

令和 5 年 5 月 31 日現在

機関番号：24405

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2020～2022

課題番号：20K03865

研究課題名（和文）超流動ヘリウムを用いた吸込渦形成機構の解明

研究課題名（英文）Study of Suction vortex formation using superfluid Helium-4

研究代表者

小原 顕 (Obaraq, Ken)

大阪公立大学・大学院理学研究科・講師

研究者番号：50347481

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,300,000円

研究成果の概要（和文）：超流動He中で吸込渦の観測を行った。超流動吸込渦の渦芯を横切る経路の第2音波共鳴によって量子渦密度を測定し、同時に、渦芯を通らない経路で超音波流速測定を行い、水平方向の循環を直接測定した。2つの測定の結果、吸込渦中の量子渦はほぼ水平かつ渦芯に巻き付くような形状で存在していることを明らかにした。この成果は超流動に限らず、一般の液体の吸込渦としても、渦度の構造を明らかにした初めての研究である。

研究成果の学術的意義や社会的意義

流体力学は数々の流体現象を明らかにしてきたが、吸込渦という鉛直流と水平回転流が共存している流れについては多くのことは知られていなかった。その理由は、中心付近の流れが極端に強くなるため、風洞実験・可視化実験のようなテクニックが使えなかったからである。この研究では超流動特有の音波（第2音波および超音波）と、超流動特有の循環の量子化条件を用いることで、もっとも身近な渦の一つの内部の流れの構造を明らかにした。

研究成果の概要（英文）：I have studied Suction vortices generated in superfluid He. The quantum vortex density was measured by second resonance in the path across the vortex core, and at the same time, the horizontal circulation was directly measured by ultrasonic velocimetry in the path not passing through the core.

The two measurements revealed that the quantum vortex-lines in the suction vortex are nearly horizontal and wraps around the vortex core. This study is the first case that clarified the structure of vorticity of the suction vortex not only in superfluids but also in ordinary liquids.

研究分野：超流動・低温工学

キーワード：超流動 吸込渦 量子渦 循環 量子乱流

1. 研究開始当初の背景

吸込渦は風呂桶や竜巻などに代表される鉛直方向の吸込流を伴う回転流である。身近な流れであるにもかかわらず、渦の中心付近の流れの構造はあまり明らかになっていなかった。その主な理由は、渦の性質を決める物理量である「渦度」が観測できないからであり、これは回転中心付近の流速が極端に速いため風洞実験・可視化実験に適さないからである。一方、超流動ヘリウムでは、渦度の大きさは量子力学の要請により単一値しかとりえず、その配置あるいは密度だけを計測すれば、渦度を直接観測できたことになる。また、本実験計画の直前に、量子渦糸の配置は超流動特有の音波である第2音波で観測でき、また、超音波をもちいて循環の定量化を行うことができるようになっていた。

2. 研究の目的

吸込渦の最も原始的なモデルは、微小な渦度を持つ「素渦」が渦定理にしたがって吸込口に集中させられることで形成され、そのコア半径は吸込流の強さと液体の粘性および渦度の粘性拡散のバランスで決まるとされる。しかし、素渦は現象を説明するための概念に過ぎず、その移動や集中が観測されたことはない。一方、超流動ヘリウムには古典流体でいう素渦に対応する量子渦糸が存在する。本計画では低温の液体中で直接動作するモーターを用いて超流動吸込渦を生成し、さらに、量子流体特有の音波（第2音波）を用いて量子渦糸密度の極端に濃い領域すなわち渦コア内での量子渦の配置・構造と密度を計測することで、コア内の流れの解明を目的とした。粘性のない超流動の吸込渦のコアの構造を理解することで、将来的には一般的な流体における回転流の形成原理の解明につなげることも目的とした。

