

—位相の微細解像による磁束量子の直視—
外村彰 株式会社日立製作所 フェロー

高温超伝導体は無損失導電材料として実用的に利用するには、磁束量子のピン止めが最重要課題である。しかし、磁束量子も欠陥もともに極めて小さいために、磁束量子が欠陥にピン止めされたり脱離する様子は、これまで直接観察することは出来なかった。本 CREST の研究によって高干渉電子波を用いたローレンツ顕微鏡法を用いることによって高温超伝導体の動的観察の可能性が開かれた。さらに高温超伝導体ならではの挙動を解明すべく開発を続けてきた“100万ボルト電子波干渉型電子顕微鏡”が2000年春に完成し、現在、サンプルを自在に回転傾斜でき、かつ任意の方向が磁場を印加できる低温試料ステージを取り付け、実験を行っているところである。シンポジウムでは、その結果をも報告する予定である。

高温超伝導体中の磁束量子の動的観察

300kV の電子顕微鏡を用いて高温超伝導体 Bi-2212 の磁束量子の動的観察の実験を行った。

磁束量子は、ニオブなど低温超伝導体では見たこともない、高温超伝導体ならではの振舞いを見せた。その動きは、温度や磁場によって様々な変化を示す。最も顕著なのは、温度 25K の上下で見せた動的な振舞いである。

25K 以下の温度では、すべての磁束量子がゆっくりとほぼ同じ速度で動いた (図 1(a))。温度を下げると速度が急激に遅くなり、当初はまったく動いていないのではないかと見誤ったほどである。

ところが 25K 以上になると、これまでゆっくり動いていた磁束量子が、特定の場所にピン止めされ動かなくなる。さらに力を増すと、時々急に“ホッピング”して $50\mu\text{m}$ 以上も素早く移動する (図 1(b))。空席になった欠陥には、再び磁束量子がやってくるので、像は明滅しているように見える。そこに、磁束量子をピン止めするピンニング・センターが新たに生じたかのように見える。

“なぜ温度を変えただけで磁束量子の動きがこうも変化し、ピンニング・センターが新たに生じたのだろうか？”—我々は、ピンニング・センターが何であるかを直接観察によって、同定するには至っていないが、以下のような解釈をした。

25K 以下では、磁束量子は高温超伝導体ならではの振舞いを示す。すなわち、厚さ 2000\AA の薄膜を貫く磁束量子は、100 個もの密に分布した原子サイズの欠陥 (酸素欠陥などの可能性がある) によって集団的にピ

ン止めされる。磁束量子に力を加えると、熱振動の助けを借りて、欠陥から一斉に脱離するわけではないが、欠陥一つ一つから脱離し新しい欠陥にピン止めされながら、結果的に少しずつ移動していく。これが磁束量子がゆっくりと平行移動する理由である。この様子は磁場を強くしても変わらない。

温度を上げると、熱振動の効果が増大し、欠陥から脱離の確率が急激に大きくなるために、ピン止め力が弱まり磁束量子の移動速度が高まる。ところが 25K まで達すると、事情が変化する。小さな欠陥ほど、また多くの欠陥で集団的にピン止めされているほど、熱振動の影響は顕著に現われるので、原子的サイズの欠陥によるピン止めは急激に減少する。一方、低温で影を潜めていたもう少しサイズの大きなピンニング・センターが、高温領域で姿を現し、磁束量子の動きを支配するようになったと考えられる。

この実験により、高温超伝導体中の磁束量子の常伝導芯が極めて細いために、高温超伝導体中に高密度で存在する原子的オーダーの欠陥（酸素欠陥など）によって集団的にピン止めされ、特異な動きをすることが捉えられた。とはいえ、高温超伝導体は層状構造をしているため、さらに特異な振舞いが予測されている。例えば層に平行に磁場をかけた時、磁束量子は層間に潜り込み断面は楕円形となり、層を横切る方向には動きにくくなる。斜めに磁場をかけた時には、磁束線がジグザグになったり、温度が上がると層毎に分かれてパンケーキになり独立に動き出すという。その姿をじかに捉えたいために、100 万ボルトの電子顕微鏡を開発したのである。

100 万ボルト電子波干渉型電子顕微鏡の開発

図 2 に示した装置によって、磁束量子の磁場直径よりも厚い高温超伝導体を観察出来るようになっただけでなく、 $2 \times 10^{10} \text{ A/cm}^2 \cdot \text{ster}$ というこれまで得られたことのない高い電子輝度と単色性 $\Delta E/E = 5 \times 10^{-7} / \text{分}$ を有する電子線が実現した。これは厚いサンプル中の磁束量子を詳細に観察するのに有利なだけでなく、レンズ収差で抑えられている電子顕微鏡の分解能向上にも寄与し、事実、この装置によって 0.5 \AA を切る格子分解能記録を達成している。

現在、極低温のサンプルを傾斜回転で任意の方向から磁場を印加できるステージを取り付けて、層状構造などを反映した磁束量子の挙動を明らかにする実験を進めている最中である。

文献

- 1) T. Kawasaki, T. Yoshida, T. Matsuda, N. Osakabe, A. Tonomura, I. Matsui and K. Kitazawa: "Fine crystal lattice fringes observed using a transmission electron microscope with 1-Mev coherent electron waves" Appl. Phys. Lett.

