

科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和元年6月21日現在

機関番号：24402

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2015～2018

課題番号：15H03694

研究課題名(和文) 超流動ヘリウム流れ場における量子渦の運動状態の研究

研究課題名(英文) Study on the motion of quantized vortex under the flow field of 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) 13,300,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、超流動ヘリウムの量子渦の運動を、量子渦のユニークな性質を利用して実験的に研究し、以下の成果を得た。振動ワイヤーによる量子渦生成器と渦輪検出器を製作し、量子渦生成から渦輪検出までの時間を測定した。検出時間の分布から、渦輪の放出はランダムに起こっていること、また平均検出頻度の時間変化から、生成される量子渦は定常状態になることを見出した。放出される渦輪直径が広く分布することから、生成される渦はタングル状態、すなわち、量子乱流状態になっていることを明らかにした。放出される渦輪直径とその平均放出頻度の結果は、量子乱流の渦構造が自己相似性を持つことを示唆している。

研究成果の学術的意義や社会的意義

粘性流体の乱流など一般に見られる乱流現象には、流れの不規則性や乱流構造の自己相似性が観測されている。しかし、これらの現象が、乱流中の渦の運動とどのように関係するのか、分かっていない。本研究の対象は、量子化された渦のみで構成される最もシンプルな乱流であり、渦の役割を顕著に引き出すことができる。本研究の結果は、渦運動の直接観測からその不規則性を明らかにし、また放出渦輪のサイズ依存性から乱流の渦構造に自己相似性があることを示した。我々の研究成果は、乱流構造における渦運動の役割を解明するものであり、乱流研究へ向けての新たな研究手段を提供するものである。

研究成果の概要(英文)：We report the results obtained in the present study as follows, for the purpose of investigating vortex motions experimentally in superfluid helium by using novel characteristics of a quantized vortex. Using a set of two vibrating wires as a vortex generator and a detector of a vortex ring, we measured the time between the beginning of a vortex creation by the generator and the detection of a vortex by the detector. We find that vortices created by the generator emit vortex rings randomly, becoming an equilibrium state between the creation and the emission of vortices. The diameters of the emitted rings distribute widely, suggesting that vortices created by the generator become entangled, namely quantum turbulence. The relation between the ring diameter and the mean emission rate implies that the vortex structure of a quantum turbulence created by the generator has a self-similarity.

研究分野：超低温物理学

キーワード：低温物性 流体 超流動ヘリウム 量子渦 量子乱流

1. 研究開始当初の背景

超流動ヘリウム4は、巨視的スケールにわたって量子性を示す特異な現象として注目され、多くの研究者を引きつけながら進展してきた。現在では膨大な研究成果が蓄積され、基本的な事柄はほぼ理解されていると言ってよいだろう。超流動状態の秩序変数は巨視的波動関数で記述され、流れ場は位相の空間変化として表される。したがって流れはポテンシャル流であり、超流動単体では回転流(渦)が存在せず、超流動ではない秩序変数が零の状態や他の物体を芯とする渦は、その循環が量子化される。実際、回転容器内で超流動の渦が存在することが確かめられ、W. F. Vinen は 1961 年にその渦が量子化されていることを実証した[1]。その後の多くの研究により、定常的な渦の性質は、渦芯の構造などを除いてほぼ明らかになっている。

このような状況にあっても、超流動ヘリウム渦の動的な性質は、現在でもあまり分かっていない。渦芯の半径は 0.1 nm と非常に細く、渦を観測する手段が限られているためである。このため量子渦の動的な性質は、もっぱら渦をモデル化した数値計算によって調べられてきた[2]。超流動ヘリウムの渦は、秩序変数が零の特異線である非常に細い渦芯と、循環量子 $n=1$ の超流動循環流で構成されるので、渦芯を太さのない糸としてモデル化する。この渦糸は超流動の中で途切れず、渦糸の端が無い渦輪か、超流動の境界に終端する状態をとる。また渦糸と渦糸が接近し交差すると、渦糸間のつなぎ替え(再結合)が起こると考えられる。これらのモデルに基づいて、超流動流によって応答する量子渦の運動や、量子渦が絡まるタングル状態(量子乱流状態)について、理論的な研究が多数行われてきた。

