

平成 21 年 11 月 30 日現在

研究種目：基盤研究(B)

研究期間：2007～2008

課題番号：19340101

研究課題名(和文) 極低温走査プローブ顕微鏡を用いた量子界面の研究

研究課題名(英文) Study of Quantum Surfaces and Interfaces using a Scanning Probe Microscope Working at Very Low Temperatures

研究代表者

白濱 圭也 (SHIRAHAMA KEIYA)

慶應義塾大学・理工学部・教授

研究者番号：70251486

研究成果の概要：

本研究は、極低温動作可能な走査プローブ顕微鏡(SPM)を開発し、低次元電子系やヘリウム等のクリーンな「量子界面」で発現する新奇量子現象の解明を行うものである。以下の研究成果を得た。(1)周波数変調型極低温原子間力顕微鏡(FM-LT-AFM)技術を確立し、50mK までの極低温領域での動作、原子ステップ分解能の実現に成功した。(2)探針が表面に平行に振動する「極低温摩擦顕微鏡」を開発し、典型的な層状超伝導物質 NbSe₂ の平坦表面におけるナノスケール摩擦を研究した。探針と表面が 10nm 程度離れている状況(非接触領域)でも、探針に大きな摩擦力が働くことを発見した。この非接触摩擦力の起源は従来の摩擦力理論では説明できない新奇なエネルギー散逸機構であり、摩擦現象の理解に新たな知見を与えると期待される。

交付額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2007 年度	6,800,000	2,040,000	8,840,000
2008 年度	7,700,000	2,310,000	10,010,000
年度			
年度			
年度			
総計	14,500,000	4,350,000	18,850,000

研究分野：低温物理学

科研費の分科・細目：物理学・物性 II

キーワード：(1)走査プローブ顕微鏡 (2)物性実験 (3)低温物性 (4)表面・界面物性
(5)2次元電子系 (6)摩擦 (7)超伝導

1. 研究開始当初の背景

絶対温度 1 ケルビン(K)以下の極低温では、固体中電子の超伝導、液体ヘリウムの超流動などの劇的な量子現象が観測される。これらの現象は通常、電磁波を遮断した低温環境で実現されるため、目視による測定が困難である。発熱を伴わない走査プローブ顕微鏡(SPM)が開発されれば、低温物理学ひいては

物性物理学での革新的な顕微手法となることが期待される。さらに、極低温で実現される種々の低次元電子系(液体ヘリウム表面電子系、半導体ヘテロ界面電子系、グラフェン(単層グラファイト)、トポロジカル物質、層状超伝導物質)や、液体ヘリウムの自由表面ではその「クリーンネス」によって新しい量子現象の発現が期待される。極低温 SPM はそ

のような「量子界面」の研究に最適であり、物性物理学に新しいブレイクスルーをもたらすであろう。

SPM はその測定物理量により、操作トンネル顕微鏡(STM)、原子間力顕微鏡(AFM)、AFM の応用である磁気力顕微鏡(MFM)、近接場光学顕微鏡(SNOM)など、多様なバリエーションが存在する。これまで極低温環境で動作が確立しているのは STM がほとんどであり、AFM をベースとした SPM を極低温で動作させることは STM に比べ遙かに難しい。ここに本研究を推進することの意義がある。即ち、未だノウハウが確立していない極低温 SPM を開発することで、未開の研究分野を拓こうということである。

2. 研究の目的

本研究は、極低温 SPM を開発し様々な極低温量子現象の探索・解明に役立てることを目指すものである。研究テーマは大きく以下の3つに分けられる。

- (1) 極低温走査プローブ顕微鏡の開発
- (2) 超伝導体表面におけるナノスケール摩擦研究への応用
- (3) 超流動液体ヘリウムのナノスケール物性研究への応用

3. 研究の方法

本研究では SPM の極低温動作に適した手法として、音叉型水晶振動子をカンチレバーに用いた周波数変調型非接触原子間力顕微鏡(FM-NC-AFM)を基本手段として採用した。この方法は発熱が無くまた振動子の Q 値が低温で増加することから、極低温使用に最適であると考えた。

(1) 極低温走査プローブ顕微鏡の開発

極低温動作に最適な手法と思われる、音叉型水晶振動子をカンチレバーに用いた周波数変調型 SPM を開発した。その写真を図 1 に示す。水晶振動子を用いた FM-AFM では、振動子の振幅を 1 nm 以下まで小さくすることでチップ 試料間に働く引力を感度よく検出し、原子分解能が実現できる。本研究では 1 nm 程度の小振幅を実現し、顕微鏡画像として利用可能な引力の測定が安定に行えることを目指した。

