

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 6 月 6 日現在

機関番号：24402

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2012～2013

課題番号：24740206

研究課題名(和文)光ハイドロフォンを用いた量子液体中の音響タブレンスの実験

研究課題名(英文) Search for Acoustic Turbulence in Cryogenic Liquid using Fiber-Optic Probe Hydrophone

研究代表者

小原 顕 (Obara, Ken)

大阪市立大学・理学(系)研究科(研究院)・講師

研究者番号：50347481

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,400,000円、(間接経費) 1,020,000円

研究成果の概要(和文)：液体Heに大振幅の定在波音波を励起すると非定常な巨大吸収が観測される。これは音場によって蒸気泡が生成され、さらに泡が音場と非線形に相互作用することに起因すると、申請者は考えている。この説を定量的に証明するため、リアルタイムに音場の絶対値を測定できる装置光ハイドロフォンを開発した。この装置は、超流動相および蒸気相を含む1.5～5.5Kのヘリウム中で、動作することを確認した。密度換算には成功したが、圧力換算に必要な精度には至らなかった。この原因はAPD検出器の本質的な問題に起因することを突き止めた。この問題さえクリアすれば、音響タブレンスの定量的観測に一步近づけるはずである。

研究成果の概要(英文)：It is well known that a huge sound absorption takes place when a large amplitude standing-wave is excited in liquid Helium. I have started this project to show that the absorption was the result of the cavitation and the non-linear interaction between the vapor bubble and the standing-wave, which has been called the acoustic turbulence. In order to study it, I have constructed the Fiber-Optic Probe Hydrophone optimized for Cryogenic Liquid. I have succeeded in measuring the static density of both liquid and vapor helium in the temperature window from 1.5 to 5.5 K. However, I did not succeed in converting the density to the pressure because the accuracy were not high enough. I found that the reason originated from the intrinsic noise of the APD sensor itself. So, it will be possible to study the acoustic turbulence in more qualitatively by improving the stability of APD itself.

研究分野：数物系科学

科研費の分科・細目：物理学・物性I

キーワード：表面・界面 センサー 応用光学 非線形科学 臨界現象 低温工学

1. 研究開始当初の背景

液体 He に大振幅の音波を励起すると、非定常かつランダムな音響吸収が観測される。これは、音場とそれによって発生した微小な泡が相互作用することで生ずる「音響タブレンス」であると我々は推論していた。すなわち、音響キャビテーションによって振動板表面にもともと存在している不均一気泡核から有限サイズの泡が生成され、その泡がひきつづき同じ音波によって強制的に膨張収縮運動させられる。液体 He 中に存在している泡は He 蒸気の泡しかなく、通常は有限サイズの泡になると表面張力の効果で自然消滅してしまふ筈である。ところが、音波に曝されていると、有限サイズのまま長い寿命を持つ可能性があり、その運動がカオスであることが、他の実験から類推できる。もし、我々が観測した非定常吸収が音響タブレンスであるなら、自然科学一般に興味のある「非平衡開放系」における非定常あるいは時空間欠性という特徴を示している可能性がある。非平衡開放系は、自然界の様々なところで見つかっているが、多くの場合は複雑系であり、基礎的な原理を追及するうえで障害が多い。従って、背景として殆ど完全に理解されている液体 He 中で研究する意義は大きい。

さて、非定常吸収が音響タブレンスであることを裏付けるためには、まず、音場の強さの絶対値を決定する必要がある。また、泡が音波を吸収している事を実証する必要がある。このような現象をとらえるためには、一般にはハイドロフォンを使って、リアルタイムに液体の圧力の絶対値測定を行う必要がある。しかし、液体ヘリウムを用いるような低温下で使用できる、校正されたセンサーがない。そこで、あらたなセンサーの開発・改良が必要になった。要求されるのは、1000 Pa 程度の分解能と DC ~ 100 kHz 程度の周波数帯域である。

2. 研究の目的

1でも述べたように、超純粋な低温下の音響タブレンスの性質を調べることは、最終的には非平衡開放系における一般的なエネルギーの流れを理解することになる。そのためには、音波と泡の膨張収縮運動の関係を調べる必要があり、そのためには圧力の局所・リアルタイム・絶対値測定を行わなければならない。この要件を一挙に解決するのが、ハイドロフォンである。本計画の具体的な目標は、「光ハイドロフォン」と呼ばれる装置を低温用に最適化したい。光ハイドロフォンとは、媒質に光ファイバーを直接挿入し、光ファイバーのコアと媒質の界面での光の反射を計測することで、媒質の密度あるいは圧力を直接リアルタイム計測するものである。最大の特徴は、極めて広い周波数範囲(高い応答速度)と、自己校正が可能なことである。室温の水や大気衝撃波観測用には既に開発され

