

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 6 月 23 日現在

機関番号：32201

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2013～2015

課題番号：25800202

研究課題名(和文) 固体ヘリウム4の「超」固体性は転位を用いて全て説明出来るのか？

研究課題名(英文) Study of a Contribution of the Dislocation Kinetics to the "Super" Solid Properties of Solid Helium-4

研究代表者

高橋 大輔 (Takahashi, Daisuke)

足利工業大学・工学部・准教授

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)：本研究は「固体ヘリウム4に発現する低温物性異常が転位運動のみで理解できるか」の問題提起のもと、以下の手法で実施された。(1)転位運動による固体弾性変化がねじれ振子の共鳴周波数変化に与える影響の有限要素法を用いた定量的評価。(2)定常回転下における剪断・体積弾性率の直接測定。結果、(1)により固体弾性変化がねじれ振子の周波数変化を定量的に説明することが明らかになった。しかし、(2)より回転下の弾性率にねじれ振子実験で観測された回転数依存性を持つ固体ヘリウム4物性量の“量子化”は観測されなかった。本研究により、転位運動は固体ヘリウム物性異常のすべてを説明しないことが明らかになった。

研究成果の概要(英文)：This study is motivated by the understanding of the origin of the anomaly of physical properties of solid 4He below 200 mK, which is fully explained by whether dislocation kinetics or not. In order to elucidate the contribution of the dislocation kinetics, we employed two methods: (i) the finite element method (FEM) analysis, (ii) direct observation of the elastic moduli under DC rotation in which a property of solid 4He shows a quantization behavior. FEM analysis clearly shows the change in stiffness induced by dislocation kinetics plays an important role to understanding the previous experiment reported by other groups. The elastic moduli measurements under DC rotation, however, shows that the elastic moduli are not affected by DC rotation. In conclusion, the dislocation kinetics does not fully explain the anomaly of Solid 4He at low temperature.

研究分野：低温物理学

キーワード：固体ヘリウム 量子固体 低温物性実験 弾性・転位 巨視的量子現象 有限要素法解析

1. 研究開始当初の背景

(1) 最も質量が軽い希ガス元素であるヘリウム ( $^4\text{He}$ ) は、強い量子性を反映した大きな零点振動振幅を持つ。結果、絶対零度においても固相形成には 25 気圧以上の圧力を必要とする。固体ヘリウム内では零点振動によって、隣接格子原子間の位置交換が誘発される。半世紀以上前より、 $^4\text{He}$  原子もしくは結晶内の点状格子欠陥の連続的位置交換が巨視的量子現象として発現する「超」固体状態の存在可能性が示唆されていた。「超」固体状態は固体でありながら並進対称性が自発的に破れた状態(かつゲージ対称性も破れている)である。これは固体ヘリウムが固体内でありながら流体的自由度を内包するという二律背反の状態をもつことを意味する。

(2) 2010-11 年、申請者らは固体  $^4\text{He}$  を充填したねじれ振子(図 1 に概念図を示す)の共鳴周波数(共鳴周波数の自乗は固体の慣性モーメントに比例、振子の剛性率に逆比例する)を定常回転下で測定し、200mK 以下の温度域において共鳴周波数が回転数に対し「離散的に変化」する様子を観測した。この共鳴周波数変化の起源が固体の慣性モーメント変化に依るとすれば、慣性モーメントは角運動量に比例することから、「離散的変化」は固体内部に発現した「流れ場」の角運動量が離散的に変化したことを示唆すると考えられる。これは、液体ヘリウム超流動状態とのアナロジーより、固体  $^4\text{He}$  内に量子循環(渦)が形成されたこと示唆すると考えられた。上記結果は  $^4\text{He}$  固相に「超」固体状態が存在する証左の 1 つとして以下の通り発表された(Science **330**, 1512(2010), PRL **108**, 105302(2011))。

