

## A04 超伝導磁束量子系をモデルに用いた界面摩擦現象における非平衡ゆらぎの役割の解明

東京大学大学院総合文化研究科 前田京剛

東京大学大学院総合文化研究科 加藤雄介

東京大学大学院総合文化研究科 鍋島冬樹

### 1. 研究の背景・目的

摩擦現象の機構の理解・制御は工学・理学の様々な側面で重要である[1]。界面摩擦現象を支配しているのは界面およびその近傍での原子の集団運動の非平衡揺らぎであり、その理解が界面摩擦現象の最終理解につながるが、それは、未だ達成されていない。この問題に主に実験的に挑むにあたり問題となるのは、摩擦現象の実験では磨耗のために再現性のよい繰り返し実験が困難だということである。これに対して、我々は、固体電子系が低温で示す量子凝縮相の集団運動が摩擦の物理の絶好のモデル系になることに注目し [2, 3]、以下を目的とした研究を行った。すなわち、(1)外力で駆動された超伝導体磁束（ボルテックス）格子系のダイナミクスを界面摩擦現象のモデル系とみなし、(2)界面摩擦の微視的理解の鍵を握ると考えられる、原子の集団運動の非平衡揺らぎの役割を調べるために、磁束格子系のマイクロ波・ミリ波領域での複素伝導度スペクトロスコピーを行う。(3)理論の助けを借りて、これらの実験結果を解釈する。(4)これにより、界面摩擦の物理の微視的理解を完成させる。その結果、例えば、巨視的な物体の界面摩擦では良く知られた経験則であるアモントン・クーロンの法則の成立条件が完璧に理解でき、さらに、摩擦の制御についての提言も行える。

### 2. 全体の研究計画概要

(1)界面摩擦が発生している状態での界面とその近傍における原子の運動（集団運動の非平衡揺らぎ）を理解するために、超伝導体磁束格子の複素交流伝導度を、駆動バイアスのある場合、ない場合それぞれで測定し、そのスペクトルを解析することで、原子の集団運動の非平衡揺らぎについての情報を得る。不純物置換や欠陥照射等の手法で様々なピン止め状態の試料を用意し（これは、さまざまな清浄度の界面を用意することに対応）、データを比較することで、原子の集団運動の非平衡揺らぎと摩擦力のマクロな振る舞い（速度依存性や待機時間依存性）との関係を明らかにする。(2)理論の助けを借りて、実験結果の解釈を行う。以上により、(A)界面摩擦現象を微視的に完全に理解し、(B)それに基づき、マイクロマシンやナノマシンの摩擦を制御するための具体的方法を提言する。

### 3. 期間中の実施内容

(1)超伝導体結晶試料の用意:Nb 薄膜をスパッター法で作製し、超伝導特性を評価した。

(2)駆動電流印加の可能な、伝送線共振器の設計・制作

作製した Nb 薄膜を微細加工し、図 1 のような伝送線共振器（長さ 4mm、厚み 100nm）を設計・製作した。加工に先立ち、電

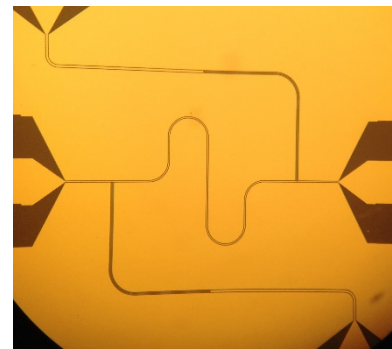


図 1 Nb 伝送線共振器

磁界解析シミュレーターを利用して、Q 値、共振周波数、駆動電流導入アームの有無による共振特性の変化を調べ、実際の加工パターンを決定した。実際の加工は、通常のウェットエッチングによった。

### (3) 共振器の共振特性の測定

7.9GHz、3.7GHz の二種類の共振器を作製し、共振特性の測定を行った結果、Nb が超伝導の状態では Q 値が 2000-3000 となった。これらの値は直流導入端子を有するものとしては従来の先行研究の報告に十分比肩しうるものである。

### (4) 直流駆動電流の効果

直流駆動電流を印加した状態で共振特性を測定した。この場合、ジュールヒーティングの効果を避けるため、駆動電流は矩形パルスの形で与え、パルスの平坦部に対して共振特性を測定した。図 2・3 に示すように、臨界電流に対応するところから共振特性が変化し、特に、磁束格子の運動による抵抗値  $R$  が緩やかに増加することが分かった。さらに、この増分は、周波数がいわゆるクロスオーバー周波数に近い程大きくなることが分かった。これらの一連の知見は本研究で初めて得られたものである。現在、これらについても解釈を検討しているとともに、さらなるデータセットの充実を目指している。

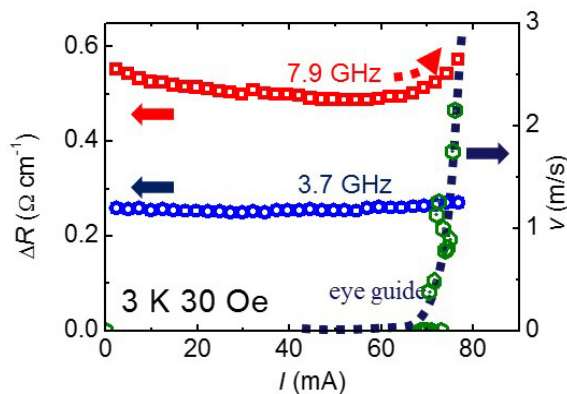


図 2 交流抵抗の駆動電流依存性 (右側の磁束の速度)。

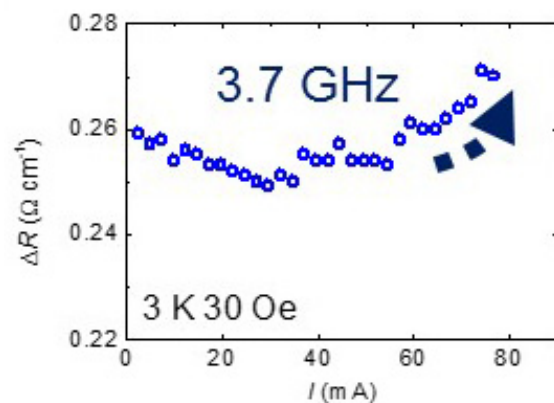


図 3 3.7 GHz における交流抵抗の駆動電流依存性の拡大図。

## 4. まとめ

短い期間内に、当初目的に沿った形で研究を開始することができた。今後、時間・空間分割の手法等を導入することなどで、より充実したデータセットの取得を目指すとともに、結果の理論的解釈にも注力し、当初目的の達成に向けてさらに研究を継続したい。

### 参考文献：

- (1) 例えば、前田京剛：表面科学 30 (2009) 580-586、及びその中の引用文献。
- (2) A. Maeda *et al.*: Phys. Rev. Lett. 94 (2005) 077001/1-4.
- (3) D. Nakamura *et al.*: J. Phys. Cond. Matter 22 (2010) 445702/1-7.
- (4) 黒川穂高ら：2017 年春の物理学会 (大阪大学) (17aD32-2) .
- (5) 黒川穂高ら：2018 年春の応用物理学会 (早稲田大学) (19pB401-10) .
- (6) 黒川穂高ら：2018 春の物理学会 (東京理科大学) (22aK508-7) .