

令和 2 年 6 月 1 日現在

機関番号：12602

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2017～2019

課題番号：17K05568

研究課題名(和文) 低次元強相関ボーズ流体の超流動ダイナミクスと非線形応答

研究課題名(英文) Dynamics and nonlinear response of strong correlated Bose superfluid

研究代表者

檜枝 光憲 (Hieda, Mitsunori)

東京医科歯科大学・教養部・教授

研究者番号：30372527

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,400,000円

研究成果の概要(和文)：高周波振動子である水晶マイクロバランスを駆使し、広帯域周波数(20～500MHz)において種々の次元の強相関ヘリウム4に対して超流動応答(超流動密度、エネルギー散逸)測定を実施した。本研究により、主に次の結果が得られた。(1)マイクロ波帯において2次元超流動応答の測定に成功した。(2)多重極限(高周波、回転)における研究により、2次元超流動の回転効果が生じる臨界速度に周波数依存が存在することを明らかにした。(3)バルク液体ヘリウム4超流動の横ずれ音響インピーダンス研究を実施し、素励起(フォノン、ロトン)の有効粘性モデルと定性的に一致することを示した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

スーパークリーンなヘリウム量子流体は超流動の機械的応答研究ができるオンリーワン系であり強相関ボーズ流体に関する基礎研究の理想的なモデル系である。本研究結果により超流動ダイナミクスの断片が明らかにされ、また高周波を使った研究の新たな可能性を示した。これらの結果は強相関ボーズ系における普遍性を捉えたものと考えられ、他の強相関ボーズ系(超伝導体、磁性体、電子、冷却原子気体、結晶、液晶、クォーク)の研究においても大きな前進になるものと考えられる。

研究成果の概要(英文)：We studied superfluid response of strongly correlated helium-4 in various dimensions by a quartz crystal microbalance (QCM) with the wide frequency range of 20 - 500 MHz. Main results we obtained are as follows. (1) We succeeded to observe superfluid response of two-dimensional helium-4 at microwave frequencies beyond 300 MHz. This observation is the first successful case in the world. (2) We experimentally revealed a frequency dependence of the critical velocity of the nonlinear effect of the two-dimensional superfluid under rotation at high frequencies. (3) We measured shear acoustic impedance of bulk helium-4 at various high frequencies. The experimental data of the frequency dependence are phenomenologically described by the effective viscosity model of elementary particles, phonon and roton.

研究分野：低温物理

キーワード：超流動 非線形効果 KT転移 ボーズ流体 ヘリウム4

## 様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

### 1. 研究開始当初の背景

1908年にカマリン・オネスがヘリウムの液化に成功し強相関ボーズ流体ヘリウムの興味深い量子物性に気づいてからすでに100年もの歳月が経過した。しかし今日においてもなお液体・固体ヘリウムの研究が続けられており、量子効果に起因する超流動・超固体、フェルミ液体状態、多体交換による核磁気秩序、量子乱流、量子相転移、など物性物理学の根幹を成す豊かな物理現象・概念が次々に生み出されてきた。2016年のノーベル物理学賞に関連して、トポロジカル励起であるボルテックス-アンチボルテックスの対形成による新しいタイプの相転移、つまりコスタリッツ-サウレス(KT)転移がヘリウム4薄膜の2次元超流動転移で最初の実証された事実はその最たる例である。

近年の強相関ボーズ流体(ヘリウム4)の話題として、ナノ構造体によって実現した2次元系、および1次元系における低次元超流動の研究があげられる。低次元系では大きな揺らぎの影響で通常のGL理論は破綻をきたし、2次元(ヘリウム4薄膜)超流動はKT転移で説明され、1次元(ヘリウム4ナノチューブ)超流動は朝永-ラッティンジャー(TL)流体と呼ばれる特異な量子状態と関係している。つまり種々の次元でその物理機構特有のダイナミクスを示し、非平衡物理学の観点からも興味深い。超流動ダイナミクスを研究する強力な方法として機械的応答の周波数依存を測定することがあげられる。しかし、ヘリウム研究では伝統的に低周波振動子(ねじれ振子、~1kHz)のみが用いられ、超流動ダイナミクスに関する情報は線形応答領域の静的極限(ゼロ周波数近傍)に限定されていた。より詳細な研究を実施するために、特にMHzを超えるような振動数における超流動ダイナミクスの研究が待たれていた。

