

平成 25 年 6 月 6 日

報道関係者各位

国立大学法人 広島大学

電子に働く力の定量化に初めて成功 ～次世代エレクトロニクス材料の機能解明・新機能探索に新たなツール～

ポイント

- [強相関電子](#)^{※1} 材料中の電子が、電子や格子から受ける効果を、それぞれ定量化することに成功
- 従来の[電子・格子相互作用](#)^{※2} の評価手法の問題点を初めて見出し、その改善方法を導出
- 次世代エレクトロニクス材料の機能の解明や新機能の探索に向けた強力なツールを提示

研究の概要

広島大学 放射光科学研究センター（以下「HiSOR」という）の岩澤英明助教、島田賢也教授、産業技術総合研究所 電子光技術研究部門 酸化物デバイスグループの相浦義弘研究グループ長を中心とする研究グループは、HiSOR の高輝度[シンクロトロン放射光](#)^{※3} を利用した、世界最高水準の分解能の[角度分解光電子分光実験](#)^{※4} により、電子同士が互いに強く避け合う効果（[電子相関](#)^{※1}）と電子が結晶格子の振動から受ける効果（電子・格子相互作用）を定量化することに成功しました。

電子相関と電子・格子相互作用は、電子の運動、ひいては、物質の電気・磁気・光学的性質を決める非常に重要な要素です。しかし電子相関の取扱いは極めて難しく、これまでの研究の多くは、電子相関の効果を漠然と仮定し、電子・格子相互作用の評価を行っていました。今回、研究グループは、電子相関の効果を明確に考慮した上で、電子・格子相互作用を評価しました。その結果、従来の評価方法では、電子・格子相互作用の効果が、著しく過小評価されていたことを見いだすとともに、正しく電子・格子相互作用の強さを評価する手法を初めて導出しました。本手法は、多くの物質に広く適用可能であり、特に、電子相関の効果が大きい強相関電子材料の研究に威力を発揮します。

強相関電子材料は、磁場をかけることで電気抵抗が激減する「巨大磁気抵抗効果」や電気抵抗が低温でゼロになる「高温超伝導」など、置かれた環境によって劇的に性質が変化することから、次世代のエレクトロニクス材料として期待されています。例えば、巨大磁気抵抗素子はハードディスクの磁気ヘッドとして応用・製品化され、近年のハードディスクの飛躍的な大容量化を担っています。また、高温超伝導体を用いた送電ロスの無い高温超伝導ケーブルも実用化への期待が高まりつつあります。

こうした強相関電子材料の優れた性質は、電子相関に加え、電子・格子相互作用などの相互作用が競合・協同的に働いているためです。今後、本手法により、強相関電子材料で働く複数の相互作用の強さを正しく評価できることで、その機能・メカニズムの解明、さらには、相互作用の強さを新しい評価基準とした、次世代電子エレクトロニクス材料の探索・開発が大きく進展することが期待されます。

本研究の成果は、平成 25 年 5 月 31 日、英国 Nature Publishing Group のオンライン科学雑誌『Scientific Reports』電子版 3 巻（記事番号：1930）に掲載されました。掲載論文は下記 URL からどなたでも無料で閲覧することができます。

論文タイトル：`True` bosonic coupling strength in strongly correlated superconductors

著者： Hideaki Iwasawa, Yoshiyuki Yoshida, Izumi Hase, Kenya Shimada,

Hirofumi Namatame, Masaki Taniguchi, Yoshihiro Aiura

掲載雑誌：Scientific Reports 3, 1930 (2013).

論文 URL：

<http://www.nature.com/srep/2013/130531/srep01930/full/srep01930.html>

研究の背景

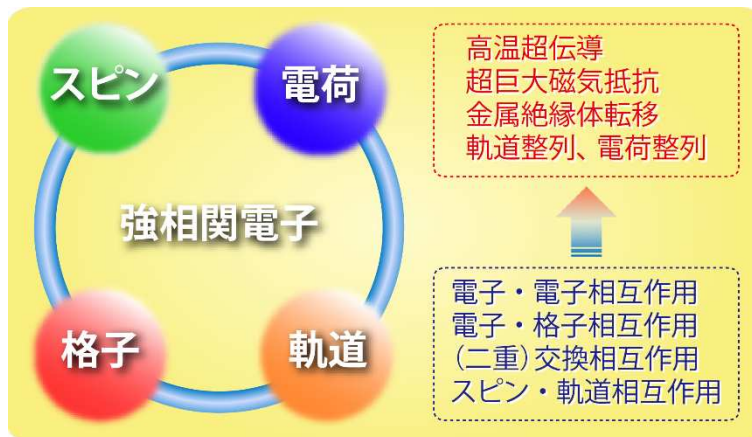


図 1. 強相関電子材料の概念図。

強相関電子では、強い電子相関のために、電子のもつ「電荷」・「スピン」、電子が運動する舞台となる「格子」・「軌道」が物質の性質に大きく関わります。電子はこれらと相互に作用し合い（右下：青字）、強相関電子材料では、劇的な現象が生じます（右上：赤字）。

