

**科学研究費助成事業 研究成果報告書**

平成 28 年 10 月 22 日現在

機関番号：13901

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2014～2015

課題番号：26630050

研究課題名(和文) 圧力計測に基づく量子乱流渦と個体粒子の相互作用の解明

研究課題名(英文) Interaction between small particle and quantum vortex from the view point of pressure statistics

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) 2,900,000円

研究成果の概要(和文)：量子乱流中における渦構造の可視化をおこなった。微細な水素固体粒子を一様に播種することから量子渦中心にトラップさせ、渦構造の移動を観察することに成功した。また、粒子のラグランジュ的挙動を解析することで、粒子速度や加速度を算出した。量子渦にトラップされた粒子が流動から受ける抵抗との釣り合いを考え、量子渦と微細粒子との相互作用について考察した。微細なプローブを作成し、変動圧力の計測を試みた。圧力の計測は可能と判断さえる。しかし、バックグラウンドのノイズを低減することが必須であり、統計量の算出にはさらなる微細化が望まれる。

研究成果の概要(英文)：The visualization of quantum vortex in super fluid was performed using the small Hydrogen particles. The motions of quantum vortex can be successfully observed by the present visualization system. Particle Lagrange velocity and acceleration was computed by analyzing the particle trajectories. And the interaction between the vortex and small particles are discussed. It was found that the static pressure fluctuation in quantum turbulence can be measured but there are several problems to be solved for the accurate measurement in the next stage. One of the most significant problems is the background noise, which is caused by free surface waves and they should be decreased.

研究分野：流体工学

キーワード：流体工学 量子乱流 量子渦

### 1. 研究開始当初の背景

液体 He は、絶対温度 2.17K において粘性を有しない超流動流れ (HeII) が出現し、通常の粘性を持つ液体 He (常流動成分、He I) と混在する。Landau はこの状況を二流体モデルとして記述することで、多くの物理現象を説明することに成功した。常流動成分と超流動成分が混在している状態を直接に観察することは難しく、これまで音波による音の減衰など間接的な方法により確認されてきた。また、超流動中には量子渦の存在が予測され、渦のつなぎ替えが R. Feynman により予測されている。量子渦は循環が量子化されており、すべての渦が同一の渦度を持つという特徴があり、粘性が無いため高レイノルズ数乱流の特性を調べる対象として注目されている。

一般的な可視化手法である粒子画像流速計測法 (PIV 法) を用いて、超流動 He の流れを計測することは、1980 年代から幾つかの試みがなされてきた。PIV 法の最大の問題は、超流動 He 中で長時間浮遊する粒子を生成することである。村上ら(1988)は、水素と重水素を混合して He との比重を合わせ、微粒子を作成している。Van Sciver(2005)らは、中空ガラスビーズの比重を調整することで利用してきた[1]。これらの先駆的な研究は、巨視的な流動場を把握することに成功を収めた。その後、より比重の軽い固体水素の微粒を浮遊させ、Bewley(2006)らは量子渦を初めて可視化した[2]。その画像の中には、量子渦のつなぎ替えも確認されている。

Paoletti(2008)らは Bewley の方法を発展させ[3]、熱対向流中の粒子挙動を詳細に観察している。熱対向流とは片方が閉じた容器の端面を加熱すると、超流動成分は右方向に速度で、超流動成分は左方向に連続式を満たすように移動する現象である。さて、熱対向流中の固体粒子の挙動に関して、奇妙な実験結果が報告されている。粒子の移動速度を表すとき、Van Sciver らは、Paoletti らはの結果を報告している。両者の相違は量子渦が複雑に絡み合った構造を形成し、粒子がトラップされたことが原因と予想されている。しかし、それらは主に数値計算を用いたものであり[4]、実験的な検証はない。

申請者は、乱流中の変動静圧の計測を長年おこなってきた[5]。静圧プローブを用いて、境界層や噴流における変動静圧の特性を明らかにし、プローブを小型化することから、乱流中の微細渦構造の検出が可能であることを報告している。熱対向流中における渦タングルは、乱流中の微細渦構造と類似していると予想される。量子渦は単一の渦度を持っているため、タングルもその集合体として特徴ある圧力分布を示すであろう。そこで、これまで開発してきた圧力計測法を量子乱流の渦構造の検出に発展させる。熱対向流において渦タングルの発生割合、大きさ、領域を明らかにするための基礎データとして、固体

