

## (論文内容の要旨)

本論文は、磁場中に閉じ込められたプラズマにおける不純物の乱流輸送を新しい解析手法を用いて研究した成果を纏めたものであり、6章からなっている。

第1章は序論であり、核融合プラズマに対する不純物の様々な影響を述べ、不純物の輸送過程の研究の重要性を指摘している。特に、周辺プラズマにおいて最も支配的な乱流であるドリフト波乱流下における不純物輸送を研究することが核融合プラズマの閉じ込めに必要不可欠であることを示し、構造関数、特異値分解法など統計的手法を用いることにより不純物輸送過程について新たな知見が得られることを述べ、本論文の構成を示している。

第2章では、核融合プラズマ実現に対してプラズマ乱流が閉じ込めに大きく影響していることを述べ、これまでに確立された乱流理論をまとめるとともに、流体乱流との類似性から Navier-Stokes 方程式とプラズマ乱流の自己組織化の関係が示されている。さらに、プラズマ乱流を扱う上で重要なドリフト波の特性について述べ、抵抗性ドリフト波の非線形モデルである Hasegawa-Wakatani モデルが導出されている。

第3章では、乱流の自己相似性に起因する干渉性渦構造が、粒子や熱の輸送に大きく影響を及ぼすことから、それら乱流構造を解析する手法を述べている。まず、構造関数解析と、その拡張法である Extended Self-Similarity 法の説明がなされている。構造関数スケール指数の導出法を述べた後、その構造関数スケール指数の次数依存性を間欠性の観点から説明し、その物理的モデルを明らかにしている。次いで、乱流の時空間構造の解析のための特異値分解法の説明がなされている。

第4章では、乱流輸送を駆動する場を表す Hasegawa-Wakatani 方程式とパッシブスカラーとして捉えた不純物の輸送方程式を自己無撞着に結合したシミュレーションを行った結果を述べている。シミュレーションで得られた不純物密度と渦度の構造関数スケール指数を詳細に検討した結果、渦フィラメントが存在する場での構造関数スケール指数を記述する She-Leveque モデルとよく一致することが分かった。これは、不純物が渦フィラメントに沿って移流するシミュレーションと一致する結果であり、乱流場の渦度と不純物輸送の間に強い相関があることを示しており、定量的に不純物輸送とプラズマの渦度場が同じマルチフラクタル性を持つことを示した。構造関数スケール指数から導かれる Hurst 指数を評価し、プラズマ密度とポテンシャルは長距離の自己相関を示すことを明らかにした。さらに test particles によるシミュレーションを行い、粒子のステップ長の確率密度関数を求

めた。その結果はガウス分布から大きく外れ間欠性を示すことを明らかにした。

第5章では、特異値分解法を用いた、時空間マルチスケール解析の結果が示されている。本解析は、不純物輸送の数値データを空間と時間の双方の固有モードを用いて同時に分解するものであり、空間構造と時間構造を同時に抽出することを可能とする。その結果、観測するスケールによる、パッシブスカラーの混合過程の違いが明らかにされた。大きなスケールの渦構造は時間に対して緩和的な運動をするのに対し、小さなスケールの渦構造は時間的に間欠的な運動を示した。また、この間欠性が大スケールの渦から小スケールの渦に伝達していくことが示されている。さらに、周辺プラズマにおける不純物輸送では渦のサイズが相関時間の平方根に依存することを明らかにした。これは、不純物輸送において渦のカスケード過程がサイズに関わりなく一定の割合で起こっていることを示している。

第6章では、以上の研究結果から得られた総括であり、また今後の課題を要約している。

氏名	二谷辰平
----	------

(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性能を支配するプラズマ周辺部の不純物輸送のダイナミクスを理解することを目的に、従来の新古典理論あるいは現象論的な拡散方程式に基づく解析から、プラズマ中に異常輸送を引き起こす乱流場の影響を取り入れた解析に拡張するとともに、得られたシミュレーションデータに対して構造関数解析や特異値分解と呼ばれる高次の時空間構造を表現することが可能な統計解析法を適用することにより、不純物の輸送機構に対して新たな知見を見出した。得られた主な成果を以下に示す。

1) 乱流輸送を駆動する場を表す Hasegawa-Wakatani 方程式とパッシブスカラーとして捉えた不純物の輸送方程式を自己無撞着に結合したシミュレーションを行った。その結果、不純物密度の渦構造はプラズマ乱流の渦構造と強い相関を持つことを定量的に示すとともに、乱流場とその影響を受けた不純物輸送はマルチフラクタル性を持つことを明らかにした。これは不純物輸送が非拡散的な間欠現象によって支配されることを意味し、周辺部の不純物の挙動が乱流場の特性を強く反映することを示している。

2) シミュレーションで得られた不純物密度と渦度の構造関数スケール指数を詳細に検討した結果、渦フィラメントが存在する場での構造関数スケール指数を記述する She-Leveque モデルとよく一致することが分かった。これは、不純物が渦フィラメントに沿って移流するシミュレーションと一致する結果であり、乱流場の渦度と不純物輸送の間に強い相関があることを示している。これは不純物輸送のダイナミクスに対して新しい統計力学的知見を与えるものである。

3) これまでの不純物輸送の解析では時間構造と空間構造を独立に扱っていたが、本研究では、不純物輸送の数値データを空間と時間の双方の固有モードを用いて同時に分解する特異値分解法を適用し、空間における「干渉性構造」と時間における「間欠性構造」の両者を同時に抽出することに成功した。その結果、大きなスケールの渦構造は時間に対して緩和的な動きを示す一方、小さなスケールの渦構造は間欠性を示すこと、渦のサイズが相関時間の平方根に依存することなどを明らかにした。これらは、不純物輸送において渦のカスケード過程がサイズに関係なく一定の割合で起こっていることを意味しており、新しい知見である。

以上、本研究は今後の核融合プラズマの閉じ込めに重要な影響を及ぼす不純物輸送の基礎理論として重要な成果であり、学術上、實際上寄与するところが少なくない。

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 20 年 8 月 21 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。