

平成 30 年 6 月 11 日現在

機関番号：32612

研究種目：基盤研究(A) (一般)

研究期間：2014～2016

課題番号：26247062

研究課題名(和文)トポロジカル超流動体のジョセフソン物理

研究課題名(英文)Josephson Physics of Topological Superfluids

研究代表者

白濱 圭也 (Shirahama, Keiya)

慶應義塾大学・理工学部(矢上)・教授

研究者番号：70251486

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 32,100,000円

研究成果の概要(和文)：本研究は、トポロジカル超流動体としての新展開が期待される超流動ヘリウム3に対して、ジョセフソン効果および準粒子トンネル分光、集団励起などの実験を行い、トポロジカル性を検証し新奇状態を探索するものである。

AB両相でトポロジカル超流動の特徴的性質発現が期待される擬2次元薄膜を実現するため、シリコンウェハー貫通スリット構造とスラブ円盤空間の作製を進め、前者については幅 $2 \times 100 \mu\text{m}$ の貫通スリット、後者は $1 \mu\text{m}$ 高さに対し平坦度乱れが $4\text{nm}$ という極めて平坦な円盤空間の作製に成功した。また超流動流測定装置、超音波実験装置、ねじれ振動子装置の開発を行った。同時に製作した核断熱消磁冷凍機を用いて実験を行う。

研究成果の概要(英文)：In this project, we study topological properties of superfluid  $^3\text{He}$  by performing experiments on Josephson effect, quasiparticle transport, and collective excitations. We have attempted to fabricate novel microslit structures on Si wafers with dimensions  $1 \times 100 \mu\text{m}$  by dry etching, and make a microslab structures by ultrahigh precision machining. So far we have succeeded to fabricate  $2 \times 100 \mu\text{m}$  slit structures and  $1 \mu\text{m}$  thick disk-shape geometry with  $4\text{nm}$  flatness. We have also prepared an apparatus to detect Josephson and quasiparticle flow using SQUID based displacement sensor, a ultrasound cell to study collective modes, and a torsional oscillator to search for chiral edge current. These devices are installed on a PrNi5 nuclear demagnetization refrigerator, which has also been prepared in this work. Some preliminary experiments have already been performed and experiments with superfluid  $^3\text{He}$  get underway.

研究分野：低温物理学

キーワード：低温物性 超流動 ヘリウム3 トポロジカル超流動 ジョセフソン効果

### 1. 研究開始当初の背景

「トポロジカル超伝導・超流動」は、2006年の Kane と Mele に始まるトポロジカル絶縁体の理論から派生した新しい概念である。近年の超伝導・超流動研究の中心的課題として興味を持たれているが、その研究は理論が大きく先行している。実験では、理論を検証できる舞台として、トポロジカル超流動性が確定している超流動  $^3\text{He}$  に注目が集まっている。超流動  $^3\text{He}$  には A,B,A1 という 3 つの異なる相がバルク状態で存在し、さらに最近異方的制限空間中でポーラー相と呼ばれる相が安定に存在することが発見された。 $^3\text{He}$ -B 相は非自明なトポロジカル超流動状態であり、界面アンドレエフ束縛状態(マヨラナ粒子)の存在が本研究連携研究者の村川により実験で示された。また A 相をコヒーレンス長程度(100nm)まで薄膜化すると、クーパー対の軌道角運動量ベクトルが面直方向を向きギャップノードが消失して、トポロジカル超流動体となりうるが、薄膜作製の困難から、実験的には確認されていない。A 相は時間反転対称性が破れたカイラル超流動体であり、時間反転対称性が保たれた B 相と好対照な研究対象となる。トポロジカル超伝導体の候補物質としては  $\text{CuBi}_2\text{Se}_3$  等が盛んに研究されているが、万人が認めるトポロジカル超伝導物質はまだ存在しないことから、トポロジカル性に焦点を当てた超流動  $^3\text{He}$  の実験研究の進展が渴望されている。

