

氏名	伊藤清一
学位(専攻分野)	博士 (人間・環境学)
学位記番号	人博第173号
学位授与の日付	平成15年3月24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	人間・環境学研究科人間・環境学専攻
学位論文題目	非中性プラズマによる渦糸の二次元運動の実験的研究

論文調査委員 (主査) 教授 際本泰士 教授 富田博之 教授 前川 覚 教授 宮本嘉久

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粒子群で構成される集団を意味し、特に粒子が作る自己電場によって発生する集団的な運動が支配的になった状態を特徴とする。本研究では電子のみで構成された非中性プラズマを用いる。この多粒子系に磁場方向の一様性を与えることにより、磁場に垂直な二次元平面の中で電子の円軌道の中心（案内中心と呼ぶ）の集団が非圧縮・非粘性の完全流体と同等の運動をする状態を円筒状の真空容器の中に実現した。この流体においては電子が集団として作る電場によって流れがうまれる。この流れの中にできる渦の強さ（渦度）は電場によって駆動されるので、電子の密度分布に比例することになる。この関係から、電子密度分布を計測すれば、理想的には渦運動の全てを知ることができる。

本研究において著者は、この流体が荷電粒子の集合体である性質を利用して、制御・計測・データ解析において電磁気学の手法を導入し、いくつかの技術開発を行った。その基盤の上に実験研究を行い、理論的に期待されていた渦糸運動の基本的性質を実証するとともに、背景にある弱い渦との相互作用によって、渦糸が示す運動の新しい側面を発見した。以下では章の順に従って本論文の概略をまとめる。

第1章では非中性プラズマが長時間保持できる物理的理由と二次元流体としての特性を引き出すための条件を示したうえで、二次元渦の実験装置の満たすべき条件を議論した。

第2章では非中性電子プラズマの閉じ込め装置の構造と、渦糸を構成する電子プラズマの生成法、制御法について記述した。ついで二次元面内において電子プラズマの密度分布を細密に計測するために開発した技術および画像計測システムの応答特性について線形性および信号／雑音比の面から定量的に検討した。

第3章では前章に記述した手法で得られた電子密度の二次元分布のデータの数値解析法の記述とその検討がテーマである。ここでは256×256個の位置の密度データから高速で電位分布を導出する手法をまず述べている。著者はグリーン関数の手法では10時間を要した積分計算が、直交関数の級数展開を利用したアルゴリズムを適用することにより十分な精度で数分間に短縮することを示した。このように導出した二次データから、従来採用されてきた静電誘導プローブの信号波形を数値的に再構成すると、単純な渦構造の場合には直接計測した電気信号とよく一致することを示し、本手法の妥当性を担保した。一方、複雑な渦構造の計測には本手法が遙かに優勢であることを示した。

第4章は渦糸間の相互作用が課題である。完全流体の渦糸運動は流体力学の教科書においてまっ先に扱われる基本事項ではあるが、明瞭な実験がない。本論文では真空中に離散した糸状の電子分布を最大19本まで同時に作り、その1本1本を渦糸としつつ渦糸の強さ（循環）と位置関係を初期条件として制御した。このように形成した渦糸の寿命は回転時間の1000倍以上であり、実質的に散逸のない渦運動を実現している。著者はこのような好条件で渦糸相互作用を実験的に検証して、理論的に期待される理想的渦糸のハミルトニアン運動を明瞭に実証した。

第5章では、多数の渦糸の相互作用を取り扱う複雑さを避けて、1本の渦糸を選び、それ以外の渦糸を空間的に塗りつぶ

して滑らかに分布した広がりのある渦として、渦糸の運動を実験的に検討した。つまり、1本の渦糸と背景渦度分布との相互作用を検証した結果、渦糸は背景渦度の勾配を登るという気象学では定性的に認識されていた特性を明確に実証した。更に本実験とはほぼ同時期に米国において理論的に導出された、背景渦度勾配中に位置する渦糸の運動を記述する線形方程式が、背景渦度の摂動レベルが小さい範囲において、本実験と良く一致することを示した。しかし、完全流体においては一旦発生した摂動は変形しつつ生き残り、その後の渦運動に大きく影響することを、著者は実験において明瞭に観測し、画像データの数値解析を基盤として、このような効果を取り込めていない理論モデルの限界と問題点を指摘した。

渦糸として良く近似できるとは言え、現実の渦糸の断面は有限の広がりを持っており、この観点からは渦紐と呼ぶのが相応しい。有限断面の変形についての検証が第6章の課題である。本実験によれば、強い渦紐は背景渦を局所的に巻込みつつ移動して、背景渦度分布を大きく変える。弱い渦紐は背景渦のシアの中でフィラメント状に引き伸ばされ、崩壊し消滅してしまう。その中間においては渦紐は楕円形に変形を受けるが、シアの強い領域を通過すると再び円断面を回復する。このような観測結果に対比すべき理論モデルとしては極端に単純化されたものしか存在しない。もっとも実験に近いモデルとして、直線的な流れの速度にずれを持つ背景の中に、平坦な渦度分布をもつ渦紐が置かれた場合の渦紐の変形度を評価した解析例がある。著者はこのモデルを実験条件の回転流れに置換えて、ずれの強さに対する楕円度の依存性を検討し、理論値と実験値は数値的には近いことを確認した。しかしその関数形は、理論が下に凸でずれの増加に伴って楕円度が発散するのに対して実験では上に凸となる。実験ではずれが大きくなっても楕円度には上限があり、それをこえると渦紐の崩壊がおこる。しかもこの実験的上限値は別な理論で予言された楕円度の安定限界値と一致していることを著者は発見した。つまり、本実験は渦紐の形状変化が2つの独立な理論を満足する形で実現されていることを初めて示したことになる。本章では更に実験データから導出した流れ場の中で渦を構成する粒子が渦圏内から流出する条件を導出し、渦の崩壊条件と良く対応がつくことを指摘している。

