

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 6 月 3 日現在

機関番号：24402

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2014～2015

課題番号：26600135

研究課題名(和文)液体用光学式マイクロピトー管の開発

研究課題名(英文)Development of optical micro-Pitot's Tube for Cryogenic Liquid

研究代表者

小原 顕(Obara, Ken)

大阪市立大学・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) 3,100,000円

研究成果の概要(和文)：本研究の目的は、低温から高温までの広い温度範囲で使用可能な光学式マイクロフォンとその応用であるピトー管の実用化に向けた、基礎研究であり、特に低温極限での動作とノイズの軽減に重点を置いていた。研究の結果、ノイズの源は光源の出力揺らぎと光電圧変換アンプの電圧ノイズにあることを突き止め、光源の安定化については非コヒーレント化とフィードバックの導入、およびアンプの性能改良には低温アンプの導入で一定の成果をあげることができた。ピトー管の構成はできなかったが、低温アンプと液体ヘリウム用低温ポンプの製作に関しては、世界をリードする成果を産みだし、今後の発展が期待できる。

研究成果の概要(英文)：The aim of this project is the fundamental study for developing a Fiber-Optic Probe Hydrophone (FOPH) that can be used in the wider range of temperatures to utilize the optical micro-Pitot's Tube system. The known problems of this system are their huge noise. We found that the origins of the noise are the fluctuation of the optical sensor and the power fluctuation of the coherent-light source. I have improved the latter problem by introducing a non-coherent light source whose output power is controlled by the feedback circuit located in the ice bath. I also developed the liquid-helium pump that produces a DC mass flow of liquid Helium in the low temperatures, whose flow will be measured by FOPH Pitot's tube. Although we could not succeed in developing the micro-Pitot's Tube up to now, we made a prominent success in making the low temperature amplifier that can be operated in the liquid Helium temperature, which attracts the international interests.

研究分野：超低温実験物理学

キーワード：マイクロフォン 光学式マイクロフォン 冷却アンプ 高速密度測定 速度場測定 液体ヘリウムポンプ レーザー

1. 研究開始当初の背景

流体力学は実学的要素を持ちながら、基礎理論と工学的実験がかけ離れた学問である。理論体系は完結しているが、基礎方程式が数学的に複雑で、何かの極限操作を考慮しなければ扱えないことが多い。実際に起きる興味深い現象の多くは非線形かつ非平衡が本質であり、正確に理解しようとする大変な困難を伴う。一方、風洞実験をはじめとした工学的な研究は非常に盛んに行われ、一種の経験則が広く知られている。本研究計画の発端は、理論と実験のギャップを埋める研究分野を構築したいという要求から始まった。その大きな目標に向けた最初の一步として、任意の1点における圧力と流速の同時の時間変化が計測可能なシステム構築が求められているというわけである。

さて、流体力学には、流体を構成する物質の物性を反映してしまうことが多いため、物性量の判っていない物質では定量的な物理が議論できないという問題がある。本研究で選んだのは、表面張力・蒸気圧・音速・状態方程式などの基礎物性が極めて高い精度で確定しているヘリウムである [R. J. Donnelly and C. F. Barenghi, *J. Phys. Chem. Ref. Data* 27, 1217 (1998)]. さらに現在、別プロジェクトで低温モーターを用いて液体ヘリウムの回転流を起こす研究が進展しており、流速も人為的に発生させられる可能性がある。本計画では液体ヘリウムを用いてセンサーの性能評価を行うことができるような環境が整いつつある。

2. 研究の目的

一般に、ハイドロフォンの方式にはメンブラン型と呼ばれるコンデンサ構造膜の振動を電気信号に変換するものがある。比較的溫度依存性が小さく、感度校正も容易で高感度である反面、空間分解能がない。これに対して、ニードル型は空間分解能が高く音波の反射も小さいが、圧電素子の周波数依存性・溫度変化が大きいため、その都度校正が必要である。本研究の対象である光学式ハイドロフォン (FOPH) は光ファイバを用いたハイドロフォンで、圧力測定のための感圧素子は光ファイバの先端となる。圧力信号は、光ファイバと液体の界面における光反射の変化 (フレネルの反射損失) が密度・圧力によって変化することを利用する。測定媒質の状態方程式を用いて自己校正可能で、また、局所性も高い。周波数帯はエレクトロニクス部分だけに依存し、概ね DC~10MHz である。しかし、現時点では感度が低く、数 10kPa 以下を測ることができない。従って、最初の目的は、FOPH を低圧測定用に改良することになる。

