

## 2012年度（高圧物理学研究室）

私達のグループでは、銅酸化物における高温超伝導の発現機構に関する知見を得ることを目的として、幾つかの研究機関・グループと共同で以下に記す1~3の実験を行い、銅酸化物高温超伝導体の電子物性について詳しく調べている。また、本学工学研究院応用物理学部門・トポロジー理工学研究室と共同でカルコゲナイド系擬2次元電子物質のSTM/STS実験(4)を行っている。4に関するこれまでの研究では、その代表物質の一つであるTiSe<sub>2</sub>において、カイラル電荷密度波（charge-density waves : CDW）というCDWの積層構造に関する新奇な秩序を見出してきた。今年度は、カイラル電荷密度波がVSe<sub>2</sub>でも存在することを明らかにし、その両者の特徴の違いについても詳しく調べた。

1. Bi<sub>2</sub>Sr<sub>2</sub>CaCu<sub>2</sub>O<sub>2(8+δ)</sub> (Bi2212) とBi<sub>2</sub>Sr<sub>2</sub>CuO<sub>2(6+δ)</sub> (Bi2201) における走査トンネル顕微鏡 (STM) を用いたトンネル分光 (STS) 実験 (室蘭工業大学との共同研究)
2. La<sub>2-x</sub>Sr<sub>x</sub>CuO<sub>4</sub> (La214) における中性子散乱実験および角度分解光電子分光実験 (スイス連邦工科大学ポールシェラー研究所との共同研究)
3. Bi2212におけるポンプ・プローブ分光実験 (本学工学研究院応用物理学部門・戸田研究室およびスロベニア・ヨゼフステファン研究所ミハイロヴィチ・グループとの共同研究)
4. 擬2次元電子物質TiSe<sub>2</sub>およびVSe<sub>2</sub>のSTM/STS実験 (本学工学研究院応用物理学部門・トポロジー理工学研究室との共同研究)

これらの研究の中でBi2212銅酸化物高温超伝導体のSTM/STS実験で得られた結果について、その概要を以下に記す。超伝導転移温度 ( $T_c$ ) より高温からフェルミ面上のゾーン境界点 (アンタインード) を中心に発達するギャップ様構造 (擬ギャップ) は、高温超伝導体に特有の現象であり、その発現機構との関係から大きな注目を集めている。STM/STS 実験から、アンタインードでの擬ギャップの大きさ $\Delta^*$ は試料表面の場所によって異なり、超伝導ギャップの大きさを $\Delta_0$  として、 $\Delta_0$  から $2\Delta_0$ 程度まで不均一に分布することが知られている。また、 $\Delta^*$ が大きな試料では、CuO 面に格子定数の約4倍の周期を持つ (チェッカーボード模様の) 電荷秩序が明瞭に現れる。したがって、擬ギャップとチェッカーボード様電荷秩序は密接に関係しているものと考えられる。しかし、これまでのBi2212におけるSTM/STS実験では、電荷秩序と擬ギャップの関係に関して矛盾する結果が報告されており、両者の関連性を考える上で大きな障害となっている。その一つは、電荷秩序が観測されるエネルギー領域に関するもので、電荷秩序は主に擬ギャップの内側のエネルギー領域で現れるという結果と、逆に擬ギャップの外側のエネルギー領域に現れるという全く異なる結果が報告されていたことである。また、電荷秩序の周期に対立する結果 (エネルギー (STM 実験のバイアス電圧 $V_b$ ) と共に変化する・しないという結果) が報告されていた。上記の問題が起る可能性として、電荷秩序の観測に用いられた局所状態密度 (local density of states : LDOS) 像を得る際に行なわれる規格化の方法が考えられる。LDOS 像は試料表面を覆うように多数の点でSTS スペクトル (LDOSのエネルギー ( $V_b$ ) 依存性) を測定し、ある特定のエネルギーのLDOS を画像化することで得られる。しかし、高温超伝導体のように局所的な電子状態が測定点によって大きく異なる場合、画像化前にSTS スペクトルを規格化すると考えられるが、この規格化に違いがあると、LDOS 像に現れる電荷秩序の特徴が大きく変わる可能性がある。このような問題を避けるために、私達のグループでは、規格化を必要としないLDOS像 ( $dI/dV$ 像 : 探針の高さを一定に保ちながらSTM測定を行なう際に変調加算バイアスを用いて得られる $dI/dV$ 信号 (ロックイン出力信号) の画像) の測定からBi2212における電荷秩序のエネルギー (バイアス電圧) 依存性を調べ、従来の方法で得られたLDOS 像の結果と比較した。

