

令和 3 年 6 月 2 日現在

機関番号：32612

研究種目：若手研究

研究期間：2018～2020

課題番号：18K13503

研究課題名（和文）超流動ヘリウム中の量子渦の微視的ダイナミクスの解明

研究課題名（英文）Elucidation of microscopic dynamics of quantum vortex in superfluid helium

研究代表者

永合 祐輔（Nago, Yusuke）

慶應義塾大学・理工学部（矢上）・助教

研究者番号：50623435

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,100,000円

研究成果の概要（和文）：本研究は、量子乱流状態の臨界的振舞において重要な要素である量子渦の運動状態の解明を目的とし、以下に示すナノ電気機械システムおよび渦生成装置を開発し、超流動ヘリウム中における渦、乱流生成実験を行った。

1. 量子渦に対する高感度センサーとしてカーボンナノチューブや光硬化性樹脂を用いたナノスケールの架橋ワイヤー型（または梁型）の機械共振装置を作製した。
2. 量子渦環を生成させるための細孔板振動子を作製し、超流動ヘリウム中で量子渦生成に伴う振動の散逸を観測した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

超流動ヘリウム中の量子渦・量子乱流はシンプルな構造の超流動流の渦で構成されるため、その本質の理解は、古典流体やプラズマ中の渦・乱流現象や宇宙における位相欠陥など広範な分野の物理の理解に密接に関わる。量子乱流に関わる量子渦の微視的な運動状態の解明には、ナノサイズの微小なセンサーが必須であり、本研究によって量子渦のナノセンシング確立に進捗が得られたことは意義が大きい。また、渦の生成・制御が実現できる渦環生成装置の開発は、今後どのような渦がどのように振舞うかを直接観測できる実験系の実現に向けて大きく貢献したと言える。

研究成果の概要（英文）：The purpose of this research is elucidation of motion of quantum vortex which is one of the important factors in a critical behavior of quantum turbulence. We developed nanoelectromechanical systems (NEMS) and vortex generating devices, and performed preliminary experiments of vortex and turbulence generation in superfluid helium, as follows.

1. We fabricated nanoscale mechanical resonators of bridged wire (or beam), made of a carbon nanotube or photo-curing resin, as high sensitivity sensors for quantum vortices.
2. We fabricated orifice plate oscillators for generation of quantum vortex rings, and observed dissipation of oscillation due to vortex generation in superfluid helium.

研究分野：低温物性

キーワード：超流動 量子渦 量子乱流 量子流体 トポロジー マイクロ・ナノデバイス

様式 C-19、F-19-1、Z-19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

超流動流の渦である量子渦は、量子性が巨視的に現れるという点において基礎物理学的に興味深い上、超伝導におけるデバイス応用や、量子渦で形成される量子乱流状態の古典流体・磁気乱流などの類似性等、広範な分野に関連する関心の高いテーマの一つであり、長年にわたり精力的な研究が進んできた。超流動ヘリウムでは、熱対向流、イオン照射、振動物体などを用いた量子渦・量子乱流の生成、減衰実験が行われており、量子性特有の臨界的振舞や古典乱流との類似性・相違性などが明らかになっている。しかし、乱流の生成・減衰に関わる量子渦糸のダイナミクスや素励起放出などの微視的描像は実験的には未解明である。これは、流れやイオン、音波などの実験は、測定スケールが実験セル(生成器検出器間の距離)に相当するため、乱流中の平均渦糸間隔に比べて非常に大きく、個々の渦糸の情報を得るのが難しいことが考えられる。細線振動子などのマイクロサイズの振動物体による実験も行われているが、それでも渦糸に比べて十分大きいスケールである。量子渦の微視的なダイナミクスを解明するためには、一本の渦糸の挙動が検出できるサイズの超微小高感度センサーが強く望まれる。

2. 研究の目的

本研究は、量子乱流状態の臨界的振舞において重要な要素である量子渦の微視的なダイナミクスの解明を目的とし、理想的に一本の渦糸に対する高感度な力学的センサーであるナノ電気機械システム(NEMS)の開発に取り組む。具体的には、トレンチ構造を施した基板上に架橋させたカーボンナノチューブ(CNT)を土台とした超伝導ナノワイヤー(NW)共振器、光硬化性樹脂や窒化ケイ素を用いた架橋梁構造のナノビーム(NB)共振器を作製する。また、乱流中の量子渦の振舞を解明するためには、量子渦のサイズ、形状、数が制御された単純モデル化した系でその渦の運動状態を調べるのは効果的である。そこで、量子渦環を制御して超流動中に発生させ、それをNEMS共振器で検出することを目的として、量子渦環を生成させるための細孔板振動子の開発にも取り組む。

