

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 6月 5日現在

機関番号：13901

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2010～2011

課題番号：22651036

研究課題名（和文）

超流動ヘリウム4薄膜に浮いたヘリウム3単分子層のナノトライボロジー研究

研究課題名（英文）

Nanofriction of ^3He monolayer on superfluid ^4He film

研究代表者

檜枝 光憲 (HIEDA MITSUNORI)

名古屋大学・理学研究科・講師

研究者番号：30372527

研究成果の概要（和文）：

超低温において強い量子現象を示す液体ヘリウムの性質を利用して、超流動ヘリウム4薄膜表面上に浮いたヘリウム3単分子層との界面で起こるナノ摩擦研究を行った。100 MHzの水晶マイクロバラン（QCM）を用いた研究から、平坦な金基盤上に吸着したある膜厚の ^3He - ^4He 混合薄膜では、基盤速度が $35 \mu\text{m/s}$ 以上になると非超流動膜の一部が基盤振動からピンニング-ディピンニングの機構により約 0.2 K でスリップが観測された。このスリップが観測されはじめる温度と ^4He の超流動転移温度が近いことから両者の間に何らかの関係が示唆される。

研究成果の概要（英文）：

We studied a nanofriction of a ^3He - ^4He mixture film at ultra low temperatures. By a QCM experiment at 100 MHz with a planar gold substrate, we observed surprisingly that a part of ^3He on an underlying ^4He layer slips at around 0.2 K by a pinning-depinning mechanism above $v = 35 \mu\text{m/s}$. To describe the mechanism, a possible scenario related to the superfluid transition of the ^4He fluid layer is suggested.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2010年度	2,600,000	0	2,600,000
2011年度	600,000	180,000	780,000
総計	3,200,000	180,000	3,380,000

研究分野：複合新領域

科研費の分科・細目：ナノ・マイクロ科学、ナノ構造科学

キーワード：トライボロジー、表面・界面物性、ナノトライボロジー

1. 研究開始当初の背景

摩擦現象の理解は基礎・応用研究において極めて重要である。近年、原子間力顕微鏡（AFM）や分子動力学計算を用いた研究が行われ、ナノスケールにおけるすべり摩擦研究『ナノトライボロジー』が盛んに行われてきた。J. Krimらは、水晶マイクロバラン（QCM）を用いて振動基盤上に吸着した原子数層の希ガス原子膜と振動基盤上に生じる摩擦の研究を行った。その結果、キセノン、クリプトンなどの古典的な希ガス原子膜は、振動基盤上に粘性的な界面摩擦を及ぼしな

がら $\sim 10^{-9} \text{ s}$ 程度の緩和時間でスリップしていることを示した。我々のグループでは、超低温極限環境で強い量子性を示す単分子膜と振動基盤界面に生じるナノトライボロジー研究を行ってきた。 ^4He 膜-基盤間に生じる摩擦は、粘性がゼロとなる超流動や超固体現象との関連から大変に興味深い。我々の今までの研究によって、超音波法やQCMを用いた新しい測定方法が開発され、ヘリウム単分子膜は界面摩擦が完全にゼロになる超流動状態だけではなく常流動状態でさえもMHz帯高周波の基板振動からスリップすること

をはじめて明確にした。またこのスリップ現象は単分子膜の構造に強く依存することも報告してきた。

2. 研究の目的

本申請課題「超流動ヘリウム4 薄膜に浮いたヘリウム3 単分子層のナノトライボロジー研究」は、水晶マイクロバランス (QCM) を使い常流動³He (フェルミ粒子)・⁴He 超流動 (ボーズ粒子) に生じる界面摩擦を研究するものである。このように、摩擦ゼロの超流動表面を使い摩擦ゼロから有限微小摩擦までを系統的に研究するという着想に基づいた研究は、国内外を見渡しても過去に例が無い。以下に我々の研究の特徴 (斬新性・チャレンジ性) をまとめる。

(1) ヘリウム4 超流動表面 (摩擦ゼロ) を利用した新しい摩擦研究であること

ヘリウムは超低温において強い量子統計性を示し、2つの同位体³He とはそれぞれフェルミ粒子、ボーズ粒子という異種粒子として振舞う。この³He・⁴He の混合ガスを基盤に吸着すると、その異なるゼロ点振動エネルギーのためにアンドレーエフ表面束縛状態を形成し、³He (フェルミ粒子) が超流動 (ボーズ粒子) 表面上に浮いた大変にユニークな2層構造薄膜を形成することが知られている。このように強い量子性を利用したナノ摩擦研究は過去に例が無い。

