

平成 30 年 6 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：2016～2017

課題番号：16K14158

研究課題名(和文)量子乱流場の三次元渦構造の可視化とラグランジュ速度の計測

研究課題名(英文)Three-dimensional vortical structures and Lagrange velocity measurements

研究代表者

辻 義之(TSUJI, Yoshiyuki)

名古屋大学・工学研究科・教授

研究者番号：00252255

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,700,000円

研究成果の概要(和文)：超流動場の可視化のために、低温デュアーを取り囲む複数台のカメラ配置を実装できる体系を構築した。粒子位置とその大きさを算出する計算アルゴリズムを構築した。高速度カメラで撮影をした画像を時系列で解析をして、4時刻以上の粒子位置を追跡することで、ラグランジュ速度、加速度の算出をおこなった。量子渦と微粒子の相互作用から粒子軌道が特異な形状を示すことが観測された。つまり、ラグランジュ速度と加速度を算出することで、量子渦タングルの渦間距離を見積もる指標を提示できることが分かった。熱対向流下において、加熱するパワーを調整して流動状況を変化させ、その速度分布、加速度分布形状の変化を体系的に調査した。

研究成果の概要(英文)：The three-dimensional visualization system was constructed with 4 high-speed cameras. And the Lagrange trajectories are recorded in a short period of time. The camera system, small luminescence particles, laser system, and optical systems were improved. This visualization system enables us to obtain the velocity field in space and the small eddy structures are visualized by means of 2nd invariant of velocity gradient tensor. For applying to the visualization of quantum eddy, each camera is connected with one another by ran cables and is synchronized by trigger input signal. Small particle trajectories are recorded at 4 different times. Lagrange velocity and acceleration were calculated and their probability density functions are analyzed in the counter flow. Changing the heater power, the counter flow pattern varies, and their statistical properties are studied.

研究分野：流体工学

キーワード：乱流 超流動 可視化

1. 研究開始当初の背景

量子乱流場において、微細粒子の軌道を三次元計測するシステムの構築と三次元的な渦構造の把握とその運動を調べることが必要とされていた。粒子のラグランジュ軌道の解析から、一粒子ならびに二粒子の相対拡散を古典乱流場の拡散理論と比較し、その相違を量子渦と微細粒子の相互干渉の観点から理解することが量子乱流場の解明に必要であった。また、非一様な流れ場として壁面に沿う乱流中で個体壁と粒子との相互作用を可視化により調べ、粒子運動の統計性を調べ、古典乱流における壁近くの微細渦の挙動と普遍則の関連が不明であった。量子乱流は未だに多くの謎につつまれている。その現象を理解するためには、古典乱流の知識が有用であることは確実である。しかし、これまで量子乱流は物性論研究者が研究対象としており、流体工学の観点から渦の挙動や流動が理解されることはなかった。

2. 研究の目的

量子乱流中の流動を可視化するために、水素を液体 He 中に噴出し、微細な水素粒子 (1 μm 程度) を播種する方法を用いてきた。図 1 は温度 2.17K における二次元レーザーシート (8.7mm \times 8.7mm) 内での可視化写真を示す。細く伸びた糸状の部分が量子渦に相当する。粒子の軌道を画像処理した結果を図 2 に示す。粒子ごとにその軌道を異なる色で示してある。移動を開始する最初の位置を黒丸で示した。粒子は弾道的な軌道を示す場合とジグザグな軌道を示す場合が観察される。特に後者は粒子が量子渦にトラップされた場合である。量子渦はいくつかの渦が複雑に絡み合ったタングルを形成しており、古典乱流中の微細渦と同様に間欠的に局在すると予想される。

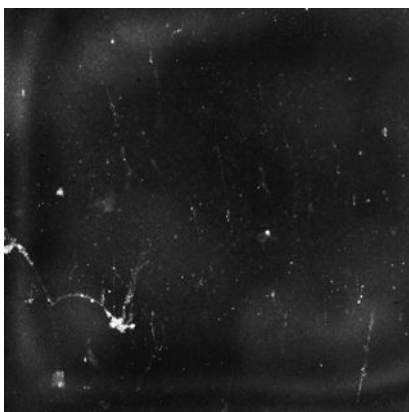


図 1 量子渦可視化 (T = 2.17 [K], at HeII)

