

# 論文の内容の要旨

## 論文題目 走査型トンネル/マイクロ波顕微鏡 の高感度化と低温応用

氏名 高橋 英幸

銅酸化物高温超伝導体の擬ギャップ領域で空間的に不均質な電子状態が実現していることが走査トンネル顕微鏡(STM)を用いた研究で明らかになったように、近年の物質科学においては、ナノスケールの空間分解能で局所的に物性測定を行う重要性が増している。

一般に、物性の発現には物質中の素励起のダイナミクスが大きく寄与するので、その特徴が明らかになれば、多くの問題の解明に向けて重要なステップとなる。固体中の電子や素励起のダイナミクスは複素交流電気伝導度に(電子の場合はマイクロ波領域)集約されるため、その測定は有効な手段である。しかし一般的なマイクロ波応答測定法では空間的不均質性に関する情報は平均化されてしまうので、不均質な系の研究には適さない。しかし近接場を利用した局所的なプローブである走査型マイクロ波顕微鏡(SMM)を応用することで、局所マイクロ波応答が測定可能となる。とくに近年、STMや原子間力顕微鏡(AFM)と組み合わせることによって、試料表面近くで高い精度でマイクロ波プローブを制御することが可能になり、従来のSMMよりも高い空間分解能での観察が可能となった。しかしこれまで報告されているSMMは適用できる試料の条件が非常に限られており、より物性研究への貢献度の高い装置として用いるためには、以下のように解決しなければならない課題が多くあった。

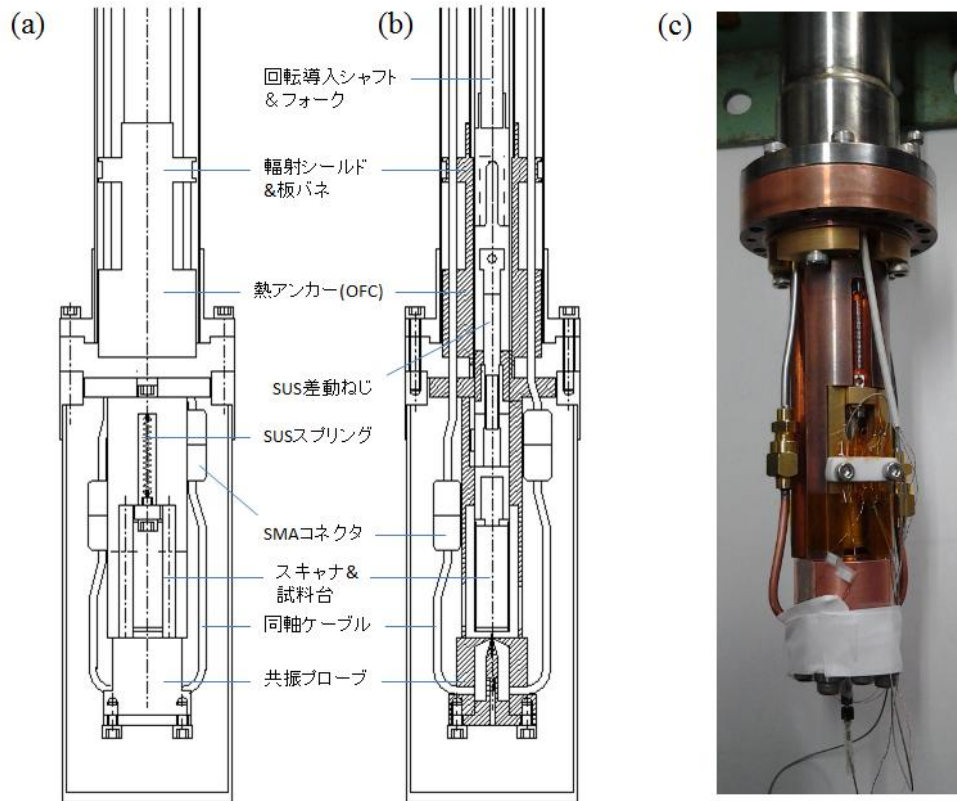


図 1. 開発した低温 STM-SMM の(a)側面図。(b)断面図。(c)写真。

1. マイクロ波応答検出感度が低く、高分解能化や定量測定の障害となっている
2. 低温での長時間の安定動作が難しい
3. 共振プローブの有用な解析モデルが確立していない
4. 得られるマイクロ波応答の像は表面形状と試料の電気特性の影響が混じり合う。したがって表面形状の影響を軽減する技術が開発される必要がある