このように理論が先行する中、我々は、超流動ヘリウムの渦が理論モデルの渦糸のように振る舞うのか、超流動中の振動ワイヤーを用いて実験的に研究してきた[3]。ワイヤー表面の滑らかさとヘリウムの冷却方法を工夫することで、次のことを実験で明らかにしてきた[4,5]。ヘリウムが超流動相転移温度を通過すると、キブル・ツレック機構により位相欠陥(量子渦)が生成される。生成された渦は、ワイヤー表面のこぼこの隙間に付着し、準安定的に残る。この状態でワイヤーを振動させると、振動と相対的にワイヤー表面を流れる超流動流によって付着渦が伸長する[4]。滑らかな表面のワイヤーを使い、超流動相転移温度をゆっくり通過させると、生成され残留する渦は減少し、速い流れでも渦の伸長が起きない[5]。このように我々は、ワイヤーへの量子渦の付着制御方法を開発することで、付着量子渦が超流動流によって伸長することを発見した。

さらに我々は、2つの振動ワイヤーを並べ、片方の振動ワイヤーで渦を伸長させると、もう一方の振動ワイヤーが渦輪を検出することを発見した[6]。我々は、渦糸モデルを用いて次のシナリオを提案した。ワイヤーの振動で渦が伸長し、不安定な渦運動の過程で渦同士が再結合して渦輪となり、その渦輪は渦芯周りの循環流によって飛行し、隣の振動ワイヤーに衝突する。また振動ワイヤーに用いた極微細超伝導線の表面が滑らであることが、渦輪の検出に重要であることを示した[7]。

この新たな渦輪の検出方法は、振動ワイヤーが生成し放出する渦輪の研究へと発展する。放出される渦輪の大きさは分布し、ワイヤーの太さや振動振幅よりも一桁以上小さい直径の渦輪まで分布することを発見した[8]。このことは、再結合によって大きな渦輪から小さな渦輪へとカスケードすることを示唆する。この論文8は *Physical Review B* の Editors' suggestion を獲得するなど、国内外で大きな評価を得ている。放出される渦輪の大きさを渦糸モデルによる数値計算によって調べ、振動振幅より大きい渦輪から一桁小さい渦輪まで分布することがわかり、実験で得た結果とも対応する[9]。

2. 研究の目的

このように超流動ヘリウムにおける量子渦の運動は徐々に明らかになりつつあるが、渦間の再結合の機構や、渦の慣性質量や弾性などの基本的な運動はまだわかっていない。量子渦の慣性質量は、渦芯の動きにどの範囲の超流動循環流が応答するかが重要で、A. J. Leggett と D. J. Thouless の論争など多くの議論がなされてきた[10]。しかし、渦芯のみの質量と予想するものから、循環流すべての関与を予想するものまで、多様な理論予想があり決着していない。また、再結合によって生成される渦輪は、一定の周期で振動する物体によって渦が伸張されるため、規則的に生成され、放出されると予想されるが、我々の研究結果では渦輪はランダムに放出されている[8]。

このように渦運動を支配する法則にはまだ未解明な点が多く、実験的に渦の運動を調べることによって、新たな法則性の発見が期待できる。本研究では、超流動ヘリウム流れ場の量子渦の運動を、これまでに開発した観測手段で研究する。回転流下の渦に直接振動を加えることで生じる波動を観測し、渦の運動状態を研究する。また速い流れで起こる渦の伸長や、再結合で生成する渦輪の観測から、振動物体が伸張する渦の構造を研究する。これらにより量子凝縮相の流れを、量子渦の運動の視点から解明する。

参考文献

1. W. F. Vinen, 'The detection of single quanta of circulation in liquid helium II', *Proc. Roy. Soc. A* **260**, 218 (1961).
2. 坪田誠, '量子渦のダイナミクス', **非線形科学シリーズ1**, (中村勝弘編, 培風館 2008).
3. 矢野英雄, 坪田誠, '物体の運動で発現する量子乱流', *日本物理学会誌*, **68(11)**, 734 (2013).
4. H. Yano, N. Hashimoto, *et al*, 'Motions of quantized vortices attached to a boundary in