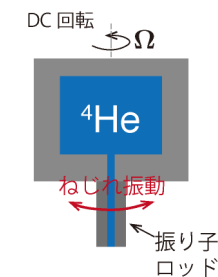


図 1: ねじれ振子概念図

(3) 一方、2007 年に Day, Beamish によって、固体  $^4\text{He}$  の古典的物性量である剪断弾性率が 200mK 以下で上昇し、固体が「硬くなる」様子が実験的に示されていた。この変化は結晶内の転位(線状結晶欠陥)が同位体不純物である  $^3\text{He}$  原子にピン留めされ、自由度を失うことによって生じると解釈されている。ねじれ振子の共鳴周波数は振子のみならず、内包試料の弾性にも依存する。これにより、(2) で示した結果に対し、外的擾乱による転位運動の励起に伴った固体のソフト化を反映している可能性が示唆された。また、本研究提案準備期に、ナノ多孔体中に固体  $^4\text{He}$  を生成し、転位運動を抑制した系において、過去のねじれ振子実験で得られた慣性モーメント由来と考えられる周波数変化が観測されないことが示された。これは、「超」固体による現象と考えられてきた実験結果が転位運

動に起因する振子内固体の剛性変化で解釈される可能性を強く支持する。一方、「超」固体性による物性量の量子化を想起させる回転実験で得られた「離散的変化」は固体弾性変化では説明されていない。

2. 研究の目的

本研究は 2004 年に Kim, Chan によりねじれ振子法により観測され、申請者らによりその存在を支持された固体  $^4\text{He}$  の「超」固体性が、回転実験における「物性量」の「離散的変化」も含め、結晶内転位のダイナミクスですべて説明できるか否かを明らかにするために実施された。当初予定された研究目標は以下のとおりである。

(1) 転位ピン留に伴う固体弾性率変化がねじれ振子共鳴周波数変化に与える影響の定量的評価。

(2) 固体内の転位が直截的に影響を与える弾性率の多重極限環境下(固体厚さ・定常回転・同位体不純物濃度などの制御による)における変化の実験的検証による、1-(2)で示した結果に対する転位自由度の寄与の評価。

3. 研究の方法

(1) 有限要素法(FEM)解析による固体弾性率変化に伴うねじれ振子の共鳴周波数解析と振子内部固体の動的応答の可視化

電気的に中性である固体  $^4\text{He}$  は物性量測定手法が限られているうえ、実験時に不可欠な寒材である液体ヘリウム高騰により、実験遂行前の解析的アプローチが重要性を増している。本研究では、近年、主に海外のグループが固体  $^4\text{He}$  物性研究に積極的に取り入れている FEM 解析を本邦で初めて導入し、転位による固体弾性率の変化がねじれ振子共鳴周波数に及ぼす影響を定量的に評価した。FEM 解析で用いたモデルは以下とおりである。

ロッド内のみ固体を充填したねじれ振子の共鳴周波数変化

前述のとおり、ねじれ振子の共鳴周波数は振子の剛性率に依存する。振子の剛性率は主に振子ロッド部の剛性によって決定される。よって、ロッド部のみ固体を充填したモデルを用いることで、「固体の弾性率変化に伴うロッドの剛性変化」がもたらす共鳴周波数変化を評価できる。

円筒型固体を内包したねじれ振子の共鳴周波数における固体振動状態の可視化

他グループにより、ねじれ振子共鳴周波数下において、固体の振動振幅は振子の振動振幅に対し「オーバーシュート」する可能性が指摘された。円筒状固体を充填した振子モデルを用い FEM 解析を用うことで上記の可視化を試みた。

(2) 定常回転下における固体  $^4\text{He}$  の剪断弾性

### 率および体積弾性率の実験的観測

当初目標として掲げた多重極限環境における実験より、定常回転下における弾性率測定を実施した。回転下における固体  $^4\text{He}$  への実験的研究は所属機関での実施が困難であったため、河野公俊（理研）、白濱圭也、立木智也（慶應大・理工）の協力のもと、理化学研究所設置の回転希釈冷凍機を使用して実施した。当該冷凍機は申請者らによる過去の回転実験で使用された冷凍機である。

