

様式1【公表】

「頭脳循環を加速する戦略的国際研究ネットワーク推進プログラム」  
平成29年度事後評価資料（実施報告書）

整理番号	R2604		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)			
代表研究機関名	東京大学			
代表研究機関以外の協力機関				
主担当研究者氏名	瀧川 仁			
補助金支出額	(平成26年度) 39,196,659 円	(平成27年度) 40,138,164 円	(平成28年度) 40,164,893 円	(合計) 119,499,716 円
(公募応募当初の「事業計画調書」に記載の) 若手研究者の 派遣計画	(平成26年度) 3人	(平成27年度) 5人 (3人)	(平成28年度) 4人 (4人)	(合計) 5人
若手研究者の 派遣実績	(平成26年度) 2人	(平成27年度) 6人 (2人)	(平成28年度) 5人 (5人)	(合計) 6人
(公募応募当初の「事業計画調書」に記載の)研究者 招へい計画	(平成26年度) 7人	(平成27年度) 6人 (5人)	(平成28年度) 15人 (6人)	(合計) 17人
研究者の 招へい実績	(平成26年度) 7人	(平成27年度) 5人 (4人)	(平成28年度) 13人 (5人)	(合計) 16人

(参考)

派遣期間が300日未満となり、最終的に若手派遣研究者派遣実績のカウントから除外された者(外数)	(平成26年度) 0人	(平成27年度) 0人 (人)	(平成28年度) 0人 (人)	(合計) 0人
---	----------------	-----------------------	-----------------------	------------

## 様式1【公表】

### 1. 派遣・招へいによる人的交流を通じて得られた成果の達成状況

#### (1) 事業計画調書に記載した到達目標

(事業計画調書(3-(2))に記載した「研究課題を海外の研究グループと共同して行うことにより、国際研究ネットワークの強化・拡大に関して客観的な指標に基づく到達目標」)

本研究計画では、近年急速に発展した当該分野において、理論・実験の両面で、米国とヨーロッパと物性研究所のこれまでのネットワークを更に強化し、特に我々が物質開発については世界に先駆けて成功していることを最大限利用し、物性研究所が中核拠点として実質的にこのネットワークを先導して構築することを目標としている。(尚、本ネットワークは、TOPONETとネーミングしている。)

本事業における主要連携研究者のBalents教授による、「相関が重要でない電子系でのトポロジカル絶縁体の理論的予言」が行われた翌年に発表された「実験的確認の論文」の引用数は、毎年数百件以上に上り、その爆発的な研究の進展を反映している。同じBalents教授による「強相関電子系におけるトポロジカル量子相の理論的予測の論文」もすでに多くの関心を集めており、このタイミングで米国・ヨーロッパの強力な研究グループとの共同研究のもと、本研究課題である一連の新しいトポロジカル現象の実験的検証を行うことによって、世界的研究ムーブメントに拍車をかけることになる。物性研究所がその研究の中核拠点としての役割を担うことにより、本ネットワークを基礎とした国際共同研究による国際共著論文数の顕著な増加が期待できる。

また、物性研究所は物性科学の全国共同利用・共同研究拠点として、これまで国内の共同研究ネットワークの構築に努力してきた。本事業による国際的な展開は、世界的な共同研究拠点として発展する重要な礎石のひとつとなることが期待される。更に、本国際共同研究の成果は公開シンポジウムなどを通じて速やかに日本全国の物性研究者に還元され、それを契機として国内にもこの新しい問題に挑戦する共同研究グループが生まれることが期待される。

#### (2) 上述の到達目標に対する達成状況の自己評価とその理由

##### 【自己評価】

- 期待を上回る成果を得た
- 十分に達成された
- おおむね達成された
- ある程度達成された
- ほとんど達成されなかった

##### 【理由】

本事業で当該分野における世界トップレベルの研究機関との国際共同研究ネットワークを構築することにより、以下に挙げるような、ネットワークを基にした国際共著論文アウトプットへの効果、共同利用・共同研究拠点としての国内への波及効果、及び、組織面における国際連携の強化において十分な成果が得られている。

連携機関との質の高いアウトプット

## 様式1【公表】

表1は、連携研究機関との本事業開始前後の1年あたりの平均論文数である。平成26年10月から開始した本事業に対して、開始前として平成22年から平成25年の4年の平均論文数と、開始後として平成27年と平成28年の平均論文数、そして参考として平成29年の8月15日時点での論文数を示している。

(表1) 連携研究機関との年平均共著論文数

	開始前 期間：H22～H25	開始後 期間：H27～H28	H29【8月15日時点】 ( )内は投稿中
共著論文数	3.25	4.5	4 (6)
うち、Science、Nature系	0.5	1	2 (3)
Physical Review Letter	0.75	1.5	1 (0)