- alternating currents of superfluid ^4He ', **Phys. Rev. B**, **75**, 012502 (2007).
- N. Hashimoto, R. Goto, H. Yano, *et al*, 'Control of turbulence in boundary layers of superfluid ^4He by filtering out remanent vortices', **Phys. Rev. B**, **76**, 020504(R) (2007).
 - R. Goto, S. Fujiyama, H. Yano, M. Tsubota, *et al*, 'Turbulence in boundary flow of superfluid ^4He triggered by free vortex rings', **Phys. Rev. Lett.**, **100**, 045301 (2008).
 - H. Yano, T. Ogawa, Y. Nago, *et al*, 'Transition to quantum turbulence generated by thin vibrating wires in superfluid ^4He ', **J. Low Temp. Phys.**, **156**, 132 (2009).
 - Y. Nago, H. Yano, *et al*, 'Vortex emission from quantum turbulence in superfluid ^4He ', **Phys. Rev. B**, **87**, 024511 (2013) (Editors' suggestion).
 - A. Nakatsuji, M. Tsubota, H. Yano, 'Statistics of vortex loops emitted from quantum turbulence driven by an oscillating sphere', **Phys. Rev. B**, **89**, 174520 (2014).
 - D. J. Thouless, J. R. Anglin, 'Vortex mass in a superfluid at low frequencies', **Phys. Rev. Lett.**, **99**, 105301 (2007).

3. 研究の方法

本研究では、一定の周波数で振動する物体によって量子渦を伸張させ、再結合によって放出される量子渦輪の運動を、渦輪検出器によって検出する。複数の渦輪検出器を渦生成器のまわりに配置し、渦生成から渦輪検出までの時間を繰り返し測定することによって、渦の運動状態を研究する。

渦の生成器と渦輪検出器には、我々が開発した極微細超伝導線（直径 $2\ \mu\text{m}$ ）を利用した振動ワイヤーを用いる。図1のように、柱の上に細いワイヤーを半円状に張る。ワイヤーを半円状に張ることで共鳴振動モードが安定化し、ワイヤーの質量とばね定数で決まる周波数で振動する。これを磁場中に置き、電流を流すことによって、ワイヤーに力（ローレンツ力）を与える。共鳴周波数の交流電流を流すことで、半円状のワイヤーを、一定の周期で、図1の渦生成器ワイヤー（generator）の矢印の方向に振動させる。ワイヤーの振動によって、ワイヤーに付着する渦は伸張され、再結合によって渦輪となり、渦生成器から放出される。

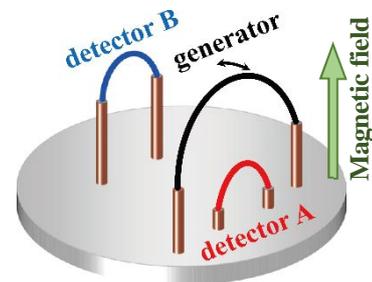


図1. 振動ワイヤーによる渦生成器と渦輪検出器

放出される渦輪の運動を多角的に調べるために、複数の渦輪検出器を使用する。これらは図1のように、渦生成器ワイヤー（generator）の振動する方向に対して、垂直方向（detector A）と振動方向（detector B）に、それぞれの半円状ワイヤーの頂点間の距離が等しくなるように配置する（距離 $0.83\ \text{mm}$ ）。渦の生成開始から渦を検出するまでの時間を測定し、渦の運動状態を調べる。また、超流動の回転流れ場を駆動し、渦検出器で回転流下の渦の運動を研究する。