さらに、後述するナノスケール摩擦を研究するため、探針を表面に対し平行に振動させて摩擦力(エネルギー散逸)を測定する摩擦力顕微鏡(水平力顕微鏡)の開発を行った。

また、カンチレバー信号増幅用に CMOS-OP アンプを用いた低温電流プリアンプの開発を行った。



図 1(上)希釈冷凍機に装着した SPM の全体写真。(下)摩擦力顕微鏡用に作成した音叉型水晶振動子カンチレバー。

(2) 超伝導体表面におけるナノスケール摩擦研究への応用

SPM の応用として、超伝導体表面での摩擦研究を行った。超伝導電子の表面摩擦への効果は非常に興味深い問題であり、その存否をめぐっては過去 10 年以上にわたり論争となっていた。これを解明し、更に摩擦力を利用した超伝導のナノスケールプローブを創成する目的で、摩擦力顕微鏡の開発を行った。

試料として、STM 実験によく利用される典型的な層状超伝導物質 $1H-NbSe_2$ を用いて、探針を表面に平行に振動させたときの振動子周波数とエネルギー散逸、更に金属探針で STM

の同時測定が可能なセットアップを開発し、摩擦力測定を 4.2K から室温の範囲で行った。

(3) 超流動液体ヘリウムのナノスケール物性研究への応用

液体ヘリウムの超流動は、超伝導と本質を同じくする低温特有の量子現象である。しかし超流動に対するナノスケールの研究手法はこれまで存在しなかった。本研究では開発した極低温 SPM を、超流動ヘリウムのナノスケール物性を調べる初めての手法として用いる。SPM を金属容器中に密閉して少量の液体ヘリウムを入れると、超流動状態では数十ナノメートルの厚みの液体ヘリウム薄膜が基盤表面を覆う。この薄膜の粘性等の動的性質を水平力顕微鏡で調べることを試みた。この実験により、超流動に特有な量子渦の構造や流れ場の観測、励起粒子のスペクトルの測定などが可能になり、超流動ナノフレイクティクス(Super-Nanofluidics)という全く新しい研究分野開拓への道が開けると期待される。

4. 研究成果

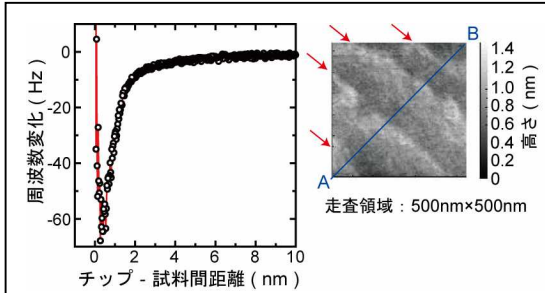


図 2(左) 77K における SrTiO₃(0001)面でのフォースカーブ(周波数シフトの距離依存性)。負の周波数シフトが引力、正が斥力に対応する。(右)引力領域で得た同物質表面のトポグラフィ像。矢印が単原子層ステップを示す。

(1) 極低温走査プローブ顕微鏡の開発

周波数変調型 AFM と基本とした SPM を極低温動作させるというアイデアは奏功し、幅広い用途に使用可能な極低温 SPM が完成した。

典型的な測定結果として、77 K においてチタン酸ストロンチウム(SrTiO₃)基板表面にチップを近づけたときの周波数変化を図 2 に示す。チップ 試料間距離が数 nm の地点から周波数は負の方向へ変化し、その後、正の方向へ変化した。同様の振る舞いは 1.3K まで観測された。これはファンデルワールス力の測定に成功したことの証左である。また、引力領域で周波数変化が一定になるようにフィードバックをかけて走査したところ SrTiO₃ の原子ステップを測定することに成功した。

また、低温電流プリアンプの開発においては、SPM 動作周波数において 10⁷V/A のゲインを有し、SN 比の高いアンプの製作に成功した。

(2) 超伝導体表面におけるナノスケール摩擦研究への応用

摩擦力と STM トンネル電流の同時測定可能な手法を開発したことで、試料探針間距離の定量的な分析が可能となり、ナノスケール摩擦力の物理的機構の解明に貢献できる実験装置が完成した。

