

様式6 (第15条第1項関係) (採択年度=平成26年度以降)

平成27年 4月 9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26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27年 3月31日	関連研究分野(分科細目コード)	物理学・物性II (実験) (4906)
------	-------	----------	-------------	-----------------	-------------------------

補助事業名 (採択年度)	補助金支出額 (別紙のとおり)
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)	39,196,659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、カリフォルニア大学サンババ校、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、アウグスブルグ大学、ケルン大学

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 ガタキガワ 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 サカキハラ トシロウ 榊原 俊郎	東京大学	物性研究所	教授	物性物理
ナオシカワ 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)
カノ シンジ 狩野 真二	物性研究所事務部予算・決算係	電話番号 04-7136-3212 E-mail isspp-yosan@isspp.u-tokyo.ac.jp

2. 本年度の実績概要

本年度における若手研究者の派遣は計画通りの2人、招へい者についても計画通りの7人、また、予定をしていたワークショップについては米国で行う予定を日本開催に変更し実施した。但し、予定していた米国においてもアメリカ物理学会開催時に集まった連携研究者と、本プロジェクトの研究内容と次年度のワークショップに関する打合せを行った。共同研究の具体的な研究実施内容やその成果について、3つの研究テーマ毎に以下に述べる。

○ 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トポロジカル絶縁体として、最も実現可能性が高い系として物性研究所で開発した量子物質 $\text{Pr}_2\text{Ir}_2\text{O}_7$ がある。この系は強相関電子系では初めての半金属であることが、UCSBの理論グループとの共同研究からわかっている。まず、若手研究者（中辻）が $\text{Pr}_2\text{Ir}_2\text{O}_7$ と $\text{Nd}_2\text{Ir}_2\text{O}_7$ の単結晶の純良単結晶を育成し、その電子構造を検証した。その結果、半金属・絶縁体転移を示す $\text{Nd}_2\text{Ir}_2\text{O}_7$ においても、半金属領域において、 $\text{Pr}_2\text{Ir}_2\text{O}_7$ と同様のQuadratic Band Touching状態を実現していることを確認した。また、 $\text{Nd}_{2-x}\text{Ir}_{2-x}\text{O}_7$ において、NdとIrの組成を制御することに成功し、半金属・絶縁体転移の温度が x の関数として劇的に変化することを発見した。さらに、主要連携研究者Balents教授とこれらの実験の解析を行い、半金属・絶縁体相転移の機構が、Ndの4fモーメントとIrの5d電子の間の相関によっていることが明らかになった。一方、同Balents教授の理論から期待されるトポロジカル絶縁体の存在を検証するために、主要連携研究者Andrew P.Mackenzie教授と連携研究者Clifford Hicks博士と共同で、一軸圧力下での測定を行うための共同研究を進めている。また、担当研究者（榊原）が $\text{Nd}_2\text{Ir}_2\text{O}_7$ の極低温磁化測定を行い、磁場中でのNd4fスピン構造の相転移を発見した。この物質において、主要連携研究者Zherlitsyn博士と協議し、超音波実験により、磁気格子相互作用を明らかにすることが有効であることが分かった。

トポロジカル絶縁体と関連して、ワイル半金属相においては、場の理論によって電流と磁場が比例する「カイラル磁気効果」が予言されている。この効果は、場の理論の立場からは、ギャップが開いて絶縁体相になっても残るように見える。一方、絶縁体では、少なくとも平衡状態では磁場下でも電流が流れることはないと期待される。押川は藤田浩之（大学院生）と共同で、このことと場の理論による計算の矛盾を解消し、ワイル半金属相やトポロジカル絶縁体などの動的な磁場応答について研究を進めている。