4. 研究成果

我々が開発した振動ワイヤーは、振動による量子渦の伸張をワイヤー振動のエネルギー損失として検出する。渦生成にともなうエネルギー損失を一定に保ちながら、渦生成開始から渦輪検出までの時間を多数回（一つの条件で $1,000$ 回）測定すると、検出時間は広く分布することを見出した。この分布を調べるために、検出器 B が時間 t までに渦輪を検出する確率 P を、 $1 - P$ としてプロットする（図2）。渦生成開始からしばらくの間は渦輪の検出確率 P が低い、時間 t_f 以降では $1 - P$ は指数的に変化する指数分布を示す。指数分布は渦輪の検出がポアソン過程であることを示しており、したがって、渦輪の放出がランダムであることを示している。渦生成器のワイヤーは一定の周期（ $3\ \text{kHz}$ ）で振動しているにもかかわらず、生成される渦輪はランダムに放出されており、生成器ワイヤーが伸張する渦がカオス的に運動することを示している。

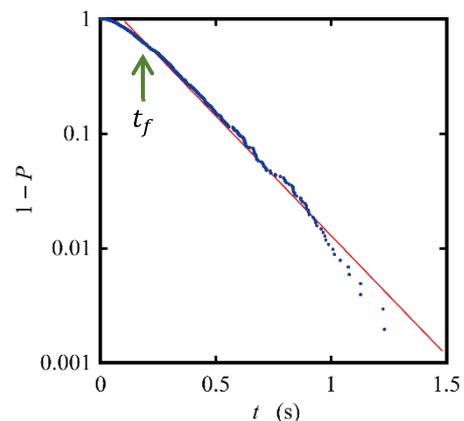


図2. 検出器 B で測定した時間 t までに検出しない確率 $1 - P$

また、時間 t_f 以降では傾き一定の指数分布を示すことから、検出はランダムでも、その平均検出頻度が時間によらず一定であることを示している。すなわち、渦放出はランダムであるが平均放出頻度は一定であり、生成される渦の状態は、生成エネルギーの流入と渦輪として放出されるエネルギーがバランスする定常状態であることを示している。

同様の現象は検出器 A でも見られ、ワイヤーの振動方向によらず生成される渦がカオス的に運動すること、また時間が立つと、渦の生成と放出が定常状態になることを示している。しかし渦の生成エネルギーを増加させると、検出器 B で観測される振動方向の分布とは異なり、検出器 A では2つの指数分布にしたがうことを見出した。この結果は、放出される渦輪の平均頻度

が、ある時間が立つと増加することを示している。この現象は検出器 B では観測されないことから、渦輪の生成に異方性があることを示しているが、なぜこのような異方性が現れるのか、まだ分かっていない。

さらに我々は、検出器が検出する最小渦輪サイズを $0.8\ \mu\text{m}$ から $200\ \mu\text{m}$ まで変化させて、同様の測定を行った。検出する渦輪サイズの制御は、超流動の中に存在する常流動成分が渦を減衰させる現象を利用した。渦輪は渦芯を循環する流れによって輪の面の垂直方向に運動するが、常流動成分との相互摩擦のために、輪の面に沿って輪が縮み消滅する。この現象を利用することで、小さな渦輪を検出器に届く前に消滅させ、大きな渦輪のみ検出できるように選別した。この方法で図 2 と同様の測定を行い、それぞれの渦輪サイズについて平均検出頻度を求めた (図 3)。

検出頻度は、図 3 のように検出される最小渦輪直径 D に対してべき乗則 ($\text{rate} \propto D^{-1.6}$) に従い、指数が -1.6 で変化することを明らかにした。検出頻度の結果は、ワイヤーの振動によって伸張し生成される渦の構造を反映していると考えられる。

渦輪は渦間の再結合によって生成されるため、渦輪の直径は、再結合前の渦間の距離に対応すると考えられる。図 3 のように、放出される渦輪のサイズが広く分布する結果は、生成される渦の渦間距離が広く分布していることを示している。つまり一定の周期のワイヤー振動で引き伸ばされた渦は、カオス的な運動によって絡まり、量子渦タングル状態 (量子乱流状態) になっていると推測される。また、渦輪の放出頻度は検出頻度に比例するので、渦輪直径と検出頻度の関係は、量子渦タングルの渦間距離の頻度分布に対応すると考えられる。この分布が図 3 のようにべき乗則に従う場合、渦の構造は自己相似性 (フラクタル性) を持つことが知られている。すなわち、ワイヤーの単純な振動運動が引き起こす量子渦の運動が、量子渦タングル (量子乱流) の自己相似性を生み出していることになる。

