

科学研究費助成事業（基盤研究（S））公表用資料  
〔令和2（2020）年度 研究進捗評価用〕

平成29年度採択分  
令和2年3月31日現在

直流電場・電流：強相関電子系の新しい制御パラメータ

DC Electric Field and Current: Novel Control Parameters  
for Strongly Correlated Electron Systems

課題番号：17H06136

前野 悦輝 (MAENO, YOSHITRU)

京都大学・大学院理学研究科・教授



研究の概要（4行以内）

強相関多体効果の本質を顕在化させる新しい制御パラメータとして直流電場・電流の有効性を確立するため、主に定常電流下の非平衡状態が創り出す新現象を明らかにするとともに、その機構の理解を進める。

研究分野：数物系科学

キーワード：強相関電子系、非平衡定常状態

1. 研究開始当初の背景

強相関電子系特有のモット絶縁相を金属化させる制御パラメータとして、これまで元素置換や圧力印加が広く用いられ、高温超伝導を含む異方的超伝導・超巨大磁気抵抗など新奇な現象を生んできた。

2. 研究の目的

本研究の目的は、強相関多体効果の本質を顕在化させる新しい制御パラメータとして直流電場・電流の有効性を確立するため、主に定常電流下の非平衡状態が創り出す新現象を明らかにするとともに、その機構の理解を進めることにある。

研究対象の中心はモット絶縁体  $\text{Ca}_2\text{RuO}_4$  で、我々が最近発見した直流電流の下で創発する特異な磁性や金属状態など、平衡状態では実現しない電子状態の理解を深める。また、他の強相関電子系酸化物で同様の非平衡・非線形現象を探索することで、これらの新現象の特質と一般性を明らかにする。

本研究を通じ、強相関物質の非平衡定常状態で生まれる創発現象の研究展開の世界的先駆けを目指す。

3. 研究の方法

第一に、主対象の4d電子系ルテニウム酸化物  $\text{Ca}_2\text{RuO}_4$  について、電場誘起の絶縁体・金属転移、そして電流誘起の特異な磁性の詳細とメカニズムを明らかにする。絶縁体・金属転移につ

いては、フォノンや構造不安定性の役割を明らかにする。特異な磁気状態については、理論の適用を吟味する実験事実を得るため、電流や磁場の方向依存性（異方性）を含めて、電流を制御パラメータとする物性相図を構築する。また、類縁の4d電子系物質での非平衡定常状態の研究も進める。

第二に、3d・5d電子系の酸化物の中で、エネルギーギャップが比較的小さなモット絶縁体を選び、直流電場・電流の効果を明らかにする。本研究では、電流下での光電子分光も含む実験データ集積と理論構築と並行して、国内外の共同研究により、フォノン不安定性解明、走査型プローブによる局所ダイナミクスの研究に加え、ポンプ・プローブ分光による高速緩和過程と本研究の主題である直流効果の比較も進める。

4. これまでの成果

主対象の  $\text{Ca}_2\text{RuO}_4$  については、以下の成果を挙げた：(1)電流通電下でゼーベック係数が増大するという新しい熱電現象を発見した[7]。(2)電流通電により結晶格子が顕著に変形する現象を明らかにした[1]。(3)電場・電流誘起の構造一次相転移を伴う絶縁体・金属転移に関して、相分離ドメインの微細構造を明らかにした[3]。(4)絶縁体・金属転移の局所過程を顕微赤外カメラによるサーマルイメージングで明らかにした。(5)発熱効果を抑制するため、微細加工技術を駆使して試料単結晶と薄膜温度計を素子化した。(6)

モット転移に対する過剰酸素の役割を明らかにした。(7)硬 X 線光電子分光(HAXPES)により、電流による電子状態の変化を観測した。(8)電気二重層トランジスタ構造での電場誘起現象を明らかにした。電流誘起の反磁性信号観測については、測定上の技術的問題を解明しつつある。

この他、3d・5d 電子系物質での同様の現象の探索、また超伝導相での電流誘起効果の研究も進めている。

## 5. 今後の計画

[A] 4d電子系ルテニウム酸化物  $\text{Ca}_2\text{RuO}_4$  の電流通電効果については、非線形伝導、熱電効果、格子変形効果、局所分域構造イメージング、マイクロ光電子分光などの研究をさらに探求する。顕微サーマルイメージングを併用した物性特定を標準技術として確立する。当初計画になかった新しい取り組みに関しては、電流を流さない電気二重層トランジスタ構造での電場誘起現象、微細素子化による計測技術の確立と有効性実証を進める。

