

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 6 月 27 日現在

機関番号：13901

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2012～2013

課題番号：24656120

研究課題名(和文) 中性子を用いた量子乱流渦の検出法の開発

研究課題名(英文) Quantum vortex visualization by neutron radiography

研究代表者

辻 義之(Tsuji, Yoshiyuki)

名古屋大学・工学(系)研究科(研究院)・教授

研究者番号：00252255

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,000,000円、(間接経費) 900,000円

研究成果の概要(和文)：液体Heは絶対温度2.17K以下でその粘性を消失し、超流動状態となる。超流動He中には量子化された循環を持つ量子渦が存在し、それらが互いに絡み合った渦タングルを形成すると考えられている。超流動渦を可視化するために、中性子を用いた方法を検討し、その実証試験として、半導体レーザーによる可視化をおこなった。トレーサーとしては、固化した水素粒子を用いた。熱対向流下での粒子挙動は常流動成分に追従する粒子、超流動成分に追従する粒子を明確に区別することに成功し、量子渦タングルの存在を明らかにした。

研究成果の概要(英文)：When the liquid helium has its temperature below 2.2K, it becomes a super fluid, and indicates the unique properties. For instance, there exists the mass flow without friction, anomalous heat transport by a mechanism known as thermal counter flow, and quantized vortex lines in the turbulent state. These characteristics have been investigated by temperature fluctuation measurement and the second sound attenuation technique. However, they are model dependent and do not give the dynamical information of the fluid flow. For this reason, we have been interested in applying the visualization technique to the super fluid helium in order to obtain the local velocity fluctuation, and study the statistical characteristics.

研究分野：工学

科研費の分科・細目：機械工学・流体工学

キーワード：乱流 超流動 量子渦

## 1. 研究開始当初の背景

超流動 He は熱伝導率が極めて高いため、超伝導マグネットなどの冷却材として大きな期待がもたれている。超電導マグネット冷却では、複雑に入り組んだ狭い流路に液体 He を流して冷却する。流路の形状により冷却効率は影響を受けるが、その主な原因は量子渦や渦構造が複雑に絡み合った渦タングルと壁面との相互作用にあると考えられる。しかし、超流動 He における渦構造の挙動は、粘性がないため、空気中や水中などにおける我々に馴染みある渦運動と大きく異なる。

R. ファインマンが量子渦タングルの存在を予測したのは 1955 年である。その後、量子渦の存在を裏付ける観測が多数報告されるが、それらは量子渦そのものの存在を直接に証明するものではなく、音波の吸収などによる間接的な状況証拠を示すにとどまっていた。2006 年、メリーランド大学の Rathlop らは、水素・重水素の混合気体をトレーサーとして用い、量子渦とそのつなぎ換えを可視化画像により報告した。超流動 He は粘性が無いため、レイノルズ (Re) 数が極めて大きい乱流の統計的性質を調べる対象として研究が始まっている。Maurer ら (フランス) は実験により、坪田 (大阪市大) らは数値計算により、超流動 He のエネルギースペクトルに、Kolmogorov の  $-5/3$  乗則が存在することを報告している。

リチャードソンが描いた渦のカスケードの描像は、 $-5/3$  乗エネルギースペクトルの現象論を理解する上で広く受け入れられているが、近年では J. C. R. Hunt (2010) により、大きな渦からエネルギー散逸スケールへの直接作用が提案されている。しかし、量子乱流において実験的に  $-5/3$  乗則を観測し、量子渦との関連を議論した研究は申請者の知る限り皆無であり、今度の研究進展が期待される。

## 2. 研究の目的

量子渦の大きさは数ミクロンと予想され、一般に可視化に利用される直径数ミクロンのトレーサー粒子を用いた方法では、量子渦の挙動をとらえることができない。また、小さな粒子を用いたとしても、渦とトレーサーの相互作用は無視できないため、渦構造の変化を可視化するには適さない。そこで、トレーサーとして He の同位体 ( $He^3$ ) を用いることをこ