乱流の流れの不規則性や乱流構造の自己相似性は、一般の粘性流体の乱流でも観測されている現象であるが、まだその起源や法則性など詳しいことは分かっていない。我々の得た研究成果は、渦がカオス的な運動をすること、またこの運動によって乱流構造に自己相似性が現れることを示唆している。本研究の対象は、量子化された渦のみで構成される最もシンプルな乱流であり、我々は、乱流における渦運動の役割を引き出すことに成功した。本研究の成果は、乱流構造における渦運動の役割を解明するものであり、乱流研究へ向けての新たな研究手段を提供するものである。

5 . 主な発表論文等

[雑誌論文] (計 3 件)

H. Yano, K. Sato, K. Hamazaki, R. Mushiake, K. Obara, and O. Ishikawa, " Vortex emission from quantum turbulence generated by vibrating wire in superfluid ^4He ", Journal of Low Temperature Physics, 査読有, Vol. 196, 2019, 184 - 189

DOI 10.1007/s10909-019-02143-4

H. Yano, K. Ogawa, Y. Chiba, K. Obara, and O. Ishikawa, " Anisotropic formation of quantum turbulence generated by a vibrating wire in superfluid ^4He ", Journal of Low Temperature Physics, 査読有, Vol. 187, 2017, 515 - 522

DOI 10.1007/s10909-016-1729-z

矢野英雄, 超流動ヘリウムの量子乱流と渦放出、ながれ、査読無、35 巻、N0.6、2016、435 - 437

http://www.nagare.or.jp/download/noauth.html?d=35-6_tokushu2.pdf&dir=39

[学会発表] (計 30 件)

浜崎康佑, 佐藤浩司, 小原顕, 矢野英雄, 石川修六, 「超流動 ^4He 中の振動ワイヤーが生成する量子乱流の渦構造と異方性」, 日本物理学会第 74 回年次大会, 2019 年 3 月 14 日 ~ 17 日, 九州大学, 福岡市

K. Hamazaki, K. Sato, Y. Kimura, K. Obara, H. Yano, and O. Ishikawa, " Vortex emission from turbulence produced by counterflow in superfluid ^4He ", SHU-OCU Symposium on Physics, 2018 年 12 月 27 日 ~ 28 日, Osaka City University, Osaka, Japan

K. Hamazaki, K. Sato, Y. Kimura, K. Obara, H. Yano, and O. Ishikawa, " Vortex emission from turbulence produced by counterflow in superfluid ^4He ", International Symposium in Honor of Professor Nambu for the 10th Anniversary of his Nobel Prize in Physics, 2018 年 12 月 12 日 ~ 13 日, Osaka City University, Osaka, Japan

K. Sato, K. Hamazaki, R. Mushiake, K. Obara, H. Yano, and O. Ishikawa, " Power dependence of vortex emission generated by vibrating wire in He II ", International Symposium in Honor of Professor

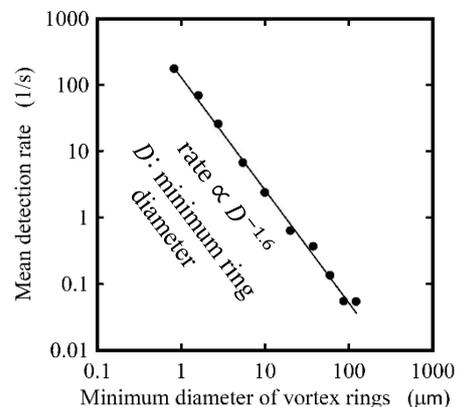


図 3 放出渦輪直径に対する平均検出頻度の変化

Nambu for the 10th Anniversary of his Nobel Prize in Physics、2018年12月12日~13日、Osaka City University, Osaka, Japan

佐藤浩司, 虫明亮哉, 濱崎康佑, 小原顕, 矢野英雄, 石川修六、「超流動ヘリウム4中の振動ワイヤーがつくる量子乱流の渦構造」, 第17回低温工学・超伝導若手合同講演会、2018年11月30日、関西学院大学、大阪市