3. 研究の方法

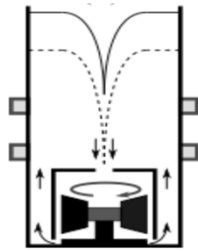


図1

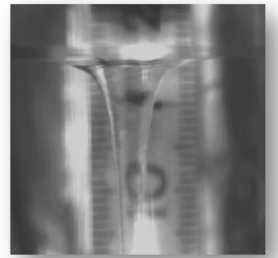


図2

吸込渦は低温中で動作する超伝導モーターとタービンをを用い、超流動ヘリウムを直接回転させることで生成する。吸込渦の発生装置は図1のように、タービンとそれを囲う穴の空いたチャンバからなる。タービンが回転すると超流動が回転し、遠心力によってチャンバから押し出されたあと、回転しながら容器壁近傍を上昇するが、チャンバの穴は回転中心にあるため圧力が相対的に低くなっているから鉛直方向の吸込流が発生するという原理に基づく。図2は実際の超流動の吸込渦の写真である。背景に見えるモノサシより、直径およそ1 cm程度のオブジェクトであることがわかる。この液面は巨視的な循環 Γ （および回転流速）による遠心力と重力（加速度 g ）が釣り合うために、中心軸からの距離を r として $\Gamma^2/8\pi gr^2$ の形に変形しており、これは古典理論と合致する。ただし、量子力学的な要請により、超流動中の渦度はすべて循環が量子化された量子渦（直径1 Å以下）が担っていなければならないので、図2の渦も量子渦の集合体でなければならないことになる。量子渦の太さは光学的手法のみに頼るなら絶望的なサイズであるが、超流動には第2音波という温度の波が存在し、その波の振幅（温度変動）が量子渦によって減衰するという特徴がある。そのため、渦コアのサイズが分かれば、コア内の渦糸密度の絶対値が解ることになる。ただし、第2音波減衰測定で解るのはコア内の渦糸密度だけであり、渦糸がタングルを形成している場合と、鉛直に配向している場合の区別がつかない。そこで、本実験では新たに、超流動吸込渦中のコアを通らない経路（水平方向）を伝播させる超音波が循環に比例した見かけの音速を示すことに注目した。すなわち、回転流れに対して上流方向と下流方向の超音波を交互に発信・受信し、パルス波束の伝播時間差を計測すれば良い。伝播時間差と循環の関係は、単純な流体力学計算から数値的に求めることができる。この方法で取得された吸込渦の循環は、液面形状から得られた循環と比較することで正当化できる。なお、この方法は一般的な流体の渦に対しても適用できるはずであるが、本研究で初めてその有効性が確認されたものである。そこで、この技術を超音波循環測定法と呼ぶことにした。

4. 研究成果

まずは、主たる研究報告である Phys. Rev. Fluids **6**, 064802 (2021)から説明する。

すべての実験は1.65 Kの超流動ヘリウムにおいて、タービンを最大6回転毎秒で回転させなが

ら行った。

(1) 吸込渦のコアを直接通るようにセットされた第2音波について、減衰量に比例する量を計測したものが図3である。縦軸は無回転時の共鳴スペクトル幅と回転時

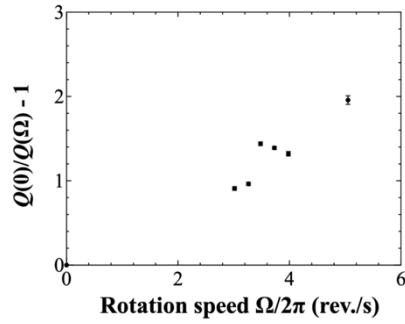


図3

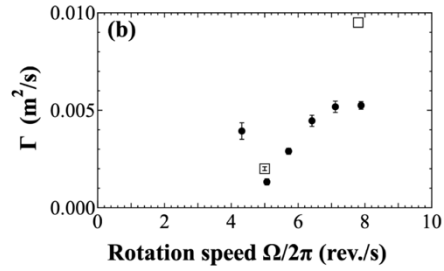


図4

のスペクトル幅の比を取ったもので、これに吸込渦のコア半径とその他の実験条件に起因する量を掛けると、コア内の渦糸密度が導出できる。今回の研究ではコア半径を実験的に求めることができなかつたので、水を用いた先行研究[J. Fluid Mech. **556**, 121 (2006)]をもとに、吸込穴半径を用いて解析することにした。

(2) 前項とまったく同一の条件において、コアの外周部を通るようにセットされた超音波の伝播時間差を測り、それを循環に換算した結果が図4である。なお、本実験でもちいる程度のパワーでは、超音波は量子渦とほとんど相互作用をしない。この時点では測定誤差が大きいため明確な結論をだすのが難しかったが、次の研究論文において、循環がタービン回転数に直接比例する結果が得られている。

(1) および(2)の結果を用い、さらに、コア径が吸込穴径に等しいと仮定して局所的なコア内の渦糸密度を求めたものが図5(超音波)図6(第2音波)である。ただし、図5の局所渦糸密度は Γ を量子化循環 κ (量子渦糸のもつ循環)で割った値 Γ/κ を、吸い込み穴の面積で割ったものである。