ころみる。可視化用レーザーに代わり中性子ビームを利用し、その第一歩として、中性子による  $He^3$  の可視化実験を行う。

超流動 He に関する研究は主にその物性を明らかにすることを目的におこなわれてきた。しかし、量子渦や渦タングルが形成されれば、それらの運動を扱うために流体力学は不可欠となる。今後、物性と流体の異分野の融合した新たな学術領域へと発展する可能性が期待される。また、Re 数が十分に大きい極限での乱流統計則と渦構造との関連を調べる格好の対象となり、乱流研究における未解決課題に対して高 Re 数乱流の新たな実験手法を提示できる。

## 3. 研究の方法

中性子可視化施設では、サンプルを設置できるスペースは狭いため、中性子反射のための結晶板、撮影カメラを小型化した。結晶のクオリティは反射する中性子波長に影響し可視化される画像の分解能を限定するため、材質の選定を慎重に決定した。可視化実験とは別に、液体 He を超流動状態にするための小型デュアを準備し、He 回収経路、温度調整用の圧力調整電磁弁を設置する。He の液化については、十分にノウハウを確立できた。 $He^3$  を可視化粒子として用いることを想定して、超流動乱流中での個体粒子の挙動に関して、別途実験を進める。可視化画像の解析には、広く利用されている PIV 法のアルゴリズムを用い、量子渦の同定をおこなう。本手法が量子渦、量子タングルの新たな検出法として確立できるか考察を行った。

図 1 に本実験で用いたステンレス製クライオスタットの断面の略式図を示す。最内槽が液体ヘリウム槽である。液体ヘリウム槽は内径 200mm、高さ 1300mm である。液体ヘリウム槽への熱侵入は外周の液体窒素槽と真空断熱槽によって軽減される。液体窒素槽は熱輻射による熱侵入を軽減する。真空断熱槽は熱伝導による熱侵入を軽減する。真空断熱槽の真空度は  $10^{-6}$  kPa 程度としている。このクライオスタットは可視化実験のために石英ガラス製の窓を有している。可視化窓は  $0^\circ$ 、 $90^\circ$ 、 $180^\circ$  の箇所に配置している。 $0^\circ$  の窓から  $180^\circ$  の窓へシートレーザー光を入射し  $90^\circ$  の窓からカメラで撮影をする。各箇所の窓は外部から最内槽まで貫くように三層の窓から成っている。本実験では液体ヘリ

ウム槽の圧力を制御することで、液体ヘリウムの温度を制御している。

図2は本研究で行った実験におけるクライオスタットの内装の略式図である。図のようなフランジに支柱を設けて試料などを設置し、先に述べたクライオスタット上部にのせ実験を行う。支柱の最下部には液体ヘリウムをかさ増しする目的でアルミニウム 2017 (ジュラルミン) ブロックを接続している。ジュラルミンブロックには上部に穴をあけ、白金コバルト温度計を挿入している。白金コバルト温度計は室温から 10K 程度までをモニターする。また底部には液体ヘリウムの温度をあげるためなどに用いる、常温で 420Ω、定格 230W のカートリッジヒーターを接着している。電気系統は 48 ピンフィードスルーによって実験室側と配線している。

