

## 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 25 年 6 月 11 日現在

機関番号：10103

研究種目：若手研究（B）

研究期間：2009～2012

課題番号：21740264

研究課題名（和文）2次元ヘリウム4固体における零点空格子とその超流動状態

 研究課題名（英文）Superfluidity of zero-point vacancies  
in two-dimensional solid helium-4

研究代表者

柴山 義行 (SHIBAYAMA YOSHIYUKI)

室蘭工業大学・工学研究科・准教授

研究者番号：20327688

研究成果の概要（和文）：

グラファイト表面に形成された2次元<sup>4</sup>He整合固体相に現れる特異な超流動的振る舞いと、量子固体中に存在する零点空格子との相関を調べるため、ねじれ振り子法によりグラファイト表面上の<sup>4</sup>He薄膜の非古典的回転慣性を測定し、その面密度依存性、臨界速度を測定した。2次元<sup>4</sup>Heの相図を作成し、非古典的回転慣性は整合固体相近傍にのみ現れることを明らかにした。

研究成果の概要（英文）：

In order to investigate the novel superfluidity of the two-dimensional (2D) registered phase of <sup>4</sup>He on graphite and zero-point vacancies in bosonic quantum crystals, areal density dependence and critical velocity of non-classical rotational inertia (NCRI) in <sup>4</sup>He films adsorbed on Grafoil were performed by a torsional oscillator method. I obtained the phase diagram of 2D <sup>4</sup>He and discovered a finite NCRI appeared in only vicinity of the registered phase.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2009年度	1,500,000	450,000	1,950,000
2010年度	700,000	210,000	910,000
2011年度	700,000	210,000	910,000
2012年度	500,000	150,000	650,000
年度			
総計	3,400,000	1,020,000	4,420,000

研究分野：数物系科学

科研費の分科・細目：物理学・物性II

キーワード：超低温・量子凝縮系，超流動

## 1. 研究開始当初の背景

ヘリウム(He)は質量が軽く分子間の相互作用が小さいため低温において非常に強い量子性を示す。その端的な現象は液体Heの超流動転移である。超流動は本質的には超伝導と同じ巨視的量子現象の1つで、Bose粒子である<sup>4</sup>Heは飽和蒸気圧下約2.17Kで超流動転移を起こす。この強い量子性のためHeは

0Kにおいても液相の存在する唯一の物質であり、<sup>4</sup>Heでは約25気圧の圧力を印加することで初めて固化をおこす。固体Heも液体同様強い量子性を示し、量子固体と呼ばれる。He原子の質量が軽いため零点振動が大きく、その大きさは格子定数と同程度にもなる。そのため固体Heでは固体であるにも関わらずHe原子間の粒子交換が頻繁に起こることが

知られている. この粒子交換は例えば固体  $^3\text{He}$  の核磁性に対し重要な役割 (Multi Spin Exchange) を担っている.

1969年 Andreev と Lifshitz<sup>[1]</sup> は固体 He においてその強い量子効果, 特にその大きな零点振動のため, 古典的な結晶では存在し得ない特異な空格子, 零点空格子 (zero-point vacancy) が存在し, 結晶中で Bloch 状態を形成している可能性を理論的に指摘した. さらに固体  $^4\text{He}$  における零点空格子は Bose 粒子であることから, 低温でこの零点空格子が Bose-Einstein 凝縮をおこし, 固体でありながら超流動状態を示す可能性も指摘し, これを超固体 (supersolid) と名づけた. それ以後固体の超流動に関し理論面から様々な報告がなされてきたが, 実験的にこれを確認した報告はこれまでなかった.

