流が不整磁場の浸透を抑え、有理面での磁気島生成を抑えることを明らかにした。また、これらの研究を通じて浮き彫りとなった、漸近接続法が抱える困難について、新しい発想に基づいてそれら困難を取り除く接続解法を開発した。

研究成果の概要 (英文)： We have studied resistive-wall-mode stability and error-field effects in a cylindrical plasma both via a reduced model based on the asymptotic matching method and via nonlinear simulations. Plasma rotation induces Doppler shift of wave frequency, which results in the separation of rational and Alfvén-resonant surfaces. If the plasma rotation is fast enough, the singular current at the Alfvén-resonances suppress the penetration of error fields and the generation of magnetic islands at the rational surface. Through these studies, we recognized several difficulties in the asymptotic matching method, and therefore we have invented a new matching method which can remove these difficulties based on a new idea.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2007年度	900,000	0	900,000
2008年度	800,000	240,000	1,040,000
2009年度	800,000	240,000	1,040,000
2010年度	800,000	240,000	1,040,000
総計	3,300,000	720,000	4,020,000

研究分野： プラズマ物理学

科研費の分科・細目： 総合工学・核融合学

キーワード： プラズマ閉じ込め・安定性, 磁気流体力学, プラズマ流

1. 研究開始当初の背景

核融合プラズマをはじめとする磁化プラズマにおいて、磁気流体波 (Alfvén 波) の挙動に対するプラズマ流の効果は、物理的にも工学的にも、さらには数学的にも大変興味深い研究対象である。

まず、重要な事実、プラズマ流存在下の

Alfvén 波が非エルミート演算子で記述されることである。プラズマ流がない場合には、Alfvén 波はエルミート演算子で記述されるが、その場合、量子力学で良く知られるように、固有値 (波の周波数に対応) が実数であること、全ての固有関数が互いに直交すること、固有関数が完全系を張る。このことから、

Alfvén 波の挙動に関する情報は、原理的にはモード解析により全て得ることができる。しかし、プラズマ流を含めた場合には、これらの性質がない非エルミート演算子で記述されるため、Alfvén 波の挙動を知るためには、モード解析でなく、基本的には初期値問題として扱う必要がある。非エルミート演算子のスペクトル理論を数学的に研究するのもチャレンジングで大変興味深い。我々はむしろ、非エルミート演算子で記述される系で起こる現象に着目し、その物理を研究するという立場に立っている。初期値問題として扱うことから、過渡現象や漸近挙動が興味深い研究対象となってくる。

また、核融合プラズマにおけるプラズマ流の効果は、近年、プラズマ閉じ込めの高性能化の観点から大変注目を集めている。特に Alfvén 波に関連する不安定性を、プラズマ流が抑制することが様々な実験から明らかになってきており、その理論解析が急務となっている。特に、抵抗性壁モードおよび新古典テアリングモードと呼ばれる不安定性は、プラズマ閉じ込め性能を著しく劣化させるため、核融合炉を実現するためには必ず抑制しなければならない。これらの不安定性は、装置の構造物等から生ずる不整磁場がプラズマ中に浸透し増幅される現象とも結合するため、その浸透のプラズマ流による抑制に関しても研究が盛んに進められつつある。

2. 研究の目的

本研究では、磁場閉じ込めトーラス型核融合プラズマ中に存在する流れが引き起こす諸現象、特に Alfvén 波の線形安定性に関連した過渡現象および漸近挙動について理論・シミュレーション研究を行う。近年核融合分野で注目を集めている抵抗性壁モードの解析を具体例とし、漸近接続理論を応用して過渡現象などを解析する統一的な手法を確立することを目的とする。また、確立した手法をトロイダルプラズマに適用し、既存の実験や ITER プラズマの定量的評価・予測を可能とする。

3. 研究の方法

研究対象とする抵抗性壁モードおよび不整磁場の浸透に関し、必要不可欠な要素は、プラズマ中の有界面 Alfvén 共鳴面、抵抗性導体壁、および不整磁場である。簡約モデルによる理論研究では、これらの要素を含む最も簡単なモデルを採用した。プラズマは低ベータ円柱配位とし、簡約化磁気流体力学 (Magnetohydrodynamics, MHD) 方程式で記述した。プラズマの周りを囲む真空領域では、低周波 Maxwell 方程式を用いる。真空領域に置かれた抵抗性導体壁は非常に薄いと仮定し、導体壁内の拡散方程式を簡約化し