ているが、低温用はまだない。そこで、特に液体ヘリウム用に特化した高感度光ハイドロフォンを製作・評価することにした。

また、低温のヘリウムで発見されている時空間欠性を示す類似現象として、超流動乱流が挙げられる。これは、物理的な振動子を振らせることで量子渦糸にエネルギーを注入しつづけることで乱流を不安定性に成長させるという現象で、非平衡開放系の典型例であると認識されている。そこで、できる限り量子渦糸乱流の研究とも交流し、新たな分野の開拓を行うことも目的とする。

3. 研究の方法

ハイドロフォンとは流体の振動圧力を計測するシステムの総称で、一般的には piezo 振動子 小型のコンデンサマイクロフォンを利用する。いずれの装置でも、音場の絶対値を知るには基準となる振動圧力を用いた感度校正が必要である。しかし、低温下では基準となる振動圧力がない上に、感度そのものが温度/周波数依存性を持つため、実質的に校正不可能である。一方、光ハイドロフォンは以下に示すように、殆ど周波数依存性をしめさず、かつ、圧力の絶対値を知ることができるという特徴がある。その原理を以下に述べる:

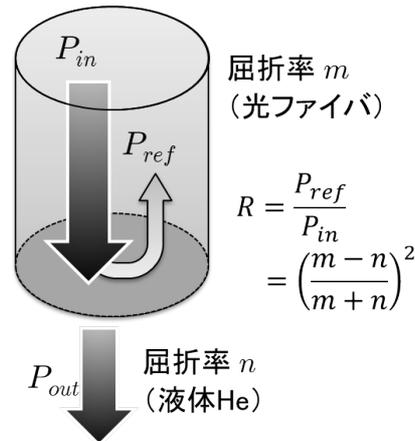


図1：フレネルの反射損失の原理

図1のように、屈折率 m の 1 本の光ファイバーを用意し、一端を光源、反対側の一端を屈折率 n 媒質中に浸す。入射光は屈折率の違いにより光ファイバー端面において入射光の一部が反射して光源側に戻る。これを、フレネルの反射損失と呼ぶ(下流側からみるとエネルギーが損失しているように見えるため)。この反射率は、液体 He の屈折率・

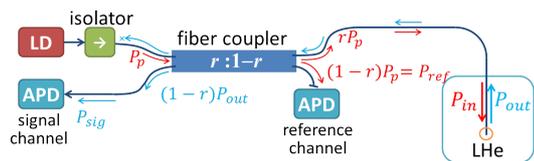


図2：測定装置概念図

誘電率に依存する。屈折率はローレンツ=ローレンスの式によって密度へと変換可能で、密度は状態方程式を通して圧力に変換できる。この原理を具体化した装置の概念を図2に示す。図中のLDは赤外線(830nm 1mW)のレーザーダイオードであり光量(正確には順方向電流)が振幅変調されている。isolatorは反射光からLDを保護するために入れられた一方通行デバイスである。isolatorを出た光はfiber couplerと呼ばれるデバイスの一端に輸入される。fiber couplerは、この装置の中心的なデバイスで、入力された光を、エネルギーで $r:1-r$ の比で分岐して出力する働きがあり、かつ、双方向動作が可能である。この機能を用いると、センサー用光ファイバーとそれに接する媒質の界面における反射を、一度も自由空間(大気中)を経由することなく測ることができるわけである。この特徴は、特に低温実験において重要である。すなわち、通常、低温における光実験は、高価な光学窓付クライオスタットをもちいなければならない。窓からの環境光の除去特に発熱対策に大変な労力を必要とする。また、光学システムと冷凍システムの間での位置調整なども必要である。一方、本システムは既存のクライオスタットに直接導入できる点で、安価かつメンテナンスが簡単になるという特徴がある。さて、fiber couplerにおいて分岐された光のうち、一方はreference channelのAPDに入射される。もう一方はセンサーとなるファイバーの端面を照射する。分岐比 $r$ は一定なので、reference channel APDの出力は、センサーファイバーへの入射光のパワーに厳密に比例した値をリアルタイムに計測していることになる。さて、センサーファイバーの先端は90度にクリープされており、そこでフレネル反射損失が起きる。反射光は再びfiber couplerの一端に入射され、さらに分岐され、一方がsignal channelのAPDへ至る。もう一方はisolatorによって阻止され、熱となって消失する。さて、二つ設置されたAPDは、それぞれ入射光と反射光を計測するためのアバランシェフォトダイオードである。従って、二つのAPDの出力の比をとることによって、反射率を求めることができるのである。投入光エネルギーと反射光エネルギーを同時に計測するため、多少のLDの出力揺らぎはキャンセルされることが期待される。

