

令和元年6月6日現在

機関番号：12601

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2016～2018

課題番号：16K17738

研究課題名(和文)コバルト酸化物におけるスピン状態結晶相の解明

研究課題名(英文) Investigation of spin state crystallization in a cobaltite

研究代表者

池田 暁彦 (Ikeda, Akihiko)

東京大学・物性研究所・助教

研究者番号：90707663

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,100,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では半世紀以上研究されているコバルト酸化物のスピンクロスオーバーに関する研究を行った。本研究では従来着目されていた温度依存性に加えて、新たにパルス超強磁場という軸を適用して、広い温度・磁場平面上での研究を展開した。その結果、100テスラ以上の領域に複数の非自明なスピン状態秩序相が広がっていることを発見した。本研究により、多軌道強相関係における新領域が切り開かれた。

研究成果の学術的意義や社会的意義

材料の新規物性を見いだすことは材料科学の最大の目的である。本研究では他のどの物質でも見つかっていない秩序化をコバルト酸化物において発見した。この秩序はスピン状態という自由度の秩序化であり、その機能性・性質は全く知られていない。今後、磁歪素子、アクチュエーター、センサなどの観点から材料評価を行うことで機能性が明らかになると考えている。

研究成果の概要(英文)：In this research project, we have investigated a long standing problem of the spin-crossover of a cobaltite. Previous studies have focused on its temperature evolution, whereas we have applied a new axis of ultrahigh-magnetic fields along with the temperature evolution. We have explored in a wide range of temperature and magnetic field, resulting in a discovery of anomalous spin-state ordered phases above 100 T. The study opens a new area of multi-orbital Mott physics.

研究分野：固体物性

キーワード：コバルト酸化物 超強磁場 スピンクロスオーバー スピン転移 スピン状態秩序 励起子凝縮 磁歪
創発物性

様式 C-19、F-19-1、Z-19、CK-19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

ペロフスカイト型コバルト酸化物 LaCoO_3 において Co^{3+} は $3d^6$ の電子配置をとり、eg 軌道に入る電子数に応じて低スピン状態、高スピン状態、中間スピン状態とりうることが知られている。コバルト酸化物ではスピン状態間のエネルギーギャップが小さいために、温度・圧力・磁場などの弱い摂動によってスピントロニクスオーバーが起こりやすい。 LaCoO_3 では低温の低スピン絶縁体基底状態から温度上昇に伴って、100 K 程度で絶縁体状態を保ったまま、磁化率の極大を持つ。さらに 500 K で磁化率の再度の上昇と共に金属絶縁体転移を起こす。この微視的なメカニズムに関しては 50 年以上の研究の歴史があり、研究開始当初も共鳴 X 線散乱、中性子線非弾性散乱などを用いてスピン状態の特定が精力的に行われていた。

2. 研究の目的

本研究ではコバルト酸化物のスピントロニクスオーバーの解明を主眼としつつ、他の研究とは異なるアプローチとして、磁場誘起スピントロニクスオーバーに着目して研究を行った。研究の目的は、当時すでに見いだされていた 60 T の磁場誘起スピントロニクスオーバーにおいて、スピン状態が秩序化した「スピン状態結晶相」が発現しているとの予想があったので、これを検証することとした。

3. 研究の方法

100 テスラを超える磁場中での磁化測定技術を洗練させ、さらにこの磁場領域で利用できる磁歪計測装置を開発した。

4. 研究成果

従来知られていた 60 T の相転移の温度依存性を追跡したところ、高温で高磁場側にシフトする異常な挙動を示すことを見いだした。ここから、高磁場側に低エントロピー相が存在することを予見した。相図形状からスピン状態秩序相は 2 つあると考えられる。このうち一つがスピン状態結晶相であると考えられる。さらにもう一方のスピン状態秩序の例として、励起子凝縮相の可能性を検討している。これらの起源を探るのが今後の研究課題である。

5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計 17 件)