これを用いて測定した NbSe₂ 平坦表面上探針の周波数・散逸・トンネル電流の距離依存性を図 3 に示す。トンネル電流が流れない「非接触領域」(3-15nm)において、周波数と散逸(摩擦力)の大きな増大が観測された。探針と表面が接触せず、ファンデルワールス力のような長距離力が支配的なこの距離領域で大きな摩擦力が観測されたのは初めてで

ある。

過去の摩擦力顕微鏡でも非接触領域での摩擦力は観測されているが、その大きさは本研究の結果に比べ数桁以上小さい。またこれまでに理論的に提案されている非接触摩擦の発現機構(ファンデルワールス力、金属表面電荷、表面フォノン等の効果)では、過去の結果も含め観測された摩擦力を説明することは出来ない。本研究で得られた巨大な非接触摩擦力の起源解明は、広く摩擦現象の理解に貢献すると期待され、現在鋭意検討を進めている。

また、超伝導転移に伴って期待される摩擦力の変化は、現在まで観測されていない。これについては更に研究を進めている。

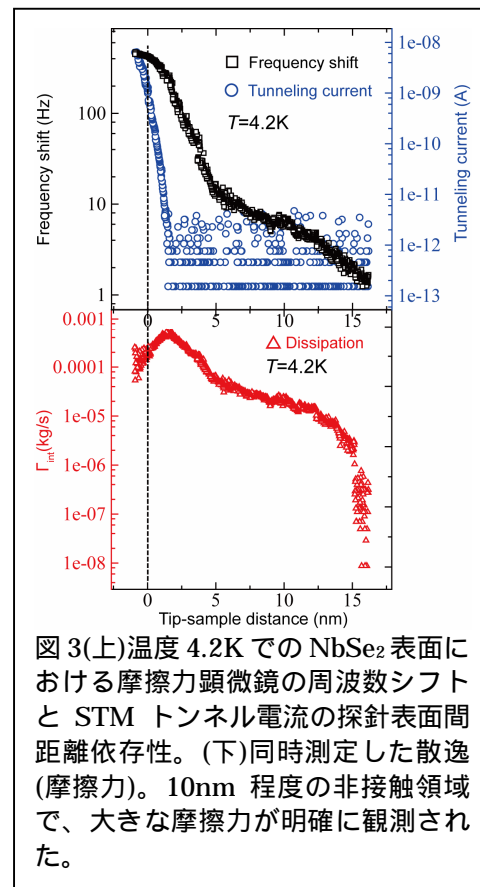


図 3(上)温度 4.2K での NbSe₂ 表面における摩擦力顕微鏡の周波数シフトと STM トンネル電流の探針表面間距離依存性。(下)同時測定した散逸(摩擦力)。10nm 程度の非接触領域で、大きな摩擦力が明確に観測された。

(3) 超流動液体ヘリウムのナノスケール物性研究への応用

グラファイト(HOPG)を試料とする摩擦力顕微鏡を密閉容器に入れ、液体ヘリウムを導入することで、2.1K 以下の超流動状態で数十ナノメートルの厚みの液体ヘリウム薄膜がグラファイト基盤表面を覆う状況をつくる。この薄膜の粘性等、ナノスケールでの動的性質を摩擦力顕微鏡で調べることを試みた。これまでに行った実験では、約 2K でヘリウム

薄膜の超流動転移に伴うと思われる周波数と散逸の変化を観測した。ヘリウムの超流動特性をナノスケールで測定したのは初めてであり、更に研究を進めている。

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3件)

1. Kohta Saitoh, Kenichi Hayashi, Yoshiyuki Shibayama, Keiya Shirahama, A low temperature scanning probe microscope using a quartz tuning fork, Journal of Physics: Conference series, 査読あり、150巻、012039_1-4頁、2009年
2. Kohta Saitoh, Kenichi Hayashi, Yoshiyuki Shibayama, Keiya Shirahama, A current to voltage converter for cryogenics using a CMOS operational amplifier, Journal of Physics: Conference series, 査読あり、150巻、012016_1-4頁、2009年
3. Kohta Saitoh, Kenichi Hayashi, Yoshiyuki Shibayama, Keiya Shirahama, Development of a low temperature scanning probe microscope, Journal Low Temperature Physics, 査読あり、150巻、4号、561-566頁、2008年

[学会発表](計15件)