○ 磁性体における量子スピン液体相

物性研究所において開発した量子スピン液体の候補物質である量子スピンアイス系 $\text{Pr}_2\text{Zr}_2\text{O}_7$ の純良単結晶の育成をめざし、組成のことなる $\text{Pr}_{2-x}\text{Zr}_{2-x}\text{O}_7$ を育成し、その結晶性の化学分析を中辻が、さらにNQRを用いた解析を担当研究者（瀧川）が行った。その結果純良単結晶の育成方法を確立した。さらに、その中性子回折実験を若手研究者（中辻）が連携先のJHUの主要連携研究者Broholm教授と共同で行う共同研究を進めている。担当研究者（榊原）と行った磁化測定には、磁場誘起のモノポールの量子気体・液体転移であるメタ磁性転移を発見した。その実験結果をドレスデンMPI-PKSの主要連携研究者Moessner教授と共同して解析し、この系で期待される磁気格子相互作用の効果について議論を行った。その議論による物理的推測に基づき、Rober Kuchler博士を招へいして、磁歪系を希釈冷凍機と300 K以下の高温での測定用に物性研究所にて導入し、共同で熱膨張、磁歪の測定を進めている。さらに、純良単結晶を用いた磁気熱量効果の測定は、主要連携研究者Philipp Gegenwart教授とともに現在、進行中である。

カゴメ格子上のハイゼンベルグ反強磁性体は、フラストレート磁性体の代表的モデルであるとともに、量子スピン液体相を基底状態として持つ現実物質の候補と考えられている。近年、このモデルの基底状態はRVBスピン液体（Z2トポロジカル相）であるという説が強力になっている。しかし、これも理論的に完全に確かめられたわけではない。MPI-PKSの連携研究者Yin-Chen He博士らは、密度行列くりこみ群を用いた精緻な数値的研究によって、カゴメ格子上のXXZ反強磁性体の相図を明らかにした。その結果は、ハイゼンベルグ反強磁性体の基底状態がRVBスピン液体であるという描像にも再検討を迫るものとなっている。押川は同He博士を物性研に招聘し、カゴメ格子上のXXZ反強磁性体の有効理論について共同研究を行った。同He博士らの得た数値的結果をゲージ理論を用いて記述できる可能性が見出され、現在研究が進行中である。

Kitaevは2006年の論文で、蜂の巣格子上のボンドの方向に依存した異方的交換相互作用を持つ量子スピン系の厳密解を求め、その中に量子スピン液体相が含まれることを示した。ケルン大学の連携研究者Maria Hermanns博

士らは、Kitaev 模型とその厳密解をさまざまな格子に拡張した。押川は同 Hermanns 博士を物性研に招聘し、これらの模型に対する格子変形の効果について共同研究を行った。格子変形は、フェルミオンに結合するゲージ場として記述できるため、これによってどのような物理的効果が生み出されるかを検討中である。

