

|          |  |
|----------|--|
| 氏名       | やまぐち そういちろう<br>山 口 聡 一 朗                     |
| 学位(専攻分野) | 博 士 (理 学)                                    |
| 学位記番号    | 理 博 第 2861 号                                 |
| 学位授与の日付  | 平成 17 年 3 月 23 日                             |
| 学位授与の要件  | 学位規則第 4 条第 1 項該当                             |
| 研究科・専攻   | 理学研究科物理学・宇宙物理学専攻                             |
| 学位論文題目   | WT-3 トカマクにおける多断面での軟 X 線発光像再生による鋸歯状振動の 3 次元観測 |

|        |                     |          |           |
|--------|---------------------|----------|-----------|
| 論文調査委員 | (主 査)<br>教授 水 崎 隆 雄 | 教授 田中耕一郎 | 助教授 藤 定 義 |
|--------|---------------------|----------|-----------|

### 論 文 内 容 の 要 旨

本論文は、トカマクプラズマの磁気流体的緩和現象である鋸歯状振動の崩壊過程を 3 次元的に観測した結果をまとめたものである。観測は WT-3 トカマクで発生したオーミック加熱プラズマを対象に行い、従来の単一断面での軟 X 線発光像再生法を多断面での同時再生法に拡張することにより 3 次元観測を実現し、鋸歯状振動の崩壊過程について新たな知見を得た。

第 1 章は序論である。最初に周期的な崩壊により高温のプラズマコア部の再組織化を引き起こす鋸歯状振動が、WT-3 トカマクのような小型装置から超高温プラズマを発生する大型装置までみられる普遍的な現象であり、鋸歯状振動に関する研究が熱核融合プラズマの実現にきわめて重要な意義を持っていることを述べている。続いて、初期の実験結果に基づいてカドムツエフによって導入された崩壊過程に関する標準的な理論モデル、すなわち、プラズマコア部での磁気流体的キンクモード不安定性の発達とこれによって誘起される全磁気再結合に基づく 2 次元モデルのみでは、その後の観測手法の発展により得られた多くの観測結果を完全には説明できないことを述べている。最後に、トロイダルプラズマの弱磁場側が磁気流体的には不安定であるという認識に基づき、キンクモードが大きく発達した崩壊の最終段階ではカドムツエフモデルのような 2 次元的なものではなく 3 次元的な崩壊が起きる可能性を指摘している。

第 2 章は 3 次元観測のために開発した多断面での軟 X 線発光像再生装置について述べている。本装置は、既設の軟 X 線発光像再生装置を基に、これと同一の装置を新たに 2 箇所増設したものを加えて構成したものであり、既設の電子サイクロトロン放射計測装置と合わせてトーラスの周りの計 4 箇所での同時観測による鋸歯状振動の 3 次元観測を実現した。特に、既設と新設のものを合わせて計 3 式の軟 X 線発光像再生装置の相対感度較正を行う手法を新たに開発した。この較正法の妥当性について幾つかの種類のプラズマを対象に試験し、十分な精度で多断面発光像再生が可能であることを確認した。

第 3 章は観測結果について述べている。測定空間精度を十分に確保するために鋸歯状振動が出現するコア部が大きなプラズマを対象に観測した。様々な崩壊が観測されたが大きく三種類に分かれた。最も出現頻度の高いものは、ポロイダルモード数  $m=1$ 、トロイダルモード数  $n=1$  のキンクモード構造を持つヘリカルホットコアの出現に伴い崩壊が開始した。次に出現頻度が高いタイプにおいては  $m=1/n=1$  モードに加えて  $m=2/n=2$  のモード構造が崩壊初期に一時的に現れた。最後の稀なタイプでは、最初  $m=2/n=2$  モードによりプラズマコア部断面の環状領域において部分崩壊が起きるが、プラズマ中心は影響を受けずにより高温に発展し、ついには  $m=1/n=1$  モードによる崩壊が起きた。いずれの場合も崩壊は二段階で進行した。すなわち、第一段階においては  $m=1/n=1$  ヘリカルホット構造の発達とともに崩壊が穏やかに進行したが、第二段階に入るとホットコアのヘリカル構造が大きく崩れるとともに崩壊が加速し崩壊終了に至った。特に崩壊の最終段階においては、弱磁場側に移動したホットコアの断面形状は円から逆転半径に沿った三日月に変形し、一方、強磁場側に移動したホットコアは消えてなくなるか、あるいは広くばやけた構造に変化した。また、軟 X 線発光像に現れるこれらのホット構造が確かに電子温度の高い領域であることは、電子サイクロトロン放射計測により確認された。

