

科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和 2 年 6 月 8 日現在

機関番号：24402

研究種目：挑戦的研究(萌芽)

研究期間：2017～2019

課題番号：17K18761

研究課題名(和文)超流動ヘリウムの量子渦集中と巨大渦の研究

研究課題名(英文)Study on vortex concentration and enhanced vortex growth in superfluid helium

研究代表者

矢野 英雄 (Yano, Hideo)

大阪市立大学・大学院理学研究科・准教授

研究者番号：70231652

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 5,000,000円

研究成果の概要(和文)：これまでの研究実績は以下のとおりである。

超流動ヘリウムに回転流と吸い込み流を駆動するポンプを開発した。このポンプによって、超流動ヘリウムの巨大渦(吸い込み渦)の生成に成功した。巨大渦における液面高さの空間変化より、渦流の循環を求めた。この循環はポンプの羽根車の回転速度にほぼ比例し、ポンプから排出される超流動流がもつ角運動量に、渦の循環が関係することを明らかにした。第2音波の減衰により、巨大渦中心を通る経路の量子渦密度を見積った。求めた循環と量子渦密度から、渦流によって液面が引き込まれる渦管の直径より2倍程度の直径の円筒領域に、量子渦が集中することを明らかにした。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究は、巨視的量子凝縮相で研究されてこなかった渦の基本定理を応用し、新たな概念である超流動の流れによる量子渦集中を確立した点に意義がある。量子渦の構造、複数の渦の結合、量子数2以上の量子渦など、超流動の安定性に関する未解決問題への研究方法を提供する。また、渦が発生する過程での循環の集中は古典流体でもいまだ未解決であるが、循環が量子渦で特徴づけられ、その運動を可視化できる超流動ヘリウムによるみ、詳細に研究することができる。渦の発生メカニズムの解明は、工学的応用や竜巻など気象学でも重要で、本研究の成果は、量子流体にとどまらず流体工学や地球流体力学へも応用される。

研究成果の概要(英文)：We report the results obtained in the present study as follows, for the purpose of developing new aspects of quantized vortex structures in a vortex tower of superfluid helium.

1) We developed the vortex pump of superfluid helium and found that a vortex tower, namely a suction vortex, is produced in superfluid helium. 2) Measuring the height of fluid surface as a function of the distance from the vortex center, we estimated the circulation of the suction vortex flow. The circulation is proportional to the revolution speed of the rotor of the pump, suggesting that the angular momentum of the superfluid flow drained from the pump is related to the vortex circulation. 3) Measuring the dumping of the second sound signal, we estimated the vortex line density around the suction vortex. Using the circulation and the vortex line density of the vortex, we found that vortex lines concentrate in a cylinder with the twice diameter of the vortex tube in superfluid helium.

研究分野：超低温物理学

キーワード：低温物性 超流体 量子渦 超流動流 量子渦集中

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

ヘリウムが持つ超流動性は、その性質が見出されてから1世紀がたち、これまで多くの研究者を魅了してきた。ヘリウム (^4He) 原子は、陽子2個、中性子2個、電子2個の偶数個のフェルミ粒子から構成されるスピン0のボース粒子である。液体ヘリウム4 (^4He) は飽和蒸気圧下において絶対温度 2.17 K (-271°C) でボース・アインシュタイン凝縮を起こし、超流動に相転移する。超流動ヘリウム4は、粘性を示す常流動(密度 ρ_n)と粘性がない超流動(密度 ρ_s)の二成分で構成され、2流体モデル(全体の密度 $\rho = \rho_s + \rho_n$)で記述することができる。

超流動成分は秩序変数 $\Psi(r) = \sqrt{\rho_s(r)}e^{i\varphi(r)}$ で特徴づけられ、超流動速度場 v_s はこの波動関数の位相勾配に比例する量として、 $v_s = (\hbar/m)\nabla\varphi$ で与えられる。ここで \hbar はプランク定数、 m はヘリウム原子の質量、 φ は波動関数の位相である。したがって渦度が $\nabla \times v_s = 0$ であるために、超流動の速度場は渦なしのポテンシャル流である。しかし、ある閉曲線C内に超流動密度ゼロ($\Psi(r) = 0$)の欠陥があると、Cに沿った循環は多重連結が可能となり、循環 $\oint_C v_s dl$ は有限の値をとる。

$$\oint_C v_s dl = \frac{\hbar}{m} \oint_C \nabla\varphi dl = \frac{h}{m} n \quad (n = 0, 1, 2 \dots) \quad (1)$$

