

2011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、今年も昨年に引き続き以下に記す1~4の実験により、銅酸化物高温超伝導体の電子物性について詳しく調べた。また、昨年度より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擬2次元電子系物質 TiSe_2 のSTM/STS実験（5）を行っているが、今年度はカイラル電荷密度波（Charge-Density-Wave : CDW）と呼ばれる電子系の新奇な秩序における点欠陥周囲の電子状態を調べ、その周囲で観測されるフリーデル振動にCDWのカイラリティと関係して2種類のもの（右回りと左回り）が存在することを明らかにした。

1. $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_{(8+\delta)}$ (Bi2212) と $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CuO}_{(6+\delta)}$ (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
2. 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. Bi2212における電子ラマン散乱実験（室蘭工業大学との共同研究）
5. 擬2次元電子系物質 TiSe_2 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）

以上の研究の中から、Bi2212銅酸化物高温超伝導体のSTM/STS実験とポンプ・プローブ実験で得られた結果について、その概要を以下に記す。銅酸化物高温超伝導体の大きな特徴の一つは、擬ギャップと呼ばれるギャップ様構造が T_c より高温の T^* 付近から低温で電子系のエネルギー・スペクトルに形成されることである。擬ギャップは、その発見当初（1990年代初め）から、「超伝導ギャップの前駆的な現象か、あるいは、超伝導とは競合する新たな秩序（隠れた秩序）によるか」を巡って活発に議論されてきた。これまでの角度分解光電子分光 (ARPES) 実験から、擬ギャップは k -空間のゾーン境界に位置する $(\pi, 0)$ 近くのフェルミ面に T^* 付近から形成され、擬ギャップ状態 ($T_c < T < T^*$) でのフェルミ面は $(\pi/2, \pi/2)$ 付近を中心とするアーク状（フェルミ・アーク）になることが知られている。私達のグループは、1999年と2000年に公表したBi2212のSTM/STS実験に関する論文で、擬ギャップが $(\pi, 0)$ 付近のフェルミ面に開くのに対して、超伝導転移に実効的な d 波の超伝導ギャップ（有効超伝導ギャップ）は主にフェルミ・アーク上に T_c より低温で形成されることを指摘した。このような2種類のギャップが一つのフェルミ面を分けて形成されること（フェルミ面の二分性）は、最近のARPESの結果とコンシステントである。また、STM/STS実験では、ギャップの空間的不均一や新奇な電荷秩序が観測されており、これらの現象は“フェルミ面の二分性”との関係から精力的に研究されている。私達のグループは、Bi2212における最近のSTM/STS実験で、 $(\pi, 0)$ 付近のフェルミ面（アンタイ・ノード領域）に形成される擬ギャップにはエネルギー・スケールの異なる2種類のものがあり、大きなエネルギー・スケール（超伝導ギャップの数倍）の擬ギャップは（静的な）電荷秩序に由来すること、また、電荷秩序が著しく発達する試料では、擬ギャップがナノメータ・スケールで空間的に不均一であることを明らかにしてきた。不均一な擬ギャップを伴った電荷秩序は、 T_c より低温でも存続し、フェルミ・アークで起こる均一な超伝導と実空間で共存する。フェルミ・アークに形成される有効超伝導ギャップの大きさ Δ_{sc} （低エネルギーのSTSスペクトルに見られる均一なギャップ構造のエネルギー幅として定義される）は、キャリア（ホール）濃度が T_c 最大（90K）の最

適ドープから少しアンダードープ ($T_c \sim 65\text{K}$) までの範囲で、d波超伝導に関するBCS理論の結果とほぼ一致すること ($2\Delta_{sc} \sim 4k_B T_c$) も示してきた。今年度は、ホール濃度領域をこれまでより広げてBi2212の Δ_{sc} を測定し、ヘビー・アンダードープの試料 ($T_c \sim 40\text{K}$) でも Δ_{sc} が T_c とスケールして小さくなることを確認した。このことは、フェルミ面を二分して形成される擬ギャップ (アンタイ・ノード領域) と超伝導ギャップ (ノード領域 (フェルミ・アーク)) が競合関係にあることを強く示唆するものである。一方、最近行ったBi2212の光誘起超伝導・非超伝導転移における準粒子ダイナミクスに関するポンプ・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) では、高強度のポンプ光超短パルスを試料表面の一部に照射すると、超伝導が局所的に破壊され、同時に擬ギャップ/電荷秩序もある程度抑制されるが、その後の超伝導の形成は擬ギャップ/電荷秩序が元の状態にほぼ回復した時点から始まることを示唆する結果が得られた。したがって、擬ギャップ/電荷秩序は、超伝導と単なる競合関係にあるのではなく、超伝導の発現に必要な電子系の性質と考えられ、その起源の解明は銅酸化物高温超伝導の発現機構を理解する上でますます重要になったと言える。