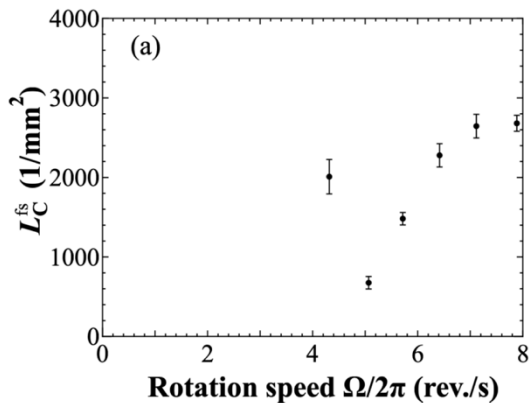


図5

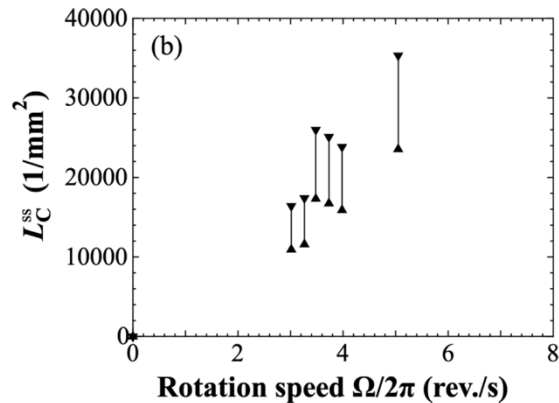


図6

先に述べたように、図5は後の研究で回転数に比例することが確かめられているので、どちらの測定方法で得られたコア内局所渦糸密度もタービン回転数に比例しているという結果が得られた。しかし、渦糸密度でみると、図6の方が一桁ほど大きくなっている。この結果より、コア内の量子渦のうち9割は回転に寄与していないことが示唆される。すなわち、量子渦は水平方向を向いている成分が多いことがわかった。ただし、単に水平方向を向いているだけでは鉛直方向の超流動流が存在することとつじつまが合わないので、量子渦はコア内で軸を鉛直方向に向けたらせん構造になっていることが示唆される。これはちょうど、古典電磁気学と流体力学を対応させると、ソレノイドコイルの電流が渦度、磁場の向きが鉛直超流動流に相当することと完全に対応する。以上の考察とそれを導いた実験結果が、本研究の最大の成果である。そして、古典流体においても吸込渦の渦度の3次元構造が実験的に明らかになったことはないから、超流動を用いた成功例であり、第2音波と量子渦糸の性質をもちいて初めて明らかにできたものである。また、この構造に関する考察は、本学の乾・坪田[Phys. Rev. B **102**, 224511 (2020)]による渦糸モデル数値シミュレーションの結果とも一致している。さらに、古典流体の理論において吸込渦が安定に存在するのは、「中心方向に向かう流れ(吸込流の水平成分)」と「粘性による渦度拡散」が釣り合うからであると説明されている。この考えを超流動吸込渦に適用すると、量子渦は超流動流によって流されるのは明らかだが、超流動に粘性はない。しかし、有限温度における量子渦は互いに反発するので、高密度の量子渦糸はある種の実効的な粘性を持っていると考えることができる。このアイデアは、超流動の量子乱流研究におけるエネルギー散逸のメカニズムとして提案されているアイデアと合致する。すなわち、超流動吸込渦は、そのコアに超流動乱流を圧縮

している状態であり、量子渦の構造を大域的に見ればコイル状のバンドルを形成しているのではないかと示唆される。

(3) さらに、図4に表した超音波循環計測法の精度を改善するための装置開発を行った。精度が悪い原因は、伝播時間差と音波の周期が近く、従来法の波束伝播時間差法では検出限界に近いので、オシロスコープで計測せざるを得ず、時間分解能と統計量が足りなかったことにある。そこで、ガスパイプラインなど、伝播時間差と音波の周期の比がほぼ一致する状況（これは偶然である）で実際に使われている最大相関法による超音波流速計を超流動回転流に応用した [J. Low Temp. Phys. **208**, 379–385 (2022)]. この方法は、観測された波形データ（上流向き S_A , 下流向き S_B ）について、以下の式で表される時間遅れ相関関数