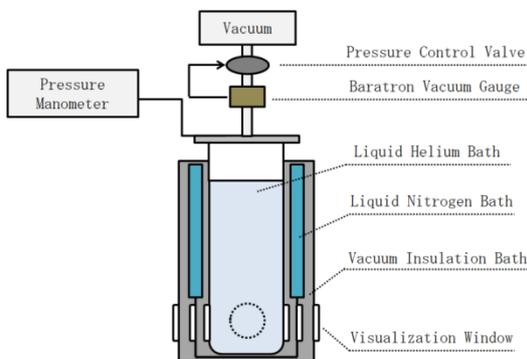


図1 クライオスタット概略図

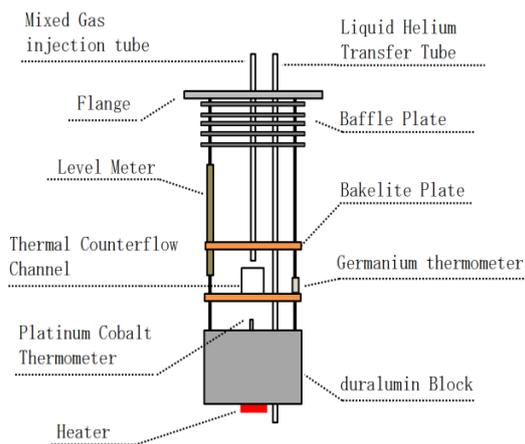


図2 クライオスタット内装概略図

#### 4. 研究成果

He3 を注入したアルミ製パイプ (上下 2 本) と空パイプ (中央) の中性子画像をイメージングプレート (IP) によって画像化した結果を図 1 に示す。中性子はアルミには吸収されないため、中空パイプの中は白くなっている。

上下のパイプでは He3 により吸収された中性子が IP により黒色となっている。その明度の大きさから、吸収された中性子の大きさを見積もることができ、He3 の濃度が算出される。この可視化実験から、確かに He3 が中性子により可視化されること、また、トレーザーとしての可能性があることが明らかとなった。しかし、He3 は空間中に分子レベルで一様に分散しており、He4 中に播種されたとすると、その区別が現状の画像処理技術でできるかが問題となる。

可視化画像を処理するための技術は、可視光レーザーと微小粒子を用いた粒子画像速度計測法 (PIV, Particle Image Velocimetry) として広く利用されており、それらの知見に基づけば、可視化粒子の適切な割合は十分に研究成果が報告されている。

量子渦の可視化のためには、1mm×1mm 四方の領域を想定している。中性子ビームを微小領域に入射させるために、反射結晶板を設置してビーム方向を任意に調整できるようにした。結晶板を固定して、マイクロ移動装置で微小移動 (現在は手動) ができる。しかし、中性子照射中には角度の変更ができないため、最適な中性子波長を決めることができなかった。結晶板はグラファイト製 (60mm×60mm×1mm) を用いているが、結晶のクオリティが低いいため、ブラック条件で反射する波長を正確に定められなかった。

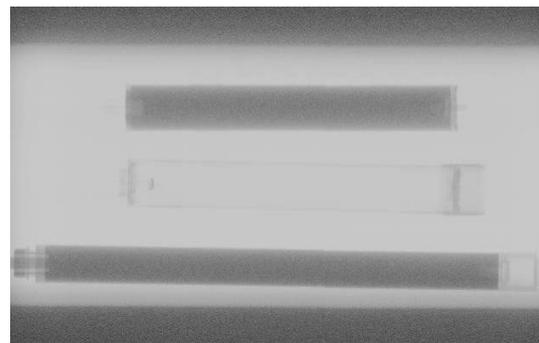


図3 中性子イメージングの画像  
アルミニウム管に He3 を注入してある。中央の管には、入れていないので、その比較から、He3 が中性子により可視化されていることがわかる

液体ヘリウム中への He3 濃度変化の可視化画像をチェックするため、疑似的にトレーサー粒子として、ナイロン粒子、個体水素を超流動 He 中で YAG レーザーを用いて可視化をおこなった。デュアー容器などの画像定量

