

## 電子波の位相と振幅の微細解像

### —原子位置指定トンネル分光装置の開発と超伝導のコヒーレンス—

北澤宏一 東京大学新領域創成科学研究科物質系専攻教授

<当初目的> ナノテクノロジー時代の観測ツールとして有力な原子位置指定トンネル分光装置を開発し、その偉力を高温超伝導のコヒーレンス観測に活用し、ピン止め機構の解明に役立てる。

<主な成果> 1.原子位置指定トンネル分光装置の性能を段階的に高め、超高真空・極低温・強磁場を同時に実現し、かつ、*in-situ* で試料表面処理を行える *Version* を初めて設計、完成した。2.この装置により、高濃度 Pb ドープ Bi2212 系における高臨界電流 (ピン止め) の機構を解明した。3.高温超伝導体に不純物をドーピングし、原子の個々を解像することに成功し、不純物原子クラスターの存在、不純物が形成する電子状態のエネルギー分布を測定することに成功した。4.高温超伝導体中でのボルテック分布に線状分布、複数磁束量子の集合などこれまで知られていない異常があることを見出した。5.高温超伝導に独特な新たなピン止め機構として「擬ギャップ由来ピン止め機構」を提唱した。6.組成の異なる単結晶を系統的に多数合成し、電磁氣的測定を行い、高温超伝導全体にわたる磁気相図における「ユニバーサル・スケール則」を提唱した。

#### 1. 原子位置指定トンネル分光装置：

現時点で超高真空・極低温・強磁場を同時に実現した装置は海外で発表されておらず、国内では本装置開発が基となって、他の研究機関にも類似装置が納入され稼動を始めた。

現在、到達温度 300mK の実現を目指した最終調整段階にある。

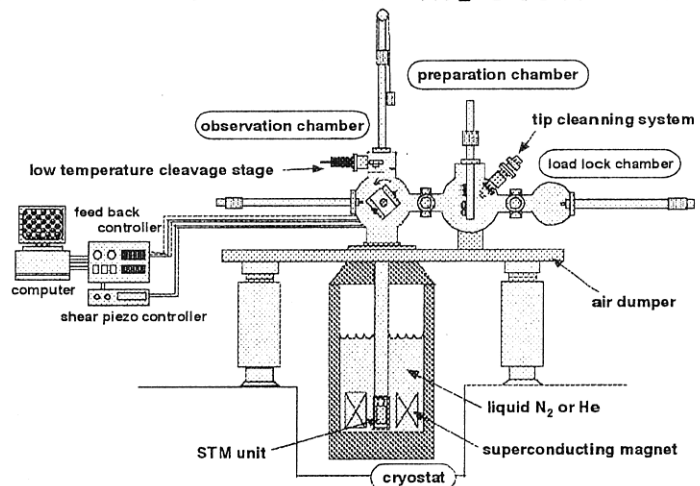


図 1. 開発された原子位置指定型トンネル分光装置

2.本グループの発見した「高臨界電流超伝導体」である高濃度鉛ドーピング Bi2212 系の高臨界電流密度メカニズムの概略が判明した：1)鉛ドーピングによりキャリア数が増大せずに、BiO 面をよぎる伝導性が上昇する。このため異方性が約 1 桁も低減する、2)異方性低減により、ボルテック

スのピン止めポテンシャルが上昇する、3)さらに強力なピン止めサイトとして、第2相析出物がラメラ状あるいは格子状に出現し、ピン止めを有効にする。3)この析出構造は界面で超伝導オーダーパラメタが1nm程度で急峻に変化し、ピン止めに非常に有効である。4)ピン止め中心として、臨界温度がやや低く、しかし、超伝導凝集エネルギーの大きな第2相の存在があり、これが高温での臨界電流を高めている。

3. 高温超伝導体中にドーブされた不純物原子として Pb、Ni、Co について個々の原子の解像とそれら不純物原子がフェルミ準位に対してどのようなエネルギー準位に電子状態を形成するかを明らかにすることができた。Pb は Bi サイトを置換して BiO 面上に存在する。Co は数個の原子の集合したクラスタとして存在する。