$$C(\tau) = \sum_i^N \{S_A(t_i + \tau) \cdot S_B(t_i)\}$$

を計算し、 C を最大とする τ から伝播時間差を求めるという方法である。さらに、この方法はマイコン化されており、およそ 100 ms の測定間隔の測定の平均値を全自動で得ることができる。実際の測定結果は図7に示す通りで、図4から劇的に改善されたことが解る。なお、□印は光学的に液面の形状を観察し、そこから循環を求めたものである。最大相関法による循環計測は、数値計算プロセスがあるものの、フリーパラメータなしで、渦の循環を求めることができるということがわかった。これは（超音波振動子の音響インピーダンスマッチングを除けば）超流動の性質を全く使っていないので、ほとんどすべての回転流における循環をほぼ全自動・リアルタイムで計測できる手法を開発したことになる。なお、図7は循環がタービンの回転数に比例するということを指名しているが、これは決して自明なことではなく、新たな発見である。本研究では、タービン回転が液体に角運動量を供給し、それが図1の示す液体の角運動量に転嫁するというモデルを提唱している。また、この測定のあとに行われた関連実験において、この系を角運動量に対する非平衡開放系の定常状態であるとみなすことにより、吸込穴付近で角運動量流の散逸が発生しているという事実を突き止めた。これについては 2023 年夏の量子流体・固体に関する国際会議で招待講演を行い、日本物理学会 2023 年年次大会でも口頭発表を行う予定である。

なお、申請当初に計画していた PIV/PTV 法による量子渦運動の可視化実験については、技術取得に主眼をおいたため、研究成果として発表したのは、ULT2022 国際会議のポスター発表での追加資料のみとなった。この技術の取得を通じ、PIV/PTV 法は超流動吸込渦中の量子渦のダイナミクスを追求する上で最重要課題となることが確信できた。

本研究では、さらなる研究分野の発展につながる2つの貢献があった。

さらに、本研究で扱った超流動吸込渦はタービンによる攪拌で作られていたから、凝縮体の基底状態である超流動成分の流と励起状態の流体表現である常流動成分が同じ速度で同じ向きに流れる系であった。超流動では、このほかにも、超流動成分と常流動成分が互いに逆行する向きに流れる系を作ることができる（熱対向流）。そして、熱対向流がある臨界速度をこえると、量子乱流とよばれる量子渦糸のタングルを生成することがわかっている。本研究で扱った第2音波の実験技法を、細管から吹き出す（もしくは吸い込まれる）熱対向流によって生成される量子乱流という全く新しい凝縮系の実験的研究を開始することができるだろう。予備実験では、たしかに細管出口に発生する量子乱流が観測されている（日本物理学会 2023 年春期大会口頭発表）。これはおそらく、吸込渦（もしくは吐出渦）の熱対向流版であろうから、研究を続ける価値がある。また、今回の実験における吸込渦の中心付近の回転流速はおよそ 10 m/s に達する見積もりになる一方、第2音波の音速は温度によるが 20 m/s 以下で変化し、超流動転移温度近傍においては数 m/s まで下落する条件がある。そのため、一般相対論的に考えるとシミュレーション・ブラックホール（事象の地平線）を形成する可能性がある。すなわち、超流動吸込渦は第2音波を閉じ込めてしまうかもしれない。そこで、本学の石原教授（2022 年度退職・南部研究所所員）と共同で、相対論的と量子流体力学の対応関係を探る研究に着手した。今後の発展に期待したい。

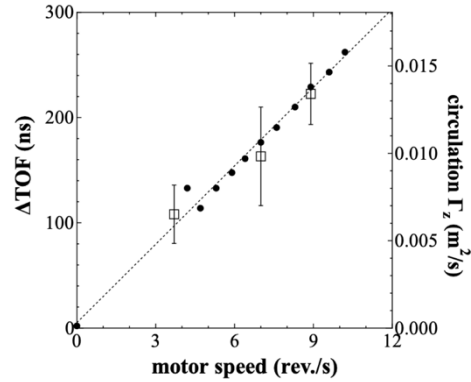


図7

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計2件（うち査読付論文 2件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 2件）

1. 著者名 Obara Ken, Matsumura Itsuki, Tajima Naoya, Ohya Katsuyoshi, Yano Hideo, Ishikawa Osamu	4. 巻 6
2. 論文標題 Vortex line density of superfluid suction vortex	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Physical Review Fluids	6. 最初と最後の頁 064802-1-16
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevFluids.6.064802	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 N. Kakimoto, K. Obara, H. Yano, O. Ishikawa	4. 巻 208
2. 論文標題 Circulation of Superfluid Suction Vortex	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Journal of Low Temperature Physics	6. 最初と最後の頁 379-385
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/s10909-022-02684-1	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

