

[ホーム](#)[最新情報 >](#)[研究 >](#)[教育 >](#)[国際協力 >](#)[KEKについて >](#)[最新情報 >](#)[ハイライト](#)[プレスリリース](#)

2011

2010

2009

2008

2007

2006

2005

[過去の記事](#)[用語解説](#)[トピックス](#)[News@KEKアーカイブ](#)[J-PARC News](#)[イベント](#)[求人情報](#)

プレス・リリース

世界で初めて強相関電子を2次元空間に閉じ込めることに成功 - 新たな高温超伝導物質の実現や、電子素子作りに道を拓く -

2011年7月15日

東京大学

高エネルギー加速器研究機構 (KEK)

科学技術振興機構 (JST)

東京大学大学院工学系研究科の組頭広志（くみがしら・ひろし）准教授 [現：高エネルギー加速器研究機構 (KEK) 物質構造科学研究所・教授]らの研究グループは、電子同士が互いに強く影響し合う状態にある「強相関電子^{*1}」を2次元空間（層）に人工的に閉じ込める「量子井戸構造^{*2}」を作り出すことに世界で初めて成功しました。この構造は、レーザーを使った結晶成長の技術を駆使し、伝導性をもつ酸化物を原子層レベルで精密に制御することで実現されました。KEK放射光科学研究施設フォトンファクトリー (PF)^{*3}の放射光^{*4}による高精度な分光法で電子の振る舞いを詳細に調べることで、強相関電子が2次元空間に閉じ込められていることを確認しました。高温超伝導体を作製するには強相関電子は欠かせない存在です。今回の成果によって、強相関電子の振る舞いを人工的にコントロールすることが可能となり、これまでの超伝導転移温度を遥かにしのぐ高温超伝導体の作製はもちろん、人類の夢であった室温超伝導体の実現にもつながると期待されます。またシリコン系半導体にとって代わる新しいタイプの電子素子の開発にも見通しが立ちました。この成果は東京大学大学院工学研究科の吉松公平・日本学術振興会特別研究員、尾嶋正治教授らとの共同研究です。研究成果は、米国科学雑誌「Science」の2011年7月15日（現地時間）号に掲載される予定です。

関連サイト

放射光科学研究施設 フォトンファクトリー
東京大学大学院工学研究科 尾嶋研究室

関連記事

2010.07.15 News@KEK
サイズを変えて導体から絶縁体へ ～厚さの変化で性質が変わるしくみ～

2008.08.21 News@KEK
絶縁体の界面に現れる金属～次世代素子の有力候補～

2008.07.09 プレス
絶縁体界面に生じる金属層の発生メカニズムを解明

2005.11.17 News@KEK
コンピュータを高性能に～半導体素子の界面反応を探る～

1. 研究の背景と経緯

パソコンや携帯機器の高性能化にともない、電子デバイスの性能向上への要求はとどまることがなく、新しい動作原理にもとづくデバイスの開発が望まれています。これは、これまでの情報化社会を支えてきたシリコンなどの半導体デバイスにおいては微細化による高性能化や高集積化が理論的な限界を迎え、電子デバイスを様々な機能をもつ材料で置き換える必要性が高まっているためです。この新規デバイス材料として、強相関酸化物が注目されています。電子の電荷のみを利用して従来半導体デバイスと比べて、強相関酸化物では、電子の電荷・軌道・スピンの自由度を利用して様々な機能が期待されるためです。その代表例が、銅酸化物における高温超伝導やマンガン酸化物における巨大磁気抵抗効果^{*5}です。これらの物質には、伝導を担う伝導層が絶縁層に挟まれた二次元的な層状構造をもつという共通の特徴があります（図1（左））。そのため、伝導層に閉じ込められた強相関電子の振る舞いを制御することが機能を制御するための鍵となります。実際、銅酸化物高温超伝導体では、絶縁層に挟まれる伝導層の枚数が増えるにつれて超伝導転移温度が上昇してゆくことが知られています。このように、強相関酸化物においても従来半導体技術のように、人工的に構造を制御して強相関電子の状態を制御する技術が強く望まれています。

2. 研究手法と成果

本研究グループは、層状の結晶構造と量子井戸構造の類似性（図1）に着目し、レーザー分子線エピタキシー^{*6}という技術を用いて、伝導性をもつ強相関酸化物の一つであるバナジウム酸ストロンチウム (SrVO₃) の量子井戸構造を作製することで二次元的な層状構造を人工的に作り出すことに世界で初めて成功しました。この人工構造は図2にあるように伝導層の枚数 (m分子層) を自由自在に制御できるという特長を持ちます。さらに、KEK物質構造科学研究所の放射光科学研究施設フォトンファクトリーに新設したレーザー分子線エピタキシー装置と光電子分光装置からなる複合装置を用いて、人工的に閉じ込めた強相関電子の振る舞いを角度分解光電子分光^{*7}という方法で詳細に調べました。