○ 強相関電子系 YbAlB_4 における量子臨界相

$\beta\text{-YbAlB}_4$ は、金属で初めて磁気秩序と無関係な量子臨界性を確認した物質であり、常圧で量子臨界相を形成していることが期待される。その量子臨界性は通常の金属のフェルミ液体とは大きく異なる性質を示す。さらに、同組成で構造の異なる $\alpha\text{-YbAlB}_4$ は低温でフェルミ液体を示す。 $\beta\text{-YbAlB}_4$ で現れる量子臨界性の起源を明らかにするため、 $\alpha\text{-YbAlB}_4$ においてAlサイトをFeで置換する実験を行ったところ、Feを1.4%置換するだけで、 $\beta\text{-YbAlB}_4$ と同様の臨界性を示すことを発見した。さらに量子臨界点を超えてFeで置換することで、反強磁性状態が現れる。その反強磁性の秩序を明らかにするために、Broholm教授と中性子回折実験を行った。その結果、Fe置換量を変化することで、磁気秩序の波数ベクトルは変化しないが、磁気モーメントの方向は変化することがわかった。さらに、この磁気秩序による量子臨界性と常圧で現れる $\beta\text{-YbAlB}_4$ の量子臨界性の違いを、今後、Broholm教授と中性子実験等で明らかにする方針である。さらに、主要連携研究者Balicas博士と若手研究者(志村)が協力して米国国立高磁場研究所において、高磁場での量子振動を確認した。また、圧力下での電気抵抗測定から量子振動の周波数が圧力の関数としては変化しないが、磁場の関数として変化することを確認した。これは、連携先のケルン大学のAchim Rosch教授らが率いる理論グループが指摘するフェルミ面のトポロジーの変化を実験的に検証することになる可能性が高く、今後も引き続き、高磁場での実験を行っていく。さらに、 YbAlB_4 においては、磁場中における量子臨界メタ磁性転移について、その近傍で現れる量子臨界性をRober Kuchler博士とともに磁歪測定に基づいて、明らかにした。これは、このメタ磁性転移が熱力学的にも量子相転移とみなせることを明らかにしたという点で大変、重要である。三田村裕幸助教が2月27日からドレスデン高磁場研究所へ赴き、主要連携研究者S. Zherlitsyn博士と共同でデジタル位相検波法を用いた低温・パルス強磁場下の電気抵抗測定装置の立ち上げを開始した。既に必要な機材の移設は完了し、順調に作業が進んでいる。

トポロジカル相の分類の理論的研究は、これまで主に理論的取り扱いが比較的簡単な、ギャップを持つ相について行われてきた。しかし、上述のような実験的研究の進展もあり、ギャップレスな量子臨界相の分類が今後重要な問題になると考えられる。押川は、古谷峻介氏(ジュネーブ大学)と共同で、1+1次元でSU(2)対称性と並進対称性を持つ量子反強磁性体の量子臨界相の新たな分類を行った。1+1次元でSU(2)対称性とローレンツ普遍性を持つ量子臨界相は、自然数のレベルをパラメータとするSU(2) Wess-Zumino-Witten(WZW)理論で記述される。このとき、量子反強磁性体の並進対称性はWZW理論の持つZ2対称性に対応する。今回の研究で、Z2対称性の存在下では、2つの異なるレベルを持つSU(2) WZW理論の間にくりこみ群のフローがあるとき、レベルの差は偶数になることを量子異常に基づいて示した。すなわち、SU(2) WZW理論はZ2対称性の存在下で、レベルが偶数のものと奇数のものの二つのクラスに分類される。スピンの整数の並進対称な量子反強磁性鎖の量子臨界相は偶数レベルのWZW理論に、スピンの半奇数の場合は奇数レベルのWZW理論で記述される。ただし、並進対称性(WZW理論のZ2対称性)が破れた系ではこのような分類は適用されない。これは、対称性によって保護されたトポロジカル(Symmetry-Protected Topological=SPT)相の概念を量子臨界相に拡張したものであるともいえる。

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。2.で上記したように、研究成果としては既に多くの具体的な結果が得られつつある。特に、若手研究者の派遣以外にも担当研究者と若手研究者がそれぞれ数回に渡り連携研究機関へ訪問し、理論と実験事実の具体的な研究内容の議論を行ったこと、そして、年度末に開催したワークショップとその期間の前後における集中的な議論・ブレインストーミング等により、理論と実験の間の密接な関係が構築されつつある。したがって、本年度の達成度としては十分な結果が得られており、また今回のプロジェクト提案に対する海外の連携研究者の反響及び評価が高く、来年度のドイツでのワークショップ開催においては連携機関のMax Planck 複雑系物理部学研究所側からの提案により、共催という開催形態となるなど、連携機関・連携研究者との積極的な協力関係が築かれつつある。

