

(続紙 1)

京都大学	博士(人間・環境学)	氏名	河井 洋輔
論文題目	非平衡多粒子系の緩和過程を渦運動・乱流の両視点より構造解析する非中性プラズマ実験		
(論文内容の要旨)			
非中性プラズマとは、正または負のいずれかの電荷を持つ荷電粒子群によって構成された多粒子系である。その集団的な振る舞いは、荷電粒子群が作り出す強い自己電場によって支配され、特にその構造が磁力線方向に一様化されるとき、磁場に垂直な平面内で非粘性・非圧縮性の2次元理想流体と同等の運動を行う。この流体が作り出す流れは電場によって駆動されるため、渦の強さ（渦度）は荷電粒子の密度分布に比例することになる。 申請者はこの特性を利用し、電子のみで構成された純電子プラズマの密度分布から、乱流中に現れる渦度構造を高精度の観測系で可視的に計測している。さらに、その画像データを基盤として、従来、波数空間上で検討されてきた乱流の物理描像を、実際に観測される実空間での渦運動の観点も含めて議論している。 第1章では非中性プラズマの特性、特に2次元理想流体との等価性と乱流実験における利点について説明している。さらに、従来の中性流体を用いた実験研究では到達できなかった精度で渦運動の観点から乱流の性質を検討する、という本論文の目的を提示している。 第2章では先ず純電子プラズマの閉じ込め装置の構造と、プラズマの生成法・制御法について述べ、初期分布の形成から乱流の発生、電子密度分布の画像計測までの一連の実験手順について説明している。次に渦度の空間構造を高精度で観測する画像計測システムについて、その詳細を実験データに基づき解説している。最後に理想流体における流れ場に対応する自己電位分布を、観測した電子密度分布から数値的に導出する手法について記述している。 第3章では本論文で検討を行う乱流緩和過程での渦度分布の時間発展について詳細に記述している。初期においてリング状に形成された電子プラズマは、自らが作り出す流れのシア（流れの速度勾配）によって攪乱に対し不安定となり、その非線形成長を介して複数個の渦を形成する。形成された渦群は相互に合体を繰り返し、単一の安定な終状態へと収束する。申請者はこの緩和過程を、渦度分布の空間積分量から追跡し、それがエンストロフィーの減少およびパリンストロフィーの増加として特徴付けられることを示している。ナビエ・ストークス方程式から、パリンストロフィーが流れ場のシアによって自発的に発展する物理量であることを示し、観測からその増加が渦群の合体過程に伴う微細な乱流構造の生成に対応していることを明らかにしている。さらに渦度の大きさに対応するエンストロフィーが、パリンストロフィーに比例する散逸項によって減少していることを示し、そこから本実験系における実効的な散逸強度の評価を行っている。			

第4章では前章で示した渦度分布の観測結果にフーリエ解析を適用することで、波数空間上で議論される2次元乱流の理論モデルと実験との比較を行っている。最初に乱流の動力学を特徴付ける物理量であるエネルギースペクトルの導出手法について述べ、次いで得られるスペクトルの時間発展について記述している。ここでは特にスペクトルの形状が広い波数領域に渡ってべき則に従うことが示され、渦度分布が多様なスケールを持つ渦構造によって構成された乱流状態に達していることを確認している。さらにこの時間発展をエネルギーおよびエンストロフィーの波数空間上における輸送係数から追跡し、エネルギーが初期に形成される渦より低次波数側へと流され、一方、エンストロフィーが高次波数側へと輸送されている様子を観測している。以上の結果をもって申請者は、観測された乱流緩和過程が、定性的には理論モデルによって予測される乱流描像に従って進行していると結論付けている。しかし同時に、スペクトルのベキ指数が理論モデルと異なり波数依存性が急峻になること、エンストロフィーの流れが乱流を覆う強い渦によって阻害されること、という理想的な乱流との差違も指摘している。

このような波数空間上における乱流の動力学を、実空間上で観測される渦運動と直接対応させて検討することが第5章の主題である。そのためこの章では実・波数両空間上において局所的な分解能を有するウェーブレット解析を同じ実験データに適用している。ウェーブレット解析の特性について記述した後、申請者が最初に取り組んでいるのは、実験装置に起因する雑音の除去である。ウェーブレットの特性を上手く利用することで、画像データ全域に渡って重畳していた雑音を、電子由来の信号に影響を与えることなく除去することに成功している。これにより微細な乱流構造を十分な信号対雑音比をもって解析できることを実証している。次にウェーブレット解析から波数スペクトルの局所的な空間構造を観測し、前章で示された波数空間上における乱流描像が、実空間上では渦構造の微細化に対応していることを明確に示している。さらに、理想的な乱流モデルとの差違については、強い渦の寄与によるエネルギースペクトルの急峻化という観点から検討が行われている。申請者はウェーブレットを用いた強い渦と微細な乱流構造の分割化を提案し、この手法によって強い渦が取り除かれた乱流構造のスペクトルが、理論モデルのスペクトルと良く一致することを明らかにしている。