研究グループによる伝導層を制御する技術、および正確な評価技術は、高温超伝導体の材料開発のみならず、強相関電子の電荷・軌道・スピンの自由度を利用したデバイスを作り出すためのブレークスルーになる技術です。

その結果、閉じ込めによって不連続になった電子状態（量子化^{*8}状態）を表すピークを観測し（図3(a)）、その状態が伝導層の数に対応して変化することを見出しました。これらの振る舞いは、理論計算による予測と非常に良い一致を示すことから（図3(b)）、今回作製した量子井戸構造という2次元空間に強相関電子が閉じ込められていること、また、SrVO₃層の数を増やすことで不連続になった電子状態を制御できること、が明らかになりま

した。

さらに詳細に調べた結果、この強相関量子井戸構造における量子化状態では、通常の金属を用いた従来の量子井戸には見られない、1. 軌道ごとに選択的に量子化される、2. 量子化状態にある電子の有効質量^{*9}が増大する、という興味深い現象が見いだされました（図4）。

3. 今後の展開

今後、この技術を用いて電荷・軌道・スピンの自由度を制御することで、強相関電子が示す高温超伝導などの類い希な機能を人工的に制御することが可能になると考えられます。また、新しい動作原理に基づいた超伝導デバイスや光スイッチングデバイスといった強相関エレクトロニクス^{*10}への発展が期待されます。

本研究は、文部科学省科学研究費補助金（A19684010、S22224005）および、科学技術振興機構（JST）戦略的創造研究推進事業 個人型研究（さきがけ型）およびチーム型研究（CREST）の一環として、KEK物質構造科学研究所特別課題（08S2-003、09S2-005）のもとで実施しました。

本研究は、東京大学大学院工学系研究科の組頭広志 准教授、吉松公平 日本学術振興会特別研究員、尾嶋正治 教授、堀場弘司 助教、および吉田鉄平 助教、藤森淳 教授（同理学系研究科）らとの共同研究です。

<論文名および著者>
「Science」
論文名："Metallic Quantum Well States in Artificial Structures of Strongly Correlated Oxide"（日本語名：強相関酸化物人工構造の金属量子井戸状態）
K. Yoshimatsu, K. Horiba, H. Kumigashira, T. Yoshida, A. Fujimori, and M. Oshima

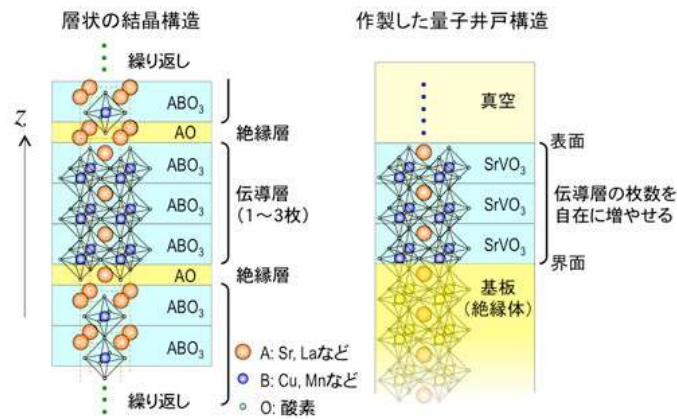


図1 高温超伝導体などの層状の酸化物構造（左）と本研究で作製した量子井戸構造（右）：青が伝導層、黄色が絶縁層を示す。層状酸化物では伝導層が最大で3枚の化合物しか存在しない。高温超伝導体では、伝導層が1枚から3枚と増えるに従い、超伝導転移温度が上昇することが知られている。本研究で作製した量子井戸構造では、伝導層の数を自在に制御できる。

