

審査の結果の要旨

論文提出者氏名 和久 公則

本論文は、題目「低次元銅酸化物の異常金属相の研究」に表現されているように、低次元構造を有する銅酸化物を舞台に、一次元系と二次元系を対比する形で強相関電子の電荷のダイナミックスを実験的に考察し、金属としての異常性を明らかにしたものである。論文は全四章からなる。

第一章では、研究の背景と目的が述べられている。銅酸化物に代表される遷移金属酸化物中の強く相互作用する電子は、極めて多彩な物性を示す。その代表例は高温超伝導酸化物である。ここでは強相関という因子に加えて、次元性という因子が問題をますます困難かつ興味深いものにしていく。本論文では一次元強相関金属の代表として $\text{YBa}_2\text{Cu}_4\text{O}_8$ の二重 CuO 一次元鎖、二次元金属の代表として $\text{Ca}_{2-x}\text{Na}_x\text{CuO}_2\text{Cl}_2$ を取り上げ、一次元系と二次元系の対比を意識しながら、低次元銅酸化物の電荷ダイナミックスに現れる電子相関の効果を明らかにすることを目的とする。

第二章では二次元系である $\text{Ca}_{2-x}\text{Na}_x\text{CuO}_2\text{Cl}_2$ の光学スペクトルと異方的電気抵抗の測定結果をもとに、二次元銅酸素二次元面の電荷ダイナミックスを議論している。まずこれまでの電荷ダイナミックスの問題点、特に擬ギャップ効果をどのように捉えるのかについて、これまでの対立する考え方が簡潔にまとめられている。つぎに、これらの問題に対するアプローチとして、 $\text{Ca}_{2-x}\text{Na}_x\text{CuO}_2\text{Cl}_2$ の物質としての存在の重要性、歪みのない銅酸素に次元面を有すること、高いへき開性が強調されている。

本研究では単結晶の面内抵抗率と面間抵抗率を測定し、世界で初めて CNCOC は抵抗の異方性が 10^4 程度と高温超伝導体の中でも非常に異方性が大きい物質であることを明らかにした。また、面間伝導の半導体的挙動を他の系と比較し、面間伝導と擬ギャップの関係がこの系ではもっとも単純な形では成立しないことを主張した。本論文はこれを、これまで考えられてきたより $\text{Ca}_{2-x}\text{Na}_x\text{CuO}_2\text{Cl}_2$ の擬ギャップがはるかに小さいと推論する。

次に電気抵抗の温度依存性とは相補的な関係にある光スペクトルの詳細な検討を行った。反射率の測定から得られた光学伝導度を拡張 Drude 解析し、エネルギーに依存する準粒子散乱 $\eta/\tau^* \sim 0.3\text{eV}$ 付近に折れ曲がりを見出した。これまでの考え方では、この折れ曲がりには大きな擬ギャップの存在を示唆することになる。本研究はこれを η/τ^* の飽和（準粒子がインコヒーレントになる様子）と考え、関係する物理量の見積もりがこの描像とかなりの精度で符合していることを示した。これらの議論から導き出される描像は、高温超伝導銅酸化物の電荷ダイナミックス、擬ギャップといった鍵となる現象を眺める新しい視点を供する。ドーピングが進むにつれ η/τ^* が小さくなり、キャリアが少しずつ動きやすくなっていく、すなわちコヒーレンスを回復していく様子が観測さ

れた。

第三章では一次元系としての $\text{YBa}_2\text{Cu}_4\text{O}_8$ の磁気輸送現象の実験結果が述べられ、それを元に金属的強相関一次元鎖の電荷ダイナミクスが議論されている。まず、背景と問題意識が簡潔に述べられている。 $\text{YBa}_2\text{Cu}_4\text{O}_8$ はab面方向に広がる CuO_2 面とb軸方向に伸びる CuO 二重鎖がc軸方向に交互に積み重なった構造をしている。この物質のc軸伝導は CuO 二重鎖間の伝導によって支配されるので、c軸で見る限り、この系は理想的な一次元金属である。鎖間の伝導は磁場印加とともに、金属的から非金属的へと変化し、系の次元性を低下させるので磁場誘起次元交差現象と呼ばれる。温度によらない一定の磁場で起きる磁場誘起次元交差現象Gorkov-Lebedのモデルにより説明することが出来るとされてきた。Gorkov-Lebedのモデルとは、 CuO 鎖のキャリアの運動が磁場によって、空間内に閉じ込められることを本質とするもので、電子が古典的な描像で記述できる自由な電子の存在を前提としている。モデルに当てはまるような平均自由行程の長い電子が一次元鎖に存在するのか？が問題意識として提起されている。

Gorkov-Lebedのモデルの範疇では、乱れを導入して電子の平均自由行程を短くすると、閉じ込めが弱められ次元性交差現象が起きなくなること、次元性交差現象が起きる磁場は平均自由行程によらないこと、が予測される。本論文では不純物として非磁性Znを系に導入し、意図的に電子の平均自由行程を短くすることで、Gorkov-Lebedモデルの検証を行った。その結果、二重鎖内の電子の平均自由行程が短くなると、確かに電子の閉じ込めが弱くなるものの、臨界磁場そのものは変化しないことが示された。すなわち、Gorkov-Lebedのモデルが成り立っており、 CuO 鎖のキャリアは驚くほど自由に自由に運動していることが明らかにされた。

第四章では、本論文の結果の総括と討論が行われている。一次元、二次元系ともに、電荷ダイナミクスの新しい側面が明らかにされたばかりでなく、二つを比較検討することによって次元性の効果が浮き彫りにされた。すなわち、強相関の効果との協奏現象により、隣接する電子との絡み合いが小さい一次元系のほうがむしろ電子にとって動きやすい環境を構成しているように見える。

以上、本論文にまとめられた研究は、高温超伝導銅酸化物中の強相関電子の電荷ダイナミクスと擬ギャップの関係について新しい描像を構築すると同時に、一次元系との比較により次元性によって電荷のダイナミクスが質的に変わることを検証した。これらは高温超伝導機構解明、強相関電子の学理構築の重要な基礎を与える。この意味で超伝導工学あるいは強相関エレクトロニクスの発展に寄与するところ大であり、本論文は博士(工学)の学位請求論文として合格と認められる。