

京都大学大学院エネルギー科学研究科基礎科学専攻 プラズマ・核融合基礎学分野
学位論文情報 (janvier Miho)

著者名： Janvier Miho (美穂)

京都大学学術情報リポジトリ：

未定

研究科・専攻： 京都大学大学院エネルギー科学研究科 エネルギー基礎科学専攻

論文題目：

Study of the nonlinear dynamics of double tearing modes to understand explosive magnetic reconnection in fusion and astrophysical plasmas

核融合と宇宙プラズマの爆発的磁気再結合理解のためのダブルティアリングモードの非線形ダイナミクスの研究

学位授与年月日：平成 23 年（2011 年） 9 月 26 日

取得分野：博士（エネルギー科学）

学位記番号：エネ博第 222 号

論文調査委員：

主査： 岸本泰明（京都大学大学院エネルギー科学研究科・教授）

中村祐司（京都大学大学院エネルギー科学研究科・教授）

柴田一成（京都大学大学院理学研究科・附属天文台・教授）

学位論文の要旨：

本研究は、核融合プラズマや宇宙・天体プラズマにおいて、ダブルティアリングモード (DTM) と呼ばれる電磁流体力学 (MHD) 過程が関与した突発的で爆発的な高速の磁気リコネクション現象をもたらすトリガーの物理機構を解明することを目的に、抵抗性 MHD モデルに基づく高精度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、得られた主な成果は次の通りである。

- 1) 高性能の核融合プラズマや太陽表面のプラズマなどで現出する反転磁気シアを有する磁場構造のもとで抵抗性 MHD モデルに基づくダブルティアリングモード (DTM) の非線形シミュレーションを行い、DTM の線形構造を特徴付ける共鳴面間の幅と磁気島長の二つの物理量に対して、磁気島が有限幅で飽和する領域と高速の磁気リコネクションをもたらす領域を分ける臨界曲線を同定することに成功した。これは、高速の磁気リコネクションが線形の自由エネルギー源に基づいて予測できることを示している。また、この臨界値は抵抗値に依存しないことを見出し、高速の磁気リコネクションのトリガーはプラズマ抵抗とは異なった要因で発生するものであることを明らかにした。
- 2) 上記 1) の解析から、高速の磁気リコネクションをもたらすトリガーは、磁気島の構造変化(磁気島の幅や三角変形の増大)が新しい自由エネルギー源となって発生する 2 次的不安定性であるとの着想に至った。これに基づいて、DTM の非線形シミュレーションで時々刻々変化する 2 次元の磁気島

構造を自由エネルギー源として取り入れ、この下で成長する固有モードを同定するシミュレーションを行った。その結果、磁気島幅および磁気島の三角変形の度合いを示す磁気島角が一定値（臨界値）に達すると新しい不安定が出現することを見出した。この不安定性は、磁束と流れが結合した大域的な特性を有するとともに、抵抗値に依存しないことから、これが高速の磁気リコネクションをトリガーする要因であるとの結論に至った。この新しい 2 次元不安定性を、1 次元的な電流勾配によるものと区別して「構造駆動型非線形不安定性」と命名した。

3) この構造駆動型非線形不安定性の出現を通して、磁気島幅と磁気島角が臨界値以下の飽和状態では互いに分離していた磁束と流れが次第に結合して大域的な構造に変化し、その結果、磁気島は、残存している 1 次元電流勾配からさらにエネルギーを受け取って成長を加速し、高速の磁気リコネクションに至ることを明らかにした。

以上の研究は、核融合プラズマや宇宙・天体プラズマなどで観測される突発的で爆発的な高速の磁気リコネクション現象を 2 次的不安定性の出現という観点から説明する理論モデルとして、磁気リコネクション研究の進展に貢献するものである。