4. 日本側研究グループ（実施主体）の研究発表状況（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> <ul style="list-style-type: none"> ・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。 ・さらに数がある場合は、欄を追加して下さい。 ・著者名について、主著者に「※」印を付けてください。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>を付けてください。 ・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「○」印を付けてください。 	
1	<p>※D. Yoshizawa, T. Kida, <u>S. Nakatsuji</u>, K. Iritani, M. Halim, T. Takeuchi, M. Hagiwara High-Field Multi-Frequency ESR in the Rare-Earth Spinel Compound CdYb₂S₄ <i>Appl. Magn. Reson. published online: 15 Feb. 2015.</i> 【査読有】</p>

②学会等における発表

発表題名 等	
<p>（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。）</p> <ul style="list-style-type: none"> ・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、主たる発表者名は「※」印を付けて下さい。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>を付けてください。 ・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○印を付けてください。 	
○ 1	<p><u>M. Oshikawa</u> “Orbital Angular Momentum and Spectral Flow in Two Dimensional Chiral Superfluids” 【招待講演】 Frontiers in Condensed Matter Physics, Dec 9-12, Korea Institute for Advanced Study, Seoul</p>
○ 2	<p><u>M. Oshikawa</u> “Symmetry protection of critical phases and global anomaly in 1+1 dimensions” 【招待講演】 ISSP-MPIPKS Joint Workshop, “Dynamics of Strongly Correlated Systems”, Mar 30-31, ISSP, Univ. of Tokyo, Japan (2015).</p>
3	<p><u>S. Nakatsuji</u>, “Quantum Melting of Spin Ice” 【招待講演】 Edgar Lüscher Seminar 2015 “Neues aus der Festkörperphysik”, (Hotel-Sport Klosters/Schweiz, Switzerland 07 – 13. February 2015) (2015)</p>
4	<p><u>S. Nakatsuji</u>, “Strange metal without magnetic instability in β-YbAlB₄” 【招待講演】 2015 American Physical Society March Meeting, Invited Session: Emergent Quantum Phases and Their Transitions in Correlated Electron Systems, (March 2–6, 2015; San Antonio, Texas, USA) (2015)</p>
5	<p><u>S. Nakatsuji</u>, “Emergent quantum excitations in spin ice through coupling with electrons” 【招待講演】 Quantum Matter and Materials Colloquia, Universität zu Köln, (February, 6th 2015, Universität zu Köln, Germany) (2015).</p>
6	<p><u>S. Nakatsuji</u>, “Emergent critical phases in correlated electron systems” 【招待講演】 Seminar in Department of Physics and Astronomy, (March 11th 2015, Johns Hopkins University) (2015).</p>
7	<p><u>中辻 知</u>, 「量子スピナイスと量子伝導現象」 【招待講演】 磁気学会第52回スピナイスと量子伝導現象専門研究会、(2015年1/28(水)13:00～ 東北大学 金属材料研究所 講堂) (2015)</p>