しかし 2004年, Kim と Chan はねじれ振り子法と呼ばれる測定手段により, 固体  $^4\text{He}$  における固体の超流動状態を強く示唆する実験結果を報告した<sup>[2]</sup>. 申請者の属するグループはこの報告にいち早く注目し, Kim と Chan の結果の追試に最初に成功した<sup>[3]</sup>. しかしながら, 我々のグループを含む複数のグループの詳細な研究の結果, Kim と Chan により見出されたバルクの固体  $^4\text{He}$  における固体の超流動的な挙動の起源は, 初めに Andreev と Lifshitz に予言されたような零点空格子の Bose-Einstein 凝縮に起因するという量子固体の内因的なものではなく, 格子欠陥や転位の運動など, 固体  $^4\text{He}$  の結晶の質に起因する外因的なものであるという見方が強くなっている.

一方近年福山らのグループは, 2次元基盤であるグラファイト表面を  $^4\text{He}$  で1層コートし, さらにその上に構築された2次元  $^3\text{He}$  システムにおいて, 面密度 5.5-6.85 atoms/nm<sup>2</sup> の領域で特異な Fermi 流体相が現れることを熱容量の測定から見出した<sup>[4]</sup>. この特異な量子相が出現するのは, 下地基盤と整合した2次元  $^3\text{He}$  固体 (4/7 相) の現れる面密度 (6.85 atoms/nm<sup>2</sup>) の直下であり, 福山らはこれが2次元  $^3\text{He}$  4/7 整合相にドーピングされた零点空格子の量子ホッピングによることを明らかにした. これは量子固体中に実験的に零点空格子を構築した最初の研究であり, 同様の系を  $^4\text{He}$  で構築すれば2次元  $^4\text{He}$  固体中に, 面内を自由に運動する零点空格子を構築できることを強く示唆している. さらに, 固体  $^4\text{He}$  中の零点空格子は Bose 粒子であり, 低温において零点空格子の超流動状態が実現されると期待される.

また実は, グラファイト表面上に形成された  $^4\text{He}$  薄膜において, 2次元  $^4\text{He}$  固体における零点空格子の超流動状態と思われる特異な超流動の報告が Crowell と Reppy<sup>[5]</sup> により既になされている. 彼らの論文ではその特異な

超流動の起源は明らかにされていないが, 『(1) 特異な超流動の現れる面密度が, 2次元  $^3\text{He}$  システムで零点空格子の現れる領域とほぼ等しく』, 『(2) 薄膜液体で観測される Kosterlitz-Thouless 転移 (KT 転移) とは質的に異なる振る舞い』であることから, 彼らの観測した  $^4\text{He}$  薄膜における特異な超流動は, 2次元  $^4\text{He}$  固体中の零点空格子の超流動であった可能性が非常に高い.

研究代表者は, 上に述べたここ数年の量子固体  $^4\text{He}$  における固体の超流動的挙動の発見, 同じく量子固体である2次元  $^3\text{He}$  薄膜における, 零点空格子を作る特異な量子相の発見に着目し, 2007年度から新たに, 2次元  $^4\text{He}$  固体における零点空格子が担う固体の超流動の, ねじれ振り子法による研究を開始した. 本研究開始前の1年の研究において, 『(1)  $^4\text{He}$  面密度 6.7 atoms/nm<sup>2</sup> において Crowell と Reppy に観測された特異な超流動状態の再現性を確認』し, 『(2) この特異な超流動状態が数 100  $\mu\text{m/s}$  程度の臨界速度を持つ』ことを明らかにしてきた.<sup>[7]</sup> この特異な超流動の起源を2次元  $^4\text{He}$  固体における零点空格子の超流動によるものと仮定すると, 測定から見積られる超流動密度及び  $^4\text{He}$  面密度の大きさから, 2次元  $^4\text{He}$  固体中に作り出された零点空格子が2次元面内に完全に非局在化していると考えられ, 大変興味深い系が構築されていることを明らかにしてきた.