た。不整磁場は、壁での非同次項として表現される。これら方程式の解を適切な境界条件により接続すれば、系全体の解を得ることができる。重要なのはプラズマ中の現象のモデル化で、簡約モデルによる理論研究では、プラズマの電気抵抗や慣性が働くのは共鳴面付近の狭い領域のみとし、その他の領域ではこれらの効果を落としたモデルを用いた。これは、伝統的に漸近接続法として知られる方法である。

非線形シミュレーションでも、簡約モデルによる理論研究と概ね同じ状況を仮定した。これは、1つには物理研究のためにできるだけ複雑さを避けるためであり、もう1つには簡約モデルによる理論研究と直接的な比較ができるからである。ただし、非線形シミュレーションは、簡約モデルで用いられるプラズマ流の大きさに関する仮定が成り立たないパラメータ領域でも行うことができる。

4. 研究成果

まず、円柱プラズマを用いた抵抗性壁モードの簡約化モデルを開発し、またそのモデルを用いて解析を行った。なかでも、外的な要因による磁場摂動にプラズマが応答し、磁気島と呼ばれる構造が形成される場合に、どのような定常状態が形成されるかを解析した。プラズマ流が小さい場合は、従来行われていた研究結果が適用できるが、プラズマ流が大きい場合には、流れによって波の周波数が Doppler シフトする効果が無視できなくなる。本研究では、この Doppler シフトの結果生じる Alfvén 共鳴を考慮して従来の理論を拡張し、どのような大きさの磁気島が形成されるか、またその磁気島がプラズマに与えるトルクはどのようになるかを研究した。その結果、Alfvén 共鳴効果によって、磁気島の大きさは従来の理論よりも小さくなり、外的な磁場摂動が小さい場合には完全に磁気島を消し去ってしまうことを明らかにした。また、トルクは、従来の理論によればプラズマ回転と共に減少するが、本研究ではプラズマ回転と共に大きくなることを明らかにした。現在、実験結果を説明するためには従来の理論が用いられているが、その見直しを迫る意義をもつ結果である。

次に、この簡約化モデルが扱えないパラメータ領域まで含めて研究を行うため、数値シミュレーションコードを開発し、シミュレーションを行った。簡約化モデルでも予言されていた通り、プラズマの電気抵抗が非常に小さい高温プラズマでは、プラズマ流が非常に小さくても不整磁場の浸透を遮蔽する効果は大きく、磁気島生成が抑えられることが示された。この結果は図 1 に示している。また、抵抗性壁不安定性に関する実験結果を説明するために用いられている禁則帯モデルの

中で重要な要素の1つである電磁トルクは、プラズマ流が大変小さいところで大きい、プラズマ流の増加と共に減少に転じ、Alfvén共鳴が効いてくる程度にプラズマ流が大きくなると再び増加することを示した。またその増加は、プラズマ流の大きさに比例することも示した。

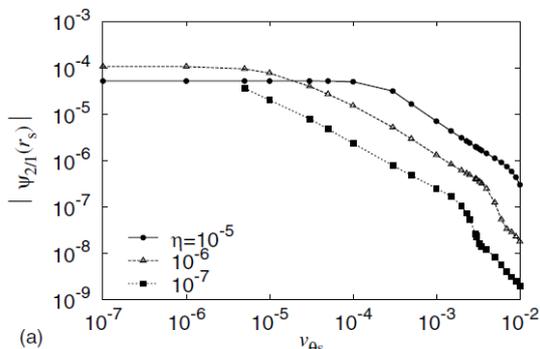


図1：円柱プラズマにおける簡約化MHDモデルの非線形シミュレーション結果。横軸はプラズマ回転速度で、縦軸は外的に与えられた不整磁場がプラズマ中の有理面でどの程度浸透したかを表す。 η は規格化されたプラズマ電気抵抗。 η が小さいほど、小さいプラズマ回転でも不整磁場の浸透が遮蔽されている。

