

|                  |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  |
|------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Title            | ナノスケール・ヘリウム物理学の構築とその応用                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                           |
| Sub Title        | Nanoscale helium physics and its applications                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    |
| Author           | 白濱, 圭也(Shirahama, Keiya)<br>本多, 謙介(Honda, Kensuke)<br>柴山, 義行(Shibayama, Yoshiyuki)<br>村川, 智(Murakawa, Satoshi)<br>Koga, Aaron(Tsuiki, Tomoya)<br>立木, 智也                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          |
| Publisher        |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  |
| Publication year | 2015                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                             |
| Jtitle           | 科学研究費補助金研究成果報告書 (2014. )                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         |
| JaLC DOI         |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  |
| Abstract         | <p>本研究は、ヘリウム4をナノ空間に閉じこめて実現される「ナノスケール・ヘリウム」における新しい量子現象を系統的に探索解明すると共に、その超流動性を自在に制御する方法を確立して、様々な科学技術への応用研究を展開する。基礎的側面では、ナノ多孔体中4Heに見られる2つの量子相転移の発現メカニズムを完全に解明した。また、ナノポアアレイ中4Heの超流動性が、量子渦の発生に起因する特異な減衰を示すこと、グラフェン表面上4Heが多数の2次元固体相を有することを明らかにした。応用的側面では、超流動ジョセフソン素子の開発を目指し、ジョセフソン効果観測用デバイスと、第二音波を用いた超流動流速測定装置の開発を行った。</p> <p>In this project, we search for novel quantum phenomena in "Nanoscale Helium", which is realized by confining 4He in nano-spaces. We also pursuit possible applications of Nanoscale Helium by controlling superfluidity in nano-spaces. We have elucidated perfectly the mechanisms of two quantum phase transitions in 4He-nanoporous systems by dynamical measurements. We have discovered anomalous dissipation in superfluid 4He confined in regular nanopore array, and various two-dimensional solid phases in 4He immersed in graphene sheets. In application studies, we have developed superfluid Josephson junctions with flow measurement devices, and superfluid velocimeter utilizing the Doppler shift of second sound.</p> |
| Notes            | <p>研究種目：基盤研究(S)</p> <p>研究期間：2009～2014</p> <p>課題番号：21224010</p> <p>研究分野：低温物理学</p>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 |
| Genre            | Research Paper                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                   |
| URL              | <a href="https://koara.lib.keio.ac.jp/xoonips/modules/xoonips/detail.php?koara_id=KAKEN_21224010seika">https://koara.lib.keio.ac.jp/xoonips/modules/xoonips/detail.php?koara_id=KAKEN_21224010seika</a>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          |

慶應義塾大学学術情報リポジトリ(KOARA)に掲載されているコンテンツの著作権は、それぞれの著作者、学会または出版社/発行者に帰属し、その権利は著作権法によって保護されています。引用にあたっては、著作権法を遵守してご利用ください。

The copyrights of content available on the Keio Associated Repository of Academic resources (KOARA) belong to the respective authors, academic societies, or publishers/issuers, and these rights are protected by the Japanese Copyright Act. When quoting the content, please follow the Japanese copyright act.

平成 27 年 6 月 12 日現在

機関番号：32612

研究種目：基盤研究(S)

研究期間：2009～2014

課題番号：21224010

研究課題名（和文）ナノスケール・ヘリウム物理学の構築とその応用

研究課題名（英文）Nanoscale Helium Physics and Its Applications

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

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 171,600,000 円

研究成果の概要（和文）：本研究は、ヘリウム4をナノ空間に閉じこめて実現される「ナノスケール・ヘリウム」における新しい量子現象を系統的に探索解明すると共に、その超流動性を自在に制御する方法を確立して、様々な科学技術への応用研究を展開する。基礎的側面では、ナノ多孔体中4Heに見られる2つの量子相転移の発現メカニズムを完全に解明した。また、ナノポアアレイ中4Heの超流動性が、量子渦の発生に起因する特異な減衰を示すこと、グラフェン表面上4Heが多数の2次元固体相を有することを明らかにした。応用的側面では、超流動ジョセフソン素子の開発を目指し、ジョセフソン効果観測用デバイスと、第二音波を用いた超流動流速測定装置の開発を行った。

研究成果の概要（英文）：In this project, we search for novel quantum phenomena in "Nanoscale Helium", which is realized by confining 4He in nano-spaces. We also pursuit possible applications of Nanoscale Helium by controlling superfluidity in nano-spaces. We have elucidated perfectly the mechanisms of two quantum phase transitions in 4He-nanoporous systems by dynamical measurements. We have discovered anomalous dissipation in superfluid 4He confined in regular nanopore array, and various two-dimensional solid phases in 4He immersed in graphene sheets. In application studies, we have developed superfluid Josephson junctions with flow measurement devices, and superfluid velocimeter utilizing the Doppler shift of second sound.

