

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 5 月 30 日現在

機関番号：12601

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2014～2015

課題番号：26610097

研究課題名(和文) 超構造による強相関トポロジカル量子系のエッジ状態・電子相制御

研究課題名(英文) Control of electronic state of correlated topological quantum systems utilizing superstructure

研究代表者

藤岡 淳 (Fujioka, Jun)

東京大学・工学(系)研究科(研究院)・講師

研究者番号：80609488

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,900,000円

研究成果の概要(和文)：相対論的電子(ディラック・ワイル電子)が強く相互作用し合う強相関トポロジカル半金属の一例であるパイロクロア型R2Ir2O7を対象に、新トポロジカル電子相を探索した。その結果、モット転移近傍でワイルモット絶縁体と呼ばれる新奇な強相関トポロジカルモット絶縁体相が生じている可能性を見出した。また磁壁に生じるエッジ状態の電気伝導性はモット転移から離れるに従って低下することを見出した。

研究成果の概要(英文)：We have studied the new topological electronic phase in pyrochlore iridates, which is one of the correlated topological semimetals. As a results, we found that a new topological Mott insulating state so called as Weyl Mott insulator can be realized on the verge of band-width controlled Mott transition. Moreover, it turned out that the electrical conductivity of edge state emerging at magnetic domain walls is reduced when the bandwidth is tuned away from Mott transition.

研究分野：固体物理学

キーワード：物性実験 強相関電子系

1. 研究開始当初の背景

トポロジカル絶縁体、ディラック・ワイル半金属など電子構造の幾何学的性質(トポロジー)を反映した量子状態についての研究が、急速に展開している。研究開始当初は、古典的な半導体材料を中心とした電子相関の弱い系についての研究が多く、強相関電子が示す集団現象とトポロジカル量子現象が融合した現象についての研究は数少なかった。このような中、反強磁性モット絶縁体中で生じるワイル半金属が存在することが2011年に理論的に提案された[1]。具体的にはパイロクロア型  $R_2Ir_2O_7$  ( $R$ =希土類イオン)のモット転移近傍でワイル半金属相が生じることが第一原理計算に基づいて予言された。ワイル半金属ではバルクがゼロギャップ半導体で、トポロジカルに保障されたエッジ状態が試料表面・界面に生じる事が予言されており、その実験的検証を目指した研究が世界的に加速していた。このような中、我々はこの物質群の一部でバルクの電子構造がゼロギャップ状態であり、かつ一種の電子的界面である磁壁に電気伝導性の高いエッジ状態が現れることを実験的に明らかにした。過去の研究で、この物質群では組成変化によってモット絶縁体相、金属相などの様々な相が生じることが既に知られていた。通常、モット転移が生じる際には eV スケールの電子構造の変化が生じるため、バンド構造のトポロジーやエッジ状態が大幅に変化する事が予想される。しかしながら研究開始当初は、バンド幅制御のモット転移が生じる過程のバルクやエッジ状態の電子状態変化については未開拓の状態であった。

2. 研究の目的

本研究ではパイロクロア型  $R_2Ir_2O_7$  におけるモット転移近傍で新トポロジカル電子相を探索し、磁壁に生じるエッジ状態の電子状態を明らかにすることを目的とした。

3. 研究の方法

モット転移近傍の新電子相探索

パイロクロア型  $R_2Ir_2O_7$  では  $R$  イオンの組成を変える事で  $Ir-O-Ir$  ボンド角が変わり、一電子バンド幅を系統的に制御する事ができる。本研究では超高压合成法を用いて様々な組成の  $R_2Ir_2O_7$  混晶多結晶を合成し、電荷・熱輸送特性、電子構造を系統的に調べることで電子相図を構築することを目指した。また、並行して光学測定を行い、ワイル電子の電荷ダイナミクスについての知見も得る事を目指した。

トポロジカルエッジ状態による2次元界面電子系の生成と新奇電子相の探索

$Nd_2Ir_2O_7$  混晶系において走査型マイクロ波インピーダンス顕微鏡によるマイクロ波領域の電気伝導度の実空間マッピング測定を行い、金属的磁壁を可視化した。磁壁の厚み、