ホール濃度 $\sim 0.12$ ,  $T_c=72$  Kのアンダードープ試料において $dI/dV$ 像のバイアス電圧依存性を詳しく調べた結果、擬ギャップより小さいバイアス電圧では周期 $4a$ の電荷秩序が明瞭に観測されるが、擬ギャップより大きなバイアス電圧では電荷秩序は非常に弱いことが明らかとなった。また、 $dI/dV$ 像を測定した領域の一部について従来の方法によるLDOS像も調べたが、その際のSTSスペクトルの規格化を擬ギャップの十分外側の高バイアスで行なった低エネルギー（擬ギャップの内側のエネルギー）に関するLDOS像が、同じエネルギーの $dI/dV$ 像に現れる電荷秩序を再現することが分かった。したがって、Bi2212のSTSスペクトルは高バイアスで規格化するのが妥当と考えられる。そこで、高バイアスで規格化されたSTSスペクトルの場所依存性を詳しく調べた。その結果、擬ギャップの内側のエネルギーにおける $dI/dV$ 像（LDOS像）に現れる電荷秩序（変調構造）は、擬ギャップの発達の様子が周期 $4a$ で変動するためであることが分かった。さらに、 $dI/dV$ 像のバイアス電圧依存性から、電荷秩序の周期がエネルギーに依存しないという結果が得られた。このように、今年度のBi2212におけるSTM/STS実験では、従来のLDOS像に加えて $dI/dV$ 像（規格化を必要としないLDOS像）の測定も行なったことにより、電荷秩序の周期のエネルギー依存性や擬ギャップとの詳細な関係が明らかとなった。

## 2012年度（強相関電子磁性Ⅱ研究室）

### 1 スピン偏極走査トンネル顕微鏡

スピン偏極走査トンネル顕微鏡（SP-STM）はナノメートルオーダーの磁性体のスピン分布を評価するために用いられるが、従来の装置では原子レベルで平坦な試料表面が必要であるために単結晶磁性体の観察のみが行われてきた。そこで我々はSP-STMの応用範囲を多くの試料に広げるため、磁化変調方式SP-STMの開発を進めている。これまでFIBで微細加工したCoアモルファス磁性チップと磁気記録ヘッドを組み合わせた磁化変調探針を開発し、凹凸のある多結晶NiFe試料で初めてスピン信号の検出に成功したが、そのSN比は不十分であり、また磁性探針の中には磁化反転が不安定なものもあった。そこで新たにCoアモルファス磁性探針の代わりにMo探針上にNiFe磁性薄膜を成膜した新たな磁性探針を開発し、スピン信号のSN比の向上を図った。さらにこの磁性探針を用い凹凸のある多結晶磁性体薄膜試料においてはじめてバイアス電圧依存性を得ることに成功した。スピン依存トンネル電流の検出実験のためにSi基板の上にNiFeを100 nm成膜した試料を用意した。試料の保磁力は3 Oe程度であり、試料近傍に設置した電磁石により磁化反転が可能である。また、試料は10 nm程度の結晶粒で構成された多結晶状態となっていることをSTM観察で確認した。この試料に交互に磁場を印加したときのロックインアンプの出力信号から、探針磁化と試料の磁化が平行のときと反平行のときの差信号（Spin signal）を得ることができる。この信号のバイアス電圧依存性を図1に示す。ここで、トンネル電流一定（0.09 nA）モードで測定を行っている。バイアス電圧が $-3$  V $\sim 1$  Vと広い範囲でスピン信号はあまり変化していないことが分かる。この結果は多結晶磁性体では初めての測定例であり、広いバイアス電圧領域でスピン信号が大きく変化しないことは磁区観察という観点からは有用である。この結果はNiFeのアップスピンとダウンスピンの状態密度より計算されるバイアス依存性からは説明することができず、トンネル電流の方向を考慮に入れた計算をする必要があると思われる。