近年、次世代の電子デバイス材料として、[強相関電子*1](#)材料が大きな注目を集めています。通常の金属や半導体では電子は自由に動き回り、電子の持つ電荷が物質の性質に大きく関わります。コンピュータなど私たちの身の回りに溢れるエレクトロニクス機器の多くでは、この電荷の性質を利用してしています。一方、強相関電子材料では電子相関が強く、電子は自由に動けなくなるために、電子の持つ[スピン*5](#)が物質の性質を大きく左右しはじめます。強相関電子の持つ電荷・スピンに加えて、電子が運動する舞台となる結晶格子の振動や電子軌道からの影響が複雑に絡み合うことで（図 1）、強相関電子材料では、液体窒素温度よりも高い温度で電気抵抗がゼロになる「高温超伝導」や、磁場をかけることで電気抵抗が 1000 分の 1 にまで激減する「超巨大磁気抵抗」といった劇的な現象が発生すると考えられています。したがって「強相関電子がどのように相互作用を受けて運動しているのか？」を明らかにすることが、その機能を解明する上で重要な問題となります。しかし、強相関電子材料では、理論的な予測が非常に困難であることから、相互作用の種類・強さを実験的に定量評価することが望まれていました。

研究の内容

今回、研究グループは、強相関電子材料の代表例の 1 つである、層状ルテニウム酸化物「 Sr_2RuO_4 」について、高輝度シンクロトロン放射光^{※3}を用いた角度分解光電子分光^{※4}という手法により、強相関電子の振る舞い（エネルギー・運動方向の分布）を精密に調べました（図2：実験○）。黒線は電子相関効果を含まない理論計算を表し、赤線は電子相関効果を含んだ理論計算を表します。どちらの計算にも電子・格子相互作用の効果は含まれていません。

図中の「エネルギーの基準点」では、実験値と黒線との差は「①電子相関+電子・格子相互作用」の効果に対応し、理論計算同士の差は、「②電子相関」の効果に対応します。従って、「③電子・格子相互作用」は「③=①-②」であることがわかります。

しかし、従来の研究では、実験値と赤線との差が「③電子・格子相互作用」に対応すると考えられてきました。この時の「②電子相関」の効果は「②=①-③」であり、基準点を正しくとった「②電子相関」よりもかなり大きいものとなっていることがわかります

研究グループは、このように導出方法を見直し、従来の手法で見積もられる電子・格子相互作用の強さ（ $\lambda_{\text{格子}}^*$ ）と電子・格子相互作用の“真”の強さ（ $\lambda_{\text{格子}}$ ）の間には、電子相関の強さ（ $\lambda_{\text{電子}}$ ）を用いて、 $\lambda_{\text{格子}}=(1+\lambda_{\text{電子}})\lambda_{\text{格子}}^*$ の関係式が成り立つことを見出しました。（ $1+\lambda_{\text{電子}}$ ）を考慮した新手法により、③ $=(1+\lambda_{\text{電子}})\times$ ③が成り立つことも確認できました。これにより、強相関電子材料において、電子が受ける電子相関の強さと電子・格子相互作用の“真”の強さを定量化することが可能となりました。

従来の手法では電子・格子相互作用の強さを 0.36 と見積もっていました。本研究の新しい評価法を用いると、この値は $1/(1+\lambda_{\text{電子}})=1/3$ 倍に過小評価されていて、本来は $\lambda_{\text{格子}}=1.1$ という大きな値であることがわかりました。結合の強さが 1 に比べて大きいのか（強結合）、十分小さいのか（弱結合）は、超伝導の起源を考えるうえで重要なポイントです。本研究により電子・格子相互作用は弱結合でなく、強結合であることが初めて明らかになりました。この結果は、弱結合を前提とした理論モデルに再考を促すものです。