表からわかるように、連携研究機関との共著論文数が着実に増えている中で、特に高いインパクト雑誌への投稿論文数が増えている。本事業による研究成果が本格的に論文数に反映されるのは本年からであり、8月15日時点において開始後の年平均程度まで投稿中も含めて論文数が伸びていることがそれを示している。明らかに、本事業による国際共同研究ネットワークによって、到達目標で掲げていた連携研究機関との共著論文が増加するだけでなく、質の高い研究へと発展していることがわかる。

### 研究会等での国内研究者の普及、及びネットワークの拡大

物性研究所は共同利用・共同研究拠点であり、日本全国の物性研究者に対して、本事業で展開する国際共同研究に参加する機会を提供することを目標としており、最終年に行った滞在型ワークショップとシンポジウムは、本事業の総括に加えて全国の物性コミュニティへの普及を目的としている。本事業の主眼となる強相関係のトポロジカル相と機能をテーマにしたシンポジウム (Topological Phases and Functionality of Correlated Electron Systems, TPFC) では、物性研究所以外での国内21機関及び連携機関以外の海外の12機関から、3日間で延べ347名 (物性研以外の国内146名、連携研究機関以外の国外39名 (連携機関は41名)) の参加があった。加えて、トポロジカル系の研究では特に理論が先行して重要な役割を担うことから、理論のメルティングポットを想定した約1ヶ月間に渡る滞在型ワークショップ (Theory of

Correlated Topological Materials, TCTM) を開催した。同様に物性研以外の国内19機関及び連携機関以外の海外11機関から延べ410名 (物性研以外の国内94名、連携機関以外の国外61名 (連携機関は58名)) の参加があった。上述したように理論的な進展を目指した滞在型ワークショップでは1日2講演の後にも議論ができる場を用意し、メルティングポットとして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



最終年シンポジウム TPFC 集合写真

## 様式1【公表】

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。そして、参加した物性研究所以外の国内及び連携研究機関以外の国外の研究者に対し、本事業のネットワークから波及した共同研究グループができることが期待される。

### 国際協定等による連携強化

上述したように、本事業から発展した高いレベルの国際共同研究のポテンシャルは連携機関においても高く評価されている。例えば、連携機関の米国・ジョンズホプキンス大学（JHU）からの提案で、双方が投資する金額を設定した覚書き（MOU）を結ぶことになった。MOUでは、東大側としては同じく頭脳循環プログラムで採択されている東京大学カブリ数物連宇宙研究機構と物性研究所の連名で、JHUの物理・天文学科との間で、2017年から2021年の4年間に年間6万ドルが双方で研究交流活動に投資することが明記されている（参照：JHUの主要連携研究者Broholm教授のレター、及びレターにMOUの文面案が添付、8月15日時点でJHU側の最終調整待ち）。また、本事業のテーマである量子物質研究に関して、ドイツ・マックスプランク研究所、東京大学、カナダ・ブリティッシュコロンビア大学（UBC）の3者間の協定が平成29年4月に結ばれ、各機関が各々年間4千万の投資を行うことが明記されている。この協定においては、参加部局として本事業での実績を元に物性研究所が加わることになり、担当教員として本事業の主担当研究者、担当研究者、若手派遣研究者が入っている。このような例によってから、本事業により国際共同研究ネットワークが強化され、組織的な繋がりに発展した形で継続していることがわかる。

### 活きたネットワークによる成果

最後に、准教授の派遣者③と担当研究者の押川教授が、研究議論や情報収集のために頻繁に連携機関を含む海外の研究機関に赴き、いわば潤滑油として「活きた」ネットワーク構築に精力的に取り組んだことを強調したい。これは2-(2)で後述するが、トポロジカルな電子構造に由来すると考えられる、反強磁性体における自発的的巨大ホール効果の世界で初めての発見にも大きく貢献している。この発見はトップレベルの先端研究者とのブレインストーミング等の議論から導かれたものであるが、連携研究者とは言え、基本的には競合関係にある研究者とどこまで研究上重要な議論ができるかが肝心の点となるが、今回ではこの活きたネットワークを構築できたことにより重要な発見に繋がったと考えている。また、そうした積極的な海外での活動により、連携機関以外との共同研究も本事業を契機に相当数始まっている（資料3-(3)）。2年目での連携機関のマックスプランク複雑系物理学研究所との共催ワークショップをドイツ側で開催できたこと、最終年のシンポジウムへの連携機関と連携以外から12機関の参加があったこと、そして、JHUとのMOU締結に至った事情もこの活きたネットワーク構築によるところが大きい。

## 様式1【公表】

### 2. 国際共同研究課題の到達目標及びその達成状況

#### (1) 事業計画調書に記載した国際共同研究課題の研究目的及び到達目標

(事業計画調書(3-(2))に記載した国際共同研究課題の研究目的及び到達目標(「研究の学術的背景」及び「当該研究領域における本研究課題の学術的な特色や独創的な点、及び事業期間内に何をどこまで明らかにしようとするのか、到達目標とその検証方法」))

