

論文審査の結果の要旨および担当者

報告番号	※ 甲 第 14525 号
------	---------------

氏 名 榊 直人

論 文 題 目

量子乱流中の微小粒子の軌道曲率解析と量子渦同定手法の開発

(On the curvature of small particle trajectories in quantum turbulence and the quantum vortex identification method)

論文審査担当者

主査	名古屋大学	工学研究科	教授	辻 義之
委員	慶応義塾大学	法学部	教授	小林 宏充
委員	名古屋大学	工学研究科	教授	山澤 弘実
委員	核融合科学研究所	ヘリカル研究部	准教授	中野 治久

論文審査の結果の要旨

榎 直人君 提出の論文「量子乱流中の微小粒子の軌道曲率解析と量子渦同定手法の開発」は、量子乱流中の微細粒子の軌道と渦の幾何学的形状を可視化実験及び数値計算から明らかにしている。各章の概要は以下の通りである。

第2章では、PTV解析を用いて、熱対向流中における2次元ラグランジュ軌道中の軌道曲率を計算した。ラグランジュ速度を軌道曲率の大きさによって条件付けし、粒子の振る舞いについて解析を行った。曲率の大きな領域で条件付けされた粒子は、複雑な軌道、あるいは突然の変化を伴う軌道を示す傾向にあった。曲率の小さな領域で条件付けされた粒子は、熱流束に応じて振る舞いが異なった。低い熱流束の場合、垂直方向速度のPDFは、元々の垂直方向速度のPDFよりも明確な2峰性を示した。低い熱流束において曲率で分類すると、粒子は量子渦タングルの複雑な相互作用が分離される。一方、高い熱流束の場合、熱流束に依存する粒子速度はより高い速度で動くようになるために、量子渦によるトラップを簡単に抜け出せるようになる。この時、曲率の低い領域での垂直方向速度は熱対向流の特徴である2峰性を示さず、量子渦の空間密度が上昇し粒子と相互作用を起こしやすくなる。曲率の小さな領域での垂直方向速度PDFにおける常流動成分に対応するピークと、元々の垂直方向速度のピーク位置の変化は、熱流束が小さい時と比べて小さい。量子渦タングルの複雑な相互作用を分離できないことが原因であることが明らかになった。

第3章では、2章での結果を数値的に検討するための有効な手段として、GP乱流シミュレーションにおける量子渦同定手法の開発をおこなった。古典乱流における渦同定手法に着目し、渦近傍における圧力の幾何学的な条件を満たし、さらにその周りに旋回流がある事を満たす手法を開発した。量子渦の場合、圧力を密度に置き換えた上で幾何学的な条件を求める必要があるが、置き換えのみでは適用できない。旋回条件における速度テンソルの判別式が量子渦近傍における速度場に対してはうまく機能しないためである。そこで、旋回条件を量子渦にも適用可能なように開発した。新しい旋回条件は、幾何学的な条件を満たす渦軸候補に垂直な平面における半径の円周上の各チェックポイントにおいてその周方向単位ベクトルとその点における速度場との内積の符号がほぼ一致することを条件としている。以上の操作をGP乱流データに対して適用することで渦を実際に可視化し、それらが渦の性質である凝縮体波動関数、つまり $\psi=0$ を満たす事および、渦軸周りの流線を可視化して旋回流が存在することを確認する事で、この渦同定手法が正しく実行されることが証明された (verification)。この過程で、幾何学的条件は満たすが、旋回条件は満たさない点が生じた。これらは再結合の前後で現れるため、重要である。また、基本的な量子渦のダイナミクス (渦輪の運動および再結合現象) を観測することで、この手法の物理的な正当性を確かめた (validation)。

第4章では第3章の続きとして、開発した量子渦の同定手法の有用性を示す事およびGP乱流から量子渦に関する重要な物理を抜き出す事を目的として、開発した手法を用いて量子渦の統計性について検討を行った。まず、穏やかなGP乱流シミュレーションで解析を行なった。本手法を用いて計算可能な量子渦の総長、平均渦間距離、および本手法独自の量として、旋回領域の最大値を求めた。細かい設定は、数値シミュレーションと実験との間ではあるものの、これらの特徴的な長さは直接あるいは間接的に実験的観測や実験に基づく推定と関係している。旋回領域の最大値は 60ξ (ξ は回復長) 程度となった。この結果は、圧力が周囲の領域よりも低くなる渦芯領域が回復長 ξ よりもかなり大きくなることを示唆している。また、同定した量子渦の渦軸の曲率も計算した。渦軸の曲率のPDFは、小さい曲率領域ではというべきを、また大きな曲率領域ではというべきを示した。密度の高波数スペクトルがより発達した乱流場についても同様の量を解析した。いずれの量も穏やかな乱流の場合の量と比べて変化し、量子渦がより絡まった状態である密度の高波数スペクトルがより発達した乱流の特徴を示した。特に、旋回領域の最大値はとなり、穏やかな乱流の場合と比べるとかなり小さくなっている。また、密度の高波数スペクトルがより発達した乱流中で同定した量子渦の渦軸の曲率も計算した。穏やかな乱流における渦軸の曲率分布と同一となった。先行研究での結果も踏まえると、曲率分布は乱流の発達度合いによらず、定常的であると言える。また、大きな曲率領域での分布は、使用した数値モデルや数値条件に強く依存する可能性が示唆される。一方で、小さい曲率領域はモデルに左右されず、を示す事が示唆された。本研究の同定法は先行研究で扱われた種々の統計量を算出可能な点に加え、新たな統計量である旋回半径や擬渦についてその大きさを初めて評価し、GP乱流中の量子渦の性質を新しく提示した点において有用であるといえる。

本研究では熱対向流中の粒子軌道を、その曲率に基づき分類し、量子渦と粒子の関係等について解析を行った。粒子と量子渦の関係を数値計算の観点から考えるために、大規模計算にも対応可能であり渦の半径 (旋回半径) といった新たな渦の性質を考慮できる量子渦の同定法を開発した。本研究で開発された量子渦の同定法は渦を物理的性質も含めて正しく取り出す事が出来かつ、先行研究で扱われた統計量を算出可能な点で有用である事が示された。また、旋回半径や擬渦といった新たな指標を初めて評価することが出来た点でも有用である。数値的な粒子の軌道曲率解析に対しても十分適用出来る事を示唆している。

以上のように本論文では、量子乱流中の微細粒子の軌道特性を明らかにし、量子渦の検出方法を新たに提案している。これらの評価方法並びに得られた結果は、量子乱流による高効率の冷却手法への応用を実現するために重要であり、工学の発展に寄与するところが大きいと判断できる。よって、本論文の提出者である榎 直人君は博士 (工学) の学位を受けるに十分な資格があると判断した。