- [1] F. Andreev and I. M. Lifshitz, *Sov. Phys. JETP*, **29**, 1107 (1969).
- [2] E. Kim and M. H. W. Chan, *Nature*, 427, 225 (2004); *Science*, **305**, 1941 (2004).
- [3] M. Kondo, S. Takada, Y. Shibayama, and K. Shirahama, *J. Low Temp. Phys.*, **148**, 695 (2007).
- [4] Y. Matsumoto, D. Tsuji, S. Murakawa, H. Akisato, H. Kambara, and H. Fukuyama, *J. Low Temp. Phys.*, **138**, 271 (2005).
- [5] P. A. Crowell and J. D. Reppy, *Phys. Rev. B*, **53**, 2701 (1996).
- [6] Y. Shibayama, H. Fukuyama, and K. Shirahama,
- [7] Y. Shibayama, H. Fukuyama, and K. Shirahama, *J. Phys. : Conf. Ser.*, **150**, 3, 032096 (4 pages) (2009).

## 2. 研究の目的

本研究ではこれまでの研究成果をさらに発展させ, 2次元  $^4\text{He}$  固体における零点空格子の物理を調べることを目的とした. この目的を達成するために特に2つの観点, 『(1) 量子固体における零点空格子の生成機構』, 『(2) 2次元  $^4\text{He}$  固体における零点空格子の超流動状態』について明らかにする. 既にこ

れまでの研究で、面密度  $6.7 \text{ atoms/nm}^2$  において零点空格子の超流動に起因すると考えられる超流動のレスポンスを観測したが、そもそもどのような条件で零点空格子が2次元  $^4\text{He}$  中に生成するのか、全く明らかになっていない。本研究において構築する2次元  $^4\text{He}$  薄膜の相図を作成することで零点空格子の生成機構を明らかにする。又、その零点空格子の存在する面密度領域において超流動密度の温度変化や臨界速度を測定し、零点空格子の超流動状態について知見を得る。

### 3. 研究の方法

理想的な2次元基盤であるグラファイト上に低温で一定量の  $^4\text{He}$  を吸着させ、様々な面密度の  $^4\text{He}$  薄膜を作成する。この2次元  $^4\text{He}$  薄膜における超流動成分の測定を希釈冷凍機を用いて約  $10 \text{ mK}$  の超低温領域まで行う。超流動成分の測定にはねじれ振り子法と呼ばれる測定手段を用いる。ねじれ振り子法による測定から、 $^4\text{He}$  薄膜における『超流動転移の有無』、『超流動密度の温度依存性』、『超流動転移温度・超流動密度の、 $^4\text{He}$  面密度依存性』、『超流動成分の臨界速度』を測定し、グラファイト基盤上に形成された2次元  $^4\text{He}$  薄膜の相図を作成する。この様にして得られた2次元  $^4\text{He}$  薄膜の相図より『零点空格子の生成機構』、『零点空格子の動的性質』、『零点空格子の超流動状態』を調べ、零点空格子の量子状態を明らかにする。

グラファイト基盤としてグラファイトの一種であるグラフォイルを用いる。グラフォイルは比表面積が  $20 \text{ m}^2/\text{g}$  と比較的大きく、これまで  $\text{He}$  薄膜の研究に多く用いられてきた物質である。グラファイト表面上に形成された  $^4\text{He}$  薄膜に対する超低温領域の物性測定手段として、ねじれ振り子法による非古典的慣性モーメントの測定を用いる。この手法は2004年、KimとChanにより初めて固体の超流動的挙動が報告された時に用いられた実験手段である。図1にねじれ振り子の全体図を示す。ねじれ振り子法では、試料(グラファイト基盤、及びその表面に形成された  $^4\text{He}$  薄膜)の入ったサンプルセルをベリリウム銅(BeCu)やコインシルバー(Ag900)などで作ら