### 2. 研究の目的

上記の背景に基づき、本研究では超流動ヘリウム 3 のトポロジカル性を探求する実験を展開する。トポロジカル超流動であることがわかっている  $^3\text{He}$ -B 相に対して、ジョセフソン効果および準粒子トンネル分光の実験を行い、B 相の界面状態の詳細な解明を試み、マヨラナ粒子に代表される新奇な状態を探索する。またトポロジカル超流動性が期待される A 相の擬 2 次元状態を実現し、半整数量子渦やカイラルエッジ流の探索を行う。

### 3. 研究の方法

トポロジカル超流動性の研究手段として、よく制御された擬 2 次元超流動  $^3\text{He}$  と、超流動  $^3\text{He}$  弱接合(ジョセフソン接合)を実現することが重要であると考え、2 つの方法を着想した。その一つはシリコンウェハーに  $1\mu\text{m}$  程度の幅を有する貫通スリット構造の作成である。液体ヘリウム容器中にウェハーを間仕切りとして挿入することで、2 つのバルク  $^3\text{He}$  がスリット中の擬 2 次元  $^3\text{He}$  で接続された構造が得られる。容器間に圧力差を与えることで擬 2 次元  $^3\text{He}$  中に方向が制御された超流動流を生成できる。またスリットの片側から超音波の照射によって 2 次元  $^3\text{He}$  特有の性質が期待される集団励起(ヒッグスモードを含む)を調べることができる。現在の微細加工技術で作成可能な幅  $1\times 100\mu\text{m}$ 、深さ  $50\mu\text{m}$  の貫通

構造をシリコンもしくは SOI ウェハーに多数作成することを目標とした。幅  $1\mu\text{m}$  は  $^3\text{He}$  コヒーレンス長の約 20 倍に相当するので、その空間に閉じこめた  $^3\text{He}$  は擬 2 次元性を有すると期待される。

スリット構造は本研究の主題である超流動ジョセフソン接合の生成にも利用される。スリットの長さを薄くすることで、2 つのバルク  $^3\text{He}$  が秩序パラメタを抑圧させて接触した超流動弱接合もしくは超流動ジョセフソン接合が作成できる。これを利用して超流動  $^3\text{He}$  に対するジョセフソン効果の研究、および準粒子トンネルの実験が行える。特に後者の実験は過去に研究例がない新しいものであり、スリット中の擬 2 次元空間での準粒子状態、特にミッドギャップ状態やマヨラナ状態に関する知見が得られると期待される。

本研究で着想した擬 2 次元  $^3\text{He}$  を得るもう一つの手段は、超精密旋盤によるスラブ空間の作成である。上記のスリット構造は、スラブ面積が小さくかつバルク液体と接しているため、行える実験手法に制限がある。そこで  $1\text{cm}^2$  オーダーの面積を有する高さ  $1\mu\text{m}$  の擬 2 次元空間を、無酸素銅に超精密旋盤により作成するという着想を得た。このような擬 2 次元空間は過去の研究でも作成されていたが、空間サイズやそのばらつきに問題を残していた。本研究では円盤空間を有するねじれ振動子を作成して、構造がよく制御された擬 2 次元  $^3\text{He}$  の超流動密度や粘性のような基礎物性の測定を目指した。またこれを応用して、熱ホール効果やホール粘性のようなトポロジカル超流動に特徴的な新奇物性の測定に繋げることも企図した。

これらの擬 2 次元  $^3\text{He}$  および超流動弱接合の実験手法として、ダイヤフラム容器と超伝導 SQUID 変位計による超流動流測定装置、超音波透過検出装置、スラブ空間を持つねじれ振動子装置の製作を行った。

また、本研究では実験に必要な超低温生成装置の開発も行った。 $0.4\text{mK}$  までの超低温生成が可能な  $\text{PrNi}_5$  核断熱消磁冷凍機を準備した。さらに理化学研究所所有の回転希釈冷凍機に銅核断熱消磁装置を搭載し、回転下のトポロジカル超流動実験を行うための実験環境を整備した。

### 4. 研究成果

擬 2 次元  $^3\text{He}$  を実現するための貫通スリット構造の作成を、東京大学ナノプラットフォームの微細構造作製施設の全面的な協力を得て進めた。Si ウェハーおよび SOI(Si on Insulator)基盤の両方を用いて、Bosch プロセスと呼ばれるドライエッチングの手法を用いてスリット構造の製作を試みた。その結果現在までに、SOI 基盤に幅  $2\mu\text{m}$  の極めて平滑な貫通スリット構造を作ることに成功している。 $2\mu\text{m}$  は超流動コヒーレンス長の 50 倍近い長さであるため、擬 2 次元超流動の実現には幅を  $1\mu\text{m}$  近くにする必要があるが、平坦

