

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成 24 年 5 月 10 日現在

機関番号：24402

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2010～2011

課題番号：22740201

研究課題名（和文） 量子音響タプレンスの観測に向けた極低温液体ヘリウム中の
気泡生成の研究研究課題名（英文） Bubble nucleation in cryogenic Helium
-Search for Acoustic Turbulence in Quantum Liquids-

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

研究成果の概要（和文）：超純粋かつ量子性の強い液体 ^4He に大振幅の音波を入射すると、非線形かつ非定常な吸収が観測される。この異常な吸収はランダムではあるが、新たに導入した統計処理を行うことにより、定量的な評価が可能となった。その結果、異常吸収の発生は気泡発生に伴うものであることをほぼ確定した。また、波形の観測から、音響タプレンスの前兆を捕まえた。いずれの成果も、今後の発展に期待が持てる。

研究成果の概要（英文）：When we apply a large amplitude sound to ultra-pure quantum liquid, the unsteady non-linear response with anomalous absorption are found. We have developed the new technique to evaluate it quantitatively and revealed that this absorption is due to the nucleation of the bubble. In addition, we have observed the prelude of the acoustic turbulence. Further developments are expected from these results.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2010 年度	2,700,000	810,000	3,510,000
2011 年度	600,000	180,000	780,000
年度			
年度			
年度			
総計	3,300,000	990,000	4,290,000

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・気泡核生成

1. 研究開始当初の背景

「液体中で、大振幅音波を励起したら、どのようなことがおこるだろうか？」という根源的な疑問がある。この疑問を解決するためには、極めて純粋で簡単な物質が必要である。

本研究で利用する低温下の液体 ^4He は、低温故にそれ自身で自動的に超純粋である。ま

た、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。また、絶対零度まで液体のまま存在出来るため、熱揺らぎに支配される数 K から顕著な量子性が期待される数 mK という極低温領域までをカバーしている。したがって、目的を達成するには最適な液体である。

本研究の開始時点では、小振幅の場合には入力に比例した振幅の正弦波が観測されるが、大振幅になると図1のような「振幅の消

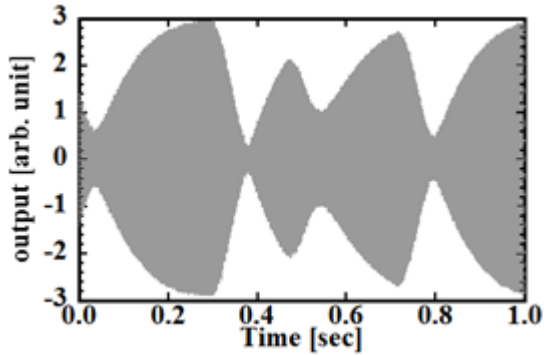


図1：異常吸収波形

失と緩やかな回復」を間欠的に繰り返すという異常吸収が起きるということが分かっていた。この異常な吸収は大きな圧力振動によって瞬間的に低い圧力が生成され、気泡が発生したと考えられる。パルス音の発生は気泡の急激な膨張収縮運動の結果であり、異常な波形は気泡発生によるエネルギーの吸収と振動板の力学的な応答の回復を示しているものと考えられる。しかし、異常吸収の定量的性質とその原理、エネルギーの流れについては殆ど未知であった。

2. 研究の目的

一般に、液体中の気泡は外部音場と相互作用してカオスを発生し、音響タブレンスと呼ばれる複雑で乱れた状態に遷移することがある。本研究計画は、超純粋かつ量子性の強い液体 ^4He を用いて極低温下の音響タブレンスの性質を調べ、現在申請者を含めて世界的に活発に議論されている量子乱流との対応関係から非平衡開放系におけるエネルギーの流を理解することを最終目標とする。その中で、本申請は温度・圧力・不純物ガス濃度・表面形状等を制御することによって、気泡発生の素過程を明らかにし、音響タブレンスの発生条件を調べることに焦点を絞って研究した。

3. 研究の方法

液体中の気泡生成の方法には沸騰法、気体注入法、粉碎法など幾つかの手法が提案されているが、本計画で用いた方法は、音響法の一つに分類される。ただし、通常音響法は大出力の超音波振動子を用いた方法である。

Balibar [Physical Review B64, 064507 (2001)] による先行実験では最大の音場は最低で -9 bar を超えているものの、極めて大きな発熱を伴うため、パルス法を用い、温度が上昇するまえの一瞬の現象を扱わざるを得なかった。一方、本実験は極低温かつ沸騰をともしない純粋な音響キャビテーションを長期間発生させたいため、より低い投入エネルギーで大きな音場を発生させる必要が