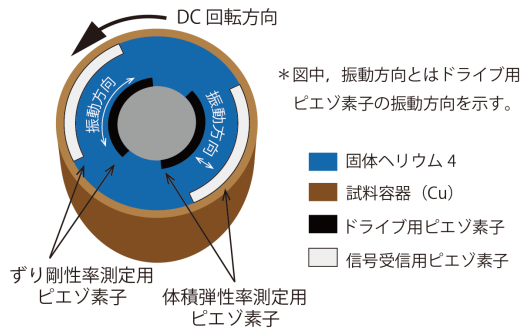


図 2：弾性率測定用セルの概念図

図 2 に実験セルの模式図を示す。試料容器内に生成された円環状固体  $^4\text{He}$  は 2 組の圧電素子 (PZT) を用い動径および円周方向に駆動される。各 PZT は試料容器内側がドライブ用、外側が固体応答の測定用となっている。ドライブ用 PZT に周波数固定の交流電圧を入力し、ひずみを固体に与える。ひずみにより固体に応力が生じ、受信用 PZT を変形させる。PZT の変形は圧電効果により交流電流信号に変換される。交流電流信号は固体のずれ剛性率に比例し、これを測定する。

### 4. 研究成果

#### (1) FEM を用いた固体弾性率変化の評価

ロッド内のみ固体を充填したねじれ振子の共鳴周波数変化

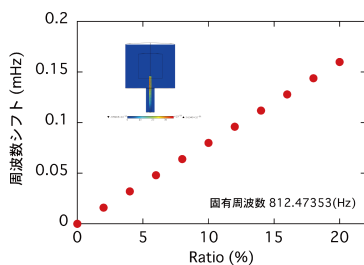


図 3：FEM によるロッド内固体の剪断弾性率変化に伴うねじれ振子共鳴周波数シフト。振子の固有周波数、および 20% 剪断弾性率が上昇した時の振動振幅をそれぞれ図中に示した。

有限要素法 (COMSOL Multiphysics を使用) により評価された「ロッド内のみ固体  $^4\text{He}$  を生成したねじれ振子」の固体弾性率に対する共鳴周波数を図 3 に示す。横軸にロッド内固体  $^4\text{He}$  剪断弾性率の増加率 (Ratio), 縦軸は 20mK における振子の共鳴周波数シフト量を示している。図 3 に示す通り、本研究によって、ロッド内の固体弾性率増加に伴う振子の共鳴周波数変化量を FEM 解析によ

て定量的に評価することが可能になった。計算に際し、固体部分のメッシュサイズは固体直径の 1/10 ~ 1/1000 程度に設定し、メッシュサイズ依存性も検討した。弾性体理論を用いた円筒形固体に対する理論解析では、上記変化を定量的に評価することはできない。本計算機実験によって本系における FEM 計算の重要性が明らかになった。また、本成果は青木らにより実験で検証・確認され当該結果と合わせ、紙上発表された (JLTP, 86, 08604(2014))

円筒型固体  $^4\text{He}$  を内包したねじれ振子の共鳴周波数における固体振動状態の可視化

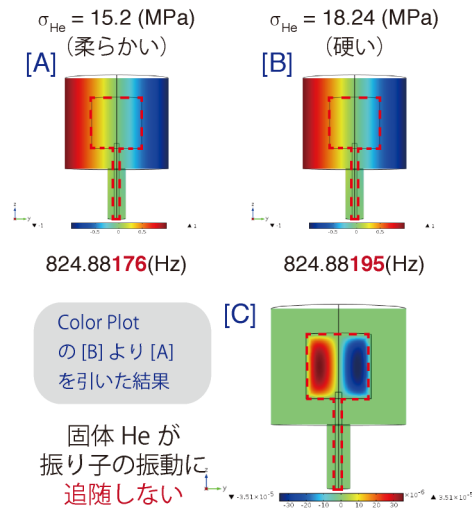


図 4：FEM による固体振動振幅の可視化  
図中、赤破線部に固体を充填した

図 4 に FEM 計算により得られた「共鳴周波数におけるねじれ振子断面の振動振幅」をカラープロットした結果を示す。図 4[B] は図 4[A] に対し固体の剪断弾性率が 20 %大きい。図 4[C] は図 4[B] と図 4[A] の差分を示している。緑は振幅 0, 赤と青では振動が逆位相で生じていることを示す。本研究により、振子内固体の弾性率変化は振子本体の振動振幅を変化させないが、固体の振動振幅を増加させることが示された。これは、理想的なねじれ振子 (振子本体の金属が十分硬い金属で構成されている場合) において、固体が振子の振動に追従せず「オーバーシュート」していることを示唆し、Beamish et. al. (2012) らが指摘した振子内固体  $^4\text{He}$  の挙動に対する推論を裏付ける結果となりうる。

これら一連の FEM 解析により、転位の不純物ピン留に伴う固体弾性率変化は静止下におけるねじれ振子実験で得られた周波数変化を充分再現し得ることが確認された。

#### (2) 定常回転下における固体 $^4\text{He}$ の剪断弾性率および体積弾性率の実験的観測

固体弾性率の定常回転に対する応答を明らかにするため、以下の実験を実施した。

一定回転数、一定歪みのもとでの温度変化

一定温度，一定歪みのもとでの回転数掃引本稿ではの実験結果を示す。

図5は20mKにおける固体弾性率の定常回転数依存性である。上段および下段左軸は固体充填時のバックグラウンドも含めた剪断弾性率，体積弾性率の測定結果である。各々測定時に印加した歪みは  $6.97 \times 10^{-9}$  (剪断方向)， $7.60 \times 10^{-9}$  (圧縮方向)である。各結果について固体非充填時のデータ(バックグラウンド)を右軸に示した。本研究により，回転数に対する信号変化は，いずれの弾性率測定結果も固体非充填時と同程度の変化であり，かつ固体充填時のデータに明確な量子化が観測されないことが示された。この結果は転位の自由度が定常回転印加によって影響を受けないことを強く示唆する。

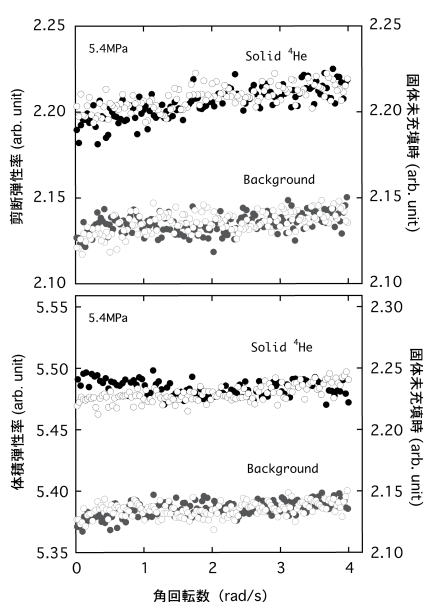


図5：回転下における固体<sup>4</sup>He弾性率測定結果  
白抜きは減速時，塗りつぶしは加速時のデータ

一般に固体の弾性変化は転位のダイナミクスに強く依存する。固体ヘリウムの場合には前述のとおり，転位が同位体不純物にピン留めされ自由度を喪失することで弾性率の変化が生じることが理論的に示されている。転位の同位体不純物に対するピン留めは転位におよそ  $10^{-14}$  N の外力(臨界ピン留め力： $F_c$ )に相当する応力が加わることで外れる。結果，転位は自由度を回復し，固体はソフト化する。定常回転を試料に印加することで固体に加わる力は遠心力，機械振動が誘起するコリオリ力である。本研究で印加した回転数の範囲内では，これらは高々  $10^{-16}$  N 程度であり， $F_c$ より十分小さい。よって，回転によって固体に生じる応力は上記ピン留めを外すに至らない。以上のとおり，本研究結果は定量的に古典的転位ピン止めの描像で理解できる。

### (3) まとめと展望

本研究により固体<sup>4</sup>Heの弾性変化がこれまで実施されたねじれ振子法を持ちいた「超」固体観測において与える影響を定性的・定量的に評価した。得られた主たる結論は以下のとおりである。

固体弾性率の変化は振子内部における固体のオーバーシュートを誘起し，かつ有限の周波数変化をもたらす。この結果より，固体弾性率変化が多くのねじれ振子実験を再現することが示された。

転位運動に起因する固体弾性率変化は現在印加しうる定常回転数において影響を受けない。回転下での結果は古典転位論の拡張である dislocation-vibration モデルで理解される。