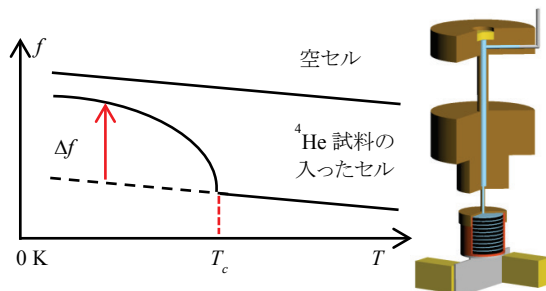


図1. ねじれ振り子の全体図と、固有振動数の温度変化。

れた細く硬い金属ロッドの先に吊り下げ、その金属ロッドのねじれ弾性定数  $\kappa$  とサンプルセルの慣性モーメント  $I$  とで決まる固有振動数  $f = (2\pi)^{-1} \sqrt{\kappa/I}$  でサンプルセルをねじれ振動(数  $100 \text{ Hz}$  から数  $1000 \text{ Hz}$  程度)させる。サンプルセル内の  $^4\text{He}$  が超流動状態になると超流動成分はセルの慣性モーメントに寄与しなくなる。これを非古典的慣性モーメントと呼ぶ。この非古典的慣性モーメントのためねじれ振り子の固有振動数は上昇する。この固有振動数のシフト量  $\Delta f$  はサンプルセル中の超流動密度に比例することから、固有振動数の温度変化  $f(T)$  を測定することにより、 $^4\text{He}$  薄膜における超流動転移の有無、超流動転移点の  $^4\text{He}$  面密度依存性、超流動密度の温度変化や面密度依存性を決定することができる。また、熱容量の測定とは異なり、ねじれ振り子法は動的な測定である。ねじれ振動の振幅を変化させることで超流動成分の臨界速度を測定することもできる。

### 4. 研究成果

(1) グラファイト表面の2次元  $^4\text{He}$  に現れる非古典的回転慣性とその面密度依存性

まず、グラファイト表面に形成された2次元  $^4\text{He}$  薄膜の非古典的回転慣性の測定を一定の振動速度 ( $100 \mu\text{m/s}$ ) の下で行い、その面密度依存性を調べた。図2に、各面密度の試料に対するねじれ振り子の共振周波数の温度変化  $f(T)$  を示す。実線は  $^4\text{He}$  薄膜を形成する前(空セル)の共振周波数である。各面密度の試料の共振周波数は、高温部が空セルの共振周波数と重なるように縦軸を平行移動して示してある。面密度  $n_{\text{He}} = 18.06 \text{ atoms/nm}^2$  までは最低温度  $10 \text{ mK}$  まで有限の周波数シフトは観測されない。これは  $^4\text{He}$  が基盤と強く吸着し inert layer を形成するためである。  $18.19 \text{ atoms/nm}^2$  の試料において初めて、有限の周波数シフトが  $200 \text{ mK}$  以下で観測されるようになる。試料の面密度の増加に伴いこの周波数シフトは増加してゆくが、  $18.67 \text{ atoms/nm}^2$  で極大をとった後、減少に転じ、面密度  $19 \text{ atoms/nm}^2$  付近では、周波数シフトはほとんど観測されなくなる。さらに試料の面密度を増やすと再び周波数シフトは

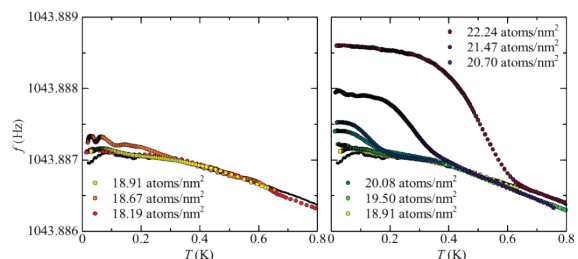


図2 各面密度の試料に対するねじれ振り子の共振周波数の温度変化  $f(T)$ 。

増加する。

この周波数シフトの面密度依存性を図3に示す。横軸は試料の面密度  $n_{\text{He}}$  であり、縦軸は10 mKにおける周波数シフト  $\Delta f_{10\text{mK}}$  である。18~19 atoms/nm<sup>2</sup>と19 atoms/nm<sup>2</sup>以上の2つの面密度領域で有限の周波数シフトが現れるのが判る。この、面密度に対するリエントラントな周波数シフトの振る舞いは1996年にCrowellとReppyが報告した振る舞い<sup>[1]</sup>と定性的に一致する。彼らによると、高密度側の周波数シフトの起源は3層目の超流動薄膜によるものであるが、一方低密度側の周波数シフトの起源は明らかにされていない。この2つの密度領域における周波数シフトの起源を調べるため、次に周波数シフトのねじれ振子振動速度  $v_{\text{osc}}$  依存性を調べた。