これは、超流動の速度の循環が、 $\kappa = h/m (= 0.998 \times 10^{-3} \text{ cm}^2/\text{s})$ を単位として量子化されることを示している。超流動ヘリウムでは、直径 0.2 nm 程の超流動密度ゼロの状態を芯とし、 $n = 1$ の循環量子 κ で超流動が循環する渦が存在する。この渦を「量子渦」と呼び、渦芯以外は渦度 $\omega = \nabla \times v_s$ がゼロで、渦芯に渦度が集中する。また超流動ヘリウムの渦芯は原子半径よりも細く、渦糸とみなすことができる。

量子渦が存在すると、流れ場が伴うためエネルギーが増加する。このため絶対零度では量子渦が消滅しそうだが、古典流体とは異なり、流れの量子化のために流れが徐々に減少できないこと、渦の端が超流動中に存在できないため超流動の境界(壁)に付着し、量子渦は準安定的に存在する。また、超流動ヘリウムの実験では、超流動転移する過程で量子渦が核生成され、あるいは相転移温度付近で熱励起されるなどして生成される。生成された量子渦(渦糸)は容器表面に付着し、表面のラフネスのために渦糸は容易に残留する[1]。超流動ヘリウムの入った容器を回転させれば、付着渦糸が拡張し、超流動に回転流が駆動される。このとき、渦糸は三角格子状に配列し(図1)流れは剛体回転流となる[2]。

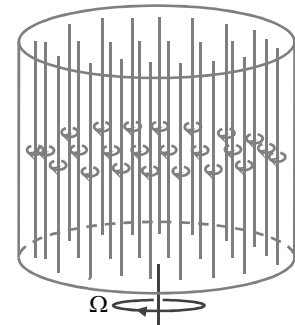


図1. 回転下の量子渦

これまでに行われた量子渦の実験的研究は、容器全体を回転させる剛体回転流で静的に配列する量子渦の研究か、流れ場で量子渦がランダムに運動する量子乱流の研究[3,4]に限られてきた。我々は、あらたな量子渦の動的運動の研究を開拓するために、挑戦的萌芽研究「超流動ヘリウムの定常流を駆動するポンプの開発」(2014年度~2016年度)で超流動流れ場の新たな駆動方法を確立した。本研究では、この研究を発展させ、これまで実現することができなかった「バスタブ渦」を実現する。バスタブ渦は、水を張ったバスタブの栓を抜くと、水の排出に伴って発生する。これは、水の中に分散する渦度が排出口への流れにともなって集中し、循環が増加することで発生すると考えられている[5]。我々が開発した超流動渦巻ポンプは、超流動ヘリウム吸い込み流を駆動でき、あらたな量子渦運動研究の開拓を可能とする。

2. 研究の目的

本研究は、超流動ヘリウム量子渦のあらたな動的現象研究の開拓を目的とする。我々はすでに超流動ヘリウム定常流を駆動する渦巻ポンプを開発しており、超流動ヘリウムの吸い込み流れにともなう現象を実験的に研究することができる。渦巻ポンプは容器内の超流動を回転させ、回転流では外周より中心の圧力が低いことを利用して、容器外の流れを駆動する。渦巻ポンプ外周から流出する超流動流は角運動量を持つため、循環量子 κ の渦度を持つ量子渦が流れとともに輩出される。この流れは、渦巻ポンプ中心軸に開けられた吸込み口へと流れ込み、超流動流れに乗る量子渦は吸込み口で集中すると期待できる。量子渦集中にともない循環が増加し、超流動ヘリウム巨大渦(バスタブ渦)が実現する。本研究では、超流動ヘリウム巨大渦を実現させるとともに、巨大渦の液面形状から循環を実測し、また量子渦密度を直接観測する。これらの研究から、量子渦集中を確立し、その集中機構および量子渦集中により発生する巨大な超流動渦の構造と発生過程を解明する。

3. 研究の方法

本研究では、まず量子渦を集中させる方法を確立する。量子渦を移動し集中させるために、非粘性流体の渦に適用されるヘルムホルツの渦定理に着目する。流れに渦を置くと、渦構造を維持するために流れに乗って渦が移動する。この渦定理によれば、中心へ向かう流れを回転流に加えれば、渦が集中する。たとえば、バスタブの水が排水パイプから流出するとき発生するバスタブ渦は、この原理が働くと考えられている。すなわち、回転する超流動ヘリウムを中心から排出する流れを作れば、バスタブ渦のように量子渦が集中し、巨大な渦が発生する。