3. 研究の方法

以下に示す手順でセンサーを作製する。

(1) 超伝導 NW 共振器

微細加工によってSiO₂/Si基板上にトレンチ構造を作製する。レーザーリソグラフィ、プラズマエッチング装置を用いて、SiO₂膜下に隙間(アンダーカット)構造を施したトレンチを作製する。アンダーカットは後に示すNbN電極スパッタ時に接地面と電気的に切り離すためのものである。この基板に、電子線リソグラフィと電子銃蒸着によってCNT成長の触媒であるCo薄膜を高精度に位置決めして蒸着する。その後、アルコールCVDを用いてCNTを作製する。トレンチ上に架橋できたCNTに対して、電極としてNbNをスパッタ蒸着することで、NbN/CNT架橋NWが完成する。

(2) 光硬化性樹脂製 NB 共振器

3D光造形装置を用いて、光硬化性樹脂を用いたNB共振器を作製する。基本的な構造は(1)と同様にアンダーカットを施したトレンチ上に架橋させる。電極として、Au/Cr薄膜を蒸着する。

(3) 窒化ケイ素製 NB 共振器

(1)と同様のSi基板に窒化ケイ素(SiN)を蒸着したものを準備し、(2)と同様な架橋梁構造の共振器を作製する。

(4) 渦環生成装置：細孔板振動子

3D光造形装置を用いて、光硬化性樹脂を用いた細孔板を作製する。板状の構造物に真円の細孔を作製する。超伝導細線振動子(Vibrating Wire:VW)を作製し、そこに細孔板を接着する。以上の装置は、有限要素法による数値計算によって共振周波数を見積もった上で、設計する。NEMS共振器(1)~(3)については、共振周波数がMHzオーダーになるよう設計する。渦環生成装置については、まずファインマンの臨界速度 v_L から、細孔から渦環が発生する流速を見積もる。しかし、バルク液体ヘリウムには、超流動相転移時に位相欠陥として自発生成した渦糸が物体表面に付着した状態で残留することが知られており、これまでに熱対向流、回転ヘリウム、振動物体等の実験によって、付着残留渦の不安定性が引き起こす量子乱流生成が報告されている。したがって、細孔から渦環が発生する速度よりも低い速度で細孔板振動子表面に付着した残留渦が不安定性を引き起こす状況は好ましくない。付着残留渦による乱流生成の臨界速度 v_c は周波数の平方根に比例することが知られており、これと上記のファインマンの臨界速度 v_L の見積もりから、 $v_L < v_c$ となるような、振動子の共振周波数と細孔のサイズを決定し、設計を行う。作製したセンサーを、⁴He冷凍機を用いて温度約1Kの超流動ヘリウム中で共振測定を行い、正常な共振を示すローレンチアン型の周波数スペクトルの確認と、量子渦・量子乱流生成に伴う振動の散逸を観測する。

窒化ケイ素製NB共振器(3)は、第2年度より茨城県つくば市の物質材料研究機構との共同研究のもと開発を進めていたが、コロナ禍に伴う緊急事態宣言、ロックダウンにより先方への出張が困難となったため、電極基板の作製までで中断となり、その後の目途が立たず開発研究が休止

となった。したがって、NEMS 開発に関しては3年のうち前半がNW共振器(1)、後半が樹脂製NB共振器(2)の開発を主として実質的に進めた。また、本研究における超流動ヘリウム実験は、第2年度までは共同研究先の東京大学低温センターにて、冷凍機を準備し、超伝導マグネットを自作して進めていたが、同様にコロナ禍の影響を受けて、最終年度は予定通り実験を進めることができなかった。そこで、代わりに慶應大学内で測定するための冷凍機の準備を行った。