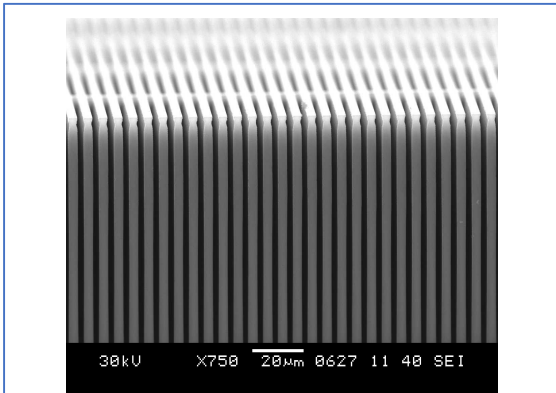


図: Si ウェハーに作製した貫通スリット構造の走査電子顕微鏡写真。幅  $2\mu\text{m}$   $\times$   $100\mu\text{m}$ 、深さ  $100\mu\text{m}$  の深溝スリット列が作製され、スリット幅も均一であることがわかる。

で均一なスリット構造の完成には至っておらず、引き続き作製を試みている。

次にジョセフソン効果と準粒子分光実験を行うための超流動流測定装置を製作した。これはダイヤフラムによる圧力差でスリット構造中液体  $^3\text{He}$  に流れをつくり、流量を別のダイヤフラムに近接した SQUID 変位計で計測する装置である。SQUID の雑音軽減に時間を要しているが、これまでに完成した  $2\mu\text{m}$  スリット構造を取り付けて、予備的実験を進めている。

また、超音波透過検出装置についても製作を行った。水晶振動子をスリット構造の両側において  $5\text{-}70\text{MHz}$  の超音波の透過を観測することで、擬 2 次元  $^3\text{He}$  に期待される集団励起モードの観測を試みる。

幅  $1\mu\text{m}$ 、直径  $10\text{mm}$  の円盤状スラブをもつ容器を、慶應義塾大学理工学部間研究室の協力により超精密旋盤を用いて加工し、平坦度乱れが  $4\text{nm}$  に抑制されたスラブ構造の作製に成功した。この容器を装着したねじれ振動子の製作を行い、超流動  $^4\text{He}$  を用いた予備的実験を行った。

また  $\text{PrNi}_5$  核断熱消磁冷凍機の準備を完了するとともに、回転核断熱消磁冷凍機用銅核ステージの製作を行った。

## 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 4 件)

1. T. Tsuiki, D. Takahashi, S. Murakawa, Y. Okuda, K. Kono, K. Shirahama, “Effect of rotation on the elastic moduli of solid  $^4\text{He}$ ” Phys. Rev. B 97, 054516 (2018)、査読有り
2. Takahiko Makiuchi, Satoshi Murakawa, Keiya Shirahama, “A Compact Rotating 1K Cryostat for Helium 4 Studies” Journal of Low Temperature Physics 187, 633–638 (2017)、査読有り
3. Kobayashi, Amane, Sekiguchi, Yuki, Takayama, Yuki, Oroguchi, Tomotaka,

Shirahama, Keiya, Torizuka, Yasufumi, Manoda, Masahiro, Nakasako, Masayoshi, Yamamoto, Masaki “TAKASAGO-6 apparatus for cryogenic coherent X-ray diffraction imaging of biological non-crystalline particles using X-ray free electron laser at SACLA” REVIEW OF SCIENTIFIC INSTRUMENTS, 87, 5 (2016)、査読有り

4. Shin, Jaeho, Choi, Jaewon, Shirahama, Keiya, Kim, Eunseong “Simultaneous investigation of shear modulus and torsional resonance of solid  $\text{He-4}$ ” PHYSICAL REVIEW B, 93, 21 (2016)、査読有り

〔学会発表〕(計 37 件)

