

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 6 月 7 日現在

機関番号：12601

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2014～2015

課題番号：26800194

研究課題名(和文)不均一性・ランダム性の無いナノスケール中ヘリウム4超流動の動的応答による研究

研究課題名(英文)Study for dynamic response of superfluid helium four in homogenous nanopore

研究代表者

村川 智 (Satoshi, Murakawa)

東京大学・低温センター・准教授

研究者番号：90432004

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,000,000円

研究成果の概要(和文)：ナノメートルサイズ中の超流動ヘリウム4の流れの性質を研究するために、10nm程度の細孔を持つ試料板を振動ワイヤー法により振動させる実験を行った。超流動転移温度以下で、ある速度以上に振動させると振動の共鳴曲線に異常が現れた。この異常は孔の空いていない板を振動させた場合では見られなかったため、細孔中の超流動の流れに異常が起きていることを示している。細孔中の超流動の流れは低速では量子渦糸の熱活性化モデルで説明でき、高速では量子乱流が発生していると考えられる。

研究成果の概要(英文)：To study for the flow of superfluid helium four in nanopore, we measured vibrating wire with a nanopore plate response. Below superfluid transition temperature, resonance curves show anomalous behavior when the velocity is high. This behavior are not shown in the experiment with no pore, so the superfluid flow in the pore become unusual. At the relatively low velocity, the superfluid flow in nanopore behavior can be explained by thermal activated quantum vortex model, and at high velocity region, quantum turbulence should be occurred.

研究分野：低温物理

キーワード：量子液体 超流動 ナノスケール 量子渦 乱流

1. 研究開始当初の背景

希ガスであるヘリウムは電子配置が閉殻構造であり、質量が小さいため量子性が顕著に現れる物質であると広く知られている。その強い量子性のため絶対零度においても常圧では固相にならず、液相のまま存在し、その液相にはボース統計（ヘリウム 4 ( $^4\text{He}$ ))、フェルミ統計（ヘリウム 3 ( $^3\text{He}$ )) で表される量子統計による振る舞いの違いが顕著に現れる。高圧にすることで現れる固相においても、原子の交換が頻繁に起きているため、2 体交換相互作用だけでなくより多くの原子が参加する多体交換相互作用が重要になるため、通常の固相では起きない量子的な現象が起こる。このようなヘリウム物性は電子物性と非常に近い現象、概念が多い。これらのことからヘリウムは凝縮体の物理系の中でも量子液体・固体として認識され活発に研究がおこなわれている物質であり、ヘリウム系と電子系は互いにフィードバックをかけながら研究が発展してきた。

近年、この超流動をナノスケールサイズに閉じ込めると、超流動転移温が大きく抑制され、圧力をパラメータとした量子相転移を示唆するといった新たな現象が明らかになった。図 1 に例として 2.5 nm の孔を持つ多孔体ガラス中のヘリウムの温度圧力相図を示す[1]。この新たな現象の中でも、超流動相と通常の液相の間に現れる「局在ボースアインシュタイン凝縮相」(図 1 中の Localized BEC の領域)は非常に興味深い。これらの現象は異なる孔の径、形状の多孔体で観測されている[1, 2]。孔のランダム性や不均一性がその由来として挙げられているが[3, 4]、依然として発現機構の詳細は明らかになってい

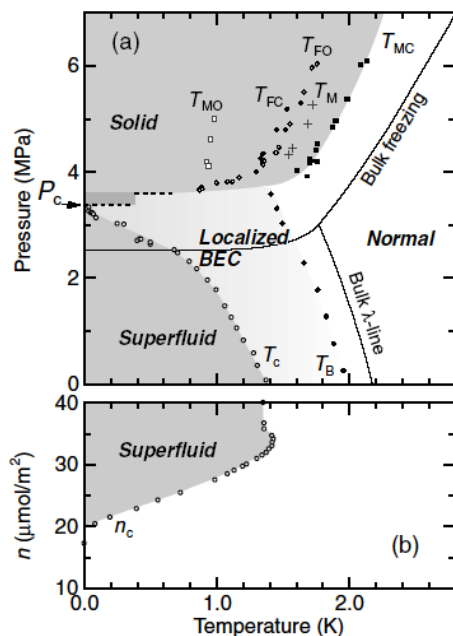


図 1: ナノ多孔質ガラス中のヘリウムの相図[1]。

ない。

関連して進んでいる低次元、特に一次元系における超流動の理論研究においては、超流動の本質は動的応答であり、その周波数特性が重要であると議論されている[5]。図 1 の超流動が現れる温度も回転運動による動的応答によって得られているものであるが、系の低励起エネルギー状態と密接に関連するエネルギー散逸は詳細に調べられてはいなかった。