伝導度、形状などの諸特性を評価した。

また、異なる希土類イオンから成るヘテロ構造を作製し、界面に磁壁をピン止めすることでエッジ状態の2次元電子系の電子物性を評価する事を目指した。 $Nd_2Ir_2O_7$  と  $Eu_2Ir_2O_7$  からなるヘテロ界面をパルスレーザー堆積法によって作製し、両者の保磁力差を利用してヘテロ界面に反強磁性磁壁をピン止めする事を試みた。ヘテロ界面における電気伝導度、ホール効果、ゼーベック効果などの輸送特性を測定し、トポロジカルエッジ状態に起因する2次元電子系の電子物性を評価することを試みた。

4. 研究成果

モット転移近傍の新電子相探索

バンド幅制御のモット転移を精密に制御するために  $(Sm_yNd_{1-y})_2Ir_2O_7$ 、 $(Nd_{1-x}Pr_x)_2Ir_2O_7$  を合成した。図1(a)-(c)に抵抗率の温度依存性を示す。高温領域では  $y=0-0.6$  の組成で

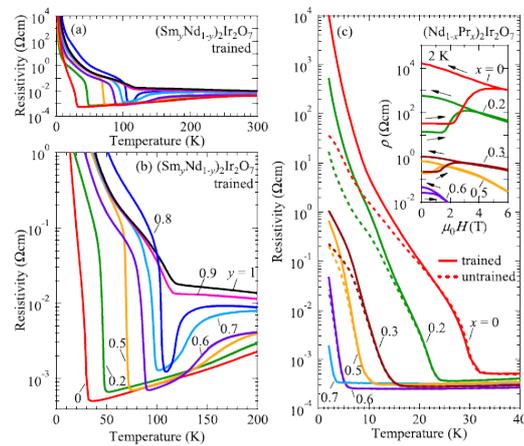


図1 (a)  $(Sm_yNd_{1-y})_2Ir_2O_7$  における電気抵抗率の温度依存性。(b)は200 K以下での拡大図。(c)

$(Nd_{1-x}Pr_x)_2Ir_2O_7$  における電気抵抗率。抵抗率は金属的な振る舞いを示しているが、 $y=0.9-1$  では温度の低下と共に増加している。どの組成でも反強磁性転移温度以下で抵抗率が急激に上昇している点は共通しているが、 $y=0.6-0.8$  では抵抗率が非単調な温度依存性を示している事が分かる。例えば  $y=0.8$  では170K以上では半導体的な振る舞いをしているが、150K付近で急激に減少し、106Kの反強磁性転移で急激に増加している。この状況は  $V_2O_3$  などの典型的なモット転移系で見られる常磁性絶縁体・金属転移とよく似ている。1次相転移に特徴的な比熱の跳びなどはみられないため、常磁性絶縁体・金属転移の臨界終点近傍に特有の温度によるクロスオーバーであると考えられる。このような振る舞いは圧力下での  $R=Eu$  でも見られており乱れの効果や相分離によるものではないと考えられる。

図1(c)に  $(Nd_{1-x}Pr_x)_2Ir_2O_7$  における抵抗率の温度依存性を示す。 $x=0-0.7$  では磁気転移温度以下で抵抗率が大幅に上昇している。こ

れらすべての系で 14T 中で磁場を印加して試料を冷却した場合 (trained) と無磁場で冷却した場合 (untrained) で抵抗率に差が生じていることがわかる。磁気ドメインが整列した trained 状態での抵抗率の方が高く、磁気ドメインはバルク状態と異なり高い電気伝導性を有していることが窺える。

R サイトの平均イオン半径  $r$  と温度についての電子相図を図 2(a) に示す。 $r$  が大きい  $x > 0.8$  の領域では 2 K まで常磁性金属相が広がっているが、他の組成では常磁性絶縁体相、反強磁性絶縁体相が見られる。特に