低温用 FOPH が実現したあとは、ピトー管を開発することを考える。従来のピトー管は動圧と静圧の差を差圧計で直接観測するこ

とにより実現している。本計画では差圧測定装置として一対の光学式ハイドロフォンを用い、電子回路上で差動をとる。最終的にはセンサーそのものが流速に及ぼす影響を最小限に抑えるため、ピトー管の大きさを可能な限り小型化することに挑戦したい。

3. 研究の方法

本研究の対象である光ハイドロフォンの原理を以下に示す。一般に、屈折率が異なる2つの媒質の境界面で、入射側の屈折率を n 透過側の屈折率を m とすると、界面で

$$R = \left(\frac{m-n}{m+n} \right)^2$$

なる反射が起きる。FOPH ではこれを利用する。すなわち、先端を研磨した光ファイバを被測定媒質中に挿入すると、光ファイバ端面において入射光の一部が反射して光源側に戻るわけである。実際の屈折率測定は図1のように行う。ここで重要なのは、図中で1:1と描かれているファイバカップラである。この装置は、入射光を1:1のパワーに分岐する、双方向の装置である。これにより、 $APD_{sig} \cdot APD_{ref}$ で検出された電圧を光の強度に換算し、比をとると反射率がわかる。反射率からヘリウムの屈折率 n と密度 ρ の関係を用いるには、Lorentz-Lorenz の式

$$\frac{n^2-1}{n^2+2} = \frac{4\pi}{3} \frac{\alpha}{M} \rho$$

より求めることができる。ここで、 α は分極率、 M は分子量とともに温度、圧力によらない定数である。全温度・圧力における液体 He の状態方程式、(圧力と密度の関係式) は未確定だが、絶対零度に限れば Maris の式 [S. Balibar, *JLTP*, **129**, 363 (2002)] があり、1 bar で 0.0056% という極めて微小な変化がおきることがわかる。すなわち、フレネル反射損失をハイドロフォンとして利用するためには、非常に小さな反射率変化を計測しなければならない。本計画は、このような小さな反射率変化を読み取るという技術的な側面が非常に大きいといえる。また、局所性という意味では、光ファイバの有効コア径で決まり、シングルモードファイバであれば数 μm まで下げることができる。また、奥行きに関しては、センサファイバからみて光の波長程度 (約 $1 \mu\text{m}$) の領域の密度・圧力の平均を捉えていることになる。

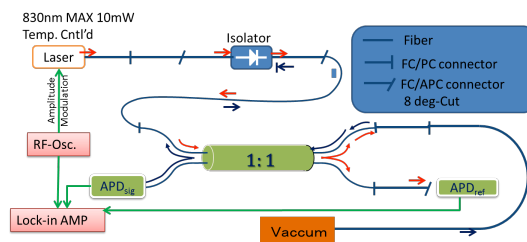


図1：ハイドロフォン構成

申請の時点で、申請者は 1.4 ~ 4.5K の静状態における液体ヘリウムの密度測定に成功していた。しかし、その精度は極めて低く、実用に耐えるものではなかった。原因として考えられるのは、検出器の不安定正と光源の出力揺らぎである。本計画では、まず過去の実験装置の保温と固定方法を最適化するだけでそのまま再計測し、比較対象となるデータを取得する。次に、検出器の揺らぎを調べ、最後に光源の揺らぎをしらべることにした。

4. 研究成果

(1) 従来方式の FOPH による液体ヘリウムの静的密度測定

この実験では、予備実験の段階で、非常にノイズが大きいことが判っていたため、光源に発振器で 70 kHz の振幅変調をかけロックインアンプで AM 検出することにした。応答速度はロックインアンプの時定数で決まり、およそ数秒必要であった。また光検出器は市販の APD モジュールを使用した。図 1 中の vacuum と書かれた部分に気液共存状態のヘリウムを閉じ込め、直接冷却を行った。その結果、図 2 のグラフのような結果を得た。飽和蒸気圧下における液相の密度は Donnelly によってまとめられているが、蒸気相のデータはまだない。そこで、今回、C. Gaiser [Metrologia 46, 525 (2009)] によるピリアル展開のパラメータを利用し、既知の飽和蒸気圧から密度に換算した。同時に、光ファイバの屈折率は室温において公称 1.4583 であり、低温でも 1.458 でフィットできることがわかった。すなわち、光ファイバの屈折率の温度依存性は、ほとんど無視して良いということが判った。