量子渦の可視化は国外に数例の報告があり、申請者らも国内で初めて可視化をおこなった。しかし、量子渦は三元的構造をしており、渦のつなぎ替えやタングル形成などは、二次元レーザーシートではその全容を捉え

ることは不可能である。そこで、本研究では三次元空間内において渦構造を可視化し、その空間的な運動を詳しく調べるための計測体系を構築することを目的とする。また、非一様な乱流場におけるトレーサー粒子のラグランジュ軌道を計測することで、量子乱流中の微細粒子の拡散過程について考察をおこなう。

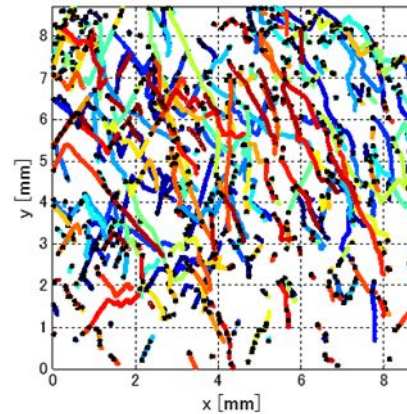


図 2 粒子軌道図 (T=1.91 [K], W=419 [W])

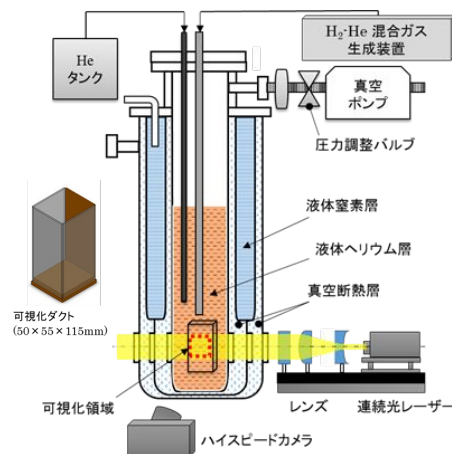


図 3 低温用クライオスタットおよび可視化用ダクト

3. 研究の方法

実験には極低温用収容容器であるステンレス製クライオスタットを用いる (図 3 参照)。クライオスタット中央には透明ダクトが設置されており、下面に設置したシート状ヒーターから熱流束を印加することで熱カウンター流をダクト中に発生させる。ヒーター出力は 400 ~ 800 W/m^2 である。クライオスタットには 3 方向に可視化窓が設置されており、 0° から 180° 方向に光学系により厚さ 1 mm に調整されたシート状の連続レーザー光を照射し、 90° 方向よりハイスピードカメラで撮影を行う。可視化領域は 8.7 \times 8.7 mm, 空間分解能は 8.5 $\mu\text{m}/\text{pixel}$, 時間分解能は 250 fps である。

本研究では HeI 中に水素とヘリウムの混合ガスを噴射して水素を固化させ、微細な固体水素粒子生成し、流れに追従させ可視化計測

を行う。噴射する混合ガス比は $H_2:He = 1:40$ 、噴射圧力 20 kPa である。液体ヘリウム層の温度は、真空ポンプを用いて 4He の飽和蒸気圧曲線に沿って減圧することで調整し、本研究では 1.76 K から 2.09 K の範囲に設定した。