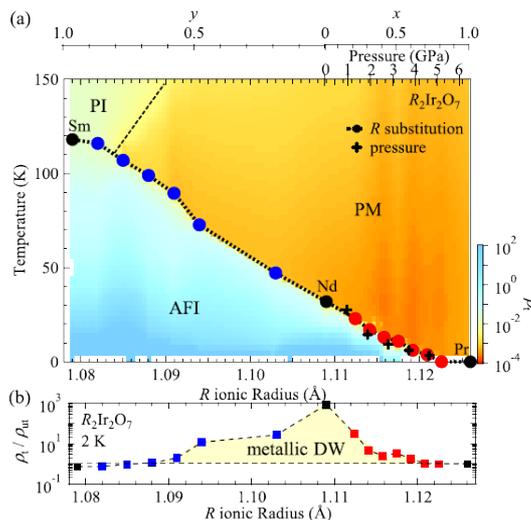


図 2 (a)  $(\text{Sm}_y\text{Nd}_{1-y})_2\text{Ir}_2\text{O}_7$ 、 $(\text{Nd}_{1-x}\text{Pr}_x)_2\text{Ir}_2\text{O}_7$  における電子相図 (b) 磁壁の伝導性を表す  $\rho_t/\rho_{ut}$  の組成依存性。

$(\text{Sm}_y\text{Nd}_{1-y})_2\text{Ir}_2\text{O}_7$   $0.6 < y < 0.8$  付近ではリエントラント型絶縁体・金属・絶縁体転移が見られている。また、磁気転移温度は  $r$  の減少と共に増加する傾向にあり、一電子バンド幅と反強磁性秩序のエネルギースケールの密接な関係が窺える。

図 2(b) に trained と untrained の抵抗率の比  $\rho_t/\rho_{ut}$  を  $r$  に対してプロットした。 $\rho_t/\rho_{ut}$  は大ざっぱにはバルクと磁壁の伝導の比に対応している ( $\rho_{ut}$  にはバルクの抵抗率成分も含まれているため厳密ではない)。 $\rho_t/\rho_{ut}$  は  $R=\text{Nd}$  で最大となっている。 $r$  が小さい領域では磁壁の抵抗率が上昇している事に由来しており、 $r$  が大きい領域ではバルクの抵抗率が低下しており、見かけ上、磁壁の伝導度が小さくなって見えているためと考えられる。この事を考慮すると一電子バンド幅の減少と共に磁壁の伝導性は単調に減少していると考えられる。特に  $y > 0.7$  では  $\rho_t/\rho_{ut}$  が 1 よりも小さく磁壁がキャリアの散乱体として作用している可能性がある。換言すると磁壁が  $y=0.7$  付近で金属から絶縁体へ転移している可能性がある。同じ組成においてバルクは常磁性絶縁体・金属クロスオーバーを示しており、磁壁の電子状態との関連性が窺える。

## トポロジカルエッジ状態による 2 次元界面電子系の生成と新奇電子相の探索

図 3 にマイクロ波インピーダンス顕微鏡によるマイクロ波領域の伝導度イメージングを示す。左図にゼロ磁場で冷却した状態を示す。磁壁が高伝導度の縞状模様として観測されている様子が分かる。磁壁の幅は分解能以下 ( $\sim 100\text{nm}$  以下) であることが分かった。右図は 4.7K で 9T まで磁場を印加した後の磁場をゼロに戻した状態であるが、ほとんどの磁

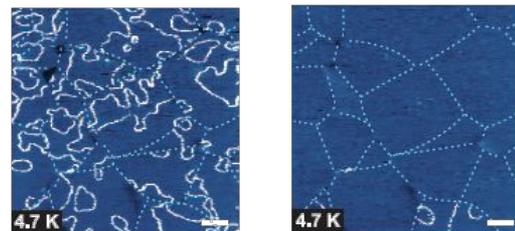


図 3 マイクロ波インピーダンス顕微鏡像。左図：ゼロ磁場で冷却した状態。右図：4.7K で 9T まで磁場掃引した後の状態。

壁が消失している様子が分かる。磁壁の電気伝導度を評価するために微小電極を作製し 2 端子法によって電気伝導度測定を行った。磁場印加と共に伝導度が減少し、その過程で磁壁の消失による離散的な抵抗の跳びが見られた。跳びの大きさから磁壁当たりのシート伝導度が  $1\text{mS}$  程度であると評価できた。

バルク多結晶中では磁壁は結晶の欠陥や粒界によるピン止めのためランダムに配向するためそこでの電子系の精密物性評価は容易ではない。そこで薄膜試料におけるエピタキシャル界面への磁壁のピン止めを検討した。図 4 に YSZ 基板の上に製膜した  $\text{Nd}_2\text{Ir}_2\text{O}_7$  の X 線逆格子像と電気抵抗率の温度依存性を示す。抵抗率は磁気転移温度以下で上昇している。 $\text{Eu}_2\text{Ir}_2\text{O}_7$  との 2 層膜の作製を行ったが

