

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 6 月 10 日現在

機関番号：82110

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2011～2015

課題番号：23561009

研究課題名(和文)開放系プラズマにおける突発的電磁流体现象の研究

研究課題名(英文)Research of explosive MHD phenomena in open boundary plasma

研究代表者

石井 康友 (Ishii, Yasutomo)

国立研究開発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・研究主幹

研究者番号：70354579

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,800,000円

研究成果の概要(和文)：新古典粘性効果、FLR補正、有限抵抗シェル、制御コイルによるMHD制御機能などを含む拡張MHDモデルに基づくトロイダルMHDコードを開発した。これらのコードにより、外部揺動による磁気島成長過程の研究を行い外部揺動と内部磁気島の非線形応答を明らかにした。トロイダル簡約化MHDコードと粒子コードを結合し、磁場そのものが乱雑にならない場合にも電子軌道がカオス的に散乱される機構を見いだした。本研究により、摂動磁場印加、内部での逃走電子電流の発生、磁気リコネクション、磁気島の成長、不純物の影響など、トカマク放電の大域的崩壊を説明するのに必要となる物理を含んだ統合型の非線形MHD・流体モデルを開発した。

研究成果の概要(英文)：We developed new codes based on an extended MHD model including neoclassical viscosity effect, FLR effect, a finite resistivity shell and magnetic coils are integrated in our MHD code. By using these codes, we investigated magnetic island growth by an external perturbation and the nonlinear response between an external perturbation and magnetic island. It was found that electron orbit becomes stochastic without stochasticity of magnetic field by integrating a toroidal reduced MHD code and a particle code.

In this research project, we developed integrated nonlinear MHD/fluid type models and codes including physics models, for example, external magnetic perturbation, generation of runaway electron current inside core plasma, magnetic reconnection, magnetic island growth and the effect of impurity, which are necessary for investigate the major disruption of tokamak plasmas.

研究分野：プラズマ物理学

キーワード：核融合 トカマク プラズマ 非線形応答 磁気再結合 非局所応答 ディスラプション 電磁流体力学

1. 研究開始当初の背景

磁場閉じ込めプラズマの高性能化及び長時間保持には、MHD モードの発生回避又は制御が必須の課題となっている。従来、MHD モードの発生条件はMHD 平衡下での線形理論・モデルを中心に研究されてきており、MHD 安定性限界の評価に大きな成果を挙げてきている。しかしながら、Sawtooth、NTM、RWM の発生条件、反転磁気シアプラズマの低ベータ崩壊条件など未説明の問題が多い。磁場閉じ込めプラズマでは、外部システム系とのエネルギー入出力や、乱流からの逆カスケードにより、炉心プラズマには流れが発生している。このようなプラズマの回転は、回転の無いプラズマでは一致する磁気中性面とアルフベン共鳴面の乖離を引き起こす事が知られている(図1)。