1. 「ファイバーブラッググレーティングを用いた高速 100MHz ひずみ計測装置の構築と超強磁場中スピン格子物性の開拓」
池田暁彦、松田康弘
[固体物理 Vol. 54, No. 3, 147 \(2019\)](#) (査読あり)
2. "Magnetoelastic couplings in the deformed Kagome quantum spin lattice of volborthite"
A. Ikeda, S. Furukawa, O. Janson, Y. H. Matsuda, S. Takeyama, T. Yajima, Z. Hiroi, H. Ishikawa
[Phys. Rev. B 99, 140412\(R\) \(2019\)](#) (査読あり)
3. "Magnetic-Field-Induced Kondo Metal Realized in YbB_{12} "
T. T. Terashima, Y. H. Matsuda, Y. Kohama, A. Ikeda, A. Kondo, K. Kindo, and F. Iga
[Phys. Rev. Lett. 120, 257206 \(2018\)](#) (査読あり)
4. "Optical filter method for high-resolution magnetostriction measurement using fiber Bragg grating under millisecond-pulsed high magnetic fields at cryogenic temperatures"
A. Ikeda, Y. H. Matsuda and H. Tsuda
[Rev. Sci. Instrum. 89, 096103 \(2018\)](#) - - - - [arXiv:1803.03404](#) (査読あり)
5. "Record indoor magnetic field of 1200 T generated by electromagnetic flux-compression"
D. Nakamura, A. Ikeda, H. Sawabe, Y. H. Matsuda, and S. Takeyama
[Rev. Sci. Instrum. 89, 095106 \(2018\)](#) (査読あり)
6. "100 MHz high-speed strain monitor using fiber Bragg grating and optical filter applied for magnetostriction measurements of cobaltite at magnetic fields beyond

- 100 T”
- A. Ikeda, T. Nomura, Y. H. Matsuda, S. Tani, Y. Kobayashi, H. Watanabe, K. Sato
[Physica B 536 \(2018\) 847-849](#) - - - - - [arXiv:1708.09207](#) (査読あり)
7. “1000 T project of the electro-magnetic flux compression at Kashiwa, UTokyo”
 S. Takeyama, D. Nakamura, A. Ikeda, H. Sawabe, Y.H. Matsuda
 16th International Conference on Megagauss Magnetic Field Generation and Related Topics (MEGAGAUSS), 2018
 (DOI: [10.1109/MEGAGAUSS.2018.8722645](#)) (査読あり)
 8. “Spin-lattice separation of the spin-ladder compound BIP-TENO by microsecond megagauss field”
 K. Nomura, A. Ikeda, Y. Kohama, Y.H. Matsuda, S. Takeyama, N. Amaya, T. Ono, Y. Hosokoshi
 16th International Conference on Megagauss Magnetic Field Generation and Related Topics (MEGAGAUSS), 2018
 (DOI: [10.1109/MEGAGAUSS.2018.8722650](#)) (査読あり)
 9. “Magnetostriction studies up to megagauss fields using fiber Bragg grating technique”
 A. Ikeda, Y. H. Matsuda, D. Nakamura, S. Takeyama, H. Tsuda, K. Nomura, A. Shimizu, A. Matsuo, T. Nomura, T. C. Kobayashi, T. Yajima, H. Ishikawa, Z. Hiroi, M. Isobe, T. Yamauchi, K. Sato
 16th International Conference on Megagauss Magnetic Field Generation and Related Topics (MEGAGAUSS), 2018
 (DOI: [10.1109/MEGAGAUSS.2018.8722656](#)) - - - - - [arXiv:1810.10472](#) (査読あり)
 10. “Contactless ultra-high frequency AC-conductivity measurement applicable to destructive magnets above 100 T”
 D. Nakamura, A. Ikeda, Y.H. Matsuda, S. Takeyama
 16th International Conference on Megagauss Magnetic Field Generation and Related Topics (MEGAGAUSS), 2018
 (DOI: [10.1109/MEGAGAUSS.2018.8722657](#)) (査読あり)
 11. “Megagauss-field effect on the metal-insulator transition in $V_{1-x}W_xO_2$ ($x = 0.06$)”
 Y. H. Matsuda, D. Nakamura, A. Ikeda, S. Takeyama, Y. Muraoka, Y. Suga
 16th International Conference on Megagauss Magnetic Field Generation and Related Topics (MEGAGAUSS), 2018
 (DOI: [10.1109/MEGAGAUSS.2018.8722672](#)) (査読あり)
 12. 「コインに磁場をかけると、どうなる？」
 池田暁彦、松田康弘
[日本物理学会誌 73 318-320 \(2018\)](#) (査読あり)
 13. “Magnetization process of the Kondo Insulator YbB_{12} in ultrahigh magnetic fields”
 T. T. Terashima, A. Ikeda, Y. H. Matsuda, A. Kondo, K. Kindo, F. Iga
[J. Phys. Soc. Jpn. 86, 054710 \(2017\)](#) (査読あり)
 14. “High-speed 100 MHz strain monitor using fiber Bragg grating and optical filter for magnetostriction measurements under ultrahigh magnetic fields”
 A. Ikeda, T. Nomura, Y. H. Matsuda, S. Tani, Y. Kobayashi, H. Watanabe, K. Sato
[Rev. Sci. Instrum. 88, 083906 \(2017\)](#). - - - - - [arXiv:1703.10971](#) (査読あり)
 15. 「強相関コバルト酸化物の新しいスピנקロスオーバー」
 池田暁彦、松田康弘、佐藤桂輔
[固体物理, Vol. 52, No. 6, 335 \(2017\)](#). (査読あり)
 16. “Spin state ordering of strongly correlating $LaCoO_3$ induced at ultrahigh magnetic fields”
 A. Ikeda, T. Nomura, Y. H. Matsuda, A. Matsuo, K. Kindo, K. Sato
[Phys. Rev. B 93, 220401\(R\) \(2016\)](#) **Editors’ Suggestion** (査読あり)
 17. “Magnetic-field-induced spin crossover of Y-doped $Pr_{0.7}Ca_{0.3}CoO_3$ ”
 A. Ikeda, S. Lee, T. T. Terashima, Y. H. Matsuda, M. Tokunaga, T. Naito
[Phys. Rev. B 94, 115129 \(2016\)](#) - - - - - [arXiv:1607.01623](#) (査読あり)