電子相関の強い量子スピン系・遍歴電子系で見いだされた、あるいは発現する可能性のある興味深い現象を、トポロジカル相の概念に基づいて理論的に整理し、新しい量子現象の予言と実験による検証を通じて、新しい分野を創出することを最終目標としている。具体的には以下で述べるような目的のもと、トポロジカル絶縁体、スピン液体相、量子臨界相に固有な量子現象について、量子現象を発現する新物質の開発、先端的な測定技術による量子現象の観測、そして量子現象の理論的な解析を、本事業のネットワークを用いて行っていく。

#### 到達目標とその検証方法：

##### ■ 強相関電子系におけるトポロジカル絶縁体の理論および実験的解明。

イリジウムパイロクロア酸化物が強相関電子系における新しいトポロジカル絶縁体を実現する舞台となることを、物性研究所が世界に先駆けて見出している。本事業では、この系における理論的に予測される電子構造と比較するとともに、新しいトポロジカル相の微視的な性質を明らかにする。

##### ■ スピン液体・量子臨界相についての多面的な測定による実験的典型例の創出。

近年日本を中心に実験的に研究されてきた、強相関電子系における新しい磁性現象であるスピン液体や量子臨界相等の対称性の破れを伴わない量子液体において、その相形成に本質的に重要なトポロジカル量子現象となる、スピノンやモノポールなどのトポロジカル磁気励起、巨大なトポロジカルホール効果などの特異な性質を実験的に見出す。

##### ■ スピン液体・量子臨界相のトポロジカル効果の理論的解明とその実験による検証。

電子が完全に局在した量子スピン液体においては、トポロジカル相についての理論研究が近年大きく進展したものの、強相関電子系におけるトポロジカル相は理論的にも未開拓の部分が多い。強相関トポロジカル相のガイドラインになりうる新しい理論的提案に向けた共同研究を、本ネットワークの理論系で行うとともに実験による検証を目指していく。

#### (2) 上述の到達目標等に対する達成状況の自己評価とその理由

##### 【自己評価】

期待を上回る成果を得た

十分に達成された

おおむね達成された

ある程度達成された

ほとんど達成されなかった

##### 【理由】

研究対象とした3つの相、「強相関電子系でのトポロジカル絶縁体」「磁性体における量子スピン液体相」「強相関電子系における量子臨界相」において、以下に具体的な成果を挙げるように、物性研究所において開発した物質を元に、それぞれの系における

## 様式1【公表】

研究では論文発表に繋がる成果が得られるとともに、その後も共同研究が進展している。特に、トポロジカルな起源と考えられる反強磁性体では世界で初めての巨大異常ホール効果を示す現象の発見（論文17）は、まさに本事業の目標である新しい分野創出を導く魁けになる画期的な成果と位置付けられる。実際、米国エネルギー省の研究戦略に注目すべき先端研究として紹介されている。これは、本事業による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発想を得た成果であり、論文では連携機関との共著とはなっていないが、理論と実験の間の密接な関係の構築によって導かれた結果であり、本事業の国際的なトップクラスの交流の利点が最大限に活かされた成果と言える。

### ■ 強相関電子系におけるトポロジカル絶縁体の理論および実験的解明。

物性研究所で開発したイリジウムパイロクロア酸化物の中でも $\text{Pr}_2\text{Ir}_2\text{O}_7$ と $\text{Nd}_2\text{Ir}_2\text{O}_7$ において、この系が典型的トポロジカル絶縁体 $\text{HgTe}$ と同じ電子構造を持つ強相関電子系では初めての半金属であること（論文11、37）、更に量子相転移近傍に位置し2次の波数分散を持つフェルミノード系であること（論文19）を実験的に明らかにし、強相関電子系におけるトポロジカル絶縁体の実現していることを電子構造の直接観測の立場から突き止めている。また、フェルミノードがある場合に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るため、基板を用いた薄膜作製における基板との界面の歪を利用した研究により、自発的異常ホール効果の状態がより高温で現れることや、連携研究者のArmitage教授と共同では、テラヘルツ分光により薄膜試料が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見出しており（論文準備中）、強相関電子系トポロジカル絶縁体実証への周辺事実を押さえつつある。上記したように、一軸圧はこの系においてワイル金属への遷移を可能とし、主要連携研究者Balents教授の理論を検証するためにも必要な実験であるため、一軸圧力技術を開発した連携機関のマックスプランク固体化学物理学研究所とは共同研究を継続し、平成30年には連携研究者Hicks博士を客員所員として4ヶ月物性研に招へいすることになっている。

