

平成 30 年 6 月 4 日現在

機関番号：12601

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2015～2017

課題番号：15K05143

研究課題名(和文) 高速熱測定によりプローブする、パルス高磁場での磁場誘起秩序相の研究

研究課題名(英文) Research of field induced phase in pulsed magnetic fields; calorimetric study

研究代表者

小濱 芳允 (Kohama, Yoshimitsu)

東京大学・物性研究所・准教授

研究者番号：90447524

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,600,000円

研究成果の概要(和文)：本申請では、パルス強磁場下での熱測定技術を用い、磁場誘起秩序相の研究を行った。

パルス磁場下での熱測定はそもそも難しい技術であり、1. 磁場発生や2. クライオスタットの開発から進めた。1の磁場発生については、60テスラ以上の磁場で超フラットトップ磁場の発生に世界で初めて成功した。2のクライオスタットの開発により、パルス磁場下で<sup>3</sup>He温度の熱測定が可能になった。このように装置開発にも力点を置きつつ、同時に固体酸素や幾つかの磁性体について磁気熱量効果の研究を完了した。いくつかの重い電子化合物については比熱測定を完了し、論文として発表した。期待通り、多くの研究成果が得られたと考えている。

研究成果の概要(英文)：In this project, the field induced phases in pulsed field region were investigated by calorimetric measurements. The calorimetric measurement under pulsed field was known to be very challenging, and so, at first, I focused on the technical developments of "1. pulsed field generation" and "2. <sup>3</sup>He cryostat". On the topic of pulsed field generation, for the first time, the generation of highly stabilized flat-top pulse was successfully generated above 60 T which has 0.005 T field stability. It should be noted that, by the development of <sup>3</sup>He cryostat, it became possible to reach <sup>3</sup>He temperature in the pulsed field calorimetry. In parallel with these developments, magnetocaloric researches up to 60 T on the solid-oxygen and quantum magnets were performed. The specific heat measurements on some heavy Fermion compounds, were also performed up to 60.5 T. These results were published in several peer-reviewed journal.

研究分野：強磁場

キーワード：強磁場 熱測定 比熱測定 磁気熱量効果 磁性体 重い電子化合物

### 1. 研究開始当初の背景

磁場が誘起する秩序相の研究は長い歴史がある。しかしながら特にパルス強磁場下での測定手法は不足しており、磁化測定か電気抵抗測定のみという現状であった。このため、包括的な研究により、磁場誘起秩序相の詳細を解明する体制を立ち上げる必要性があった。

しかしながら申請者により、2010年頃からパルス磁場中の比熱測定技術が立ち上がってきた。これは申請者の過去のプロジェクト“若手研究B; 70Tパルス強磁場下における比熱測定装置の開発”を含む。これらの開発により磁化・電気抵抗・比熱という3つの基礎測定手法による、より包括的な強磁場の研究が可能となると見込まれた。

しかし研究開始当初(H27年)は比熱測定技術は未だ黎明期とも言え、より良い物性研究のためにも、さらなる開発が必要である段階でもあり、開発と研究を同時に進める必要があった。

### 2. 研究の目的

本申請の主目的は2つある。一つは、“高速熱測定をさらに改良し、パルス磁場下での包括的な物性研究を可能とさせる”ことである。二つ目は、“完成させた高速熱測定技術を使い、実際に興味ある系で物性測定を完了する”ことにある。この二つの目的を二年で完遂させるのは難しい課題であったが、やり遂げることができたと考えている。

### 3. 研究の方法

本申請では、まず装置開発を重点的に進め、それと並行させ物性研究を行った。

#### ～装置開発～

一つの開発は、“パルス磁場の安定化”である。これにより、渦電流や磁気熱量効果による“磁場変化に誘起される温度変化の除去”を狙った。実は、温度がシグナルである熱測定においては、急な温度変化は天敵ともいえるノイズ源であり、そのためパルス磁場の安定化が、強く求められていた。この開発では、現在広がってきたFPGA技術や、パワートランジスタ技術を組み合わせ、パルス磁場が本来持つ磁場変化を打ち消す装置を組み立てた。

