

令和 5 年 6 月 10 日現在

機関番号：10103

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2019～2022

課題番号：19K03734

研究課題名(和文)数と形状を制御した量子渦輪によるボース凝縮体ダイナミクス研究への新たなアプローチ

研究課題名(英文)Improvements of the investigation on Bose condensate state with well-controlled quantum vortex ring

研究代表者

柴山 義行 (Shibayama, Yoshiyuki)

室蘭工業大学・大学院工学研究科・准教授

研究者番号：20327688

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,300,000円

研究成果の概要(和文)：本研究の目的は超流動ヘリウム4中にサイズ、数、運動方向を制御した量子渦輪を発生できる量子渦輪発生器を開発し、量子渦のダイナミクスを解明する新たな実験手段を実現することである。試作した量子渦輪発生器(ノズル径 0.3 mm)を超流動および常流動ヘリウム中に浸しその振動特性の挙動の違いから、量子渦輪発生の有無を検証した。常流動中では圧電振動板の振動振幅は単に励起電圧に比例するだけだが、超流動中ではある閾値以上の励起電圧で振動振幅やQ値が大きく減少することを見出した。他研究グループの振動細線による量子渦輪発生実験と同様な現象であり、本装置でも量子渦輪が発生していることを確認した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究では、数、形状、運動方向全てを制御した量子渦輪を発生できる量子渦輪発生器の開発に取り組んだ。これまでこれら全てを制御した量子渦発生法は確立されていない。この実現が本研究の学術的意義である。この量子渦輪発生器を複数設置することで、量子渦輪同士の衝突実験が可能となる。さらに2006年にLathropらが報告した量子渦可視化と組み合わせることで、計算機シミュレーションで予言されている量子渦の衝突や再結合過程を直接検証する研究に発展させることが可能となる。本研究により良く制御された量子渦発生法を確立することで、ボース凝縮体のダイナミクスの実験的研究に新たなアプローチをもたらすことが可能となる。

研究成果の概要(英文)：This study aims to develop a quantum vortex ring generator capable of creating a well-controlled quantum vortex ring in superfluid helium-4 regarding size, number, and motion direction, and to realize a new experimental method for investigating quantum fluid. The prototype generator has a jet nozzle of 0.3 mm in diameter and two piezoelectric diaphragms: a driver and a receiver. Applying impulse voltage to the driver causes jet flow of liquid helium, and the receiving diaphragm detects the response. The creation of a quantum vortex ring in superfluid helium was examined based on the vibration characteristics of the diaphragm. It was found that the Q-value of the diaphragm significantly decreased above a specific threshold excitation voltage. This phenomenon is similar to previous studies in the quantum vortex ring generation using vibrating wire, indicating the present quantum vortex ring generator can create a quantum vortex ring.

研究分野：低温物理学

キーワード：量子渦 渦輪 超流動ヘリウム 低温物理学 巨視的量子効果 巨視的量子現象 強相関ボース凝縮体

## 1. 研究開始当初の背景

ボース凝縮体に特有な巨視的量子状態の1つに量子渦の存在がある。量子渦は循環の量子化により発生したボース凝縮体中の位相欠陥である。量子化された循環は系の保存量であるため、発生した量子渦はボース凝縮体の運動に伴い安定な位相欠陥として運動する。このボース凝縮体のダイナミクスを理解するために最も重要な研究の1つが量子渦の生成消滅過程、量子渦同士との再結合過程の解明であり、理論と実験の両面から現在盛んに研究が行われている。

特に超流動ヘリウム4の量子渦は渦芯直径が1 Å程度と非常に小さく、渦糸近似が良く成り立つ。この様な特徴から、ボース凝縮体の運動を記述するGross-Pitaevskii方程式を数値的に解くことで量子渦の運動や再結合過程の計算機シミュレーション(引用文献[1])が行われている。一方、実験では、

- (1) 超流動ヘリウム4中で直径数10 μmの振動細線をある閾値以上で激しく振動させて量子渦輪を発生させることによる、量子渦生成メカニズムの研究(引用文献[2])
- (2) 超流動ヘリウム4中に自然発生している量子渦糸を、固体水素微粒子をトレーサとして可視化し、量子渦糸のダイナミクスや量子渦糸の再結合過程を直接観察する研究(引用文献[3])