### ■ スピン液体・量子臨界相についての多面的な測定による実験的典型例の創出。

スピン液体の系では、物性研究所において開発した量子スピンアイス系 $\text{Pr}_2\text{Zr}_2\text{O}_7$ において、磁場誘起のモノポールの量子気体・液体転移とされるメタ磁性転移の発見に始まり、主要連携研究者Moessner教授らとの磁気格子相互作用の効果についての理論的な議論に従って、主要連携研究者Broholm教授と中性子によるモノポールの直接観察（論文46）、主要連携研究者Gegenwart教授らと磁気熱量効果の発散に伴う量子臨界的なスケールリング則の発見、更に熱伝導の実験から量子スピン液体の証拠となるモノポールの量子コヒーレンスとゲージ場の揺らぎに対応するフォトンを示唆する結果が得られており（論文投稿中）、この系で期待されるトポロジカルな量子欠陥であるモノポールの動的性質の解明に向けて実験による検証が進んでいる。

一方、量子臨界性を形成していると期待されている $\beta\text{-YbAlB}_4$ においては、量子臨界相の形成を金属としては世界で初めて実証し（論文5）、高磁場測定では高磁場域のみに出現する量子振動の観測に成功し、更に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（論文投

## 様式1【公表】

稿中)。これは、連携先のケルン大学の主要連携研究者Rosch教授らの理論グループが指摘するフェルミ面のトポロジー変化の実験的な検証となる可能性が高く、高磁場での実験を継続している。さらに、磁歪測定によって磁場中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ている。同組成で構造の異なる $\alpha$ -YbAlB<sub>4</sub>においては、核磁気共鳴実験などから量子臨界相が磁気臨界性とは関係なく現れていることを見出し、これはトポロジカル量子相転移の可能性を示唆していることから理論的な面からも研究を進めている。

更に本事業での期待を上回る成果としては、トポロジカル量子現象として特異な現象として、 $Mn_3Sn$ という物質において反強磁性体でありながら自発的巨大異常ホール効果の発見がある(論文17)。一般に反強磁性体は磁化を持たないために、強磁性体でみられるような異常ホール効果などの巨視的起電力効果がないと考えられてきた。しかし、ワイルノードを持つ状態が反強磁性体において実現すれば、逆格子空間にワイルノード対がつくる大きな仮想磁場が存在し、それによる巨大異常ホール効果および巨大スピンの流がゼロ磁場においても現れることが期待される。さらに、フェルミアークと呼ばれる表面状態の存在が予言されている。このような状況の中、本事業でのネットワークでの議論やブレインストーミングを活用することにより、 $Mn_3Sn$ という物質がまさに上記の性質を満たす反強磁性体であることを発見した。反強磁性体において大きな異常ホール効果の発見は、19世紀後半に異常ホール効果が発見されて以来これが世界初であり、強磁性体にはない新しい機構が期待される。主要連携研究者Balents教授との共同研究を通じて、この物質の電子状態の系統的な研究により、この異常ホール効果のトポロジカルな起源を解明し、異常ホール効果によるカイラル異常や、カイラル端電流やフェルミアークによる表面状態など、強相関電子系におけるトポロジカル量子効果の典型例を確立する研究を継続中である。

### ■ スピン液体・量子臨界相のトポロジカル効果の理論的解明とその実験による検証。

上記したように、理論からの提案に基づいて実験的に検証したイリジウムパイロクロア酸化物の強相関トポロジカル系や、反対に実験から理論展開を生み出した反強磁性体の異常ホール効果など、理論と実験の相補的な展開が進展している。一方、スピン液体や量子臨界相において以下のような新しいガイドライン的な理論研究も生まれている。例えば、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があるが、この系の基底状態となるスピン液体の種類について、連携研究者であるHe博士やPollmann博士らとの共同研究により、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(論文51)。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。

また、物性研究所への理論的な面での波及効果では、例えば、Kitaevモデルとその厳密解をさまざまな格子に拡張した研究を行っている連携研究者Hermanns博士の招へいにより、実験的検証へ向けたKitaevモデルの金属有機構造体を用いた新たな実現について理論的提案(論文52)や、更に3次元Kitaevスピン液体に関する研究に展開している。(Hermanns博士と物性研究所との学生でプレプリントを発表している。)

## 様式1【公表】

### 3. 今後の展望について

これまでの実施状況を踏まえて、事業実施期間終了後の展望について記入して下さい。

① 自己資金、若しくは他の競争的資金等による海外派遣・招へいの機会を含む若手研究者の研鑽・育成の事業の継続（又はその見込み）状況

1. で述べたように、大学院生、ポスドクなどの若手研究者の交流を目的とし、年間6万ドルを投資するMOUをJHUと、大学間ではあるが年間4千万を投資するマックスプランク-UBC-東大の三者協定を結び、交流が組織的な繋がりに発展しており、海外派遣及び招へいによる若手研究者の研鑽や育成に向けた環境を維持している。このJHUのMOUの下、派遣者⑥は事業終了後も引き続きJHUに滞在している。