○ 8	Y. Matsumoto, K. Kuga, E. C. T. O'Farrell, T. Tomita, <u>Y. Shimura</u> and <u>S. Nakatsuji</u> , “Novel quantum criticality in valence fluctuating YbAlB₄ systems” 【招待講演】 Workshop on Recent Developments in the Kondo Problem, Jan 9-10, ISSP, Univ. of Tokyo, Japan (2015). 【招待講演】
○ 9	Y. Matsumoto, K. Kuga, E. C. T. O'Farrell, T. Tomita, <u>Y. Shimura</u> and <u>S. Nakatsuji</u> , “Emergent critical phase in a correlated electron system” 【招待講演】 ISSP-MPIPES Joint Workshop, “Dynamics of Strongly Correlated Systems”, Mar 30-31, ISSP, Univ. of Tokyo, Japan (2015).
○ 10	<u>Y. Tada</u> , “Orbital angular momentum in two-dimensional chiral superfluids” 【招待講演】 Informal Condensed Matter Seminar (February 4 th 2015, MPI-PKS Dresden) (2015).
◎ 11	中山充大、近藤猛、Zhaoming Tian、Mario Halim、石川洵、Ru Chen、Eun-Gook Moon、松波雅治、Walid Malaeb、Balleile Cedric、明比俊太郎、石田行章、組頭広志、小野寛太、木村真一、Leon Balents、 <u>中辻知</u> 、辛埴 「角度分解光電子分光で観測するパイロクロア型イリジウム酸化物の電子状態」口頭発表【審査無し】 日本物理学会 第70回年次大会（東京都、早稲田大学 早稲田キャンパス、2015年3月）
12	田久保耕、津山智之、山本真吾、松田巖、伊奈稔哲、新田清文、水牧仁一朗、鈴木慎太、松本洋介、 <u>中辻知</u> 、和達大樹 「 α -YbAl _{1-x} Mn _x B ₄ のX線吸収分光」ポスター発表【審査無し】 日本物理学会 第70回年次大会（東京都、早稲田大学 早稲田キャンパス、2015年3月）
13	阪口友唯、池田修悟、河村直己、水牧仁一朗、鈴木慎太郎、久我健太郎、 <u>中辻知</u> 、石松直樹、小林寿夫 「多重極環境下における β -YbAlB ₄ のX線吸収分光II」口頭発表【審査無し】 日本物理学会 第70回年次大会（東京都、早稲田大学 早稲田キャンパス、2015年3月）
14	寺島拓、松田康弘、近藤晃弘、金道浩一、鈴木慎太郎、久我健太郎、松本洋介、 <u>中辻知</u> 、河村直己、水牧仁一朗、稲見俊哉 「強磁場における重い電子系 α -YbAl _{1-x} Fe _x B ₄ の磁化とX線磁気円二色性」口頭発表【審査無し】 日本物理学会 第70回年次大会（東京都、早稲田大学 早稲田キャンパス、2015年3月）
15	鈴木慎太郎、 <u>志村恭通</u> 、久我健太郎、富田崇弘、松本洋介、 <u>中辻知</u> 「単結晶 α -YbAl _{1-x} Mn _x B ₄ の磁気物性と輸送特性」口頭発表【審査無し】 日本物理学会 第70回年次大会（東京都、早稲田大学 早稲田キャンパス、2015年3月）
◎ 16	菅原健人、中埜彰俊、澤博、 <u>中辻知</u> 、石川洵、D.E. MacLaghlin、C. Broholm 「パイロクロア格子Pr ₂ Ir ₂ O ₇ の結晶構造と磁性」ポスター発表【審査無し】 日本物理学会 第70回年次大会（東京都、早稲田大学 早稲田キャンパス、2015年3月）
17	富田崇弘、石川洵、Timan Zhaoming、松本洋介、 <u>中辻知</u> 「パイロクロア型イリジウム酸化物における高圧下での結晶構造と輸送特性」口頭発表【審査無し】 日本物理学会 第70回年次大会（東京都、早稲田大学 早稲田キャンパス、2015年3月）
◎ 18	藤陽平、Frank Pollmann、 <u>押川正毅</u> 「空間反転対称性によって守られた1次元ボゾン系のギャップ相」口頭発表【審査無し】 日本物理学会 第70回年次大会（東京都、早稲田大学 早稲田キャンパス、2015年3月）

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	5 人 (2 人)	4 人 (4 人)	5 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