研究分野：低温物理学

キーワード：低温物性 物性実験 量子凝縮系 超流動 量子相転移 ジョセフソン効果 量子渦 量子臨界現象

## 1. 研究開始当初の背景

液体・固体ヘリウムは低温物理学の中心的研究対象であり、凝縮系物理学の根幹をなす豊かな概念を生み出してきた。ヘリウムは「強相関系」の典型であり、その超流動性や磁性の発現には強い原子間相関が本質的とされてきたが、強相関ゆえにその理解は困難でチャレンジングな課題である。申請者らは、 $^4\text{He}$  をナノサイズの微細孔を有する「ナノ多孔体」に閉じこめて原子相関を系統的に制御して、「ヘリウムナノ構造」の新しい量子多体現象を探索する試みを、特定領域研究・基盤研究(A)の助成を受け精力的に展開し、細孔直径 2.5nm のナノ多孔質ガラス中  $^4\text{He}$  の量子相転移の発見(PRL 93, 070401 (2004))、「局在ボース・アインシュタイン凝縮」状態の発見(JPSJ 77,013601 (2008); PRL 100, 195301 (2008))といった成果を上げた。これらの成果を現した相図を図1に示す。「ヘリウムナノ構造」はバルク  $^4\text{He}$  と全く異なる相図を有し、超流動と BEC が異なる温度で起こる。この驚くべき量子相転移の発見は、ナノ細孔への閉じこめで新しい原子相関効果が生み出されることを示している。さらに、コヒーレンス長(約 0.3nm)の10倍程度の細孔で超流動が抑圧されることから、全く新しい「超流動ジョセフソン接合」を実現し、超流動ヘリウムを他分野や実用研究に大きく発展させることができる、という着想を得た。

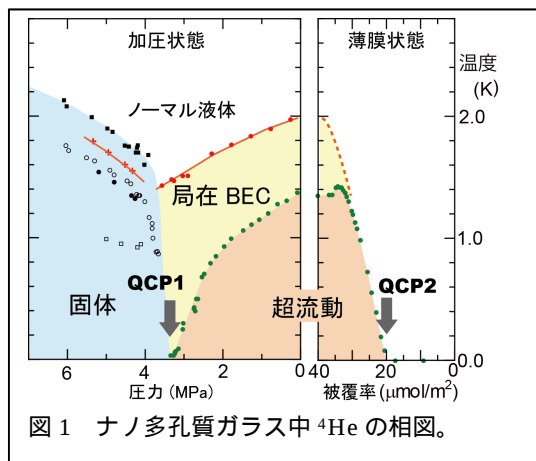


図1 ナノ多孔質ガラス中  $^4\text{He}$  の相図。

## 2. 研究の目的

本研究はナノ多孔体を利用して創成される「ナノスケール・ヘリウム」における新しい物理の構築と、他分野への応用を追求する。具体的な研究目標を以下のように定めた。

- (1)  $^4\text{He}$  ナノ構造の量子臨界現象の解明 ランダム・周期的ナノ構造を用いた実験から、量子相転移の発現機構を微視的に解明し、モット転移・ボースガラスや酸化物高温超伝導との対応を深く追求し、「ポテンシャル中強相関ボース液体」の実験的モデルを創成する。
- (2) ナノ構造を用いた超流動性制御 ポーラスアルミナの規則的細孔構造を利用して、超流動特性を制御することを目指し、ジョセフソン素子の開発に繋げる。
- (3) 超流動ジョセフソン素子の開発 (2)の

成果を利用して中性超流体に対するジョセフソン効果」を実現し、従来より遙かに高感度の「超流動ジョセフソン素子」を開発する。(4) 超流動ジョセフソン素子による応用研究 上記超流動ジョセフソン素子を用いて「 $^4\text{He}$  物質波干渉計」を開発し、超流動ジャイロスコープによる地球自転速度の測定等の基礎物理学的・実用的研究を展開する。

## 3. 研究の方法

本研究は、白濱(代表)、柴山(H25 年度まで分担)、村川(H22-24 研究支援者、H25 より連携研究者)および慶應義塾大学大学院生がナノスケール・ヘリウムの極低温実験を担当し、本多(分担)および山口大学学生が「ポーラスアルミナ」(以下 PA と略す)から種々のナノ構造を開発するという分担で進めた。また、途中の研究進展に対応して、河野公俊(理研)と高橋大輔(理研・足利工大)の協力を得てナノ多孔体中固体  $^4\text{He}$  の超流動に関する実験を、理化学研究所の回転希釈冷凍機を使用して行った。更に、ナノ多孔体中  $^4\text{He}$  の理論構築が T. Egge と押川正毅(東大物性研)が主導し、本研究グループが協力する形で進められた。また超音波実験では檜枝光憲(名大)、鈴木勝・谷口淳子(電通大)、ジョセフソン実験では R. Packard(UC Berkeley)の助言協力を得た。