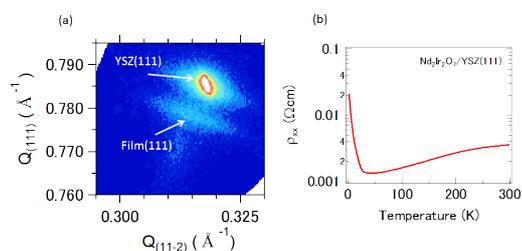


図 4：微小電極によるシート電気伝導度の磁場依存性。

平坦なヘテロ界面が得られず磁壁を界面へピン止めするには至らなかった。製膜プロセス中に生じる原子の拡散が大きいことが平坦な界面作製が困難である理由と考えられる。

## 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者に

は下線)

〔雑誌論文〕(計 4 件)

E. Y. Ma, Y-T Cui, K. Ueda, S. Tang, K. Chen, N. Tamura, P. M. Wu, J. Fujioka, Y. Tokura, Z-X. Shen, " Mobile metallic domain walls in an all-in-all-out magnetic insulator " Science 350, 538 (2015).

K. Ueda, J. Fujioka, C. Terakura, Y. Tokura, " Pressure and magnetic field effects on metal-insulator transitions of bulk and domain wall states in pyrochlore iridates " Phys. Rev. B, 92, 121110 (2015).

K. Ueda, J. Fujioka, B.-J. Yang, J. Shiogai, A. Tsukazaki, S. Nakamura, S. Awaji, N. Nagaosa, and Y. Tokura, " Magnetic Field-Induced Insulator-Semimetal Transition in a Pyrochlore Nd<sub>2</sub>Ir<sub>2</sub>O<sub>7</sub> " Phys. Rev. Lett, 115, 056402 (2015).

" Anomalous domain-wall conductance in pyrochlore-type Nd<sub>2</sub>Ir<sub>2</sub>O<sub>7</sub> on the verge of the metal-insulator transition "

K. Ueda, J. Fujioka, Y. Takahashi, T. Suzuki, S. Ishiwata, Y. Taguchi, M. Kawasaki, and Y. Tokura, Physical Review B 89, 075127 (2014)

〔学会発表〕(計 4 件)  
(invited)

1. J.Fujioka, " Magnetic field induced semimetal-insulator transition in pyrochlore-type iridates " Indo-Japan Conference on " Emergent phenomena in transition-metal compounds and related materials" March 28-30, 2016, Indian Institute of Science, Bengaluru, India

2.J. Fujioka, " Strain-induced ferromagnetism and topological semimetal phase in correlated electron systems with strong spin-orbital entanglement " The 2nd International Symposium on Interactive Materials Science Cadet Program, 18, Nov. 2015, Osaka University

3.J. Fujioka, " Metal-insulator transition and anomalous magnetic domain-wall conductance in pyrochlore-type iridates " LSmatterC15, " Novel States in Spin-Orbit Coupled Quantum Matter: from Models to Materials " Kavli Institute for Theoretical Physics, UNIVERSITY OF CALIFORNIA SANTA BARBARA, CALIFORNIA, 30,

July, 2015  
2015 年度

4. J. Fujioka, " Metal-insulator transition in Pyrochlore-type iridates with anomalous magnetic domain-wall conductance " 7th International Conference on Highly Frustrated Magnetism 2014 7月7日、Cambridge University, United Kingdom

〔図書〕(計 0 件)

〔産業財産権〕

出願状況(計 0 件)

名称:

発明者:

権利者:

種類:

番号:

出願年月日:

国内外の別:

取得状況(計 0 件)

名称:

発明者:

権利者:

種類:

番号:

取得年月日:

国内外の別:

〔その他〕

ホームページ等

<http://www.cmr.t.u-tokyo.ac.jp/>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

藤岡 淳 (FUJIOKA JUN)

東京大学・大学院工学系研究科・講師

研究者番号: 80609488

(2) 研究分担者

( )

研究者番号:

(3) 連携研究者

( )

研究者番号: