

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 6 月 16 日現在

機関番号：54502

研究種目：研究活動スタート支援

研究期間：2014～2015

課題番号：26889064

研究課題名(和文) 高速イオンによって駆動されるインターチェンジモードに関する研究

研究課題名(英文) Study on the interchange mode induced by energetic ions

研究代表者

西村 征也(Nishimura, Seiya)

神戸市立工業高等専門学校・その他部局等・講師

研究者番号：70548544

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 1,300,000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、様々な運動論的效果によって電磁流体力学的(MHD)不安定性が安定化あるいは不安定化される。プラズマ加熱や核融合反応によって生成される高速イオンは、魚骨型振動と呼ばれるモードを励起することが知られている。本研究においては、ヘリカル系装置におけるインターチェンジモードと高速イオンの相互作用について調べた。運動論的エネルギー原理に基づく拡張されたインターチェンジモードの分散関係を解析し、高速イオンの運動を粒子シミュレーションによって調べた。捕捉高速イオンとの波-粒子相互作用によって、安定なインターチェンジモードが不安定化されることが新たに見いだされた。

研究成果の概要(英文)：In magnetic confinement fusion plasmas, magnetohydrodynamic (MHD) instability is stabilized or destabilized by various kinetic effects. It is known that energetic ions produced by plasma heating or fusion reaction excite modes called the fishbone mode. In the present study, interaction between the interchange mode and energetic ions in helical systems is investigated. An extended dispersion relation of the interchange mode based on the kinetic energy principle is analyzed, and energetic ion motion is investigated using particle simulations. It is newly found that the stable interchange mode is destabilized by wave-particle interaction with trapped energetic ions.

研究分野：核融合プラズマ

キーワード：磁場閉じ込め核融合プラズマ 高速イオン 電磁流体力学的不安定性 運動論的效果 波-粒子相互作用
エネルギー原理 分散関係 粒子シミュレーション

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プラズマ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。これらの装置では、反磁性効果や新古典効果などによって電磁流体力学的(MHD)モードが安定化・不安定化される現象や、加熱や核融合によって発生する高速イオン(高エネルギーイオン)によって安定なMHDモードが不安定化する現象などが観測される。これらは、MHDモードに対する運動論的效果という枠組みで捉えることが可能である。

高速イオン駆動型のMHDモードは高速イオンの損失増大の要因となり、プラズマの加熱効率低下をまねく。将来の核融合炉では、同種の現象による粒子の損失増大も予測され、第一壁・ダイバータへの熱負荷が懸念される。国内においては、高速イオン駆動型のMHDモードに関しては、トロイダルアルファ固有モードについて重点的に研究が行われてきた。一方、他のMHDモードが関係すると考えられる現象も観測されているが、理論的解釈が追いついていないのが現状である。高速イオン駆動型のMHDモードに関する研究は、トカマクとヘリカル系の双方において、その潜在的な重要性のために今後大きく発展することが見込まれている。

核融合科学研究所のヘリカル系装置、LHDとCHSにおいては、垂直中性ビーム入射によって多量の捕捉高速イオンが生成されるときに、魚骨型の波形を示す磁場振動が観測され、高速イオンの損失が増大する。トカマクにおいては、魚骨型振動は捕捉高速イオンの駆動するキンクモードが要因であることが知られている。一方、ヘリカル系ではインターチェンジモード(以下、ICモード)に関連したモードであることが示唆され、EICモード(高エネルギー粒子駆動型インターチェンジモード)と呼ばれている。

これまでの我々の研究においては、MHDモデルに新古典的プラズマフローの効果を組み込んだ運動論的MHDモデルを用いることにより、LHDにおける磁気島の自然消滅機構を理論的に解明することに成功した。同様に、捕捉高速イオンからの寄与を運動論的效果として加味したICモードのモデルを構築して解析することにより、ヘリカル系における魚骨型振動の理論的解明への糸口を得ることができると考えている。

2. 研究の目的

トカマクにおける魚骨型振動の理論をヘリカル系に応用し、ヘリカル系における魚骨型振動に関する理解を進展させることを目的とする。捕捉高速イオンが存在する場合のICモードの理論モデルの構築と数値解析を行う。また、粒子シミュレーションコードを用いて、波-粒子共鳴相互作用を検証する。

また、MHDモードへの運動論的效果とい

う点で本研究と理論的に密接に関連しているLHDにおける磁気島の自然消滅機構についても解析を進める。

3. 研究の方法

運動論的エネルギー原理に基づき、ヘリカル系における捕捉高速イオンが存在する場合のMHDモードの分散関係を導出する。MHDモードの具体例としてICモードを考えることにより、拡張されたICモードの分散関係を導出して解析を行う。

粒子シミュレーションコードを開発し、捕捉高速イオンの粒子軌道を解析する。

磁気島の自然消滅機構に関して、これまでの研究において構築したモデルを拡張した理論解析を行う。

4. 研究成果

(1) 運動論的なMHDエネルギー原理の構築

運動論的なMHDエネルギー原理は、運動論的效果によってMHDモードになされる仕事はMHDモードの運動およびポテンシャルエネルギーに変換されるという考えを定式化したものである。本研究ではChen(1984)によるトカマクにおける捕捉高速イオンとMHDモードに関する理論を、ヘリカル系を記述可能なものへと拡張した。高速イオンについては、ドリフト運動論的方程式を捕捉粒子のバウンス運動について平均化したものを用いた。MHDモードのエネルギーの計算においては、簡約化MHDモデルを用いた。最終的には、固有関数と複素回転周波数を変数とする運動論的效果を含むMHDモードの分散関係が導出された。

(2) 拡張されたICモードの分散関係の解析

(1)において導出されたモデルをヘリカル系のICモードに適用し、拡張されたICモードの分散関係を導出した。導出された分散関係は非線形固有値問題に分類され、解析計算を行うことは困難である。そこで、試行関数法によって分散関係を代数方程式に近似する手法を用いた。これを数値的に解いた結果、運動論的效果によって駆動される新しいMHDモードの存在が明らかになった。図1は分散関係を数値的に解き、線形成長率と回転周波数を求めた結果を示している。ただし、時間は捕捉高速イオンの歳差ドリフト周波数によって規格化されている。ICモードはサイダム条件を満たしており、線形安定な条件下で計算を行った。 D_{\parallel} は捕捉高速イオンの圧力勾配と不安定化に作用する曲率に関するパラメータである。 D_{\parallel} のある値を境に有限の回転周波数を伴う不安定性(正の成長率)が現れている。これは、捕捉高速イオンによって安定なICモードが不安定化されたことを意味する。

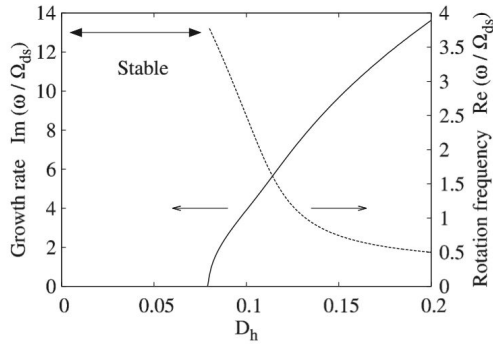


図1 捕捉高速イオンが存在するときの IC モードの分散関係

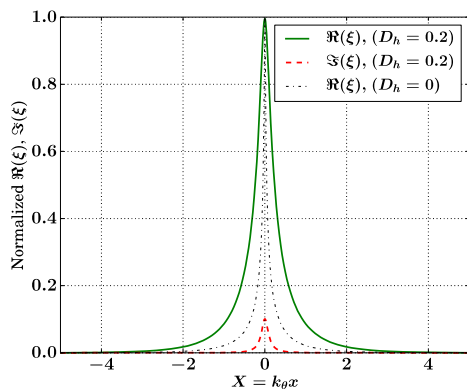


図2 捕捉高速イオンによる IC モードの固有関数への影響

次に、ICモードの空間構造に対する捕捉高速イオンの影響を明らかにするために、分散関係を固有値方程式に変形し、固有値問題に対する数値解析を行った。以下では、ICモードが線形的に不安定な条件下で解析を行った結果を示す。図2においては捕捉高速イオンの効果が存在する場合 ($D_h = 0.2$) と存在しない場合 ($D_h = 0$) について、固有関数の径方向の分布を示している。捕捉高速イオンが存在しない場合には、固有関数は実部のみを持つ。一方、捕捉高速イオンが存在する場合には、モードが回転周波数を持つことに対応して固有関数に虚部が発生する。2つの場合の比較により、高速イオンは IC モードの固有関数の径方向分布を押し広げる効果があることが明らかになった。トカマクにおけるキंकモードは大域的な構造を持つために、捕捉高速イオンの影響を取り扱う場合にも、元々の固有関数を試行関数として用いる安定性解析が一般的に行われている。一方で、図2の結果は、ICモードのような有界面に局在化したモードを扱う場合には、固有値問題を正確に解く必要があることを示唆している。

(3) 高速イオンの粒子シミュレーション 理論モデルの妥当性を検証するために、ヘ

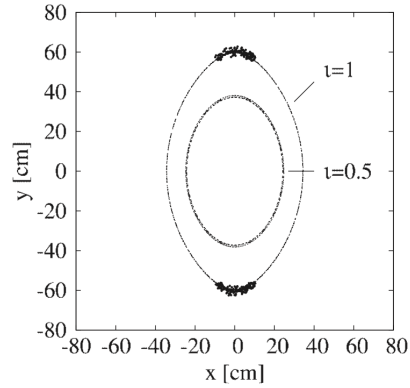


図3 捕捉高速イオンの軌道のポアンカレ図

リカル系における捕捉高速イオンの運動を計算するための粒子シミュレーションコードを開発した。バウンス中心の軌道や歳差ドリフト周波数について、シミュレーション結果は理論モデルにおいて用いられている値とよく整合することが確かめられた。図3においては、ポロイダル断面における捕捉高速イオンの軌道のポアンカレ図を示す。ここで、 \hat{i} は背景磁場の回転変換である。次に、ICモードを模擬した電場揺動を加味した場合について粒子シミュレーションを行った。電場揺動のモデル化においては、簡約化 MHD モデルで用いられている円柱座標系におけるフーリエモードを使用した。シミュレーションの結果、電場揺動と捕捉高速イオンのエネルギー交換は、波-粒子共鳴条件を満たす場合に最も大きくなることが確かめられた。このシミュレーションの問題点として、電場揺動のモデル化において背景磁場のリップル構造が反映されていない点が挙げられる。今後の課題として、磁気面座標を構成するモジュールを追加し、背景磁場のリップル構造が波-粒子共鳴条件にどのような影響を与えるかについて調べる必要がある。

(4) 磁気島の自然消滅機構の解析

ヘリカル系における磁気島の自然消滅について、LHD の観測との定性的な比較研究を進めた。はじめに、磁気島の情報と磁場の観測データとの対応関係に関する理論モデルを構築した。次に、磁気島の自然消滅のモデルの精緻化を行った。ヘリカル系特有のパラメータである磁気軸位置は、新古典的プラズマフローの性質に深く関係している。ヘリカルリップル率は、磁気軸位置の変化に伴って変化し、これが新古典粘性の強さに影響を与える。本研究においては、既存の理論モデルにおいて定数として扱われていたヘリカルリップル率を磁気軸位置の関数としてモデル化した。このモデルを用いて理論解析を行った結果、LHD において観測される磁気軸位置の変化に伴う磁気島の自然消滅の閾値の変化について、定性的な説明を行うことが可能となった。

5 . 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計7件)

Seiya Nishimura, Timothee Nicolas, Xiaodi Du, *Effects of trapped energetic ions on the interchange mode*, Fusion Science and Design, 査読有 (in press, available online)

DOI: 10.1016/j.fusengdes.2015.12.056

Seiya Nishimura, *Trapped energetic ion dynamics affected by localized electric field perturbations*, Jpn. J. Appl. Phys., 査読有, Vol. 55, 2016, 01AH08 1-6

DOI: 10.7567/JJAP.55.01AH08

Seiya Nishimura, *Interchange mode excited by trapped energetic ions*, Phys. Plasmas, 査読有, Vol. 22, 2015, 072505 1-9

DOI: 10.1063/1.4926509

Seiya Nishimura, *Novel theory of energetic-ion-induced interchange mode*, J. Phys. Soc. Jpn., 査読有, Vol. 84, 2015, 065002 1-2

DOI: 10.7566/JPSJ.84.065002

Seiya Nishimura, *Roles of effective helical ripple rates in nonlinear stability of externally induced magnetic islands*, Phys. Plasmas, 査読有, Vol. 22, 2015, 022521 1-8

DOI: 10.1063/1.4913652

Seiya Nishimura, *Nonlinear stability of externally induced magnetic islands in multi-helicity helical systems*, Plasma Fus. Res., 査読有, Vol. 10, 2015, 1203014 1-3

DOI: 10.1585/pfr.10.1203014

Seiya Nishimura, *Plasma-induced magnetic responses during nonlinear dynamics of magnetic islands due to resonant magnetic perturbations*, Phys. Plasmas, 査読有, Vol. 21, 2014, 122502 1-8

DOI: 10.1063/1.4903203

〔学会発表〕(計9件)

Seiya Nishimura, Timothee Nicolas, Xiaodi Du, *Effects of trapped energetic ions on the interchange mode*, 第21回 NEXT 研究会、2016/3/10-11、京都テルサ

西村征也、(依頼講演)「共鳴磁場摂動に関する研究提案」、NIFS ネットワーク型共同研究会合(プラズマの急激な変化を伴う MHD 平衡ダイナミクス及びその閉じ込めとの相互作用の研究)、2015/12/18、名古屋大学東山キャンパス

西村征也、「インターチェンジモードに対する捕捉高エネルギーイオンの効果」、第32回プラズマ・核融合学会年会、

2015/11/24-27、名古屋大学東山キャンパス

Seiya Nishimura, Timothee Nicolas, Xiaodi Du, *Effects of trapped energetic ions on the interchange mode*, 12th International Symposium on Fusion Nuclear Technology, 2015/9/14-18, ICC Jeju (韓国)

Seiya Nishimura, *Simulation study of trapped fast ion motion in magnetic confinement devices*, ISPlasma 2015/IC-PLANTS 2015, 2015/3/26-31, 名古屋大学東山キャンパス

西村征也、「外部駆動磁気島の非線形ダイナミクスに伴うプラズマの磁場応答」、日本物理学会第70回年次大会、2015/3/21-24、早稲田大学早稲田キャンパス

西村征也、(依頼講演)「LHDにおける外部駆動された磁気島の非線形安定性」、MHD 研究会、2014/12/25-26、核融合科学研究所

西村征也、「ヘリカル系における高速イオンの歳差運動と MHD 不安定性に対する影響」、プラズマ・核融合学会九州・沖縄・山口支部第18回支部大会、2014/12/20-21、九州大学筑紫地区キャンパス

Seiya Nishimura, *Theoretical and numerical analyses of trapping and precession drift of fast ion*, Plasma Conference 2014, 2014/11/18-21, 朱鷺メッセ

〔その他〕

ホームページ

<http://www.kobe-kosen.ac.jp/~n-seiya/>

6 . 研究組織

研究代表者

西村 征也 (NISHIMURA, Seiya)

神戸市立工業高等専門学校・電気工学科・

講師

研究者番号：70548544