粒子の移動速度および加速度が量子渦により受ける影響を明らかにする。

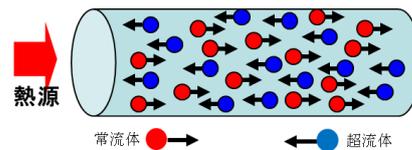


図1 熱対向流概念図

### 2. 研究の目的

超流動液体ヘリウムを対象に、量子乱流場の変動圧力法の開発をおこなう。超流動は粘性がないため、高レイノルズ数乱流の属性を調べる対象として注目されているが、流速測定をするために用いられる微粒子の挙動が、流体乱流と大きく異なることが報告されている。その原因として、超流動乱流場に形成される量子渦が複雑に絡み合った渦タングルを形成し、粒子をトラップするためと考えられる。本研究では、量子乱流中の変動圧力の計測を試みる。また、微細粒子が量子渦にトラップされる過程を可視化することから、粒子加速度と渦中心の圧力を見積もり、変動圧力計測にフィードバックする。

### 3. 研究の方法

絶対温度 2K における超流動場を対象にし、液体 He を用いた対向流を安定に形成させる。極低温条件下における、変動静圧の計測法を開発する。圧力センサーの選定をおこない、センサー形状の改良を重点的に進める。固体水素を用いた微粒子 (直径数  $\mu\text{m}$ ) を生成し、熱対向流下における粒子移動速度を可視化により計測する。粒子移動速度と超流動成分速度と常流動速度との速度比を、ヒーター熱流束を変化させながら計測し、理論値との比較をおこなう。次に同一条件下での変動圧力の計測をおこなう。量子渦中心の圧力を理論的に見積もり、微細粒子がトラップされる過程から、その定量的な妥当性を考察する。極低温実験を実施するためのデュアーは、研究室が所有する既存のものを使用する (図 2 参照)。

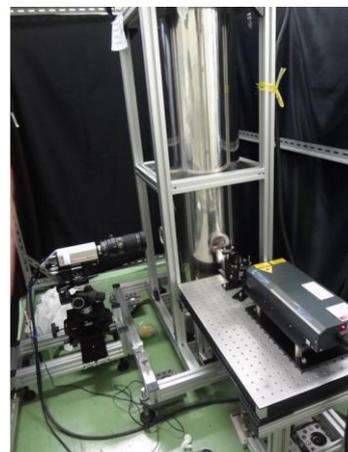


図2 可視化用金属デュアー

このデュアーは可視化窓を備えた構造であり、レーザー光を入射することから、He流動の可視化が可能となっている。測定部は、透明なアクリル製ダクトを設置する。底部にヒーターを設置し、熱対向流(図1)を発生させる。

変動圧力の計測のため開発した微小プローブを図3に示す。直径0.3mmのSUS管に静圧穴(直径80 $\mu$ m)を4つ配置してある。圧力センサーとして極低温用のトランスデューサーを使用した。



図3 圧力計測プローブ

#### 4. 研究成果

可視化のための微細粒子は、Bewleyらの方法を参考に、水素とHeの混合気体を超流動He中にゆっくりと噴出することで、数ミクロン以下の微粒子の作成に成功した。水素の混合比、噴出圧力と形成される粒子径をヒーター入力ごとに調整した。図4には可視化した粒子画像を示す。レーザー光学系の工夫から、鮮明な画像を取得できているようにはなかったが、噴出時間や混合比によって粒子径が変化するものの、再現性を確認できた。量子渦にトラップされる微細粒子を観測できた。

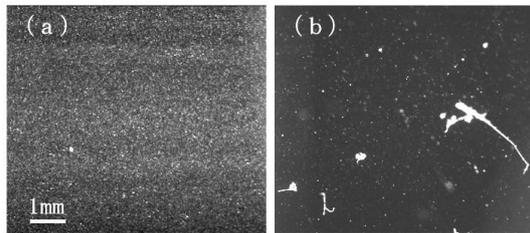


図4 可視化画像(a)HeI中、(b)HeII中

熱対向流における粒子速度測定のため、固体水素粒子をダクト内に播種する。粒子径は数 $\mu$ m以下として、長時間の浮遊を確認した。ヒーターからの熱流束(1kw/m<sup>2</sup>~15kw/m<sup>2</sup>)により、対向流を発生させる。熱流束は、Van Sciverらと同等の範囲である。可視化画像処理から粒子軌跡を時間的に追尾して、ラグランジュ速度を算出する。粒子軌道を追尾するプログラムは、以下のアルゴリズムに基づき作成した。(1)輝度による粒子の識別、(2)粒子径による識別、(3)荷重平均中心の算出、(4)時系列ごとの粒子の識別と軌道の算出、(5)誤ベクトルの除去。

変動圧力計測は対向流実験を行った条件とまったく同一条件で、変動圧力の計測を行う。タングルの発生頻度と速度比がどのような関係にあるのかを調査する。

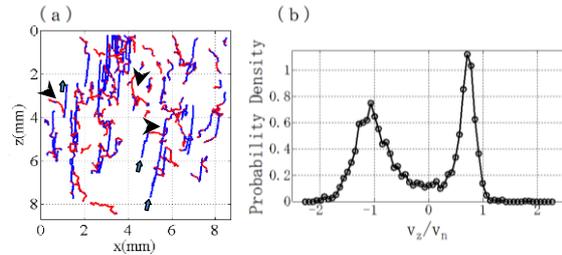


図5 (a)代表的なトレーサー粒子の軌跡 (b)垂直方向成分の運動速度の確率密度関数

図5(a)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(垂直上向きをz軸とする)。図中の矢印は軌跡の開始点である。HeIIの温度はT=2.02K、熱流束はz正方向にq=38.1mW/cm<sup>2</sup>印加している。通常流体のよう乱流中では見られない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対向する流動を反映していると考えられる。図5(b)はこの実験における全トレーサー粒子のz方向成分の運動速度v<sub>z</sub>の確率密度関数である。横軸は常流動成分の理論流速v<sub>n</sub>で無次元化している。正と負の運動速度でそれぞれピークを持つ二峰性の分布が得られた。正の速度は常流動成分に追従するトレーサー粒子の運動速度を、負の速度は量子化渦にトラップされるトレーサー粒子の運動速度を表している。

量子化渦にトラップされz負方向に運動するトレーサー粒子は、z負方向にトラップ力F<sub>T</sub>を受け、z正方向にストークス抗力

$$F_S = 6\pi\mu d v_p \quad (1)$$

を受けている。ここで $\mu$ は粘度、 $d$ はトレーサー粒子の半径、 $v_p$ はトレーサー粒子の運動速度である。F<sub>T</sub>の大きさを見積もるために、z負方向へ運動するトレーサー粒子の加速度がゼロ、つまりF<sub>T</sub>=F<sub>S</sub>である時の運動速度v<sub>0</sub>を求めた。加速度は連続して運動速度を計測できたトレーサー粒子の速度値の差を取得画像の時間間隔で除して算出した。

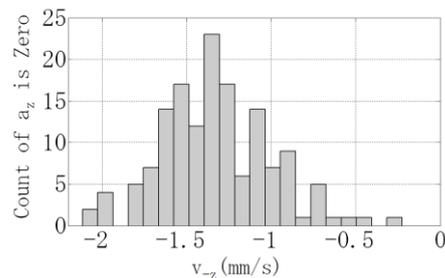


図6 粒子加速度がゼロとなる速度分布

z負方向速度に対するv<sub>0</sub>の頻度分布を図6に示す。v<sub>0</sub>は-1.35mm/sで最頻出となる。量子化渦にトラップされ運動するトレーサー粒子と対向する方向へ流れる常流動成分の速度は、図5(b)における正のピークを示す速度(0.889mm/s)を用いる。常流動成分の流動に対するトレーサー粒子の相対速度は、

この二つの速度差から約 2.24mm/s となる。この値を式(1)に代入することで、本実験における  $F_T$  を算出できる。

一方で Sergeev らは量子化渦の渦芯近傍で形成される圧力勾配

$$\nabla p = \frac{\rho_s \kappa^2}{8\pi^2} \nabla \left( \frac{1}{r^2} \right) = -\frac{\rho_s \kappa^2}{4\pi^2} \frac{1}{r^3} \quad (2)$$