が行われている。

一方、これまでの量子渦の実験的研究には1つの大きな課題がある。それは数、形状、運動方向を制御した量子渦生成法の確立である。(1)の振動細線による量子渦輪発生法では、発生する渦輪の数や形状、運動方向を自由に制御できないため、個々の渦輪の運動や渦輪同士の再結合過程を解明するのは難しい。(2)の量子渦の可視化実験では量子渦再結合過程の直接観察に成功しているが、偶然生じた量子渦が偶然再結合するのを待たなくてはならない。また、開いた形状の量子渦糸は両端が装置壁面や液面で終端されており、その運動は境界条件に大きく依存する。従って引用文献[1]の計算機シミュレーションにあるような量子渦の再結合過程を検証するためには、良く制御された量子渦を発生させ、その衝突実験を実現しなければならない。この『良く制御された量子渦』とは、数、形状、運動方向の3つが制御された量子渦である。良く制御された量子渦を発生することのできる新たな実験手法を開発することで、ボース凝縮体のダイナミクスに対する実験的研究に新たなアプローチをもたらすことが可能となる。

## 2. 研究の目的

本研究の目的は、超流動ヘリウム4中に数、大きさ、運動方向を制御した量子渦輪を発生できる量子渦輪発生器を開発し、ボース凝縮体の実験的研究、特に超流動ヘリウム4中に発生する量子渦のダイナミクスの解明に対する新たな研究手段を実現することである。

量子渦輪発生器の基本的なアイデアは、空気中で古典渦輪を発生させる空気砲と同じである。内部が空洞になった容器を超流動ヘリウム4中に用意する。容器内に圧電振動板を置き、その対向面に0.1 mm程度のノズルを設ける。圧電振動板をパルス駆動するとノズルから超流動ヘリウム4が瞬間的に噴出する。ノズル近傍における超流動速度場が臨界速度を超えると、ノズル近傍に量子渦輪が発生する。発生する渦輪の大きさはノズル径、その数は振動板のパルス駆動回数、その運動方向はノズルの向きで決まる。従って数、大きさ、運動方向の全てを制御して量子渦輪を発生することができる。また渦輪はドーナツ状に閉じた形状を持つため、装置壁面などの境界条件にはよらず自身の径のみで決まる自己誘導速度で等速直線運動を行う。従って、良く制御された条件で量子渦のダイナミクスを実験的に研究することが可能となる。

## 3. 研究の方法

本研究の目的である数、形状、運動方向を制御した量子渦輪を超流動ヘリウム4中に発生できる量子渦輪発生器の開発を行うため、本研究では

- (1) 量子渦輪発生器駆動部に用いる圧電振動板の、液体ヘリウム4温度での振動特性の測定と、量子渦輪生成条件の決定
- (2) 液体ヘリウム4の排気冷却による、到達目標温度1.5 Kのクライオスタットの製作
- (3) (1)で決定した条件に基づき量子渦輪発生器を試作し、超流動ヘリウム4中での量子渦輪の発生実験

を行った。

### (1) 液体ヘリウム温度での圧電振動板の振動特性の測定

研究室既設の無冷媒ヘリウム4冷凍機(最低到達温度2.2 K)により、液体ヘリウム温度における圧電振動板の振動特性の測定を行った。圧電振動板と平行に固定電極を設け平行平板コンデンサを構成する。極板間にバイアス電圧 $V$ を印加するとコンデンサ容量 $C$ に応じた電荷 $Q = CV$ が固定電極上に誘起される。圧電振動板に交流電圧を印加し振動させると極板間距離が変化し、 $C$ が変化する。その結果 $Q$ が時間変化し電流が流れる。この電流をロックイン増幅して測定することで圧電振動板の駆動量速度とその周波数特性を測定することができる。