<p>（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）</p> <p>希土類化合物を含む系に対する高磁場・圧力下・極低温における磁気抵抗測定を担当する。具体的な系に関しては重い電子化合物α-、β-YbAlB₄、およびパイロクロア金属酸化物Pr₂Ir₂O₇を対象とした。</p> <p>派遣者は米国国立高磁場研究所において、価数揺動を示す重い電子系化合物α-YbAlB₄にたいして最大 31 T、最大 1.8 GPa、最低温 0.4 Kといった超極限環境下での磁気抵抗測定を行った。また、上記のα-YbAlB₄の関連物質で磁気秩序を示すα-Yb(Al, Fe)B₄ (Fe=16%)に対して、常圧下、最低温 20 mK、最大磁場 18 Tでの磁気抵抗測定を行った。</p> <p>（具体的な成果）</p> <p>まずα-YbAlB₄に対する圧力下、磁気抵抗測定の結果、いくつかの量子振動を観測し、さらにそれらが明瞭に圧力変化を示すことを明らかにした。特に約 1.5 GPaにおいて量子振動から見積もられた有効質量が増強されることを見出し、この圧力で何らかの臨界点に到達していることを示唆する実験結果を得た。そしてα-Yb(Al, Fe)B₄ (Fe=16%)は 18 Tという高い磁場下でも秩序相が安定であることを見出した。これは約 10 Kという転移温度を考えると高く、単純な磁気秩序では説明できない可能性がある。</p>				
派遣先	派遣期間			合計
（国・地域名、機関名、部局名、受入研究者）	平 26 年度	平 27 年度	平 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	276 日	0 日	340 日

派遣者②の氏名・職名：三田村 裕幸・助教

<p>（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）。</p> <p>数値位相検波法をドレスデン強磁場研究所の低温・パルス強磁場と組み合わせる事により、輸送・磁気特性等の各種低周波交流物性測定を 100 T級の超強磁場下で高感度に行なえるようにする。三田村は数値位相検波法を世界で初めてパルス強磁場下の測定に応用し、独自技術として発展させている。垂直分解能と併せて時間分解能も高いため、現在では通常の金属の量子（シュブニコフ＝ドハース）振動が容易に観測出来るようになっている。この方法は交流帯磁率などの他の様々な物理量の測定にも応用が期待でき、本研究での実現を目指す。これらを用い、とりわけ磁場誘起の量子相転移の実験的解明を行う。また、強磁場中での超音波共鳴吸収測定を用いた量子臨界現象の多角的理解を行う。</p> <p>（具体的な成果）</p> <p>主として本研究予算で購入した各種計測機器を日本からドレスデン強磁場研究所に通関・搬入し現地で調整を行なった。また現地で調達した計測機器等を試験し、両者併せて開発予定の測定系が目標とする性能を十分達成出来ることを確認した。本プロジェクトで三田村が行なう活動内容を S. Zherlitsyn 部門長ら現地スタッフに説明し各担当者との調整をはかった。</p>				
---	--	--	--	--

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、ドレスデン高磁場研究所、 S. Zherlitsyn 部門長	33 日	267 日	70 日	370 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	7 人 (5 人)	16 人 (8 人)	17 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）

主要連携研究者である Broholm 教授は、世界の中性子科学を代表する実験家であるだけでなく、ワシントンの米国国立標準技術研究所 NIST における the Multi Axis Crystal Spectrometer (MACS) 等の最新の実験装置を開発するなど装置開発技術を持つ。そこで、本プログラムの推進課題である量子物質におけるトポロジカル現象の研究方針に関する重要な議論を行い、彼の管理する実験装置を用いた中性子回折実験を実施した。また、理論家との交流を通じて、中性子実験の結果の理解を進め、さらなる実験の指針を立てるために彼の本拠地である Johns Hopkins 大学に中辻が渡米して、集中的に議論を行い、今後の実験方針を確認した。

（具体的な成果）

α -YbAlB₄のAlサイトをFeで置換することで、反強磁性状態が現れる。その反強磁性の秩序について、中性子回折実験を行った。その結果、Fe置換量を変化することで磁気秩序の波数ベクトルは変化しないが、磁気モーメントの方向は変化することがわかった。さらに、この磁気秩序による量子臨界性と常圧で現れる β -YbAlB₄の量子臨界性の違いを、今後Broholm教授と中性子実験等で明らかにする方針である。また、Pr₂Zr₂O₇においては、Prの置換量が数%ずれるだけで、Prの結晶場が大きく乱れることが分かった。これはPrの持つ非クラマース性によるものである。これについてもPr置換量を精度よくコントロールした純良単結晶を用いたBroholm教授と中性子実験を行う予定である。主要連携研究者の理論家であるLeon Balents氏、連携研究者の理論家であるOleg Tchernyshyov氏と実験結果について議論をした結果、特に[100]方向の磁場依存性がこの系の量子性を決めるためには重要である。さらに、強相関電子系におけるトポロジカル量子相の探求のために、non-coplanarの磁気構造を持つ候補物質を育成し、中性子回折実験によりその磁気構造を決定するために、新しく多結晶・単結晶育成を推進中である。