[学会発表] (計 29 件)

1. 28-29 MAR 2019@東北大理学部 (青葉山キャンパス)
「第二回コバルト研究会 強相関材料と新機能 -価数転移とスピン転移-」 (**invited**)
「コバルト酸化物における磁場誘起三重項励起子凝縮の探索」 池田暁彦
2. 14-17 MAR 2019@九州大学、日本物理学会年次大会
"Magnetostriction study of spin-state transitions of LaCoO₃ at ultrahigh magnetic fields II" (14pS303-5 領域8)
3. 東北大金研ワークショップ "International workshop on science at x-ray free electron lasers: Chemical physics and materials science in extreme x-rays light and extreme fields" (**Invited Talk**), 27-28 FEB 2019
Akihiko Ikeda, ISSP, UTokyo, Japan
"Unconventional magnetic states and spin-lattice coupling in ultrahigh magnetic fields"

2018

4. 物性研短期研究会「量子多体効果が生み出す液晶的電子状態 (**Oral Talk**)
- 2018
Akihiko Ikeda, ISSP, UTokyo, Japan
「コバルト酸化物の励起子凝縮におけるスピンと軌道のネマティック秩序化」
5. 強磁場コラボラトリにおける物性研究の現状と展望@東北大金研 (**Oral Talk**), 26-28 NOV 2018
Akihiko Ikeda, ISSP, UTokyo, Japan
「LaCoO₃の磁場誘起スピントスオーバーにおけるスピン格子結合: 磁場温度相図の超強磁場磁歪計測による探索」
6. エヌエフ基金: 第7回(2018年度) 研究開発奨励賞@学士会館 (**Invited Talk**), 21 NOV 2018
Akihiko Ikeda, ISSP, UTokyo, Japan
「独自開発超高速ひずみ計測装置による極限強磁場中スピン格子科学の開拓」
7. MegaGauss-16@Kashiwanoha (**Invited Talk**), 28 OCT 2018
Akihiko Ikeda, ISSP, UTokyo, Japan
Magnetostriction studies up to megagauss fields using fiber Bragg grating technique [ID83]
8. MegaGauss-16@Kashiwanoha (Poster) p80, 28 OCT 2018
Spin gap and high-field phase in CaV₄O₉ up to 190 T: A 2D quantum spin system on 1/5 depleted square lattice
University of Tokyo, Japan
9. MegaGauss-16@Kashiwanoha (Poster) p81, 28 OCT 2018
High field effects on the antiferromagnetism of a Mott insulator Ca₂RuO₄
University of Tokyo, Japan 81
10. 9pB202-11、領域8
Magnetostriction study of field-induced spin-state transitions of LaCoO₃
池田暁彦, 中村大輔, 松田康弘, 嶽山正二郎, 佐藤桂輔
東大物性研, 茨城高専
日本物理学会 2018年秋季大会@同志社大 9/9
11. RHM2018@Santa Fe (Oral) June24-28, 2018
Akihiko Ikeda, ISSP, University of Tokyo
"Search for Excitonic Condensation in Cobaltites at Ultrahigh Magnetic Fields"
12. "Multipole order of spin and orbitals in cobaltites" ([pdf](#))
A. Ikeda, Y. H. Matsuda, K. Sato, T. Naito
JPhysics regional meeting, Poster
物性研6階、March 16, 2018