これまで、プラズマ加熱の観点から、この2つの共鳴面の乖離の重要性が調べられてきた。近年、外部揺動と

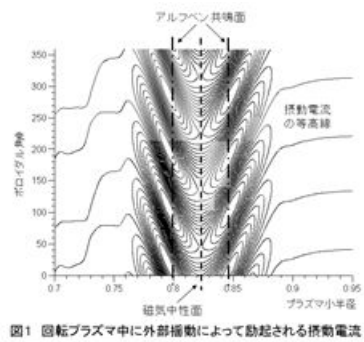


図1 回転プラズマ中に外部揺動によって励起される揺動電流

の相互作用が重要な MHD 不安定性 (RWM,NTM) の発生機構に対しても、この2つの共鳴面の乖離が重要であることが明らかと成ってきている。図1に示されるように、外部揺動により印加された摂動は、回転プラズマでは、磁気中性面でなく、その両側のアルフベン共鳴面に摂動電流を形成する。この摂動電流が磁気中性面に移動すると磁気再結合が起こり、MHD モードの不安定化が引き起こされる [PFR 1092, 2009, Y.Ishii]。このような摂動電流の磁気中性面への移動は、プラズマ回転との相互作用で決定される非線形過程であり、従来の線形 MHD 理論では考慮されていない物理機構である。開放系プラズマでは、乱流からの逆カスケード過程だけでなく、外部系とのエネルギー・運動量の遣り取りによってもプラズマ回転が発生する。従って、回転プラズマ中での MHD モードの発生機構の解明には、プラズマ回転の発生・減衰機構を取り込んだ物理モデルに基づく研究が必要である。さらに最近の研究では、MHD 安定なプラズマ中でも、乱流によって磁気島が形成される可能性が指摘されている。

2. 研究の目的

本研究課題では、従来の標準的な線形 MHD 理論・モデルとは異なり、1) MHD 非平衡、2) 複数モード相互作用 (multi-processes)、3) MHD - 乱流相互作用 (multi-scale)、4) プラズマ流れの生成・減衰に着目し、開放系非平衡プラズマでの MHD 理論・モデルを構

築し、数値シミュレーション研究を基本として、突発的な MHD 現象の発生機構の解明を目指す。このような開放系非平衡プラズマの MHD 理論・モデルの構築は、トカマクプラズマのディスラプション現象の解明のみでなく、太陽フレアの突発現象や太陽磁気圏と地球磁気圏の相互作用(宇宙天気)などの天体プラズマにおける MHD 現象解明にも貢献する。

本研究では、2流体効果を含む開放系 MHD モデルを中心的な物理モデルとし、外部系を含む非線形シミュレーション研究により、開放系非平衡プラズマにおける複数モード相互作用 (multi-processes)、MHD-乱流相互作用 (multi-scale) を明らかにし、核融合プラズマや天体プラズマで普遍的に観測される突発的な MHD 現象の発生機構、成長、飽和またはディスラプションに至る機構の解明を行う。

(1) 外部揺動に対するプラズマの非線形応答
外部揺動は、誤差磁場のように定常場合(静的外部揺動)と MHD 不安定性のように時間変動する場合(動的外部揺動)がある。従来の理論モデルでは静的外部揺動を研究対象とし、その最大振幅が MHD モードの発生閾値に成ると考えられていた。最近の研究により、動的外部揺動では、最大振幅が MHD モードの発生閾値に成らない事が解明された [PFR 1092, 2009, Y.Ishii]。これは、図1に示された回転プラズマ中での磁気中性面とアルフベン共鳴面の空間的な乖離と、電磁揺動とプラズマ回転の非線形相互作用に起因する。動的外部揺動に対する理論・シミュレーション研究では、基礎過程を解明するため、抵抗性 MHD モデルが用いられてきた。本研究では、乱流効果及び2流体効果を含む拡張型 MHD モデルを用いることにより、高温プラズマにおける抵抗層での非理想 MHD 効果を考慮した場合の、動的外部揺動による MHD モードの突発的発生機構を解明する。

(2) プラズマ回転の駆動・減衰機構と動的外部揺動による MHD モードの発生

回転プラズマ中での動的外部揺動による MHD モードの発生機構は、磁気中性面での磁気再結合過程だけでなく、プラズマ回転の駆動・減衰機構にも強く影響される。従って、外部系との相互作用により回転が発生・減衰する機構及び、非開放系プラズマでの回転の発生機構である乱流からの層流生成機構を無矛盾に取り入れたモデルを開発する必要がある。本研究では、開放系及び非開放系プラズマ中での回転の発生・減衰機構を含む拡張型 MHD モデルを用いて動的外部揺動による MHD モードの発生機構を調べる。