ある。従って、本計画では小出力のピエゾブザー用振動子による定在波共鳴を用いた。こ

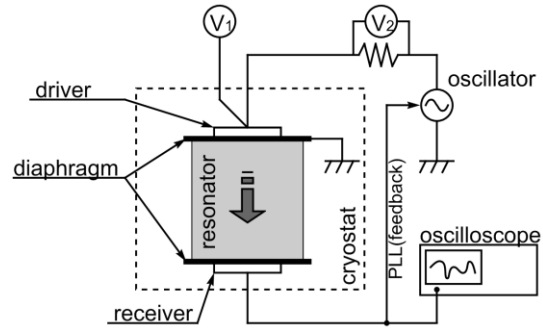


図2：測定回路図

の手法では、図2のように、receiverからの出力をdriverにフィードバックさせることによってPLLを構成し、自励共鳴させる。純粋なパルスは作れないものの、非常に安定したCWを励起し続けることができるという特徴がある。すなわち、ひとたび定在波共鳴条件を設定すれば、大きな温度変化・振幅変化があったとしても、自動的に最大効率状態を維持し続けることができる。

さて、以上に述べた手法は低エネルギーで高音場を発生させるものであった。気泡の発生は、振動板表面(図2中のdiaphragm)に何らかの事情により予め付着している不均一気泡核を用い、そこから音響圧の負圧によって気泡へと成長させるという方法を用いた。Atchely [J. Acoust. Soc. Am., 85 (1989) 1065]によれば、気泡核の由来は「液体を容器に注ぎ込むときに、液体の接触角の関係で周囲の気体を凹凸に閉じ込める」ことにあるのだが、本研究の場合は周囲の気体がすべて純粋な蒸気であり、なおかつ接触角も0なので、Atchelyの理論がそのまま成り立つ保証はない。しかし、一方で、気泡核がない壁から気泡が直接生成するためにはマイナス数barの負圧が必要であるため、そのようなメカニズムだけの気泡生成もまたあり得ないだろう。このように、気泡生成のメカニズムそのものがまだ基礎研究の対象であって、制御できる段階ではない。そこで、まずは第1段階として、気泡発生条件のうち、投入エネルギーあるいは励起振幅の関係を、伝統的な統計的手法を用いて考察することにした。

さらに、発生した気泡に振動音場を印加し続けることにより、気泡の膨張収縮振動と外部音場の非線形な相互作用のために不規則音波が発生するという予想を高メモリデジタルタイザによって観測することにした。

不純物ガス濃度や表面構造依存性に関しては、大変興味深いものの、今回は以上の二点に焦点を絞って実験を行うことにした。

4. 研究成果

測定の結果、小振幅励起の場合には入出力特性は線形であるが、大振幅励起の場合には非定常な吸収が観測されることが判った。この異常な吸収の発生はランダムである。図3にその一例を以下に示す。

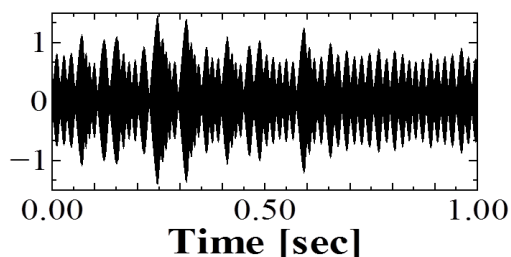


図3：ランダムな異常吸収波形

この例では、励起振動の周期は 1/3.6kHz であり、波形に表れている構造はそれよりもはるかに長い。しかも、この波形はあくまでも例であり、常にこの波形が観測されるわけではない。吸収は大きいものの、顕著な構造が観測されないこともある。本研究での第1の成果は、この、ランダムな吸収に統計的な手法を応用し、定量的な評価が行えることを示したことである。以下に、その手法を示す：

1. 絶対に異常吸収が発生しない低励起状態で、入出力特性 (receiver 出力 / driver 投入電圧) を観測する。
2. PLL 自励共鳴が維持できる最低の励起電圧で待機する。
3. 300 ms 間 driver に高い励起電圧を印加し、その間の平均出力電圧を計測する。
4. 再び2に戻る。PLL 自励共鳴は維持されている。
5. この時に観測される入出力特性は図4のような形をしている。
6. 低励起での入出力特性を高励起まで2時間数で外挿する。
7. 外挿曲線から外れた場合を1とカウントし、載っているばあいを0とカウントする。