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。また、これまでのSP-STMはスピンの1成分のみの検出にとどまっているが、2成分検出を可能とすることを将来的な目標に掲げている。これまで磁性探針の磁化を磁気記録ヘッドを用いて反転させる手法を開発しており、これを用いて本年度凹凸のある多結晶磁性体薄膜試料においてスピン信号の検出を試みた。図1に磁化変調方式のSP-STM装置の模式図を示している。

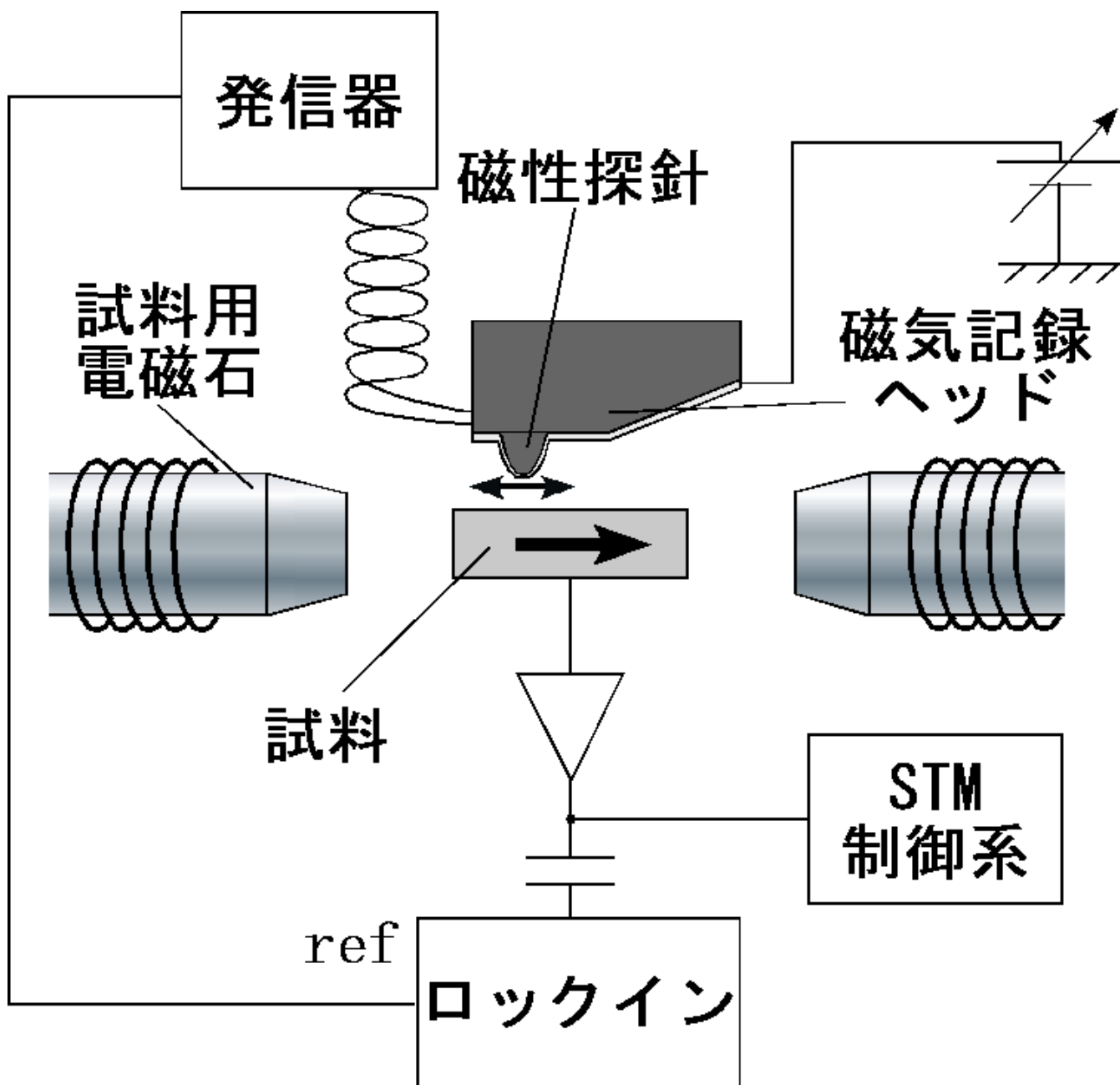


図1 磁化反転方式SP-STMの概略図

磁気記録ヘッドの電磁石に交流電流を流すことにより、磁性探針の磁化は周期的に反転する。試料と磁性探針の間に流れるトンネル電流は距離だけではなく両者のスピンの方向にも依存しており、そのトンネル電流のスピン依存成分をロックインアンプを用いて検出する。試料用電磁石から生じる磁場により試料の磁化を反転させることが可能であり、試料磁化反転と共にロックインアンプの信号も反転することが期待される。図2はSi基板上にNiFe磁性体を100 nm蒸着した多結晶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であるスピン信号を示している。

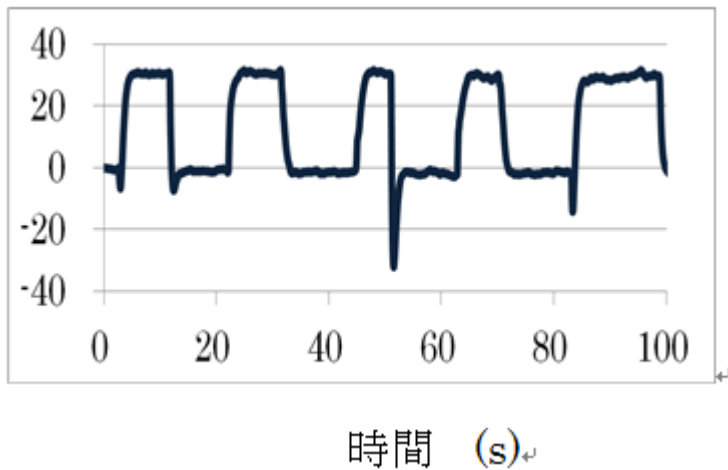


図2 スピン信号の時間依存性