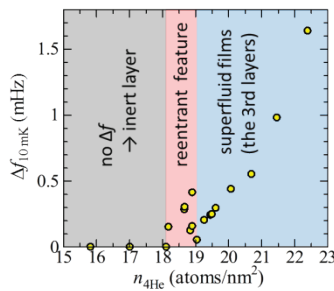


図3. 一定の振動速度 100 μm/s における 10 mK での周波数シフトの面密度依存性。

[1] P. A. Crowell and J. D. Reppy, *Phys. Rev. B*, **53**, 2701 (1996).

(2) グラファイト表面の2次元<sup>4</sup>Heに現れる非古典的回転慣性の振動速度依存性とヒステリシス現象

(1)に述べたように、周波数シフトは面密度に対しリエントラントな振る舞いを示す。この挙動はCrowellとReppyによる報告<sup>[1]</sup>と一致する。この2つの密度領域における周波数シフトの起源を調べるため、周波数シフトのねじれ振子振動速度  $v_{\text{osc}}$  依存性を調べた。図4に2つ面密度、18.68 atoms/nm<sup>2</sup>と21.47 atoms/nm<sup>2</sup>の試料の、各  $v_{\text{osc}}$  における周波数シフトの温度依存性を示す。3層目の超流動薄膜による周波数シフト観測される21.47 atoms/nm<sup>2</sup>の試料では、周波数シフトは振動速度には依存しない。一方18.68 atoms/nm<sup>2</sup>の試料では振動速度の増加に伴い周波数シフトの大きさが減少することが判る。このことは密度領域18~19 atoms/nm<sup>2</sup>に現れる周波数シフトの起源が超流動薄膜によるものとは異なることを示している。

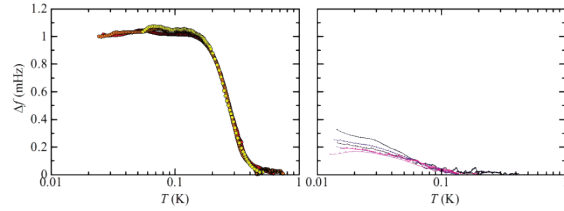


図4. 18.68 atoms/nm<sup>2</sup>と21.47 atoms/nm<sup>2</sup>の2つの試料における周波数シフトの振動速度依存性。

グラファイト表面の2次元<sup>3</sup>He薄膜では、面密度18.85 atoms/nm<sup>2</sup>で4/7相と呼ばれる整合固体相出現することが知られており<sup>[2]</sup>、同じグループによる熱容量の測定から、<sup>4</sup>Heの場合でも同様な固体相が出現することが示唆されている。従って面密度18~19 atoms/nm<sup>2</sup>に現れる周波数シフトの起源もこの2次元固体相によるものと考えられる。2次元量子固体において周波数シフトの起源として考えられるのは、(1)吸着薄膜のスリップ現象、(2)KimとChanにより報告された固体の超流動現象、の2つが考えられる。一般に、吸着薄膜のスリップ現象では基盤の速度が速くなるほどスリップする割合が多くなり、その結果周波数シフトが大きくなる。しかし本研究では振動速度が大きいほど周波数シフトが小さくなるので、この周波数シフトの起源は吸着薄膜のスリップによるものではないことがわかる。一方固体の超流動現象では、ある臨界速度以上になると周波数シフトが減少することが報告されている。今回観測された挙動はこれと良く一致することから、今回18~19 atoms/nm<sup>2</sup>に観測された周波数シフトの起源が固体の超流動現象と同じ起源であることを示唆する。

図5に、図4に示した18.68 atoms/nm<sup>2</sup>の試料の、15 mKにおける周波数シフト  $\Delta f$  の振動速度  $v_{\text{osc}}$  依存性を示す。  $v_{\text{osc}}$  の小さな領域では、 $\Delta f$  は明瞭な  $v_{\text{osc}}$  依存性を示さないが、500 μm/s程度以上から  $v_{\text{osc}}$  の増加に伴う  $\Delta f$  の減少が観測される。この  $v_{\text{osc}}$  の増加に伴う  $\Delta f$  の減少は、バルク固体<sup>4</sup>Heにおける固体の超流動での振る舞いと定性的に一致する。ただし、バルク固体<sup>4</sup>Heの場合数100 μm/s以上で周波数シフトが消失するのに対し、本研究対象のグラファイト表面上の2次元<sup>4</sup>He

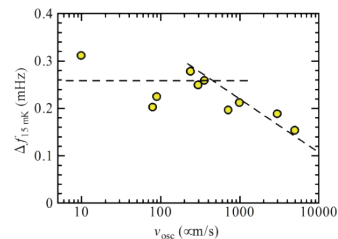


図5. 面密度18.68 atoms/nm<sup>2</sup>の試料の15 mKにおける周波数シフトの、振動速度依存性。

では5000  $\mu\text{m/s}$ と非常に速い $v_{\text{osc}}$ でも有限の $\Delta f$ が観測されることがわかった. このことはバルク固体 $^4\text{He}$ と2次元 $^4\text{He}$ 固体とに現れる周波数シフトに質的な違いが存在することを意味する.

この違いを調べるために, 研究対象であるグラファイト表面上の2次元 $^4\text{He}$ に現れる周波数シフトに対し, ねじれ振りの振動速度の増減に対するヒステリシスの測定を行った. 図6に, 面密度18.39 atoms/nm<sup>2</sup>の試料の, 有限の周波数シフトが出現する65 mK, 及び周波数シフトの現れない700 mKにおけるねじれ振子共振周波数 $f$ の $v_{\text{osc}}$ 依存性を示す. 試料である $^4\text{He}$ 薄膜固体は, 800 mKからねじれ振子のドライブを停止させた状態で10 mKまで冷却され, その後所定の温度に保ちねじれ振子のドライブを開始した. いずれの温度でも共振周波数 $f$ は $v_{\text{osc}} = 150 \mu\text{m/s}$ 程度まで急激に増加し, その後も $v_{\text{osc}}$ の増加に伴い増加傾向にある. しかし $v_{\text{osc}}$ を一定に保ち $f$ の温度変化を測定した時の結果から, この $f$ の $v_{\text{osc}}$ 依存性はねじれ振子自身の $v_{\text{osc}}$ 依存性によるものであり, 本質ではない. 5000  $\mu\text{m/s}$ 以上まで増加させた後 $v_{\text{osc}}$ を減少させた. 周波数シフトの現れない700 mKでは共振周波数に有意なヒステリシスは観測されない. 一方有限の周波数シフトが現れる65 mKでは, 1100  $\mu\text{m/s}$ 以下で $f$ にヒステリシスが現れ,  $v_{\text{osc}}$ 増加時よりも0.06~0.08 mHz低い値をとる. この大きさは図4に示した5000  $\mu\text{m/s}$ まで振動速度を増加させたときの共振周波数の減少とほぼ等しい. このことは2次元 $^4\text{He}$ 固体に現れる周波数シフトには2種類の成分, 500  $\mu\text{m/s}$ 程度以上振動速度の増加に伴い消失する成分と5000  $\mu\text{m/s}$ 以上でも消失しない成分が存在することを示唆する. しかし今回観測したヒステリシスの大きさ0.06~0.08 mHzは, 作成したねじれ振子の感度・周波数安定性と同程度の大きさなので, 詳細を検討するためにはより安定度の高いねじれ振子を作成する必要がある.