この状況を実現するために、バスタブ渦研究に使われる方法を超流動ヘリウムに適用する(図2)。シリンダー容器下部にポンプを配置し、図1の矢印の向きに流れを循環させる。ポンプは、超伝導モーターと回転する羽根車で構成する。羽根車が回転するとポンプ容器内に回転流が駆動され、回転流の遠心力により中心と外周との間で圧力差が生じる。この圧力差によって矢印の向きに流れを駆動する。粘性のない超流動が物体の動きで回転するのは奇妙に思えるが、量子渦が羽根車の動きによって誘起され、その量子渦が媒介となって超流動に抗力を与えるためである[4]。

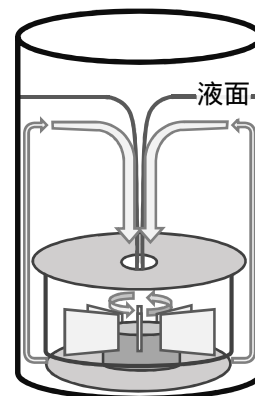


図2 超流動ヘリウムの巨大渦発生装置。容器内にポンプを置き、矢印の向きに流れを循環させる。

ポンプの外周からはき出される流れは、周方向の運動(角運動量)をもってシリンダーの内壁に沿って上部へ流れ、シリンダー外周からポンプ中央の穴へ流れが集中する。角運動量を持つ周方向の流れは量子渦を保持し、流れとともに量子渦は中央へ移動し、中央での量子渦集中によって巨大な渦が発生する。量子渦の移動と巨大渦の構造を、超流動ヘリウム液面の可視化と第2音波による量子渦密度観測によって研究する。巨大渦の可視化は、パイレックスガラス製の透明クライオスタットとアクリル製容器を用いることによって、室温からの観測を可能にした。また第2音波は超流動に特有の音波で、超流動成分と超流動成分が逆位相に動く音波である。第2音波は量子渦で減衰する特徴を持ち、この性質を利用して量子渦密度を測定する。

4. 研究成果

(1) 超流動ヘリウムの巨大渦

ヘリウムを超流動状態まで温度を下げ、図2のポンプを作動させると、超流動ヘリウムの液面はポンプ吸込み口へと引き込まれる(図3)。すなわち、我々は超流動ヘリウムの吸い込み渦(巨大渦)の駆動に成功した。吸込み口では循環が増大するために、渦中心の圧力は低下することで液面が引き込まれ、中心からの距離 r の液面高さ $h(r)$ は次式で与えられる。

$$h(r) = h_{\infty} - V - \frac{C}{r^2} \quad (2)$$

$$\left(V = \frac{u^2 + w^2}{2g}, \quad C = \frac{\Gamma^2}{8\pi^2 g} \right)$$

ここで、 h_{∞} は渦中心から十分離れた位置の液面高さ、 u は周から渦中心へ向かう流速、 w は渦中心軸上を吸込み口へ向かう流速、 g は重力加速度、 Γ は渦の循環である。我々は、液面の位置を実測し、(2)式でフィットして、パラメータ V と C を求めた(図4)。パラメータ C から巨大渦の循環を求めることができる。

(2) 巨大渦(吸い込み渦)の循環

我々は、ポンプの羽根車の回転速度(rps: revolutions per second、回転数/秒)を変化させ、観測された巨大渦の液面形状(図4)から、渦の循環を求めた(図5)。データは3つの状態について測定した。青丸()は超流動成分 ρ_s が80%のとき($\rho_s/\rho = 0.8$)、水丸()は超流動成分 ρ_s が30%のとき($\rho_s/\rho = 0.3$)、赤丸()は液体ヘリウムが常流動状態のときである。図5からわかるように、データのスクアターはやや大きいものの、液体ヘリウムの状態にかかわらず循環は回転数に比例する。これは、ポンプから排出される超流動ヘリウムが回転速度に比例する角運動量を持ち、それが吸い込み口に集中することで循環が決まることを示している。