(3) MHD モードの発生を伴う平衡の時間発展

トカマクプラズマの平衡分布は外部入力により時間変化し非平衡状態にある。平衡の時間発展に伴い、MHD モードが臨界安定状態を不安定もしくは安定方向に横切る場合が

ある。MHD モードが臨界安定状態を横切る場合の MHD モードの発生・飽和・消滅過程は線形理論では説明が難しい研究課題である。このような MHD モードの発生条件・機構を、自発的に不安定化する MHD モード及び外部揺動により不安定化する MHD モードの双方に対して解明する。

3. 研究の方法

本研究では、現有のトロイダル形状非線形拡張型 MHD コード（一般化オーム則）を改良し、物理研究テーマ(1) 外部揺動に対するプラズマの非線形応答の研究、(2) プラズマ回転の駆動・減衰機構と動的な外部揺動による MHD モードの発生研究、(3) MHD モードの発生を伴う平衡の時間発展と外部制御系によるディスラプション回避の研究を以下のように分類し、順次研究を遂行していく

(ア) 円柱形状を仮定し、2 流体効果を含む拡張型 MHD モデルを用いて、高温領域の回転プラズマ中での外部揺動による突発的な磁気島の発生機構を詳細に調べる（コード開発(a)）。

(イ) 外部系によるプラズマ回転の生成・減衰機構を取り入れ、かつイオン流体乱流効果、新古典粘性効果を含む非線形拡張型 MHD モデルを開発する。本モデルを基礎とした拡張型非線形 MHD コードを開発し、開放系及び非開放系でのプラズマ回転の生成・減衰機構を取り入れた、外部揺動による磁気島の突発的発生機構を解明する。特に、磁気島の突発的発生を引き起こす閾値、臨界条件を調べる。（コード開発(b) (c)）

(ウ) (イ) で得られた研究成果を基に、NTM の発生機構を解明する。（コード開発(c)）

(エ) 外部加熱効果により平衡が時間発展する全領域非線形拡張型 MHD シミュレーション研究を行う。平衡の時間変化による MHD モードの不安定化・安定化機構を解明するとともに、MHD モード構造を持つプラズマ中での乱流輸送特性と平衡の時間発展を調べる。また、外部制御情報による MHD モードの発生回避や抑制、ディスラプション回避のための基礎的理論を確立する。（コード開発(c)）

(オ) トロイダル形状全領域非線形拡張型 MHD シミュレーション研究を行い、バルーニングモードを含む様々な MHD モードの複合過程を解明するとともに、ディスラプション回避のための理論モデル及び効率的な帰還制御方法を考案する（コード開発(d)）

コードの開発順序は以下のように行う。

(a) 現有の拡張型非線形 MHD コードの円柱形状に対して、3-fields モデルから 4-fields モデルに拡張しトロイダル流を物理量として含めるとともに、偽真空領域、プラズマ対向壁（抵抗性壁・完全導体壁）を含むように拡張し、プラズマ端に自由境界条件を導入する（円柱形状全領域非線形拡張型 MHD コード）。

(b) (a) で開発された拡張型 MHD コード

に、ドリフト波、イオン温度勾配モード、トロイダル及びポロイダル新古典粘性を導入する。

(c) (b) で開発された拡張型 MHD コードに電子流体の平行方向熱伝導効果を導入する（円柱形状全領域非線形拡張型 MHD コード）。

(d) (c) で開発された円柱形状非線形拡張型 MHD コードをトロイダル形状に拡張する。この際、トロイダル形状での自由境界条件の導入に関しては、世界的に明確な成功例が無いため、基本的な数値技法の変更を行う可能性がある。