## (2) 到達目標温度 1.5 K のクライオスタットの製作

超流動ヘリウム 4 中での研究を行うため、ガラスデュワーを用いた液体ヘリウム 4 の排気冷却によるクライオスタットとその排気システムを準備した。

## (3) 量子渦輪発生器の試作と超流動ヘリウム中での量子渦輪の発生実験

(1) の研究で得た知見を元に量子渦輪発生器を試作した。(2) で準備したクライオスタットに試作した量子渦輪発生器をセットし、液体ヘリウム 4 中でその動作確認を行った。量子渦輪発生を検証は圧電振動板の共鳴の励起電圧依存性の測定により行った。ノズルからの噴出によって量子渦輪を生成するには、臨界速度以上で超流動ヘリウム 4 を噴出させる必要がある。渦輪の発生にはエネルギー散逸が伴うので渦輪の発生の有無で圧電振動板の  $Q$  値は大きく変化する。従って、圧電振動板の共鳴の、 $Q$  値の励起電圧依存性の測定から量子渦輪の励起の検討を行った。

## 4. 研究成果

### (1) 液体ヘリウム温度での圧電振動板の振動特性と量子渦輪生成条件の決定

#### ① 液体ヘリウム温度での圧電振動板の振動特性

3.5 K、真空中で量子渦輪発生器駆動機構に用いる圧電振動板の振動特性を測定し、量子渦輪発生に十分な駆動速度で圧電振動板を駆動させるための条件を探索した。図 1 に、直径 15 mm の圧電振動板((株)村田製作所製, 7BB-15-6)の、励起電圧 50 mV<sub>pp</sub> での周波数特性(振動振幅  $\delta$  と位相差  $\phi$ )の結果を示す。9.76 kHz に鋭い共振ピークが存在する。図 2 には、共振周波数 9.76 kHz における圧電振動板の振動速度  $v_p$  の励起電圧  $V_{osc}$  依存性を示す。駆動速度は励起電圧 50 mV<sub>pp</sub> 程度までの範囲で励起電圧に比例し、約 150  $\mu$ m/s に達した。それ以上の励起電圧では振動速度がなまる傾向が見られた。このなまりは圧電振動板の非線型性によるものである。量子渦輪発生器のノズル径を 0.1 mm とし、矢野らによる振動細線を用いた量子渦輪生成の結果(引用文献[2])と同じ臨界速度(約 360 mm/s)がノズル近傍で実現することで量子渦輪が発生すると仮定した場合、渦輪発生に必要な圧電振動板の駆動速度は約 16  $\mu$ m/s と見積もられる。従って、励起電圧により圧電振動板駆動速度を容易に制御でき、量子渦輪発生のための駆動条件を充分達成できることを確認した。

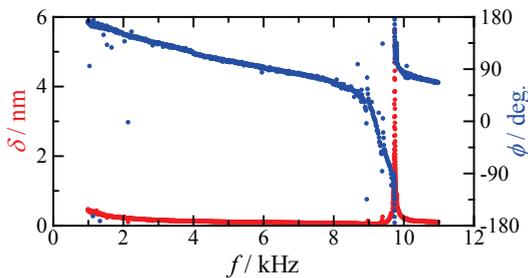


図 1 : 3.5 K 真空中における圧電振動板の振幅  $\delta$ 、位相差  $\phi$  の周波数依存性。

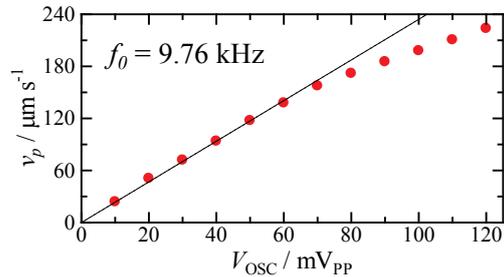


図 2 : 3.5 K 真空中における、共振周波数 9.76 kHz での圧電振動板の振動速度  $v_p$  の励起電圧依存性。

#### ② ヘルムホルツ共鳴を利用した量子渦輪発生器のデザイン

①の研究により、臨界速度という観点では圧電振動板を利用した超流動ヘリウム 4 の噴出により量子渦輪発生条件を達成できることを明らかにしたが、一方、圧電振動板をその共振周波数で駆動すると圧電振動板の内部摩擦に起因する発熱により超流動状態が破壊される可能性があることが明らかとなった。この発熱を抑えて圧電振動板を駆動するために、圧電振動板の共振の代わりにヘルムホルツ共鳴を駆動機構として利用できないか検討し、ヘルムホルツ共鳴器の試作を行った。ヘルムホルツ共鳴器の共鳴周波数は容器の体積、開口部の長さ、開口部の断面積に依存する。量子渦輪発生器を模して試作したヘルムホルツ共鳴器では約 136 Hz にヘルムホルツ共鳴を観測することができた。