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	
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	10 日	10 日	26 日

招へい者⑦の氏名・職名：Yin Chen He ・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）

連携先のマックス・プランク複雑系物理学研究所の主要連携研究者 Moesner 所長やグループリーダーの連携研究者 Pollmann 博士らの推薦を受けた、長期滞在が可能な若手研究者を招聘として、Pollmann 博士のグループから、ポスドクの He 博士を受け入れ、これまで、担当研究者の押川研究室と Pollmann 博士の間で推進してきた共同研究をさらに発展させ、物性研における実験的研究にも提案を行うことを目標に

する。今回の滞在期間中では共同研究とともに、理論インフォーマルセミナーとして、” Spin liquids and their transition in kagome antiferromagnets” というタイトルで講演も行った。

(具体的な成果)

He 博士らは、密度行列くりこみ群を用いた精緻な数値的研究によって、カゴメ格子上の **XXZ** 反強磁性体の相図を明らかにしており、その結果はハイゼンベルグ反強磁性体の基底状態が **RVB** スピン液体であるという、近年有力とされている描像にも再検討を迫るものとなっている。担当研究者の押川は、He 博士の物性研滞在中にカゴメ格子上の **XXZ** 反強磁性体の有効理論について共同研究を行った。He 博士らの得た数値的結果をゲージ理論を用いて記述できる可能性が見出され、現在検討を進めている。

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	
Max Planck 複雑系物理部学研究所、ドイツ ・押川正毅 (東京大学)	22 日	0 日	90 日	112 日

招へい者⑬の氏名・職名 : Maria Hermanns ・助教 (相当)

(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)

連携機関のケルン大学の研究者 Trebst 教授との議論を踏まえ、強相関係におけるトポロジカル量子相と、それに伴う量子臨界現象について共同研究を行う。また、Hermanns 博士の最近の理論的研究と、若手研究者の中辻研究室を中心とする物性研における実験的研究の関連について集中的な議論を行う。今回の滞在期間中では共同研究とともに、理論インフォーマルセミナーとして、” Majorana metals and quantum spin liquid” というタイトルで講演も行った。

(具体的な成果)

Hermanns 博士らは、Kitaev 模型とその厳密解をさまざまな格子に拡張している。担当研究者の押川は、Hermanns 博士の物性研滞在中に、これらの模型に対する格子変形の効果について共同研究を行った。格子変形は、フェルミオンに結合するゲージ場として記述できるため、これによってどのような物理的効果が生み出されるかを検討中である。

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	
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	0 日	60 日	82 日

招へい者⑯の氏名・職名 : Robert Kuchler ・特任講師

(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)

熱膨張と磁歪の測定は、トポロジカル量子相の相境界の転移を検出するのに必要不可欠な測定手段である。連携機関であるドレスデンの Max Planck 固体化学物理学研究所はこのような熱膨張測定技術で世界的に有名であり、まさに連携研究者 Rober Kuchler 氏は、キャパシタンス法による熱膨張・磁歪の精密測定装置を開発してきた研究者である。物性研究所にて、実際に彼の作製した熱膨張測定系を用いて、量子現象の探索の共同研究を行うため、その Kuchler 氏を招へいした。

(具体的な成果)