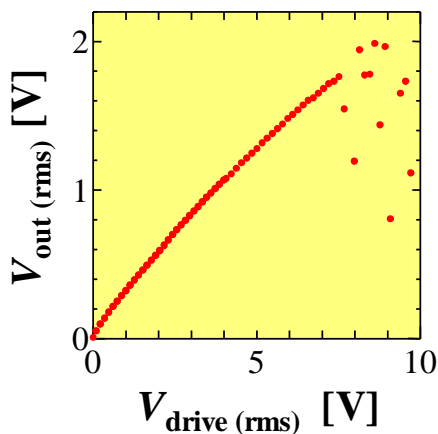


図4：入出力特性

以上の作業を数百回くりかえし、励起電圧に対する異常発生確率 P を求めたものが、次の図5である。

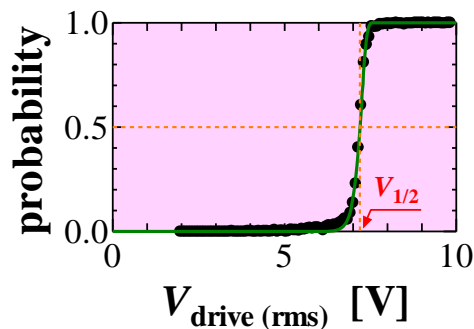


図5：異常発生確

ここで表れたフィッティング曲線は「非対称 S 字形曲線」と呼ばれる関数で、

$$P = 1 - \exp(-\log 2 \exp A (V_{\text{drive}} - V_{1/2}))$$

のように表される。これは、 A を Δ の V 微分であるとすれば、熱励起でエネルギー障壁 Δ をのりこえるような現象に表れるものと同様である。すなわち、この系には熱エネルギーおよび入力エネルギーと同等な大きさの Δ が存在することを示唆している。図6は、閾電圧 $V_{1/2}$ の圧力依存性を示す。

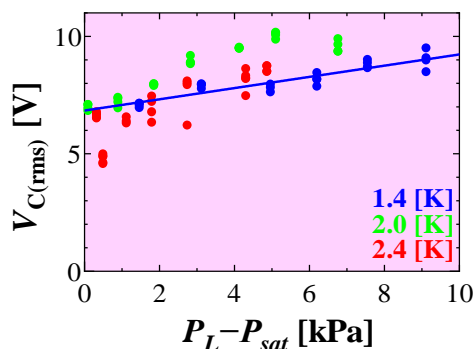
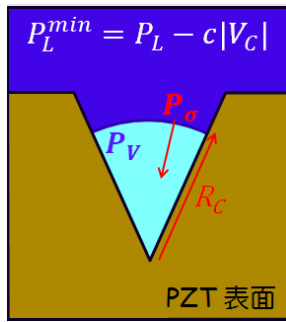


図6：異常発生閾電圧の圧力依存性

このように、閾電圧には圧力依存性があることがわかった。すなわち、一見ランダムに見える異常吸収が、一定時間内に「起きる / 起きない」という二値化によって定量的に評価できるようになった訳である。次に、異常発生閾電圧は、高圧になるほど、異常は発生しにくいという傾向があることが判った。これにより、異常発生が泡の発生と関連する現象であることはほぼ確定できたといって良いだろう。これが、第2の成果である。

さて、ここで、異常発生が泡の発生に関係するものであることを認めるならば、以下の議論が成立する。まず、振動板表面の凸凹にマイクロな気泡が捕縛されている状態を考える。これは、100%のヘリウム蒸気からなるマイクロな気泡である。簡単のために、気泡の形を、下図のように、円錐型のくぼみの中に、円錐の頂点を中心とする球の一部である



と仮定する。すると、気泡の半径がそのまま曲率半径になるから、表面張力を σ とすると気泡には内向きに表面圧力 $P_\sigma = 2\sigma/R$ が存在する。また、気泡内部の

圧力は P_v である。気泡には、以上二つの圧力のほかに、音場振動も与え続けられているため、膨張収縮を行う。本来は動力学的に取り扱うべき振動子ではあるが、ここでは簡単のために、音場が負の最大 P_L^{min} に振れたときには振動子は殆ど静止していると近似し、その時点での圧力のつり合いを考えると、