学位対象論文：

- 1) Miho Janvier, Yasuaki Kishimoto and Jiquan Li
Investigation of Trigger Mechanism in the Explosive Nonlinear Growth of the Double Tearing Mode
Plasma and Fusion Research (Regular Articles), **Vol. 5**, S2056 (1-4) (2010)
http://www.jspf.or.jp/PFR/PFR_articles/pfr2010S2/pfr2010_05-S2056.html
- 2) Miho Janvier, Yasuaki Kishimoto and Jiquan Li
Mechanism of Structure-Driven Nonlinear Instability of Double Tearing Mode in Reversed Magnetic Shear Plasmas
Plasma and Fusion Research (Regular Articles), **Vol. 5**, 038 (1-3) (2010)
http://www.jspf.or.jp/PFR/PFR_articles/pfr2010/pfr2010_05-038.html
- 3) Miho Janvier, Yasuaki Kishimoto and Jiquan Li
Critical parameters for the nonlinear destabilization of double tearing modes in reversed shear plasmas
Nuclear Fusion **51**, 083016 (1-13) (2011)
<http://iopscience.iop.org/0029-5515/51/8/083016?fromSearchPage=true>
- 4) Miho Janvier, Akihiro Ishizawa, Jiquan Li, and Yasuaki Kishimoto
Role of the pressure force in the explosive dynamics of magnetic islands in double tearing modes

Physics of Plasmas **18**, 102112 (1-6) (2011)

http://pop.aip.org/resource/1/phpaen/v18/i10/p102112_s1?isAuthorized=no

5) M. Janvier, Y. Kishimoto, and J. Q. Li

Structure-Driven Nonlinear Instability as the Origin of the Explosive Reconnection Dynamics in Resistive Double Tearing Modes

Phys. Rev. Lett. **107**, 195001(1-5) (2011)

<http://prl.aps.org/abstract/PRL/v107/i19/e195001>

学位論文の概要：

Study of the nonlinear dynamics of double tearing modes to understand explosive magnetic reconnection in fusion and astrophysical plasmas

核融合と宇宙プラズマの爆発的磁気再結合理解のためのダブルティアリングモードの非線形ダイナミックスの研究

本研究は、高性能の核融合プラズマや太陽に代表される宇宙・天体プラズマにおいて、ダブルティアリングモード (DTM) と呼ばれる電磁流体力学 (MHD) 過程が関与した突発的で爆発的な高速の磁気リコネクション現象をもたらすトリガーとその後の非線形発と理論解析の研究成果をまとめたものであり、以下の9章からなっている。

第1章は序論であり、突発的かつ爆発的に発生する磁場閉じ込め核融合プラズマのディスラプション現象や太陽フレアなどの宇宙・天体プラズマにおける高速の磁気リコネクション現象の代表的な実験や観測結果を示すとともに、それらが当該分野に果たす役割や重要性について論じている。また、Sweet-Parker モデルや Petschek モデルなど、これまで提案された磁気リコネクションの基本的な物理機構について概説している。これらに基づいて、本論文の主題である展の物理機構を解明することを目的に、抵抗性 MHD モデルに基づく数値シミュレーションの反転磁気シアと呼ばれる磁場構造下で現出するダブルティアリングモードとそれが引き起こす高速の磁気リコネクションの先行研究を紹介し、本研究の意義と目的を論じている。

第2章では、磁気リコネクション現象の基礎である抵抗性の電磁流体力学(MHD)理論とともに、単一電流シートに起因するティアリングモードや抵抗性キンクモードを記述する漸近接続法などの基礎理論、これら抵抗性モードの線形成長率のプラズマ抵抗依存性や磁束と流れの構造などの基本特性、それらの非線形発展を予測・記述する理論モデルを紹介し、本研究を遂行するための基礎的な枠組みを提示している。

第3章では、第2章の抵抗性モードに関する理論を基礎に、本論文の主題であるダブルティアリングモード (DTM) の基礎理論を概説するとともに、DTM の線形モード構造や非線形ダイナミックスを特徴付ける重要なパラメータである共鳴面間の幅や磁気島長に対する DTM