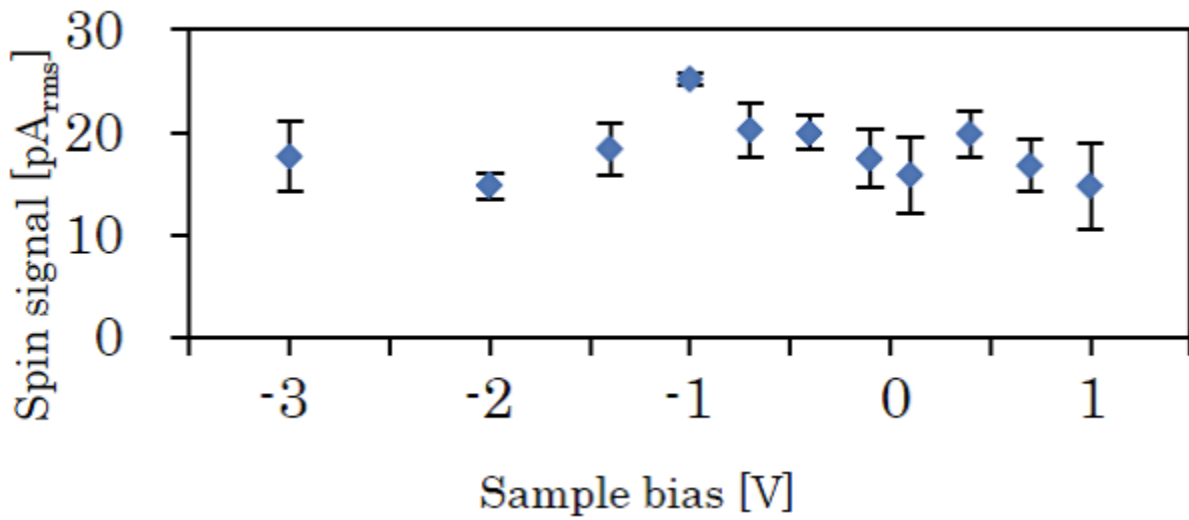


図1 スピン信号の時間依存性

## 2 磁化の2成分検出可能な磁化変調方式SP-STM用磁性探針

磁性体試料の磁化の面内1成分を原子分解能で観察するスピン偏極STM (SP-STM) はすでに実現しているが、磁化の面内2成分を同時に検出するSP-STMはまだ開発されていない。そこで、磁化変調方式で面内2成分を同時に検出することを目的に、探針先端の磁化をx、y方向に反転させる磁性探針の開発を試みた。十字形にエッチング加工した厚さ25 $\mu$ mのCoアモルファス箔を湾曲させて磁路とし、x、y用の2個1組の2対のコイルを図1のように配置した。

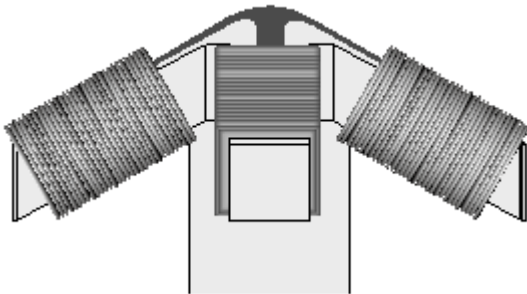


図1 2成分検出用電磁石とCoアモルファス磁路

磁路の交差したところに円錐形状の微小な磁性体を固定して探針とする予定である。磁路の幅は2 mm以下とし、曲率半径10 mm程度で湾曲している。x、y方向用コイルにそれぞれ通電することにより探針先端の磁化を2次元制御する。磁性探針を固定する位置でのCoアモルファスの磁化方向を、偏光レーザー光のKerr効果を利用してその場測定を行った。図2 (a)にxコイルに振幅232 mAの正弦波電流を通電した時のKerr信号の時間変化を示す。

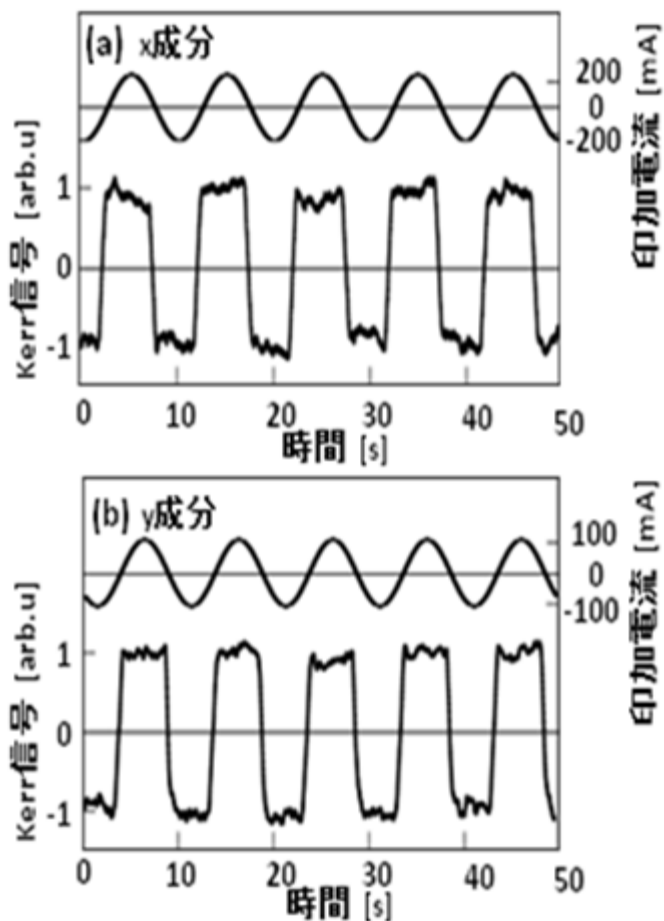


図2 Coアモルファス箔のKerr信号の時間変化, (a): x成分, (b): y成分

コイルへの印加電流に同期した矩形形状のKerr信号が現れており、磁化がx方向に反転していることが分かる。印加電流はKerr信号が十分飽和する値とした。同様にyコイルに振幅126 mAの正弦波電流を通電した時の結果を(b)に示す。xと同様、磁化がyコイル電流に同期して反転していることが分かる。