

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う。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ソン・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。これにより、界面摩擦現象が微視的に理解されたことになる。(2)実験結果の正確な理解の助けとなるのは、理論であり、その結果も、実験の解釈に補助的に利用する。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. 本年度の実施内容

(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。加工用マスクの作製は外注し、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

作製した共振器の共振特性を、Nb が常伝導の状態、超伝導の状態それぞれで測定した。図 2 に、直流電流導入線付きの共振器の超伝導状態での共振特性を示す。共振周波数は 15.5 GHz で、2.94 K (超伝導状態) の Q 値は、ゼロ磁場下、50G で、それぞれ、290, 260 であった。Nb 共振器に関するこれまでの文献では、さらに 1 桁以上高い Q 値が報告されているので、共振器の形状や幾何学的配置を最適化して、さらなる Q 値の改善をする必要がある。

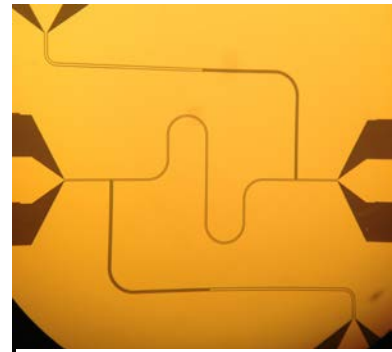


図 1 Nb 伝送線共振器

(4) 直流駆動電流の効果

試みに、(3)と同様の測定を、直流駆動電流を印加した状態で行ったところ、図 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する振る舞いが観測された[4]。更に磁場下の測定で磁束量子の運動のどのようなパラメーターを抽出できるかは、次年度以降の課題である。

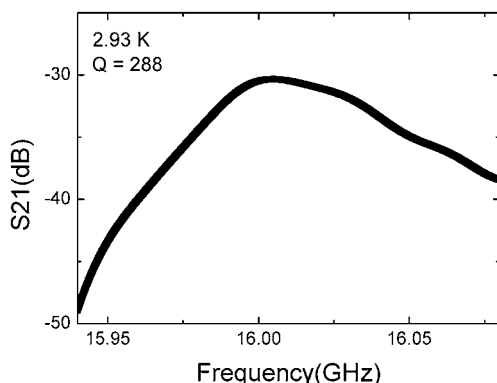


図 2 作製した伝送線共振器の共振特性 (2.93 K)

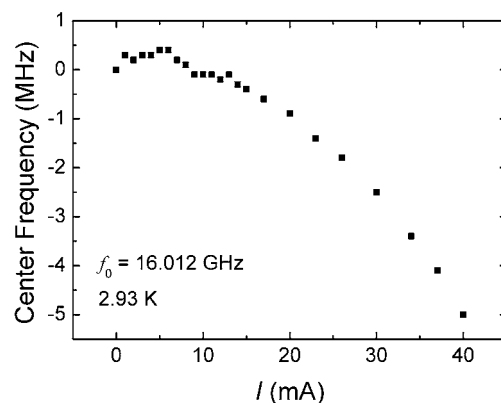


図 3 共振周波数の逆数の電流依存性 (2.93 K)

4. 本年度のまとめ

本年度はほぼ当初計画に沿って、研究を進めることができたが、本来の目的である、界面摩擦の物理に対するマイクロゆらぎの効果については、何も言及できていない。次年度、さらに共振特性を改善させ、また複数の周波数での測定を行い、スペクトルが得られるようにして、摩擦の物理の議論に結び付けたい。

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) で発表予定 (17aD32-2) .