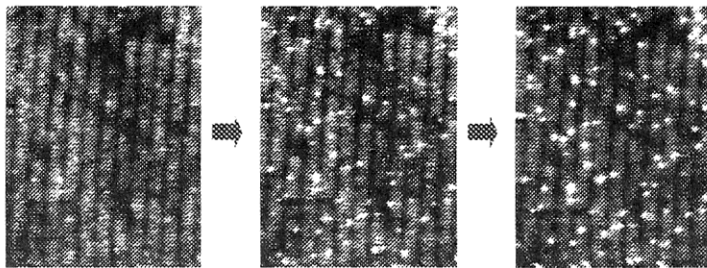


図4. モジュレーションを伴う Bi2212 面上の Ni 原子における電子状態密度はフェルミ面よりエネルギーが高くなるにつれ増大する(300-900mV)

図5. Co 原子は数個ずつのクラスタを形成し、フェルミ準位より 400mV 以上高いエネルギーに電子準位を与える

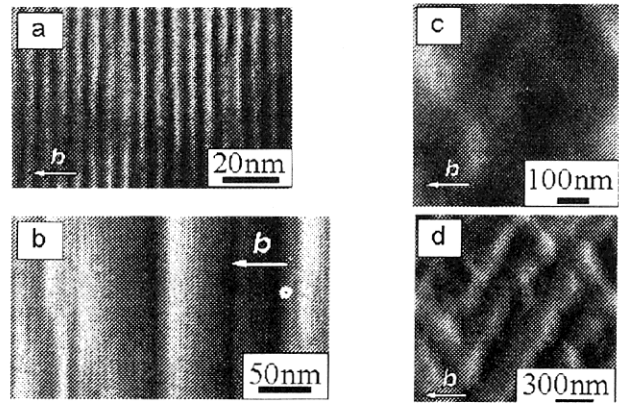


図2. Bi(Pb)2212 単結晶の微細構造の変化。  
(a)  $x=0.4$  : TEM 像、(b)  $x=0.6$  : STM 像(ラメラ構造)、(c)  $x=0.6$  : STM 像(バブル構造)、(d)  $x=0.6$  : STM 像(ジグザグ構造)

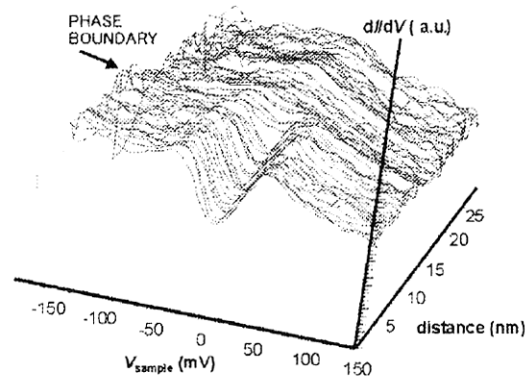
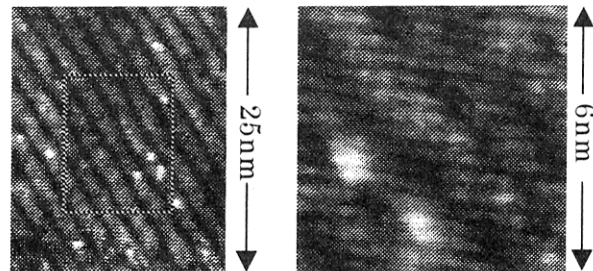


図3. 第2相析出界面付近で超伝導ギャップスペクトルが変化するようにほぼ1nmでスペクトルは急峻に変化している



4. 高温超伝導中でのボルテックス分布に線状分布など従来知られていない異常があることを見出した。不純物ドーピング試料で見られるもので、磁束量子は単独でなく、数量子単位が集合して1箇所が存在する。また、結晶方位と特有な方位に配列する。このことは $\mu\text{m}$  オーダーの不純物原子の偏析を示唆する。