また、本事業では学生派遣は認められていなかったが、連携を強化する目的で自己資金を用いて、本事業の期間中から連携機関に向けて毎年4名程度の学生派遣を行ってきた。事業後においても海外学生派遣は継続しており、現在1名のJHUへの派遣を行っている。

② 本事業の相手側を含む海外の研究機関との研究ネットワークの継続・拡大（又はその見込み・将来構想）状況（組織において本事業で支援した若手研究者に期待する役割も含めて）

上述したように、JHUとは連携が発展した形となり組織的な交流に発展しており、JHU側の物質科学のInstitute for Quantum Matterに属する相当数の研究者が、この連携に関わることになる。連携研究者 Armitage 教授も客員所員として来年度の滞在に向けて準備を始めている。現在も、派遣者⑥は引き続き滞在しており、学生の派遣も行っている。JHUとの連携においては、派遣者③が今後も交流の中核として貢献していく。

マックスプランク複雑系物理学研究所においては、同研究所と物性研究所の理論部門は以前からの連携が深く、またMPI-UBC-UTokyoの協定により一層の連携体制が築かれており、最近では非平衡の分野の連携が深まりつつある。同研究所には派遣者④が滞在中異動前のPollmann氏との共同研究を進めており、Pollmann氏がミュンヘン工科大学へ異動したことにより連携の輪が広がっている。同マックスプランクの固体化学物理学研究所においても、Hicksグループリーダーが客員所員として平成30年5月から4ヶ月間物性研に招聘し共同研究を進めることになっており、連携活動は確実に継続されている。

ドレスデン高磁場研究所については、物性研究所の強磁場施設と同じパルスマグネットを用いた強磁場施設であり、派遣者②が測定装置の高度化に関する情報共有などを鍵として、より連携が深まる事が期待できる。

同じ高磁場施設である米国国立強磁場研究所においては、滞在した派遣者①が後述するように広島大学に異動することもあり、派遣者①を基軸とした国内を含めた連携の拡大が期待される。

アウグスブルグ大学については、事業の期間中に主要連携研究者 Gegenwart 教授の研究室から物性研究所の助教に異動した研究者もおり、本事業を契機に連携が深まっている。現在、アウグスブルグ大学側からの要望により先方からの学生の受入について検討を始めている。

本事業では理論系のネットワークを組んだ、上記のマックスプランク複雑系物理学研究所、カルフォルニア大学サンタバーバラ校、ケルン大学、ミュンヘン工科大学、及びハーバード大学においては、担当研究者である押川教授が事業後も頻繁に赴くことになるとと思われる



## 様式1【公表】

が、本事業中にこれらの機関を訪問している派遣者④が今後の連携活動の一翼を担うことが期待される。また、本事業で行った理論のメルティングポットである1ヶ月に渡る滞在型ワークショップにおいて、海外の研究者と濃密な研究時間を過ごした物性研を始め全国からの理論研究者との間で、国際共同研究が始まることが期待される。

### ③ 本事業で支援した若手研究者の研究人材としての将来性について

派遣者①は、特に極低温領域の様々な実験技術についてスキルがあるとともに、研究内容への理解も深く優れた実験系の研究者と言える。また、本事業の海外滞在により英語スキルも上達し、現在は国際的な活動も自身で開拓するなどの器量も備えるに至っている。これらのことが評価されて、本事業の終了後まもなく、広島大学の助教に採用されており今後の活動が期待される。

派遣者②の精密実験に関わる技術と知識は高く評価すべきものであり、更に本事業による海外での研究経験及び実績により本人の自信に繋がったものは大きいと思われ、今後の活躍が期待できる。

派遣者③は今回の  $Mn_3Sn$  の発見だけでなく、若手ながら既に多くの重要な発見を行っており、派遣先の JHU においても際だったプレゼンスを示しており、JHU や今回の連携機関以外にも多くの著名な研究者と積極的に交流し共同研究を行っている。ほぼ間違いなく、今後も中核的かつ先導的な立場での国際レベルでの活躍をしていくと思われる。

派遣者④は、理論家として独立した研究スタイルを既に身につけ、また創造性豊かで物理に情熱を持って研究に望んでいることが評価されており、本事業においてもドイツの中に留まらず米国にも積極的に訪問するなど、国際的にも活躍が期待できる。

派遣者⑤は、測定や物質開発における洞察力は鋭いものがあり、実験の研究者として高く評価されている。それは本事業で短い期間に薄膜技術を身につけ成果を出していることから証明されており、特に磁性材料の薄膜技術を活かす方面での活躍が期待される。

派遣者⑥は、本事業から当該分野での研究を始めたこともあり、この分野での頭角を現すにはしばらく時間がかかると思われる。ただ、本事業の期間の短い間に単結晶育成技術を身につけるとともに、試料評価による育成条件へのフィードバックや、中性子散乱実験のスキルと理解力を身につけていることは高く評価でき将来性も期待できる。