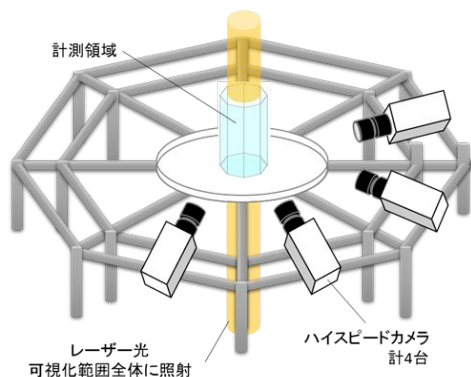


図4 三次元可視化撮像系

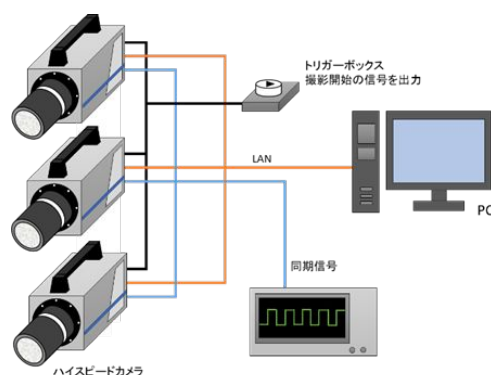


図5 複数台のカメラ同期システム

三次元流動場の計測をおこなうために4台のカメラを配置した撮像体系を構築した(図4参照)。各カメラは 45° だけ互いに離れた角度で設置することが可能になっている。角度を変えた8方向からの計測をできるようにしてある。

4台のカメラを同時計測するためにLANケーブルで接続して同期させ、計測できるように調整した。同期信号は外部入力として、トリガースイッチを介して同時計測を開始する。高速度カメラは、すべて同じ4Gメモリを搭載するようにメモリの増設をおこなった。計測を数回連続して行うため、データの記憶場所を最初から確保できるようにランダムトリガーマードをファームウェアに書き込んだ。ハイスピードカメラには等倍マクロレンズ(SP AF 180mm F/3.5 Di LD [IF] MACRO 1:1, Tamron Co, Ltd.)と、空間分解能を向上させるためにテレコンレンズ(DIGITAL TELEPLUS PRO300 2X DGX, Kenko Tokita)を装着している。カメラのイメージセンサは $17.4\text{mm} \times 17.4\text{mm}$ であり、テレコンレンズを装着することにより、可視化領域を狭め、空間分解能を向上させることができる。テレコンレンズを装着することで空間分解能を向上させることが可能であるが、カメラ

のイメージセンサに入る光量が減るため、可視化領域が暗く写る。そのためマクロレンズの絞りは最大まで開けている。絞りを開けることにより可視化領域は明るく写るが、被写界深度は小さくなる。撮影の際の時間分解能は 250 fps、シャッター速度は $1/250\text{ s}$ である。また、撮影ソフトは、PFV(Photron FASTCAM Viewer, Photron, Inc.)を用いた。

4. 研究成果

本実験で扱うトレーサ粒子は H_2 とHeの混合ガスを液体ヘリウム中に噴射することにより生成したものをを用いている。そのため、粒子径はばらつきを持ち、正確な粒子径をあらかじめ知ることは難しい。そこで粒子径が既知であるナイロントレーサ粒子を用いて、本研究で構築した撮像体系により粒子検出が正確にできるのかを確認した。

実験には可視化ダクト内の水に、トレーサ粒子(密度 1.02 g/cc 、平均粒子径 $4.1\ \mu\text{m}$)を追従させることで流動を可視化している。粒子は水と同程度の密度を持っており、流動によく追従する。また、粒子径はミクロンオーダーであり H_2 とHeの混合ガスにより生成した粒子と似たような粒子径を持っていると予想される。粒子を少量のエタノールと混ぜ合わせることで、粒子が塊になるのを防いでいる。粒子を入れたエタノールを水と混ぜ合わせ可視化流体を作成した。水とエタノールが混在した状態であるが、エタノールは極少量であるため、水の物性等への影響は考慮しない。可視化に用いた光学系は液体ヘリウムを用いた実験と同一である。

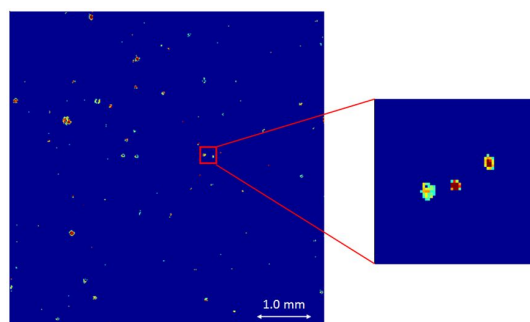


図6 撮影した粒子画像

撮影した画像を図6に示す。混合ガスを用いた粒子と比べ小さな粒子が撮影できている。追跡した粒子軌道を図7に示す。軌道は30枚以上連続して追跡できた粒子の軌道であり、軌道ごとに色分けしている。また軌道の始点を黒く塗りつぶしている。粒子軌道は斜め方向の粒子の運動を表している。また、粒子は直線的な軌道を示している。