計算によれば反射率は飽和蒸気圧において約0.02であり、液体 $^4\text{He}$ の1 barの圧力変化に対応する反射率の変化は約 $6 \times 10^{-6}$ と小さい。良好な感度を得るためには、レーザー出力に振幅変調をかけ、高感度光検出器の出力をロックインアンプで検波する。変調周波数は音響タプレンスを引き起こす励起音波の音響周波数(約3 kHz)よりも十分に高い。70 kHzとした。レーザーは発熱を引き起こす可能性があるため、極低温での圧力測定ではバーストパルスにて行う必要がある

かもしれない。光検出器の感度を評価するため反射率と圧力の校正を行う必要があるが、光ハイドロフォンは従来のハイドロフォンと異なり、(電気信号処理系を除けば)感度の周波数依存性が殆どないため、定常的加圧/減圧による感度校正が可能である。飽和蒸気圧下の液体Heの場合、圧力と温度はITS-90という基準に基づき1対1に対応するため、実際には液体Heをサンプル容器に閉じ込め、容器ごと温度を変化させれば十分である。

このシステムの根幹部分は決して新しいものではなく、室温大気・水用の衝撃波観測の実証実験 [Staudenraus, Ultrasonics 31, 267 (1993)]がすでにある。低温下で応用されれば、本計画が世界初となる。また、本計画ではStaudenrausらの構築したシステムよりもはるかに高感度が要求される。

#### 4. 研究成果

本研究の成果は、主にシステムそのものの構築と、校正手法の確立、そして今後につながる新たな発見からなる。以下、(1)~(6)の成果について概説する。

(1)第1の研究成果は、低温・真空中および激しいサーマルサイクルに対して安定に動作する光ファイバーが選択できたことであった。我々が用いたのは、近赤外用のシングルモードファイバー(Thoalabs SM800-125-5.6)である。カタログによれば、屈折率は室温(800 nm)において1.4586である。低温かつ830 nmの波長での屈折率は未知(およそ1.5程度であることが期待されていた)であったが、最終的には、1.485と求められた。また、光ファイバーコアのモード場直径(実質的にコア直径)は5.6  $\mu\text{m}$ であり、実際にはその数倍の広さの領域における屈折率の変化を読み取ることができるということを意味している。また、将来、このハイドロフォンシステムを空間掃引することができるようになったとすれば、その空間分解能は10  $\mu\text{m}$ 程度になることが期待される。このファイバーの選定には、NTT基礎研究所の山口真澄氏の助言によるところが大きい。

(2)第2の成果は、光学ハイドロフォンを実際に作成し、室温の空気と有機溶剤の屈折率を測定することに成功したことである。様々な改良を加えて、ノイズ対策を行った最終形は図3のようになっている。

optical (fiber) couplerの分岐比 $r$ は実測で約0.55であった。このシステムを作り上げるうえで、幾つかのポイントがある。

LDの出力および出力波長は、激しくダイオード本体の温度に依存する。先に述べたように、このシステムは、基本的には入力エネルギーの変動に対しては強いはずだが、目標としている感度は屈折率にして $10^{-6}$ の精度であるため、光源の揺らぎは

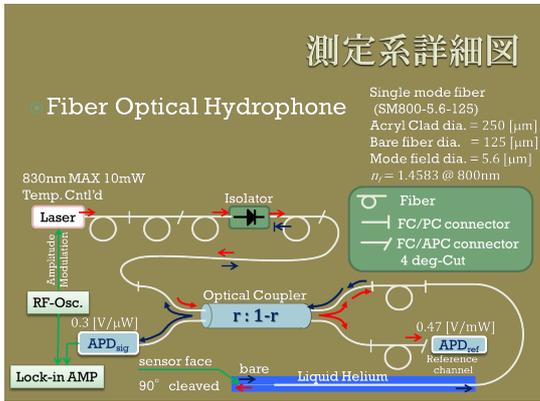


図3：測定系詳細図

無視できなかった。これは、一つには、signal 用と reference 用 APD の感度が大きく異なることに起因するものと思われる。入念な温度コントロール設定と保温、また、なるべく出力レベルを下げることである程度の改善を見た。不用意な反射を起こさない。