$$P_L^{min} + 2\sigma/R_c = P_v$$

となっているはずである。 P_v は未知だがどんなに大きくても飽和蒸気圧である数百 Pa よりも小さな量である。一方、 P_L^{min} も $2\sigma/R_c$ は大きな量であるから、実質的に右辺は 0 とみなせる。また、 P_L^{min} が投入電圧に比例するので $P_L^{min} = cV$ とおくことができる。このようにして、閾電圧の圧力依存性のグラフがほぼ線形になっていることを説明することができる。そして、未定定数 R_c をフィッティングから求めると、 $R_c = 23 \text{ nm}$ となった。これは凡その気泡核臨界半径を表していると考えることができ、気泡核がこれ以上大きな半径になれば、圧力は釣り合うことができず、爆発的な成長を示すことになる。23 nm というサイズは、凡そ piezo 振動板の表面に存在する無数の傷（おそらく、製造工程に起因するもの）の典型的なサイズよりも小さい。即ち、気泡核は振動板表面の傷の底の方に捕縛されていることを示している。即ち、気泡核が成長するといっても、傷の中から表に出てくるような状況にはなっていないのである。以上の議論は、気泡核の幾何学に対して大胆な仮定をおいて定性的な議論を行っているにすぎず、定量的な評価に耐えるものではない。しかし、不均一核生成という一般には取り扱いの難しい現象が、液体ヘリウムという舞台を使えば基礎研究を可能にする事を示している。その意味において、第3の成果であったといえる。これは、2012年3月の物理学会で報告した。Δについては、大変興味のあるところであるが、気泡核の形状に強く依存することが予想されるために現段階では考察に至っていない。今後、何らかの方法で気泡核体積の形状・体積を限定することができれば、大きく推進することができるようになるだろう。ただ Δ そのものはさておき、Oxtoby [J. Chem. Phys., 100, 7665 (1994)] による核生成理論を用いた考察では、S 字関

数の傾き A から臨界気泡核形成に関与する粒子数を求めることができる。これにより間接的に導かれる臨界核のサイズ等を見積もったところ、閾電圧 $V_{1/2}$ から得られる情報とほぼ同じであることが判った。従って、現段階では A に関する考察よりも閾電圧 $V_{1/2}$ に関する考察を深めることにした。

第4の成果は、常流動中と超流動中での、異常発生の違いについてである。本実験で明らかになったのは「常流動状態かつ飽和蒸気圧」では一度異常吸収（気泡発生）が起きると、長い時間待っても定在波共鳴が起きない、ということである。常流動状態でも、圧力下なら超流動と同じ結果が得られている。この理由は、今のところ、次のように考えている。すなわち、気泡核の急激な膨張とその後の泡の膨張収縮運動とは蒸気の液化と液の蒸発の繰り返しに他ならない。さらに、液化と蒸発には潜熱の移動が伴う。超流動状態では熱伝導率が極めて高いので、潜熱の移動は極めて高速に行われる。従って、泡は急激な膨張収縮を行うことが可能なのである。一方、常流動状態では熱伝導率が低いため、潜熱の移動が制限されているため、泡は膨張も収縮もできない状態になってしまっているのではないかと考えられる。すなわち、常流動飽和蒸気圧下では、振動板表面に泡が付着したままになっており、これが一種の吸音材になっているために定在波を励起することができないのである。これは、Hao [Phys. Fluids, 11, 2008 (1999)] らによる Vapor Bubble 理論を超流動を含めて拡張したことになる。一方、常流動の高圧状態では、泡は液体の圧力に負けて収縮するので問題はない。以上のように、超流動中と常流動中の違いは、粘性の有無では説明できず、熱伝導率の違いとしてなら説明できるということが判った。この成果については、現在、投稿論文を準備しているところである。

最後に、強い音場をかけ続けたときに発生する不規則音波について述べる。実験前の予測としては、Lauterborn [J. Acoust. Soc. Am., 84, 1975 (1988)] らの先行研究と同じように、カオスが発生するものと期待していた。これは、泡の半径方向の運動方程式が強い非線形性をもっているため、大振幅振動にさらされるとカオス振動を起こすというものであり、一種のタブレンスと考えられている現象の一つである。本研究では、泡の運動が定在波の吸収と密接に関連しているため、異常吸収波形もカオス的に振る舞うはずである。これを検証するためには3通りの方法が考えられている。一つ目は、個別波形を詳細に観察する方法、二つ目は波形のFFT解析を行う方法、三つ目は位相空間図形を構築する方法である。このうち、本研究では、異常発生時に励起周期の二倍の周期をもつ微細な構造を持