外部制御情報（加熱、運動量注入、外部揺動磁場）に関しては、適宜導入していく。外部揺動磁場に関しては現有コードに実装済み。

4. 研究成果

(1) トロイダル形状拡張型電磁流体コードによるトロイダルプラズマ中での外部揺動による外部駆動磁気島の突発的発生機構

トカマクプラズマを含むトーラス形状のプラズマでは、印加された外部揺動磁場とは異なったヘリシティーを持つ磁気島がトロイダル結合効果により発生する場合がある。このような現象は、プラズマ崩壊現象や新古典磁気島の突発的発生機構においても重要である。MHD 揺動などを模擬し、振幅が時間変動する外部磁場揺動をトロイダルプラズマに加えるシミュレーション研究を行った。単一ヘリシティーを仮定した場合は、これまでの研究で示したように（Y. Ishii PFR Vol. 5, 002(2010)）、外部駆動磁気島の成長は外部磁場揺動の増大にほぼ比例するが、外部駆動磁気島の減衰は抵抗性に強く影響され、外部磁場揺動の消失後も磁気島が存在する。一方、トロイダル結合効果を含むマルチヘリシティーの場合、外部揺動と同一ヘリシティーを持つ外部駆動磁気島の時間発展は単一ヘリシティーの場合と同じであるが、トロイダル結合により励起される異なったヘリシティーを持つ外部駆動磁気島の時間発展は同一ヘリシティーの場合と異なることが分かった。また、プラズマ中に共鳴面を持たない非共鳴外部揺動磁場を加えた場合でも、トロイダル・モード間結合により、プラズマ内部に磁気島が励起されることを示した。特に、低アスペクト比トカマクでは、非共鳴外部揺動から効率的なエネルギー遷移が起こり、外部駆動磁気島が形成される可能性を示した。非共鳴外部揺動によりプラズマ中に生じた外部駆動磁気島では、摂動電流等の分布が共鳴外部揺動による外部駆動磁気島の場合と異なる。従って、トカマクプラズマ中での外部駆動磁気島の突発的発生機構を解明するためには、非共鳴外部揺動に起因する磁気島の形成過程も含めて、より詳細に解析する必要があることが分かった。

(2) トロイダル簡約化非線形 MHD コードへの新古典効果の導入

新古典粘性効果を含む非線形拡張型 MHD コードの開発を行った。この開発したコードを用いて、トロイダル形状での外部揺動による磁気島成長過程の基礎的な研究を行った。その結果、外部揺動のプラズマ中へのしみ込み過程と内部に形成された磁気島のエネルギー放出過程の時間スケールの違いから、外部揺動の時間変化と強制磁気再結合により内部に形成される磁気島の時間発展に差異が生じ、外部揺動消失後も内部磁気島は長時間存続する事が分かった。

また、プラズマ中の突発現象に関しては、電子慣性効果を含む拡張型 MHD モデルに於いて変分原理を定式化し、 $m=1$ 内部キンクティアリングモードの爆発的成長を解析的手法に予測する事に成功した。トカマクプラズマで観測される鋸歯状振動現象は、炉心プラズマの高性能化に於いて重要な制御対象の現象である。この鋸歯状現象は $m=1$ 内部キンクティアリングモードに起因すると考えられているが、その速い成長率を引き起こす物理的機構はまだ解明されていない。速い成長率を再現するために、電子慣性効果による無衝突磁気再結合がその原因と考えられている。本研究では、無衝突プラズマが散逸を持たない保存系であることに着目し、2 流体モデルへの変分原理の拡張と変分原理を用いた非摂動的な解析手法により、鋸歯状振動における爆発的成長の理論解析に成功した。

(3) MHD コードの統合化

これまでに開発してきた MHD コードの統合化を行った。平衡に関してはトカマクプラズマ平衡を計算する meudas コードタイプの平衡と moment 平衡の双方から初期平衡から平衡を読み込むことが可能となった。また、開放系プラズマの非線形挙動を調べるうえで重要となる有限抵抗シェルや制御コイルによる MHD 制御等の機能も統合した。この非線形 MHD シミュレーションコードを用いて、1) トロイダル・アルフベン振動の基本的性質のチェック、2) トロイダル結合を介した、2 つのティアリングモードの相互作用による非線形不安定化過程のチェック、3) 異なったヘリシティーを持つ外部揺動による強制磁気再結合過程の非線形シミュレーション研究を行った。