本研究結果は2004年より続く「超」固体状態の存在・非存在論争に対し，現在観測されている現象が転位のダイナミクスのみで説明できる可能性を明確に否定する。 本研究成果を受け，より本質的な，新奇量子相としての「超」固体の発現メカニズム解明が進むと期待される。

### 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 1 件)

Y. Aoki, I. Iwasa, T. Murata, D. Takahashi, A. Yamaguchi, S. Murakawa, and Y. Okuda : Resonant Frequency Change of Torsional Oscillator Induced by Solid <sup>4</sup>He in Torsion Rod, Journal of Physical Society of Japan, Vol. 86, pp.084604-084609 (2014), 査読有, DOI : 10.7566/JPSJ.83.084604

〔学会発表〕(計 13 件)

白濱圭也，高橋大輔：量子相転移近傍の<sup>4</sup>He 薄膜における弾性率異常，日本物理学会，2016年3月22日，東北学院大学(仙台市)

K. Shirahama, D. Takahashi, T. Kogure, H. Yoshimura, and R. Higashino : Anomalous Elasticity of <sup>4</sup>He Films at the Quantum Phase Transition, The American Physics Society March Meeting 2016, 2016年3月17日，Baltimore(USA)

滝沢亮人，檜枝光憲，立木智也，白濱圭也，高橋大輔，松下琢，和田信夫，河野公俊：QCMを用いたDC回転下2次元<sup>4</sup>He超流動転移の研究，日本物理学会，2015年9月19日，大阪市立大学(大阪市)

立木智也，高橋大輔，村川智，河野公俊，白濱圭也，固体ヘリウム4のDC回転下弾性率測定，日本物理学会，2015年9月17日，大阪市立大学(大阪市)

T. Tsuiki, D. Takahashi, S. Murakawa, K. Kono, and K. Shirahama : The

elasticity measurement of solid  $^4\text{He}$  under DC rotation, International Symposium on Quantum Fluids and Solids, 2015年8月10日, Niagara Falls(USA)  
立木智也, 高橋大輔, 河野公俊, 白濱圭也: ねじれ振り子を用いた DC 回転下固体ヘリウムの研究, 日本物理学会, 2014年9月10日, 中部大学(春日井市)  
白濱圭也, 高橋大輔, 小暮隆行, 東野羅磨, 吉村仁美: ナノ多孔体中吸着ヘリウム薄膜の異常硬化現象, 日本物理学会, 2014年9月10日, 中部大学(春日井市)  
T. Tsuiki, D. Takahashi, K. Kono, and K. Shirahama: DC Rotation Effect on Solid Helium Four Confined in Porous Vycor glass, 27th International Conference on Low Temperature Physics, 2014年8月11日, Buenos Aires(Argentina)  
K. Shirahama, T. Kogure, R. Higashino, H. Yoshimura, D. Takahashi: Anomalous Stiffening of  $^4\text{He}$  Films Adsorbed on Nanoporous Glasses, 27th International Conference on Low Temperature Physics, 2014年8月9日, Buenos Aires(Argentina)  
立木智也, 高橋大輔, 村川智, 河野公俊, 白濱圭也: DC 回転印加に対する多孔質中固体ヘリウムの応答, 日本物理学会, 2014年3月30日, 東海大学(平塚市)  
高橋大輔, 立木智也, 村川智, 河野公俊, 白濱圭也: 制限空間内に生成した固体ヘリウム4のDC回転応答, スーパーマターが拓く新量子現象, 2014年4月19日, 東京大学物性研究所(柏市)  
白濱圭也, 小暮隆行, 吉村仁美, 東野羅磨, 高橋大輔: ナノ多孔体中吸着ヘリウム薄膜の異常硬化現象, スーパーマターが拓く新量子現象, 2014年4月17日, 東京大学物性研究所(柏市)  
D. Takahashi: Quest for Supersolid State in  $^4\text{He}$ , 8th Japan France Frontiers of Science Symposium, 2014年1月25日, Meth(France)

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

高橋 大輔 (TAKAHASHI DAISUKE)  
足利工業大学・工学部・准教授  
研究者番号: 80415215