76 No.9(2000) 1342-1344.

2) 外村彰: “高温超伝導がここまで見えるー動き回るミクロの磁束量子”
科学 69(1999)p.429-434.

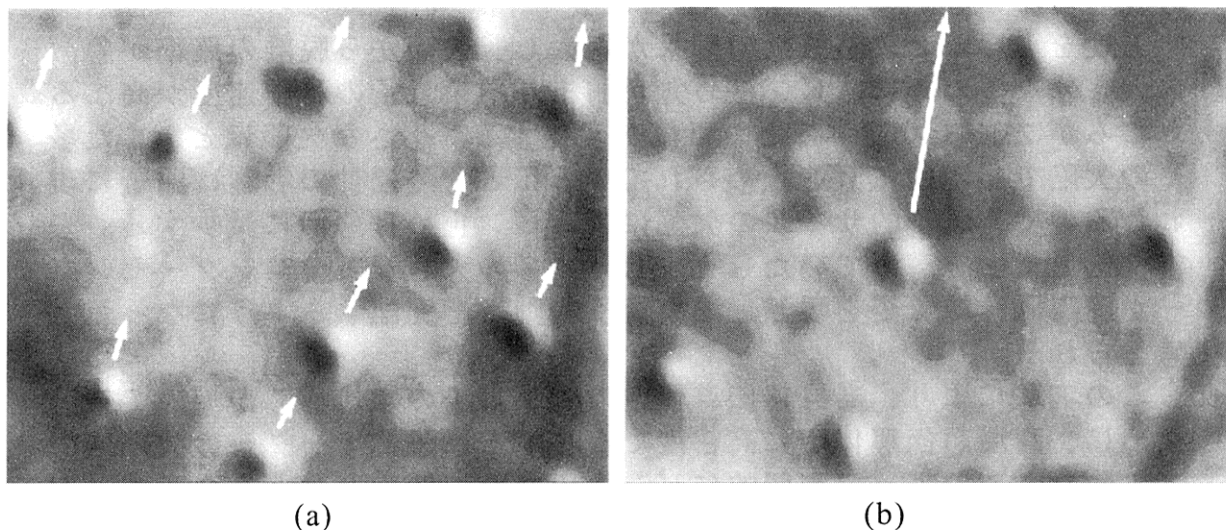


図 1. ローレンツ顕微鏡による Bi-2212 薄膜中の磁束量子の動的観察
磁束量子の動きはとりわけ温度によって変化し、25K 以下の低温では極めてゆっくりと磁束量子が平行移動 ((a)T=20K) するが、25K 以上になると、磁束量子は特定の点に捕捉されるようになり、力を加えると急にホッピングして姿を消す ((b)T=30K)。

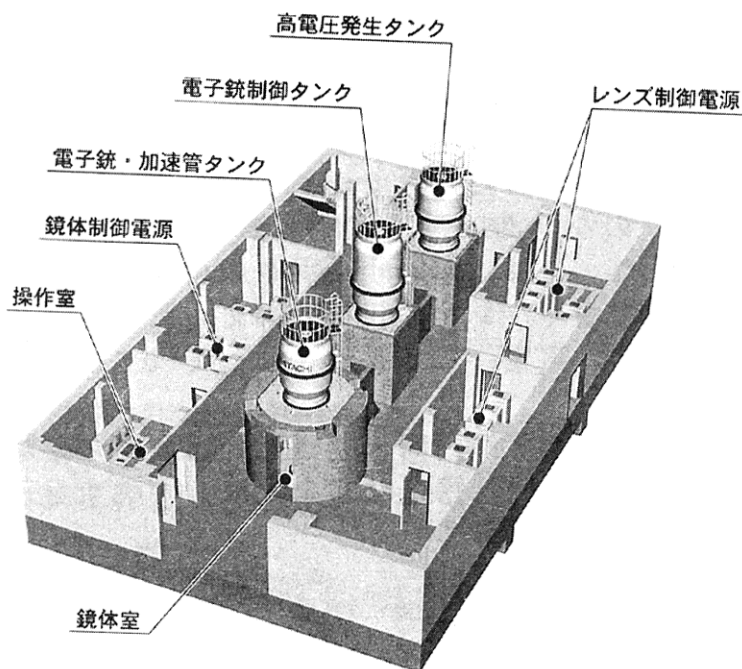


図 2. 100 万ボルト電子顕微鏡