4. 研究成果

・NEMS共振器の開発

最初に、研究開始当初からの構想であった超伝導 NbN/CNT ナノワイヤー共振器の開発を行った。図1にSiO₂/Si基板のトレンチ上に架橋させたNbN/CNTの電子顕微鏡写真を示す。SiO₂の下にある隙間(アンダーカット)のサイズおよびトレンチの深さは、微細加工時のマスクとエッチングのガス物質、エッチングパワーの条件を調整し、最適条件を見出した。蒸着したNbN薄膜がアンダーカットによってトレンチ底の接地面とショートしていないことが確認できた。NWの機械共振による量子渦の生成・検出を行うため、できる限り高振幅振動の実現が必要となる。そこで、先行研究の典型的な架橋CNTを用いた共振器に比べて十分長い直線型のNWの作製に取り組み、その結果直径100nm、最大長さ~13μmの架橋NWの実現に成功した。予備実験としてNWの電気抵抗の温度依存性を測定し、バルクNbNの超伝導転移温度に近い約15Kで超伝導転移を起こすことを確認した(図2)。電気的導通のとれた最大長さ~13μmの非常に長い架橋NW共振器の実現に成功したことが新しい成果である。

架橋NWを用いた量子乱流生成検出装置の準備を行った。超伝導細線振動子(VW)と音叉型水晶振動子を渦・乱流生成装置、架橋NW共振器を渦検出器とし、超流動ヘリウム中で生成した量子渦がNW共振器まで到達して検出できるように、各振動子とNW基板を互いの間隔を微調整して試料台上に配置した。架橋NW共振器はVWと同様、磁場印加駆動法を用いて共振させる。⁴He冷凍機を用いてで温度1.3Kの超流動ヘリウム中で測定を行った。超伝導細線振動子と音叉型水晶振動子においては正常動作確認し、液体の粘性抵抗の温度依存性、量子乱流遷移を観測した。しかし、NW共振器については、共振信号の観測にまで至らなかった。原因として特に長いNW共振器はCNTが直線形でないことや本実験方法で作製したCNTでは架橋クランプの強度が弱く正常に強制振動しない可能性が考えられる。作製方法や駆動方法に改善の必要がある。

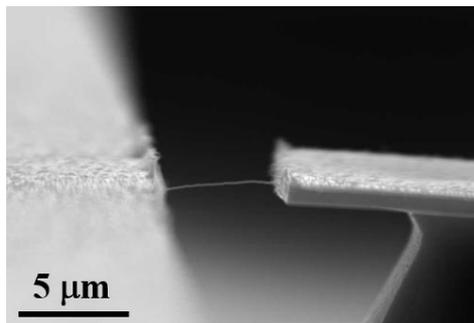


図1. NbN/CNT ナノワイヤー共振器の電子顕微鏡写真

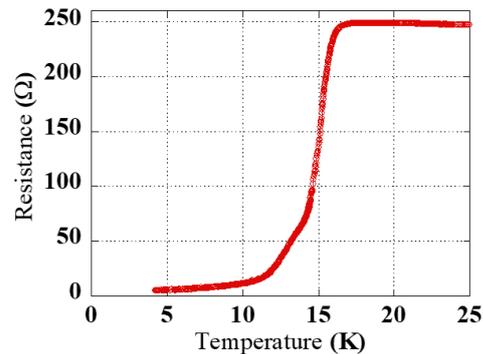


図2. ナノワイヤーの電気抵抗の温度依存

以上より、NbN/CNT ナノワイヤー共振器の開発は途中まで進捗したところで中断し、これと平行して光造形法を用いた光硬化性樹脂製ナノビーム共振器の開発に着手した。この方法は初めての試みであり、CNTに比べればサイズ制限があるが原理的に100nm程度の太さのNEMSデバイス作製が可能である。研究方法の(1)や(3)のNEMS作製方法では微細加工に相当な時間と労力を要するのに対し、光硬化性樹脂を用いた本デバイスが実現できれば、複雑な加工プロセスを必要としない容易な作製方法が確立できる。本研究では図1の構造と同様なアンダーカットを施したトレンチ構造上に架橋した梁構造の作製を試み、作製条件出しによって最小太さ300nm、最長30μmの架橋NBの実現に成功した。また、高精度ピンセットやマイクロマニピュレータを用いた構造物の基板への移動および固定の方法を確立した。電極はNbN/CNTナノワイヤーの場合と同様の方法で直接Au/Cr薄膜を蒸着することで作製した。しかし、光造形法では造形時の露光ブロックの段差等による電極薄膜の段切れにより電極間の導通がとれない試料もあった。そこで、さらに光造形装置の加工条件の調整により、ブロック段差の是正と構造の改良を行った。現在も引き続きさらなる改良に取り組んでいる。