(2) スーパークリーン (超純粋) 物質系である点

一般的に不純物は多くの物理現象に大きな影響を及ぼす。ナノ摩擦についても同様な報告がなされており、ナノ摩擦の本質を研究するためには、不純物を排除した実験が必要となる。絶対零度において唯一液体で存在するヘリウムは、不純物の排除が容易である。

(3) 他の物理現象との共通性

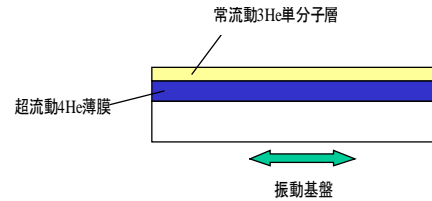
摩擦の物理は、電荷密度波 (CDW) のスライディング、スピン密度波、第2種超伝導体の磁束格子、結晶中の転移の運動、などの物理現象と類似性が見られ、本研究から他分野への波及効果が期待される。

(4) 超低温極限環境での実験は技術的に難しい点

超低温極限環境における実験は、超低温生成技術や微小信号測定など技術的に困難な実験である。この超低温実験技術とナノトライボロジーの組み合わせは、まさに極限計測の組み合わせであり、過去に測定例がほとんど

無いチャレンジングな研究課題である。

以上より超流動⁴He 薄膜表面上に浮いた³He 単分子層との界面で起こる摩擦現象を研究し、2物体間に生じる界面摩擦のナノスケールでの起源や素過程の解明に必要な知見を得る。



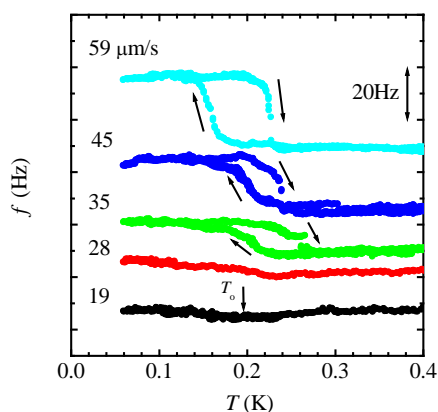
3. 研究の方法

本研究は、平成22~23年の2年計画で行った。平成22年度は、まず実験準備としてQCM測定システム及び温度制御システムの改良を行った。QCM測定システムは、周波数モジュレーション (FM) 法を使い超低温極限環境での周波数安定度を0.1 Hz以下にすることを目指した。FM法の特徴は発振回路を使う方法とは異なり、柔軟に発振周波数を変化でき励起パワーを1 nW以下に抑えることができるため超低温環境下での実験に大変に有利となる。超低温の発生は研究室に既存する³He・⁴He希釈冷凍機によって行い、抵抗温度計ブリッジAVS-47によって1 mK以内の温度制御を行った。本実験で使うQCM実験セルは、超低温で熱伝導の良い材質の無酸素銅 (OFHC) を使い自作した。実験準備の終了後、平坦な金基盤上にある膜厚の³He・⁴He混合薄膜 (ヘリウム4の吸着量: 37.38 $\mu\text{mol}/\text{m}^2$, ヘリウム3の吸着量: 7.93 $\mu\text{mol}/\text{m}^2$) を吸着させ、100 MHzのQCM測定を開始した。周波数とエネルギー散逸の変化から、超流動⁴He薄膜・常流動³He単分子層の界面に生じるナノ摩擦の温度変化 (0.06~0.4 K) について定量的に評価した。またQCMの振動振幅 (基盤速度: 19~59 $\mu\text{m}/\text{s}$) を系統的に変化した測定を行い、ピンング・ディピンング転移の有無を調べた。

平成23年度は、前年度に引き続き³He・⁴He希釈冷凍機を用い、超流動薄膜に浮いた³He単分子層に対してQCM測定を行った。以上から得られた結果を比較検討し、2物体間に生じるナノ摩擦の起源や素過程を議論した。平成23年度は研究の最終年度として結果をまとめ、論文執筆の準備を行った。

4. 研究成果

平坦な金基盤上に吸着したある膜厚の ^3He - ^4He 混合薄膜（ヘリウム4の吸着量： $37.38 \mu\text{mol}/\text{m}^2$ ，ヘリウム3の吸着量： $7.93 \mu\text{mol}/\text{m}^2$ ）の結果を図に示す。最小の基盤振動速度 $19 \mu\text{m}/\text{s}$ では 0.16 K で超流動転移に伴う周波数シフトを観測した。さらに振動速度を上昇していくと、驚くべきことに基盤速度が $35 \mu\text{m}/\text{s}$ 以上になると超流動転移では説明できない余分な周波数シフトが観測され、振動速度の増加とともに大きくなった。これは非超流動膜の一部が基盤振動からのスリップしていることを示している。このスリップは、昇温・降温過程の間でヒステリシスを伴っていることから、 ^3He - ^4He 混合薄膜がピンング-ディピンングの機構によりスリップしたと解釈される。ここで2つの疑問、①このスリップは ^3He - ^4He 混合薄膜のどこで起こっているのか？、②この温度変化によって引き起こされるピンング-ディピンング転移はどのようなメカニズムで引き起こされるのか？、が頭に浮かんでくる。