第6章では、本研究の成果が簡潔にまとめられている。

以上、本論文において申請者は、乱流中の渦構造を高精度で計測・解析し、波数空間上で展開されてきた乱流の物理描像を実験的に描き出すことに成功している。

(論文審査の結果の要旨)

Leonardo da Vinci のスケッチにも描かれているように、乱流は大小様々なスケールをもつ渦によって構成され、それらの相互作用を介してその構造を形成または変化させている。乱流は我々を取り巻く環境において普遍的に観測される現象であるが、多様なスケールに渡るこのような物理機構を、理想的な条件下で高精度に観測・解析できる実験は現実には得難く、流体力学分野では専らモデルを対象とした理論解析や数値シミュレーションに研究の重点が置かれてきた。

このような状況下において、非中性プラズマを用いた2次元理想流体に関する実験研究は、乱流の物理究明に対して重要な役割を果たす。非中性プラズマは散逸が極めて弱いため、乱流の特性と散逸過程とが明確に分離された理想的な条件下での実験が可能であり、さらに渦度がスカラー量として直接可視的に観測可能であるため、微細な乱流構造まで高い精度で流体の動力学を追跡することが出来る。

本学位申請論文において申請者は、このような特性を利用し、高精度の計測系を用いた渦構造の観測を行い、非中性電子プラズマの乱流緩和過程について研究している。実験により得られた画像データを基盤として、これまで波数空間上で議論されてきた乱流の動力学を、実空間上における渦運動と直接対応させ詳細な検討を行っている。その解析は緻密で、高く評価される。

第1章では本研究の目的が過去の研究結果を踏まえた上で明解な形で示され、続く第2章では本研究で用いられた実験装置の構造と原理が詳細に記されている。第3章では乱流緩和過程の時間発展が、実空間上における渦運動の観点から検討され、ナビエ・ストークス方程式で記述される渦群の合体過程とそれに伴う乱流構造の形成過程が、様々な積分量の時間発展から定量的に示されている。特に、ここで検討された渦度の散逸過程は、これまでの非中性プラズマ物理では見過ごされてきた課題であり、その物理機構の解明は不十分ながらも、非中性プラズマを用いた流体研究に対して新しい局面を与えている。

第4章では観測された電子密度分布に対しフーリエ解析を適用し、実空間上における観測結果を波数空間上で解析し、実験と理想的な乱流理論モデルとの対比を試みている。エネルギーやエンストロフィーなど乱流を特徴付ける物理量の波数空間上における時間変化を追跡することによって、観測された乱流緩和過程が、理論モデルによって予測される乱流描像と定性的に一致していることを実証している。この解析において、乱流理論が前提としている極めて散逸の弱い流体における波数スペクトルの動力学とその輸送係数の性質を、実験結果から初めて明瞭に確認している。これは中性流体を用いた実

験研究とは一線を画す、極めて精度の高い優れた成果である。

第5章が本論文の核心部分である。実空間と波数空間の両空間上で局所的な分解能を有するウェーブレット解析を実験データに適用することで、第3章において示された実空間上での渦運動と第4章で議論された波数スペクトルの

動力学との対応関係が明らかにされている。ウェーブレット解析から波数スペクトルの局所的な空間構造を観測することで、波数空間上で観測される多様なスケールに渡る渦度の流れが、実空間上では渦間の相互作用に伴う乱流構造の形成・成長に対応していることを初めて明確に捉えている。さらにウェーブレットの特性を巧みに利用することで、画像データから特定の渦度構造を、他の構造に影響を与えることなく抽出することに成功している。特に、乱流全体を覆う強い渦構造と微細な乱流構造とを客観的に分離する手法を開発し、実験と理想的な理論モデルとの定量的な比較を可能にしている。本章で詳述された解析は、2次元乱流理論の基盤を固めるものとして高く評価される。さらに乱流実験を新しい段階へと発展させる上で基礎となる優れた手法である。

本研究の意義は、（１）従来の中性流体を用いた実験研究では到達できなかった高い精度で乱流を計測した、（２）これまで主に非局所的な波数空間上で検討されてきた乱流の動力学を実際に実空間で観測される渦運動の観点と融合させて解析する手法を確立した、という２点である。ミクロなスケールにおける揺動とマクロな秩序構造とが密接不可分に結びついているこのような物理機構は、非中性プラズマや乱流に留まらず、様々な自然現象において普遍的に存在する。本研究の成果が他分野に与える波及効果は極めて大きいと期待される。

よって本論文は、博士（人間・環境学）の学位論文として価値あるものと認める。平成22年1月18日、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。

Webでの即日公開を希望しない場合は、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