### 2. 研究の目的

強相関ボーズ流体(ヘリウム4)をモデル系として、種々の次元の超流動のダイナミクスと非線形効果を研究する。高周波振動子を駆使し広帯域周波数における超流動応答(超流動密度、エネルギー散逸)測定を実施し、回転、振動振幅、周波数などの測定パラメータを大きく変化させることで、線形応答領域から理論的に取り扱い困難な非線形応答領域までを系統的に調べ、理論研究発展のための標準となる実験データを獲得する。

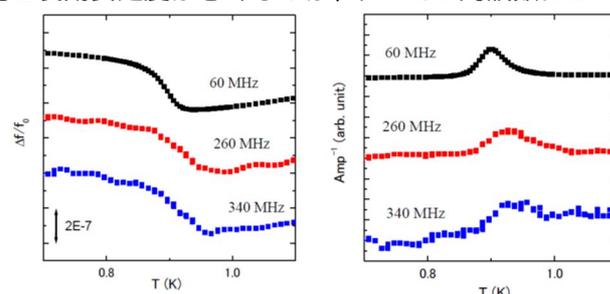
### 3. 研究の方法

高周波振動子である水晶マイクロバランスを駆使し、広帯域周波数(1~500MHz)における超流動応答(超流動密度、エネルギー散逸)測定を実施する。実験準備(実験セル作製、配線、液体窒素温度による動作チェック等)完了後、希釈冷凍機を使い極低温において温度スイープ測定をスタートする。超流動応答測定は、いろいろな原子相関を持ったヘリウム4ボーズ流体に対して実施する。原子相関制御は吸着粒子数の制御や圧力を変化によって密度(原子間距離)を変化することで行う。さらに回転、振動振幅、周波数などの測定パラメータを大きく変化させることで、線形応答領域から理論的に取り扱い困難な非線形応答領域までを系統的に調べ、理論研究発展のための標準となる実験データを獲得する。得られたデータから各パラメータ依存(温度、原子相関、周波数、振幅)を実験的に明らかにするとともに、可能な限り既存の理論と定量的な比較検討を実施する。

### 4. 研究成果

#### (1) マイクロ波帯における2次元超流動応答の測定

平面基盤上の2次元4He薄膜のKosterlitz-Thouless(KT)超流動転移は、渦対の解離が本質的な役割を果たすトポロジカル転移として、理論・実験の両面から活発に研究されてきた。しかし、そのダイナミクスと非線形効果については実験的な検証が十分に実施されたとは言い難い。また、KT理論が破綻するような高周波極限における超流動応答は自明では無い問題となっている。高周波における2次元4He超流動のダイナミクスと非線形効果の研究(60~340MHz)を試みた。水晶マイクロバランズ(QCM)法はオーバートーン発振の利用により、同一状況下(基盤、膜厚)の4He薄膜に対して複数の周波数による測定が可能であり、動的KT転移の実験研究をする上で極めて有効なプローブとなってきた。その結果、超流動オンセットが0.9K付近の膜厚において、測定周波数が高くなるにつれて分解能と長期安定度が悪くなるが、すべての周波数においてエネルギー散逸ピークを伴う超流動応答の観測に成功した。また2次元超流動の動的特徴である超流動オンセットの周波数依存も明瞭に捉えることができた。本研究は、マイクロ波帯(300MHz以上)において超流動応答を測定できることを示しており、KT理論が破綻する高周波極限における超流動性の研究に道を



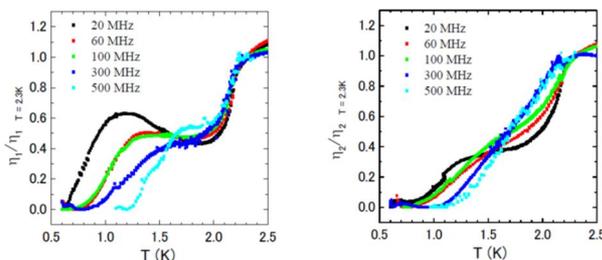
開くものである。

### (2) 多重極限 (高周波、回転) における2次元超流動の非線形効果の検証

回転希釈冷凍機を用いた水晶マイクロバランス (QCM) 実験により、高周波及び低温領域 (1K 以下) における金基板上ヘリウム4 薄膜超流動転移の研究を実施した。測定周波数 20MHz の実験では、回転下 (4rad/sec) での超流動密度の温度変化は、ゼロ回転下での実験結果と誤差内で一致した。高周波実験では、ねじれ振り子で観測された顕著な回転効果は観測されていない。電場中のクーロンガスとの対応関係より回転流による渦対の結合エネルギー低下の可能性について考察した。量子渦ペアについて、電場ゼロでは渦間距離が無限大まで引力を生じるが、有限の電場中ではある距離以上で斥力となり自由渦が生じる。この結果、回転流はある臨界速度以上になると非線形効果が起こり、エネルギー散逸の増大、ピーク温度の減少が引き起こされると考えられる。今回実施した実験状況 (回転速度 6.8 mm/s、20 MHz) は、見積もった臨界速度 200 mm/s を下回っておりこの非線形効果が観測されなかったと結論される。本研究から、2次元超流動の回転効果が生じる臨界速度に周波数依存が存在することを明らかにした。

