

# 審査の結果の要旨

氏名 明比 俊太朗

本論文は、非従来型超伝導相、磁性金属相やモット絶縁相など様々な電子相をとる強相関物質であるルテニウム酸化物のバルクとは異なる、表面特有の電子状態の詳細を超高分解能レーザー角度分解光電子分光 (ARPES) で明らかにした結果を報告したもので全7章から構成される。

第2章ではルテニウム酸化物の基礎物性が紹介されている。まず、非従来型超伝導体  $\text{Sr}_2\text{RuO}_4$  はペロブスカイト型層状構造をもつことと、その非従来型超伝導機構として有力であるスピン三重項超伝導機構が述べられている。続いて、 $\text{Sr}_2\text{RuO}_4$  の Sr に Ca を置換したルテニウム酸化物  $\text{Ca}_y\text{Sr}_{2-y}\text{RuO}_4$  の豊富な電子相が生まれるが、その背後には  $\text{Ca}_y\text{Sr}_{2-y}\text{RuO}_4$  の Ca 置換量の増大とともにペロブスカイト構造内に存在する  $\text{RuO}_6$  八面体の面内・傾斜回転が生じ、強相関が増大するためであることが述べられている。最後に  $\text{Sr}_2\text{RuO}_4$  の表面ではバルクと比べて面内に  $\text{RuO}_6$  八面体が回転するという先行研究が紹介され、表面はバルクより強相関が増大する舞台であると言及されている。

第3章では、本論文で用いた実験手法であり、バンド構造の直接観測を可能にする ARPES の原理がまとめられている。スペクトル関数の導出、及び実験装置の性能や高分解能測定を可能にするレーザーの性能も合わせて述べられている。

続く第4章、5章及び第6章が本論文の主幹部ある。第4章では、 $\text{Sr}_2\text{RuO}_4$  の表面電子状態を観測した研究がまとめられている。まず、バルクよりも強相関が増大すると予測される表面電子状態の ARPES による抽出の難しさが紹介され、バルクとは異なる表面の電子状態を明らかにすることの意義を述べている。実験結果では、放射光 ARPES 測定から  $\sim 13\text{eV}$  以下のエネルギーを用いると終状態効果のため表面電子状態の選択抽出が可能であることが見出され、超高分解能  $7\text{eV}$  レーザーARPES 測定から表面はバルクよりも大きい有効質量と狭いバンド幅を持つことがわかった。すなわち表面ではバルクよりも強相関が増大していることが見出されている。

さらに第5章では、第4章で観測した  $\text{Sr}_2\text{RuO}_4$  の表面バンド上にキック構造として現れる、電子-ボゾンカップリングを詳細観測した研究がまとめられている。 $\text{Sr}_2\text{RuO}_4$  のキック構造が  $\sim 30\text{meV}$  以上に存在するためフォノンが超伝導機構であると言及する報告がある一方で、 $\text{Sr}_2\text{RuO}_4$  のもつ光学フォノンの最低エネルギー  $\sim 15\text{meV}$  を下回る低エネルギーの磁気揺らぎの存在を検証した報告と、表面では特に面内軌道に由来する擬2次元のバンド  $\gamma$  で強磁性揺らぎが増強するという報告があると紹介されている。そのため従来の ARPES では明らかにされていない低エネルギーボゾンと電子との結合を観測する意義が述べられている。超高分解能の  $7\text{eV}$  レーザーARPES 測定を行った結果、2つの擬1次元バンド  $\alpha$ 、 $\beta$  及び擬2

次元バンド $\gamma$ の3つ全てに $\sim 8\text{meV}$ と $\sim 15\text{meV}$ という低エネルギーのキंकが見出された。次いで、キंकを生むボゾンと電子の結合の強さ $\lambda$ の波数依存性を見積もりを通して、 $\sim 8\text{meV}$ 及び $\sim 15\text{meV}$ のキंक構造を生むボゾンを同定するための議論がなされている。 $\sim 15\text{meV}$ のキंकのエネルギーは光学フォノンに照合し、かつ $\lambda$ は1次元的な $\beta$ 及び2次元的な $\gamma$ が同程度で競合するため、そのボゾンを光学フォノンと同定している。一方で $\sim 8\text{meV}$ のキंकのエネルギーは光学フォノンの最低エネルギーを下回っている。見積もった $\lambda$ の値は擬2次元的な $\gamma$ が擬一次元的な $\alpha$ 、 $\beta$ より大きく、表面で増強する強磁性揺らぎである可能性が高いことが示唆されている。

続いて第6章では、第2章で紹介した豊富な電子相をもつ $\text{Ca}_y\text{Sr}_{2-y}\text{RuO}_4$ の表面電子状態を観測した研究がまとめられている。まず $\text{Ca}_y\text{Sr}_{2-y}\text{RuO}_4$ の表面はバルクと $\text{RuO}_6$ 八面体の面内・傾斜回転の振る舞いが異なるため、バルクと異なる電子状態が実現するという先行研究が示されている。7eVレーザーARPES測定の結果、 $\text{Ca}_y\text{Sr}_{2-y}\text{RuO}_4$ のCa置換量 $y$ の増大と共にバルクの $\text{RuO}_6$ 八面体の傾斜回転が増大する領域( $y \geq 1.6$ )から表面の面内軌道に由来する $\gamma$ バンドのバンド幅に顕著な縮小が見られ、面内軌道のホッピングの抑制が見出された。さらに同領域の表面で、フェルミ準位上の準粒子スペクトル強度が急激に減少しはじめ、 $y=1.8$ で強度がほぼ0になり、バルクとは対照的なインコヒーレント状態が生まれていることがわかった。これはバルクの傾斜回転が表面にバックリングを引き起こすためであると考察されている。

最後の第7章では全体のまとめが述べられている。

以上述べたように、本論文はルテニウム酸化物の表面電子状態について、重要な知見をもたらしたものである。なお、本論文の第4、5、及び6章は、近藤猛准教授、越智正之氏、中山充大氏、谷口晴香氏、黒田健太氏、國定聡氏、有田将司氏、酒井志朗氏、生天目博文教授、谷口雅樹名誉教授、中辻知教授、前野悦輝教授、有田亮太郎教授、辛埴教授との共同研究であるが、論文提出者が中心となり実験及び解析を行っており、その寄与が十分であると判断する。

したがって、博士(科学)の学位を授与できると認める。

以上 1978 字