Robert Kuchler氏を招へいし、彼の作製した高精度熱膨張測定系の導入を高温システムと、希釈冷凍機を用いた低温システムに対して行った。今後、これらを用いて、量子スピニアイス系であるPr₂Zr₂O₇で期待される立方晶から正方晶への変化を伴うモノポールのポーズ・アインシュタイン凝縮の検出実験を行う。また、YbAlB₄においては、磁場中における量子臨界メタ磁性転移について、その近傍で現れる量子臨界性を磁歪測定に基づいて、明らかにした。これはこのメタ磁性転移が熱力学的にも量子相転移とみなせることを明らかにしたという点で大変重要である。

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）	12 日	47 日	0 日	59 日

招へい者⑩の氏名・職名：Sergei Zherlitsyn・部門長

（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）

主要連携研究者 Sergei Zherlitsyn 博士は、パルス強磁場下での超音波共鳴吸収測定技術において第一人者であり、これを用いた物質中の量子現象についての非常に多くの優れた研究実績がある。Zherlitsyn 博士の知見を我々の研究に生かすために招聘し、講演等を通じ強磁場中での物質中の新奇量子現象について幅広い観点から議論を行った。

（具体的な成果）

強相関電子系におけるトポロジカル絶縁体の候補物質である半金属・絶縁体転移を示すNd₂Ir₂O₇において、Zherlitsyn博士と協議し、超音波実験により磁気格子相互作用を明らかにすることが有効であることが分かった。また、β-YbAlB₄で現れる量子臨界性の起源を明らかにすることを目的とした高磁場実験について、派遣している三田村裕幸助教とともに共同でデジタル位相検波法を用いた低温・パルス強磁場下の電気抵抗測定装置の立ち上げ状況について確認できた。

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	
ドレスデン高磁場研究所、ドイツ・榊原俊郎 （東京大学）	7 日	4 日	10 日	21 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）

主要連携研究者 Balents 教授はトポロジカル絶縁体の発見者及び命名者として世界的に著名な理論家である。最近はその発展として強相関電子系におけるトポロジカル絶縁体の研究を行っており、イリジウム酸化物がそれを実現していることを初めて予言したことで有名である。その連携を強め、世界的ネットワークでの指導的な役割を担うと同時に、共同で成果を発信するために、Balents 教授を物性研究所に招聘して、理論・実験グループと集中的に進捗状況の議論を行った。

（具体的な成果）

イリジウムパイロクロア酸化物で現れる金属・絶縁体転移について中辻が純良単結晶を用いて行った実験について、ハパードモデル、近藤格子モデルに基づく解析を行い、理論・実験の間での一致を得た。また、物性研究所の中辻と近藤が共同で得た半金属状態の電子状態についての解析も同時に進めており、そ

の結果は、Balents教授のグループと共同で論文としてまとめ、投稿中である。さらに、量子スピニアイス系 $\text{Pr}_2\text{Zr}_2\text{O}_7$ 系については、今後の中性子回折実験についても方針を議論した。

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	
カル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	10 日	10 日	26 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）

主要連携研究者 Balicas 博士は世界を代表する高磁場での量子輸送測定 of 専門家である。今回の推進プログラムにおいて核となるトポロジカル量子相で期待される新奇な量子相転移を検出する磁気抵抗、ホール抵抗、磁化の定常高磁場下での測定を現地に滞在する若手研究者志村氏と行った。その実験の実施後に、彼を招へいして、理論家と議論し、そのガイドラインに従った物質開発・測定指針の議論を行った。

（具体的な成果）

若手研究者である志村氏と Balicas 氏が共同で国立高磁場研究所において得られた実験結果について議論を行った。特に、 YbAlB_4 系で得られた量子振動の結果から、今後、圧力や化学置換を行うことで、新しい量子相転移による電子構造の変化を明らかにすることが最重要課題であることが明確になった。さらに、イリジウムパイロクロア酸化物においては、この系において現れるユニークな半金属状態についての知見を得るため、高磁場における量子振動の結果についてさらに解析を進めた。

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	12 日	10 日	30 日

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。