一方このヘルムホルツ共鳴はノズルの形状に大きく依存し、目標としている内径 0.1 mm のノズルではヘルムホルツ共鳴が大きく抑制されてしまうことが明らかとなった。設計の異なる 3 種のノズルを用意しそれぞれのノズルにおけるヘルムホルツ共鳴の共鳴周波数と  $Q$  値を測定し、(1) オリフィスをノズル出口に設置し、(2) ノズル長をノズル内径程度以下に抑えることで、内径 0.3 mm 以下のノズルでも十分ヘルムホルツ共鳴を励起できることを明らかにした。

### (2) 液体ヘリウム 4 の排気冷却による、到達目標温度 1.5 K のクライオスタットの製作

開発したクライオスタットの最低到達温度 1.3 K で、1.4 K を安定して 8 時間以上持続できることを確認した。これは本研究の実施に十分な能力を持つ。

(3) 量子渦輪発生器の試作と超流動ヘリウム中での量子渦輪の発生実験

(1)②の研究から、ヘルムホルツ共鳴を駆動機構とした量子渦輪発生器をデザインし、その試作を行った。図3に試作した量子渦輪発生器を示す。無酸素銅でできた円筒容器の両端に圧電振動板を取り付け、片方をドライブ電極、もう片方をレシーブ電極とする。円筒容器中央に真鍮製のノズルを取りつける。(1)②の研究から、ノズル内径  $\phi 0.3$  mm, ノズル長 0.3 m とした。ドライブ電極に交流電圧を印加し、ヘルムホルツ共鳴を励起する。励起されたヘルムホルツ共鳴をレシーブ電極で検出する。円筒容器の内容積を  $V$ , ノズルの断面積と長さをそれぞれ  $S$ ,  $L$ , 液体ヘリウム4の音速を  $v$  とすると、ヘルムホルツ共鳴周波数  $f$  は

$$f = (v/2\pi) \cdot (S/LV)^{1/2}$$

で与えられる。本装置を液体ヘリウム4中に浸し、温度一定の条件で周波数掃引を行い共鳴曲線の測定を行う。ヘルムホルツ共鳴の有無から作成した量子渦輪発生器の基本的な動作確認を行い、常流動及び超流動中それぞれにおける共鳴曲線の励起電圧依存性の測定から、量子渦輪の励起を検証した。

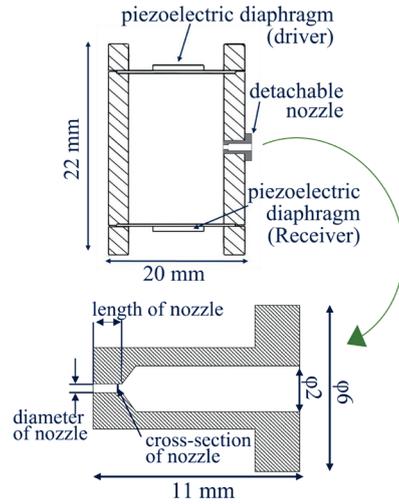


図3: 本研究で開発した、ヘルムホルツ共鳴を駆動機構とした、量子渦輪発生器。

図3に(a)常流動、及び(b)超流動ヘリウム4中における共鳴曲線の励起電圧依存性を示す。縦軸(レシーブ電極の応答電圧)は、ドライブ電極の励起電圧(常流動中では  $0.1 V_{pp}$ , 超流動中では  $0.01 V_{pp}$ )で規格化してある。低励起電圧では常流動中では 940 Hz, 超流動中では 1311 Hz に共鳴が観測された。これらは各温度における液体ヘリウム4の音速から期待されるヘルムホルツ共鳴周波数と一致する。また、真空中ではこれらの共鳴は一切観測されない。従って装置を液体ヘリウムに浸した状態で観測された共鳴はヘルムホルツ共鳴であり、本量子渦輪発生器でヘルムホルツ共鳴を励起することが可能であることを確認することができた。