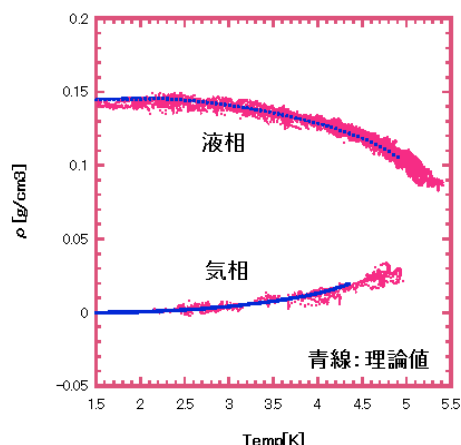


図 2 : 飽和蒸気圧下のヘリウムの密度測定結果。理論値 (公称値) との比較

(2) ノイズの原因について

静的密度の測定については一定の成果を取めたが、非常に大きなノイズがあることも分かった。ノイズの大きさを評価するには幾つかの手法があるが、本研究では、その目的である圧力解像度に注目したい。液体ヘリウムの超流動転移温度周辺における密度は 0.145 g/cc に対して、実測値ではおよそ ±

0.02 g/cc 程度の揺らぎがある。これは、液体ヘリウムの圧力に換算すると、およそ 10 bar 程度の揺らぎに相当する。このノイズを軽減するためロックイン検波せざるをえず、そのため帯域幅が数秒までに制限されてしまう。すなわち、帯域幅確保といういみでも、低ノイズ化は必須であると言える。では、ノイズの原因はどこにあるのだろうか？ それを調べるのを第 2 の課題とした。

2-1 : 光センサーの低ノイズ化

これまでに用いてきた光センサーは、浜松ホトニクス製の APD モジュール

(S12060-10) であった。APD 素子は通常の PN 接合フォトダイオードに加えて、半導体内部に高電圧の逆バイアスを加えることでアバランシェ増倍機構を実現させたものである。PD 部分の光電流変換に比較的大きな温度依存性があるのに加え、アバランシェ増倍率にも温度依存性があることがわかっていいる。そのため、使用した APD モジュールでは APD 素子近傍の温度を計測し、最終電圧出力が一定になるようなフィードバックを逆バイアス用の高電圧に対してかけていた。ただし、アナログ方式ではなく、マイコンを用いた計算方式であって、理想的なフィードバックにはなっていない。また、逆バイアス用高電圧電源は、いわゆるチャージポンプ式 DC-DC 変換器であり、非常に大きなリップルとスパイク状ノイズ発生させている可能性がある。そこで、まずは APD とその電流電圧変換アンプ基板を液体窒素で強制冷却し、電源をすべてシリーズ型の低ノイズ電源に取り替えることを試みた。実験は、APD 素子と後段の自作のトランスインピーダンスアンプを簡易真空槽の中に入れ、直接液体窒素で冷却することによって行った。実効的な全光電流変換係数は、光検出感度に内部増倍率をかけたもので、図 3 はその温度変化を示したものである。このように、液体窒素による強制冷却の効果が確認できた。これは、Dorokhov, [Nucl. Inst. Meth. in Phys. Res. A 504 (2003) 58-61] による報告と概ね同じであるが、あまり大きな増倍効果は得られなかった。これは、実際に用いた APD の性能によるものと考えられる。

