

研究課題別事後評価結果

1. 研究課題名: 電子波の位相と振幅の微細空間解像手法の応用展開

2. 研究代表者名及び主たる研究参加者名:

研究代表代行 花栗 哲郎(理化学研究所 前任研究員)

主たる研究参加者

外村彰(株式会社 日立製作所 フェロー)

岸尾光二(東京大学 教授)

下山淳一(東京大学 助教授)

長谷川哲也(東京大学 教授)

野原実(東京大学 助教授)

3. 研究内容及び成果:

本研究は、先行の『電子波の位相と振幅の空間微細解像』プロジェクト(戦略的創造研究推進事業:CREST)で開発した干渉型電子顕微鏡及び走査型トンネル顕微鏡(STM)を、それぞれ電子波の位相及び振幅に敏感なナノスケールの電子状態評価装置としてとらえるという視点から高度化し、それらを応用することでナノ物性の発現機構解明と将来の機能性材料のシーズとなるような未知の物性探索を行うことを目的として発足した。

具体的な研究対象としては、高温超伝導体の磁束ピン止めの問題にこれらの手法を適用した。1MV電子波干渉型電子顕微鏡と全方位磁場印加装置を組み合わせ、高温超伝導体の有効なピン止め中心である柱状欠陥にトラップされる磁束の直接観察に成功した。また、結晶の主軸から傾けた磁場下において、異方性の異なる $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_y$ (Bi-2212)と $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$ (Y-123)では質的に異なる磁束構造をとることが明らかとなった。これらは、加速電圧の増強によって磁束の3次元構造が観察できるようになって初めて得られた成果である(外村グループ)。また、バルク試料の磁束観察に有利なSQUID顕微鏡と、精密局所組成分析、構造解析を組み合わせ、 $\text{La}_{2-x}\text{Sr}_x\text{CuO}_4$ (La214)において、わずかな組成ゆらぎが有効なピン止め中心となっていることを見出した。また、Pbを高濃度ドーピングしたBi2212のピン止め中心を、STMを用いたAtomic site tunneling(AST)によって電子状態の立場から明らかにした(長谷川グループ)。様々な酸化物高温超伝導体における系統的な不純物置換効果の実験から、いくつかの不純物が有効なピン止め中心として働くことを発見した。例えば、Bi2212超伝導体の単結晶について、従来不定比であった金属組成を定比に近付けることによる劇的な臨界電流特性の改善を、またPb置換Bi2212単結晶においては同様な改善だけでなく、Cuへの微量不純物置換によっても大きく J_c が上昇すること

を見出した(岸尾・下山グループ)。

これらの磁束系に関する研究に加え、顕微鏡群の物性計測手法としての優位性を示すため、巨大熱起電力、巨大磁気抵抗など興味深い物性を示し、将来のエレクトロニクス材料として囑望されている、強相関電子系遷移金属化合物のSTM観測を強力に推し進め、わずかにドーブされたモット絶縁体 $\text{Ca}_{2-x}\text{Na}_x\text{CuO}_2\text{Cl}_2$ における異常な電子的不均一と、強相関電子系の全く新しい基底状態である電子結晶を発見した。また、その他、多くの強相関電子系化合物の原子分解能STMと走査型トンネル分光(STS)に成功し、本装置がバラエティに富んだ試料の観測に適したものであることを実証した(北澤・花栗・野原・ドラゴグループ)。また、強相関系における物質開発を進め、Co酸化物における熱電特性の改善、新しい熱電材料の発見、また、熱電材料の研究手法にヒントを得たソフト化学の手法を用いて新しい超伝導体を発見した。また、その他の新奇材料開発として、希ガスを内包したフラーレンにおける超伝導を発見した(北澤・花栗・野原・ドラゴグループ、岸尾・下山グループ)。

4. 事後評価結果

4 - 1. 外部発表、特許、研究を通じての新たな知見の取得等の研究成果

電磁波の「位相」の測定に関して、世界一の空間解像度の干渉型電子顕微鏡を作製し、ローレンツの手法で高温超伝導体の磁束量子を観測し、柱状欠陥やその他の欠陥によるピン止めの様子を見たのは世界で始めてである。磁束を観察する方法は色々あるが、磁束の動的挙動を観ることができたのは、他の追従を許さない新しい知見を与える成果である。また、「振幅」の測定では、場所を同定しながら電子密度を測定するトンネル顕微鏡(STM)の改良を進め、高温超伝導体を始め様々な遷移金属化合物のSTM実験を試み、多くの化合物の世界初のSTM像取得に成功した。その中で、ホールを少しドーブした $\text{Ca}_{2-x}\text{Na}_x\text{CuO}_2\text{Cl}_2$ において、絶縁体が超伝導体に変化するところで、電子がチェッカーボード型に分布することを観測し、高温超伝導の機構解明の手がかりを与えた。これらの研究成果は世界の水準を越えている。欲を言えば、「位相と振幅」の本質的な相関効果追求への“試み”があれば申し分ないが、この点は今後期待する。

材料開発については、ピン止め機構を解明し、高臨界電流の超伝導体材料を開発することを、目標とすることで、多くの実用材料設計の指針を得ている。例えば、 Bi2212 の組成の定在比化、乃至は、Pbドーブにより、さらには、 Hg(Re)1223 により、臨界電流の著しい上昇を見出したことは、材料実用化を期待させる成果であり、高く評価できる。

本研究は、CREST研究での干渉型顕微鏡とSTMの建設の応用として認められた継続研究であると判断するが、研究グループと研究対象が多岐に亘ったためか、若干到達目標が明確でなくなり、総花的な結果で終わった点も見られる。しかし、個々の結果に関しては、他の追従を許さぬもの、世界の水準を超えるものが多く、十分な成果が得られていると判断する。

4 - 2 . 成果の戦略目標・科学技術への貢献

得られた成果はいずれも超伝導の分野では極めてインパクトが大きい。特に高温超伝導体の量子化磁束とそのピン止めの直接観察は、超伝導研究者の夢を実現したもので科学的なインパクトは大きい。超伝導以外の波及効果を考慮に入れて今後も重点的に研究開発を進めていくべきものとする。

技術的インパクトとして、実用的な高温超伝導材料の開発の観点から、Bi2212系、Hg(Re)1223系などで、臨界電流上昇のための方針を示したことは、実際の実用材料設計に、基盤研究として与える貢献は大きい。実用材料設計に有用な情報を与えるためにはさらに総合的な研究が必要とされるが、今後、本研究の成果を基に、具体的な高温超伝導線材開発の進展が期待される。

4 - 3 . その他の特記事項(受賞歴など)

1) 北澤宏一研究代表者は2002年5月に科学技術振興機構の専務理事に就任した。これに伴い、継続研究は花栗哲郎研究代表代行のもとに遂行された。

2) 受賞

文化功労者顕彰(2002/11/3), 外村彰

紫綬褒章授章(2002/11/3), 北澤宏一

日本電子顕微鏡学会論文賞(2002/5/14), “Development of a 1-MV field-emission transmission electron microscope”, Journal of Electron Microscopy 49 (2000)

711-718, 川崎猛、吉田高穂、明石哲也、松田強、外村彰、北澤宏一 他

T. Sugioka, M. Shigemori, T. Okabe, S. Horii, J. Shimoyama, and K. Kishio, “Best Scientific Contribution Award”, given by the European Society for Applied Superconductivity, September 18, 2003

堀井滋、応用物理学会講演奨励賞 2003年3月