まず、第一の疑問の「このスリップは ^3He - ^4He 混合薄膜のどこで起こっているのか？」に関して議論する。下地の ^4He 薄膜のみで行った実験ではスリップが観測されていないため、下地の ^4He 薄膜そのものはスリップしない事が確認されている。つまりスリップの信号は ^4He 薄膜上に浮かんでいる ^3He によるものであり、 ^3He - ^4He 界面でスリップしたと結論される。本実験における最大振動速度 $59 \mu\text{m}/\text{s}$ では周波数シフト 19 Hz を観測し、これは ^3He 吸着量の 90% に対応する。

次に第二の疑問「この温度変化によって引き起こされるピンング-ディピンング転移はどのようなメカニズムで引き起こされるのか？」について議論する。古典的な物理吸着膜（ネオン、クリプトン）を使った先行研究（Bruschi et al., Phys. Rev. Lett. 88, 046105; Phys. Rev. Lett. 96, 216101）による

の QCM 実験においてピンング-ディピンング転移が報告された。これらの研究によれば、①基盤の格子欠陥、②基盤と吸着膜の表面構造の不一致、が原因として提案されている。しかしながら我々の実験に用いた基盤、つまり特に何の清浄処理を施していない金基盤では、その表面の物理吸着膜の構造相転移がシャープに起きないため、これらの原因は本測定で観測された温度変化によるピンング-ディピンング転移を説明できない。

そこで新しいメカニズムを提案するために、①下地の ^4He 膜上の ^3He がスリップしている、②ピンング-ディピンング転移温度と下地の ^4He 膜の超流動転移温度が近い、という2つの実験事実に注目した。温度を下げていくと下地の ^4He 薄膜は常流動から超流動へと転移する。超流動 ^4He は粘性がゼロである完全潤滑剤であり、基盤から超流動 ^4He 上に浮いている ^3He に運動量を運ばない。つまり超流動転移温度近傍において急激に界面摩擦が小さくなり、 ^3He はピンング-ディピンング転移によりスリップすることになる。しかし、本実験では $35 \mu\text{m}/\text{s}$ 以下ではスリップが観測されない。これは依然として小さな静摩擦力が働いている事を意味しており、振幅がある閾値を越えた時点で ^3He がスリップし始めるということで説明される。おそらく下地の超流動 ^4He 膜が 0.15 layer 程度と非常に薄いため、基盤の表面欠陥などによるピンングにより小さな静摩擦力が ^3He に生じていると思われる。

今後はさらに詳細に研究を進めるために、膜厚、振幅、周波数などを系統的に変化した測定を行い、超流動ヘリウム4薄膜-常流動ヘリウム3単分子層の界面に生じるナノ摩擦について議論を深めていく必要があるだろう。

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0件）

〔学会発表〕（計2件）

① 発表者：T. Oda, H. Yamaguchi, T. Matsushita, N. Wada, and M. Hieda,
発表題目： ^3He Effect on 2D Superfluidity in ^3He - ^4He Mixture Films on Planar Gold,
学会名：The 26th International Conference on Low Temperature Physics, LT26
発表年月日：August 10-17, 2011,
発表場所：Beijing International Convention Center, Beijing, China

②発表者：小田拓弥，鎌田浩輝，檜枝光憲，
松下琢，和田信雄
発表題目：金基盤上 ^3He - ^4He 薄膜のスリップ
現象的挙動
発表日：2011年3月28日
学会名：日本物理学会第66回年次大会
場所：新潟大学五十嵐キャンパス

〔図書〕（計0件）

〔産業財産権〕

○出願状況（計0件）

名称：
発明者：
権利者：
種類：
番号：
出願年月日：
国内外の別：

○取得状況（計0件）

名称：
発明者：
権利者：
種類：
番号：
取得年月日：
国内外の別：

〔その他〕

ホームページの URL：
<http://ult.phys.nagoya-u.ac.jp/>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

檜枝 光憲 (HIEDA MITSUNORI)
名古屋大学・大学院理学研究科・講師
研究者番号：30372527

(2) 研究分担者

研究分担者無し

(3) 連携研究者

連携研究者無し