(ア) 光ファイバーの接続部には、絶対に空気を入れてはならない。空気と光ファイバーコアの間にも、大きな反射存在するからである。これは、系統誤差を生むだけでなく、反射光と入射光が干渉して誤動作が起きる。これを防ぐため、光ファイバーコネクタ接続部に、光ファイバーと全くおなじ屈折率を持つジェルを導入し、反射を観測限界以下に抑えることに成功した。これは、センサー用光ファイバーの先端にジェルを塗布したうえで反射光レベルを計測することによって確かめられた。

(イ) Reference 用 APD (入射光エネルギー計測用) には、大きな光エネルギーが入射される。ここで重要なのは、光ファイバーと APD の間に、わずかな空気層が存在し、ここでも光の反射が発生することである。しかも、APD の構造上、上記のジェルを導入することができない。そこで、光ファイバーの先端を 8 度で切断したものを利用した。これにより、ファイバー端面での反射は起きるが光ファイバー内で全反射条件をみたすことができず、極めて短距離の間に拡散させることができるようになった。しかし、そのために APD に入射する光量は約 60% 減少してしまった。

で、可能な限りの努力はしたものの、現実としてはどこかに意図せぬ小さなキャビティーが形成されたまま残ってしまう。キャビティーによるノイズ発生は、キャビティーの長さに依存し、キャビティーの長さは光ファイバーの長さで決まる。すなわち、光ファイバーがわずか(光の波長の数分の 1 程度の長さ)に変動がおきると、それがそのままノイズとなって観測される

ことを意味する。従って、光ファイバーの経路のうち、反射光が発生しそうな箇所は徹底的に除振しなければならなかった。probe 先端の 90 度クリップした。これは、光ファイバーに軸に対して垂直な傷を与えて折ることで実現する。90 度からずれると、反射光量が減るだけでなく、偏波の発生が危惧されるからである。

APD には、本質的に内部増倍率の強い温度依存性がある。現在市販されている APD はセンサーそのものの温度コントロールを行わず、センサー近傍の温度を実測し、後段増幅器の増幅率を自動で制御することで安定性を保っている。本実験での要求精度は極めて高いので、本来なら APD そのものを温度制御(あるいは冷却)すべきだが、今回は本体そのものを保温することとした。

以上のポイント抑えた上で、予備実験をおこなった。室温大気圧下の空気(屈折率 1.000)はもちろんのこと、エタノール(1.3618)イソプロパノール(1.3749)を明確に見分けることができるようになった。

これら成果は日本物理学会 第 68 回 年次大会(広島大学 2013/03/27)において発表された。

(3) 第 3 の研究成果は、低温 1.5~5.5 において、気液共存状態(飽和蒸気圧下)および一部超臨界状態のヘリウムの静的密度の測定とその校正方法の確立に成功したこと

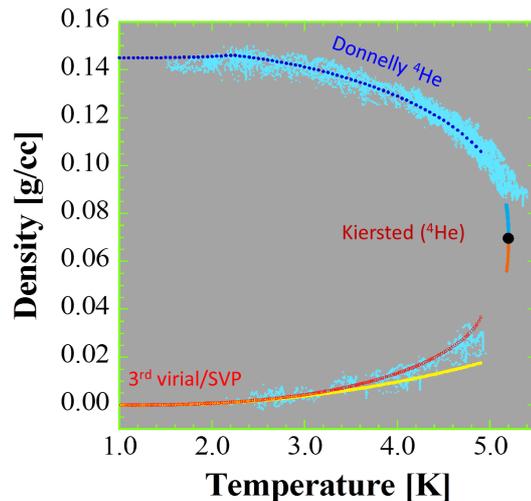


図4：密度測定の結果と理論値

である。

図4はその測定結果で、5.2 K 以下では気相と液相の明確な区別がついていることが判る。その差は、屈折率にして 0.04 程度である。5.2 K 以上の測定も行ったが、超臨界状態になっているため、圧力と温度の正確な決定が難いため、グラフには載せていない。図4中の青い点線は、Donnelly [J. Phys. Chem. Ref. Data 27, (1998)] らによってまとめられた飽和蒸気圧下の液体ヘリウムの密度の公称値である。一方、赤い線は蒸気の密度の