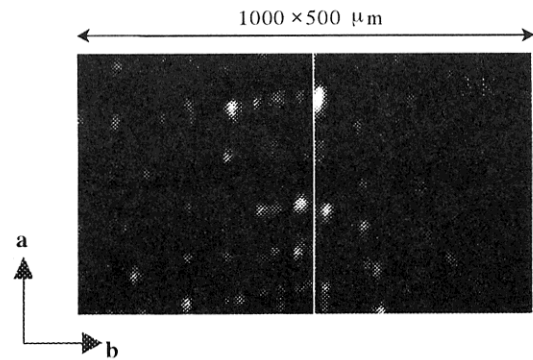


図 6 2%のコバルトをドーピングしたBi2212単結晶では1-3単位の磁束量子がトラップされ、ab磁区方向あるいは45度方向に分布することが見られた(走査型SQUID像)

5. 高温超伝導に独特な新たなピン止め機構として「擬ギャップ由来ピン止め機構」を提唱した。これは図3の観測に基づいて提出されたもので、高温超伝導体において、臨界温度は等しくても、ドーピング・レベルの異なる2つの相を相互に連結析出させることで高臨界電流を実現するための手段として注目した。超伝導凝集エネルギーが両相において異なることを利用する。この機構が高濃度鉛ドーピング系で実現している可能性を示唆した。

6. 実用に向けた高臨界電流の実現のために、高温超伝導の異方性と磁気相図との関連の解明が重要である。本研究では磁気相図においてボルテックス格子融解、不可逆磁場、ボルテックス構造の次元クロスオーバーの3つの重要な境界線が存在することを指摘し、その3線ともに異方性係数 $\gamma$ により物質に関わらずユニバーサルにスケールされることを実験的に定式化し、重要な経験則として提起した。

1)ボルテックス格子メルティング

$$B_{\text{pl}}(\text{Oe}) = 2.85 \gamma^{-2} d^1 (T_c/T - 1)$$

$d$  (cm) は  $\text{CuO}_2$  面間隔

2)不可逆磁場

$$H_{\text{irr}}(\text{Oe}) = 1.0 \times 10^8 (\gamma^2)^{-1.1} (1 - T/T_c)^{1.5}$$

$$= H_0 (1 - T/T_c)^{1.5} \quad 0.4 < T/T_c < 0.6$$

$$H_{\text{irr}}(\text{Oe}) \propto (1 - T/T_c)^{\gamma^0} \quad \text{低温側}$$

3)次元クロスオーバー線

$$H_{2\text{D}-3\text{D}}(\text{Oe}) = 2 \times 10^{-7} \gamma^{-2} s^{-2}$$

$s$  はブロッキング層を介しての $\text{CuO}_2$ 層間隔

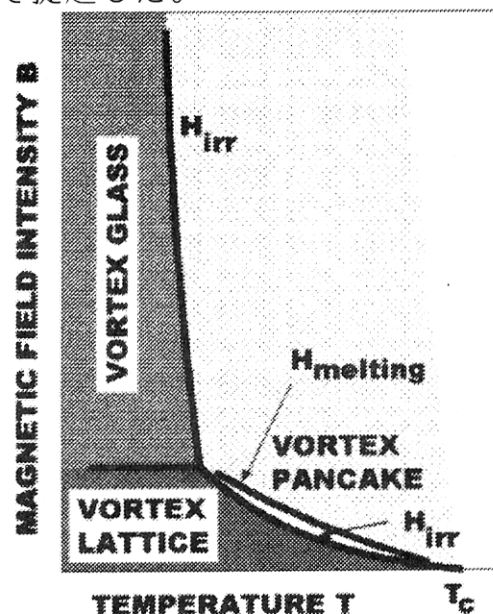


図 7. 高温超伝導に普遍的に見られた磁気相図