

様式6（第15条第1項関係）

平成29年 4月 10日

| | | | |
|------------------------|--------------------|----------------------------|-------|
| 独立行政法人 日本学術振興会理事長 殿 | 研究機関の設置者の 所在地 | 〒113-8654 東京都文京区本郷7-3-1 | |
| | 研究機関の設置者の 名称 | 国立大学法人 東京大学 | |
| | 代表者の職名・氏名 | 総 長 五 神 真 (記名押印) | |
| | 代表研究機関名 及び機関コード | 東京大学 | 12601 |

平成28年度戦略的国際研究交流推進事業費補助金
実績報告書

戦略的国際研究交流推進事業費補助金取扱要領第15条第1項の規定により、実績報告書を提出します。

| | | | | | |
|------|-------|--------------|-------------|---------------------|--------------------|
| 整理番号 | R2604 | 補助事業の 完了日 | 平成29年 3月31日 | 関連研究分野 (分科細目コード) | 物理学・物性II (4906) |
|------|-------|--------------|-------------|---------------------|--------------------|

| | |
|----------------------------------------------------|--------------------------------|
| 補助事業名（採択年度）新奇量子物質が生み出すトポロジカル現象の先導的研究ネットワーク（平成26年度） | 補助金支出額（別紙のとおり） 40,164,893 円 |
|----------------------------------------------------|--------------------------------|

代表研究機関以外の協力機関

海外の連携機関
Johns Hopkins大学、カルフォルニア大学サンタバーバラ校、米国国立高磁場研究所、Max Planck固体化学物理学研究所、Max Planck複雑系物理学研究所、ドレスデン高磁場研究所、アウクスブルグ大学、ケルン大学、ミュンヘン工科大学、ハーバード大学

1. 事業実施主体

| フリガナ 担当研究者氏名 | 所属機関 | 所属部局 | 職名 | 専門分野 |
|------------------------------|------|-------|----|------|
| 主担当研究者 タキガワ マサシ 瀧川 仁 | 東京大学 | 物性研究所 | 所長 | 物性物理 |
| 担当研究者 サカキバラ トシロウ 榊原 俊郎 | 東京大学 | 物性研究所 | 教授 | 物性物理 |
| オシカワ マサキ 押川 正毅 | 東京大学 | 物性研究所 | 教授 | 物性物理 |
| 計3名 | | | | |

| フリガナ 連絡担当者 | 所属部局・職名 | 連絡先（電話番号、e-mailアドレス） |
|-------------------|----------------|-----------------------------------------------------------|
| ムラモト ヨウコ 村本 洋子 | 物性研究所事務部予算・決算係 | 電話番号 04-7136-3212 E-mail issp-yosan@issp.u-tokyo.ac.jp |

※2頁以降は、交付決定を受けた時点の事業計画の項目に合わせて必要に応じて修正すること。

2. 本年度の実績概要

最終年度の年度末の2月から、一ヶ月間の理論の滞在型ワークショップ”Theory of Correlated Topological Materials”と、その期間中に3日間シンポジウム”Topological Phases and Functionality of Correlated Electron Systems”を開催した。ワークショップでは連携機関を始め14人を招へいし37講演、シンポジウムでは19人を招へい（うち外国人13人）し24講演の構成とし、参加者は140人以上に昇った。若手研究者の派遣は昨年度1人追加されたが、1人は昨年度で派遣が終了したため本年度の派遣は5人となり、招へいはワークショップ・シンポジウムへの招へいもあり13人となった。共同研究の具体的な研究実施内容やその成果については、以下に3つの研究テーマ毎に述べる。

○ 強相関電子系におけるトポロジカル絶縁体

強相関電子系におけるさまざまな新しいトポロジカル量子相の発現の舞台となる、派遣者の中辻らが開発したパイロクロア型イリジウム酸化物 $\text{Pr}_2\text{Ir}_2\text{O}_7$ においては、フェルミノードを持つことから一軸歪を与えることでワイル金属状態になることが期待されている。この系において基板を用いた薄膜を作製した場合、基板との界面の歪によりワイル半金属状態が誘起される可能性があると考えられ、実際に、バルクでの単結晶で見られた1.5 K以下の自発的異常ホール効果の状態が薄膜では40 K以上で現れることを見出した。これは基板との界面における歪により対称性が低下することだけでなく、電子相関も増大することで巨視的に時間反転対称性を破ったワイル半金属状態が実現している可能性が高い。更に連携研究者の Armitage 教授と共同でテラヘルツ分光を行い、この薄膜試料はフェルミノード系に電子相関が重要な系に特徴的な巨大な誘電率を持つことを明らかにした。また、関連する $\text{Eu}_2\text{Ir}_2\text{O}_7$ においては Ir の 5d 電子が作る all-in all-out 秩序が作る拡張八極子の状態が磁場とは垂直方向に磁化を誘起するカイラルな磁性を持つことも明らかにした（論文 16 (Nature Physics, 2017)）。

理論面においては、物理的な磁場、あるいはベリ一位相による仮想的な磁場により生じる量子ホール状態はトポロジカル相の典型例であり、トポロジカル絶縁体を含めた統一的な理解が進んでいる。強相関トポロジカル相の分類は未開拓の部分が多く一般的な枠組みが必要であるため、担当研究者の押川は連携機関における滞在中において、Yuan-Ming Lu 助教授 (Ohio State)、Ying Ran 准教授 (Boston College) らとも連携を深め、強相関系を含め周期ポテンシャル中の量子ホール状態に一般的に適用できる新たな一般則を見出した。これによると、単位胞あたりの粒子密度と磁束によって、量子化されたホール伝導度として出現可能な値が強く制約される。既に簡単なモデルについて有益な結果が導かれており、具体的なカイラル物質への適用を進めている。

○ 磁性体における量子スピン液体相

量子スピン液体はこれまで乱れに対して弱いとされてきた。一方、非クラマース磁性体においては、乱れによって磁氣的縮退が破れることで、有効な量子揺らぎが導入されることが知られている。主連携研究者の Broholm 教授らと共同で量子スピンアイス候補物質である $\text{Pr}_2\text{Zr}_2\text{O}_7$ において、乱れを導入することで量子スピン液体状態が安定化することを見出した（論文 17 (PRL, 2017)）。さらに、[111]方向に磁場を加えることによって、メタ磁性転移が現れるが、この転移による新しい磁性を明らかにするべく純良単結晶を用いた中性子実験を同 Broholm 教授らと行っている。

量子スピン液体の主たる起源となるフラストレーションの強い磁性体の典型的なモデルとして、カゴメ格子上のハイゼンベルグ反強磁性体は長年の間精力的に実験・理論・数値計算の各

方面から研究され、特に近年の数値計算手法の発展に伴い多くの結果が報告されるようになってきた。この系の基底状態は長距離秩序を持たないスピン液体であることが支持されているが、どのような種類のスピン液体かについて更に明らかにしていくために、連携研究者である He 博士や Pollmann 博士らとの共同研究として、1次元系に確立している密度行列くりこみ群 (DMRG) の応用で有限の周長を持つ円筒を1次元系として取り扱うことによる計算結果を再検討した。結果として、円筒の周方向の境界条件を変化させることで、ギャップが大きく減少することを新たに見出した。これは、DMRG で得られていたギャップは有限周長の円筒を扱っていることによる効果であり、2次元系の極限ではギャップレスであることを示唆している。さらに、転送行列のスペクトルにディラックコーンの構造が現れることを示し、DMRG の結果も詳細に解析すると、むしろ基底状態がギャップレスなディラックスピン液体を示唆することを見出した。この結果は、量子磁性における最も基本的な問題に大きな進展を与えるものとして注目されている。