### (3) 高周波におけるバルク液体ヘリウム4の横音響インピーダンス測定

超流動ダイナミクスを研究する強力な方法として機械的応答の周波数依存を測定することがあげられる。高周波・広帯域 (20~500MHz) においてバルク液体 4He 超流動の横ずれ音響インピーダンス研究を実施した。液体中の横ずれ水晶振動子の動作は、粒子の平均自由行程と粘性長の大小関係で決まっている。ラムダ温度以上では平均自由行程が十分に小さく (流体領域)、高周波粘性計として動作する。ラムダ温度以下になると平均自由行程が急激に大きくなるため、ある温度以下でパリスティック領域へとクロスオーバーする。この状況では振動子表面と準粒子 (フォノン、ロトン) が直接運動量を交換し、超流動相中の準粒子を研究する上で極めて有効なプローブとなる。実験データ (20, 60, 100, 300, 500 MHz) より振動子の Q 値の逆数の変化、周波数の変化より、それぞれ有効粘性 1、有効粘性 2 が計算される。有効粘性 1、2 とともに明確な周波数依存を観測した。また過去に実施された振動ワイヤーを使った低周波実験 (1.9 kHz) と観測に大きな違いが生じた。有効粘性 1 については 1.6 K 以下で顕著な周波数依存が観測された。一方で、有効粘性 2 についてはラムダ温度以下の温度領域全体で周波数依存が観測され、1.5 K 付近でデータが 1 点で交差する結果を得た。これらから、高周波実験ではフォノンの有効粘性への寄与は小さくそのためロトンによる寄与が支配的であること、1K 以下の有効粘性の急激な減少はパリスティックなロトンの寄与が原因であること、がわかった。また 2 つの理論モデル、粘弾性モデル、ロトンの平均自由行程-粘性長比を考慮した kinetic モデル、と比較をしたところ、理論では実験結果を説明できず、理論で有効粘性の周波数依存の定性的な振る舞いが説明された。



5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計1件（うち査読付論文 1件／うち国際共著 0件／うちオープンアクセス 0件）

|  |                               |
|--|-------------------------------|
| 1. 著者名<br>Matsushita Taku, Hieda Mitsunori, Toda Ryo, Inagaki Shinji, Wada Nobuo                                       | 4. 巻<br>86                    |
| 2. 論文標題<br>Transition from a 2D Degenerate Bose Liquid to 3D Superfluid in 4He Films Formed in Nanopores               | 5. 発行年<br>2017年               |
| 3. 雑誌名<br>Journal of the Physical Society of Japan   | 6. 最初と最後の頁<br>103601 ~ 103601 |
| 掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子）<br><a href="https://doi.org/10.7566/JPSJ.86.103601">https://doi.org/10.7566/JPSJ.86.103601</a> | 査読の有無<br>有                    |
| オープンアクセス<br>オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難   | 国際共著<br>-                     |

〔学会発表〕 計26件（うち招待講演 0件／うち国際学会 7件）

|  |
|--|
| 1. 発表者名<br>稲垣諒一, 松下琢, 伊藤正行, 天池一憲, 檜枝光憲, 和田信雄 |
| 2. 発表標題<br>3次元ナノ細孔中の3Heスピン緩和時間の4He膜厚依存性      |
| 3. 学会等名<br>日本物理学会第75回年次大会                    |
| 4. 発表年<br>2020年                              |

|  |
|--|
| 1. 発表者名<br>和田信雄, 小林利章, 谷口純子, 檜枝光憲, 松下琢 |
| 2. 発表標題<br>簡易CMN温度計と小型10mK冷凍機の性能評価     |
| 3. 学会等名<br>日本物理学会第75回年次大会              |
| 4. 発表年<br>2020年                        |

|   |
|---|
| 1. 発表者名<br>檜枝光憲, 小林利章, 谷口純子, 鈴木勝, 松下琢, 和田信雄 |
| 2. 発表標題<br>200MHzを超える2次元4He超流動応答の試み         |
| 3. 学会等名<br>日本物理学会第75回年次大会                   |
| 4. 発表年<br>2020年                             |