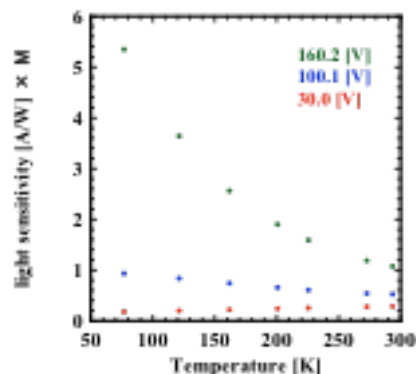


図 3 : 実効光検出感度の温度依存性

2-2 : 低温アンプ

液体窒素温度で正常に動作するオペアンプについて調べたところ、白濱らによれば [Hayashi, JLTP 150, 012016 (2009)] Full CMOS タイプと呼ばれるオペアンプにその可能性はある。幾つかの Full CMOS オペアンプについて調べた結果、Analog Devices 社の AD8516ARZ か AD8646ARZ が液体窒素温度でもほとんど特性が変化せず利用可能であることが判った。また、低容量コンデンサも積層セラミックタイプの C0G 規格あるいは PPS タイプのものは概ね使用できることがわかった。電解コンデンサもタンタルタイプとアルミ・ポリマータイプが利用可能であることも判った。さらに、AD8546ARZ と TDK のセラミックコンデンサ C1608C0G シリーズ、および Vishay のタンタルコンデンサ 293D シリーズを用いたアンプ回路は、液体ヘリウム温度 (4.2 K) でもほとんど室温と同じ動作をおこなうことが確認できた。ただし、CMOS 特有のノイズは温度を下げて減らすことができない。従って、オペアンプの冷却は、センサーを冷却し、その近傍の低温部分にアンプを設置することで、伝送経路が拾うノイズあるいは同軸ケーブルによるロスを軽減することが目的であって、熱雑音を軽減できない。さて、冷却 CMOS アンプの注目すべきことは、その回路構成の簡便さと経済性である。すなわち、現存する低温アンプの主流は SQUID を用いたものと、GaAs 系 FET を用いてディスクリートに構成されたものであり、その技術に長けた者でなければ制作が困難である。しかし、Full-CMOS 低温アンプは通常の室温における設計とほとんど何も変更することなく数 MHz 程度の帯域幅と高い入力インピーダンスを持たせることができる。これを国際会議で報告したところ、国内外の幅広い分野の実験研究者から注目を集めた。本研究計画から派生した新たな研究分野の幕開けである。

2-3 : 光源の出力揺らぎおよびコヒーレント光にともなうゆらぎによるノイズの解消

レーザーダイオードは、一般的に、半導体そのものの温度変化によって光量と波長が変化する。そのため、これまで用いてきたレーザーダイオードも、温度コントローラと電流コントローラで出力強度を安定化するようにしてはいたが、それでも超長期安定性は保証できなかった。また、コヒーレント光の宿

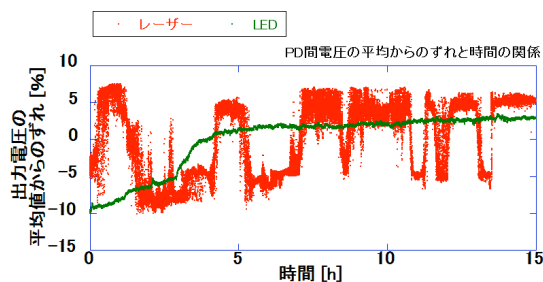


図4 : レーザーと高輝度 LED の、同一出力時の出力揺らぎの違い。

命として、光回路中に意図せぬフレネル反射があると、寄生キャビティが形成される。このキャビティの長さは当該部分の光ファイバの長さと同程度であるから、光ファイバの実効長が光の波長の数分の1程度でも伸びるとモードホップが発生し、光量および発振波長が揺らぐ原因になってしまう。光源としてのモードホッピングノイズがないレーザー発振器は存在するが、光ファイバ接合部におけるフレネル反射は必ず発生する。ならば、最初からコヒーレント光を用いなければ良い、という結論に至った。そこで、今回は光源に高輝度赤外線 LED に変更することで回避した。そのかわり、今度は集光技術が必要となる。様々な試行錯誤の結果、本研究がたどり着いた最適な方法は、光ファイバカップラの LED (Thorlabs M850F2) に大口径の光ファイバをつなぐことであった。その結果、これまでに用いてきた口径 5.6 μm の光ファイバ (Thorlabs, SM800-5.6-125) の局所性を一旦犠牲にし、口径 200 μm の FT200UMT に変えることにした。図4は、レーザーと LED の長期安定性測定の結果である。なお、両光源の出力は、ともに検出器出力が同一になるようなパワーを選んでいる。レーザーの出力には大きな揺らぎがあり、ほぼ二値化されていることから、モードホップであることがわかる。一方、定電流駆動の LED は、室温変化に相当する長期ドリフトはあるものの、安定している。次は LED を恒温化したいところだが、残念ながら今回用いた LED は 1 W 級とかなり発熱するため、直接氷温冷却するのは現実的でない。そこで、LED から出た光をファイバカップラで分岐し、一方の光を恒温化されたフォトダイオードで検出し、その光量が一定になるように室温の LED に流れ