様式1【公表】

(資料1)

資料1 実施体制

① 日本側研究グループ事業実施体制

フリガナ 担当研究者氏名	所属機関	所属部局	職名 (身分)	専門分野	備考
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	
若手研究者 ナカツジ サトル 中辻 知	東京大学	物性研究所	准教授	物性物理	
ミタムラ ヒロユキ 三田村 裕幸	東京大学	物性研究所	助教	物性物理	
タダ ヤスヒロ 多田 靖啓	東京大学	物性研究所	助教	物性物理	
シムラ ヤスユキ 志村 恭通	東京大学	物性研究所	特任研究員	物性物理	
ヒゴ トモヤ 肥後 友也	東京大学	物性研究所	特任研究員	物性物理	
ヒュイユアン マン Huiyuan Man	東京大学	物性研究所	特任研究員	物性物理	
計9名					

② 相手側となる海外の研究グループ（海外の連携機関）

研究機関名	相手側研究者氏名 (招へいした研究者は※印を表示)	職名 (身分)	備考	派遣した 若手研究者氏名
Johns Hopkins大学	Collin L. Broholm ※ Oleg Tchernyshyov ※ Peter Armitage ※	教授 准教授 教授	(H29.1.30追加)	中辻知 肥後友也 Huiyuan Man
カリフォルニア大学サンタバーバラ校	Leon Balents ※ Timothy H. Hsieh ※ Louk Rademaker ※	教授 ポスドク ポスドク	(H29.1.30追加)	
米国国立高磁場研究所	Luis Balicas ※ Pallab Goswami	主任研究員 ポスドク		志村恭通
Max Planck固体化学物 理学研究所	Andrew P. Mackenzie Clifford Hicks ※ Robert Kuchler ※	所長 グループリーダー 特任講師		
Max Planck複雑系物理 学研究所	Roderich Moessner Olga Petrova ※	所長 ポスドク	(H27.4.1追加)	多田靖啓
ドレスデン高磁場研究所	Sergei Zherlitsyn ※	部門長		三田村裕幸

様式1【公表】

(資料1)

アウグスブルグ大学	Philipp Gegenwart	教授		
ケルン大学	Achim Rosch ※ Alexander Altland Simon Trebst ※ Maria Hermanns ※	教授 教授 教授 助教	(H27. 4. 1追加) (H29. 1. 30追加)	
ミュンヘン工科大学	Frank Pollmann ※	准教授	期間中にMax Planck複雑系物理 学研究所から異動	(多田靖啓)
ハーバート大学	Yin Chen He ※	ポスドク		
計10機関				

## 資料2 双方向の人的交流にかかる資料

### (1) 若手研究者の選抜方針・基準、選抜方法の概要

本事業の対象となる若手研究者を、職位に応じて3つに分け、以下のような基準を設け選抜方針とした。

- ・准教授：本事業においてはネットワーク構築を行うことが目的となるため、当該研究分野に十分な実績を持ち、将来の国際共同研究を先導する意欲とともに、プロジェクトに対する強い責任感とリーダーシップにより、本ネットワーク構築に海外サイトにおいて尽力できる資質が必要となる。さらには、派遣先の要請によっては当該機関の他の若手研究者の研究指導を行なえる能力を持った人材を選抜する。
- ・助教：国際的な研究者として目的意識・使命感を持って研究に取り組む意欲が高く、基本的には自立して海外において研究活動を行え、本ネットワーク構築にも自ら貢献できる能力を持つことが条件となる。研究者としての将来性を考慮すると、この機会に新たな研究テーマに挑戦するなど研究の幅を広げる意欲も期待する。
- ・ポスドク：国際的な研究者として目的意識・使命感を持つことが前提で、本事業においては研究活動に主な貢献を期待するところとなるが、本事業の目的を理解しネットワーク構築にも貢献する意識を持てること。

選抜方法は、主担当研究者及び担当研究者と事業運営を行うURAが、候補となる若手研究者との面接により、上記の基準を満たすとともに、英語による文書作成能力およびコミュニケーション能力や、派遣国の文化や生活習慣を尊重する姿勢などの海外の研究・生活に不可欠な要素及びストレス耐性なども含めて総合的に検討し選抜した。

### (2) 派遣及び招へいの支援体制の概要

(日本側からの派遣者及び連携機関からの招へい者に対して組織としてどのようなバックアップ体制をとったかについて記載してください。)

#### 【派遣者に対する支援体制】

派遣の対象となる長期滞在の事前に短期的な出張を行い、派遣後直ぐに研究が開始するための研究内容に関する現地での事前打合せや、派遣先の研究環境の確認、及び住居などの滞在に向けた準備を行うように指導した。滞在中においては、スカイプなどによるコンタクトを頻繁に行うとともに、担当研究者もしくは本事業の運営管理を行っているURAが現地へ赴き、派遣先の研究環境及び生活環境の把握を行った。