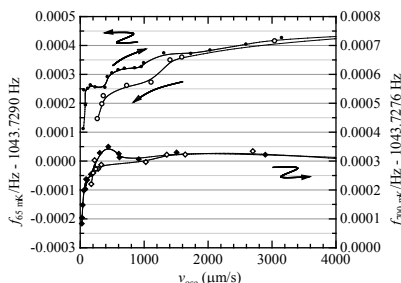


図6. 18.39 atoms/nm<sup>2</sup>の試料の, 65 mK (●○), 700 mK (◆◇)での共振周波数 $f$ の振動速度 $v_{\text{osc}}$ 依存性. ●◆: $v_{\text{osc}}$ 増加過程, ○◇: $v_{\text{osc}}$ 減少過程.

- [1] P. A. Crowell and J. D. Reppy, *Phys. Rev. B*, **53**, 2701 (1996).  
 [2] H. Fukuyama, *J. Phys. Soc. Jpn.*, **77**, 111009 (10 pages) (2008).

### (3) 非古典的回転慣性の大きさと零点空格子密度

グラファイト表面上の面密度18~19 atoms/nm<sup>2</sup>の2次元 $^4\text{He}$ 薄膜に現れる周波数シフトは, (1) 4/7 整合固体相近傍にのみ現れること, (2) 固体薄膜のスリップ現象ではないこと, (3) バルク固体 $^4\text{He}$ の固体の超流動現象と同様の振動速度依存性が見られること, から, この周波数シフトの起源は2次元 $^4\text{He}$ 固体における固体の超流動現象による可能性が高い. この周波数シフトが2次元 $^4\text{He}$ 固体の非古典的回転慣性(non-classical rotational inertia; NCRI)によるものと仮定した場合に, NCRIの割合(NCRI fraction; NCRI $f$ ), 零点空格子密度の大きさを見積もり議論する.

最も周波数シフトの大きな試料は面密度18.68 atoms/nm<sup>2</sup>の試料であるが, このうち1層目(12.0 atoms/nm<sup>2</sup>)はinert layerと呼ばれ, 基盤からの強いvan der Waals力を受け基盤と強く吸着するため周波数シフトには寄与しない. 従って, 今回観測された周波数シフトは2層目の $^4\text{He}$  (6.68 atoms/nm<sup>2</sup>)のNCRIにのみ起因する. また, 研究に使用したGrafoilは完全な2次元平面ではないので, ねじれ振子法では観測できないNCRIが一定の割合存在し,  $\chi$ ファクターと呼ばれる. 3層目の超流動薄膜による周波数シフトから今回研究に用いたGrafoil基盤の $\chi$ ファクターを見積もると0.977となり, 全NCRIのうち2.3%だけが今回観測された周波数シフトに寄与していることになる. この $\chi$ ファクターを用いるとNCRI $f$ は40%となり, 2層目の $^4\text{He}$ の40%がNCRIに寄与していることがわかる. また, 理想的な4/7相の面密度18.85 atoms/nm<sup>2</sup>を用いるとこの試料(18.68 atoms/nm<sup>2</sup>)の零点空格子密度は2.5%と見積もられる. 高木による計算機シミュレーションでは約2%まで零点空格子が存在するという結果が得られており, 我々の結果と矛盾しない.

- [1] T. Takagi, *J. Phys. : Conf. Ser.*, **150**, 032102 (2009).