また、異なったヘリシティーを持つ外部揺動による強制磁気再結合過程の非線形シミュレーション研究(開放系プラズマにおける幾何学的結合効果の研究)においては、外部揺動と異なったヘリシティーを持つティアリング安定な共鳴面に、トロイダル結合効果により磁気島が強制的に励起される場合、外部揺動とは異なった位相で成長する事を明らかにした。高温プラズマでは抵抗値が小さくなるため、この位相差が大きくなり、また、励起される磁気島の幅が外部揺動や外部揺動と同一ヘリシティーを持つ磁気島と比較して小さくなる。このような非線形効果は磁

気島発生に関する実験結果の解釈や外部コイルによる MHD 制御に対して重要な新しい発見である。これらの研究成果をプラズマ核融合学会第 30 回年会で発表した。

(4) MHD-乱流相互作用 (multi-scale) に関するモデリング研究

重要な突発的 MHD 現象の 1 つであるトカマクプラズマのディスラプション現象に関する研究が進展した。MHD スケールの突発現象の発生とその時間スケールは、MHD スケールより小さい空間スケールで重要と成る乱流現象に支配される可能性がある。本研究では、MHD-乱流相互作用に関して、圧力勾配の分極項が陽に現れる FLR 補正のある簡約化流体モデルの開発を行った。本研究では、粒子運動のレベルで簡約化を行って構築したジャイロ運動論モデルからジャイロ流体モデルを導き、流体モーメントの押し出し表現を用いてジャイロ流体モーメントを物理的な粒子流体モーメントに変換して、簡約化電磁流体モデルを導く手法を採用した。この手法は、圧力はテンソルとして現れないので微視スケールで重要な有限 Larmor 半径 (FLR) 効果を導入する際に便利である。従来とは異なる厳密表現を用いて新しい粒子フラックスの押し出し表現を導き、高いベータ値を持つプラズマで重要となる圧力勾配の分極項があらわに現れる FLR 補正のある簡約化流体モデルの連続の式を導いた。

(5) 相対論的電子(逃走電子)の閉じ込めに MHD モードが与える影響

トカマクプラズマにおける重要な突発現象の一つがディスラプション現象である。本研究では、プラズマ中の突発現象に付随する物理機構として、トカマク装置のディスラプション時に発生する相対論的電子(逃走電子)の閉じ込めに MHD モードが与える影響を調べた。本研究で開発してきたトロイダル簡約化 MHD コードと粒子コードを結合したシミュレーションにより、径方向にグローバルな固有関数を持つマルチヘリシティーの不安定性が生じると電子ドリフト軌道と MHD モードの共鳴現象によって磁場そのものが乱雑にならない場合にも電子軌道がカオス的に散乱され、閉じ込めが大きく劣化する機構が存在するのを見いだした。

さらに、これまで開発してきたトロイダル非線形 MHD コードをトカマク装置における突発的電磁流体现象であるディスラプション現象の解析に適用した。新たに逃走電子電流の効果を検討することにより、 $m=1$ の抵抗性キンクモード発生時に逃走電子電流が磁束を運ぶタイプの内部崩壊現象を観測した。加えて、開放系プラズマにおける電磁流体现象の物理的理解を進展させるため、周辺領域に source/sink を導入したときのコア-エッジ結合現象の研究をジャイロ・ランダウ流体モデルによって実施した。短波長の微視的乱流

はプラズマのベータ値の増加により弱められるものの、突発的電磁流体现象で重要となる巨視的な揺動を散逸しうることを明らかにした。

本研究を通じ、外部からの摂動磁場印加、内部での逃走電子電流の発生、磁気リコネクション、磁気島の成長、不純物の影響など、トカマク放電の大域的崩壊を説明するのに必要となる物理を含んだ統合型の非線形MHD・流体モデルを開発した。

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2件)