### (1) ポーラスアルミナの作成と細孔修飾

本研究では PA が作るナノ細孔配列の均一性と規則性、高密度性を最大限に利用する。PA は 1 次元細孔が基盤に垂直に配列した構造を持つ(左図 SEM 写真)。PA そのものの細孔径は数十 nm であり、我々が企図する  $^4\text{He}$  超流動の抑制は非常に小さい。しかし、細孔を他の物質でコートするなどの「修飾」を施すことで、均一さを失わず細孔の狭窄化を実現できると考えた。修飾の手法として金薄膜の蒸着と、カーボンコート PA の開発の 2 つを試みた。また、従来は作成が困難とされていた、孔径 20nm 以下の PA の開発にも取り組んだ。

### (2) ナノ多孔体中 $^4\text{He}$ の量子相転移

ナノ多孔体中  $^4\text{He}$  は、吸着薄膜状態と加圧液体状態において 0K で超流動が連続的に消失する「量子臨界点」(QCP)を 1 つずつ持つ(以下、加圧状態:QCP1、薄膜状態:QCP2 と呼ぶ。図参照)。QCP1,2 近傍における量子揺らぎ効果による新現象を探索するため、ねじれ振子と超音波という測定時間スケールが 3 桁以上異なる 2 種類の動的測定法を用いて調べた。(A) QCP1(加圧状態): (A1) QCP1 における「動的量子臨界性」の発見 広帯域超音波測定手法を開発し、第一量子臨界点近傍でのダイナミクスを調べた。(A2) 周期ナノ構造における量子相転移 直径 5nm の球状の空洞が規則正しく配列し、その間がパイプで繋がったナノ多孔体(HMM3)に閉じこめた  $^4\text{He}$  の超流動転移温度の圧力依存性を、ねじれ振子と超音波を併用して調べた。(A3) 静電場の効果 外場が量子臨界現象に及ぼす効果の研究として、 $^4\text{He}$  を圧入したナノ多孔質

ガラスに約  $10^6$  V/m までの静電場を印加して、超流動特性や相図の変化を探索した。(A4) 「固体超流動」的振る舞いの解明 ナノ多孔質ガラス中  $^4\text{He}$  が広い圧力範囲でバルク固体  $^4\text{He}$  に酷似した「超流動」(超固体、Supersolid) 様の振る舞いを持つことを見出し、その詳細な研究を進めた。また、超固体挙動に対する試料回転の効果調べた。

(B) QCP2(薄膜状態): (B1) 非超流動相ダイナミクスと量子臨界現象 ナノ多孔質ガラスの細孔に吸着した  $^4\text{He}$  の薄膜に対してねじれ振子実験を行った。(B2) グラファイト表面上吸着固体  $^4\text{He}$  薄膜の超流動的挙動 グラファイトの Basal Plane 表面に吸着した  $^4\text{He}$  薄膜の「第 2 原子層」で実現される 4/7 整合固体相近傍で期待される超流動挙動を探索した。(B3) 細孔構造ランダム化による量子局在 ナノ多孔質ガラスにクリプトン 1 原子層を前吸着させて細孔径制御を試み、超流動の抑制現象を発見した。

(3) ナノ細孔アレイ中  $^4\text{He}$  の超流動とジョセフソン効果

上記(1)で作成された PA を用いた実験を展開する。(C1) PA ナノポアアレイ中  $^4\text{He}$  の超流動特性 表題の超流動性を、ねじれ振子および振動ワイヤーの手法により詳細に調べた。(C2) グラファイト表面における  $^4\text{He}$  の結晶成長とカーボンコート PA を用いた細孔径制御 グラファイト表面で起こる  $^4\text{He}$  結晶の層状(Layer by Layer)成長を、カーボンナノチューブを用いた細孔径制御に利用することを目的として、層状成長の詳細な振る舞いをねじれ振子で調べた。さらにカーボンコート PA 中  $^4\text{He}$  の超流動特性を調べた。(C3) 超流動 SQUID 装置の開発 ジョセフソン効果の観測を目指した微細超流動流検出装置の開発・製作を行った。(C4) 小型回転冷凍機の開発及び第二音波に対する回転効果の研究 ジョセフソン効果および超流動性への回転効果を利用した回転・速度センサの開発を目的として、慶応大に回転クライオスタット架台を設置した。上記(C1)で作成した PA 挿入型ヘリウム環状流路を持つねじれ振子を用いて、超流動  $^4\text{He}$  第二音波に対する回転効果を研究した。