本研究で開発した粒子検出アルゴリズムを用いて粒子を検出する。検出下粒子の粒子径分布を図8に示す。横軸はpixelである。粒子径分布のピークはおおよそ 4.0 pixel である。カメラの結像面では点光源の像がレン

ズ系の絞りによる光の回折によって広がり、結像面では円盤状のエアリディスクとして結像する。そのため、実際の微粒子のサイズよりも大きく結像される。そこで、エアリディスクの補正をおこなう。本実験体系でのエアリディスクの直径は $18.7\mu\text{m}$ と見積もられる。これを用いて実際の粒子径を計算すると粒子径分布のピーク粒子径は $4.57\mu\text{m}$ となり、これは文献値に示された平均粒子径とよく一致する。

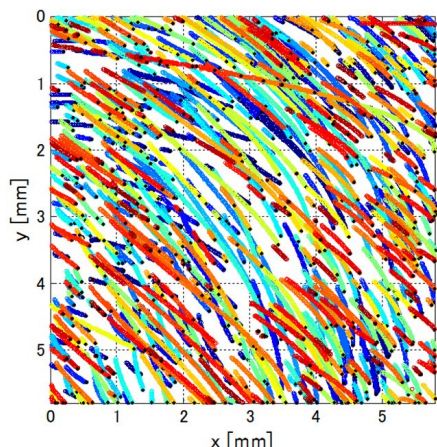


図7 粒子軌道図（軌道ごとに色分け，終点を黒印で表示）

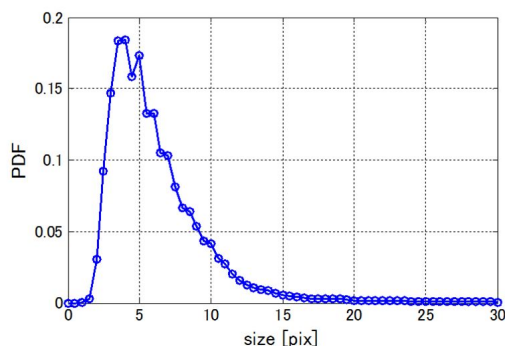


図8 粒子径分布

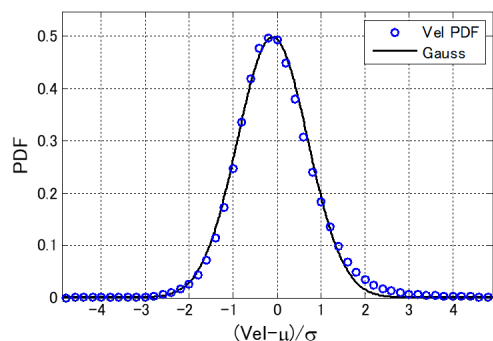


図9 ラグランジュ速度確率密度関数（青：実験結果，実線：正規分布）

次に粒子のラグランジュ速度の確率密度関数を図9に示す。粒子速度分布の横軸はラグランジュ速度の平均値と標準偏差を用い

て無次元化している。また青丸が実験結果，黒の実線が速度分布と同じ平均値と標準偏差を持つ正規分布である。粒子速度分布は正規分布とよく一致している。粒子のラグランジュ加速度の確率密度関数を図10に示す。粒子加速度分布の横軸はラグランジュ加速度の平均値と標準偏差を用いて無次元化している。また青丸が実験結果，黒の実線は対数正規分布である。対数正規分布は、自然界や人間社会に見られる複雑系と称される系において観測される、裾の長い分布関数である。例として、砂丘のサイズ分布や宇宙・天体現象を破壊現象などが、自然界の対数正規分布として挙げられる。グラフを見ると粒子加速度分布は対数正規分布とよく一致している。