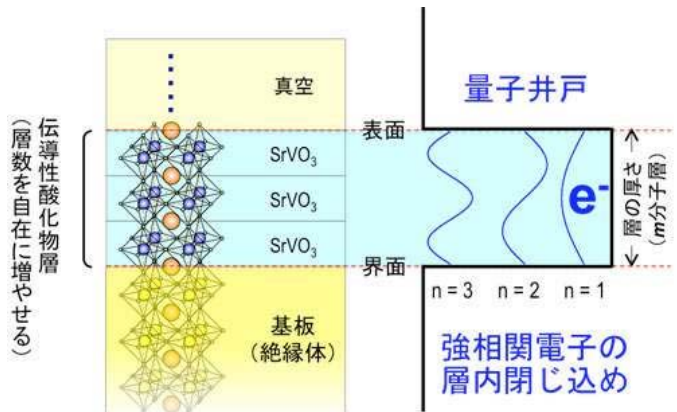


図2 量子井戸構造による強相関電子の2次元空間閉じ込め：
量子井戸構造においては、表面（真空）と界面（絶縁体）と挟まれた伝導性酸化物層（2次元空間内）に強相関電子が閉じ込められる。伝導層の枚数を増やす（量子井戸の幅を広くする）ことで、閉じ込められた電子の量子化状態を制御できる。

職員への連絡システム
 | 交通アクセス
 | 求人情報
 | よくある質問
 | サイトマップ
 | 関連サイト

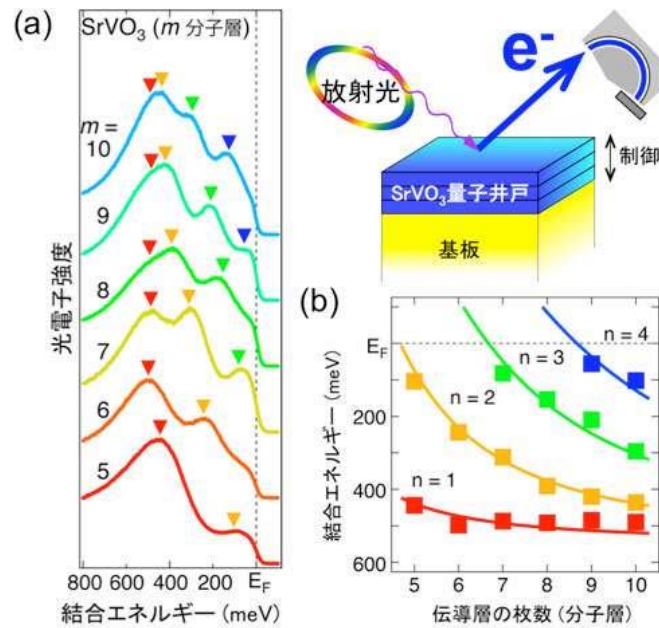


図3 放射光を用いて調べた量子井戸構造に閉じ込めた強相関電子の振る舞い：
 (a) SrVO₃量子井戸構造における角度分解光電子スペクトル。伝導層の厚さ(m分子層、mは整数値)を変えることで、逆三角形で示した量子化された状態が系統的に変化していることがわかる。
 (b)量子化状態の結合エネルギーにおけるSrVO₃伝導層の枚数(量子井戸の幅)依存性。四角が実験値、実線が理論計算の結果をしめす。実験結果と理論計算結果が良く一致することから、強相関電子がSrVO₃量子井戸構造内に閉じ込められていることがわかる。

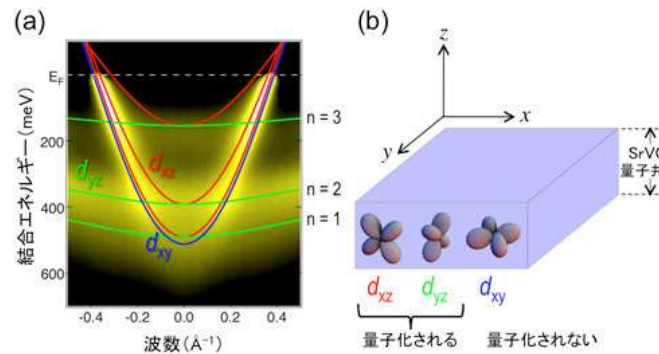


図4 SrVO₃量子井戸構造の軌道選択的量子化：
 (a)角度分解光電子分光によって決定した量子化状態の様子。赤色の線で示したd_{xz}軌道由来の状態と、緑色の線で示したd_{yz}軌道由来の状態の2種類の量子化状態が形成されていることがわかる。一方で、青色の線で示したd_{xy}状態は量子化されていない。
 (b)軌道選択的量子化の模式図。z軸(面直)方向に軌道が広がっているd_{xz}とd_{yz}軌道の状態は量子化されるが、xy平面(面内)に広がっているd_{xy}軌道は量子化されない。