二つ目の開発は、“プラスチック製<sup>3</sup>Heクライオスタット”である。これまで<sup>3</sup>Heクライオスタットを使ったパルス磁場下の測定は多いが、熱測定を使った研究は見当たらない。これは、パルス磁場により発熱が起こらない非金属部品でクライオスタットを作るのが難しいことに由来する。必要な性能は、非金属物質を用いても、低温で真空シールドでき、取り外しが安易なことであるが、様々な材料を試行錯誤して組み合わせることにより、これを解決した。

#### ～物性研究～

物性研究については、“比熱測定”と“磁気熱量効果”の測定という2つのパルス磁場下の熱測定技術を用いた。これらの測定手法を組み合わせ、磁性体、金属に関わらず強磁場領域でのエントロピー測定から、様々な成果が得られた。

### 4. 研究成果

#### ～装置開発～

パルス磁場の安定化については、世界で初めて60テスラ以上の強磁場で、磁場が時間変化しない超安定化磁場を発生した。これは、60テスラ以上という強磁場環境で0.005テスラしか磁場が変化しないという驚くべき性能であり、海外大型施設で作られている超安定化磁場の磁場安定度を遥かに凌駕する。(1桁以上の安定度)むしろその磁場安定度はより低磁場しか実現しない定常磁場の磁場安定度と比肩しており、パルス磁場というより高い強磁場環境で、世界的にも物性実験に最も適した磁場環境を開発できたと考えている。この成果はReview Scientific Instrumentsに発表され、また現在では東大物性研のみならず、世界的な広がりを見せつつある。

<sup>3</sup>Heクライオスタットについては、プラスチック素材を使い、取り外し可能で、低温まで真空を保持できるクライオスタットを開発した。これにより、実験の自由度が格段に向上し、低温・強磁場という量子現象が起こりえるフロンティア領域に進出することができた。このクライオスタットの製作の知見は様々な実験で生かされ、熱測定のみならず、低温領域での物性測定全般に利用されている。

#### ～物性研究～

本申請の結果として、重い電子系化合物における比熱測定結果を2つ報告した。1つの論部はPNAS、もう一つはPhys. Rev. Lett.誌に発表できた。重い電子系化合物については、現在2つ投稿済みの論文があり、更なる結果が得られると見込まれている。また、磁気熱量効果を用いて、幾つかの磁性体について研究を展開し、2報の論文を発表した。一つはPhys. Rev. Lett.誌に、もう一つはPhys. Rev. B誌に発表された。磁性体の磁気熱量効果の研究では、さらに1報の論文が投稿中であり、そして3報の論文が投稿準備中であり、さらなる成果が見込まれる。また本期間中には、熱測定技術や低温技術を応用した様々なパルス磁場下の測定を行った。申請期間に得られた電気抵抗測定の結果や、回転プローブを使った量子振動の結果などはその成果であり、これにより2報のNature Physics誌などを発表した。

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 13 件)

[1] Taku T. Terashima, Yasuhiro H.

Matsuda, Yoshimitsu Kohama, Akihiko Ikeda, Akihiro Kondo, Koichi Kindo, and Fumitoshi Iga, “Magnetic-field-induced Kondo metal realized in YbB<sub>12</sub>” *Phys. Rev. Lett.*, in press, (査読有).

[2] Y. J. Liu, J. F. Wang, z. Z. He, C. L. Xia, Z. W. Ouyang, C. B. Liu, R. Chen, A. Matsuo, Y. Kohama, K. Kindo, and M. Tokunaga, “Unusual magnetoelectric memory and polarization reversal in the kagome staircase compound Ni<sub>3</sub>V<sub>2</sub>O<sub>8</sub>” *Phys. Rev. B* **97**, 174429 (2018) (査読有).

[3] Zhe Wang, T. Lorenz, D. I. Gorbunov, P.T. Cong, Y. Kohama, S. Niesen, O. Breuning, J. Engelmayer, A. Herman, Jianda Wu, K. Kindo, J. Wosnitza, S. Zherlitsyn, and A. oidl, “Quntum Criticality of an Ising-like Spin-1/2 Antiferromagnetic Chain in a Transverse Magnetic Field” *Phys. Rev. Lett.* **120**, 207205 (2018) (査読有).