○ 強相関電子系 YbAlB_4 における量子臨界相

$\alpha\text{-YbAlB}_4$ において、c 軸方向に磁場を印加した際に現れる全く新しいタイプの量子臨界現象を昨年度に発見したが、本年度では磁気的な相関を明らかにするため中性子実験を主連携研究者の Broholm 教授と行った。 $\alpha\text{-YbAlB}_4$ は大型単結晶育成が難しいため、50 個程度の単結晶の結晶軸を合わせた擬似単結晶を用いた。その結果、フェルミ液体状態が現れる 10 K 以上では Yb のモーメントが c 軸方向に強磁性相関を持つこと、一方 10 K 以下では逆に面内の方向に反強磁性相関が発達することが明らかになってきた。c 軸方向の強磁性相関が発達がこの系のイジング的な磁性と、さらに、3 テスラに現れるメタ磁性転移とも関係していることが期待される。また、この系では Al サイトを Mn で置換することで 20 K 以上の温度で反強磁性秩序が現れるが、同 Broholm 教授との中性子実験により、この反強磁性状態が c 軸方向に強磁性の一軸チェーンと面内に反強磁性状態の安定化による結果であることが明らかになった。更に物性研究所の和達研究室とのコラボレーションにより光電子分光の結果から、興味深いことにフェルミ面近傍でギャップを有する近藤絶縁体的なふるまいを持つことが明らかになった。

3. 到達目標に対する本年度の達成度及び進捗状況

本事業では3つの研究テーマを主題にし、強相関電子系における新しいトポロジカル相やトポロジカル現象の理論的予言と、その実験的検証を通じて新しい分野を創出することが到達目標となる。各3つのテーマにおいて、連携機関との着実な共同研究が進み成果が出始めるとともに、派遣された若手研究者や担当研究者が滞在先の連携機関を軸に、更に連携を広める形で共同研究が発展している。特に、昨年度に我々が発見した、トポロジカルな起源と考えられる反強磁性体における巨大異常ホール効果を示す物質 Mn_3Sn の研究の注目度は高く、多くの海外の研究者を惹きつけている。最終年度として開催した、理論的な進展を目指した滞在型ワークショップではメルティングポットとして一ヶ月に渡り多角的かつ深い議論が行われ、また、シンポジウムでは本プログラム成果や最近の注目される関連成果についての招待講演も含めて、1人の講演・質疑時間を十分にとり一講演毎に内容の濃い発表と議論を深めることができた。特に、連携機関以外の著名な研究者も招へいし、それらの招へい者も含めて参加者からは継続的な開催を求める意見も出ており、分野創出に向けての各方面へのアピールにも役立てることができたと考えている。

4. 日本側研究グループ（実施主体）の研究成果発表状況（本年度分）

①学術雑誌等（紀要・論文集等も含む）に発表した論文又は著書

| 論文名・著書名 等 | |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <p>（論文名・著書名、著者名、掲載誌名、査読の有無、巻、最初と最後の頁、発表年（西暦）について記入してください。）（以上の各項目が記載されていれば、項目の順序を入れ替えても可。）</p> <p>・査読がある場合、印刷済及び採録決定済のものに限って記載して下さい。査読中・投稿中のものは除きます。</p> <p>・さらに数がある場合は、欄を追加して下さい。</p> <p>・著者名について、責任著者に「※」印を付してください。また、主担当研究者には<u>二重下線</u>、担当研究者については<u>下線</u>、若手研究者については<u>波線</u>を付してください。</p> <p>・海外の連携機関の研究者との国際共著論文等には、番号の前に「◎」印を、また、それ以外の国際共著論文等については番号の前に「○」印を付してください。また、主要連携研究者については<u>斜体・太下線</u>、連携研究者については<u>斜体・破線</u>としてください。</p> | |
| ○ 1 | <p>P. Babkevich, M. Jeong, Y. Matsumoto, I. Kovacevic, A. Finco, R. Toft-Petersen, C. Ritter, M. Månsson, <u>S. Nakatsuji</u>, and H. M. Rønnow, “Dimensional Reduction in Quantum Dipolar Antiferromagnets” <i>Phys. Rev. Lett.</i> 116, 197202 (1-5) (2016) 【査読有】</p> |
| ○ 2 | <p><u>Y. Tada</u>, S. Takayoshi, S. Fujimoto, “Magnetism and superconductivity in ferromagnetic heavy-fermion system UCoGe under in-plane magnetic fields” <i>Phys. Rev. B</i> 93, 174512 (1-7) (2016) 【査読有】</p> |
| ○ 3 | <p>T. Haku, K. Kimura, Y. Matsumoto, M. Soda, M. Sera, D. Yu, R. A. Mole, T. Takeuchi, <u>S. Nakatsuji</u>, Y. Kono, <u>T. Sakakibara</u>, L.-J. Chang, “Low-Energy Excitations and Ground State Selection in Quantum Breathing Pyrochlore Antiferromagnet Ba₃Yb₂Zn₅O₁₁” <i>Phys. Rev. B</i> 93, 220407 (1-5) (2016) 【査読有】</p> |
| 4 | <p>Y. Wakabayashi, D. Nakajima, Y. Ishiguro, K. Kimura, T. Kimura, S. Tsutsui, A. Q. R. Baron, K. Hayashi, N. Happo, S. Hosokawa, K. Ohwada, and <u>S. Nakatsuji</u>, “Chemical and orbital fluctuations in Ba₃CuSb₂O₉” <i>Phys. Rev. B</i> 93, 245117 (1-13) (2016) 【査読有】</p> |
| 5 | <p>小濱芳允、Zhaoming Tian、富田崇弘、石川洵、金道浩一、石塚大晃、<u>中辻 知</u>, 「パイロクロア型イリジウム酸化物 Nd₂Ir₂O₇における磁場印加方向に敏感な金属-絶縁体転移」 固体物理、Vol. 51 pp. 339-355 (2016) 【査読有】</p> |
| 6 | <p>N. Kiyohara, T. Tomita, and <u>S. Nakatsuji</u>, “Giant Anomalous Hall Effect in the Chiral Antiferromagnet Mn₃Ge” <i>Phys. Rev. Applied</i> 5, 064009 (1-10) (2016) 【査読有】</p> |
| ○ 7 | <p>D. E. MacLaughlin, K. Kuga, Lei Shu, O. O. Bernal, P.-C. Ho, <u>S. Nakatsuji</u>, K. Huang, Z. F. Ding, C. Tan, and Jian Zhang, “Quantum criticality and inhomogeneous magnetic order in Fe-doped α-YbAlB₄” <i>Phys. Rev. B</i> 93, 214421 (1-8) (2016) 【査読有】</p> |
| ◎ 8 | <p>M. Nakayama, Takeshi Kondo, Z. Tian, J. J. Ishikawa, M. Halim, C. Bareille, W. Malaeb, K. Kuroda, T. Tomita, S. Ideta, K. Tanaka, M. Matsunami, S. Kimura, N. Inami, K. Ono, H. Kumigashira, <u>L. Balents</u>, <u>S. Nakatsuji</u>, and S. Shin, “Slater to Mott Crossover in the Metal to Insulator Transition of Nd₂Ir₂O₇” <i>Phys. Rev. Lett.</i> 117, 056403 (1-6) (2016) 【査読有】 <i>Editors' Suggestion</i></p> |
| ○ 9 | <p>H. Ryu, M. Abeykoon, E. Bozin, Y. Matsumoto, <u>S. Nakatsuji</u> and C. Petrovic, “Multiband electronic transport in α-Yb_{1-x}Sr_xAlB₄ [x = 0, 0.19(3)] single crystals” <i>J. Phys. Condens. Matter</i> 28, 42 (1-5) (2016) 【査読有】</p> |
| 10 | <p>富田崇弘、<u>中辻 知</u>, 「超伝導に隠された異常金属相の発見」 一量子臨界「点」でなく「相」として振る舞う不思議な金属相」物性研だより 56 巻 2 号、pp. 9-11 (2016).</p> |

| | |
|---------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 11 | R. Peters, <u>Y. Tada</u> , and N. Kawakami, “Magnetism in f-electron superlattices” <i>Phys. Rev. B</i> 94, 205142 (1-6) (2016) 【査読有】 |
| 12 | <u>Y. Tada</u> , T. Koma, “Two No-Go Theorems on Superconductivity” <i>J. Statist. Phys.</i> 165, 455-470 (2016) 【査読有】 |
| 13 | T. Tomita, K. Kuga, Y. Uwatoko, and <u>S. Nakatsuji</u> , “Pressure-induced magnetic transition exceeding 30 K in the Yb-based heavy-fermion β-YbAlB₄” <i>Phys. Rev. B</i> 94, 245130 (1-6) (2016) 【査読有】 |
| 14 | <u>三田村裕幸</u> 「物性物理学における‘スピнкаイラリティ’はカイラルか？」 日本物理学会誌71 no.12 (2016)857-858. 【査読有】 |
| 15 | N. Kawamura, N. Kanai, H. Hayashi, Y.H. Matsuda, M. Mizumaki, K. Kuga, <u>S. Nakatsuji</u> , and S. Watanabe, “Lifetime-Broadening-Suppressed X-ray Absorption Spectrum of β-YbAlB₄ Deduced from Yb 3d \rightarrow 2p Resonant X-ray Emission Spectroscopy” <i>J. Phys. Soc. Jpn.</i> 86, 014711 (1-7) (2017). 【査読有】 |
| ◎ 16 | T. Liang, <u>T.H. Hsieh</u> , J. J. Ishikawa, <u>S. Nakatsuji</u> , L. Fu and N.P. Ong, “Orthogonal magnetization and symmetry breaking in pyrochlore iridate Eu₂Ir₂O₇” <i>Nature Physics</i> doi:10.1038/nphys4051 (1-5) (2017) 【査読有】 |
| ◎ 17 | J.-J. Wen, S. M. Koohpayeh, K. A. Ross, B. A. Trump, T. M. McQueen, K. Kimura, <u>S. Nakatsuji</u> , Y. Qiu, D. M. Pajerowski, J. R. D. Copley, and <u>C. L. Broholm</u> , “Disordered Route to the Coulomb Quantum Spin Liquid: Random Transverse Fields on Spin Ice in Pr₂Zr₂O₇” <i>Phys. Rev. Lett.</i> 118, 107206 (1-5) (2017) 【査読有】 |

②学会等における発表

| 発表題名 等 | |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| (発表題名、発表者名、発表した学会等の名称、開催場所、口頭発表・ポスター発表の別、審査の有無、発表年月(西暦)について記入してください。)(以上の各項目が記載されていれば、項目の順序を入れ替えても可。) ・発表者名は参加研究者を含む全員の氏名を、論文等と同一の順番で記載すること。共同発表者がいる場合は、全ての発表者名を記載し、責任発表者名は「※」印を付して下さい。発表者名について主担当研究者には <u>二重下線</u> 、担当研究者については <u>下線</u> 、若手研究者については <u>波線</u> を付して下さい。 ・口頭・ポスターの別、発表者決定のための審査の有無を区分して記載して下さい。 ・さらに数がある場合は、欄を追加して下さい。 ・海外の連携機関の研究者との国際共同発表には、番号の前に「◎」印を、また、それ以外の国際共同発表については番号の前に○印を付して下さい。また、主要連携研究者については <u>斜体・太下線</u> 、連携研究者については <u>斜体・破線</u> としてください。 | |
| ◎ 1 | ※Y. Matsumoto, A. Magata, <u>Y. Shimura</u> , T. Tomita, <u>R. Kuchler</u> , M. Brando, <u>S. Nakatsuji</u> “Field Induced Quantum Criticality without Magnetism in α-YbAlB₄” (口頭発表) International conference on strongly correlated electron systems (SCES 2016), Hangzhou, China, 2016年5月9日【審査有】 |
| 2 | ※ <u>S. Nakatsuji</u> “Large anomalous Hall effect in chiral antiferromagnets at room temperature” 【招待講演】 International conference on strongly correlated electron systems (SCES 2016), Hangzhou, China, 2016年5月11日 |
| 3 | ※ <u>S. Nakatsuji</u> “Novel Topological Phases in Correlated Electron Systems” 【基調講演】 Annual Conference of the Institute for Complex Adaptive Matter, Kent State Univ., 2016年5月16日 |

| | |
|---------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 4 | <p>※ <u>S. Nakatsuji</u>, N. Kiyohara, A. Sakai, T. Higo, and T. Tomita", "Large anomalous Hall effect in chiral antiferromagnets Mn₃Sn, Mn₃Ge" (口頭発表) J-Physics 平成 28 年度領域全体会議 (J-Physics conference 2016), 北海道大学フロンティア 応用科学研究棟, 2016 年 5 月 26 日</p> |
| 5 | <p>※ Y. Matsumoto, M. Tsujimoto, T. Tomita, A. Sakai and <u>S. Nakatsuji</u> "Multipolar ordered states and heavy fermion superconductivity in PrT₂Al₂₀ (T = Ti, V)" (口頭発表), J-Physics 平成 28 年度領域全体会議 (J-Physics conference 2016), 北海道大 学フロンティア応用科学研究棟, 2016 年 5 月 26 日</p> |
| ○ 6 | <p>※ <u>M. Oshikawa</u> "Renyi-Shannon Entropy and Boundary Field Theory" 【招待講演】 YKIS conference "Quantum Matter, Spacetime and Information", Yukawa Institute for Theoretical Physics, Kyoto University, June 13-17, 2016</p> |
| ◎ 7 | <p>※ <u>三田村裕幸</u>, E. Kampert, T. Förnster, K. Götze, <u>S. Zherlitsyn</u>, J. Wosnitza, <u>榊原俊郎</u>, 脇倉 和平, 松本圭介, 鬼丸孝博, 高畠敏郎, 鈴木慎太郎, 辻本真規, Zhaoming Tian, <u>志村恭通</u>, <u>中辻知</u> 「ドレスデン強磁場施設におけるパルス強磁場中高精度磁気抵抗測定技術の開発」(ポ スター発表)、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の未来」、東 京大学物性研究所、柏、2016 年 6 月 23 日</p> |
| ○ 8 | <p>※ <u>M. Oshikawa</u> "Superfluidity and Dynamics in 1 Dimension" 【招待講演】 "Non-Equilibrium Dynamics In Classical And Quantum Systems : From Quenches To Slow Relaxations", Abbaye Des Prémontrés, Pont-À-Mousson, France, July 13-15, 2016</p> |
| ○ 9 | <p>※ <u>M. Oshikawa</u> "Orbital Angular Momentum and Spectral Flow in Two Dimensional Chiral Superfluids" 【招待講演】NORDITA Program "Multi-Component and Strongly-Correlated Superconductors", NORDITA, Stockholm, Sweden, 20 July 2016</p> |
| ◎ 11 | <p>※ <u>押川正毅</u> 「対称性によって保護されたトポロジカル相」【招待講義】 第 61 回物性若手夏の学校、ホテルシャレードイン志賀 (長野県)、2016 年 7 月 29 日</p> |
| 12 | <p>※ <u>S. Nakatsuji</u> "Novel Topological Phases in Correlated Electron Systems" 【招待講演(Review talk)】 International symposium Quantum Criticality and Topology in Itinerant Electron Systems , 2016 年 8 月 15 日</p> |
| 13 | <p>※ <u>押川正毅</u> 「物性物理学における対称性の自発的破れ」【招待講演】 日本物理学会科学セミナー、東京大学駒場キャンパス、2016 年 8 月 21 日</p> |
| ○ 14 | <p>※ <u>M. Oshikawa</u> "Polarization and Gauge Invariance" 【招待講演】 BIRS Workshop "Geometrical Degrees of Freedom in Topological Phases", Banff International Research Station, Canada, August 23, 2016</p> |
| 15 | <p>※ M. Ikhlas, T. Tomita, N. Kiyohara, H. Narita, <u>S. Nakatsuji</u>, Y. Otani", "Large Anomalous Nernst Effect in Non-Collinear Antiferromagnets Mn₃Z (Z=Sn, Ge)" (口頭発表)、日本物理学会 2016 年秋季大会、金沢大学、2016 年 9 月 13 日</p> |
| ◎ 16 | <p>※ <u>志村 恭通</u>, Q. Zhang, B. Zeng, <u>L. Balicas</u>, <u>中辻 知</u>", "a-YbAlB₄ の高磁場磁気抵抗効果"(口頭発表) 日本物理学会 2016 年秋季大会、金沢大学、2016 年 9 月 13 日</p> |
| ○ 17 | <p>※ <u>富田崇弘</u>, M. Ikhlas, <u>志村恭通</u>, A. A. Nugroho, <u>中辻 知</u> "カイラル反強磁性体 Mn₃Sn における回転磁場中の異常ホール効果と磁気抵抗"(口頭発表) 日本物理学会 2016 年秋季大会、金沢大学、2016 年 9 月 13 日</p> |

| | |
|---------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| ○ 18 | ※酒井明人、A.A. Nugroho、西川尚、 <u>中辻 知</u> 、 「カイラル反強磁性体 Mn_3Sn におけるドーピング効果」(口頭発表) 日本物理学会 2016 年秋季大会、金沢大学、2016 年 9 月 13 日 |
| ◎ 19 | ※酒井明人、木村健太、 <u>P. Gegenwart</u> 、 <u>中辻 知</u> 、 「パイロクロア Pr 酸化物における極低温磁性」(口頭発表) 日本物理学会 2016 年秋季大会、金沢大学、2016 年 9 月 13 日 |
| ◎ 20 | ※ <u>三田村裕幸</u> 、E. Kampert, T. Förster, K. Götze, <u>S. Zherlitsvin</u> , J. Wosnitza, <u>榊原俊郎</u> 、脇舎 和平、松本圭介、鬼丸孝博、高島敏郎 「 PrT_2Zn_{20} ($T = Ir, Rh$) のパルス強磁場中磁気抵抗測定」(口頭発表) 日本物理学会 2016 年秋季大会、金沢大学、2016 年 9 月 13 日 |
| ○ 21 | ※ <u>M. Oshikawa</u> “Polarization, Gauge Invariance, and Quantum Hall Effect on Lattice” 【招待講演】 KITP Conference “Topological Quantum Matter”, Kavli Institute for Theoretical Physics, UC Santa Barbara, USA, October 17-21, 2016 |
| 22 | ※ <u>M. Oshikawa</u> “Symmetry Protection of Critical Phases and Global Anomaly in 1+1 Dimensions” 【招待講 演】 627 th WE-Heraeus Seminar, Physikzentrum Bad Honnef, Germany, November 2, 2016 |
| ◎ 23 | ※ <u>M. Oshikawa</u> “Signatures of Dirac cones in Kagome antiferromagnet” 【招待講演】 MPI-UBC-UTokyo Symposium, Hongo Campus, University of Tokyo, December 6, 2016 |
| 24 | ※ <u>M. Oshikawa</u> “Quantum Many-Body Problem and Relativistic Field Theory: Where Do We Stand Now?” 【招待講演】 CHIRAL MATTER from quarks to Dirac semimetals, RIKEN, December 8, 2016 |
| 25 | ※富田崇弘、志村恭通、M. Ikhlas、西川尚、 <u>中辻 知</u> 、大谷義近、 「カイラル反強磁性体 Mn_3Sn における回転磁場中の異常ホール効果と磁気抵抗」(ポスター発 表) |
| 26 | ※ <u>M. Oshikawa</u> “Absence of Quantum Time Crystals” 【招待講演】 Bangkok Workshop on Discrete Geometry and Statistics, Chulalongkorn University, Thailand, February 3, 2017 |
| ◎ 27 | ※ Y. Nagaoka, <u>Y. Shimura</u> , A. Sakai, M. Tsujimoto, <u>P. Gegenwart</u> , Y. Matsumoto, A. Magata and <u>S. Nakatsuji</u> “Field-Induced Quantum Critical Phenomena in PrV_2Al_{20} ” (ポスター発表) Topological Phases and Functionality of Correlated Electron Systems 2017 (TPFC2017), 東京 大学柏の葉キャンパス駅前サテライト、2017 年 2 月 20 日 |
| 28 | ※ S. Suzuki, K. Takubo, K. Kuga, T. Tomita, <u>Y. Shimura</u> , Y. Matsumoto, H. Wadati, C. Bareille, S. Shin, <u>S. Nakatsuji</u> “High temperature antiferromagnetism and Kondo insulating behavior in α - $YbAl_{1-x}Mn_xB_4$ ” (ポスター発表) Topological Phases and Functionality of Correlated Electron Systems 2017 (TPFC2017), 東京大学柏の葉キャンパス駅前サテライト、2017 年 2 月 20 日 |
| 29 | ※ M. Tsujimoto, A. Sakai, <u>S. Nakatsuji</u> “Non-Fermi liquid behaviors due to 2 channel Kondo effect in multipolar system PrV_2Al_{20} ” (ポスター発表) Topological Phases and Functionality of Correlated Electron Systems 2017 |
| ◎ 30 | ※ <u>H. Man</u> , N. Tang, J. Wen, N. Butch, <u>S. Nakatsuji</u> , <u>C. Broholm</u> “Quantum Fluctuations in the Kagome spin ice state of $Pr_2Zr_2O_7$ ” (ポスター発表) Topological Phases and Functionality of Correlated Electron Systems 2017 (TPFC2017), 東京 大学柏の葉キャンパス駅前サテライト、2017 年 2 月 20 日 |

| | |
|---------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 31 | <p>※<u>T. Higo</u>, K. Iritani, M. Halim, W. Higemoto, T. U. Ito, K. Kuga, K. Kimura, <u>S. Nakatsuji</u> "Geometrical frustration in the Heisenberg pyrochlore antiferromagnets AYb_2X_4 (A = Cd, Mg, X = S, Se)" (ポスター発表) Topological Phases and Functionality of Correlated Electron Systems 2017 (TPFC2017), 東京大学柏の葉キャンパス駅前サテライト、2017年2月20日</p> |
| 32 | <p>※Z. Tian, T. Tomita, Y. Kohama, <u>S. Nakatsuji</u> "Field inversion asymmetric behavior of magnetoresistance in anisotropic $\text{Nd}_2\text{Ir}_2\text{O}_7$ single crystal" (ポスター発表) Topological Phases and Functionality of Correlated Electron Systems 2017 (TPFC2017), 東京大学柏の葉キャンパス駅前サテライト、2017年2月20日</p> |
| 33 | <p>※<u>Y. Shimura</u>, Q. Zhang, B. Zeng, <u>L. Balicas</u>, <u>S. Nakatsuji</u> "Quantum Limit in the Heavy Fermion Metal $\alpha\text{-YbAlB}_4$" (ポスター発表) Topological Phases and Functionality of Correlated Electron Systems 2017 (TPFC2017), 東京大学柏の葉キャンパス駅前サテライト、2017年2月20日</p> |
| 34 | <p>※T. Tomita, K. Kuga, <u>Y. Shimura</u>, Y. Matsumoto, Y. Uwatoko, <u>S. Nakatsuji</u> "Strange metal phase without magnetic criticality in heavy fermion superconductor $\beta\text{-YbAlB}_4$" (ポスター発表) Topological Phases and Functionality of Correlated Electron Systems 2017 (TPFC2017), 東京大学柏の葉キャンパス駅前サテライト、2017年2月20日</p> |
| 35 | <p>※A. Sakai, Y. Matsumoto, Z. Tian, <u>S. Nakatsuji</u> "Anomalous Hall effect in nodal metallic spin ice $\text{Pr}_2\text{Ir}_2\text{O}_7$" (ポスター発表) Topological Phases and Functionality of Correlated Electron Systems 2017 (TPFC2017), 東京大学柏の葉キャンパス駅前サテライト、2017年2月20日</p> |
| ◎ 36 | <p>※<u>H. Man</u>, J. Wen, N. Butch, <u>S. Nakatsuji</u>, <u>C. Broholm</u> "Quantum Fluctuations in the Kagome spin ice state of $\text{Pr}_2\text{Zr}_2\text{O}_7$" (口頭発表) APS March meeting 2017, Ernest Morial Convention Center New Orleans, USA, 2017年3月13日</p> |
| 37 | <p>※永岡靖浩、酒井明人、辻本真規、<u>中辻知</u> "四極子近藤格子 $\text{PrV}_2\text{Al}_{20}$ における低温熱膨張と磁歪" (口頭発表) 日本物理学会 72 回年次大会、大阪大学、2017年3月17日</p> |
| 38 | <p>※辻本真規、酒井明人、松本洋介、<u>中辻知</u> "四極子自由度による重い電子系 $\text{PrV}_2\text{Al}_{20}$ の多極子転移点以上における 2 チャンネル近藤効果" (口頭発表) 日本物理学会 72 回年次大会、大阪大学、2017年3月17日</p> |
| ○ 39 | <p>※肥後友也, <u>H. Man</u>, D.B. Gopman, Y.P. Kabanov, O.M.J. van't Erve, Y. Li, M. Ikhlas, R.D. Shull, C-L. Chien, <u>中辻知</u> "カイラル反強磁性体 Mn_3Sn における磁気光学効果とドメイン観測" (口頭発表) 日本物理学会 72 回年次大会、大阪大学、2017年3月17日</p> |
| ◎ 40 | <p>※志村 恭通, Q. Zhang, B. Zeng, R. U. Schoenemann, D. Rhodes, 辻本 真規, 酒井 明人, 松本 洋介, <u>榊原 俊郎</u>, W. Zheng, Q. Zhou, <u>L. Balicas</u>, <u>中辻知</u> "反強四極子秩序系 $\text{PrV}_2\text{Al}_{20}$ の高磁場相と異方的磁気抵抗効果" (口頭発表) 日本物理学会 72 回年次大会、大阪大学、2017年3月17日</p> |
| 41 | <p>※富田崇弘、清原直樹、M. Ikhlas、西川尚、<u>中辻知</u>、大谷義近 "カイラル反強磁性体 Mn_3X (X= Sn, Ge) における強磁場回転磁気効果" (口頭発表) 日本物理学会 72 回年次大会、大阪大学、2017年3月17日</p> |
| 42 | <p>※酒井明人、松本洋介、Zhaoming Tian、<u>中辻知</u> "フェルミノードを持つ金属スピニアイス $\text{Pr}_2\text{Ir}_2\text{O}_7$ における異常な輸送特性" (口頭発表) 日本物理学会 72 回年次大会、大阪大学、2017年3月17日</p> |
| 43 | <p>※<u>多田靖啓</u>、高麗徹 "超伝導における不可避定理：永久電流と $U(1)$ 対称性の破れ" (口頭発表) 日本物理学会 72 回年次大会、大阪大学、2017年3月20日</p> |

5. 若手研究者の派遣実績（計画）

【海外派遣実績（計画）】

| 年度 | 平成 26 年度 | 平成 27 年度 | 平成 28 年度 | 合計 |
|------|----------|---------------|---------------|-----|
| 派遣人数 | 2 人 | 6 人 (2 人) | 5 人 (5 人) | 6 人 |

※当該年度は実績、次年度以降は計画している人数を記載

【本年度の海外派遣実績】

派遣者①の氏名・職名：志村恭通・特任研究員

（当該若手研究者の国際共同研究における役割を含めた具体的な研究活動）

派遣者はアウグスブルグ大学にて、希釈冷凍機を用いて $\text{PrV}_2\text{Al}_{20}$ および $\alpha\text{-YbAlB}_4$ 、また同大学との共同研究の一環として量子臨界物質である $\text{Ce}(\text{Cu,Au})_6$ の Cu サイトへの Au 置換系の磁気熱量効果測定を試みた。その結果、 $\text{PrV}_2\text{Al}_{20}$ と $\text{Ce}(\text{Cu,Au})_6$ の測定には成功したが、 $\alpha\text{-YbAlB}_4$ に関しては、交流磁場を印加する電源装置の故障により測定を断念した。また 5 月中旬にドイツから直接アメリカにわたり、米国国立高磁場研究所にて、最大 31 T の直流磁場下でワイル金属の候補物質として知られている反強磁性体 Mn_3Sn の磁気トルク測定を行い、日本へ帰国した。

（具体的な成果）

$\text{PrV}_2\text{Al}_{20}$ に関しては、以前に見られていた 11 T 付近に見られる四極子による量子臨界性を明らかにするため、最大 14.5 T までの磁気熱量効果測定を行ったところ、その発散傾向が、通常のに比べて非常に弱いことを明らかにした。これは非磁性の四極子モーメントによる量子臨界性の特徴を反映している可能性がある。

一方、 Mn_3Sn に関しては、磁気トルク測定から約 15 T 以上で明瞭な量子振動を見出した。この量子振動の有効質量は自由電子のものと比較して 20%-10%程度と非常に小さいことから、この系で期待されているフェルミ面近傍のワイルポイントの存在を反映している可能性がある。今後、詳細な角度依存性からフェルミ面の全容を明らかにする予定である。

| 派遣先 (国・地域名、機関名、部局名、受入研究者) | 派遣期間 | | | 合計 |
|-------------------------------------------|----------|----------|----------------|-------|
| | 平成 26 年度 | 平成 27 年度 | 平成 28 年度 | |
| アメリカ合衆国、米国国立高磁場研究所、L. Balicas 主任研究員 | 64 日 | 158 日 | 24 日 前年より継続 | 246 日 |
| ドイツ、アウグスブルグ大学、電子相関・磁性センター、P. Gegenwart 教授 | 0 日 | 40 日 | 46 日 前年より継続 | 86 日 |

派遣者③の氏名・職名：中辻 知・准教授

(当該若手研究者の国際共同研究における役割を含めた具体的な研究活動)

反強磁性体において初めてホール効果を示す Mn_3Sn の大型単結晶を育成し、その中性子回折実験を行った。また、派遣先 Johns Hopkins 大学において、Chia-Ling Chen 教授、若手研究者の肥後とともに Mn_3Sn において、ホール効果の動的な成分である Kerr 効果を測定し、その周波数依存性を確認した。さらに、ワイルフェルミ粒子の存在を確認するために、 Mn_3Sn の磁場中抵抗を測定した。受け入れ先の Johns Hopkins 大学の主要連携研究者 Broholm 教授とともに量子スピニアイス候補物質 $Pr_2Zr_2O_7$ の純良単結晶を育成し、非弾性中性子散乱実験を行った。また、トロント大学の Y.B.Kim 教授とは、平成 28 年 2 月にドイツで開催した本事業のワークショップへ招聘したことがきっかけに、スピン液体で観測された異常ホール効果に対応した理論について議論を行った。

(具体的な成果)

反強磁性体 Mn_3Sn の大型単結晶における中性子回折の結果、明瞭なスピン波励起を見出した。さらに、第一原理計算との比較を通じてワイルフェルミオンの励起の可能性を追求している。 Mn_3Sn の Kerr 効果の測定の結果、反強磁性体としては初めて Kerr 効果を発見し、それがドメインの観察に有効であることを見出した。連携研究者の Pallab Goswami 氏と共同で Mn_3Sn の磁気抵抗効果を詳細に解析した結果、ワイルフェルミオンが誘起する Chiral Anomaly の効果であることを見出した。量子スピニアイス候補物質である $Pr_2Zr_2O_7$ において、非クラマース 2 重項に対する乱れが量子揺らぎを増強し、量子スピン液体を安定している可能性を見出した。

| 派遣先 (国・地域名、機関名、部局名、受入研究者) | 派遣期間 | | | 合計 |
|---------------------------------------------------|----------|----------|----------|-------|
| | 平成 26 年度 | 平成 27 年度 | 平成 28 年度 | |
| アメリカ合衆国、Johns Hopkins 大学、量子物質科学研究所、C.L.Broholm 教授 | 0 日 | 117 日 | 179 日 | 296 日 |
| ドイツ、アウグスブルグ大学、電子相関・磁性センター、P. Gegenwart 教授 | 0 日 | 4 日 | 0 日 | 4 日 |
| ドイツ、Max Planck 複雑系物理学研究所、R.Moessner 所長 | 0 日 | 7 日 | 0 日 | 7 日 |
| カナダ、トロント大学、Y.B.Kim 教授 | 0 日 | 0 日 | 4 日 | 4 日 |

派遣者④の氏名・職名：多田靖啓・助教

(当該若手研究者の国際共同研究における役割を含めた具体的な研究活動)

昨年度に引き続き、Max Planck 複雑系物理学研究所（ドイツ・ドレスデン）に滞在し、同研究所の連携研究者である Frank Pollmann 氏らと、トポロジカルなエッジ質量流などの研究を行った。また、Frank Pollmann 氏、同研究所のグループ・リーダーである岡隆氏とともに、非平衡強相関係に関する共同研究を開始した。ドイツ滞在中にはケルン大学（ドイツ・ケルン）を訪れ、ゲージ場と相互作用する電子系における超伝導に関するセミナーを行い、同大学の主連携研究者である Achim Rosch 氏、Maria Hermanns 氏、及びポスドクや学生と様々な問題について議論した。さらに、カリフォルニア大学サンタ

バーバラ校（アメリカ・カリフォルニア）の主連携研究者である Leon Balents 氏を訪ね、セミナー、議論、情報交換などを行った。また、物性研究所における頭脳循環プロジェクト主催の国際シンポジウム・ワークショップ TPFC/TCTM2017 の準備・運営にあたった。

（具体的な成果）

密度行列繰り込み群法を用いた解析（Frank Pollmann 氏と共同研究）により、これまで平均場レベルの計算でされてきた、カイラル超流動体における軌道角運動量やトポロジカル・エッジ質量流に関する主張が、本質的に正しいものであることを確認した。主張の内容自体が直観的に非自明であることや、平均場計算がより精密な計算で覆されることがしばしばあることを考慮すると、興味深い結果であると考えている。また、質量流に関連しては連携を他機関に広め、高麗徹氏（学習院大学）と超伝導などにおける永久電流に関する Bloch の定理の再検討を行った。さらに、U(1)ゲージ場と結合する電子系に関して、いくつかの数学的に厳密な結果を得た。これらの結果は、トポロジカル・スピン液体の文脈や、トポロジカル秩序としての超伝導体という観点からも興味深いと考えている。超伝導に関しては、ワイル超伝導体の候補である UCoGe の具体的な物性についても研究を行い、いくつかの実験結果を理論的に説明した。また、カイラル反強磁性体 Mn_3Sn における軌道磁性や表面電流に関して、同機関内での連携を深め、実験を行っている下澤雅明氏（東京大学物性研究所）と密接に議論し、理論的サポートを行った。

| 派遣先 (国・地域名、機関名、部局名、受入研究者) | 派遣期間 | | | 合計 |
|----------------------------------------------------|----------|----------|----------|-------|
| | 平成 26 年度 | 平成 27 年度 | 平成 28 年度 | |
| ドイツ、Max Planck 複雑系物理学研究所、R. Moessner 所長 | 0 日 | 130 日 | 201 日 | 331 日 |
| ドイツ、ケルン大学、理論物理研究所、A. Rosch 教授 | 0 日 | 0 日 | 3 日 | 3 日 |
| 米国、カリフォルニア大学サンタバーバラ校、カリフォルニア理論物理学研究所、L. Balents 教授 | 0 日 | 0 日 | 6 日 | 6 日 |

派遣者⑤の氏名・職名：肥後友也・特任研究員

（当該若手研究者の国際共同研究における役割を含めた具体的な研究活動）

昨年度に引き続き、JHU の Chien 研究室において、 Mn_3Sn の薄膜作製を行った。昨年度は Mn_3Sn のエピタキシャル薄膜の作製に成功した。このエピタキシャル膜では、カゴメ面（(0001)面）が基板に平行に積層した構造となっており、異常ネルンスト効果の測定により非共面スピン構造がもたらすトポロジー・カイラリティ由来の現象の解明を行うことが出来る。また、本年度は新たに、より応用の際の汎用性の高い Mn_3Sn の多結晶薄膜の作製を行った。多結晶薄膜では、基板に安価な Si を用いることが出来ることに加え、バルク単結晶試料において確認された磁場、磁化に比例しない巨大な異常ホール効果を測定することが可能である。また、7 月の帰国以降は、物性研究所にて Chien 研究室において学んだ技術（DC マグネトロンスパッタ装置の立ち上げや Mn_3Sn 薄膜の作製）の移管を行った。

（具体的な成果）

Mn_3Sn のエピタキシャル薄膜に加え、多結晶薄膜を安価な Si 基板上に作成する事に成

功した。また、これらの薄膜試料はバルクの単結晶試料で観測された磁気・電子構造由来のトポロジークが作る巨大なホール効果、ネルンスト効果を示すことを明らかにした。現在、技術移管が完了し、東大物性研においても Chien 研と同等の薄膜の作製が可能となった。現在は物性研大谷研究室と共に、Mn₃Sn 薄膜を用いたデバイス作成や、昨年引き続き、連携機関先 JHU の Armitage 研究室における THz 実験に用いられ現在実験が行われている。

| 派遣先 (国・地域名、機関名、部局名、受入研究者) | 派遣期間 | | | 合計 |
|---------------------------------------------------|----------|----------|----------|-------|
| | 平成 26 年度 | 平成 27 年度 | 平成 28 年度 | |
| アメリカ合衆国、Johns Hopkins 大学、量子物質科学研究所、C.L.Broholm 教授 | 0 日 | 198 日 | 102 日 | 300 日 |
| ドイツ、Max Planck 複雑系物理学研究所、R. Moessner 所長 | 0 日 | 7 日 | 0 日 | 7 日 |

派遣者⑤の氏名・職名：Huiyuan Man・特任研究員

(当該若手研究者の国際共同研究における役割を含めた具体的な研究活動)

Pr₂Zr₂O₇の純良単結晶を育成し、ジョンズホプキンス大学の Broholm 教授と協力して、アメリカの米国標準科学技術研究所にて非弾性中性子散乱実験を行った。Mn₃Sn のカー効果について詳細な測定を行った。

(具体的な成果)

純良単結晶の作製に成功し、その大型単結晶を用いた中性子回折からモノポール励起の温度依存性を明確にした。反強磁性体 Mn₃Sn において反強磁性体では初めてのカー効果の検出に成功した

| 派遣先 (国・地域名、機関名、部局名、受入研究者) | 派遣期間 | | | 合計 |
|---------------------------------------------------|----------|----------|----------|-------|
| | 平成 26 年度 | 平成 27 年度 | 平成 28 年度 | |
| アメリカ合衆国、Johns Hopkins 大学、量子物質科学研究所、C.L.Broholm 教授 | 0 日 | 125 日 | 240 日 | 365 日 |

※本年度の派遣者毎に作成すること。

6. 研究者の招へい実績 (計画)

【招へい実績 (計画)】

| 年度 | 平成 26 年度 | 平成 27 年度 | 平成 28 年度 | 合計 |
|-------|----------|---------------|----------------|------|
| 招へい人数 | 7 人 | 5 人 (4 人) | 13 人 (5 人) | 16 人 |

※当該年度は実績、次年度以降は計画している人数を記載

【本年度の招へい実績】

招へい者①の氏名・職名：Collin L. Broholm・教授

(当該研究者の国際共同研究における役割を含めた具体的な研究活動)

大型単結晶を用いた反強磁性体 Mn_3Sn の非弾性中性子散乱と、 $Pr_2Zr_2O_7$ の純良単結晶を用いた量子スピニアイス状態における磁気励起の解明

(具体的な成果)

Mn_3Ge の非弾性中性子散乱を J-PARC にて行い、明瞭なスピン波励起の観測に成功した。また、ワイル点間を結ぶ新しい磁気励起の可能性を理研の有田氏の第一原理計算との比較から追及している。量子スピニアイス候補物質の $Pr_2Zr_2O_7$ の純良単結晶を用いて、弾性散乱と非弾性散乱の測定を行い、モノポール励起がつくるピンチポイントの温度依存性を明らかにした。

| 招へい元（機関名、部局名、国名）及び 日本側受入研究者（機関名） | 招へい期間 | | | 合計 |
|--------------------------------------------------|----------|----------|----------|------|
| | 平成 26 年度 | 平成 27 年度 | 平成 28 年度 | |
| Johns Hopkins 大学、量子物質科学研究所、 アメリカ合衆国 瀧川仁（東京大学） | 6 日 | 0 日 | 10 日 | 16 日 |

招へい者②の氏名・職名：Oleg Tchernyshyov・准教授

(当該研究者の国際共同研究における役割を含めた具体的な研究活動)

連携研究者として、本プログラムのメルティングポット期間として 5 週間にわたり開催したワークショップ Theory of Correlated Topological Materials のほぼ全期間に参加し、議論を通じて若手研究者に多くの示唆を与えた。また、招待講演 “Quantum spin liquid with 7 elementary particles” を行い、新しいクラスの量子スピン液体の提案を行った。さらに、期間中に開催したシンポジウム Topological Phases and Functionality of Correlated Electron Systems の組織委員を務め、招待講演者の選定に尽力した。

(具体的な成果)

物性研滞在中に、磁場中の $Yb_2Ti_2O_7$ の磁場中相図の解析を行い、古典的な模型と実験の不一致を指摘した。これは、相図を決定するうえで量子ゆらぎの重要性を示唆している。

| 招へい元（機関名、部局名、国名）及び 日本側受入研究者（機関名） | 招へい期間 | | | 合計 |
|---------------------------------------------------|----------|----------|----------|------|
| | 平成 26 年度 | 平成 27 年度 | 平成 28 年度 | |
| Johns Hopkins 大学、量子物質科学研究所、 アメリカ合衆国 押川正毅（東京大学） | 0 日 | 0 日 | 27 日 | 27 日 |

招へい者③の氏名・職名：Leon Balents・教授

(当該研究者の国際共同研究における役割を含めた具体的な研究活動)

連携研究者として、本プログラムのメルティングポット期間として開催したワークショップ Theory of Correlated Topological Materials の組織委員を務め若手研究者の招聘に尽力した。また、同期間中に開催したシンポジウム Topological Phases and Functionality of Correlated Electron Systems において、招待講演 Interplay of real and momentum space topological defects を行った。

| | | | | |
|-------------------------------------------------|----------|----------|----------|------|
| (具体的な成果) パイロクロア型イリジウム酸化物 | | | | |
| 招へい元（機関名、部局名、国名）及び 日本側受入研究者（機関名） | 招へい期間 | | | 合計 |
| | 平成 26 年度 | 平成 27 年度 | 平成 28 年度 | |
| カリフォルニア大学サンタバーバラ校、物理学科、教授、 アメリカ合衆国 瀧川仁（東京大学） | 6 日 | 0 日 | 26 日 | 32 日 |

招へい者④の氏名・職名：Luis Balicas・主任研究員

| | | | | |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------|----------|----------|------|
| (当該研究者の国際共同研究における役割を含めた具体的な研究活動) フェルミ面のトポロジーの変化を起因として、通常の金属のフェルミ液体とは大きく異なる量子臨界性を示す YbAlB_4 の高磁場でのトルク及び電気抵抗の測定を行った。 | | | | |
| (具体的な成果) YbAlB_4 において量子振動を発見し、その結果、Dirac 粒子がこの系において存在することが明らかになった。 | | | | |
| 招へい元（機関名、部局名、国名）及び 日本側受入研究者（機関名） | 招へい期間 | | | 合計 |
| | 平成 26 年度 | 平成 27 年度 | 平成 28 年度 | |
| 米国国立高磁場研究所、アメリカ合衆国 瀧川仁（東京大学） | 8 日 | 0 日 | 10 日 | 18 日 |

招へい者⑧の氏名・職名：Clifford Hicks・グループリーダー

| | | | | |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------|----------|----------|-----|
| (当該研究者の国際共同研究における役割を含めた具体的な研究活動) $\text{Pr}_2\text{Ir}_2\text{O}_7$ の単結晶の一軸歪実験の実施にあたり、Focused Ion Beam を用いた単結晶の整形を行い、実際に一軸応力を加えるための準備を行った。 | | | | |
| (具体的な成果) $\text{Pr}_2\text{Ir}_2\text{O}_7$ の一軸圧力下での物性を明らかにする実験の整備を行うことができた。本プログラムの終了後の来年度に引き続き、物性研究所へ来所する予定があり圧力下での低温実験を実施する予定である。 | | | | |
| 招へい元（機関名、部局名、国名）及び 日本側受入研究者（機関名） | 招へい期間 | | | 合計 |
| | 平成 26 年度 | 平成 27 年度 | 平成 28 年度 | |
| Max Planck 固体化学物理学研究所、ドイツ 瀧川仁（東京大学） | 0 日 | 0 日 | 9 日 | 9 日 |

招へい者⑫の氏名・職名：Achim Rosch・教授

| | | | | |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------|----------|----------|-----|
| <p>(当該研究者の国際共同研究における役割を含めた具体的な研究活動)</p> <p>本プログラムのメルティングポット期間中に開催したシンポジウム Topological Phases and Functionality of Correlated Electron Systems において、招待講演 “Pumping Approximately Integrable Systems” を行った。</p> <p>(具体的な成果)</p> <p>新奇な量子物質の新たな動的機能性を発現するための指針を示し、今後の研究の展開に有益な示唆を与えた。</p> | | | | |
| 招へい元（機関名、部局名、国名）及び 日本側受入研究者（機関名） | 招へい期間 | | | 合計 |
| | 平成 26 年度 | 平成 27 年度 | 平成 28 年度 | |
| ケルン大学、理論物理研究所、ドイツ 押川正毅（東京大学） | 0 日 | 0 日 | 8 日 | 8 日 |

招へい者⑬の氏名・職名：Maria Hermanns・助教

| | | | | |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------|----------|----------|------|
| <p>(当該研究者の国際共同研究における役割を含めた具体的な研究活動)</p> <p>本プログラムのメルティングポット期間として開催したワークショップ Theory of Correlated Topological Materials に参加し、招待講演 “3D Kitaev Spin Liquids” を行い、Hermanns 博士が世界をリードしている 3次元のキタエフスピン液体の研究の最新の現状について紹介した。また、これは Hermanns 博士との共同研究をさらに発展させる上でも有用であった。</p> <p>(具体的な成果)</p> <p>Hermanns 博士の物性研滞在中に、押川や山田昌彦（大学院生）との前年度からの議論をさらに発展させ、新しいクラスのとポロジカル相を 3次元格子で実現するための指針や、具体的な物質設計などについて共同研究を進めている。</p> | | | | |
| 招へい元（機関名、部局名、国名）及び 日本側受入研究者（機関名） | 招へい期間 | | | 合計 |
| | 平成 26 年度 | 平成 27 年度 | 平成 28 年度 | |
| ケルン大学、理論物理研究所、ドイツ 押川正毅（東京大学） | 22 日 | 7 日 | 47 日 | 76 日 |