以上より、本研究で開発したPTV解析アルゴリズムは精度よく、粒子径分布とラグランジュ軌道の追跡をおこなうことができる。

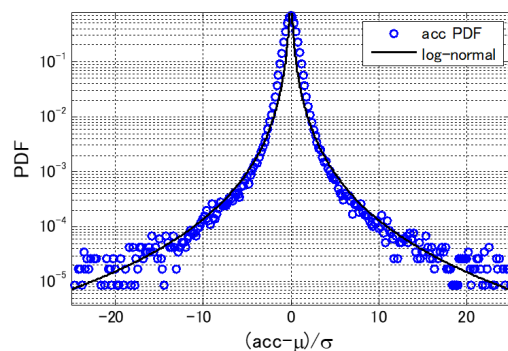


図10 ラグランジュ加速度確率密度関数（青：実験結果，実線：対数正規分布）

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 2 件)

[1] Wataru Kubo, Yoshiyuki Tsuji, Lagrangian Trajectory of Small Particles in Superfluid He II, Journal of Low Temperature Physics, June 2017, Volume 187, Issue 5-6, pp 611-617. 査読有 <https://doi.org/10.1007/s10909-017-1764-4>

[2] 久保 渉, 辻 義之, 量子乱流中の渦構造の可視化, ながれ: vol.35, 439-441, 2016. 査読無

〔学会発表〕(計 9 件)

[1] 松下 琢, 辻 義之他 9 名, 超流動 4He 中の流れの可視化のための中性子 ^3He 吸収反応を用いた He_2^* クラスターの生成 II, 日本物理学会第 73 回年次大会, 東京理科大学野田キャンパス, 2018 年 3 月 22 ~ 25 日, 23aA28-13.

[2] 吉田 恭, 辻 義之, 三浦英昭, 量子流体乱流の強乱流域におけるスペクトル, 日本物理学会第 73 回年次大会, 東京理科大学野田キャンパス, 2018 年 3 月 22 ~ 25 日, 26pK601-10 .

[3] Kyo Yoshida, Yoshiyuki Tsuji, and Hideaki Miura, Spectrum of Turbulence in nonlinear Schrodinger (Gross-Pitaevskii) equation, 5th international Conference on Mathematical Theory of Turbulence via Harmonic Analysis and Computational Fluid Dynamics, March 12-13, 2018, Nagoya University, Japan.

[4] 国立 将真, 久保 涉, 辻 義之, 鈴木 颯, Volker Sonnenschein, 富田 英生, 井口 哲夫, 超流動ヘリウム流動場可視化のためのエキシマ生成に関する研究, 第 49 回日本原子力学会中部支部研究発表会, 2017 年 12 月 14 ~ 15 日, 名古屋市東桜会館, 講演番号 R07 .

[5] 吉田 恭, 辻 義之, 三浦英昭, 量子流体のシミュレーションにおけるスペクトル, プラズマシミュレータシンポジウム 2017, 核融合科学研究所, 2017 年 9 月 7 ~ 8 日 .

[6] Yoshiyuki Tsuji, Small particle motions in super fluid He II: its size effect on particle velocity and acceleration, Quantum Turbulence Workshop, Aprl 10-12, 2017, National High Magnetic Field Laboratory, Tallahassee, Florida, USA. (招待講演)

[7] 辻 義之, 量子乱流中の渦構造の可視化, 日本流体力学会年会 2016, 2016 年 9 月 26 日 ~ 28 日, 名古屋工業大学御器所キャンパス

[8] Wataru Kubo and Yoshiyuki Tsuji, Lagrange trajectory of small particles in super fluid HeII, International Conference on Quantum Fluids and Solids 2016, 10th – 16th August 2016, Clarion Congress Hotel, Prague, Czech Republic

[9] 久保 涉, 伊藤高啓, 辻 義之, 超流動ヘリウムにおける量子渦を伴う流動場の可視化及び微細粒子の軌道解析, 第 4 4 回可視化情報シンポジウム, 2016 年 7 月 19 日 ~ 7 月 20 日, 工学院大学

6 . 研究組織

(1)研究代表者

辻 義之 (TSUJI Yoshiyuki)
名古屋大学・大学院工学研究科・教授
研究者番号 : 00252255