2017

13. (**Invited**) "強磁場における LaCoO₃ の自発的スピン状態混合と体積変化"
池田暁彦、東大物性研
第27回 日本MRS学会年次大会、口頭発表
横浜情報文化センター、Dec. 5-7, 2017
14. "ファイバー・ブラッググレーティングをもちいた高速 100MHz 歪み測定法の開発と それによる 100 テスラ超強磁場中磁歪測定"
池田暁彦、東大物性研

強磁場コラボラトリーが拓く未踏計測領域への挑戦と物質・材料科学の最先端
物質・材料研究機構、千現地区、Nov. 29-30, 2017

15. “物性研新型 2MJ 電磁濃縮超強磁場発生装置開発の現状”
池田暁彦、中村大輔、澤部博信、松田康弘、嶽山正二郎
東大物性研
日本物理学会 2017 年秋季大会 領域 3 (実験技術) 21aPS-92 (Poster)
岩手大学 (上田キャンパス) 、Sept. 21-24, 2017
16. “High-speed 100 MHz strain monitor using fiber Bragg grating and optical filter for magnetostriction measurements under ultrahigh magnetic fields”
A. Ikeda, S. Tani, K. Kobahashi, T. Nomura, Y. H. Matsuda, H. Watanabe, K. Sato
ISSP UTokyo, Osaka Univ, Ibaraki National College of Technology
日本物理学会 2017 年秋季大会 領域 3 (実験技術) 22aE26-7、Oral (En.)
岩手大学 (上田キャンパス) 、Sept. 21-24, 2017
17. **(Invited)** “Quantum spin crossover and lattice change of LaCoO₃ at ultrahigh magnetic fields : Possible manifestation of triplet BEC of excitons ”
A. Ikeda, IMGSL ISSP UTokyo
Invited seminar at Helmholtz-Zentrum Dresden-Rossendorf (HZDR), July 24 (2017),
Dresden Germany
18. “Quantum spin-crossover of correlated LaCoO₃: Possible manifestation of excitonic insulator at ultrahigh magnetic fields”
A. Ikeda¹, T. Nomura¹, Y. H. Matsuda¹, A. Matsuoi¹, K. Kindo¹, and K. Sato²
¹ ISSP UTokyo, ² Ibaraki National College of Technology
International Conference on Strongly Correlated Electron Systems, SCES 2017
(Th-1-8)
Prague, 20 July, 2017
19. “Strain monitor at 100 MHz using fiber Bragg grating and optical filter applied for magnetostriction measurements under ultrahigh magnetic fields”
A. Ikeda, T. Nomura¹, Y. H. Matsuda¹, S. Tani², Y. Kobayashi², H. Watanabe³, K. Sato⁴
¹ IMGSL ISSP UTokyo, ² LASOR ISSP UTokyo, ³ Graduate School of Frontier Biosciences,
Osaka University, ⁴ Ibaraki National College of Technology
International Conference on Strongly Correlated Electron Systems, SCES 2017
(Tu-5-2)
Prague, 18 July, 2017
20. **(Invited)** “Quantum spin crossover of LaCoO₃: Possible manifestation of triplet BEC of excitons”
A. Ikeda, IMGSL ISSP UTokyo
Spin-Orbit Interaction and G-factor (SOIG 2017)
at ESPCI Paris, 12-13, July 2017
21. **(Invited)** “Quantum spin-crossover and lattice changes in LaCoO₃ ”
A. Ikeda, IMGSL ISSP UTokyo
Seminar at Laboratoire National des Champs Magnetiques Intenses (LNCMI) of CNRS,
Toulouse, France, 10, July 2017
22. “Lattice change of LaCoO₃ at high-magnetic-fields detected using fiber-Bragg-grating technique”
A. Ikeda, S. Tani, K. Kobahashi, T. Nomura, Y. H. Matsuda, H. Watanabe, K. Sato
ISSP UTokyo, Osaka Univ, Ibaraki National College of Technology
日本物理学会 72 回年次大会 (2017) 領域 8、18aL22-2、Oral
大阪大学 (豊中キャンパス) 、March 18, 2017
23. “Quantum spin-crossover of correlated LaCoO₃” ([pdf](#))
A. Ikeda, T. Nomura¹, Y. H. Matsuda¹, A. Matsuoi¹, K. Kindo¹, and K. Sato²
¹ ISSP UTokyo, ² Ibaraki National College of Technology
The CEMS-QPEC Symposium on “Emergent Quantum Materials” , Oral
Hongo campus, UTokyo, Jan. 19, 2017