#### 【招へい者に対する支援体制】

本事業に専任する事務職員を3名雇用し、事業運営を担当するURAとともに事務局を設置した。ビザ、宿泊手配、旅費などの招へいに関わる業務全般は、この事務局で対応した。

### (3) 若手研究者の海外派遣計画及び研究者の招へい計画の見直し(増減)状況とその理由

### 【派遣計画】

派遣計画では5名の計画であったが、派遣者⑥を1名増員して6名の派遣を行った。

派遣者⑥は、量子スピンアイス系における中性子を用いた研究を主体とした。この研究テーマは本プロジェクトでも重要なテーマであるが、この系の研究を当初予定していた派遣者⑤が、本プロジェクトで新しく明らかにされた反強磁性体で非共面スピン構造を持つ幾何学的フラストレート磁性体に主題を移したため、スピンアイス系の研究を分担する派遣者⑥を追加した。

### 【招へい計画】

招へい計画では、計17名の計画であったが、最終的には16名の招へいを行った。

招へいにおいては、予定していた招へい者の個人的な事情やシンポジウム等に合わせた招へいでのスケジュール調整の問題などにより5名招へいできない状況が生じたが、研究計画自体に支障を及ぼさないように、当該機関所属の別の研究者を連携研究者として新たに4名を追加し招へいし、また当該機関へ派遣者及び担当研究者が出向くなどを行った。

## (4) 若手研究者が果たした役割にかかる成果の概要

### ① 派遣された若手研究者の成果

(資料4に記載するような研究成果の発信状況等だけではなく、国際共同研究における役割を含め、将来的に当該研究領域において中核的な役割を担う活躍が見込まれるか等の観点も含めて記載してください。)

#### 派遣者①

主に米国国立強磁場研究所に滞在し強磁場中の量子振動などの量子現象の観測を担当し、派遣後半において量子臨界性の検証に向けた熱量測定のためにアウグスブルグ大学に滞在した。

量子臨界性を示す $\alpha$ -YbAlB<sub>4</sub>において20T以上の高磁場において量子振動の観測に成功し、また、35T以下で急に消失する振舞いを観測し、観測された高磁場域におけるホール係数や磁気抵抗の測定から、Ybの磁気モーメントの分極により誘起されるフェルミ面のトポロジ相転移であることを明らかにした。また、高磁場測定に向けた圧力セルの開発を行い、それを用いた実験により、量子臨界揺らぎを反映した電子の有効質量が圧力による抑制を見出すなど、高磁場でのフェルミ面のトポロジカル相転移と量子揺らぎの関係性について成果を上げている。

本事業における最初の派遣者として、積極的に海外に乗り出し直ぐに実験での成果を上げるなど、本事業のスタートダッシュとしての活躍は評価される場所である。尚、本事業終了時点においては、海外学振により本事業の派遣先の1つであったアウグスブルグ大学に赴任する予定であったが、広島大学大学院先端物質科学研究科の量子物質科学専攻(磁性物理学研究室)に、2017年10月から助教として着任することが7月に決まり、今後の研究活動に期待したいところである。

#### 派遣者②

ドレスデン強磁場研究所に滞在し、パルス磁場での数値位相検波法を導入とともに、100T級の超磁場中で現れるような量子現象の測定を担当した。新たなノイズ除去法として数値位相検波法の導入では、100T級のパルス強磁場中で $m\Omega$ 程度の低抵抗の測定法を確立している。これにより、これまで測定できなかった低抵抗の試料での測定が可能となっている。パイロクロア酸化物においては、試料の問題等で再実験が必要な段階であるが、四極子系の試料については量子振動の測定に成功するなど論文準備に入っている。また、トポロジカル起源に重要な要素となるカイラリティに関する解説を物理学会誌に投稿している。

本事業では、100T級のパルス磁場での量子振動も含めた精密測定という、かなりチャレンジングな課題に挑戦しており、上記したように測定法自体の導入については成果を挙げたものの、試料依存性を含めた精密測定における幾つかの問題について、引き続きドレスデンと協力して研究を継続している。

本事業により派遣者本人が開発した強磁場測定技術が評価されるとともに、その測定技術を効率良く研究活動に活かすために、研究所内で超強磁場科学研究施設への配置異動を行うことになり、今後、益々派遣者の研究スキルを活かした研究に期待が持たれる。

### 派遣者③

連携機関も含めて様々な海外の研究機関に赴き研究議論や情報収集を行うとともに、准教授という立場から他の派遣者における指導等も行うなど、本事業のネットワークの海外サイトにおける中核的な役割を担った。その活動の中から、トポロジカルな電子構造に起因する革新的な発見である、反強磁性体における自発的巨大大異常ホール効果の発見を行っている。本事業に関わる全ての強相関トポロジカル系の量子物質の開発を行うとともに、物質に対する研究戦略を構築し、他の派遣者と協力するとともに、本事業に強力な実験手段となる光電子分光では物性研究所の研究グループとも協力するなど、他の研究グループを巻き込んで積極的な研究展開を図っている。そのため、数多くの研究成果を輩出しており、詳細は(5)で後述する。