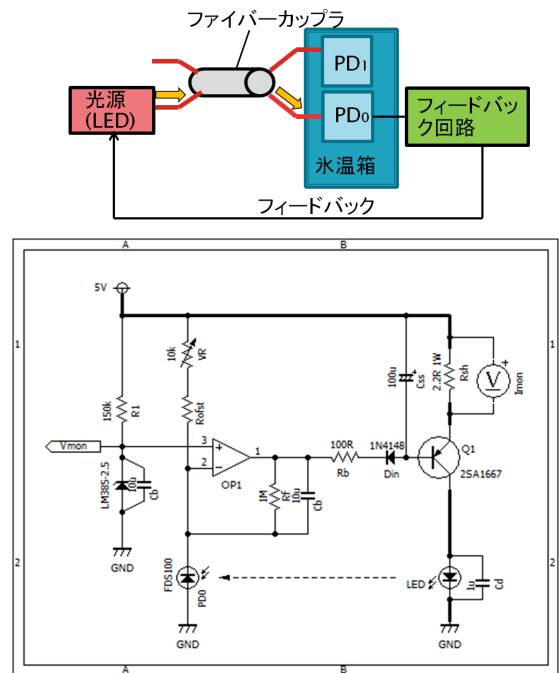


図5 : フィードバックシステム (上) 概念図 (下) 回路図

る電流値を制御する方式に改めることにした。その概略図を図5に示す。この回路はPD₀の出力と定電圧ICの出力電圧を比較し、トランジスタのコレクタ電流を制御する。その結果、LEDの光量はPD₀が常に2.50Vを維持できる状態になる。図6は、フィードバックの効果を測定した比較実験で、10%以上あった光源出力の変動を0.1%にまで軽減することに成功した。

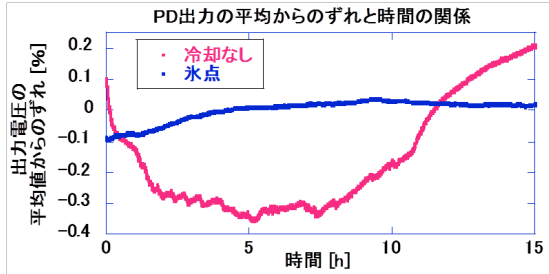


図6：フィードバックシステムの性能

(3) 差動プローブ法による密度測定

光学部：光源の揺らぎによるノイズがフィードバック法と氷点冷却で軽減できることが明らかになったので、ピトー管構成を実現するための差動プローブ法を考案した。システム構成は、図7の通りである。これまでの装置との違いは、ファイバカップラを3つ用いることで、そのうち1つはフィードバック用、2つはセンサファイバを2本用い、差動増幅法増幅を行う。光源にはフィードバック法と氷点冷却を行う。

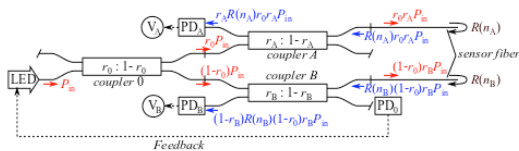


図7：差動プローブFPOHの概念図

アンプ部：光アンプは高速応答を実現するために逆方向に接続されたフォトダイオードと、ゲイン10kV/Aの電流電圧変換アンプおよびゲイン10の反転増幅回路からなる。オペアンプはAnalog Devices社のFET入力タイプのAD8066ARZを使用した。これはCMOSオペアンプに比べてノイズ密度が低く、バイポーラタイプよりも発熱が小さいという特徴がある。これも回路部品を簡易真空槽にて氷水冷却を行い、出力の安定化を図った。また、今回の改良の最大の特徴は二つの媒質からの信号を差動増幅することである。アンプはTexas Instruments社のINA129を用いた。この計装アンプは現時点で入手可能なものの中で最も周波数帯が広い。以下に、今回開発した差動増幅FOPHの概略を示す。