2016

24. “Quantum spin-crossover of correlated electrons” ([pdf](#))
A. Ikeda, ISSP UTokyo
MegaGauss Seminar
ISSP Seminar room, Nov. 1, 2016

25. "Magnetic field induced spin state transitions of LaCoO₃ and Pr based cobaltites"
A. Ikeda, Y. H. Matsuda, T. T. Terashima, T. Nomura, S. Lee, A. Matsuo, M. Tokunaga, K. Kindo, K. Sato^A, T. Naito^B, ISSP UTokyo, ^AIbaraki National College of Technology, ^BIwate University
 日本物理学会 2016 年秋季大会 領域 8、Oral
 金沢大学 (角間キャンパス)、Sep. 13, 2016
26. "Development for magnetostriction measurements in pulsed high magnetic fields using fiber Bragg grating"
A. Ikeda, S. Tani, K. Kobahashi, K. Nomura, S. Akimoto, T. Nomura, Y. H. Matsuda, H. Watanabe^A, ISSP UTokyo, ^AOsaka Univ.
 日本物理学会 2016 年秋季大会 領域 8、Poster
 金沢大学 (角間キャンパス)、Sep. 13, 2016
27. "Field induced spin state transitions of cobaltites at above 100 T"
A. Ikeda, ISSP UTokyo
 物性研短期研究会「強磁場コラボラトリー、国際協力と強磁場科学」、Oral
 東京大学物性研究所、June 23, 2016
28. "Development of measurement systems for magnetostriction and x-ray diffraction at above 100 T"
A. Ikeda, ISSP UTokyo
 物性研短期研究会「強磁場コラボラトリー、国際協力と強磁場科学」、Poster
 東京大学物性研究所、June 23, 2016
29. **(Invited)** 「LaCoO₃ と Pr 系 Co 酸化物の磁場誘起スピン転移」
池田 暁彦、東大物性研
 研究会「コバルト化合物のスピン転移が拓く新物性・新機能 第 1 回」、口頭
 東京工業大学大岡山キャンパス、April 13, 2016

[図書] (計 1 件)

1. "*Photo-stimulated desorption*"
A. Ikeda, K. Fukutani
[In: The Surface Science Society of Japan \(eds\) Compendium of Surface and Interface Analysis. Springer, Singapore \(2018\) pp 487-492](#)

[産業財産権]

なし

[その他]

ホームページ等

https://ymatsuda.issp.u-tokyo.ac.jp/member/ikeda/index_j.html

6. 研究組織

(2) 研究協力者

研究協力者氏名：松田 康弘

ローマ字氏名：Yasuhiro H. Matsuda

研究協力者氏名：佐藤 桂輔

ローマ字氏名：Keisuke Sato

※科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。