の線形成長率のスケーリング則などについて論じている。

第4章は、抵抗性 MHD モデルに基づくシミュレーション結果に基づいて、線形領域におけるダブルティアリングモード(DTM)の成長率のプラズマ抵抗値や共鳴面間の幅に対する依存性について論じている。特に、共鳴面間の幅が狭い場合は抵抗性キンクモード、広い場合はティアリングモードのスケーリングを示し、本研究の主題である DTM の高速の磁気リコネクション現象は、それらの中間領域で現出するなどの議論がなされている。

第5章では、ダブルティアリングモード(DTM)の詳細な非線形シミュレーションを行い、4章で行った線形のDTMを特徴付ける共鳴面間の幅と磁気島長の二つの物理量に対して、磁気島が有限幅で飽和する領域と突発的で爆発的な高速の磁気リコネクションをもたらす領域を分ける臨界曲線を同定することに成功している。この結果から、DTMに伴う高速の磁気リコネクションは線形自由エネルギー源によって関係付けられ、予測できることを明らかにしている。また、臨界値に対するプラズマ抵抗依存性について詳細な解析を行い、臨界値は抵抗に依存しないことを見出すとともに、高速の磁気リコネクションのトリガーはプラズマ抵抗とは異なった要因で発生するものであることを明らかにしている。

第6章では、5章で行ったダブルティアリングモードの非線形シミュレーションによる解析から、高速の磁気リコネクションのトリガーは、磁気島の構造変化（磁気島の幅や三角変形の増大）が新しい自由エネルギー源となって発生する2次的な不安定性であると結論付け、その背景を詳細に論じている。これに基づいて、非線形シミュレーションで得られている時々刻々変化する2次元の磁気島構造を自由エネルギー源として自己無撞着に取り入れ、この下で成長する固有モードを同定する新しい方程式系を導出した。この方程式系を数値的に解くことにより、磁気島幅や磁気島の三角変形の度合いを示す磁気島角が一定値（臨界値）に達すると新しい不安定性（2次的不安定性）が出現することを見出し、その基本特性の詳細を論じている。この不安定性は、磁束と流れが結合した大域的な特性を有するとともに、抵抗値に依存しないことから、これが高速の磁気リコネクションをトリガーする要因であるとの結論に至った。この不安定性を、1次元の電流勾配によるものと区別して「構造駆動型非線形不安定性」と命名している。

第7章では、6章で見出した2次的不安定性（構造駆動型非線形不安定性）がトリガーとなって突発的で爆発的に成長する磁気島のダイナミックスの詳細を論じている。特にこの不安定性の出現を通して、磁気島幅と磁気島角が臨界値以下の飽和状態では互いに分離していた磁束と流れが次第に結合して大域的な構造に変化し、その結果、磁気島は、残存している1次元電流勾配からさらにエネルギーを受け取って成長を加速し、高速の磁気リコネクションに至ることを明らかにしている。

第8章では、6章・7章における2次的不安定による解析と相補的に、磁気島近傍の磁場の圧力や張力、さらにプラズマの圧力の均衡を解析することにより、ダブルティアリングモードの突発的で爆発的な高速のリコネクションに至る説明を試みている。これは、磁気島の変形が大きくなると、リコネクション領域における磁場の散逸が磁気島の圧力均衡を破り、その結果、フィードバック的に高速の磁気リコネクションが進展するというもので、6章で提案した構造駆動型非線形不安定性の物理過程に対応している。

第 9 章では、本論文の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、宇宙・天体プラズマのそれぞれの立場から議論している。

連絡先：

611-0011 京都府宇治市五ヶ庄

京都大学大学院エネルギー科学研究科 エネルギー基礎科学専攻 プラズマ・核融合基礎学分野
岸本泰明（教授）

TEL： 0774-38-4430 FAX： 0774-32-9397

e-mail：kishimoto@energy.kyoto-u.ac.jp