招へい者⑭の氏名・職名：Timothy H. Hsieh・ポスドク

| | | | |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--|--|--|
| <p>(当該研究者の国際共同研究における役割を含めた具体的な研究活動)</p> <p>本プログラムのメルティングポット期間として開催したワークショップ Theory of Correlated Topological Materials に参加し、招待講演 “Topological Bootstrap: Fractionalization from Kondo Coupling” を行った。</p> <p>(具体的な成果)</p> <p>分数化を伴う新奇とポロジカル相を、通常の金属相などにおける自由度の結合によって構成する指針を示した。これまで理論的には多彩なとポロジカル相が分類されているが、多くの場合これを実験的に実現する方法は明確ではなかった。Hsieh 博士の講演と議論により、現実的な系での実現を目指す指針が与えられた。</p> | | | |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--|--|--|

| 招へい元（機関名、部局名、国名）及び 日本側受入研究者（機関名） | 招へい期間 | | | 合計 |
|----------------------------------------------------------|----------|----------|----------|------|
| | 平成 26 年度 | 平成 27 年度 | 平成 28 年度 | |
| カリフォルニア大学サンタバーバラ校、カリフォルニア理論物理学 研究所、アメリカ合衆国 押川正毅（東京大学） | 0 日 | 0 日 | 12 日 | 12 日 |

招へい者⑯の氏名・職名：Frank Pollmann・准教授

| <p>（当該研究者の国際共同研究における役割を含めた具体的な研究活動）</p> <p>密度行列くりこみ群 (DMRG) によるカゴメ格子上的ハイゼンベルグ反強磁性体の基底状態に関する共同研究を、連携研究者である Yin-Chen He 博士、押川らとともに行い、DMRG に関する経験が豊富な研究者として強い指導力を発揮した。また、本プログラムのメルティングポット期間として開催したワークショップ Theory of Correlated Topological Materials に参加し、招待講演 Dynamical signatures of quantum spin liquids を行い、スピン液体の動的性質について最新の知見を紹介し今後の研究の方向性に有益な示唆を与えた。</p> <p>（具体的な成果）</p> <p>研究成果欄で述べたように、共同研究の成果として、カゴメ格子上的ハイゼンベルグ反強磁性体に関して DMRG でこれまで報告されていた励起ギャップは、有限の周長の円筒を用いたことによる有限サイズ効果であり、2 次元系の極限では基底状態がディラックスピン液体であることを示唆する結果を得た。</p> | | | | |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------|----------|----------|------|
| 招へい元（機関名、部局名、国名）及び 日本側受入研究者（機関名） | 招へい期間 | | | 合計 |
| | 平成 26 年度 | 平成 27 年度 | 平成 28 年度 | |
| ミュンヘン工科大学、物理学科、ドイツ 押川正毅（東京大学） | 0 日 | 0 日 | 22 日 | 22 日 |

招へい者⑰の氏名・職名：Yin Chen He・ポスドク

| | | | | |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--|--|--|--|
| <p>（当該研究者の国際共同研究における役割を含めた具体的な研究活動）</p> <p>前年度の招へいをきっかけに、密度行列くりこみ群 (DMRG) によるカゴメ格子上的ハイゼンベルグ反強磁性体の基底状態に関する共同研究を、連携研究者である Frank Pollmann 准教授、押川らとともに行った。He 博士は、当初の研究の発案を行い、またほとんどの数値計算を遂行するなど、この共同研究の中心的な存在として最大の貢献を行った。</p> <p>また、本プログラムのメルティングポット期間として開催したワークショップ Theory of Correlated Topological Materials に参加し、招待講演 “The Kagome Spin Liquid” を行い、上記共同研究の成果を報告した。</p> | | | | |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--|--|--|--|

| | | | | |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------|----------|----------|------|
| (具体的な成果) | | | | |
| 研究成果欄で述べたように、共同研究の成果として、カゴメ格子上のハイゼンベルグ反強磁性体に関して DMRG でこれまで報告されていた励起ギャップは、有限の周長の円筒を用いたことによる有限サイズ効果であり、2次元系の極限では基底状態がディラックスピン液体であることを示唆する結果を得た。 | | | | |
| 招へい元（機関名、部局名、国名）及び 日本側受入研究者（機関名） | 招へい期間 | | | 合計 |
| | 平成 26 年度 | 平成 27 年度 | 平成 28 年度 | |
| ハーバード大学、物理学科、アメリカ 押川正毅（東京大学） | 22 日 | 38 日 | 11 日 | 71 日 |

招へい者⑱の氏名・職名：Louk Rademaker・ポスドク

| | | | | |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------|----------|----------|-----|
| (当該研究者の国際共同研究における役割を含めた具体的な研究活動) | | | | |
| 本プログラムのメルティングポット期間として開催したワークショップ Theory of Correlated Topological Materials に参加し、招待講演 “Thermalization in Quantum Systems - and its breakdown” を行った。 | | | | |
| (具体的な成果) | | | | |
| トポロジカル物質の機能発現のためにも重要な量子ダイナミクスについての最近の研究からの知見を紹介し、議論を通じて実験的研究にも多くの示唆を与えた。 | | | | |
| 招へい元（機関名、部局名、国名）及び 日本側受入研究者（機関名） | 招へい期間 | | | 合計 |
| | 平成 26 年度 | 平成 27 年度 | 平成 28 年度 | |
| カリフォルニア大学サンタバーバラ校、カブリ理論物理学 研究所、アメリカ合衆国 押川正毅（東京大学） | 0 日 | 0 日 | 8 日 | 8 日 |

招へい者⑳の氏名・職名：Simon Trebst・教授

| | | | | |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------|----------|----------|------|
| (当該研究者の国際共同研究における役割を含めた具体的な研究活動) | | | | |
| 本プログラムのメルティングポット期間中に開催したシンポジウム Topological Phases and Functionality of Correlated Electron Systems において、招待講演 “Spin liquids and (Majorana) metals” を行った。 | | | | |
| (具体的な成果) | | | | |
| 現在、理論的・実験的に活発に研究されているKitaevスピン液体や関連する量子相について、明快な解説を行った。これは、Hermanns 博士との共同研究を進展させる上でも有意義であった。 | | | | |
| 招へい元（機関名、部局名、国名）及び 日本側受入研究者（機関名） | 招へい期間 | | | 合計 |
| | 平成 26 年度 | 平成 27 年度 | 平成 28 年度 | |
| ケルン大学、理論物理研究所、ドイツ 押川正毅（東京大学） | 0 日 | 0 日 | 10 日 | 10 日 |

招へい者②の氏名・職名：Peter Armitage・教授

| | | | | |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------|----------|----------|-----|
| <p>(当該研究者の国際共同研究における役割を含めた具体的な研究活動) Pr₂Ir₂O₇の薄膜についてテラヘルツ分光を行った。</p> <p>(具体的な成果) Pr₂Ir₂O₇の持つフェルミノード状態の相関効果の結果、巨大な誘電率が現れることが明瞭になった。</p> | | | | |
| 招へい元（機関名、部局名、国名）及び 日本側受入研究者（機関名） | 招へい期間 | | | 合計 |
| | 平成 26 年度 | 平成 27 年度 | 平成 28 年度 | |
| Johns Hopkins 大学、量子物質科学研究所、 アメリカ合衆国 瀧川仁（東京大学） | 0 日 | 0 日 | 5 日 | 5 日 |

※本年度の招へい者毎に作成すること。

7. 翌年度の補助事業の遂行に関する計画

| |
|--|
| |
|--|

※ 補助事業が完了せずに国の会計年度が終了した場合における実績報告書には、翌年度の補助事業の遂行に関する計画を附記すること。