計算値であり、具体的には Gaiser [Metrologia 46, 525 (2009)]らによって求められたヘリウム気体のピリアル係数をもとに構成された状態方程式と、ITS-90 に定められたヘリウムの蒸気圧の両方を同時に満たす密度となっている。さて、現実の光ファイバの低温での屈折率という二つの不確定な定数がある。これを、上記の実験と計算値が整合するようにフィッティングすることで、矛盾なくも求めることに成功した。同時に、低温での光ファイバの屈折率が同時に求められたことにもなる。求められた密度は、Kierstead [Phys. Rev. A, 7, 242 (1973)] による密度の臨界性測定 (図中の黒点) と矛盾しない結果を得た。飽和蒸気圧下のヘリウムは、1.5 K 以下で密度は殆ど変化しないことが知られているため、本実験により、液体および蒸気ヘリウムの全温度領域での密度が測れたことになる。この成果は、International Conference on Quantum Fluids and Solids (2013/08/01-06 松江くまびきメッセ) および日本物理学会第 69 回年次大会 (東海大学 2014/03/28) ならびに一部は Journal of Low Temperature Physics, 175, 464-470 (2014) として発表されている。また、2014/4/17 ~ 18 に行われた物性研究所短期研究会「スーパーマターが拓く新量子現象」でポスター発表され、2014 年夏の国際会議 LT27/ULT2014 でも発表される予定である。

(4)(3) で、密度の測定には成功したものの、残念ながら圧力換算を行えるほどの高い精度は得られなかった。図 4 で観測された密度の揺らぎを直接状態方程式で圧力に關すると、おおよそ数気圧になる。実際に数気圧の揺らぎが存在するのは不自然なので、これは測定にかかわるノイズであると判断した。原因は 2 つ考えられる。一つは、LD そのものの出力強度と波長の不安定性である。実験で用いる APD は強い波長依存性をもっているため、また二つの APD が同一の動作状態でないため、本来キャンセルされるはずの LD 光源の揺らぎが、みかけの反射率にして  $10^{-4}$  以上の揺らぎとして反映されてしまっている可能性がある。そこで、LD を通常の通信用赤外線 LED に変更して、短時間の測定を行ってみた (赤外線 LED は LD に比べてはるかに安定しているはずである)。しかし、得られた信号の SN 比は、LD 使用時と全く同一であった。即ち、精度が悪い理由は、LD 光源の出力揺らぎではない。従って、残る可能性は、APD の素子そのものである可能性が高い。そもそも、APD とは一般のフォトダイオードの逆バイアス動作に加えて、内部で加速された光励起キャリアが半導体内部の不純物と衝突してイオン化し、雪崩的にキャリア数を増倍させる効果 (アバランシェ増幅) を利用している。この効果による内部増倍率は激しく温度に依存する。先に述べたように、市販されているセンサーモ

ジュールは、APD 素子そのものを温度制御するのではなく、センサー付近の温度を計測してマイコンで数値を補正する方式をとっている (温度補償型 APD)。これは、一般的な光学検出用途では問題ないのかもしれないが、本実験の要求制度からすれば、この補正方式には制度に限界があるものとおもわれる。本研究期間内には時間的に間に合わなかったが、本来、APD 素子およびその周辺の回路を温度コントロールするべきであるものと思われる。実際、(もはや市販されていない) ペルチェ素子冷却型 APD は、マニュアルスペック上でも温度補償型 APD にくらべてノイズがかなり小さいことがわかる。さらに、APD モジュールには、200 V 程度の高電圧発生装置が必要である。カタログによれば、電源電圧 5 V を 40 倍に昇圧しており、その動作にはスイッチトキャパシタ方式がとられている。通常、この方式の昇圧コンバータは数 10 mV 程度のリップルとスパイクノイズを放射することで知られている。従って、高安定な外部電源を別に用意しなければならないだろう。今後は APD 素子を強制冷却することで恒温化し、さらに出力リップル 10 mV 以下でスパイクが原理的に発生しないシリーズ型高圧安定化電源を導入することで、出力の超安定化を目指すことに方針が決まった。これが、第 4 の成果である。