#### 4. 研究成果

(1) ポーラスアルミナの作成と細孔修飾

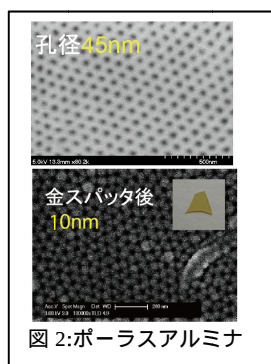


図 2: ポーラスアルミナ

孔直径 45nm、孔ピッチ 100nm、厚み 60  $\mu\text{m}$  の PA 試料を作成するノウハウを確立した。この基本試料に、スパッタリングによる金の堆積を行い、細孔径を 10nm まで狭窄化することに成功した(図 2)。更に孔径 20nm の試料作成に成功し、

これを出発点として細孔の狭窄化を試みた。また、エタノール雰囲気中で PA を加熱処理することで細孔内壁にグラファイトをコートした試料も作成した。これらを用いた実験の結果については後述する。

(2) ナノ多孔体中  $^4\text{He}$  の量子相転移

(A1) QCP1 における「動的量子臨界性」の発見  $\text{LiNbO}_3$  超音波発振素子の高調波特性を利用して、10-110MHz の広い周波数域での超音波実験に成功した。超流動・局在 BEC 相における超音波吸収が低温で温度に比例することを見出した(図 3)。この振る舞いは、量子臨界現象の緩和時間が温度に反比例するという一般論からの予想と合致し、ナノ多孔質ガラス中  $^4\text{He}$  の量子臨界挙動を初めて強

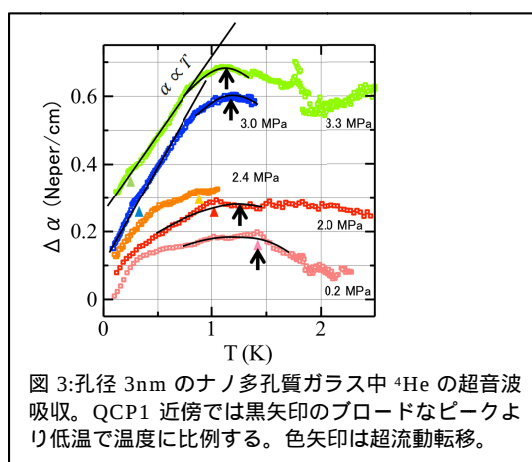


図 3: 孔径 3nm のナノ多孔質ガラス中  $^4\text{He}$  の超音波吸収。QCP1 近傍では黒矢印のブロードなピークより低温で温度に比例する。色矢印は超流動転移。

く示唆する成果である。しかし、緩和時間の値が理論予想より 3 桁程度大きく、この食い違いの解決は今後の課題として残された。また超流動転移温度が周波数増加と共に上昇し、上昇は QCP 近傍でより顕著になることも見出された。この振る舞いも、量子臨界現象の動的性質をとらえたものと解釈される。

(A2) 周期ナノ構造における量子相転移 量子相転移はボース凝縮体のナノ空間での局在を伴って起こる。このとき多孔体構造の乱れが局在効果に影響するかを調べることは非常に重要である。そこで直径 5nm の球状ナノ空洞が周期的にパイプで接続されたナノ多孔体に圧入した  $^4\text{He}$  の超流動転移を超音波により調べ、超流動転移温度が 3MPa 以上の圧力で強く抑圧され、3.4MPa 近くで 0K に近づく量子相転移を発見した。これにより、量子相転移がナノスケール・ヘリウムの普遍的な性質であり、細孔構造の乱れと関係なく起こることが示された。

周期ナノ構造中  $^4\text{He}$  では、理論面において大きな進展があった。Eggel と押川により、周期多孔構造を模した量子回転子模型で量子相転移が起こり、実験を定量的に説明することができた。この理論により、量子相転移がナノ多孔体中  $^4\text{He}$  の普遍的現象であることが確立した。

(A3) 静電場の効果 孔径 3nm のナノ多孔質ガラス中  $^4\text{He}$  に最大  $2 \times 10^6$  V/m の静電場を印加できるねじれ振子を開発して超流動特