液体ヘリウムの状態にかかわらず、循環が羽根車の回転数によって決まる結果は興味深い。水

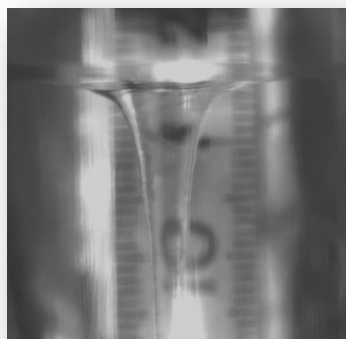


図3. 超流動ヘリウムの巨大渦。渦によって液面が引き込まれている。

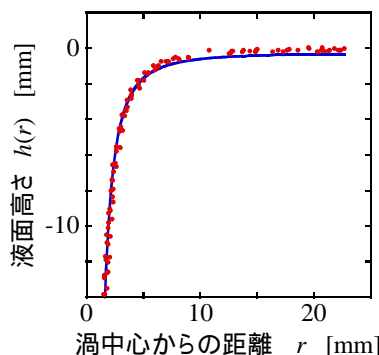


図4. 超流動ヘリウム巨大渦の渦中心からの液面高さ。

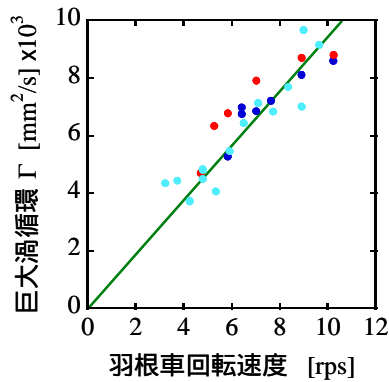


図5 . 巨大渦の循環。

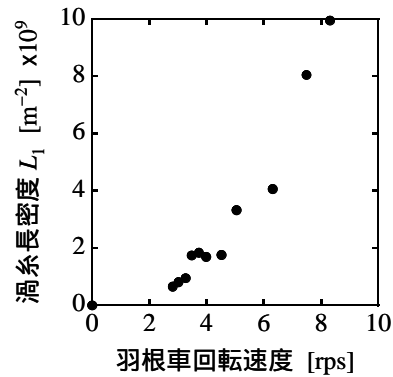


図6 . 巨大渦の量子渦密度。

のような粘性流体では、角速度を持つ流体には「素渦」と呼ばれる概念的な渦の素があり、吸込み口へ素渦が集まることで循環が増加すると考える。一方超流動ヘリウムでは量子渦が現実存在し、粘性流体と同じように吸い込み口で集中することで循環が増大すると考えられる。粘性流体の素渦は観測することができないが、量子渦は超流動に特有の第2音波で測定することができる。我々はこの点に着目し、巨大渦における量子渦構造を調べるために、第2音波測定を行った。

(3) 巨大渦の量子渦構造

第2音波測定は共鳴法を用いる。巨大渦の中心軸上を音波が通るように設置した共鳴セルで、第2音波の減衰から渦糸長密度を求めると、図6の結果を得た。また第1音波の音速測定から循環流れの回転流速を求めると、羽根車の回転速度より1桁程度遅い。さらに、巨大渦の循環の結果(図5)から、量子渦糸換算で $3\sim 10 \times 10^4 \kappa$ と見積もられる。

これらの結果を基に、巨大渦の量子渦構造を考察する。量子渦糸が巨大渦の回転軸に平行に配列していると仮定すると、渦糸長密度の見積もりから、中心軸から半径 3 mm 程度の範囲に 10^4 本オーダーの量子渦が集中していると見積もられる。その外側の領域では回転流速が遅く、量子渦があまり存在しないと考えられる。巨大渦によって液面が引き込まれて形成される渦管の直径は 2-3 mm 程度なので、渦管の外側に量子渦が集中していると考えられる。

(4) まとめと研究の意義

本研究の成果は、粘性流体の吸い込み渦では概念上の存在であった素渦の集中が、超流動ヘリウムでは量子渦として観測され、量子渦の集中が起こっていることを解明したことになる。現段階の実験研究で明らかにできることは限られ、量子渦の空間密度変化や配列など、まだわかっていないことは多い。しかし本研究は、量子渦という渦の基本モードの直接観測によって、粘性流体ではできなかった流れ場の渦構造解明へと踏み込んでいる。この成果は新たな渦の研究を開拓したと言え、今後の流体の流れ場解明へと、研究の発展が期待できる。