佐藤浩司, 濱崎康佑, 小原顕, 矢野英雄, 石川修六、「超流動ヘリウム4中の振動ワイヤーが作る量子乱流の渦構造 II」, 日本物理学会2018年秋季大会、2018年9月9日~12日、同志社大学、京田辺市

濱崎康佑, 佐藤浩司, 木村豊, 小原顕, 矢野英雄, 石川修六、「超流動⁴He熱対向流による乱流生成と渦環放出」, 日本物理学会2018年秋季大会、2018年9月9日~12日、同志社大学、京田辺市

H. Yano, K. Sato, K. Hamazaki, R. Mushiake, K. Obara, and O. Ishikawa, “Vortex emission from quantum turbulence generated in superfluid ⁴He”, International Conference on Quantum Fluids and Solids (QFS2018)、2018年7月25日~31日、University of Tokyo, Tokyo, Japan

K. Hamazaki, K. Sato, Y. Kimura, K. Obara, H. Yano, and O. Ishikawa, “Vortex emission from turbulence produced by counterflow in superfluid ⁴He”, International Conference on Quantum Fluids and Solids (QFS2018)、2018年7月25日~31日、University of Tokyo, Tokyo, Japan

K. Sato, K. Hamazaki, R. Mushiake, K. Obara, H. Yano, and O. Ishikawa, “Power dependence of vortex emission generated by vibrating wire in He II”, International Conference on Quantum Fluids and Solids (QFS2018)、2018年7月25日~31日、University of Tokyo, Tokyo, Japan

H. Yano, “Vortex emission from quantum turbulence generated by vibrating wire in superfluid ⁴He”, International Conference on Quantum Fluids and Solids (QFS2018)、2018年7月25日~31日、University of Tokyo, Tokyo, Japan

佐藤浩司, 虫明亮哉, 小原顕, 矢野英雄, 石川修六、「超流動ヘリウム4中の振動ワイヤーが作る量子乱流の渦構造」, 日本物理学会第73回年次大会、2018年3月22日~25日、東京理科大学、野田市

虫明亮哉, 佐藤浩司, 小原顕, 矢野英雄, 石川修六、「超流動ヘリウム4中の振動ワイヤーによる渦放出の異方性 II」, 日本物理学会2017年秋季大会、2017年9月21日~24日、岩手大学、盛岡市

佐藤浩司, 虫明亮哉, 小原顕, 矢野英雄, 石川修六、「超流動ヘリウム4熱対向流が生成する渦環の検出」, 日本物理学会2017年秋季大会、2017年9月21日~24日、岩手大学、盛岡市

H. Yano, K. Sato, K. Obara, and O. Ishikawa, “Observation of vortex emission generated by counter flow in superfluid ⁴He”, International Conference on Ultra Low Temperature Physics (ULT2017)、2017年8月17日~21日、Heidelberg University, Heidelberg, Germany

H. Yano, R. Mushiake, K. Ogawa, K. Obara, and O. Ishikawa, “Growth and formation of vortex tangle by vibrating wire in superfluid ⁴He”, International Conference on Ultra Low Temperature Physics (ULT2017)、2017年8月17日~21日、Heidelberg University, Heidelberg, Germany

H. Yano, R. Mushiake, K. Ogawa, K. Obara, and O. Ishikawa, “Growth and formation of vortex tangle by vibrating wire in superfluid ⁴He”, The 28th International Conference on Low Temperature Physics (LT28)、2017年8月9日~16日、Swedish Exhibition Centre/Gothia Towers, Gothenburg, Sweden

H. Yano, “Formation of quantum turbulence generated by a vibrating wire in superfluid ⁴He (Invited Talk)”, Quantum Turbulence Workshop、2017年4月10日~12日、Florida State University, Tallahassee, Florida, USA

虫明亮哉, 小川耕平, 小原顕, 矢野英雄, 石川修六、「超流動ヘリウム4中の振動ワイヤーによる渦放出の異方性」, 日本物理学会第72回年次大会、2017年3月17日~20日、大阪大学、豊中市