性や相図の変化を測定したが、精度内で有意な変化は観測されなかった。

(B1) QCP2 近傍の非超流動相ダイナミクスと量子臨界現象 単原子層程度の  $^4\text{He}$  膜では超流動が生じない。この非超流動薄膜に対して捻れ振り子実験を行い、超流動に類似した共振周波数の上昇と、散逸の増大を観測した。この現象は QCP2 で消失し、量子相転移と明確な相関を持つことがわかった。

この現象が特定の構造を持つ捻れ振り子だけに現れることを手がかりに、FEM 解析によって、現象が  $\text{He}$  薄膜の弾性率増加に起因することを確かめた。さらに弾性率変化が熱活性化型の緩和時間を仮定して説明できることから、新しい解釈を得た。即ち非超流動状態はエネルギーギャップを持つ種の「モット絶縁体」状態にあり、弾性率変化はモット絶縁体特有の「非圧縮性」に起因する。ギャップが

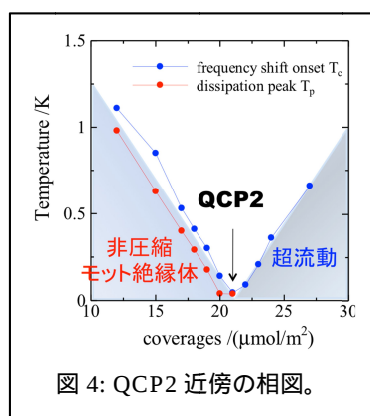


図 4: QCP2 近傍の相図。

多孔体で行われていた比熱や超音波の実験も自然に説明できる。従って  $\text{He}$  薄膜一般に存在する QCP2 は、超流動-モット絶縁体転移点として統一的に理解できる(図 4)。

(B2) グラファイト表面上吸着固体  $^4\text{He}$  薄膜の超流動的挙動 この系は基盤周期ポテンシャルの影響を受けて興味深い構造変化を示すが、第 2 層でいわゆる  $4/7$  整合相の存否が論争となっていた。我々はねじれ振り子で、2 原子層目で薄膜が液体とは異なる超流動的な振る舞いを示すことを発見し、超流動的成分が振り子振動速度の上昇に伴い減少すること、さらにこの現象が  $4/7$  整合相の存在と関連することを示唆する結果を得た。特に、 $4/7$  整合固体相に励起される空格子点が示しうるボース凝縮との関連を考察した。しかしこの超流動挙動についても、(B1)で見出した弾性異常に起因する可能性が出てきたため、実験結果の再検討を要する。

(B3) 細孔構造ランダム化による量子局在 加圧  $^4\text{He}$  に対する量子相転移(QCP1)では、乱れの影響が本質ではないことを示したが、超流動に対する乱れの影響が意外なところで発見された。多孔質ガラスに  $\text{Kr}$  原子を前吸着させて細孔径を制御する実験を試み、 $\text{Kr}$  約 1 原子層の吸着により細孔径分布が数倍大きくなり、そこに吸着された  $^4\text{He}$  薄膜の超流動転移温度が 10%低下することを見出した。

この事実は、細孔が作るポテンシャルのランダムネスが増強されたために起こる量子局在効果により、超流動性が抑制されたものと解釈される。このことから、吸着薄膜状態では乱れの影響が存在することが最終的に示された。乱れたボース粒子系の研究は冷却原子を用いて盛んに行われているが、ヘリウムで見つかったのは本研究が最初である。

(3) ナノ細孔アレイ中  $^4\text{He}$  の超流動とジョセフソン効果

(C1) PA ナノポアアレイ中  $^4\text{He}$  の超流動特性 (1)で作成した PA 中  $^4\text{He}$  の超流動特性を、ねじれ振り子および振動ワイヤーの手法により詳細に調べた。左図のようにねじれ振り子に環状流路を設け、流路の 1 箇所を PA 板で仕切り、細孔内  $^4\text{He}$  の超流動を振り子の共振周波数から調べた。転移温度の低下から細孔径を算出すると共に、左図のように多数の鋭い共鳴を観測した。これは PA 板の振動により第二音波が励起されたと解釈でき、モードの同定にも成功した。((C4)も参照のこと)

また、超伝導線を液体  $^4\text{He}$  中で振動させる「Vibrating Wire」法を応用して、ワイヤーに金蒸着 PA 試料(細孔径 10nm)を接着して超流動特性を調べた。その結果、超流動転移温度直下で、エネルギー散逸が増大し極大を持つことがわかった。孔のない PA ではこのような散逸が無いことから、散逸は孔内で生成された量子渦によると考えられる。いくつかの散逸機構を理論的に検討している。

