

令和 6 年 6 月 20 日現在

機関番号：32201

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2020～2023

課題番号：20K03839

研究課題名（和文）固体ヘリウムを用いたトポロジカル欠陥のダイナミクスに関する実験的研究

研究課題名（英文）Experimental study on the dynamics of topological defects in solid Helium

研究代表者

高橋 大輔（Takahashi, Daisuke）

足利大学・工学部・教授

研究者番号：80415215

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,300,000円

研究成果の概要（和文）：量子固体である固体ヘリウム4は、同位体であるヘリウム3のみを不純物として含む究極の清浄固体であり、固体中のトポロジカル欠陥である転位の動的性質を明らかにする点において最良の試験体となる。本研究では、固体ヘリウム4の古典的物性量であるせん断弾性率の温度変化の要因となる転位の動的性質について、弾性率変化に繊細な応答を示す二重振り子内に充填した固体ヘリウム4の弾性変化を測定することで検証を行い、既存の転位論では説明が難しい弾性率変化を観測した。本結果は、転位運動における新奇動的性質が存在する可能性を示唆する。

研究成果の学術的意義や社会的意義

トポロジカル欠陥としての転位の動的性質は結晶・非結晶体の多くで相転移を含めマクロな物性変化の核心的駆動体となる可能性が示唆されているが、他の系においては転位以外の要因を適切に取り除くことが困難である。一方、固体ヘリウム4は素性の知れた同位体としての不純物のみを考慮することで、転位の動的性質を議論することが可能となる。本研究で明らかになった固体ヘリウム4の新奇な転位ダイナミクス存在の可能性は既存の転位論の深化へ大きく寄与すると考えられる。

研究成果の概要（英文）：Solid helium-4 contains only helium-3 isotopes as impurities, it serves as an ideal solid for investigating the dynamic properties of topological defects within the solid. This study examined the dynamic properties of dislocations, which is a typical topological defect in the solid, that contribute to the temperature dependence of the shear modulus, a classical physical quantity of solid helium-4. By measuring the elastic changes in solid helium-4 confined within a double pendulum that shows sensitive responses to elastic modulus variations, we verified observed changes in elastic modulus that are difficult to explain using existing dislocation theories. These results suggest the presence of novel dynamic properties in dislocation motion.

研究分野：低温物理学

キーワード：量子固体 転位

様式 C - 19、F - 19 - 1 (共通)

1. 研究開始当初の背景

同位体であるヘリウム 3 原子のみを不純物として含み、究極の清浄固体が生成可能である固体ヘリウム 4 は、固体内のトポロジカル欠陥である転位のダイナミクスを研究する最適な研究対象であると考えられる。固体ヘリウム 4 内の転位運動は、固体内に大きな零点振動を保持するヘリウム 3 原子 (同位体不純物) が、転位芯のもつトラップポテンシャルにより転位にピン止めされることで抑制される。このモデルは、固体ヘリウム 4 のおよそ 0.2 K 以下におけるせん断弾性率上昇を定性的に説明可能である。また、このモデルでは、転位に束縛されたヘリウム 3 原子は臨界せん断応力 (ピン止め保持力に対応) 以上の外場を加えることでピン止めが外れ、転位は運動の自由度を回復し、せん断弾性率は減少する。

一方、申請者らは、極低温・定常回転下の複合環境下における多結晶固体ヘリウム 4 のせん断弾性率測定において、上記モデルでは説明不可能な現象を観測した。まず、臨界せん断応力を固体ヘリウム 4 に印加し、転位がヘリウム 3 に対して自由になった状態を用意した。次に、臨界せん断応力の 1% の遠心力 (静的圧縮応力場) をすべり面に対して垂直方向に加えた。結果、圧縮応力は転位の弦運動に対して直交するため、ヘリウム 3 の転位へのピン止めには一切関与しないにも関わらず、数時間の緩和時間を経てせん断弾性率が上昇した。

固体ヘリウム 4 の転位運動およびそれに伴う剛性変化のメカニズムは転位論の古典動力学理論 (Granato-Lucke の理論) と量子固体特有の原子多体交換の相互作用で説明されてきた。転位論は 2016 年のノーベル賞受賞対象となった Kosterlitz-Thouless 理論のベースになったことは広く知られている。しかし、申請者らの研究から、固体中の転位 (トポロジカル欠陥) の動的性質に関しては、清浄固体内であっても未だに十分な理解がなされていないことが明らかになっていった。これを明らかにすることは、結晶中のトポロジカル欠陥の運動の本質的理解という根源的かつ核心的な問いを内包している。

2. 研究の目的

トポロジカル物理は近年、物性から宇宙論にいたるまで核心的要素として注目を集めている。転位は原子面の不連続部で生じる線状欠陥であり、代表的なトポロジカル欠陥である。一方、究極の清浄量子固体である固体ヘリウム 4 の極低温下での剛性率は、その変化の様子が転位の動的性質のみによって説明されるシンプルな物性量である。