性への影響を見て、実験用装置の改良設計の基礎データとすることができた。

図4に熱カウンター流における代表的なトレーサー粒子の軌跡を示す。図中の矢印は軌跡の開始点である。実験条件は  $T=2.02\text{K}$ ,  $q=38.1\text{mW/cm}^2$  ( $z$  正方向) である。通常の粘性流体における一様乱流中では見られないような、上下動をするトレーサー粒子を確認することができた。これは粘性流である常流動成分と量子化渦が生じた超流動成分が対向する流動を反映していると考えられる。チャンネル内熱カウンター流において計測した垂直方向速度の確率密度関数には、これらの粒子運動を反映した二つのピークを持つ分布が得られた。ここに示した実験結果のピークは正負それぞれの速度に存在する。正の速度は常流動成分に、負の速度は量子化渦の運動に追従するトレーサー粒子の運動であると考えられる。本実験では、正のピークは常流動成分の70~140%ほどである。これは Paoletti らと Chagovets らの実験結果における誤差の範囲内で一致する。また、負のピークに関しては先行研究の結果と誤差の範囲内で一致することがかくにんでした。一方で、本研究では下向き速度は、超流動成分と同等の速度であるのに対して、Chagoets らは  $T=1.90\text{K}$ ,  $v_s=4\text{mm/s}$  程度の実験条件においては  $0\pm 0.5\text{mm/s}$  ほどの速度をとると主張している。量子化渦に追従するトレーサー粒子の運動速度は、トレーサー粒子の直径が大きいほど低くなると考えられる。本研究におけるトレーサー粒子は Chagovets らが用いたトレーサー粒子より直径が小さく、このような結果が得られたと考えられる。

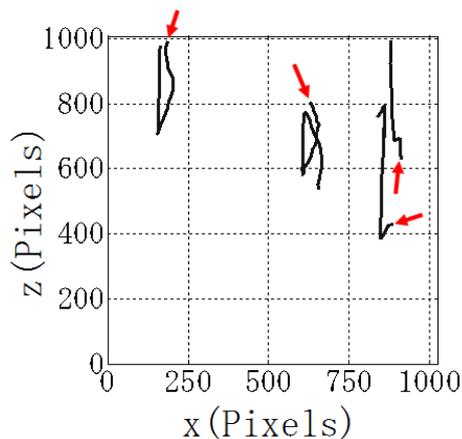


図4 熱カウンター流中におけるトレーサー粒子の軌跡、矢印は軌跡の開始点。

#### 4. まとめ

量子渦の大きさは数ミクロンと予想され、一般に可視化に利用される直径数ミクロンのトレーサー粒子を用いた方法では、量子渦の挙動をとらえることができない。また、小さな粒子を用いたとしても、渦とトレーサーの相互作用は無視できないため、渦構造の変化を可視化するには適さない。そこで、トレーサーとしてHeの同位体(He3)を用いることとし、可視化用レーザーに代わり中性子ビームを利用することを提案した。中性子ビームを用いて、He3が可視化できることを確認した。また、He3の空間分布の密度と画像処理の空間分解能の関係を考察した。微細粒子を用いることは、不可欠である一方、画像処理分解能を向上させることが今後の課題であることが明らかとなった。

超流動流中の個体粒子の挙動を調べるために、可視化レーザーを用いた計測をおこなった。熱カウンター流中では、常流動成分にトラップされる粒子、超流動成分と同方向に移動する粒子を観察した。また、超流動実験を行う施設の完備、ノウハウを確立できた。He3を可視化粒子とした場合にも、同様な粒子軌道を描くことが予想される。

[学会発表] (計 3件)

- (1) Yasuhide Eikoku, Kazuma Ishida, Kazuki Wada, Akifumi Iwamoto, Yoshiyuki Tsuji, Heat Transfer and Boiling of Liquid Helium Oscillation in Narrow Rectangular Duct, The 23rd International Congress of Theoretical and Applied Mechanics, China National Convention Center (Beijing, China), 8/19-8/24, (2012).
- (2) Yasuhide Eikoku, Kazuki Wada, Kazuma Ishida, Yoshiyuki Tsuji, Akifumi Iwamoto, Visualization and Velocity Fluctuation Measurement in Super Fluid He II, International Toki Conference, National Institute for Fusion Science, Toki, 11/19-22, (2012).
- (3) 加藤大貴、和田一輝、石田一真、平野 彰、辻 義之、伊藤高啓、岩本晃史、濱口真司、高田 卓、微細水素粒子を用いた超流動乱流の可視化、第91期日本機械学会流体工学部門講演会、九州大学、11/9-10, (2013).

#### 6. 研究組織

- (1) 研究代表者  
辻 義之 (Yoshiyuki Tsuji)  
工学研究科 教授  
研究者番号：00252255

(2) 研究分担者 なし

(3) 連携研究者 なし