

機関番号：12612

研究種目：基盤研究（C）

研究期間：2008年～2010年

課題番号：20540351

研究課題名（和文）

吸着膜超流動と固相膜滑り運動の競合現象の解明

研究課題名（英文）

Competition between slippage and superfluidity of  $^4\text{He}$  Films

研究代表者 鈴木 勝

電気通信大学・情報理工学研究科・教授

研究者番号：20196869

研究成果の概要（和文）：

本研究では、 $^4\text{He}$  吸着膜の超流動と吸着固相膜のすべり運動の競合の機構を明らかにすることを目的として、これまでに競合が観測された条件と異なる条件で QCM 測定を実施した。測定の結果、32kHz 測定においても 5 MHz 測定の基板加速度とほぼ等しい条件で競合が観測される。これは、超流動と吸着固相膜のすべり運動の競合を決める因子は吸着膜に働く有効的な力であることを示唆し、籠口が提唱する固相膜のすべり運動のモデルを支持するものである。

研究成果の概要（英文）：

In order to clarify the mechanism of the competition between slippage and superfluidity of  $^4\text{He}$  films, we carried out QCM measurements under different conditions from the previous 5 MHz-QCM experiments. In 32 kHz-QCM experiments, we observed the competition under the condition when the acceleration of oscillating substrate is much the same as the previous experiments. This suggests that the effective force acting on the film plays an important role in sliding solid  $^4\text{He}$  films, and supports the sliding model which was proposed by Minoguchi.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2008年度	2,100,000	630,000	2,730,000
2009年度	700,000	210,000	910,000
2010年度	700,000	210,000	910,000
総計	3,500,000	1,050,000	4,550,000

研究分野：数物系科学

科研費の分科・細目：物理学・物性

キーワード： $^4\text{He}$ 、吸着膜、超流動、固相膜すべり、QCM

## 1. 研究開始当初の背景

ナノスケールの摩擦現象の理解は工学的な視点からも重要であり、『ナノトライボロジー』と呼ばれる研究分野が発展している。その中の研究対象のひとつである物理吸着膜のすべり運動は、界面摩擦のメカニズムにミクロな視点からの知見を与えるとして実験的にも理論的にも興味を持たれていた。吸着膜の実験研究は、Krim 等の水晶マイクロバランス(QCM) 法の開発により開始され、彼女ら

はAu 基板上的のKr 単層膜のすべり摩擦が基板に対して不整合な固相吸着膜では液相膜に比べて小さくなると報告している。一方、Mistura らは同じく Kr/Au のすべり摩擦を測定し、外力を緩やかに上昇させると摩擦力の急激な減少が起きることを見だし『ピン止め-すべり』の転移であると報告した。このように基板に対する吸着膜の静的な構造が摩擦力を決める因子であることは明らかになりつつあった。

研究代者・鈴木は、基板振動に対する吸着膜のすべり運動の研究を量子流体である $^4\text{He}$ 吸着膜に発展させ、グラファイト基板上の $^4\text{He}$ 吸着膜( $^4\text{He}/\text{Gr}$ )の超流動と吸着固相膜すべり運動は競合する、というこれまでに報告されていない新しい現象を見出した。

これまでの $^4\text{He}/\text{Gr}$ の固相膜すべり運動の研究では、 $^4\text{He}$ 吸着膜の2原子層膜以下はある温度 $T_s$ 以下の低温域で摩擦力が減少(基板振動に追従しない質量の増加)し、 $^4\text{He}$ 吸着膜がすべり運動を起こすことが観測されていた。解析によるとこの現象は固相である吸着第1原子層の上を同じく固相である吸着第2原子層が滑ることで説明される。また、3原子層以上の $^4\text{He}$ 吸着膜の上部は液相であり低温で超流動に転移することが知られている。

$^4\text{He}/\text{Gr}$ の固相膜すべり運動の研究を続けるなかで、4原子膜の $^4\text{He}$ 吸着膜では2原子層膜から観測される $T_s$ 以下の吸着膜のすべり運動が、超流動転移以下の温度 $T_D$ で突然に抑制される特異な現象が起こることが明らかになった。

## 2. 研究の目的

本研究は、上述の新たに発見された $^4\text{He}/\text{Gr}$ での超流動が吸着固相膜のすべり運動を抑制するメカニズムを実験研究と理論研究の共同のもとで明らかにしようとするものである。この研究を通して得られる吸着膜のすべり運動のメカニズムの知見は、物理吸着膜のナノトライボロジーの研究が進展させることも期待される。

## 3. 研究の方法

超流動と吸着固相膜のすべり運動の競合に関して、研究分担者・養口は、吸着固相膜のすべり運動は第1原子と第2原子層の間の運動が担うと考え、吸着膜の上部の液体が超流動に転移すると超流動流よる質量輸送が刃状転位の運動を打ち消すと考えた。

本研究では、上述のモデルを指針として、さまざまな条件のもとで水晶マイクロバランス(QCM)法による固相膜すべり運動の観測を行い、競合の振舞いを明らかにすることより、競合現象の全体像の理解を試みた。モデルによると、競合現象は以下の性質を示す。

