

平成 21 年 5 月 29 日現在

研究種目：若手研究 B

研究期間：2007 ～ 2008

課題番号：19740216

研究課題名（和文） 一本の量子渦による量子渦乱流の素過程の研究

研究課題名（英文） Study of the elementary processes of quantum turbulence by one quantum vortex

研究代表者

石黒 亮輔 (ISHIGURO RYOSUKE)

東京理科大学 理学部応用物理学科 助教

研究者番号：40433312

研究成果の概要：

量子乱流の素過程を調べるために一本の量子渦の渦芯の動的な状態を NMR の手法によって観測した。量子渦の渦芯は直径  $10 \mu\text{m}$  程度であり一本の動的な状態の観測は困難であろうと考えられていたが次元 MRI によって渦端点の位置の移動する様子まで観測に成功した。また量子乱流の素過程における Kelvin 波と量子渦の端点と壁との相互作用に関連すると考えられる臨界速度近傍での量子渦長の揺らぎを発見した。

交付額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2007 年度	2,400,000	0	2,400,000
2008 年度	900,000	270,000	1,170,000
年度			
年度			
年度			
総計	3,300,000	270,000	3,570,000

研究分野：数物系科学

科研費の分科・細目：物理学・物性 II

キーワード：量子液体・固体

## 1. 研究開始当初の背景

超流動状態にある量子流体の乱流と、古典的な粘性流体の乱流との類似性が注目され、精力的な理論的や実験的な研究が行われている。これは量子流体はコヒーレンス長程度で平均化作用が働き、さらに渦の循環も量子化されているため、古典流体よりは容易に厳密に理論化できるため、古典流体における最大の難問の一つである乱流に対しての知見を得ることが可能と考えられるためである。

しかし量子乱流においては、超流動状態の量子流体では渦度が量子化されているため、古典乱流において重要な渦の再結合が起きるかどうかが自明でない。また、超流動は粘性のない流れであるため、特に絶対零度でのエネルギーの散逸機構も明らかにはなっていない。しかし、古典乱流で成り立っている Kolmogorov 則が超流動ヘリウムの量子乱流で示されたことは、量子乱流においても渦の再結合やエネルギー散逸が起きていることを示している。

しかし、乱流状態の渦の素過程である、‘渦の再結合’と‘Kelvin 波の減衰’の超流動乱流における直接的な観測は行われていなかった。また、量子渦に特有な問題として量子渦の端点の状態がある。つまり、量子渦の端点はその量子化条件より必ず容器壁と結合していなければならない。容器壁と量子渦の端点の結合も量子乱流にとって重要なパラメーターとなる。

しかし量子渦は超流動体中で実現するため従来の流体観測で行われてきた PTV 法などは困難であると考えられていた。

## 2. 研究の目的

本研究では量子乱流の素過程である量子渦の再結合や Kelvin 波によるエネルギー散逸を一本の量子渦の運動を直接観測することで明らかにすることを目的とした。また一本の量子渦の渦芯の運動の直接観測はこれまで行われておらず、この観測も目的のひとつであった。

## 3. 研究の方法

量子乱流の素過程である量子渦の再結合や Kelvin 波の観測のためには量子渦の渦芯の運動を直接観測する必要がある。このために  $10\ \mu\text{m}$  という比較的太い渦芯を持つ超流動ヘリウム 3A 相の量子渦を NMR によって観測し、量子渦長は一次元 MRI の手法を用いて観測した。またその動的な状態も NMR の連続測定を行うことで観測を行った。

## 4. 研究成果

本研究では細い円筒容器中に超流動ヘリウム 3A 相の一本の量子渦を生成し、これを NMR によって高精度に観測した。量子渦一本の NMR 観測はシグナルが小さいため高精度に観測することは困難であるが計測系を最適化しこれを達成した。この一本の量子渦状態をよく観測するためには円筒内にもともと出来ている織目構造をよく制御する必要があり、その制御法の研究も行った。

さらにこの一本の量子渦のダイナミクスを時間分解能 0.3 秒で観測することに成功した。また、量子渦の長さ方向の一次元 MRI を行うことにも成功し、量子渦が実際に移動しているさまを直接観測できた。