1. 檜枝光憲, 立木智也, 高橋大輔, 白濱圭也, 奥田雄一, 河野公俊, 松下琢, 和田信雄, 「バルク液体  $^4\text{He}$  の横音響インピーダンス測定」日本物理学会第 73 回年次大会、東京理科大学(野田市)2018 年 3 月 25 日
2. 巻内崇彦, 山下勝之, 互井通裕, 永合祐輔, 高橋大輔, 白濱圭也, 「多孔質ガラスに吸着したネオン薄膜の弾性測定」日本物理学会第 73 回年次大会、東京理科大学(野田市)2018 年 3 月 25 日
3. 白濱圭也, “Quantum phase transition of thin helium films probed by elastic measurement”, The International Workshop on Electrons and Ions in Quantum Fluids and Solids, 2018 年 3 月 11-14 日、東レ研修センター(三島市)(ポスター発表)
4. 白濱圭也, “Toward the direct observation of chiral edge mass current in quasi-2D  $^3\text{He-A}$ ”, The International Workshop on Electrons and Ions in Quantum Fluids and Solids, 2018 年 3 月 11-14 日、東レ研修センター(三島市)(ポスター発表)
5. 白濱圭也, “Microfabrication of multiple slit structures for studies of topological superfluid  $^3\text{He}$ ”, The International Workshop on Electrons and Ions in Quantum Fluids and Solids, 2018 年 3 月 11-14 日、東レ研修センター(三島市)(ポスター発表)
6. 白濱圭也, “Nanomechanical Resonator based on Carbon Nanotube for Study of Superfluid  $\text{He}$ ”, The International Workshop on Electrons and Ions in Quantum Fluids and Solids, 2018 年 3 月 11-14 日、東レ研修センター(三島市)(ポスター発表)
7. 檜枝光憲, 滝沢亮人, 立木智也, 高橋大輔, 白濱圭也, 奥田雄一, 河野公俊, 松下琢, 和田信雄, 「QCM 測定における 2 次元およびバルク  $^4\text{He}$  の回転効果」日本物理学会 2017 年秋季大会、岩手大学(盛岡市) 2017 年 9 月 23 日
8. 永合祐輔, 田中悠, 高木将, 谷川俊太郎, 大里啓孝, 津谷大樹, 牧英之, 村川智, 白濱圭也, 「超流動流れ場検出のための架橋ナノワイヤー共振器の開発」日本物理学会 2017 年秋季大会、岩手大学(盛岡市) 2017 年 9