固体ヘリウム 4 の剛性率変化の測定により、他の系では難しい複数の不純物の影響を排除した、トポロジカル欠陥の動的性質を直接的に研究することが可能となりえる。本研究では、転位運動の未知のダイナミクスについて、その存在を明らかにすることを目的として実施した。

3. 研究の方法

先行研究において、内部にねじれ振動子を内包する二重振動子 (floating core torsional oscillator : FTO) が、固体ヘリウム弾性率の直接的測定に適していることが示されていた。FTO の最大の特徴は、共鳴時において内部振動子と外部振動子の連成運動を固体ヘリウムが介在することにある。結果、固体ヘリウムの弾性変化が共鳴周波数変化に対して支配的になる。

図 1 に本実験で用いた FTO の概念図を示す。振動子は内側、外側ともに BeCu が用いられており、振動子の駆動および信号検出に用いる電極は Al を用いて作成されている。FTO の運動方程式より、共鳴周波数には 2 つの周波数モード (低周波数、および高周波数) があることが示される。超音波実験による先行実験で得られた固体ヘリウムせん断弾性率 ~ 12.5 MPa を用いて図 1 の振動子を FEM 解析したところ、低周波モードの共鳴周波数は ~ 796.222 Hz となる。

FTO の共鳴周波数測定は、図 2 に示す phase-lock-loop 回路を用いて行われた。図中、駆動電極と検出電極は振動子本体の電極と静電的に結合しており、非接触の測定が実施可能となる。振動子の共鳴周波数に対して、振動子の駆動電極に入力する交流電圧周波数を同期することで、振動子を強制振動させる。共鳴周波数は周波数カウンターを用いて検出した。測定時は常に、駆動電極へ印加する正弦電圧振幅は一定としている。振動子の振幅 (エネルギー散逸項の逆数に対応) は、検出電極により誘導交流電流として検出される。

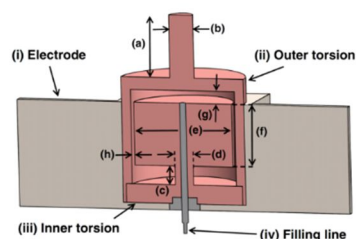


図 1: 本実験で使用したねじれ振動子の概念図。固体は (c), (h), (g) の形成する空間に生成される。

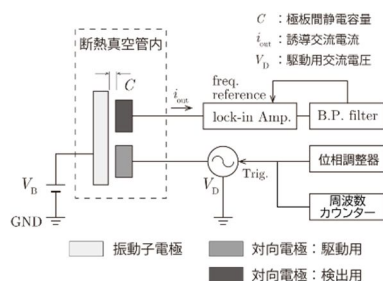


図 2: 本実験で使用した phase-lock-loop 回路のブロック図。

4. 研究成果

(1) 固体ヘリウム4充填時におけるFTO共鳴周波数の温度変化:

FTO内に充填された4MPaの多結晶固体ヘリウム4の共鳴周波数(上段)およびエネルギー散逸(下段)の温度依存性を図3に示す。図中に示す速度は、振動子内壁の接線振動速度 v_D である。本測定は全て一定駆動電圧の下で最低温度まで冷却を行った後、昇温過程で実施されている。図3に示されるとおり、固体充填前(空)のFTOの共鳴周波数変化量は固体充填時の周波数変化量に比べ十分小さい。また、固体充填時のFTO共鳴周波数は、およそ0.4K以下の温度領域で急激に増加し、およそ0.05K以下で一定となる。前述の通り、FTOの共鳴周波数変化は固体ヘリウム4の弾性率変化を反映する。共鳴周波数増加量は v_D に依存し、 $v_D < 4 \mu\text{m/s}$ において $\Delta f \sim 0.21 \text{ Hz}$ であり、 $v_D > 4 \mu\text{m/s}$ では Δf が抑制された。共鳴周波数温度変化に伴い、エネルギー散逸はピークを示し、ピーク位置はおよそ共鳴周波数変化の中間温度に位置することが確認された。

(2) FEM解析を用いたせん断弾性率変化の算出:

固体ヘリウム充填時のFTO共鳴周波数の変化について、FTO内に固体ヘリウム4を充填したモデルを用いてFEM解析を実施した。実験で得られた共鳴周波数変化 $\Delta f \sim 0.21 \text{ Hz}$ に対して、固体ヘリウム4弾性率をパラメータとしてFEM解析した結果より、およそ5MPaのせん断弾性率変化量に対応することが算出された。先行実験結果で得られた0.02Kでのせん断弾性率13MPaを用いると、およそ38%のせん断弾性率変化に対応する。

(3) 既存の固体ヘリウム内の転位ダイナミクスに関する理論との比較:

低温環境下において固体ヘリウム4内の転位は、固体中の点欠陥にピン止めされ、振動弦モデルが適用される振動運動を行っている。一方、固体ヘリウム内の同位体不純物であるヘリウム3原子(300ppm程度存在する)は、量子トンネル効果により固体ヘリウム4内をあたかも気体のように自由に動くことができる。これにより転位近傍に近づいたヘリウム3原子は転位芯のもつ引力ポテンシャルによって転位芯にトラップされることで、転位のピン止め点として作用する。転位上ヘリウム3原子の個数は降温と共に指数関数的に増加する。結果、温度の低下とともに転位のピン止め点が増加し、転位の弦運動が抑制されることで、固体弾性率は増加すると考えられている。本結果は、既存の理論と定性的に一致した温度変化を示している。また、一度トラップされたヘリウム3原子はトラップポテンシャルによる引力より大きな外力場が加わることで転位より離脱する。FTO振動子の振動速度を増加させると、固体に加わる接線応力はその速度に比例して増大することより、本結果においては、およそ $v_D > 4 \mu\text{m/s}$ で転位からのヘリウム3原子離脱のための臨界応力を超えたと考えてよい。

(4) 新奇な転位ダイナミクスの発現可能性:

図3中に示した共鳴周波数温度変化において、現在の理論では説明できない現象が確認されている。 $v_D > 40.6 \mu\text{m/s}$ の速度領域において、0.06K付近に肩を持つ点である。上述のとおり、現状の理論では、転位運動を阻害し、固体剛性率を上昇させるピン止めされたヘリウム3原子数は温度降下に対して指数関数的に連続的に変化する。この肩の原因については、量子固体内のトポロジック欠陥としての転位が持つ新奇な物性が隠されている可能性があるが、現時点でこの原因は明らかではない。この点について、今後の研究が期待される。

<引用文献>

- J. Day and J. Beamish, *Nature* **450**, 853(2007), I. Iwasa, *J. Low Temp. Phys.* **171**, 287(2013)
- J. D. Reppy, X. Mi, A. Justin, and E. J. Mueller, *J. Low Temp. Phys.* **168**, 175(2012)
- A. Haziot, Xavier Rojas, A. D. Fefferman, J. R. Beamish, and S. Balibar, *Phys. Rev. Lett.* **110**, 035301(2013)

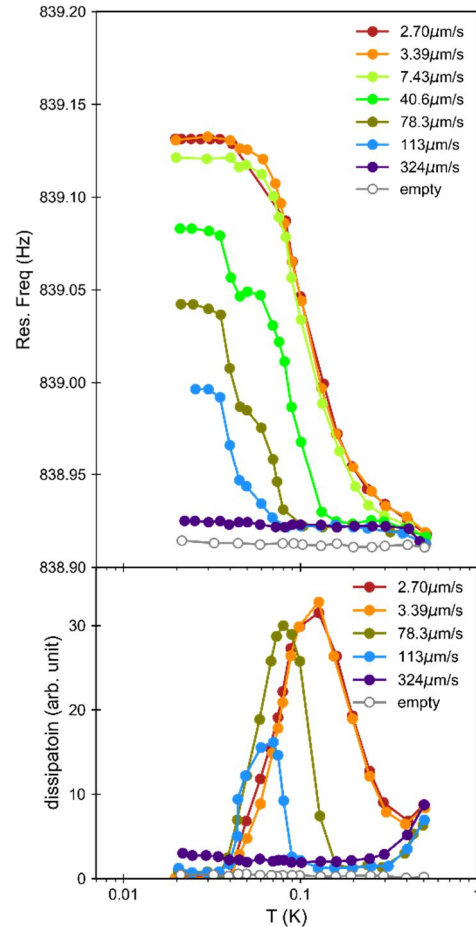


図3:(上段)固体ヘリウム共鳴周波数の温度依存性。(下段)振動子内の固体ヘリウムエネルギー散逸の温度依存性。散逸データは特徴的な変化の見られる振動速度のデータのみ掲載。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計2件（うち査読付論文 2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 Takahashi Daisuke, Ikegami Hiroki, Kono Kimitoshi	4. 巻 212
2. 論文標題 Positive Ion Critical Velocity for Nucleation of Quantized Vortices in Isotopically Pure ${}^4\text{He}$	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Journal of Low Temperature Physics	6. 最初と最後の頁 214 ~ 231
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1007/s10909-023-02970-6	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 Tsuiki Tomoya, Takahashi Daisuke, Murakawa Satoshi, Okuda Yuichi, Kono Kimitoshi, Shirahama Keiya	4. 巻 89
2. 論文標題 Study of Rotation Effect in Solid ${}^4\text{He}$ by an Elasticity-Sensitive Torsional Oscillator	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Journal of the Physical Society of Japan	6. 最初と最後の頁 094601 ~ 094601
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.7566/JPSJ.89.094601	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0件

〔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
---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------