センサファイバAを屈折率 n_A の媒質中に、センサファイバBを n_B においたとき、出力電圧 V_{out} は、

$$V_{out} = G(V_A(n_A) - kV_B(n_B))$$

とかける。ここで、 k は減衰定数で、 V_B を k 倍した電圧が差動増幅回路の負入力に入力されるように調整する。さらに、液体ヘリウムと蒸気ヘリウム、真空のように屈折率が近いときに、便利な表式に近似できる。すなわち、 $n_A = n_0 + \delta n$ および $n_B = n_0$ のとき、

$$\begin{aligned} V_{out} &= G\alpha_A [R(n_0 + \delta n) - R(n_0)] \\ &= G\alpha_A \left[\left(\frac{m - n_0 - \delta n}{m + n_0 + \delta n} \right)^2 - \left(\frac{m - n_0}{m + n_0} \right)^2 \right] \end{aligned}$$

とかける。さらに、 $N_{\pm} = m \pm n_0$ とおき、 $\delta n \ll N_{\pm}$ であることから $\delta n / N_{\pm}$ の1次まで近似すると、

$$V_{out}(\delta n) \sim 2G\alpha_A \left(\frac{N_-}{N_+} \right)^2 \left(\frac{1}{N_+} + \frac{1}{N_-} \right) \delta n$$

となり、結局、 V_{out} は δn に直接比例することになる。比例計数は、まとめて校正係数として実験で求めてしまえば、内容を明らかにする必要はない。また、暗電流やアンプのオフセット電圧はすべてキャンセルされていることも特徴である。注意したいのは、差動増幅を行っても、光源の揺らぎをキャンセルできているわけではない、という点である。

以上の方法を用いて、液体ヘリウムの密度を測定した結果のうち、期間内に測定できたのが、図8である。今回は差動プローブの片側を蒸気ヘリウムとし、蒸気ヘリウムの密度はビリアル係数の方法から得られた計算値を用いている。2~3Kの間で大幅に精度が改善されたことがわかる。光源にフィードバックをかけて安定化したことの効果が絶大であるといえる。

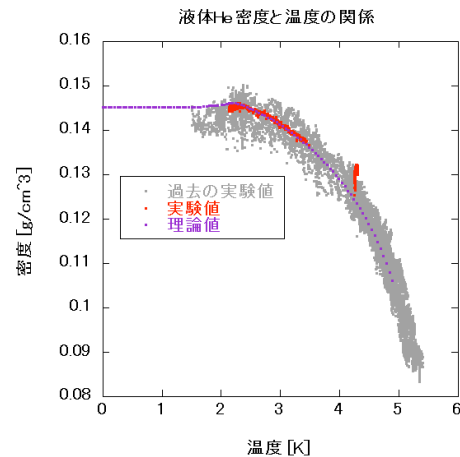


図8：差動増幅FOPHによる液体ヘリウムの密度測定。

(4) 最後に、本計画とほとんど同時進行で、大阪市立大学の矢野らが行う「モーターが直接駆動する超流動回転流」にも部分的に参画し、基礎研究の一部を担った。の研究がスタートしていた。本計画で基礎研究を行ってきたピトー管が開発できた暁に

は、人為的に発生させた超流動流を用いて比較・検証実験を行うことができるからである。具体的には、低温モーターをポンプとして利用し、直線流および準定常圧力を生成する実験を行った。その結果、ポンプの上に長さ 15cm のパイプを設置し、パイプ上部から液体が吐出させることを、世界で初めて示せた。今のところ、その流量は極めて微小であり、FOPH で測れる量には到底到達できていない。この後のさらなる開発が必要である。

以上のように、本件研究計画では FOPH のノイズの軽減に非常に多くの時間と努力を費やし、ピトー管を制作するまでには至らなかった。しかし、センサーとして用いる光ファイバの選定、ノイズの原因の特定、光源のフィードバック制御と氷点冷却の導入により、大幅にノイズを軽減させることができることを示した。また、ピトー管構成に必要な差動プローブ法の確立まで行うことができた。最終的な目的である、流体力学の理論と実験と対応させるためのヒドロフォンとするためにはもう一桁以上の安定性が必要で、そのためにはまた別の新たな技術の開発・導入が必要である。