(C2) グラファイト表面上  $^4\text{He}$  の結晶成長とカーボンコート PA による細孔制御 (1)で開

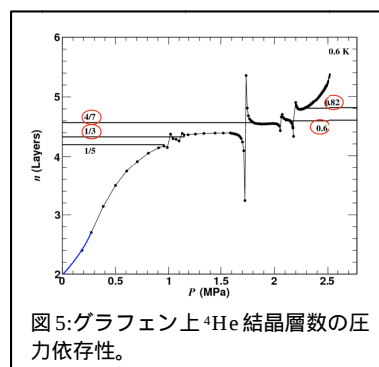


図 5: グラフェン上  $^4\text{He}$  結晶層数の圧力依存性。

発したカーボンコート PA では期待した層状結晶成長と超流動抑制は観測されなかった。しかしこの研究の関連実験

として、グラフェン表面上  $^4\text{He}$  結晶の層状成長をねじれ振り子で調べ、4 原子層目に 5 つの特徴的な異常を見出した(図 5)。この異常は、複数の 2 次元整合不整合固体間の 1 次相転移によるものと考えられ、そのうち 3 つは被覆率  $1/5, 1/3(\sqrt{3} \times \sqrt{3}$  構造),  $4/7(\sqrt{7} \times \sqrt{7}$  構造)の整合固体、1 つは不整合固体と同定した。このような多数の状態間の相転移は他の 2 次元固体では例が無く、整合不整合転移の物理にユニークな知見をもたらすものである。

(C3) 超流動 SQUID 装置の準備 ジョセフソン効果の観測を目指した微細超流動流検出装置を完成させ、細孔狭窄化 PA を装着して動作テストを行った。超伝導 SQUID 検出系にいくつかの不具合があり、これを改善し

て再度実験を行っている。

(C4) 小型回転冷凍機の開発及び第二音波に対する回転効果の研究 ジョセフソン効果をはじめとする超流動特性の回転効果を研究するため、慶応大に小型回転クライオスタット架台を設置した。これを用いて、(C1)で発見した PA 挿入環状流路での第二音波共鳴に対する容器回転の影響を調べた。予想された第二音波のドップラーシフトに比べ圧力変動の影響が大きく、圧力を安定化させた再実験を準備している。また、2.5Mpa 付近での固液共存状態で、第二音波とは異なる周期性を持つ多数の共鳴を見出した。この共鳴の発現機構について解明を進めている。

(4) (A4) ナノスケール固体  $^4\text{He}$  における超流動的挙動

当初の計画に無かった研究として、固体ヘリウムの超流動挙動の解明に向けた実験を、理研の回転希釈冷凍機を用いて行った。2004 年にねじれ振子で発見された固体  $^4\text{He}$  の超流動的挙動は、固体が低温で示す弾性率の増大に伴う見かけ上の現象であると理解さ

れている。しかし、超流動的挙動が全て弾性効果で生じているかは明らかではない。真の超流動の兆候を探るため、ナノ多孔質ガラス中固体とバルク固体を含む環状ねじれ振子を用いた実験を、4rad/sec までの DC 回転下で行った。その結果、多孔質中固体とバルク固体が共存する試料において、「みかけの固体超流動成分」が試料を回転させると大きく減少し、その減少は振動を伴うこと、これを回転角速度の逆数( $\Omega^{-1}$ )でプロットすると周期的振動になっていることを見出した(図 6)。この「 $\Omega^{-1}$  振動」は固体中電子で物理量が磁場の逆数に対し周期的に振動する「ドハース現象」を想起させる。更にバルク固体  $^4\text{He}$  の環状試料の剪断弾性率を、回転下で直接測定した。その結果、固体ヘリウムの弾性は試料回転の影響を受けないことが判明した。このことから、 $\Omega^{-1}$  振動は弾性率以外の、未知の物理量の異常に起因することが明らかになった。この極めて興味深い現象の解明に向けて、系統的な実験を進めている。

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 9 件)

Aaron M. Koga, Yoshiyuki Shibayama, Kei-ya Shirahama, Discontinuous Growth of Solid

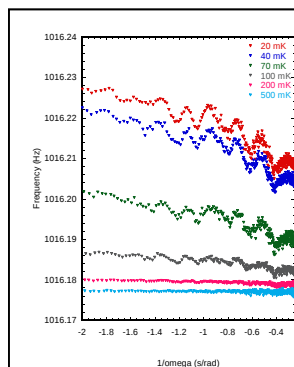


図 6: バイコール多孔質ガラス中固体  $^4\text{He}$  を入れたねじれ振子の共振周波数の、DC 回転角速度の逆数依存性。0.2 K 以下で周期的に振動する。

$^4\text{He}$  on Graphene, Journal of the Physical Society of Japan, 査読有, Vol. 82, No. 8, 2013, pp. 093601 1-4, DOI: <http://dx.doi.org/10.7566/JPSJ.82.093601>