- (1) 基板の共振振動数と基板振幅に成り立つある関係のもとで同じ振舞いを示すこと。
- (2) 基板の原子スケールでの平坦さとその大きさに依存すること。

これらの予想に対して次のような実験を行った。

(1) について：

一般にQCM法による吸着固相膜のすべり運

動の測定では、MHzの振動数領域のTAカット水晶振動子が利用されていた。本研究では共振振動数と基板振幅をこれまでの測定領域から大きく拡張することを目標に、32 kHzの振動数領域の音叉型水晶振動子を利用した水晶マイクロバランス法を開発した。図1に測定に利用した音叉型水晶振動子の写真を示した。

(2) について

これまでのグラファイト試料はグラフォイル(Grafoil)であり、典型的な微結晶のサイズは45 nm程度であると見積もられる。これに対して本研究では天然単結晶グラファイトを原料として発泡化を行い微結晶のサイズ $\sim 100$  nmかつc面内のa軸が配向した試料を得ることが可能となった。

以上の実験技術を利用して超流動と吸着固相膜のすべり運動の競合の研究を実施した。

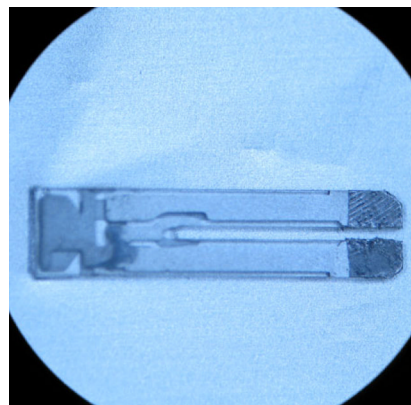


図1：音叉型水晶振動子。グラファイト試料は振動子先端部に熱圧着されている。

## 4. 研究成果

はじめに(1)の超流動と吸着固相膜のすべり運動の競合の共振振動数依存の結果について説明する。図2に音叉型水晶振動子を用いた面密度 $27 \text{ atoms}/\text{nm}^2$ の観測結果を示した。図を見て分かるように、小振幅では超流動転移に伴う共振振動数の上昇がおおよそ $0.5 \text{ K}$ で観測される。

一方、 $10 \mu\text{m}$ の振動振幅では固相膜のすべり運動がおおよそ $0.6 \text{ K}$  ( $T_s$ )で観測された後、超流動との競合が $0.5 \text{ K}$  ( $T_D$ )で起こる。これまでの $5 \text{ MHz}$ の測定では競合は振動振幅がおおよそ $0.2 \text{ nm}$ で観測された。本研究では競合が観測される振幅は大きく異なるが、2つの測定での吸着膜の加速度(単位質量あたりに吸着膜に働く有効的な力)はほぼ同じ値となる。これは、吸着固相膜のすべり運動は第1原子と第2原子層の間の刃状転位の運動であり、吸着膜の上部の超流動による質量輸送がその運動を打ち消すことで競合が起こ

るとする籠口のモデルを支持するものである。

次に(2)の競合現象の基板依存性について述べる。本実験では微結晶のサイズが大きくc面内のa軸が配向した試料を測定した。測定の結果、これまでの測定と比較して固層膜のすべり運動の吸着膜の構造にもなう変化が明確に観測された。さらに、超流動と吸着固相膜のすべり運動の競合に関しては、超流動転移温度以上で競合の前駆現象と考えられる吸着固相膜のすべり運動の抑制が新たに観測された。これは、局在する超流動との吸着固相膜の運動が結合していることを示唆し、 $^4\text{He}$ 吸着膜の物性に新たな知見を与えるものである。

以上、本研究では、これまでに超流動と固体膜すべり運動の競合が観測された条件と異なる条件でQCM測定を実施し、競合を決める因子は吸着膜に働く有効的な力であることを明らかにした。さらに、天然単結晶グラファイトによる測定では、これまで知られていない固体膜のすべり運動の前駆現象を観測した。

#### 5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計9件)

- ① F. Nihei, K. Ideura, H. Kobayashi, J. Taniguchi, M. Suzuki  
“Mechanical Response of  $^4\text{He}$  Films Adsorbed on Graphite with a Quartz Tuning Fork”  
Journal of Low Temperature Physics, **162**, 559-564 (2011). (査読有)
- ② H. Kobayashi, J. Taniguchi, M. Suzuki, K. Miura, I. Arakawa  
“Sliding Friction of Kr Films Adsorbed on Graphite”  
Journal of Physical Society of Japan, **79**, 014602-1,-6 (2010). (査読有)
- ③ M. Suzuki  
“Sliding Friction of Multilayer Helium Films”  
Proc. of World Tribology Congress 2009 (Kyoto, Japan) 852 (2009) (invited). (査読無)
- ④ N. Hosomi, J. Taniguchi, M. Suzuki, T. Minoguchi  
“Competition between the Slippage and the Superfluidity of  $^4\text{He}$  Films”  
Proc. of World Tribology Congress 2009 (Kyoto, Japan) 270 (2009). (査読無)
- ⑤ H. Kobayashi, J. Taniguchi, M. Suzuki, K. Miura, and I. Arakawa