〔学会発表〕 計19件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 6件）

1. 発表者名 都田瑠馬, 小原顕, 矢野英雄, 石川修六
2. 発表標題 超流動ヘリウム4熱対向流乱流の渦輪放出
3. 学会等名 日本物理学会2023年春季大会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 吉坂颯紀, 小原顕, 都田瑠馬, 矢野英雄, 石川修六
2. 発表標題 熱対向流による細管中の量子乱流の異方的成長
3. 学会等名 日本物理学会2023年春季大会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 K. Obara
2. 発表標題 Superfluid Suction Vortex
3. 学会等名 29th International Conference on Low Temperature Physics (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 K. Obara
2. 発表標題 Structure of Superfluid Suction Vortex
3. 学会等名 International Conference on Ultra Low Temperature Physics 2022 (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 S. Shimamura, N. Kakimoto, K. Ohyama, K.Obara, H.Yano and O.Ishikawa
2. 発表標題 Circulation of suction vortex in superfluid helium
3. 学会等名 Quantum Fluids and Solids 2021 (Online) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 K. Obara, I. Matsumura, K. Ohyama, H.Yano and O.Ishikawa
2. 発表標題 Vortex line density of superfluid suction vortex
3. 学会等名 Quantum Fluids and Solids 2021 (Online) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 H. Yano, Y. Miyakoda, N. Koizumi, K. Obara, and O. Ishikawa
2. 発表標題 Vortex Emission from Superfluid 4He Turbulence Produced in a Thin Channel by Thermal Counterflow
3. 学会等名 Quantum Fluids and Solids 2021 (Online) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Y.Miyakoda, N.Koizumi, K.Obara, H.Yano, O.Ishikawa
2. 発表標題 Emission of Vortex Rings from Thermal Counterflow Turbulence in Superfluid Helium 4
3. 学会等名 Quantum Fluids and Solids 2021 (Online) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 西岡颯太郎, 桑原慶大, 吉永享平, 八島光晴, 棕田秀和, 小原顕
2. 発表標題 微少試料NMR測定を可能にする極低温組込み型低ノイズアンプと平面型コイルの開発
3. 学会等名 日本物理学会 第77回年次大会 (2022年)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 都田瑠馬, 小原顕, 矢野英雄, 石川修六
2. 発表標題 超流動ヘリウム4中の熱対向流乱流からの渦輪放出3
3. 学会等名 日本物理学会 第77回年次大会 (2022年)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 都田瑠馬, 小原顕, 矢野英雄, 石川修六
2. 発表標題 超流動ヘリウム4中の熱対向流乱流からの渦輪放出2
3. 学会等名 日本物理学会 2021年秋季大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 小原顕, 柿本直紀, 松村樹, 大山勝義, 矢野英雄, 石川修六
2. 発表標題 超流動吸込渦の循環と渦度
3. 学会等名 日本物理学会 2021年秋季大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 小原顕, 大山勝義, 但馬直弥, 矢野英雄, 石川修六
2. 発表標題 超流動吸込渦のコア構造
3. 学会等名 日本物理学会・第76回年次大会(2021年)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 小泉成美, 都田瑠馬, 小原顕, 矢野英雄, 石川修六
2. 発表標題 超流動ヘリウム対向流乱流の渦輪放出
3. 学会等名 日本物理学会・第76回年次大会(2021年)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 松村樹, 但馬直弥, 小原顕, 矢野英雄, 石川修六
2. 発表標題 超流動吸込流による渦度の圧縮効果
3. 学会等名 日本物理学会 2020年秋季大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 小泉成美, 瀧崎康佑, 小原顕, 矢野英雄, 石川修六
2. 発表標題 超流動ヘリウム4中の渦輪の運動状態
3. 学会等名 日本物理学会 2020年秋季大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 K. Obara
2. 発表標題 Superfluid Suction Vortex
3. 学会等名 29th International Conference on Low Temperature Physics(国際学会)口頭発表
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 K. Obara, N. Kakimoto, H. Yano, O. Ishikawa
2. 発表標題 Structure of Superfluid Suction Vortex
3. 学会等名 吉坂颯紀, 小原顕, 都田謡馬, 矢野英雄, 石川修六
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 吉坂颯紀, 小原颯, 都田謡馬, 矢野英雄, 石川修六
2. 発表標題 熱対向流による細管中の量子乱流の異方的成長
3. 学会等名 日本物理学会2023年春季大会
4. 発表年 2023年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------