・渦環生成装置の開発

超流動ヘリウム中で量子渦環を生成、制御するための細孔板振動子を開発した。光造形法により真円孔直径4~100μmの細孔板を作製した。太さ30μmの超伝導細線を半円形に張った超伝導細線振動子(VW)を作製し、マイクロマニピュレータを用いてサイズ1~2mmの細孔板のVW上への高精度な配置、接着を行なった。この振動子について⁴He冷凍機を用いて、温度約1.5Kの超流動ヘリウム中で共振測定を行った。図3に見られるように、ローレンチアン型のスペクトル波形が得られ、正常な共振の振舞を示すことを確認できた。さらに図3における波形のピーク値が

ら振動子の振動速度を見積もり、ドライブ依存性を測定した(図4)。超流動中で常流動成分の粘性によるストークス抵抗を示す振舞(図の直線)と高振動振幅領域で量子渦生成に伴う振動の散逸(直線からのずれ)を観測した。この散逸は量子乱流が発生していることを示している。細孔から量子渦環が放出されている可能性があるが、これを実証するためにさらなる測定と解析が必要である。

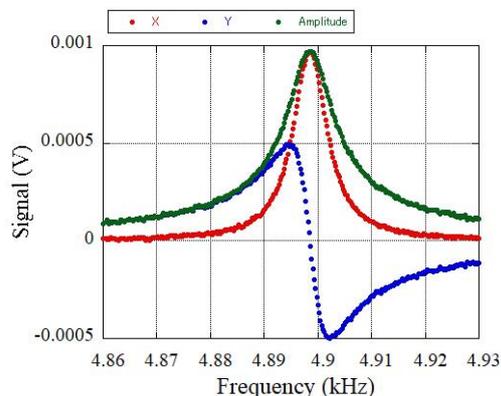


図3. 温度 1.5K における孔サイズ $4\mu\text{m}$ の細孔板振動子の周波数スペクトル

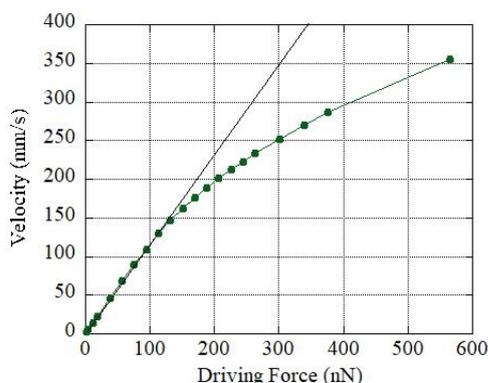


図4. 細孔板振動子の振動速度の駆動力依存性

近年の世界的なヘリウムタイトで国内でのヘリウム供給制限と価格高騰によって従来よりも液体ヘリウム実験の遂行が難しい中、さらにコロナ禍の影響によって微細加工を行っていた物質材料研究機構や液体ヘリウムが潤沢に利用できる東大低温センターへの出張を自粛せざるを得ない状況となってしまう、研究の滞りがあった。そこで急遽、学内で試料作製および実験ができるよう研究計画を練り直すことによって困難に対処した。また、研究途中に NEMS 共振器の共振信号の観測実験が進捗しない困難があったが、別の NEMS 共振器作製方法を考案してその開発に着手した。このことにより、量子渦センサーの開発に向けて新たな成果を得ることができた。最近、海外で NEMS 共振器の超流動実験への応用(A. M. Guénault et al., PRB 101, 060503(R) (2020) など)や NEMS 共振器による量子渦の挙動検出の理論考察(V. B. Eltsov et al., JETP Lett. 111, 389(2020))などナノスケールでの量子渦・量子乱流の研究が盛んに行われており、本課題研究の成果は、まだ開発の余地とさらなる実験の発展性があるものの量子乱流研究において注目すべき重要な位置づけとなる。今後の展望においては、他の共同研究で進めているフォノン生成検出デバイスの開発やヘルムホルツ共鳴装置による流れの実験の技術を本課題研究に応用することで、量子乱流中から放出されるフォノンの検出や量子渦環生成などの実験への発展が期待される。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計4件（うち査読付論文 4件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 4件）