2. 研究の目的

本研究では未だに未解明であるナノスケール中の超流動  $^4\text{He}$  の動的な性質を流れのエネルギー散逸に着目して明らかにすることを目的としている。流体の運動エネルギーは系の素励起にエネルギーを与えることで散逸するので、素励起の性質を明らかにするために流れのエネルギー散逸は非常に有用な情報を与える。特にエネルギー散逸は素励起の持つエネルギーと運動量に関連するため、流体の速度を変化させ、その依存性を調べることで素励起の分散関係等の情報を引き出すことができる。

また、先行研究では孔系に不均一性・ランダム性があった。その不均一性・ランダム性がナノスケールの超流動に決定的な役割を示すかどうかの検証をおこなうため、ランダム性の無いまっすぐな均質な孔径分布を持つナノ孔中の超流動の振る舞いを調べる。

3. 研究の方法

本研究ではナノ細孔中の流体  $^4\text{He}$  に流れを作成する必要がある。その流れは、流体に力を作用させ液体に速度を持たせて作成する方法でなく、相対的に同一な方法であるナノ細孔を動かすことで作成する。本研究では磁場中において超伝導線を半円状に張り、導線に交流電流を流すことで振動させる Vibrating Wire 法を用いる。図 2 にこの方法の模式図を示す。

この振動子は周囲存在する流体の粘性に大きく依存し、さらに低温になり準粒子の緩和時間が増大し、振動の周波数に対して流体がもはや連続体とみなせない領域では、導線に衝突する粒子の数、エネルギー等に非常に敏

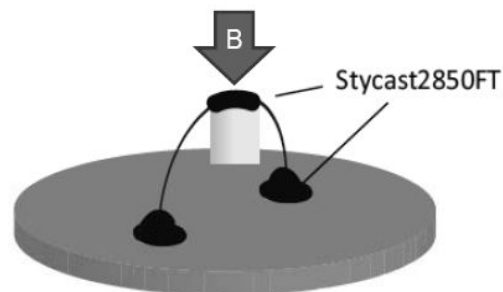


図 2: Vibrating Wire 法の模式図。

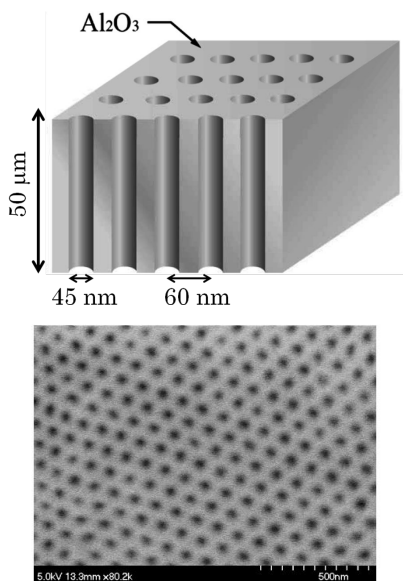


図3：ポーラスアルミナの模式図(上)とSEM画像(下)。

感になることが過去の研究から明らかになっている[6]。この振動する超伝導線にナノスケールの大きさの孔を持つ基板を取り付け、基板を振動させることで、ナノ孔中に流れを作成する。