スピン信号はおよそ35 pArmsと小さくはあるものの、試料磁化の反転に伴いスピン信号が増減することが観測された。また、磁場をこれとは垂直に印加したとき、スピン信号がでないこと、および非磁性試料でもスピン信号がでないことも確認した。さらにハードディスクに使用されている媒体にFeを40 nm蒸着した試料を用意し、そのスピン像の観察を試みた。これは媒体の記録ビットから漏れ出る磁場によりFe薄膜上にビットイメージが転写されることを期待して用意したものである。図3にこの試料を観察した結果を示す。

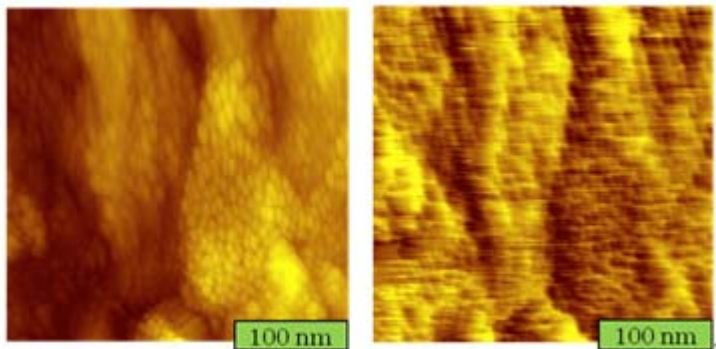


図3 Fe蒸着磁気記録媒体の凹凸像（左）とスピン像（右）

左が凹凸像であり、右がスピン像である。凹凸像から10 nm程度の媒体の結晶粒を判別することができ、分解能は2 nm程度に達している。スピン像にはビット像とは異なるが、試料の凹凸とは異なるコントラストを確認することができる。現在我々はこのコントラストをスピン像と判断している。これは多結晶磁性体試料で初めてSP-STM観察した例である。またこの試料はArスパッタークリーニングしたもので、アニール等の処理は行っていない。このような試料のSP-STM観察もこれまで報告されていない。現在、本装置には試料の粗動機構が組み込まれていないため、視野を大きく移動して観察することができない。そのため、試料上磁気記録された場所に移動することができず、ビットイメージの観察にはまだ成功していない。