(5) 本研究計画は、音響タブレンスという現象を定量的に研究するための装置開発が主であった。音響タブレンスは、非平衡開放系の一例で、大振幅の音波を用いて液体および液体中の泡にエネルギーを注入しつづけることで発生する不安定性 (時空間欠現象) である。一方、低温のヘリウムで起きる類似現象として、超流動乱流の生成現象も挙げられる。これは、物理的な振動子を振らせることで渦糸にエネルギーを注入しつづけて、渦糸乱流という流れの不安定性を発生させるというものである。このテーマは数値シミュレーションと実験がよく一致する系であるため、近年、急速に理解されつつある。エネルギーを研究期間中には、超流動乱流現象の研究グループとも相互交流をもち、その結果 3 編の論文に寄与することができた。今後もこの交流は続け、理想液体として液体ヘリウムを利用し、非平衡現象一般の理解・発展につなげていきたい。

(6) 最後に、本計画が始まったのとほぼ同時に、全世界的なヘリウムの供給不足という事態が生じた。ヘリウムを使う業種は各種あるが、低温物理学にとっても緊急事態であった。本計画とは直接の関係はないが、ヘリウムを舞台とする研究するものの務めとして、寒剤としての液体ヘリウムを用いない冷凍機の開発にも少しだけ参画し、1 編の論文に寄与することができた。ヘリウムの供給不足は若干回復したものの、今後も限りある資源であることには変わりない。冷凍機開発も、今後、ヘリウムという綺麗な系で非平衡系を

研究し続けるために必要な技術であると確信している。

## 5. 主な発表論文

(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 5 件)

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) 査読有

DOI: 10.1007/s10909-013-0962-y

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) 査読有

DOI: 10.1007/s10909-013-0986-3

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) 査読有

DOI: 10.1007/s10909-013-0934-2

Vortex emission from quantum turbulence in superfluid He-4, Y. Nago, A. Nishijima, H. Kubo, T. Ogawa, K. Obara, H. Yano, O. Ishikawa and T. Hata, Physical Review B **87**, 024511 (2014) 査読有

DOI: 10.1103/PhysRevB.87.024511

Time-of-flight measurements of vortices emitted from quantum turbulence in superfluid 4He, H. Kubo, Y. Nago, A. Nishijima, K. Obara, H. Yano, O. Ishikawa and T. Hata, Journal of Low Temperature Physics, **171**, 466-472(2013) 査読有

DOI 10.1007/s10909-012-0723-3

[学会発表](計 7 件)

液体ヘリウム用・光学ハイドロフォンの開発(II), 小原顕, 大村裕輝, 千葉祐弥, 矢野英雄, 石川修六, 畑徹, 日本物理学会第 69 回年次大会(東海大学 2014/03/28)

渦環放出から見る超流動 4He 中振動ワイヤーによる量子乱流の生成機構, 織田慎平, 若狭洋平, 小原顕, 矢野英雄, 石川修六, 畑徹, 日本物理学会第 69 回年次大会(東海大学 2014/03/28)

2 タイプの無冷媒希釈冷凍機の開発, 松

本拓也, 小原顕, 矢野英雄, 石川修六, 畑徹, 日本物理学会 2013 年秋季大会(徳島大学 2013/09/27)

Development of Fiber-Optic Probe Hydrophone for Cryogenic Liquid, K. Obara, H. Ohmura, C. Kato, H. Yano, O. Ishikawa, T. Hata, International Conference on Quantum Fluids and Solids (2013/08/01-06 松江くにびきメッセ)

液体ヘリウム用・光学ハイドロフォンの開発(I), 小原顕, 松本拓也, 岡田唯史, 矢野英雄, 石川修六, 畑徹, 日本物理学会 第 68 回 年次大会(広島大学 2013/03/27)

Anomalous Acoustic Absorption in Liquid Helium, Y. Kimura, K. Obara, H. Yano, O. Ishikawa and T. Hata, QFS2012: International Conference on Quantum Fluids and Solids, (Lancaster University, UK 2012/08/15-21)

Time-of-flight Measurements of Vortex Rings Emitted from Quantum Turbulence in Superfluid 4He, H. Kubo, Y. Nago, A. Nishijima, K. Obara, H. Yano, O. Ishikawa and T. Hata, QFS2012: International Conference on Quantum Fluids and Solids, (Lancaster University, UK 2012/08/15-21)

[その他]

ホームページ等

<http://www.sci.osaka-cu.ac.jp/phys/ult/>

## 6. 研究組織

(1)研究代表者

小原 顕 (Ken Obara)

大阪市立大学・理学(系)研究科(研究院)・講師

研究者番号: 50347481

(2)研究分担者

なし

(3)連携研究者

なし