ナノスケール基板としてはポーラスアルミナを用いた。ポーラスアルミナは孔径が数十 nm の真っ直ぐな孔があいているため、孔径に不均一性・ランダム性は無い(図3上に模式図、下にSEM画像を示す)。これがやはり数十 nm 間隔で三角格子構造を取っていることから、数 mm のかけらにおいても非常に多数の孔が存在する。そのため、測定において、十分な信号強度を得ることができる。ナノスケールの興味深い現象は2~3 nm 程度の大きさに超流動を閉じ込めたときに現れるため[1, 2]、孔径をさらに小さなものにする必要がある。本研究ではポーラスアルミナの表面に金を蒸着させる。本研究では10 nm まで小さくすることに成功している。

本研究ではこの基板を含めた振動子を液体  $^4\text{He}$  に浸し、その運動の共鳴曲線を測定することで、流れの性質を探る。比較のために、孔のない基板を取り付けた振動子の測定も同時に行い、ナノスケールの孔の必要性を検証した。

#### 4. 研究成果

図4に共鳴曲線の共鳴周波数と共鳴ピークの高さの逆数を温度に対してプロットしたものを載せる。大まかには共鳴周波数は振動に追隨する流体の量に、共鳴ピークの逆数はエネルギー散逸に相当する。横軸の温度はバルクの超流動転移温度からの差分で表している。

孔の有無に関わらず、バルクの超流動転移温度において、共鳴周波数の増加やピークの高さの逆数の減少が起きる。これは、バルクが超流動になり粘性が減少することで、振動

体と追隨する流体およびエネルギー散逸が減少することを示している。これにより、この測定が正常に行えていることが確認することができた。

超流動転移温度直下近傍においても、共鳴周波数、ピークの高さともに孔の有無に依存しない。これは、孔径が超流動の回復長と同程度のため、超流動転移をしておらず、液体が基板と一体となって振動していることで説明できる。

さらに温度を下げていくと、孔有り基板と孔無し基板との結果の乖離が見られる。孔有り振動子の共鳴周波数は、急峻に立ち上がる。これは孔中の回復長が孔径より小さくなり、液体が超流動転移し、振動に寄与しなくなることを示している。一方、共鳴ピークの高さの逆数は、孔中が超流動転移をした温度から再び上昇に転じ、流れのエネルギー散逸が大きくなっていることが見て取れる。通常、超流動状態では粘性を持つ常流体と粘性が零である超流体との二成分からなると解釈する、二流体模型で説明される。この模型では、エネルギー散逸には常流体のみが寄与し、これは温度とともに減少する。測定結果はこれと逆の振る舞いをしており、非常に興味深い。この温度領域では図5に示すように共鳴曲線の形も大きく崩れており、通常の液体でよく見られる速度に抵抗力が比例するニュートン流体ではなく、それ以外のエネルギー散逸が存在していることが判明した。