から、トレーサー粒子が量子化渦にトラップされる力  $F_T$  を計算している。ここで  $\kappa$  は循環量子数である。 $F_T$  と  $F_S$  の比はトレーサー粒子直径  $d$  の関数である。本実験条件から、直径  $1\mu\text{m}$  とすると 2 桁、 $10\mu\text{m}$  では 1 桁ほど  $F_T$  の方が大きいことが見積もられた。しかし、可視化したトレーサー粒子の運動速度から算出した  $F_T$  が 1 桁小さいとは考えられない。したがって本実験データに基づく限り、トラップ力を過大評価していると予想される。式(2)から算出される  $F_T$  は量子化渦周りに形成される圧力勾配のみを考慮した単純なモデルである。しかし、量子化渦がトレーサー粒子をトラップする際には圧力勾配のみならず、量子化渦周りに生じる常流動成分の流動や、渦自身の配列などが関与していると考えられる。これらの要素を考慮した評価式の構築が必要と考えられる。

変動圧力の計測は、図3に示したプローブを用いて幾度か試みた。熱対向流中の流動が引き起こす変動圧力は計測可能と判断されるが、幾つかの問題点が明らかとなった。現在使用しているデュアーは、外部からの減圧により温度を下げている。そのためヘリウムの自由界面が波立ち、その静圧が直接に変動変動圧力に重畳する。従って、量子渦に起因する変動圧力との区別をつけることが困難である。式(2)から見積もられる渦中心の圧力は、渦半径を数Åオーダーと仮定した場合、デルタ関数的に局在することとなる。現状のプローブ寸法は、十分に小さくしてあるが、個々の量子渦を計測するためには、静圧穴をより微細化する必要がある。

量子渦は多数の集合体としてもタングルを形成すると考えられている。現状の可視化方法では、タングルを観測することはできない。圧力計測からタングルの発生頻度を定量化できれば、相互摩擦項の定式化につながると期待される。

[1] T.Zhang and S.W.Van Sciver, J. Low Temp. Phys., vol.138, 865, (2005).

[2] G.P.Bewley D.P. Lathrop and K.R.Sreenivasan, Nature, vol.441, 588 (2006).

[3] M.S.Paoletti, et al., J. Phys. Soc. Japan, vol.77, 111007, (2008).

[4] D.Kivotides, Phys. Rev. B, vol.77, 174508, (2008).

[5] Y.Tsuji and Y.Kaneda, J. Fluid Mech., vol. 694, 50, (2012).

## 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)

[1] Yoshiyuki Tsuji, On the particle motions in quantum turbulence, Workshop on New Perspectives in Quantum Turbulence: experimental visualization and numerical simulation, December 11–12, 2014, Toyoda Auditorium, Nagoya University.

[2] 平野 彰、大高稜平、岩本晃史、辻 義之、超流動乱流中の個体粒子挙動の観察、京大数理解析研究所 RIMS 研究集会「乱流研究のフロンティア」、2014年7月23日(水)--25日(金)、京都大学数理解析研究所

[3] 平野 彰、大高稜平、岩本晃史、伊藤高啓、辻 義之、超流動ヘリウム中の量子渦が固体粒子に与える影響、日本流体力学会 年会、2014年9月15日(月)～17日、東北大学川内北キャンパス

[4] Akira Hirano, Daiki Kato, Ryouhei Ohtaka, Akifumi Iwamoto, Takahiro Ito, Yoshiyuki Tsuji, The Effect of Quantized Vortices on Particle Motion in Superfluid Helium, American Physical Society 67th annual DFD meeting, San Francisco, California(USA), Nov. 23–25, (2014), E18-2.

[5] Yoshiyuki Tsuji, "Interpretation of measurements in superfluid turbulence of He4", Le Centre CEA de Saclay, Saclay, France, September 14-18, 2015.

[6] 辻 義之、量子乱流中の微細粒子の運動について、H27年度物性研究所短期研究集会「量子乱流と古典乱流の邂逅」、東大物性研究所、1月5日-7日(2016)

[7] 辻 義之、量子渦の可視化と量子乱流中の粒子挙動、日本物理学会第71回年次大会合同シンポジウム「量子乱流が拓く新しい乱流科学」、東北学院大学、3月20日(2016)

## 6. 研究組織

(1) 研究代表者

辻 義之 (Yoshiyuki Tsuji)  
名古屋大学 工学研究科 教授  
研究者番号 : 00252255