そこで従来の SMM よりも高感度かつ液体ヘリウム中での安定な動作が可能な低温 STM-SMM を開発しこれらの問題を解決することを目的として研究をおこなった。

従来の STM-SMM で高い感度が得られない原因は、STM との複合化によって SMM としての性能が制限されているためと考えた。また、安定度の面では、小型化により低温部にプローブ全体を収めることができれば、熱的安定性が飛躍的に上がると予想された。このようなコンセプトのもとで、新たなタイプの STM-SMM プローブを開発した。

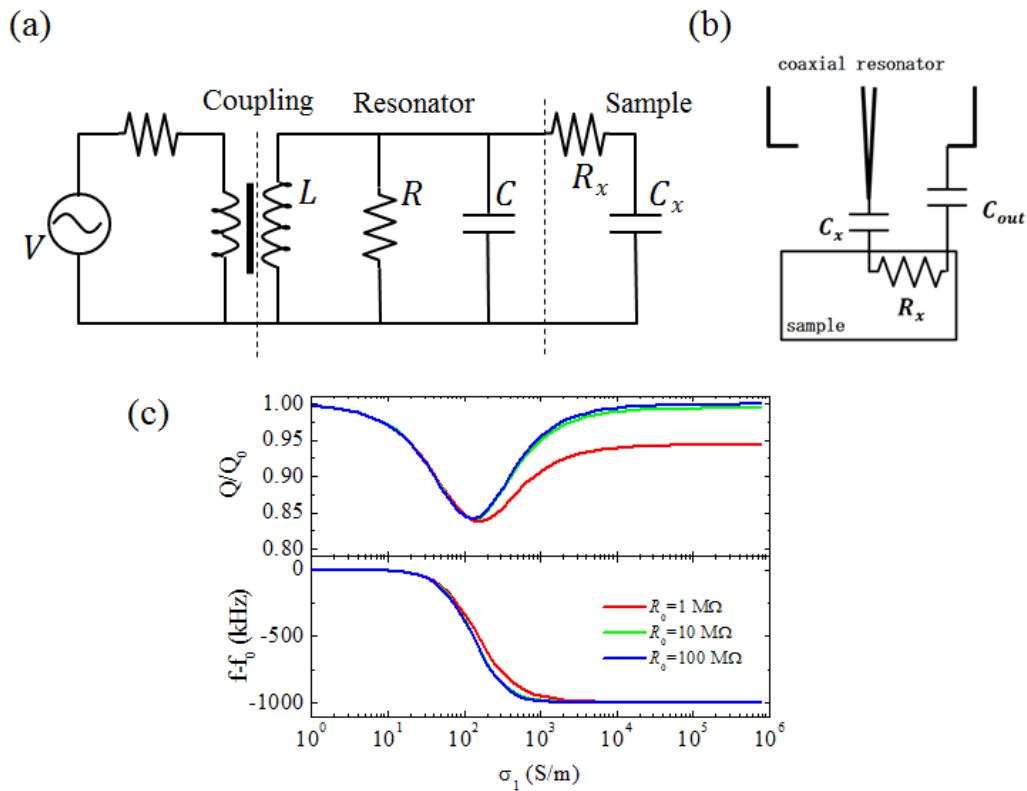


図 2. (a) TEM3  $\lambda/4$  モード同軸共振器の等価回路モデル。(b) 探針-試料で構成されるインピーダンスネットワーク。(c) 探針曲率を 100 nm としたときの試料伝導度に対するプローブの共振特性の変化。 $R_0$  は本研究で定義した結合インピーダンス。