S. Murakawa, R Higashino, K Yoshimura, Y Chikazawa, T Tanaka, K Kuriyama, K. Honda, Y. Shibayama and K. Shirahama, Torsional oscillator experiment on superfluid  $^4\text{He}$  confined in a porous alumina nanopore array, 査読有, Journal of Physics: Conf. Ser., Vol. 400, 2012, pp. 012053 (4 Pages) DOI: 10.1088/1742-6596/400/1/012053

Hitomi Yoshimura, Rama Higashino, Yoshiyuki Shibayama, Kei-ya Shirahama, Anomalous Response of  $^4\text{He}$  Confined in Nanoporous Media to Torsional Oscillation, 査読有, Journal of Low Temperature Physics Vol. 169, Issue 3-4, 2012, pp. 218-227, DOI: 10.1007/s10909-012-0687-3

Aaron M. Koga, Yoshiyuki Shibayama, Kei-ya Shirahama, Layer by Layer Growth of Solid  $^4\text{He}$  on Graphite down to 0.1 K, 査読有, Journal of Low Temperature Physics, Vol. 166, Issue 5-6, 2012, pp. 257-267, DOI: 10.1007/s10909-011-0452-z

Y. Shibayama, K. Shirahama, Suppression of Superfluidity of  $^4\text{He}$  in a Nanoporous Glass by Preplating a Kr Layer, Journal of the Physical Society of Japan, 査読有, Vol. 80, No. 8, 2011, pp. 084604 (10 Pages) DOI: <http://dx.doi.org/10.1143/JPSJ.80.084604>

Thomas Eggel, Masaki Oshikawa, Kei-ya Shirahama, Four-dimensional XY quantum critical behavior of  $^4\text{He}$  in nanoporous media, Physical Review B, 査読有, Vol. 84, 2011, pp. 020515(R) DOI: <http://dx.doi.org/10.1103/PhysRevB.84.020515>

T. Kobayashi, J. Taniguchi, A. Saito, S. Fukazawa, M. Suzuki, K. Shirahama, Ultrasound Measurements of  $^4\text{He}$  Confined in a Nano-porous Glass, Journal of the Physical Society of Japan, 査読有, Vol. 79, No. 7, 2010, pp. 084601 (6 Pages) DOI: <http://dx.doi.org/10.1143/JPSJ.79.084601>

T. Kobayashi, A. Saito, J. Taniguchi, M. Suzuki, K. Shirahama, Simultaneous Measurements of an Ultrasound and a Torsional Oscillator for Pressurized  $^4\text{He}$  in a Nanoporous Glass, 査読有, Journal of Low Temperature Physics, Vol. 158, Issue 1-2, 2010, pp. 250-255, DOI: 10.1007/s10909-009-0048-z

〔学会発表〕(計 79 件)

巻内崇彦、村川智、白濱圭也、超流動  $^4\text{He}$  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、2015 年 3 月 23 日、早稲田大学(東京都新宿区)

K. Shirahama, Anomalous stiffening of  $^4\text{He}$  films adsorbed on nanoporous glasses, 27<sup>th</sup>

International Conference on Low Temperature Physics, 2014 年 8 月 11 日, Buenos Aires, Argentina

村川智、本多謙介、白濱圭也他、ナノポア  
アレイ中の超流動  $^4\text{He}$  の流れと散逸、日本  
物理学会第 69 回年次大会、2014 年 3 月 30  
日、東海大学(神奈川県平塚市)

正入木佑輔、兼安志郎、本多謙介、量子ド  
ット剛性のための超微細細孔を持つポー  
ラスアルミナ高規則媒体の開発、日本化学  
会第 94 春季大会、2014 年 3 月 29 日、名  
古屋大学(愛知県名古屋市)

白濱圭也、A. Koga、柴山義行、グラフェ  
ン基盤上ヘリウム 4 の不連続な結晶成長、  
日本物理学会 2013 年秋季大会、2014 年 9  
月 28 日、徳島大学(徳島県徳島市)

S. Murakawa, K. Honda, Y. Shibayama, K.  
Shirahama, Superfluid flow and dissipation of  
 $^4\text{He}$  confined in a well-controlled nanopore  
array, International Symposium on Quantum  
Fluids and Solids, 2013 年 8 月 3 日、くにび  
きメッセ(島根県松江市)(招待講演)

A. Koga, Y. Shibayama, K. Shirahama,  
Discontinuous growth of solid  $^4\text{He}$  from the  
superfluid phase on graphene nanoplatelets,  
International Symposium on Quantum Fluids  
and Solids, 2013 年 8 月 5 日、くにびきメッ  
セ(島根県松江市)(招待講演)