[A][B] 4d 電子系ルテニウム酸化物  $\text{Ca}_2\text{RuO}_4$ 、 $\text{Ca}_3\text{Ru}_2\text{O}_7$  の低温磁性については、通電下の磁化測定技術を確立し、確度の高い測定結果を獲得する。具体的には、磁化測定用の試料ホルダーにグラスファイバーに代えて低温磁化の小さな石英を用い、温度分布や温度計測に新たな設計指針を反映させて再測定を行う。その上で磁化や磁気転移温度に対する電流効果の決定版のデータを発表する。

[C][D]のルテニウム酸化物以外の物質に関しては、高温で絶縁相・低温で金属相が実現する系について非平衡定常状態での振る舞いを明らかにする。また、超伝導相の異方性が電流で制御できる候補物質があるので研究を進める。

研究会 NESS2020, 国際会議 NESS2021 は計画通り開催するが、令和 2 年度に久留米工業大学で開催予定の NESS2020 については、COVID-19 との関係で開催時期の決定を慎重に行う。

## 6. これまでの発表論文等 (受賞等も含む)

[1] "Current-induced Giant Lattice Deformation in the Mott Insulator  $\text{Ca}_2\text{RuO}_4$ "

R. Okazaki, K. Kobayashi, R. Kumai, H. Nakao, Y. Murakami, F. Nakamura, H. Taniguchi, and I. Terasaki

J. Phys. Soc. Jpn. 掲載決定 (2020).

[2] "Strong spin-phonon coupling unveiled by coherent phonon oscillations in  $\text{Ca}_2\text{RuO}_4$ "

M-C. Lee, C. H. Kim, I. Kwak, C. W. Seo, C. Sohn, F. Nakamura, C. Sow, Y. Maeno, E.-A. Kim, T. W. Noh, and K. W. Kim, Phys. Rev. B **99**, 144306-1-5 (2019). DOI: 10.1103/PhysRevB.99.144306

[3] "Nano-Resolved Current-Induced Insulator-Metal Transition in the Mott Insulator  $\text{Ca}_2\text{RuO}_4$ "

J. Zhang, A. S. McLeod, Q. Han, X. Chen, H. A. Bechtel, Z. Yao, S.N. Gilbert Corde r, T. Ciavatti, T. H. Tao, M. Aronson, G.L. Carr, M. C. Martin, C. Sow, S. Yonezawa, F. Nakamura, I. Terasaki, D.N. Basov, A. J. Millis, Y. Maeno, M. Liu, Phys. Rev. X **9**, 011032-1-8 (Feb. 2019). DOI: 10.1103/PhysRevX.9.011032

[4] "Spectroscopic signature of trimer Mott insulator and charge disproportionation in  $\text{BaRuO}_3$ "

R. Okazaki, S. Ito, K. Tanabe, H. Taniguchi, Y. Ikemoto, T. Moriwaki, and I. Terasaki Phys. Rev. B **98**, 205131-1-6 (Nov. 2018). DOI: 10.1103/PhysRevB.98.205131

[5] "Development of a pressure cell using a beta-titanium alloy for a Differential Scanning Calorimeter",

T. Eto, K. Akagi, E. Takashima, A. Noguchi, T. Sakami, T. Noda and F. Nakamura J. Phys.: Conf. Ser. **969**, 012089-1-5 (April 2018). DOI:10.1088/1742-6596/969/1/012089

[6] "Current-induced strong diamagnetism in the Mott insulator  $\text{Ca}_2\text{RuO}_4$ ",

C. Sow, S. Yonezawa, S. Kitamura, T. Oka, K. Kuroki, F. Nakamura, Y. Maeno, Science **358**, 1084-1087 (Nov. 2017). DOI: 10.1126/science.aah4297.

[7] "Anomalous Thermoelectric response in an orbital-ordered oxide near and far from equilibrium",

Y. Nishina, R. Okazaki, Y. Yasui, F. Nakamura, and I. Terasaki, J. Phys. Soc. Jpn. **86**, 093707-1-4 (Aug. 2017). DOI: 10.7566/JPSJ.86.093707

受賞等:

- 寺崎一郎(分担)に日本熱電学会学術賞 (2019年9月)。
- 寺崎一郎(分担)に Aalto 大学(フィンランド)の名誉博士号 (2018年6月)。

## 7. ホームページ等

[http://www.ss.scphys.kyoto-u.ac.jp/kibanS\\_h29-33/index.html](http://www.ss.scphys.kyoto-u.ac.jp/kibanS_h29-33/index.html)