乱流の素過程についてはいくつかその観測を示唆するデータを得ることも出来た。量子渦の端点と壁との結合と Kelvin 波の減衰‘についてはこの現象に深く係わると考えられる量子渦長の揺らぎと臨界回転速度の有限な幅を観測したことで多くの情報を得ることが出来た。この量子渦長の長さの揺ら

ぎは量子渦の臨界回転速度でいどの回転速度で定常的に回転しているときに起こる。また臨界回転速度の有限な幅とは量子渦の長さの揺らぎが観測できる幅である。臨界回転速度が一点で決まらないということは単純には渦が壁にトラップされているということの説明されやすい。しかし、本研究で観測されたことはその有限な幅の中で渦の長さが揺らぐというもので、必然的に量子渦の端点と壁との結合が弱く、強くはトラップされないことを意味している。つまり、臨界回転速度では量子渦のある状態と無い状態の間でエネルギー差が無いため量子渦の長さを変える力は働かない。これは研究目的のひとつである。量子渦の端点と壁との結合状態についての大きな情報である。また、臨界回転速度に有限な幅があるということは完全な平衡状態といえず、量子渦 1 本が円筒容器内の中心に位置しているというモデルでは説明できず、量子渦に Kelvin 波が励起されており、しかもそのエネルギーが一定でないことを意味していると考えられる。つまり非平衡開放系特有の現象で何らかのエネルギー供給と散逸のバランスで揺らぎが起こっていることだと思われている。この散逸は Kelvin 波による減衰ではないかと考えられる。

ただ、量子渦の再結合に関してはこれまで本研究で用いた試料では観測できていない。これは量子渦の再結合が観測領域外で起こってしまっているからと考えられる。

本研究では量子渦のダイナミクスについての多くの情報を得ることが出来、また量子渦長の揺らぎなど予測していなかった現象も観測することが出来た。

## 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 2 件)

- ① R Ishiguro, K Izumina, Y Sasaki, M Kubota, O Ishikawa and T Takagi  
Growth of a single vortex line of  $^3\text{He-A}$  in a narrow cylinder under rotation  
J. Phys.: Conf. Ser. **150** 032033/1-032033/4 (2009) 査読有り
- ② K Izumina, R Ishiguro, M Kubota, Y Sasaki, T Takagi and O Ishikawa,  
Effect of the cooling speed through  $T_c$  on the formation of textures in superfluid  $^3\text{He-A}$   
J. Phys.: Conf. Ser. **150** 032034/1-032034/4 (2009) 査読有り

〔学会発表〕（計 12 件）

- ① R. Ishiguro, K. Izumina, M. Kubota, Y. Sasaki, T. Takagi, and O. Ishikawa  
Growth of a Single Vortex of  $^3\text{He-A}$  in a Narrow Cylinder under Rotation  
25th international conference on Low Temperature Physics Aug07 (2008) Amsterdam
- ② R. Ishiguro, K. Izumina, Y. Sasaki, M. Kubota, O. Ishikawa, and T. Takagi  
Propagation of vortex of  $^3\text{He-A}$  in the narrow cylinder  
QFS2007, International Symposium on Quantum Fluids and Solids August 1-6 (2007) Kazan, Russia
- ③ K. Izumina, R. Ishiguro, Y. Sasaki, M. Kubota, O. Ishikawa, and T. Takagi  
High rotation speed measurements of superfluid  $^3\text{He-A}$   
QFS2007, International Symposium on Quantum Fluids and Solids August 1-6 (2007) Kazan, Russia

〔図書〕（計 0 件）

〔産業財産権〕

○出願状況（計 0 件）

名称：  
発明者：  
権利者：  
種類：  
番号：  
出願年月日：  
国内外の別：

○取得状況（計 0 件）

名称：  
発明者：  
権利者：  
種類：  
番号：  
取得年月日：  
国内外の別：

〔その他〕

2009 年度 日本物理学会 秋季大会においてシンポジウム講演の予定である。

6. 研究組織  
(1) 研究代表者

( )

研究者番号：

(2) 研究分担者  
( )

研究者番号：

(3) 連携研究者  
( )

研究者番号：