|   |
|---|
| 1. 発表者名<br>稲垣諒一, 松下琢, 伊藤正行, 天池一憲, 檜枝光憲, 和田信雄  |
| 2. 発表標題<br>3次元ナノ細孔中の固体領域の4He薄膜上に形成される3Heの束縛状態 |
| 3. 学会等名<br>日本物理学会2019年秋季大会                    |
| 4. 発表年<br>2019年                               |

|   |
|---|
| 1. 発表者名<br>稲垣諒一, 松下琢, 伊藤正行, 天池一憲, 檜枝光憲, 和田信雄  |
| 2. 発表標題<br>3次元ナノ細孔中の固体領域の4He薄膜上に形成される3Heの束縛状態 |
| 3. 学会等名<br>日本物理学会2019年秋季大会                    |
| 4. 発表年<br>2019年                               |

|   |
|---|
| 1. 発表者名<br>檜枝光憲, 小林利章, 谷口淳子, 鈴木勝, 松下琢, 和田信雄 |
| 2. 発表標題<br>200MHzを超える2次元4He超流動応答測定を試み       |
| 3. 学会等名<br>日本物理学会第75回年次大会                   |
| 4. 発表年<br>2020年                             |

|   |
|---|
| 1. 発表者名<br>和田信雄, 小林利章, 谷口淳子, 山口明, 檜枝光憲, 松下琢 |
| 2. 発表標題<br>簡易CMN温度計と小型10mK冷凍機の性能評価          |
| 3. 学会等名<br>日本物理学会第75回年次大会                   |
| 4. 発表年<br>2020年                             |

|   |
|---|
| 1. 発表者名<br>稲垣諒一, 松下琢, 伊藤正行, 天池一憲, 檜枝光憲, 和田信雄                    |
| 2. 発表標題<br>3次元ナノ細孔中の $^3\text{He}$ スピン緩和時間の $^4\text{He}$ 膜厚依存性 |
| 3. 学会等名<br>日本物理学会第75回年次大会                                       |
| 4. 発表年<br>2020年   |

|  |
|--|
| 1. 発表者名<br>M. Hieda, H. Yamaguchi, T. Matsushita, and N. Wada                              |
| 2. 発表標題<br>Kosterlitz-Thouless Superfluid Transition of $^4\text{He}$ Films on Planar Gold |
| 3. 学会等名<br>International Symposium on Quantum Fluids and Solids, QFS2018 (国際学会)            |
| 4. 発表年<br>2018年  |

|  |
|--|
| 1. 発表者名<br>T. Matsushita, K. Amaike, M. Hieda, and N. Wada                         |
| 2. 発表標題<br>Singlet Dimer Bound State of $^3\text{He}$ in Nanopore Suggested by NMR |
| 3. 学会等名<br>International Symposium on Quantum Fluids and Solids, QFS2018 (国際学会)    |
| 4. 発表年<br>2018年  |

|                                  |
|----------------------------------|
| 1. 発表者名<br>和田信雄, 浦野慎也, 松下琢, 檜枝光憲 |
| 2. 発表標題<br>10mK小型冷凍機の開発II        |
| 3. 学会等名<br>日本物理学会2018年秋季大会       |
| 4. 発表年<br>2018年                  |

|  |
|--|
| 1. 発表者名<br>檜枝光憲, 立木智也A, 高橋大輔B, 白濱圭也A, 奥田雄一D, 河野公俊C, D, 松下琢E, 和田信雄E |
| 2. 発表標題<br>バルク液体4Heの横音響インピーダンス測定II                                 |
| 3. 学会等名<br>日本物理学会2018年秋季大会   |
| 4. 発表年<br>2018年  |

|   |
|---|
| 1. 発表者名<br>松下琢, 稲垣諒一, 天池一憲, 檜枝光憲A, 和田信雄, 伊藤正行 |
| 2. 発表標題<br>3次元ナノ細孔中の液体4He薄膜上に形成される3He束縛状態     |
| 3. 学会等名<br>日本物理学会2018年秋季大会                    |
| 4. 発表年<br>2018年                               |

|   |
|---|
| 1. 発表者名<br>松下琢, 稲垣諒一, 伊藤正行, 天池一憲, 檜枝光憲A, 和田信雄       |
| 2. 発表標題<br>4He被覆した3次元ナノ細孔中に吸着した3He薄膜の 値の大きなフェルミ液体状態 |
| 3. 学会等名<br>日本物理学会第74回年次大会                           |
| 4. 発表年<br>2019年                                     |

|                            |
|----------------------------|
| 1. 発表者名<br>和田信雄, 松下琢, 檜枝光憲 |
| 2. 発表標題<br>10mK小型冷凍機の開発III |
| 3. 学会等名<br>日本物理学会第74回年次大会  |
| 4. 発表年<br>2019年            |