T. Tsuiki, D. Takahashi, S. Murakawa, K.  
Kono, K. Shirahama, Nature of the quantum  
oscillation of solid  $^4\text{He}$  under DC rotation,  
International Symposium on Quantum Fluids  
and Solids (QFS2013), 2013 年 8 月 5 日、松  
江市くにびきメッセ(島根県松江市)

D. Takahashi, K. Shirahama et al., Possible  
quantum oscillation of non-classical  
rotational inertia of solid  $^4\text{He}$  in vycor by DC  
rotation, International Symposium on  
Quantum Fluids and Solids 2012 (QFS2012),  
2012 年 8 月 20 日, UK(招待講演)

Y. Iwata, S. Murakawa, K. Shirahama et al.  
Ultrasound Attenuation of Confined  $^4\text{He}$  near  
the Quantum Critical Point, International  
Symposium on Quantum Fluids and Solids  
2012, 2012 年 8 月 20 日, Lancaster, UK

K. Shirahama, Supersolid behavior in  
nano-scale  $^4\text{He}$ , Workshop “Supersolidity in  
Nature”, 2012 年 6 月 11 日, 理化学研究所  
(埼玉県和光市)(招待講演)

S. Murakawa, K. Honda, Y. Shibayama, K.  
Shirahama, Torsional oscillator measurements  
for superfluidity of  $^4\text{He}$  confined in a porous  
alumina nanopore array, 26<sup>th</sup> International  
Conference on Low Temperature Physics,  
2011 年 8 月 13 日, Beijing, China

K. Shirahama, Supersolid Behavior and  
Inertial Anomalies in Solid  $^4\text{He}$  Formed in  
Nanoporous Media, 26th International  
Conference on Low Temperature Physics,  
2011 年 8 月 13 日, Beijing, China(招待講演)

K. Shirahama, Solid  $^4\text{He}$  in Vycor under  
rotation, Workshop “Supersolids 2011”,  
2011/6/9, New York, USA (招待講演)

K. Shirahama, Helium 4 in nanoporous  
media : Confinement and disorder, Summer  
School “Disordered Systems: From  
Condensed Matter Physics to Ultracold  
Atomic Gases”, 2011 年 6 月 2 日, Cargese,  
France (招待講演)

白濱圭也、ナノ多孔構造中ヘリウム 4 の両  
市臨界性、理研シンポジウム「量子凝縮系  
の非線形・非平衡現象」, 2011 年 1 月 4 日、  
理化学研究所(埼玉県和光市)(招待講演)

Keiya Shirahama,  $^4\text{He}$  in nanoporous media:  
possible supersolid state and its coexistence  
with superfluid state, Workshop “Quantum  
Fluids and Solids: Neutrons and X-rays  
studies”, 2010 年 8 月 7 日, Grenoble, France  
(招待講演)

K. Shirahama, N. Yamanaka, T. Kondo, Y.  
Sogabe, Y. Shibayama, and S. Inagaki,  
Quantum phase transition of  $^4\text{He}$  confined in  
a regular nanoporous structure, International  
Symposium on Quantum Fluids and Solids,  
2010 年 8 月 3 日, Grenoble, France

白濱圭也、ナノスケール・ヘリウムの新しい  
物理と応用、理研シンポジウム「素粒子  
物理と超流動」, 2010 年 7 月 23 日、理化  
学研究所(埼玉県和光市)(招待講演)

Keiya Shirahama,  $^4\text{He}$  in Nanoporous Media:  
QPT, LBEC and possible Supersolidity,  
International Symposium on Quantum Fluids  
and Solids (QFS2009), 2009 年 8 月 7 日,  
Evanston, USA (招待講演)

〔その他〕ホームページ

[http://www.phys.keio.ac.jp/guidance/lab/s/sirahama/kiban\\_s/index.html](http://www.phys.keio.ac.jp/guidance/lab/s/sirahama/kiban_s/index.html)

## 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

本多謙介 (HONDA, Kensuke)

山口大学・大学院理工学研究科・教授

研究者番号：60334314

柴山義行 (SHIBAYAMA, Yoshiyuki)

慶應義塾大学・理工学部・講師

研究者番号：20327688

### (3) 連携研究者

村川智 (MURAKAWA, Satoshi)

慶應義塾大学・理工学部・講師

研究者番号：90432004

### (4) 研究協力者

コガ、アーロン (KOGA, Aaron M.)

慶應義塾大学・理工学研究科・大学院生

立木 智也 (TSUIKI, Tomoya)

慶應義塾大学・理工学研究科・大学院生