1. 著者名 Tomoyuki Tani, Yusuke Nago, Satoshi Murakawa, and Keiya Shirahama	4. 巻 90
2. 論文標題 Evidence for 4D XY Quantum Criticality in 4He Confined in Nanoporous Media at Finite Temperatures	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Journal of the Physical Society of Japan	6. 最初と最後の頁 033601-1~5
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.7566/JPSJ.90.033601	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -
1. 著者名 T. Makiuchi, K. Yamashita, M. Tagai, Y. Nago, and K. Shirahama	4. 巻 123
2. 論文標題 Multiple Diffusion-Freezing Mechanisms in Molecular-Hydrogen Films	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Physical Review Letters	6. 最初と最後の頁 245301-1~5
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1103/PhysRevLett.123.245301	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -
1. 著者名 Makiuchi Takahiko, Yamashita Katsuyuki, Tagai Michihiro, Nago Yusuke, Shirahama Keiya	4. 巻 88
2. 論文標題 Elastic Anomaly of Thin Neon Film	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Journal of the Physical Society of Japan	6. 最初と最後の頁 034601-1~6
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.7566/JPSJ.88.034601	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -
1. 著者名 Makiuchi T., Tagai M., Nago Y., Takahashi D., Shirahama K.	4. 巻 98
2. 論文標題 Elastic anomaly of helium films at a quantum phase transition	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Physical Review B	6. 最初と最後の頁 235104-1~10
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1103/PhysRevB.98.235104	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

〔学会発表〕 計12件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 4件）

1. 発表者名 谷智行, 永合祐輔, 村川智, 白濱圭也
2. 発表標題 ナノ多孔体Gelsil中ヘリウム4の流れ特性と超流動臨界指数
3. 学会等名 日本物理学会2020年秋季大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 鈴木貴博, 巻内崇彦, 永合祐輔, 白濱圭也
2. 発表標題 弾性異常で見たグラファイト上 4He 薄膜の量子相転移
3. 学会等名 日本物理学会第2020年秋季大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 桑原啓佑, 鈴木貴博, 永合祐輔, 白濱圭也
2. 発表標題 六方晶窒化ホウ素表面上ヘリウム4薄膜の超流動と弾性
3. 学会等名 日本物理学会第2020年秋季大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 鈴木貴博, 巻内崇彦, 永合祐輔, 白濱圭也
2. 発表標題 グラファイト上4He薄膜の弾性効果
3. 学会等名 日本物理学会第2019年秋季大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 鈴木貴博 , 卷内崇彦 , 永合祐輔 , 白濱圭也
2. 発表標題 グラファイト上4He薄膜の弾性異常
3. 学会等名 日本物理学会第75回年次大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Y. Nago, Y. Miyoshi, T. Makiuchi, R. Ishiguro, R. Toda, S. Murakawa, and K. Shirahama
2. 発表標題 Fabrication of Phonon Generator Devices for Study of Quantum Phase Transition in Molecular Films
3. 学会等名 The International Symposium on Quantum Fluids and Solids(QFS2019) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 T. Suzuki, T. Makiuchi, Y. Nago, and K. Shirahama
2. 発表標題 Elastic Anomaly of 4He Films Adsorbed on Graphite
3. 学会等名 The International Symposium on Quantum Fluids and Solids(QFS2019) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 T. Makiuchi, T. Suzuki, K. Yamashita, Y. Nago, and K. Shirahama
2. 発表標題 Elastic Anomaly as a Probe for Superfluidity of Helium and Hydrogen Films
3. 学会等名 The International Symposium on Quantum Fluids and Solids(QFS2019) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 永合祐輔, 三吉佑典, 石黒亮輔, 戸田亮, 村川智, 白濱圭也
2. 発表標題 ヘリウム薄膜量子相転移の研究のためのフォノン生成器の作製
3. 学会等名 日本物理学会第74回年次大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 巻内崇彦, 山下勝之, 互井通裕, 永合祐輔, 白濱圭也
2. 発表標題 吸着薄膜における弾性異常
3. 学会等名 日本物理学会第74回年次大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 T. Makiuchi, K. Yamashita, M. Tagai, Y. Nago, and K. Shirahama
2. 発表標題 Elastic Anomaly of Helium, Hydrogen and Neon Films on Disordered Substrate
3. 学会等名 American Physical Society (APS) March Meeting
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Y. Nago, Y. Morikawa, Y. Tanaka, K. Kato, T. Takagi, H. Maki, S. Murakawa, K. Shirahama
2. 発表標題 Nanomechanical Wire Resonator for Probing Quantum Vortex in Superfluid He
3. 学会等名 The International Symposium on Quantum Fluids and Solids(QFS2018) (国際学会)
4. 発表年 2018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
研究協力者	白濱 圭也 (Shirahama Keiya)	慶應義塾大学・大学院理工学研究科・教授 (32612)	
研究協力者	村川 智 (Murakawa Satoshi)	東京大学・低温センター 研究開発部門・准教授 (12601)	
研究協力者	牧 英之 (Maki Hideyuki)	慶應義塾大学・大学院理工学研究科・教授 (32612)	

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
---------	---------