本研究は、巨視的量子凝縮相で研究されてこなかった渦の基本定理を応用し、新たな概念である超流動の流れによる量子渦集中を確立した点に意義がある。この成果は、量子渦の構造、複数の渦の結合、量子数 2 以上の量子渦など、超流動の安定性に関する未解決問題への研究方法を提供する。また、渦が発生する過程での循環の集中は古典流体でもいまだ未解決であるが、循環が量子渦で特徴づけられ、その運動を可視化できる超流動ヘリウムによってのみ、詳細に研究することができる。渦の発生メカニズムの解明は、工学的応用や竜巻など気象学でも重要で、本研究の成果は、量子流体にとどまらず流体力学や地球流体力学へも応用が期待される。

<引用文献> (*: corresponding author)

‘Control of turbulence in boundary layers of superfluid ^4He by filtering out remanent vortices’, N. Hashimoto, *H. Yano, et al, Phys. Rev. B, **76**, 020504(R)(1-4) (2007).

‘Observation of Stationary Vortex Arrays in Rotating Superfluid Helium’, E. J. Yarmchuk, M. J. V. Gordon, and R. E. Packard, Phys. Rev. Lett., **43**, 214-217 (1979).

‘Turbulence in boundary flow of super-fluid ^4He triggered by free vortex rings’, R. Goto, *H. Yano, et al, Phys. Rev. Lett., **100**, 045301(1-4) (2008).

‘物体の運動で発現する量子乱流’, *矢野英雄, 坪田誠, 日本物理学会誌 第 **68** 巻第 11 号, 734-738 (2013).

‘Anatomy of a Bathtub Vortex’, A. Andersen, T. Bohr, B. Stenum, J. Juul Rasmussen, B. Lautrup, Phys. Rev. Lett., **91**, 104502(1-4) (2003).

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計3件（うち査読付論文 3件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 Matsumura Itsuki, Ohyama Katsuyoshi, Sato Koji, Obara Ken, Yano Hideo, Ishikawa Osamu	4. 巻 196
2. 論文標題 Observation of Second Sound Attenuation Across a Superfluid Suction Vortex	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Journal of Low Temperature Physics	6. 最初と最後の頁 204 ~ 210
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/s10909-019-02164-z	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Yano H, Ohyama K, Obara K, Ishikawa O	4. 巻 969
2. 論文標題 Observation of the spiral flow and vortex induced by a suction pump in superfluid 4He	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Journal of Physics: Conference Series	6. 最初と最後の頁 012002 (1~5)
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1088/1742-6596/969/1/012002	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 Yano H., Hamazaki K., Koizumi N., Sato K., Obara K., Ishikawa O.	4. 巻 印刷中
2. 論文標題 Size Distribution of Emission Vortex Rings in Turbulence Induced by Vibrating Wire in Superfluid 4He	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Journal of Low Temperature Physics	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/s10909-019-02285-5	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計18件（うち招待講演 1件/うち国際学会 13件）

1. 発表者名 H. Yano
2. 発表標題 Size distribution of emission vortex rings of turbulence induced by vibrating wire in superfluid 4He
3. 学会等名 International Conference on Quantum Fluids and Solids (QFS2019), University of Alberta, Edmonton, Canada (国際学会)
4. 発表年 2019年

1 . 発表者名 K. Obara
2 . 発表標題 Observation of second sound attenuation across a macroscopic rotational flow
3 . 学会等名 International Conference on Quantum Fluids and Solids (QFS2019), University of Alberta, Edmonton, Canada (国際学会)
4 . 発表年 2019年

1 . 発表者名 H. Yano, K. Hamasaki, N. Koizumi, K. Sato, K. Obara, O. Ishikawa
2 . 発表標題 Size Distribution of Emission Vortices of Turbulence Induced by Vibrating Wire in Superfluid 4He
3 . 学会等名 International Conference on Quantum Fluids and Solids (QFS2019), University of Alberta, Edmonton, Canada (国際学会)
4 . 発表年 2019年

1 . 発表者名 K. Obara, I. Matsumura, K. Sato, Y. Kimura, H. Yano, O. Ishikawa
2 . 発表標題 Observation of second sound attenuation across a macroscopic rotational flow
3 . 学会等名 International Conference on Quantum Fluids and Solids (QFS2019), University of Alberta, Edmonton, Canada (国際学会)
4 . 発表年 2019年