第 4 章では上記の観測結果を従来の実験結果や理論モデルと比較検討しながら考察している。プラズマコア部が明瞭な

$m=1/n=1$  ヘリカルホット構造を保ちながら崩壊がゆっくりと進行する崩壊の第一段階は、カドムツエフにより導入された2次元的な全磁気再結合によるものであり、一方、このヘリカルホット構造が大きく崩れる崩壊の第二段階においては、ヘリカルホット構造の発展により弱磁場側に第二の不安定性が誘起され、これにより3次元的な乱れた構造が出現して崩壊が加速したものと推察した。第二不安定性の候補として、プラズマの圧力勾配により駆動されるタイプとトロイダル電流の電流密度勾配により駆動されるタイプの二つがあるが、このプラズマの圧力勾配は小さいので電流密度勾配によるタイプが有力であると示唆された。

第5章は結論であり、本研究の結果をまとめたものである。特に、鋸歯状振動の崩壊過程において、ホットコアの変形が最後までヘリカル対称性を保たずに、最終段階においては3次元的な崩壊が起きるという結論を得た。

## 論文審査の結果の要旨

本論文は、WT-3 トカマクで発生したオーミック加熱プラズマを対象に、トカマクプラズマの高温のコア部における磁気流体的緩和現象である鋸歯状振動の崩壊過程を、多断面での同時軟 X 線発光像再生により3次元的に観測した結果をまとめたものであり、主な成果は以下のとおりである。

1. 既設の軟 X 線発光像再生装置を基に、これと同一の装置を新たに2箇所増設したものを加えて、多断面での軟 X 線発光像再生装置を構成し、既設の電子サイクロトロン放射計測装置と合わせてトーラスの周りの計4箇所での同時観測による鋸歯状振動の3次元観測を実現した。特に、既設と新設のものを合わせて計3式の軟 X 線発光像再生装置の相対感度較正を行う手法を新たに開発した。この較正法の妥当性について幾つかの種類プラズマを対象に試験し、十分な精度で多断面での同時発光像再生が可能であることを確認した。

2. 測定の間隔精度を十分に確保するために鋸歯状振動が出現するプラズマコア部が大きなプラズマを対象として多くの崩壊過程を観測した結果、崩壊を誘起する磁気流体不安定性の様相により幾分の変異はあるが、いずれの場合も崩壊は二段階で進行することを見いだした。すなわち、第一段階においてはモード数  $m=1/n=1$  を持つキンクモードのヘリカルホット構造の発達とともに崩壊が穏やかに進行したが、第二段階に入るとホットコアのヘリカル構造が大きく崩れるとともに崩壊が加速し崩壊終了に至った。特に崩壊の最終段階においては、弱磁場側に移動したホットコアの断面形状は円から逆転半径に沿った三日月に変形し、一方、強磁場側に移動したホットコアは消えてなくなるか、あるいは広くぼやけた構造に変化した。また、軟 X 線発光像に現れるこれらのホット構造が確かに電子温度の高い領域であることを、電子サイクロトロン放射計測により確認した。

3. 上記の観測結果を理論モデルと比較検討することにより、プラズマコア部が明瞭な  $m=1/n=1$  ヘリカルホット構造を保ちながら崩壊がゆっくりと進行する崩壊の第一段階は、カドムツエフにより導入された2次元的な全磁気再結合によるものであり、一方、このヘリカルホット構造が大きく崩れる崩壊の第二段階においては、ヘリカルホット構造の発展により弱磁場側に第二の不安定性が誘起され、これにより3次元的な乱れた構造が出現して崩壊が加速したものであるという結論を得た。すなわち、鋸歯状振動の崩壊過程において、ホットコアの変形が最後までヘリカル対称性を保たずに、最終段階においては3次元的な崩壊が起きることを初めて見出した。

以上の成果により、本論文は博士(理学)の学位論文として価値あるものと認める。また、論文内容とそれに関連した事項について試問を行った結果、合格と認めた。