2 磁化の3成分の同時観察可能な μ -MOKE

マイクロメータ領域の磁化の3成分のヒステリシスループを測定することを目的に、磁気Kerr効果を利用した μ -MOKE磁性評価装置の開発を行った。これは磁化変調方式SP-STM用磁性探針評価のために現在使用している。図1に今回開発した μ -MOKE装置を示す。3成分同時測定するため、光軸に対して4回対称に配置したパーチャーでレーザー光を分割し、試料へ4回対称に入射させる。試料からの反射光を4分割された光検出器で検出し、2対の光強度信号から磁化のx、y成分に対応するKerr回転角 θ_x 、 θ_y を同時に測定する。さら

に磁化のz成分は光検出器の和信号から θ_z を決定することができる。Kerr回転角は光弾性変調器（PEM）を用いた光学遅延変調法によって高精度に検出を行っている。図2はNiFe薄膜のヒステリシスのx、y成分をそれぞれ μ -MOKE装置で測定したものであり、印加磁場（ $\pm 1650\text{e}$ ）方向の角度依存性（x軸からの角度）を示している。縦軸は磁化反転した際のKerr信号の差である。 θ_x （ θ_y ）がcos（sin）的に変化していることが分かる。

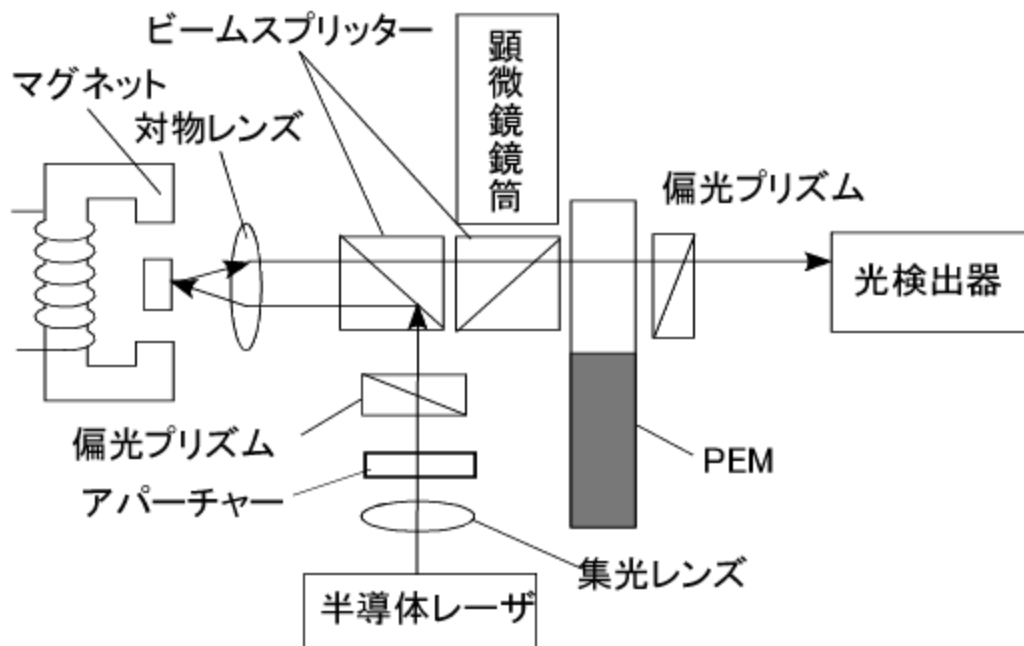


図1 Kerr回転角のヘッド電流依存性

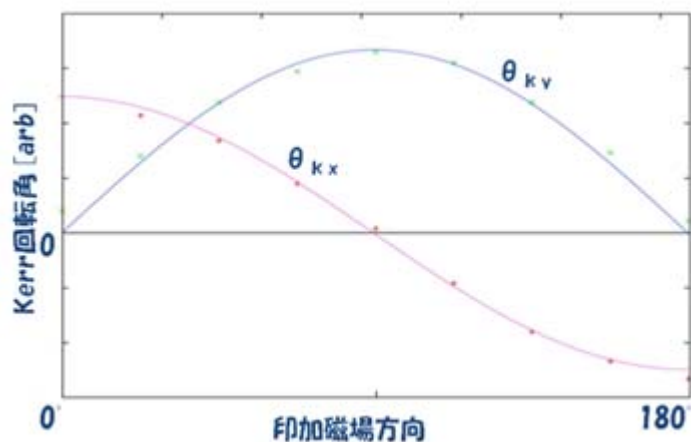


図2 Kerr回転角のヘッド電流依存性