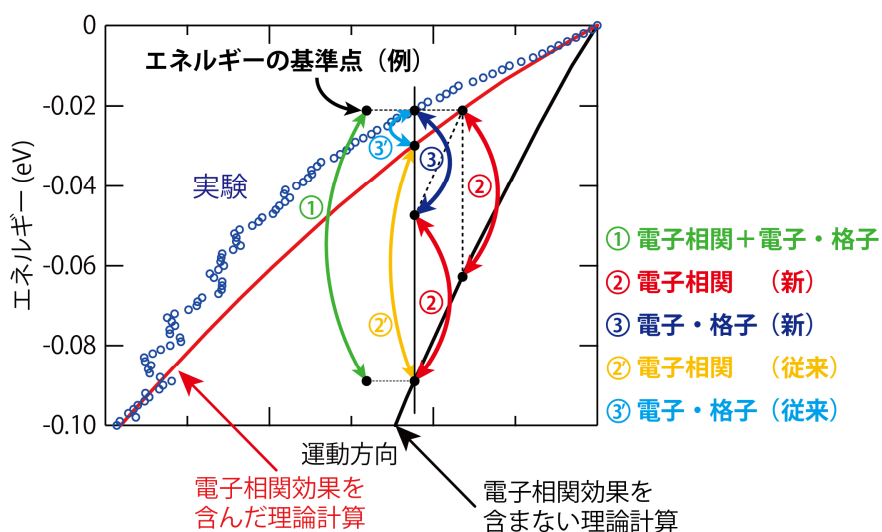


図2. ルテニウム酸化物 Sr_2RuO_4 中の電子の振る舞い

○：角度分解光電子分光実験、黒線（赤線）：電子相関の効果を含まない（含んだ）理論計算

今後の展望

今回の成果は、強相関電子材料中の電子が受ける電子相関と電子・格子相互作用の強さをそれぞれ定量的に評価する「ものさし」をはじめと与えるものです。これまで、強相関電子材料においては、電子相関の強さばかりが目立っておりましたが、今回の成果により、電子・格子相互作用も十分に大きいことがわかりました。このことは、複数の相互作用が競合・協同している様子を表しており、まさに強相関電子材料の本質を浮き彫りにしていると言えます。

今回得られた「ものさし」を活用することで、強相関電子が受ける相互作用の効果を測ることができ、強相関電子材料の機能・性質の理解が大きく促進されます。本手法は、電子相関の効果が大きい強相関電子材料にとりわけ有効であることから、次世代エレクトロクス材料の探索・開発を進める上で、強力なツールとなることが期待されます。

研究体制

本研究成果は、日本学術振興会の科学研究費補助金：若手研究（B）「偏光依存角度分解光電子分光によるマルチバンド強相関物質の微細電子構造の解明」（平成 22～24 年度、研究代表者：岩澤英明）の一環として得られました。本研究は、HiSOR の共同研究委員会により採択された研究課題（課題番号 11-A-8、11-A-9）のもと実験が行われました。

用語解説

※1 電子相関、強相関電子

電子相関は、マイナスの電荷をもつ電子同士が互いに避け合う効果のことです。固体の中では電子は波として振る舞いますが、遷移金属酸化物などでは電子の波としての広がりが小さくなり、原子核のまわりに局在する傾向が強まります。このような電子同士は互いに強く避け合うようになります。強相関電子とは強く電子相関が働いている状態を指します。

※2 電子・格子相互作用

結晶は、プラスの電荷をもつ原子核が周期的に配列して「格子」を組み、マイナスの電荷をもつ電子がその周りを運動して結合をつくっています。プラスの電荷をもつ原子核は互いに反発しますが、マイナスの電子がいることで、安定した構造（格子）を保つことができます。熱を加えると原子核はちょうどバネにつながれたおもりのように振動します。この原子核の熱振動（格子振動）によって力を受け、電子は運動の方向を変化させます。これを電子・格子相互作用と呼びます。

※3 シンクロトロン放射光

電子を光とほぼ等しい速度まで加速し、電磁石によって進行方向（電子軌道）が曲げられた時に電子軌道の接線方向に放射される強い光のことです。HiSOR では、真空紫外から軟 X 線の領域の波長の光を利用して、世界最高水準の精密な角度分解光電子分光実験を行うことができます。

※4 角度分解光電子分光実験

結晶の表面に紫外線を照射して、光電効果により結晶外に放出される電子のエネルギーと運動量を同時に測定する実験手法です。この方法により、固体中の電子のエネルギーと運動量の関係（これをバンド分散といいます）を観測することができます。精密に観測された微視的なバンド分散から、超伝導をはじめとしたさまざまな巨視的な物質の性質を説明することができます。

※5 スピン

電子の自転に由来した磁石の性質のことです。自転の方向に対応して、電子には上向きスピンと下向きスピンの2種類の状態があります。

本件に関するお問い合わせ先

【研究内容に関するお問い合わせ先】

国立大学法人 広島大学 放射光科学研究センター

助教 岩澤 英明 (いわさわ ひであき)

教授 島田 賢也 (しまだ けんや)

Tel: 082-424-6293 Fax: 082-424-6294

E-mail: h-iwasawa@hiroshima-u.ac.jp (岩澤)

kshimada@hiroshima-u.ac.jp (島田)

【記者会見に関するお問い合わせ先】

国立大学法人 広島大学 学術・社会産学連携室 広報グループ

新藤季奈 (しんどう きな)

TEL: 082-424-4518 FAX: 082-424-6040

E-mail: koho@office.hiroshima-u.ac.jp