### 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 S. Murakawa, Y. Chikazawa, T. Tanaka, R. Higashino, K. Yoshimura, K. Kuriyama, K. Honda, Y. Shibayama, and K. Shirahama, Torsional oscillator experiment on superfluid  $^4\text{He}$  confined in a porous alumina nanopore array, Journal of Physics: Conference Series, 査読有, Vol.400, No.1, 2012, 012053 (4 pages)  
DOI:10.1088/1742-6596/400/1/012053
- ② H. Yoshimura, R. Higashino, Y. Shibayama, and K. Shirahama, Anomalous response of  $^4\text{He}$  confined in nanoporous media to torsional oscillation, Journal of Low Temperature Physics, 査読有, Vol.169, No.3-4, 2012, pp.218-227  
DOI:10.1007/s10909-012-0687-3
- ③ A. M. Koga, Y. Shibayama, and K. Shirahama, Layer by layer growth of solid  $^4\text{He}$  on graphite down to 0.1 K, Journal of Low Temperature Physics, 査読有, Vol.166, No.5-6, 2011, pp.257-267  
DOI: 10.1007/s10909-011-0452-z
- ④ Y. Shibayama and K. Shirahama, Suppression of Superfluidity of  $^4\text{He}$  in a Nanoporous Glass by Preplating a Kr Layer, Journal of the Physical Society of Japan, 査読有, Vol.80, No.8, 2011, 084604 (10 pages)  
DOI: 10.1143/JPSJ.80.084604

[学会発表] (計 14 件)

- ① Y. Shibayama, Phase diagram and supersolid-like behavior of two-dimensional  $^4\text{He}$  films on graphite, Supersolidity in Nature, Jun. 11, 2012, RIKEN
- ② Y. Shibayama, H. Fukuyama and K. Shirahama, Hysteresis of non-classical rotational inertia in two-dimensional  $^4\text{He}$  films on graphite, New Frontiers of Low Temperature Physics (ULT 2011), Aug. 21, 2011, KAIST (South Korea)
- ③ Y. Shibayama, H. Fukuyama and K. Shirahama, Hysteresis of non-classical rotational inertia in 2D  $^4\text{He}$  films on graphite, 26th International Conference on Low Temperature Physics (LT26), Aug. 11, 2011, Beijing International Convention Center (China)
- ④ Y. Shibayama, Non-classical rotational inertia of two-dimensional

$^4\text{He}$  solid on graphite and proposal for the possible phase diagram, Dec. 21, 2010, Korea-Japan Solid Helium Workshop 2010, KAIST (South Korea)

- ⑤ Y. Shibayama, H. Fukuyama and K. Shirahama, Observation of non-classical rotational inertia in two-dimensional  $^4\text{He}$  solid on graphite surface, International Symposium on Quantum Fluids and Solids (QFS2010), Aug. 5, 2010., Grenoble World Trade Center (France)
- ⑥ Y. Shibayama, Non-classical rotational inertia in two-dimensional  $^4\text{He}$  solid due to zero-point vacancies, Japan-Korea Workshop Quantum Phenomena in Helium, Jun. 25, 2010., Keio University
- ⑦ Y. Shibayama, Non-classical rotational inertia in two-dimensional  $^4\text{He}$  solid on graphite, International Symposium on Physics of New Quantum Phases in Superclean Materials (PSM2010), Mar. 9, 2010., Hamagin hall (Yokohama)
- ⑧ Y. Shibayama, Non-classical rotational inertia in two-dimensional  $^4\text{He}$  solid prepared on graphite substrate, Korea-Japan Solid Helium Workshop, Dec. 21, 2009, KAIST (South Korea)
- ⑨ Y. Shibayama, H. Fukuyama and K. Shirahama, Torsional oscillator studies of non-classical rotational inertia in two-dimensional  $^4\text{He}$  solid, International Symposium on Quantum Fluids and Solids (QFS2009), Aug. 7, 2009, Northwestern University, (USA)

6. 研究組織

(1) 研究代表者

柴山 義行 (SHIBAYAMA YOSHIYUKI)  
室蘭工業大学・工学研究科・准教授  
研究者番号：20327688

(2) 研究分担者

( )

研究者番号：

(3) 連携研究者

( )

研究者番号：