[4] Toshihiro Nomura, Yoshimitsu Kohama, Yasuhiro H. Matsuda, Koichi Kindo, and Tatsuo C. Kobayashi, “ $\alpha$ - $\beta$  and  $\beta$ - $\gamma$  phase boundaries of solid oxygen observed by adiabatic magnetocaloric effect” *Phys. Rev. B* **95**, 104420 (2017) (査読有).

[5] Junjie Liu, Paul A. Goddard, John Singleton, Jamie Brambleby, Francesca Foronda, Johannes S. Möller, Yoshimitsu Kohama, Saman Ghannadzadeh, Arzhang Ardavan, Stephen J. Blundell, Tom Lancaster, Fan Xiao, Robert C. Williams, Francis L. Pratt, Peter J. Baker, Keola Wierschem, Saul H. Lapidus, Kevin H. Stone, Peter W. Stephens, Jesper Bendix, Toby J. Woods, Kimberly E. Carreiro, Hope E. Tran, Cecelia J. Villa, and Jamie L. Manson, “Antiferromagnetism in a Family of S = 1

Square Lattice Coordination Polymers NiX<sub>2</sub>(pyz)<sub>2</sub> (X = Cl, Br, I, NCS; pyz = Pyrazine)” *Inorganic Chemistry* **55**(7), 3515-3529 (2016) (査読有).

[6] Yu Saito, Yasuharu Nakamura, Mohammad Saeed Baharamy, Yoshimitsu Kohama, Yuichi Kasahara, Yuji Nakagawa, Masaru Onga, Masashi Tokunaga, Tsutomu Nojima, Youichi Yanase, and Yoshihiro Iwasa, “Superconductivity protected by spin-valley locking in ion-gated MoS<sub>2</sub>” *Nature Physics* **12**, 144-149 (2016) (査読有).

[7] Zhaoming Tian, Yoshimitsu Kohama, Takahiro Tomita, Hiroaki Ishizuka, Timothy H. Hsieh, Jun J. Ishikawa, Koichi Kindo, Leon Balents, and Satoru Nakatsuji, “Field-Induced quantum metal-insulator transition in the pyrochlore iridate Nd<sub>2</sub>Ir<sub>2</sub>O<sub>7</sub>” *Nature Physics* **12**, 134-138 (2016) (査読有).

[8] Z. M. Tian, Y. Kohama, T. Tomita, J. Ishikawa, H. Mario, K. Kindo, and S. Nakatsuji, “Experimental exploration of novel semimetal state in strong anisotropic Phrochlore iridate Nd<sub>2</sub>Ir<sub>2</sub>O<sub>7</sub> under high magnetic field” *Journal of Physics: Conference Series* **683**, 012024 (2016) (査読有).

[9] Yoshimitsu Kohama and Koichi Kindo “Generation of Flat-top Pulsed magnetic fields with feedback control approach” *Rev. Sci. Instrum.* **86**, 104701 (2015) (査読有).

[10] J. L. Her, Y. Kohama, Y. H. Matsuda, K. Kindo, Wen-Hsin. Yang, D. A. Chareev, E. S. Mitrofanova, O. S. Volkova, A. N. Vasiliev, and Jiunn-Yuan. Lin, “Anisotropy in the upper critical field of FeSe and FeSe<sub>0.33</sub>Te<sub>0.67</sub> single crystals”, *Supercond. Sci. Technol.* **28**, 045013 (2015) (査読有).

[11] Lin Jiao, Ye Chen, Yoshimitsu Kohama, David Graf, E. D. Bauer, John Singleton, Jian-Xin Zhu, Zongfa Weng, Guiming Pang, Tian Shang, Jinglei Zhang, Han-Oh Lee, Tuson Park, Marcelo Jaime, and J.D.

Thompson, Frank Steglich, Qimiao Si, H. Q. Yuan, “Fermi surface reconstruction and multiple quantum phase transitions in the antiferromagnet CeRhIn<sub>5</sub>” Proc. Nat. Acad. Sci. U.S.A. **112**, 673-678 (2015) (査読有).

[12] Kenji Mochizuki, Yoshimitsu Kohama, Akira Matsuo, and Koichi Kindo, “Development of a rapid temperature scanning system for pulsed magnetic fields and its applications”, Physics Procedia **75**, 284-291 (2015) (査読有).