【用語解説】

- *1 強相関電子
 通常の半導体や金属では、電子はほぼ自由に振る舞う。しかし、電子の密度が十分に高い場合、電子同士がお互いに強く作用し合い、結果として電子が集団としてかろうじて動くような状態が出現する。このような状態にある電子を強相関電子と呼ぶ。銅酸化物をベースとした高温超伝導体は強相関電子をもつ典型的な物質であり、強相関酸化物という。
- *2 量子井戸構造
 井戸のような形状をしたエネルギーバリアーにより、極めて薄い伝導層(2次元空間)の内部に電子を閉じ込める構造を量子井戸構造という。層に垂直な方向への電子の運動が制限されて飛び飛びの値を持つようになる。半導体デバイスではこの特長を生かすことで、電子を効率よく利用することができ、高性能の半導体レーザーやトランジスターが実現されている。
- *3 フォトンファクトリー (PF)
 光 (Photon) の工場 (Factory) の愛称で親しまれているPFは日本初のX線を利用出来る放射光専用光源として、1982年に完成した。数度の大改修を経て輝度を高めるとともに、最新技術の実験装置の整備により、世界最先端の研究成果を創出している。
 このような大型施設は、大学などが単独で維持管理することが難しいため、大学や研究機関が共同で利用実験するための施設(大学共同利用機関)としてKEKで運用している。
- *4 放射光
 光速近くまで加速された電子が、磁場によってその進行方向を曲げられたときに接線方向に放出される強い光を放射光という。赤外線からX線までのさまざまな波長をもつ光を取り出せる優れた光源として、科学技術の広い分野で用いられている。

- *5 巨大磁気抵抗効果
金属の抵抗効果が外部磁場によって変化する現象を磁気抵抗効果と呼ぶ。通常、金属の抵抗効果は数%程度であるが、特殊構造を持った磁性薄膜やペロブスカイト型マンガン酸化物では抵抗効果が数桁大きなものとなり、特に巨大磁気抵抗効果と名付けられている。この現象は、ハード磁気ディスク(HDD)の検出ヘッド等に広く応用され、高密度磁気記録装置には不可欠なものとなっている。
- *6 レーザー分子線エピタキシー
パルスレーザーをターゲット材料に照射することでターゲットから原子（分子）の引き剥がし（アブレーション）を行い、ターゲットに対向する基板に薄膜を形成する手法のこと。酸化物などの結晶成長に広く用いられている。
- *7 角度分解光電子分光
物質に光を当てると、光電効果によって光電子が飛び出す。この光電子のエネルギーの放出角度依存性を測定することにより物質中の電子の状態を調べる方法のこと。
- *8 量子化
連続的な物理量（エネルギーなど）が、狭い空間等の特殊な環境下で整数倍のとびとびの値となること。
- *9 有効質量
真空中の自由電子の質量に対し、固体中の電子は見かけ上、これと異なる質量を持っているように観測される。これを有効質量と呼ぶ。強相関電子系では電子同士の相互作用により、有効質量が大きくなる。
- *10 強相関エレクトロニクス
電子の電荷を制御、利用するエレクトロニクスに対し、電荷に加えて電子の軌道・スピンの自由度も制御、利用する新しい技術。

【お問い合わせ】

<研究内容に関するお問い合わせ>

組頭 広志（クミガシラ ヒロシ）
高エネルギー加速器研究機構（KEK） 物質構造科学研究所
TEL：029-864-5584 FAX：029-864-5584
E-mail：hiroshi.kumigashira@kek.jp

<JSTのCREST事業に関するお問い合わせ>

石井哲也（イシイ テツヤ）
科学技術振興機構 イノベーション推進本部 研究領域総合運営部
〒102-0075 東京都千代田区三番町5番地 三番町ビル
TEL：03-3512-3531 FAX：03-3222-2066
E-mail：crest@jst.go.jp

<JSTのさきがけ事業に関するお問い合わせ>

原口 亮治（ハラグチ リョウジ）
科学技術振興機構 イノベーション推進本部 研究推進部
〒102-0075 東京都千代田区三番町5 三番町ビル
TEL：03-3512-3525 FAX：03-3222-2067
E-mail：presto@jst.go.jp

<報道担当>

東京大学 工学系研究科/工学部 広報室
〒113-8656 東京都文京区本郷7-3-1
工学部列品館2階 広報室
TEL：03-5841-1790 FAX：03-5841-0529
高エネルギー加速器研究機構 広報室
〒305-0801 茨城県つくば市大穂1-1
TEL：029-879-6047 FAX：029-879-6049
E-mail：press@kek.jp
科学技術振興機構 広報ポータル部
〒102-8666 東京都千代田区四番町5番地3
TEL：03-5214-8404 FAX：03-5214-8432
E-mail：jstkoho@jst.go.jp