以上の研究成果は、IAEA核融合エネルギー会議での発表に採択されていることからわかる通り、核融合研究の最前線に対するインパクトも大きかった。また、著名論文誌にも掲載されている。

これらの研究を通じて、高温プラズマの微小な電気抵抗を扱うために必須とされてきた漸近接続理論が抱える本質的また現実的な困難を再認識した。特に、ITER等の高温プラズマの解析を行う場合には、漸近接続理論では十分な解析精度が得られず、それら困難を解決するための新しい方法論が必要であると考えるに至った。

したがって、トロイダル配位への応用を行うよりも前に、漸近接続理論が抱える困難を解決するための新しい接続解法を開発することに重心をシフトさせた。この新しい方法に導入したアイデアは、漸近接続理論のように無限に薄い境界層を用いるのではなく、有限幅の“境界層”を用いることで、漸近接続であることに起因する困難を根本から取り去ってしまうというものである。境界層内外の解は、漸近的ではなく直接接続する。本研究では、この接続に必要な境界条件を導くことに成功した。さらに、この新しい方法を用い、古典的によく知られたシングル・ダブルテアリング、内部キック、交換型モードの線形安定性を計算し、その性能の良さを示した。また、この新しい接続解法は初期値問題

としても容易に定式化できることが特徴であり、過渡現象や漸近挙動の計算に適した統一的方法論となっている。この方法を用いて抵抗性MHD安定性解析を行った結果の一例を図2に示している。

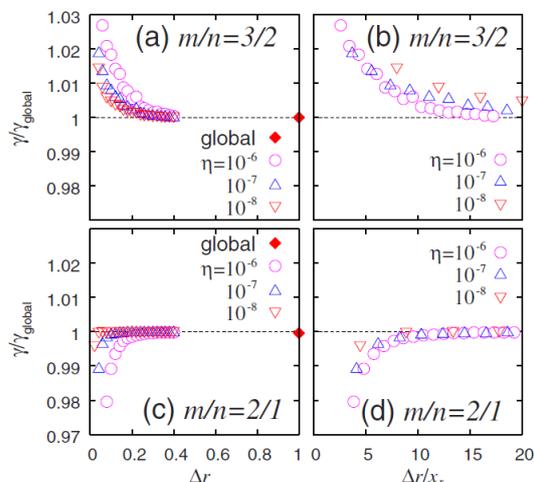


図2：新しい接続解法を用いたテアリングモード安定性解析を行った結果。(a)と(b)、(c)と(d)は、それぞれモード数が $m/n=3/2$ および $2/1$ 。(a)と(c)の横軸は内部領域の幅、(b)と(d)の横軸は内部領域の幅を抵抗層厚さで規格化したもの。各図の縦軸は、テアリングモードの成長率を、接続解法を用いずに数値計算で求めた成長率で規格化したもの。

我々が開発した新しい接続解法は、漸近接続理論が抱える困難をいくつか解決した。しかし、実験でもありがちで、かつ重要な状況、つまり理想MHD限界に近いパラメータ領域への適用に関しては、漸近接続理論を超えない点があった。それは、従来、境界層外では電気抵抗や慣性は全く効かないと考えられてきたが、理想MHD限界に近い場合には、その領域で、実はそれらの効果が有意に効いていたことに起因する。漸近接続理論にせよ、我々が開発した接続解法にせよ、この効果を落としている点は同じであり、その意味で我々の解法は漸近接続理論を超えてはいなかった。

したがって、我々は、境界層外で、電気抵抗や慣性の効果を残すために、新しいオーダーリング法を開発した。また、そのオーダーリング法に適合する接続条件も開発した。従来の漸近接続理論では、電気抵抗や慣性がゼロの極限を数学的に取るため、摂動的にそれらの効果を残すということは原理的にできない。したがって、我々が開発した新しい接続解法は、この点で漸近接続法を超えたと言ってよい。我々は、この改良された接続解法を、これまで漸近接続理論あるいは我々が以前開発した接続解法でも十分な解析精度が得ら