振動速度を変化させたとき、振る舞いは大きく3種類に分けられた。低速度領域では、共鳴曲線の形は崩れることなくニュート

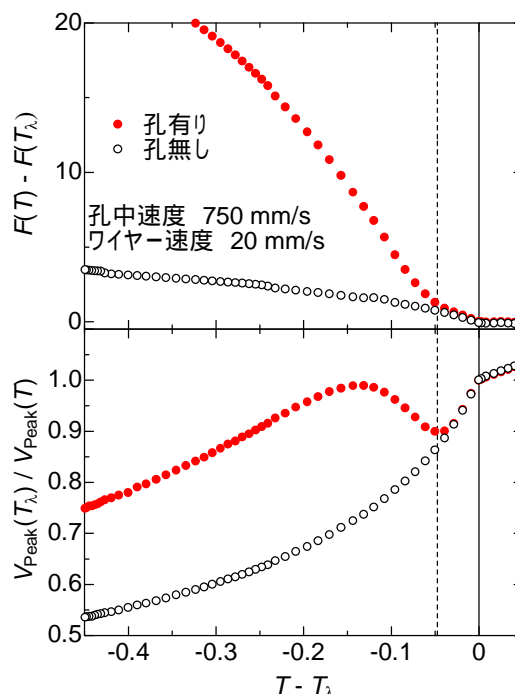


図4：振動子の共鳴周波数とピークの高さの逆数の温度依存性。白丸は孔がついていないもの。

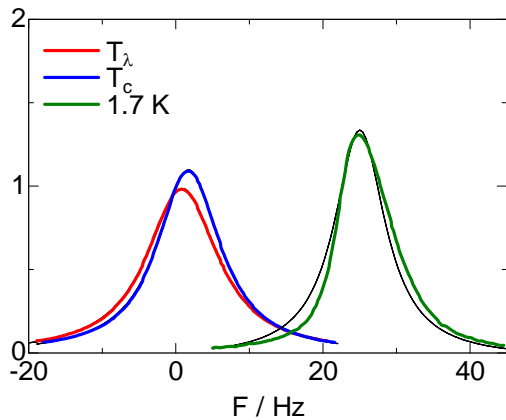


図5: 共鳴曲線の形。緑の線が異常が現れている温度領域の結果。黒い細線は通常のニュートン流体のときに得られる共鳴曲線。左右対称な形からずれていることが分かる。

ン流体的な振る舞いではあるが、散逸はいったん上昇し、最低温では孔無しのものと同じになる。孔無しのものとの差分のエネルギー散逸は孔中において流れに垂直に生成される量子渦糸の熱活性化モデルで説明できた。

高速度領域においては、常流動状態から非ニュートン流体である。新たな散逸の原因としては、バルク中においても乱流状態になっていることが推測される。このような振動体で量子渦糸が大量に作られ、周囲に乱流状態が生成されているのはよく知られている。

その中間の速度領域では、孔中の超流動が乱流になっていることが推測される。この速度ではバルクの超流動が破壊される臨界速度より十分小さい値であり、ナノスケール中の超流動がバルクと異なる性質を持っていることを示している可能性がある。この領域が現れ始める速度と、特徴的な長さや周波数とともに導くことの出来るストローハル数は約0.2となり、ちょうどカルマン渦の発生する条件となっており、孔中で生成された量子渦糸乱流が孔の中から外部に放出されていることを示唆している可能性がある。

近年、ナノスケール中の超流動や量子乱流の研究は量子液体分野でのホットなトピックである。本研究は、それらを融合した先駆けとなる研究となっている。今後、量子乱流およびナノスケール中の超流動の研究を進めるにあたって、重要な足がかりとなる研究を行うことができた。

#### <引用文献>

- [1] K. Shirahama, K. Yamamoto and Y. Shibayama, J. Phys. Soc. Jpn. **77**, 111011 (2008).  
 [2] J. Taniguchi, Y. Aoki and M. Suzuki, Phys. Rev. B **82**, 104509 (2010).  
 [3] M. Kobayashi and M. Tsubota, cond-mat/0510335.  
 [4] A. V. Lopatin and V. M. Vinokur, Phys. Rev. Lett. **88**, 235503 (2002).

[5] T. Eggel, M. A. Cazalilla and M. Oshikawa, Phys. Rev. Lett. **107**, 275302 (2011).

[6] H. E. Hall, M. A. Black and K. Thompson, J. Low Temp. Phys, **4**, 129 (1971).

#### 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)

[学会発表](計 7 件)

村川 智、ナノポアアレイを用いた超流動ヘリウム4の流れの研究、第7回低温センター研究交流会、2016年2月23日、東京大学(東京都文京区)

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ヘリウム4の流れとその散逸、平成27年度物性研究所短期研究会(招待講演)、2016年1月5日~7日、東京大学物性研究所(千葉県柏市)

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、日本物理学会2015年秋季大会、2015年9月16日~19日、関西大学(大阪府吹田市)

S. Murakawa, T. Tanaka, T. Tani, H. Noguchi, A. Nakahara, K. Honda and 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 (QFS2015), 2015年8月9日~15日, Niagara Falls (USA)

S. Murakawa, T. Tanaka, K. Osawa, Y. Shibayama, A. Nakahara, K. Honda and K. Shirahama, DISSIPATION OF SUPERFLUID HELIUM FOUR FLOW CONFINED IN A WELL-CONTROLLED NANOPORE ARRAY, 27th International Conference on Low Temperature Physics (LT27), 2014年8月6日~14日, Buenos Aires (Argentina)

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会年次大会、2015年3月21日~24日、早稲田大学(東京都新宿区)

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会年次大会、2015年3月21日~24日、早稲田大学(東京都新宿区)

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

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