つ波形を見つけた。同じ波形 F F T 波形には、励起周波数の半整数倍の成分を見つけた。いずれの特徴も Lauterborn らの主張と同じである。量子流体中で見つかった新しいタイプのタブレンスであるということで、国際会議 LT26/ULT2011 にて発表を行った。また、三つめの位相空間図形に関しては測定手法・解析方法も含めて未解決な問題が多い。予備的な実験を行ったところ、異常発生時に特徴的な図形が現れることがあることが判りつつある。ただし、定量的な解析を行うにはサンプル数が圧倒的に不足しているため、今後さらなる実験の継続が望まれる。実験におけるカオスは、一般に、大変複雑な系となるが、液体ヘリウムという簡単な系においても確実に発現することになれば、今後の研究の発展には大きな期待が持てる。

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 K. Obara, Y. Kimura, et.al., Anomalous sound absorption of finite amplitude sound in Liquid ^4He , J. of Phys.: Conf. Ser. (2012/02/16 受理) 査読有
- ② K. Obara, C. Kato, et.al, Acoustic Resonance of Superfluid He3 in Parallel Plates, J. of Low Temp. Phys. **162**, 190-195 (2011) 査読有
DOI: 10.1007/s10909-010-0298-9
- ③ Y. Nago, T. Ogawa, K. Obara, et.al., Time-of-Flight Experiments of Vortex Rings Propagating from Turbulent Region of Superfluid He-4 at High Temperature, J. Low Temp. Phys. **162**, 322-328 (2011) 査読有
DOI: 10.1007/s10909-010-0277-1
- ④ K. Obara, C. Kato, et.al., Frictional motion of normal-fluid component of superfluid He-3 in aerogel, Physical Review B **82**, 054521 (2010) 査読有
DOI: 10.1103/PhysRevB.82.054521

[学会発表] (計 14 件)

- ① 液体 ^4He 中の大振幅音波 III(日本物理学会第 67 回年次大会 (関西学院大)), 2012/03/27, 木村豊, 小原 顕, 他
- ② 超流動 ^4He 中乱流から放出された渦環と乱流生成エネルギーの関係 (日本物理学会第 67 回年次大会 (関西学院大)) 2012/03/27, 西嶋陽, 小原 顕, 他
- ③ 超流動 ^4He 乱流から放出される渦環の飛行(日本物理学会第 67 回年次大会 (関西学院大)), 2012/03/27, 久保博史, 小原 顕, 他
- ④ 振動子が作る超流動 ^4He 乱流から放出

される渦環(日本物理学会第 67 回年次大会 (関西学院大)), 2012/03/27, 永合祐輔, 小原 顕, 他

- ⑤ 超流動 ^4He 乱流から放出される量子渦環と常流体との相互摩擦(日本物理学会 2011 年秋季大会 (富山大学)), 2011/09/22, 小川徹也, 小原 顕, 矢野英雄, 他
- ⑥ 超流動 ^4He 中乱流から放出される渦環の伝播(日本物理学会 2011 年秋季大会 (富山大学)), 2011/09/22, 西嶋陽, 小原 顕, 他
- ⑦ 液体 ^4He 中の大振幅音波 II (日本物理学会 2011 年秋季大会 (富山大学)), 2011/09/22, 木村豊, 小原 顕, 他
- ⑧ 平行平板内に閉じ込めた超流動 ^3He 中の第 4 音波共鳴測定 III(日本物理学会 2011 年秋季大会 (富山大学)), 2011/09/23, 加藤千秋, 小原 顕, 他
- ⑨ ドライ希釈冷凍機の開発と温度測定 (日本物理学会 2011 年秋季大会 (富山大学)), 2011/09/23, 山口晃史, 小原 顕, 他
- ⑩ Fourth sound of superfluid ^3He in aerogel, International Symposium on Qantum Fluids and Solids (QFS2010, Grenoble, France), 2010/08/02, Ken Obara (招待講演)
- ⑪ Acoustic Resonance of Superfluid He-3 in Parallel Plates, International Symposium on Qantum Fluids and Solids (QFS2010, Grenoble, France), 2010/08/02, Ken Obara
- ⑫ 液体 ^4He 中の大振幅音波, 日本物理学会第 66 回年次大会・新潟大学 (東日本大震災のため WEB 開催) 小原 顕, 他
- ⑬ Anomalous Sound Absorption of Finite Amplitude Sound in Liquid ^4He , 26th International Conference on Low Temperature Physics (Beijin, China), 2011/08/13, Y. Kimura, Ken Obara, et.al.
- ⑭ Generation and Detection of Vortex Rings in Superfluid ^4He at Very Low Temperature, 26th International Conference on Low Temperature Physics (Beijin, China), 2011/08/13, H. Yano, Ken Obara, et.al.

[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 (OBARA KEN)

大阪市立大学・大学院理学研究科・講師

研究者番号：50347481

(2) 研究分担者

該当なし

(3) 連携研究者

該当なし