|  |
|--|
| 1. 発表者名<br>浦野慎也, 青木文哉, 松下琢, 檜枝光憲, 和田信雄       |
| 2. 発表標題<br>ナノ多孔体中ヘリウム超流動研究のための10mK小型希釈冷凍機の開発 |
| 3. 学会等名<br>日本物理学会 第73回年次大会                   |
| 4. 発表年<br>2018年                              |

|  |
|--|
| 1. 発表者名<br>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 |
| 2. 発表標題<br>バルク液体4Heの横音響インピーダンス測定                         |
| 3. 学会等名<br>日本物理学会 第73回年次大会                               |
| 4. 発表年<br>2018年  |

|   |
|---|
| 1. 発表者名<br>天池一憲, 松下琢, 檜枝光憲, 和田信雄                  |
| 2. 発表標題<br>3次元ナノ多孔体HMM-2に吸着した4He薄膜上3HeのNMRによる観測IV |
| 3. 学会等名<br>日本物理学会 第73回年次大会                        |
| 4. 発表年<br>2018年                                   |

|  |
|--|
| 1. 発表者名<br>檜枝光憲, 滝沢亮人A, 立木智也B, 高橋大輔C, 白濱圭也B, 奥田雄一D, 河野公俊D, 松下琢A, 和田信雄A |
| 2. 発表標題<br>QCM測定における2次元およびバルク4Heの回転効果                                  |
| 3. 学会等名<br>日本物理学会2017年秋季大会   |
| 4. 発表年<br>2017年  |

|  |
|--|
| 1. 発表者名<br>天池一憲, 松下琢, 檜枝光憲, 和田信雄                   |
| 2. 発表標題<br>3次元ナノ多孔体HMM-2に吸着した4He薄膜上3HeのNMRによる観測III |
| 3. 学会等名<br>日本物理学会2017年秋季大会                         |
| 4. 発表年<br>2017年                                    |

|  |
|--|
| 1. 発表者名<br>和田信雄, 松下琢, 鈴木尚将, 檜枝光憲, 戸田亮        |
| 2. 発表標題<br>3次元ナノ多孔中4He薄膜の2次元縮退および3次元相転移に伴う比熱 |
| 3. 学会等名<br>日本物理学会2017年秋季大会                   |
| 4. 発表年<br>2017年                              |

|   |
|---|
| 1. 発表者名<br>T. Matsushita, N. Wada, T. Suzuki, S. Urano, T. Murai, R. Toda, M. Hieda           |
| 2. 発表標題<br>One- and Three-Dimensional Transitions of 4He Superfluid Films Formed in Nanopores |
| 3. 学会等名<br>ULT 2017: Frontiers of Low Temperature Physics (国際学会)                              |
| 4. 発表年<br>2017年   |

|  |
|--|
| 1. 発表者名<br>T. Matsushita, K. Amaike, R. Shibatsuji, M. Hieda, N. Wada                                  |
| 2. 発表標題<br>Essentially Different 3He Fluid States in 4He-preplated 1D and 3D Nanopores Revealed by NMR |
| 3. 学会等名<br>ULT 2017: Frontiers of Low Temperature Physics (国際学会)                                       |
| 4. 発表年<br>2017年  |

|   |
|---|
| 1. 発表者名<br>N. Wada, T. Matsushita, T. Suzuki, S. Urano, T. Murai, R. Toda, M. Hieda           |
| 2. 発表標題<br>One- and Three-Dimensional Transitions of 4He Superfluid Films Formed in Nanopores |
| 3. 学会等名<br>28th International Conference on Low Temperature Physics, LT28 (国際学会)              |
| 4. 発表年<br>2017年   |

|  |
|--|
| 1. 発表者名<br>T. Matsushita, R. Shibatsuji, K. Kurebayashi, M. Hieda, N. Wada             |
| 2. 発表標題<br>Possible Tomonaga-Luttinger liquid state of 3He adsorbed in 1D nanochannels |
| 3. 学会等名<br>28th International Conference on Low Temperature Physics, LT28 (国際学会)       |
| 4. 発表年<br>2017年  |

|  |
|--|
| 1. 発表者名<br>T. Matsushita, K. Amaike, T. Yoshimura, M. Kuno, M. Hieda, N. Wada      |
| 2. 発表標題<br>3He fluid states adsorbed in 4He-preplated nanopores with 3D connection |
| 3. 学会等名<br>28th International Conference on Low Temperature Physics, LT28 (国際学会)   |
| 4. 発表年<br>2017年  |

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

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