月 23 日

9. 卷内崇彦, 互井通裕, 永合祐輔, 白濱圭也, 「ヘリウム薄膜の局在非局在転移における臨界現象」日本物理学会 2017 年秋季大会、岩手大学(盛岡市) 2017 年 9 月 23 日
10. Takahiko Makiuchi, Michihiro Tagai, Yusuke Nago, Keiya Shirahama, “Gapped bosonic and fermionic insulators of helium films”, International Conference on Ultra Low Temperature Physics, Heidelberg University (Germany), August, 17 - 21, 2017
11. Y. Nago, Y. Tanaka, T. Takagi, S. Tanigawa, H. Osato, D. Tsuya, H. Maki, S. Murakawa, K. Shirahama, “Nanomechanical Resonator based on Carbon Nanotube for Study of Superfluid He”, International Conference on Ultra Low Temperature Physics, Heidelberg University (Germany), August, 17 - 21, 2017
12. T. Tani, R. Wada, K. Kaiya, S. Murakawa, Y. Nago, Y. Mita, K. Shirahama, “Microfabrication of Multi-Slit Structures for Studies of Topological Properties of Quasi-2 Dimensional Superfluid  $^3\text{He}$ ”, 28th International Conference on Low Temperature Physics, Gothenburg (Sweden) August 9-16 2017
13. T. Tani, R. Wada, S. Murakawa, Y. Nago, K. Shirahama, “Flow Properties of Superfluid  $^4\text{He}$  in Nanoporous Media Probed by Helmholtz Resonator”, 28th International Conference on Low Temperature Physics, Gothenburg (Sweden), August 9-16 2017
14. T. Makiuchi, M. Takai, Y. Nago, K. Shirahama, “Stiffening of the gapped helium insulator”, 28th International Conference on Low Temperature Physics, Gothenburg (Sweden), August 9-16 2017
15. Keiya Shirahama, Tomoya Tsuiki, Daisuke Takahashi, Satoshi Murakawa, Yuichi Okuda, Kimitoshi Kono, “Effect of Rotation on Elastic Moduli of Solid Helium”, APS March Meeting 2017, New Orleans, Louisiana (USA), March 14, 2017 (口頭発表)
16. Takahiko Makiuchi, Michihiro Tagai, Yusuke Nago, Keiya Shirahama, “Torsional Oscillator Study of Gap-Induced Elasticity of  $^4\text{He}$  Films on Disordered Substrate”, APS March Meeting 2017, New Orleans, Louisiana (USA), March 14, 2017 (口頭発表)
17. 谷智行, 村川智, 和田龍馬, 山田快斗, 伊藤公平, 三田吉郎, 白濱圭也 「擬 2 次元トポロジカル超流動  $^3\text{He}$  研究用多重マイクロスリット構造の作成」日本物理学会 2016 年秋季大会 金沢大学(金沢市) 2016 年 9 月 13 日～ 9 月 16 日 (口頭発表)
18. Keiya Shirahama, “Gap-induced elasticity of atomically thin  $^4\text{He}$  films”, International Conference on Quantum Fluids and Solids 2016, Prague (Czech Republic), 11 August 2016 (口頭発表)
19. Tani Tomoyuki, Murakawa Satoshi, Wada Ryoma, Yamada Kaito, Itoh Kohei, Mita Yoshio, Shirahama Keiya, “Microfabrication of Multi-Slit Structures for Studies of Quasi-2 Dimensional Topological Superfluid  $^3\text{He}$ ” International Conference on Quantum Fluids and Solids 2016, Prague (Czech Republic), 11 August 2016 (ポスター発表)
20. Jaewon Choi, Tomoya Tsuiki, Daisuke Takahashi, Kimitoshi Kono, Keiya Shirahama, Hyoungsoon Choi, Eunseong Kim, “Superfluid-like Responses in Rotating Solid Helium” International Conference on Quantum Fluids and Solids 2016, Prague (Czech Republic), 11 August 2016 (ポスター発表)
21. Tsuiki tomoya, Takahashi daisuke, Murakawa satoshi, Kono kimitoshi, Shirahama keiya, “Solid helium study using elasticity-sensitive torsional oscillator under DC rotation” International Conference on Quantum Fluids and Solids 2016, Prague (Czech Republic), 11 August 2016 (ポスター発表)
22. Makiuchi, T., Murakawa S., Shirahama K., “Circulation and Vortices in Rotating Superfluid Helium 4 Confined in a Ring” International Conference on Quantum Fluids and Solids 2016, Prague (Czech Republic), 11 August 2016 (ポスター発表)
23. Makiuchi, T., Murakawa S., Shirahama K., “Compact 1K Rotating Cryostat for Helium 4 Experiment” International Conference on Quantum Fluids and Solids 2016, Prague (Czech Republic), 11 August 2016 (ポスター発表)
24. 白濱圭也, 高橋大輔, 「量子相転移近傍の  $^4\text{He}$  薄膜における弾性率異常」日本物理学会 第 71 回年次大会 東北学院大学(仙台市) 2016 年 3 月 19 日～22 日 (口頭発表)
25. 卷内崇彦, 村川智, 白濱圭也, 「超流動ヘリウム 4 第二音波の回転効果」日本物理学会 第 71 回年次大会 東北学院大学(仙台市) 2016 年 3 月 19 日～22 日 (口頭発表)
26. Jaewon Choi, Tomoya Tsuiki, Daisuke Takahashi, Keiya Shirahama, Kimitoshi Kono, Hyoungsoon Choi, Eunseong Kim “Re-investigating Solid Helium under DC Rotation with a Rigid Torsional Oscillator” APS March Meeting 2016, Baltimore, Maryland(USA), 16 March, 2016 (口頭発表)
27. Keiya Shirahama, Daisuke Takahashi, Takayuki Kogure, Hitomi Yoshimura, Rama Higashino “Anomalous Elasticity of  $^4\text{He}$  Films at the Quantum Phase Transition” APS March Meeting 2016, Baltimore, Maryland(USA), 17 March, 2016 (口頭発表)
28. 立木智也, 高橋大輔, 村川智, 河野公俊, 白濱圭也, 「固体ヘリウム 4 の DC 回転下弾性率測定」日本物理学会 2015 年秋季大会 関西大学(吹田市) 2015 年 9 月 16 日～29 日 (口頭発表)
29. 滝沢亮人, 檜枝光憲, 立木智也, 白濱圭