N. Miyato, M. Yagi, B. D. Scott,
"On push-forward representations in the standard gyrokinetic model"
Physics of Plasmas, 査読有、22 巻、2015 年、012103_1-9

A. Matsuyama, M. Yagi, Y. Kagei, and N. Nakajima
Drift resonance effect on stochastic runaway electron orbit in the presence of low-order magnetic perturbations
Nuclear Fusion 査読有り
54 (2014) 123007-1 ~ 123007-14
doi: 10.1088/0029-5515/54/12/123007

[学会発表](計9件)

A. Matsuyama, N. Aiba, and M. Yagi
"Reduced MHD modeling of runaway electron generation and avalanche by EXTREM" Joint Meeting of US-Japan MHD workshop and 27th ITPA MHD Disruption and Control Topical Group, 2016 年 3 月 7 日-2016 年 3 月 11 日 (国際学会) 核融合科学研究所 (岐阜県土岐市)

A. Matsuyama, N. Aiba, and M. Yagi
"Kinetic-MHD hybrid equilibrium model using a Monte-Carlo calculation of runaway electron distribution function," 57th APS Annual Meeting of the Division of Plasma Physics, 2015 年 11 月 16 日 ~ 2015 年 11 月 20 日 Savannah, USA (国際学会)

N. Miyato, M. Yagi
Effects of turbulence on the edge-core coupling in tokamak plasmas with transient edge source/sink
15th International Workshop on H-mode Physics and Transport Barriers
2015 年 10 月 19 日 ~ 10 月 21 日
ガルヒンク (ドイツ) (国際学会)

N. Miyato
Gyrokinetic model beyond the standard ordering
15th International Workshop on Plasma Edge Theory in Fusion Devices

2015 年 9 月 9 日 ~ 9 月 11 日
奈良春日野国際フォーラム 薨 ~ I · RA · KA ~ (奈良県奈良市) (国際学会)

宮戸直亮, 矢木雅敏, スコット・ブルース,
"標準ジャイロ運動論モデルにおける粒子フラックスの押し出し表現の比較"

Plasma Conference 2014, 2014 年 11 月 18 日、朱鷺メッセ (新潟県新潟市)

A. Matsuyama, M. Yagi, Y. Ishii, N. Aiba, and Y. Kagei

Simulation of energy-dependent stochastic transport induced by low-order MHD instabilities

for runaway electron mitigation

25th Fusion Energy Conference, 13-18 October 2014, St. Petersburg (ロシア)

宮戸直亮,
ジャイロ運動論モデルにおける流体モーメントの押し出し表現について

「高自律燃焼プラズマ中の輸送の理解に向けたトロイダルプラズマにおける閉じ込め・輸送の体系的研究」及び「閉じ込め・輸送サブクラスター会合」合同

研究会、2014 年 7 月 18 日、核融合科学研究所 (岐阜県土岐市)

石井康友

トロイダルプラズマにおける外部磁場揺動による強制磁気再結合

プラズマ核融合学会第 30 回年回

2013 年 12 月 3 日 ~ 2013 年 12 月 6 日

東京工業大学 大岡山キャンパス (東京都目黒区)

M. Hirota, P. J. Morrison, Y. Ishii, M. Yagi, N. Aiba

Nonlinear Acceleration Mechanism of Collisionless Magnetic Reconnection

24th IAEA meeting for the 24 fusion energy conference

2012 年 10 月 08 日 ~ 2012

年 10 月 13 日

サンディエゴ市 (米国)

6. 研究組織

(1) 研究代表者

石井 康友 (ISHII Yasutomo)

国立研究開発法人 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 研究主幹

研究者番号: 70354579

(2) 研究分担者

宮戸 直亮 (MIYATO Naoaki)

国立研究開発法人 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 研究主幹

研究者番号: 80370477

松山 顕之 (Matsuyama Akinobu)

国立研究開発法人 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 研究員
研究者番号： 90581075