矢野英雄、「超流動ヘリウムの量子乱流と渦放出」, 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、名古屋市

⑲ 小川耕平, 千葉祐弥, 虫明亮哉, 小原顕, 矢野英雄, 石川修六、「振動ワイヤーによる超流動⁴He量子乱流の生成機構」, 日本物理学会2016年秋季大会、2016年9月13日~16日、金沢大学、金沢市

⑳ H. Yano, “Formation of quantum turbulence generated by vibrating wire & Observation of axial flow and vortex produced by cryogenic motor in superfluid ⁴He (Invited Talk)”, Afternoon Session on Quantum Turbulence in International Conference on Quantum Fluids and Solids (QFS2016)、2016年8月10日~16日、Clarion Congress Hotel, Prague, Czech Republic

㉑ H. Yano, K. Ogawa, Y. Chiba, K. Obara, and O. Ishikawa, “Formation of quantum turbulence produced by vibrating wire in superfluid ⁴He”, International Conference on Quantum Fluids and Solids (QFS2016)、2016年8月10日~16日、Clarion Congress Hotel, Prague, Czech Republic

㉒ 矢野英雄、「運動物体が誘発する量子乱流」(シンポジウム講演「量子乱流が拓く新しい乱流科学」), 日本物理学会第71回年次大会、2016年3月19日~22日、東北学院大学、仙台市

㉓ 千葉祐弥, 小川耕平, 小原顕, 矢野英雄, 石川修六、「渦環放出から見た振動ワイヤーによる量子乱流生成機構」, 日本物理学会第71回年次大会、2016年3月19日~22日、東北学院大

- 学、仙台市
- ②6 矢野英雄、「振動物体が生成する超流動乱流」、物性研究所短期研究会「量子乱流と古典乱流の邂逅」、2016年1月5日～7日、東京大学物性研究所、柏市
 - ②7 千葉祐弥、小川耕平、小原顕、矢野英雄、石川修六、「振動ワイヤーが生成する量子乱流の渦放出と渦環サイズ」、物性研究所短期研究会「量子乱流と古典乱流の邂逅」、2016年1月5日～7日、東京大学物性研究所、柏市
 - ②8 大山勝義、小川耕平、小原顕、矢野英雄、石川修六、畑徹、「モーター駆動による超流動ヘリウム4回転流の観測」、日本物理学会2015年秋季大会、2015年9月16日～19日、関西大学、吹田市
 - ②9 Y. Chiba, Y. Wakasa, K. Ogawa, H. Yano, “Power dependence of vortex emissions generated by vibrating wire in superfluid ^4He at finite temperatures”, International Symposium on Quantum Fluids and Solids (QFS2015), 2015年8月9日～15日、Conference Event Center, Niagara Falls, NY, USA
 - ③0 H. Yano, K. Ohya, “Observation of Superfluid ^4He Flow Induced by Cryogenic Motor”, International Symposium on Quantum Fluids and Solids (QFS2015), 2015年8月9日～15日、Conference Event Center, Niagara Falls, NY, USA

〔図書〕(計0件)

〔産業財産権〕

出願状況(計0件)

取得状況(計0件)

〔その他〕

ホームページ：<http://www.sci.osaka-cu.ac.jp/phys/ult/index.html>

6. 研究組織

(1) 研究分担者

なし

(2) 研究協力者

研究協力者氏名：小原 顕

ローマ字氏名： OBARA, Ken

研究協力者氏名：千葉 祐弥

ローマ字氏名： CHIBA, Yuya

研究協力者氏名：小川 耕平

ローマ字氏名： OGAWA, Kohei

研究協力者氏名：大山 勝義

ローマ字氏名： OHYAMA, Katsuyoshi

研究協力者氏名：虫明 亮哉

ローマ字氏名： MUSHIAKE, Ryoya,

研究協力者氏名：佐藤 浩司

ローマ字氏名： SATO, Kouji

研究協力者氏名：濱崎 康佑

ローマ字氏名： HAMAZAKI, Yasuhiro

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。