也, 高橋大輔, 河野公俊, 松下琢, 和田信雄  
「QCMを用いたDC回転下2次元<sup>4</sup>He薄膜  
超流動転移の研究」日本物理学会 2015年秋  
季大会 関西大学(吹田市)2015年9月16  
日~19日(口頭発表)

30. 村川智, 田中智也, 谷智行, 野口博徳, 柴  
山義行, 中原亮, 本多謙介, 白濱圭也,  
「ナノポアアレイ中の超流動<sup>4</sup>Heの流れの  
散逸の異常II」日本物理学会 2015年秋季大  
会 関西大学(吹田市)2015年9月16日~  
19日(口頭発表)

31. 巻内崇彦, 村川智, 白濱圭也, 「超流動<sup>4</sup>He  
第二音波における回転誘起ドップラー効果  
の観測」日本物理学会 2015年秋季大会 関  
西大学(吹田市)2015年9月16日~19日  
(口頭発表)

32. T. Makiuchi, S. Murakawa, K. Shirahama  
“The Coupling of Torsional Oscillator and  
Sound in Superfluid <sup>4</sup>He” 2015 International  
Symposium on Quantum Fluids and Solids,  
Niagara Falls (USA), August 9-15, 2015 (ポ  
スター発表)

33. T. Tani, S. Murakawa, K. Yamada, K. Itoh, Y.  
Mita, K. Shirahama “Microfabrication of  
Multi-Slit Structures for Study of Topological  
Superfluid <sup>3</sup>He” 2015 International Symposium  
on Quantum Fluids and Solids, Niagara Falls  
(USA), August 9-15, 2015 (ポスター発表)

34. S. Murakawa, T. Tanaka, T. Tani, H. Noguchi,  
A. Nakahara, K. Honda, K. Shirahama  
“Anomalous Dissipation of superfluid <sup>4</sup>He Flow  
Confined in a Straight Nanopore Array” 2015  
International Symposium on Quantum Fluids  
and Solids, Niagara Falls (USA), August 9-15,  
2015 (ポスター発表)

35. T. Tsuiki, D. Takahashi, S. Murakawa, K.  
Kono, K. Shirahama “The elasticity  
measurement of solid <sup>4</sup>He under DC rotation”  
2015 International Symposium on Quantum  
Fluids and Solids, Niagara Falls (USA), August  
9-15, 2015 (ポスター発表)

36. 巻内崇彦, 村川智, 白濱圭也, 「超流動<sup>4</sup>He  
第二音波の回転誘起ドップラー効果」日  
本物理学会 第70回年次大会 早稲田大学  
(新宿区) 2015年3月21日~24日(口  
頭発表)

37. 村川智, 田中智也, 谷智行, 野口博徳,  
中原亮, 本多謙介, 白濱圭也, 「ナノポア  
アレイ中の超流動<sup>4</sup>Heの流れの散逸の異常」  
日本物理学会 第70回年次大会 早稲田大  
学(新宿区) 2015年3月21日~24日(口  
頭発表)

〔図書〕(計 件)

〔産業財産権〕

○出願状況(計 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 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〕  
ホームページ等

#### 6. 研究組織

(1)研究代表者  
白濱 圭也(SHIRAHAMA, Keiya)  
慶應義塾大学・理工学部・教授  
研究者番号: 70251486

(2)研究分担者  
高橋 大輔(TAKAHASHI, Daisuke)  
足利工業大学・工学部・准教授  
研究者番号: 80415215

(3)連携研究者  
村川 智(MURAKAWA, Satoshi)  
東京大学・低温センター・准教授  
研究者番号: 90432004

(4)研究協力者