以上をまとめると、本論文では電子の集団である非中性プラズマの特性を利用して、二次元完全流体に極めて近い状態を作りだし、電磁気的な制御・観測・解析技術を駆使することにより、従来抽象的な数学的表現にとどまっていた渦の基本的な特質を、具体的な物理量およびそのパターンとして実験的に明らかにした。更に理論では平坦分布や小摂動など様々な単純化が前提となっているが、時間的展開において実際の渦運動は急速に非線形領域に入り、理論の記述との乖離が拡大することを示した。すなわち本論文において著者は従来とは異なる新しい視点から渦運動を実験的に検証し、渦の基本的特性と多様な非線形的展開を相関を持たせて実証的に描き出した。

論文審査の結果の要旨

「渦」は私たちの環境においてなじみの深い自然現象である。その強い印象が隠喩として文学的表現に用いられている。自然科学では、この渦現象から純化された「渦糸」が想定され、様々な場の特異点を意味する用語となっている。物理学においては、散逸効果が小さく圧縮性を無視できる理想的状態を意味する「完全流体」という概念が創りだされ、その運動方程式から渦の示す多様かつ特異な物理過程が理論的に予言されている。しかし、私達に身近な流体は散逸効果が強くて（例えば鳴門の渦は1—2回転で寿命が尽きる）、理想状態の実現は難しく、渦の本質に迫る物理過程の多くはコンピュータ上の数値シミュレーションでしか実現されていない。

本論文に記載された研究においては、従来の流体とは全く異なって、電子の集団である非中性プラズマを流体として扱う。電子集団の持つ電磁気的特性を利用することにより、理想流体に限り無く近い状態（数百回転以上の寿命）をデスクトップで実現して、渦運動の基本的な諸特性を実験的に検証している。この報告ではまず本論文において評価すべき事項を列挙し、その後に説明を補足する。

本論文にて報告された研究成果は次の4つの項目にまとめることができる。

- (1) ならかな渦分布を背景にして、細くて強い渦糸が重畳された渦度分布を様々な形状で初期条件として形成する独自の技術を開発した。更にこの渦システムを、周囲からの擾乱を遮断して孤立系として自己発展させ、その展開を時間的に追跡して、詳細かつ精度よく観測する実験技術を発展させた。(第2章)
- (2) 時間変化する渦度分布を高解像度の二次元画像データとして記録し、それを数値的に高速かつ高精度で処理する技術を開

発して、渦構造を詳細に定量解析する手法を発展させた。更にこの計測・解析法を従来用いられてきた静電誘導型プローブ計測法と比較して、その優位性を実証した。(第3, 4章)

(3)背景に過度の勾配がある環境において渦糸が示す挙動について初めての実験を行い、本実験とは独立かつほぼ同時期に発表された線形理論モデルの妥当性および適用限界について定量的に検証した。(第5章)

(4)背景の渦との相互作用により渦糸の断面が受ける形状変化とその復元あるいは崩壊について、既存の諸理論モデルと比較しつつ、実験面からのデータベースを整えた。(第6章)

このいずれにおいても著者によるオリジナルな貢献が大きく、新奇性が高く学術的にインパクトのある研究成果が報告されている。

本論文で報告された「渦」について、その意義を評価するために、著者の報告に基づき若干の補足説明を加える。渦運動を担う実体は磁力線に巻きついて高速(1ナノ秒)で回転運動をする電子である。電子の密度を増やすと自身の負電荷によって分布の中心に向かった電場が発生する。この電場によって電子の回転運動には、磁場と電場の両方に垂直な周方向にずれができて、それが積み重なると、電子全体としてずれの方向に流れを作る。この巨視的な流れは約20マイクロ秒の回転運動を伴う渦を作り、渦の強さ(過度)は電子密度に比例することになる。通常の流体がビリヤードのように個々の粒子間の接触衝突に依存して渦を作るのに比べて、本研究においては電子が集団的に作る平均電場によって渦ができるため、個々の粒子間の衝突は不要であって、衝突に伴う散逸効果を分離できるという特色がある。つまり、理想としている完全流体に近づく。

実験技術の面では、この渦が電磁力を媒介とした集団運動である特質を利用して、外部から電氣的に渦分布の初期条件や境界条件を高精度で制御している。計測面では、電子群を磁力線に沿って全て同時に抽出して加速した後蛍光板に衝突させ、発光強度の2次元分布から、電子密度分布を16ビットの有効桁を持たせて、一度に256×256点の位置座標において決定している。この数値データに電磁気学の技法を適用して過度分布ほか重要な物理量の殆どを全てを導出することに成功している。

電子のみで構成される多粒子系で渦運動を実験すること自体は著者の試みが初めてではない。著者の貢献は、このような非中性プラズマの特質を十分に活用して、従来水準を超える高度な実験技術を開発し、その基盤の上にこれまで理論的にも実験的にも知られていなかった渦現象の新しい局面を明瞭に示してみせたところにある。

以上のように、本研究は宇宙や地球の気圏・水圏のダイナミクスに極めて重要な役割を果たしている渦の物理過程に対して、独自の視点から実験的検討を行ったものであり、これまでの認識を更に深める学術的成果を示している。このことから、本学位申請論文は人間・環境学専攻自然・人間共生基礎論講座にふさわしい内容を備えたものと言える。

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。また、平成14年11月11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。