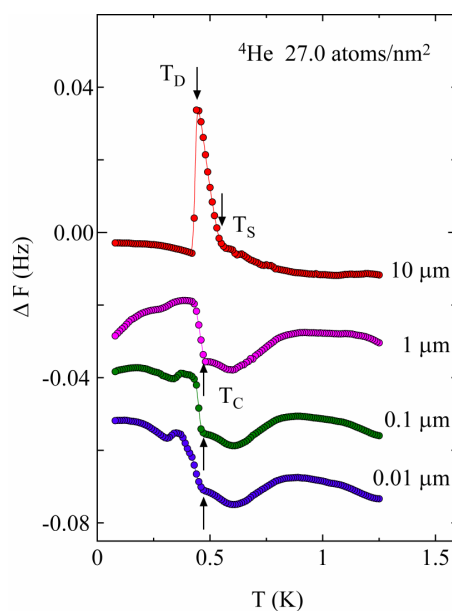


図2：音叉型水晶振動子による超流動吸着固相膜のすべり運動の競合の観測。異なる記号の色は、異なる振動振幅を表し、図中の数字は振幅である。

“Sliding Friction of Kr Films Adsorbed on Single Crystalline Graphite Substrate”

Proc. of World Tribology Congress 2009 (Kyoto, Japan) 266 (2009). (査読無)

- ⑥ N. Hosomi, J. Taniguchi, M. Suzuki, T. Minoguchi  
“Dynamical sticking of a solid  $^4\text{He}$  with superfluid overlayer”  
Physical Review B **79**, 172503-1,-4 (2009). (査読有)
- ⑦ K. Ideura, H. Kobayashi, N. Hosomi, J. Taniguchi, M. Suzuki  
“Competition between the Superfluidity and the Slippage of  $^4\text{He}$  Films Adsorbed on Porous Gold”  
Journal of Physics: Conference Series, **150**, 032032-1,-4 (2009). (査読有)
- ⑧ N. Hosomi, J. Taniguchi, M. Suzuki, T. Minoguchi  
“Effect of  $^3\text{He}$  on Superfluid  $^4\text{He}$  Films Adsorbed on Grafoil”  
Journal of Physics: Conference Series, **150**, 032031-1,-4 (2009). (査読有)
- ⑨ H. Kobayashi, J. Taniguchi, M. Suzuki, K. Miura, and I. Arakawa  
“Sliding Friction of Kr Films Adsorbed on Single-Crystalline Graphite

Substrate”  
Journal of Physics: Conference Series,  
150, 032045-1,-4 (2009). (査読有)

研究者番号 : 10202350

〔学会発表〕 (計 6 件)

- ① 野田啓, 二瓶史和, 小林甫, 谷口淳子,  
鈴木勝, 『音叉型水晶振動子による単結晶  
グラファイト基板上  $^4\text{He}$  のスリップ現象  
の観測』, 日本物理学会 2011 年秋季大会,  
富山大学, 2011 年 9 月 23 日
- ② 二瓶史和, 野田啓, 出浦健一, 小林甫,  
谷口淳子, 鈴木勝, 『音叉型水晶によるグ  
ラファイト基板上  $\text{He}$  の摩擦現象の観測』,  
日本物理学会第 66 回年次大会, 新潟大学,  
2011 年 3 月 28 日
- ③ 二瓶史和, 出浦健一, 小林甫, 谷口淳子,  
鈴木勝, 『音叉型水晶振動子によるグラフ  
ァイト基板上  $^4\text{He}$  のスリップ現象と超流  
動の観測』, 日本物理学会 2010 年秋季大  
会, 大阪府立大学, 2010 年 9 月 26 日
- ④ 小林甫, 谷口淳子, 鈴木勝, 三浦浩治,  
荒川一郎, 『単結晶グラファイト基板上の  
 $\text{Kr}$  吸着膜の界面摩擦 IV』, 日本物理学会  
2010 年秋季大会, 大阪府立大学, 2010  
年 9 月 24 日
- ⑤ 出浦健一, 二瓶史和, 小林甫, 谷口淳子,  
鈴木勝, 『音叉型水晶によるグラファイト  
基板上  $\text{He}$  の摩擦現象の観測』, 日本物理  
学会第 65 回年次大会, 岡山大学, 2010  
年 3 月 2 日
- ⑥ 小林甫, 谷口淳子, 鈴木勝, 三浦浩治,  
荒川一郎, 『単結晶グラファイト基板上の  
 $\text{Kr}$  吸着膜の界面摩擦 III』, 日本物理学会  
2009 年秋季大会, 熊本大学, 2009 年 9 月  
25 日

〔その他〕

ホームページ等

<http://ns.phys.uec.ac.jp>

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

鈴木 勝 (SUZUKI MASARU)

電気通信大学・大学院情報理工学研究科・  
教授

研究者番号 : 20196869

### (2) 研究分担者

箕口 友紀 (MINOGUCHI TOMOKI)

東京大学大学院・総合文化研究科