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 4 件)

- ① “Vortex emissions from quantum turbulence generated by vibrating wire in superfluid ^4He at finite temperature”, Y. Wakasa, S. Oda, Y. Chiba, K. Obara, H. Yano, O. Ishikawa, and T. Hata, *Journal of Physics: Conference Series* **568** (2014), 012027(1–6). (査読あり)
- ② “Development of a Fiber-Optic Probe Hydrophone for a Cryogenic Liquid”, K. Obara, H. Ohmura, C. Kato, H. Yano, O. Ishikawa, T. Hata, *Journal of Low Temperature Physics*, **175**, 464-470 (2014) (査読あり)
- ③ “Development and Comparison of Two Types of Cryogen-Free Dilution Refrigerator”, T. Hata, T. Matsumoto, K. Obara, H. Yano, O. Ishikawa, A. Handa, S. Togitani, T. Nishitani, *Journal of Low Temperature Physics*, **175**, 471-479 (2014) (査読あり)
- ④ “Observations of Vortex Emissions from Superfluid ^4He Turbulence at High Temperatures”, S. Oda, Y. Wakasa, H. Kubo, K. Obara, H. Yano, O. Ishikawa, T. Hata, *Journal of Low Temperature Physics*, **175**, 317-323 (2014) (査読あり)

〔学会発表〕(計 10 件)

- ① 物性研短期研究会「スーパーマターが拓く新量子現象」(2014 年 4 月 17 日～19 日, 東京大学物性研、千葉県柏市)「液体ヘリウム用 光学ヒドロフォンの開発」小原 顕, 他
- ② 日本物理学会 2014 年秋季大会(2014 年 9 月 7 日～10 日, 中部大学、愛知県春日井市)「液体 ^4He 常流動と超流動における Vibrating wire の抗力」若狭洋平、小原 顕, 他
- ③ 日本物理学会 第 70 回年次大会(2015 年 3 月 21 日～24 日, 早稲田大学、東京都新宿区)「低温用光学ヒドロフォンと冷却光センサーの開発」小原 顕, 他
- ④ International Conference on Topological Quantum Phenomena (2014.12.16-20, 京都大学) “Density Measurement of Liquid / Vapor Helium by Fiber-Optic Probe Hydrophone”, K. Obara, et al.
- ⑤ 27th International Conference on Low Temperature Physics (2014. 8. 6-13, Buenos Ailes) “Density Measurement of Liquid/Vapor Helium by Fiber-Optic Probe Hydrophone”, K. Obara, et al.
- ⑥ International Conference on Ultra Low Temperature Physics (2014. 8. 15-20, San Carlos de Bariloche) “Density Measurement of Liquid/Vapor Helium by Fiber-Optic Probe Hydrophone”, K. Obara, et al.
- ⑦ International Symposium on Quantum Fluid and Solids (2015. 8. 9-15, Niagara Falls, NY, USA) “Observation of Superfluid ^4He Flow induced by Cryogenic Motor”, K. Ohyama, K. Obara, et al.
- ⑧ 平成 27 年度物性研究所短期研究会「量子乱流と古典乱流の邂逅」(2016. 1. 5-7, 東京大学物性研究所、千葉県柏市)「モーター駆動による超流動 ^4He 回転流の観測」大山勝義、小原 顕, 他
- ⑨ 日本物理学会 2015 年秋季大会(2015. 9. 19, 関西学院大、兵庫県西宮市)「液体ヘリウム中で動作する低温モーターの開発」大山勝義、小原 顕, 他
- ⑩ 日本物理学会 第 71 回年次大会(2016. 3. 22 東北学院大学 宮城県仙台市)「モーター駆動による超流動 ^4He 回転流の観測 II」大山勝義、小原 顕, 他

〔その他〕

ホームページ等 とくになし

6. 研究組織

(1) 研究代表者

小原 顕 (OBARA, Ken)

大阪市立大学・大学院理学研究科・講師

研究者番号：50347481