

(続紙 1)

京都大学	博士 (エネルギー科学)	氏名	Ahmad Ali
論文題目	Study of impulsive magnetic reconnection due to resistive tearing mode with the effect of viscosity and dynamic flow in fusion plasmas (核融合プラズマにおける粘性と動的流れの影響を受けた抵抗性ティアリングモードによる突発的磁気リコネクションに関する研究)		
(論文内容の要旨)			
<p>本論文は、磁場閉じ込め核融合プラズマの閉じ込めや安定性を支配する電磁流体力学(MHD)不安定の一つである抵抗性ティアリングモード(RTM)によって駆動される突発的な磁気リコネクション現象の物理機構を明らかにすることを目的に、簡約MHDモデルに基づく非線形数値シミュレーションと理論解析の研究成果をまとめたものであり、以下の6章から構成される。</p> <p>第1章は序論であり、核融合プラズマおよび天体プラズマにおける巨視的な不安定性を対象に、その中でも突発的な磁気リコネクション現象の代表的な実験や観測結果について紹介し、それらの役割や重要性について論じている。また、磁気リコネクションの理論モデルとしてSweet ParkerモデルとPetschekモデルを紹介するとともに、抵抗性ティアリングモード(RTM)が駆動する磁気リコネクションの基本特性と物理機構を解説している。さらに、RTMの不安定性の指標Δ'が大きい場合、Rutherford領域後に急速に成長するRTMの非線形ダイナミクスを紹介し、本研究の動機と意義を提起している。</p> <p>第2章では、MHD現象を司る抵抗性MHD方程式系を基礎に、本研究で用いる強い閉じ込め磁場(ガイド磁場)が存在する場合の低ベータプラズマ近似を用いて得られる非圧縮性の簡約MHDモデルの理論体系について紹介している。</p> <p>第3章では、第2章で概説した抵抗性MHDモデルに関する理論を基に、本論文の主題であるRTMに関するFurth-Killeen-Rosenbluth(FKR)の線形理論を概説している。また、プラズマ抵抗値ηやRTMの不安定性の指標Δ'などに対する線形成長率のパラメータ依存性や固有モード構造の基本特性などについて議論している。さらに、本研究で使用するシミュレーションモデルと数値計算スキームについても説明している。</p> <p>第4章では、3章で紹介したRTMによって駆動される突発的な磁気リコネクションの物理機構を解明することを目的に、RTMの非線形シミュレーションを行い、プラズマ粘性の有無によるRTMの非線形発展を詳細に検討している。粘性がない場合、不安定性の度合いが強いRTMモードは、Rutherford領域での緩やかな成長後、爆発的な磁気リコネクションを駆動するが、そのとき電流構造はX型の点状からY型のシート状に移行するが知られている。詳細なシミュレーション解析の結果、X型からY型への移行は磁気島の幅がある臨界値w_cを超えたときに起きることを見出している。また、その基本的な駆動機構は磁場構造の変化に伴う2次的不安定の出現によって説明され、電流分布が、有理面から離れた外部層では平坦化する一方、有理面近傍の内部層では急峻化することにより、これが新しい不安定性の自由エネルギー源となってY状のシート構造を助長されていることを示した。一方、粘性がある場合、同様の2次的不安定性</p>			

によって駆動される爆発的な磁気リコネクションの特性を幅広い抵抗 η と粘性 μ のパラメータに対して調べている。その結果、この2次的不安定性は粘性率 μ が大きいほど抑制され易いことや磁気プラントル数 $P_r(\equiv \mu/\eta) \sim 1$ を境にその特性が変化することを見出し、その詳細を議論している。