れなかった問題に適用し、望ましい結果が得られることを示した。この結果を図3に示している。

これら接続解法に関する研究成果は、第一義的には、核融合プラズマにおける Alfvén 波安定性解析に関し、これまで出来なかったことが出来るようになったという点で、大変インパクトのあるものである。また、今後、トロイダル配位への応用を行えば、世界的に我々にしか出来ない高精度解析が、しかも短時間で行えるようになり、核融合研究に必須の標準ツールになるものと期待される。しかし、それ以上に、この接続解法は、自然科学や工学にしばしば現れる境界層問題一般に対する新しい解法にもなっている点で、非常にインパクトが大きい。今後、この接続解法に関し、漸近接続理論を含めた位置付けを数学的に研究することで、特異摂動（境界層）問題に関する新しいパラダイムが開けるものと期待される。さらに、境界層は古典的かつ典型的なマルチスケール現象であるという観点から言えば、我々の接続解法は、マルチスケール科学に対する新しいアプローチを示している点でもインパクトがある。

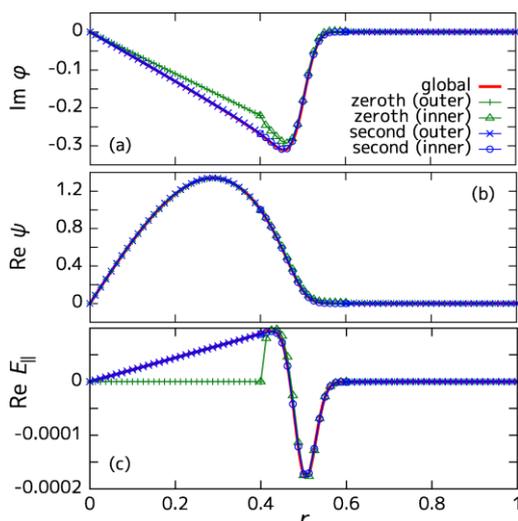


図3: 接続解法を改良し、理想 MHD 安定限界に近い状況の内部キンクモード安定性解析を行った固有関数を示している。(a)は摂動速度場の流れ関数、(b)は摂動磁場の流れ関数、(c)は磁力線方向の摂動電場。横軸はプラズマ小半径。2次の摂動まで含めることにより、外部領域で電気抵抗と慣性の効果を残すことに成功している。

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 8 件)

① M. Furukawa and S. Tokuda, “A new matching method for linear stability

analysis of magnetohydrodynamics (MHD) modes close to the ideal MHD marginal stability”, Physics of Plasmas (掲載決定, 2011). 査読有。

② M. Furukawa, S. Tokuda and L. -J. Zheng, “A numerical matching technique for linear resistive magnetohydrodynamics modes”, Physics of Plasmas **17**, 052502 (2010). 査読有。

③ M. Furukawa and L. -J. Zheng, “Suppression of error-field-induced magnetic islands by Alfvén resonance effect in rotating plasmas”, Nuclear Fusion **49**, 075018-1-6 (2009). 査読有。

[学会発表] (計 59 件)

① M. Furukawa and S. Tokuda, “Improvement of the numerical matching technique for resistive MHD stability analysis”, 52th Annual Meeting of Division of Plasma Physics, American Physical Society (November 8, 2010, Chicago, Illinois, USA).

② M. Furukawa and T. Nakatsu, “Effects of continuous spectra due to plasma rotation on numerical computation of tearing mode stability”, 51th Annual Meeting of Division of Plasma Physics, American Physical Society (November 5, 2009, Atlanta, Georgia, USA).

③ M. Furukawa, S. Tokuda and L. -J. Zheng, “Tearing mode stability analysis via a new numerical matching technique for resistive MHD”, 50th Annual Meeting of Division of Plasma Physics, American Physical Society (November 17, 2008, Dallas, Texas, USA).

④ M. Furukawa and L. -J. Zheng, “Stability analysis of resistive wall mode including effects of plasma rotation and error field”, 49th Annual Meeting of Division of Plasma Physics, American Physical Society (November 13, 2007, Orlando, Florida, USA).

[その他]

ホームページ等

<http://www.ppl.k.u-tokyo.ac.jp/furukawa>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

古川 勝 (FURUKAWA MASARU)

東京大学・大学院新領域創成科学研究科・准教授

研究者番号：80360428