1. 齋藤広大, 柴山義行, 白濱圭也, 極低温原子間力顕微鏡を用いたナノスケール摩擦の測定、摩擦の科学 2009、2009年12月3日、名古屋
2. 齋藤広大, 柴山義行, 白濱圭也, 非接触領域における極低温ナノスケール摩擦の研究、日本物理学会秋季大会、2009年9月26日、熊本大学
3. Kohta Saitoh, Yoshiyuki Shibayama, Keiya Shirahama, Nano scale friction on a superconductor surface by low temperature scanning probe microscopy, International Symposium on Quantum Fluids and Solids 2009, 2009年8月6日、米国ノースウェスタン大学
4. 齋藤広大, 林賢一, 柴山義行, 白濱圭也, 極低温走査プローブ顕微鏡を用いた超伝導体表面におけるナノスケール摩擦の測定、日本物理学会第64回年次大会、2009年3月29日、立教大学
5. 林賢一, 齋藤広大, 柴山義行, 白濱圭也, A current-to-voltage converter for cryogenics using a CMOS operational amplifier、科研費「特定領域研究」スーパークリーン物質で実現する新しい量子相の物理：研究成果報告会、2008年12月19日、奈良市新公会堂

6. 齋藤広大, 林賢一, 柴山義行, 白濱圭也, Application of a low temperature scanning probe microscope to studies of the superfluidity of 4He、科研費「特定領域研究」スーパークリーン物質で実現する新しい量子相の物理：研究成果報告会、2008年12月19日、奈良市新公会堂
7. 齋藤広大, 林賢一, 柴山義行, 白濱圭也, Nano-scale friction on a superconductor surface by scanning probe microscopy、科研費「特定領域研究」スーパークリーン物質で実現する新しい量子相の物理：研究成果報告会、2008年12月19日、奈良市新公会堂
8. 齋藤広大, 林賢一, 柴山義行, 白濱圭也, 極低温原子間力・水平力顕微鏡の開発、日本物理学会2008年秋季大会、2008年9月23日、岩手大学
9. 林賢一, 齋藤広大, 柴山義行, 白濱圭也, CMOS-OP アンプを用いた低温電流プリアンプ、日本物理学会2008年秋季大会、2008年9月23日、岩手大学
10. Kohta Saitoh, Kenichi Hayashi, Yoshiyuki Shibayama, Keiya Shirahama, A low temperature scanning probe microscope using a quartz tuning fork, 25th International Conference on Low Temperature Physics, 2008年8月9日、アムステルダム国際会議場
11. Kenichi Hayashi, Kohta Saitoh, Yoshiyuki Shibayama, Keiya Shirahama, A current to voltage converter for cryogenics using a CMOS operational amplifier, 25th International Conference on Low Temperature Physics, 2008年8月9日、アムステルダム国際会議場
12. 齋藤広大, 林賢一, 柴山義行, 白濱圭也, 水晶振動子を用いた極低温走査プローブ顕微鏡の開発、日本物理学会第63回年次大会、2008年3月24日、近畿大学
13. Kohta Saitoh, Kenichi Hayashi, Yoshiyuki Shibayama, Keiya Shirahama, Development of a Low Temperature Scanning Probe Microscope, International Symposium on Physics of New Quantum Phases in Superclean Materials, 2007年10月30日、長良川国際会議場
14. 齋藤広大, 林賢一, 柴山義行, 白濱圭也, 水晶振動子を用いた極低温走査プローブ顕微鏡の開発、東京大学物性研究所短期研究会「低温走査トンネル顕微鏡の現状と展望」、2007年10月12日、東京大学物性研究所
15. Kohta Saitoh, Kenichi Hayashi, Yoshiyuki Shibayama, Keiya Shirahama, Development of a Low Temperature Scanning Probe

Microscope, International Symposium on
Quantum Fluids and Solids 2007, 2007年8
月4日、カザン大学(ロシア)

〔その他〕

研究室 URL:

<http://www.phys.keio.ac.jp/guidance/labs/sirahama/sirahama-lab-jp.html>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

白濱 圭也 (SHIRAHAMA KEIYA)

慶應義塾大学・理工学部・教授

研究者番号: 70251486

(2) 研究分担者

該当なし

(3) 連携研究者

柴山 義行 (SHIBAYAMA YOSHIYUKI)

慶應義塾大学・理工学部・講師

研究者番号: 20327688