[13] Atsushi Miyake, Yoshimitsu Kohama, Shumpei Ohta, Yusuke Hirose, Rikio Settai, Kazuyuki Matsubayashi, Yoshiya Uwatoko, Akira Matsuo, Koichi Kindo, Masashi Tokunaga, “Development of non-metallic diamond anvil cell and quantum oscillations measurements of CePt<sub>2</sub>In<sub>7</sub> in a pulsed-magnet” J. Phys.: Conf. Ser. **592**, 012149 (2015) (査読有).

〔学会発表〕(計 11件) \*研究代表者の発表のみ

[1]小濱芳允、鍋島冬樹、前田京剛、池田敦彦、松田康弘、嶽山正二郎、日本物理学会第73回年次大会 “一巻きコイルを用いた、超強磁場下での2端子電気抵抗測定” 東京理科大学(千葉) 2018年3月

[2]小濱芳允、石川孟、松尾晶、金道浩一、瀧川仁、広井善二、日本物理学会 2017年秋季大会 “ボルボサイトにおける隠れた秩序の観測” 岩手大学(岩手) 2017年9月

[3]小濱芳允 “ロングパルス磁石を用いた、隠れた秩序相の観測” 強磁場フォーラム、NIMS(茨城) 2017年9月

[4]Yoshimitsu Kohama, “Technology and Techniques for High-Field Caorimetry at the Univ. of Tokyo” Colorado (USA) 2017年7月 (招待講演)

[5]小濱芳允, Lin Jiao, Huiqiu Yuan, 金道浩一, “CeRhIn<sub>5</sub> の高磁場比熱” 日本物理学会第72回年次大会, 大阪大学(大阪), 2017年2月

[6]小濱芳允 “パルス強磁場下の熱測定と物性物理への応用” Conference on Unusual

Physics in Kagome Lattice, 北海道大学(北海道) 2017年2月

[7]小濱芳允、金道浩一 “PID制御による、フラットトップ磁場の発生”、日本物理学会、金沢大学(石川県), 2016年9月

[8] Yoshimitsu Kohama and Koichi Kindo “Research with Non-destructive pulsed magnets: Current Status and Future Prospects at International MegaGauss Science Laboratory”, Daejeon, Korea, 2016年4月 (招待講演)

[9]小濱芳允、金道浩一 “PID制御による、フラットトップ磁場の発生”、日本物理学会、関西大学(大阪), 2015年9月

[10] Yoshimitsu Kohama and Koichi Kindo “A Device for Precise Measurements of Specific Heat in Pulsed Magnetic Fields” RHMf 2015, Grenoble, France, 2015年7月

[11] Yoshimitsu Kohama and Koichi Kindo “Generation of Flat-top Pulsed Magnetic Fields with a Homemade PID Controller” EMFL UserMeeting 2015, 2015年7月

〔図書〕(計 2件)

[1] 小濱芳允, Zhaoming Tian, 富田崇弘, 石川洵, 金道浩一, 中辻知, 石塚大晃, “パイロクロアイリジウム酸化物Nd<sub>2</sub>Ir<sub>2</sub>O<sub>7</sub>における磁場印可方向に敏感な金属-絶縁体転移” 固体物理 **51**, 339 (2016). (アグネ技術センター)

[2] 木原工, 小濱芳允, 徳永将史, 金道浩一, “パルス強磁場下における磁気熱量効果/比熱測定手法の開発” 固体物理 **50**, 371 (2015). (アグネ技術センター)

〔産業財産権〕

出願状況(計 0件)

取得状況(計 0件)

〔その他〕  
ホームページ等

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

小濱 芳允 (Kohama, Yoshimitsu)  
東京大学・物性研究所・准教授  
研究者番号：90447524

### (2) 連携研究者

黒江 晴彦 (Kuroe, Haruhiko )  
上智大学・理工学部・准教授  
研究者番号：40296885

### (3) 連携研究者

金道 浩一 (Kindo, Koichi )  
東京大学・物性研究所・教授  
研究者番号：20205058

### (4) 連携研究者

網塚 浩 (Amitsuka, Hiroshi )  
北海道大学・大学院理学研究院・教授  
研究者番号：40212576