第5章では、これまでの磁気リコネクションに関する研究ではプラズマ乱流の効果はホワイトノイズとして扱われ、モデルとして不十分であるとの着想から、乱流効果を半径方向に偶奇性を持った有限周波数で時間変化する流れ場として導入し、磁気リコネクション現象に対する影響をRTMの非線形シミュレーションによって解析している。その結果、線形領域では、流れ場の周波数がある臨界値を超えるとRTM不安定性が抑制されることを見出している。また、流れ場はRTMの非線形発展に対しても大きな影響を与え、電流シートが形成されるSweet-Parker領域において複数のプラズモイドが連続的に発生し、電流シートから排出されることで爆発的なリコネクションを誘起することを見出している。これはプラズモイドによって駆動される新たな爆発的なリコネクション現象の存在を示唆している。

第6章では、本論文で行ったRTMが起因する突発的高速の磁気リコネクションに関して、主要な成果と今後の課題について、核融合プラズマおよび天体プラズマにおける乱流とMHDモードの相互作用、および、三次元磁気リコネクションという観点から議論している。

(続紙 2)

(論文審査の結果の要旨)

本論文は、核融合プラズマの閉じ込めや安定性を支配する電磁流体力学(MHD)不安定性の一つである抵抗性ティアリングモード(RTM)によって駆動される突発的な磁気リコネクション現象の物理機構を明らかにすることを目的に、抵抗性簡約MHDモデルに基づく数値シミュレーションと理論解析の結果についてまとめたものであり、得られた主な成果は次の通りである。

- 1) 核融合プラズマにおける RTM は、Rutherford 領域で緩やかに成長した後、しばしば突発的な磁気リコネクションを駆動し、そのとき電流分布は X 型の点状構造から Y 型のシート状構造へ移行することが知られている。本研究では、その物理機構を解明するため、抵抗性簡約 MHD モデルに基づく RTM の数値シミュレーションを行い、その詳細を調べた。上述の電流構造の移行と突発的な磁気リコネクションは磁気島の幅がある臨界値 w_c を超えたときに引き起こされるが、そのときの電流分布は、有理面から離れた外部層では平坦化する一方、有理面近傍の内部層では急峻化することにより、これらが新しい不安定性の自由エネルギー源となって Y 状の電流シート構造の生成を助長していることを見出した。この過程は、RTM による磁場構造の変形に伴う 2 次的不安定性と位置付けられる。
- 2) 上記 1) の 2 次的不安定性によって駆動される急速な磁気リコネクションの特性を幅広い抵抗率 η と粘性率 μ の値に対して調べた。その結果、この 2 次的不安定性は $P_r \sim 1$ (但し $P_r = \mu/\eta$ は磁気プラントル数) を境にその特性を変化させることを見出した。具体的には、2 次的不安定性がトリガーされる磁気島の臨界幅 w_c の粘性率依存性を調べ、粘性率 μ の増加に対して臨界幅 w_c は $P_r < 1$ では減少するのに対して、 $P_r > 1$ では増加することから、 $P_r \sim 1$ の領域で 2 次的不安定性が発生し易いことや、その成長率は粘性率 μ が大きいほど抑制され易いことを示した。
- 3) 乱流効果の流れ場としてモデル的に導入し、上記 1)、2) の磁気リコネクション現象に対する影響を数値シミュレーションによって調べた。その結果、流れ場の周波数がある臨界値を超えると RTM の線形不安定性が抑制されることを見出した。また、流れ場は RTM の非線形発展に対しても影響を与え、流れ場の効果によって Y 型の電流シートが形成される領域において複数のプラズモイドが連続的に発生し、このプラズモイドが電流シートから排出されることで急速な磁気リコネクションが誘発されることを見出した。

以上の研究は、核融合プラズマの急速な磁気リコネクション現象を説明する一つのモデルを提案するものであり、同現象が関与する幅広い研究の進展に貢献するものである。

よって、本論文は博士(エネルギー科学)の学位論文として価値あるものと認める。また、平成27年2月25日実施した論文内容とそれに関連した試問の結果合格と認めた。

論文内容の要旨及び審査の結果の要旨は、本学学術情報リポジトリに掲載し、公表とする。特許申請、雑誌掲載等の関係により、学位授与後即日公表することに支障がある場合は、以下に公表可能とする日付を記入すること。

要旨公開可能日： 年 月 日以降