1 . 発表者名 T. Nakagawa, S. Inui, M. Tsubota, H. Yano
2 . 発表標題 Statistical laws and self-similarity of vortex rings emitted from a vortex tangle in superfluid 4He
3 . 学会等名 International Conference on Quantum Fluids and Solids (QFS2019), University of Alberta, Edmonton, Canada (国際学会)
4 . 発表年 2019年

1. 発表者名 H. Yano
2. 発表標題 Vortex Emission from Quantum Turbulence Induced in Superfluid 4He
3. 学会等名 Turbulence of all kinds, Osaka City University, Osaka, Japan (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 K. Obara, I. Matsumura, K. Ohya, H. Yano, O. Ishikawa
2. 発表標題 Attenuation of Second Sound across Macroscopic Rotational Flow
3. 学会等名 Turbulence of all kinds, Osaka City University, Osaka, Japan (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 N. Koizumi, K. Hamazaki, K. Obara, H. Yano, O. Ishikawa
2. 発表標題 Vortex Emission from Turbulence Produced in Thermal Counterflow of Superfluid 4He
3. 学会等名 Turbulence of all kinds, Osaka City University, Osaka, Japan (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 小泉成美, 濱崎康佑, 小原顕, 矢野英雄, 石川修六
2. 発表標題 超流動ヘリウム4熱対向流による量子乱流から放出される渦輪観測
3. 学会等名 日本物理学会2019年秋季大会 (岐阜大学)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 松村樹, 佐藤浩司, 木村豊, 小原顕, 矢野英雄, 石川修六
2. 発表標題 第二音波で観測する吸い込み渦の渦糸長密度
3. 学会等名 日本物理学会2019年秋季大会 (岐阜大学)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 中川朋, 乾聡介, 坪田誠, 矢野英雄
2. 発表標題 超流動4He量子渦タングルから放出される渦輪の統計則
3. 学会等名 日本物理学会2019年秋季大会 (岐阜大学)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 松村樹, 小原顕, 矢野英雄, 石川修六
2. 発表標題 超流動4Heの巨視的回転流の測定
3. 学会等名 日本物理学会第75回年次大会 (名古屋大学)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 I. Matsumura, K. Sato, Y. Kimura, K. Obara, H. Yano, and O. Ishikawa
2. 発表標題 Vorticity of suction vortex observed by second sound in superfluid 4He
3. 学会等名 International Conference on Quantum Fluids and Solids (QFS2018), University of Tokyo, Tokyo, Japan (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 K. Obara, I. Matsumura, K. Sato, Y. Kimura, H. Yano, and O. Ishikawa
2. 発表標題 Vortex line density of superfluid suction vortex
3. 学会等名 International Symposium in Honor of Professor Nambu for the 10th Anniversary of his Nobel Prize in Physics, Osaka City University, Japan (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 I. Matsumura, K. Ohyama, K. Obara, H. Yano, and O. Ishikawa
2. 発表標題 Observation of spiral flow and vortex produced by cryogenic motor in superfluid 4He
3. 学会等名 SHU-OCU Symposium on Physics, Osaka City University, Japan (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 松村樹, 佐藤浩司, 木村豊, 小原顕, 矢野英雄, 石川修六
2. 発表標題 第二音波で観測する吸い込み渦の渦糸長密度
3. 学会等名 日本物理学会2018年秋季大会 (同志社大学)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 H. Yano, K. Ohyama, K. Obara, O. Ishikawa
2. 発表標題 Observation of spiral flow and vortex induced by suction pump in superfluid 4He
3. 学会等名 The 28th International Conference on Low Temperature Physics (LT28) (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 H. Yano, K. Ohyama, K. Obara, O. Ishikawa
2. 発表標題 Observation of spiral flow and vortex induced by suction pump in superfluid 4He
3. 学会等名 International Conference on Ultra Low Temperature Physics (ULT2017) (国際学会)
4. 発表年 2017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
研究協力者	小原 顕 (OBARA Ken)		
研究協力者	坪田 誠 (TSUBOTA Makoto)		
研究協力者	木村 豊 (KIMURA Yutaka)		
研究協力者	大山 勝義 (OHYAMA Katsuyoshi)		
研究協力者	佐藤 浩司 (SATO Kouji)		

6. 研究組織（つづき）

	氏名 (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究協力者	濱崎 康佑 (HAMAZAKI Yasuhiro)		
研究協力者	松村 樹 (MATSUMURA Itsuki)		
研究協力者	小泉 成美 (KOIZUMI Narumi)		
研究協力者	中川 朋 (NAKAGAWA Tomo)		