図 1 は本研究で開発した装置である。最下部は TEM3  $\lambda/4$  モード同軸共振器となっており、中心導体に STM 探針を取り付け外部導体の開口部から突き出すことにより、トンネル電流と近接場マイクロ波応答を同時検出する。試料の電気特性についての情報は共振プローブの  $Q$  値と共振周波数の変化から得られる。これまで同様のタイプの低温 STM-SMM としては  $Q \sim 400-600$  程度のものの報告があるが、本装置はよりコンパクトかつ大幅に高  $Q$  値 (共振周波数約 10.7 GHz、室温で  $Q > 1000$ 、4.2 K で  $Q = 2300-2500$ ) となっている。この開発により上記の 1、2 の問題を大きく改善する結果を得た。

解析モデルとしては、共振器と等価な RLC 並列共振回路を導き、探針-試料で形成されるインピーダンスネットワークが接続された時の特性変化を議論することで共振器プローブの振舞いを理解できることを計算と実験を交えて示した (図 2)。そして金属試料の測定の際には、近接場インピーダンスに加えて探針-試料間に付加的な抵抗性負荷として働く機構 (結合インピーダンス) を考慮する必要があることを示した。

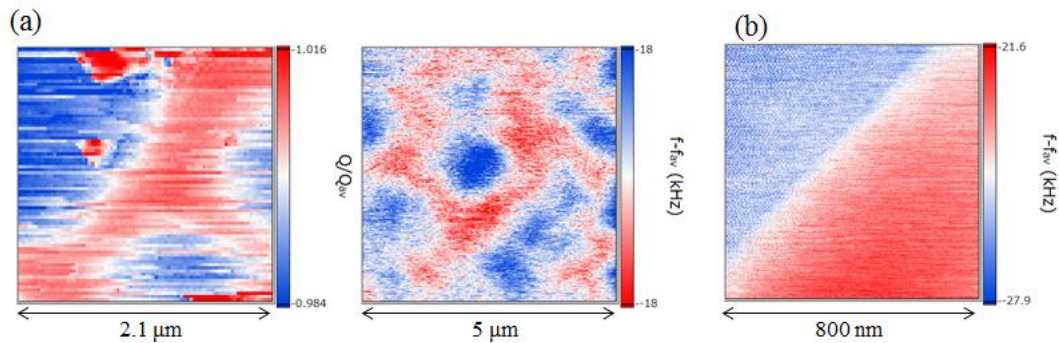


図 3. (a)室温における  $K_xFe_ySe_2$  結晶中の不均質性のイメージング。(左) 定電流モードで取得した  $Q$  像。(右) 定  $Q$  値モードで取得した共振周波数像。青が半導体領域で赤が金属領域に対応している。(b)液体ヘリウム温度で観測した  $FeSe_{0.33}Te_{0.67}$  の不均質性。青が超伝導領域、赤が非超伝導領域に対応している。

高感度 SMM を開発し、有用な解析モデルを構築したことで、不均質超伝導体の研究に応用することが可能になった。また、不均質超伝導体  $K_xFe_ySe_2(x \sim 0.8, y = 1.6 \cdot 2)$  の観察の過程で、 $Q$  値を一定にした走査モードで動作させることにより、定電流モードで伝導度の変化を検出する障害となっていたトポグラフのコントラストを低減したイメージングが可能になることを見出した。その結果  $K_xFe_ySe_2$  の金属相と半導体相の相分離を  $200 \text{ nm}$  の空間分解能で明確に観測することに成功し、この物質でマイナー相が金属的伝導を担っていることの直接的な証拠を得た(図 3(a))。

また、液体ヘリウム温度における  $FeSe_{0.33}Te_{0.67}$  の観察では、超伝導と金属領域を分けて観測することに成功し(図 3(b))、SMM が低インピーダンス試料の測定でも有益な情報を引き出せることが示された。

本研究で達成した高感度化と低温測定への応用により、SMM の幅広い分野への応用可能性が示された。将来的には、STM-SMM で  $100 \text{ nm}$  を切る空間分解能を達成するため、そして金属試料からの局所応答を定量的な議論を可能にするために、清浄な試料表面が用意できる超高真空環境の導入が必要になる。これが実現すれば、本研究のきっかけとなった銅酸化物の不均質電子状態や渦糸コア内電子状態の研究へとさらに前進すると期待する。