常流動中と超流動中の共鳴曲線を比較すると、超流動中では共鳴曲線のピークが鋭く、 $Q$ 値が大きく増加していることがわかる。これは超流動ヘリウム4が粘性0の超流体であることに起因する。常流動中でのドライブ電圧で規格化した共鳴曲線は、図3(a)に示すようにドライブ電圧には依存しない。このことは、常流動中ではレシーブ電極の応答はドライブ電圧の1次に比例することを意味する。一方、図3(b)に示すように超流動中では、閾値以上の励起電圧(約  $0.05 V_{pp}$ )以上で $Q$ 値が大きく減少する。これは圧電振動板を激しく振動させた際に新たなエネルギー散逸が生じていることを示している。この現象は矢野らによる振動細線を用いた量子渦輪発生の実験(引用文献[2])と同様な現象であり、本装置でも量子渦輪が発生していることを確認した。

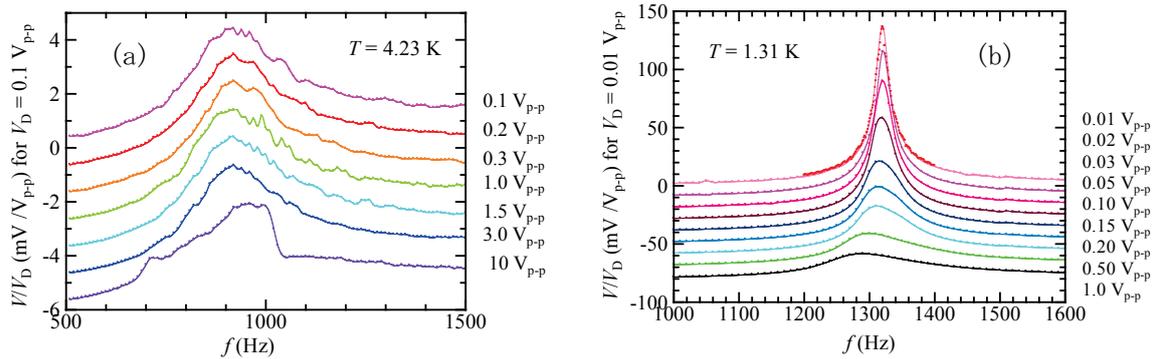


図4: (a)常流動ヘリウム4中( $T = 4.23$  K)と(b)超流動ヘリウム4中( $T = 1.31$  K)での、圧電振動板の共鳴曲線の励起電圧依存性。

<引用文献>

- [1] M. Tsubota, *et al.*, *Phys. Rev. B*, **62**, 11751 (2000).
- [2] H. Yano, *et al.*, *Phys. Rev. B*, **81**, 220507(R) (2010).
- [3] G. P. Bewley, *et al.*, *Nature*, **441**, 588 (2006).

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計7件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 4件）

1. 発表者名 Yusei Yoshii, Susumu Kumaki, Reio Kida, and Yoshiyuki Shibayama
2. 発表標題 Development of a Quantized Vortex Ring Generator
3. 学会等名 29th International Conference on Low Temperature Physics (LT29) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Hiroto Koitabashi and Yoshiyuki Shibayama
2. 発表標題 A Cryogenic Current Pre-Amplifier using a HBT OPamp
3. 学会等名 29th International Conference on Low Temperature Physics (LT29) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Yusei Yoshii, Susumu Kumaki, Reio Kida, and Yoshiyuki Shibayama
2. 発表標題 Development of an instrument for experimental study of quantized vortex
3. 学会等名 International Conference on Ultra Low Temperature Physics (ULT2022) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Hiroto Koitabashi and Yoshiyuki Shibayama
2. 発表標題 Development of a Cryogenic Current Pre-Amplifier using a HBT OPamp
3. 学会等名 International Conference on Ultra Low Temperature Physics (ULT2022) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 熊木進, 柴山義行
2. 発表標題 量子渦輪発生のためのヘルムホルツ共鳴器の開発
3. 学会等名 第56回応用物理学会北海道支部学術講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 熊木進, 柴山義行
2. 発表標題 量子渦輪に用いるヘルムホルツ共鳴器の開発
3. 学会等名 日本物理学会 第76回年次大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 吉井佑成, 山田文哉, 斎藤剛, 柴山義行
2. 発表標題 量子渦輪発生器に用いる圧電振動板の振動特性
3. 学会等名 日本物理学会 2019年秋季大会(物性)
4. 発表年 2019年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8 . 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------