派遣者③は、本事業開始当初は准教授であったが、上記のようなことも含め研究能力が高く評価され期間中の平成28年4月1日に教授に昇任している。当該領域においてまさにトップリーダーとして活躍しており、また、海外のトップクラスの研究者との交流も深く、今後も中核的かつ先導的な立場での国際レベルでの活躍が期待できる。

### 派遣者④

本事業では唯一の理論の派遣者として、押川担当研究者とともに、主にネットワークの理論系の核としての役割を担いドイツと米国の理論の連携機関に滞在するとともに、トポロジカルの効果が特長的に関わる超伝導・超流動を切り口にトポロジカル相として議論されている系について研究を行っている。

磁性体とは異なり超流動体では、試料形状や試料表面の状態によって、エッジ質量流や軌道角運動量がモデル計算により変わることがあるが、密度行列繰り込み群法を用いた解析(主要連携研究者Pollmann准教授と共同研究)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ている。また、遍歴的強磁性と超伝導の共存しワイル超伝導体としても提案されていUCoGeにおいて、特殊な結

晶構造に着目した現象論的なスピンモデルを提案し、加えて外部磁場による磁気揺らぎの変化などを考慮し、**ab**面内の磁場に対する磁性や超伝導の安定性の説明を可能している。

本事業2年目の平成28年3月に滞在先となるマックスプランク複雑系物理学研究所で本事業と共同開催した国際ワークショップ”Topological Phenomena in Novel Quantum Matter”では、開催に向けた現地係としての役割を担った。理論家として既に独立した研究スタイルを既に身につけており、先端的なテーマへの取組みや国際的な感覚も本事業を通じて身につけており、今後の活躍が期待できる。

#### 派遣者⑤

本事業で発見された反強磁性体でありながら自発的的巨大異常ホール効果を示す  $\text{Mn}_3\text{Sn}$  の薄膜試料に関する研究を JHU にて担当した。薄膜化の研究はトポロジカル効果を応用したデバイス化に向けて非常に大きなインパクトを与えることから、本事業においても重要なテーマとなっていた。

基板や製膜温度、雰囲気等の薄膜作製に必要な条件の最適化を行った結果、 $\text{Mn}_3\text{Sn}$  の多結晶/エピタキシャル(単結晶)薄膜両方の作製に成功した。また、抵抗等の基礎物性に加え、異常ホール効果や異常ネルンスト効果といった磁気・電子構造におけるトポロジーを反映した物性についてもバルク単結晶試料と同様の振る舞いを示していることを確認した。帰国後は、物性研究所において、DC マグネトロンスパッタリング装置の立ち上げを行い、今回協力を得られた JHU 側と同等の純良薄膜作製が可能な環境を構築している。ほぼ、薄膜育成に時間を費やしていたが、薄膜を利用した物性研究も既に開始しており、物性研究所の大谷研究室と共に、 $\text{Mn}_3\text{Sn}$  薄膜を用いたデバイス作成や、連携機関先 JHU の Armitage と共同で THz 実験を開始している。また、磁気光学カー効果を利用した研究においても成果が得られており論文を投稿している。

派遣者⑤は上述したように薄膜育成を用いた研究であるが、薄膜育成については本事業から始めた研究であり、それも海外での研究室で技術を培い、決して長くない滞在期間において成功させている。更に日本に帰国し装置の立ち上げから直ぐに JHU 側と同等レベルの薄膜育成に達していることは驚くべきことで、これらは派遣者⑤の優れた能力によるものであり、更にこれらの磁性材料の薄膜技術を活かしスピントロニクス方面やデバイス化にも研究の幅を拡げつつあり、今後の展開も期待される。

#### 派遣者⑥

量子スピンアイスにおける量子モノポールの動的性質について中性子散乱を用いて明らかにするために、 $\text{Pr}_2\text{Zr}_2\text{O}_7$  の純良単結晶育成から試料評価、そして JHU における中性子散乱を担当した。

物性研究所において、 $\text{Pr}_2\text{Zr}_2\text{O}_7$  の中性子非弾性散乱用の大型の純良単結晶育成に成功し、それを用いて中性子実験を行い、運動量空間における中性子散乱強度のマッピングでピンチポイントと呼ばれる特徴的なパターンにおいて、ほぼ量子スピンモデルの理論計算と同じスペクトルが得られた。これは以前の結果と比較して純良な単結晶が得られた効果が大きく、現在論文準備中であるが、 $\text{Pr}_2\text{Zr}_2\text{O}_7$  が2次元系の量子スピンアイスの理想的な系であることを明らかにした意義は高く評価される。

## ② 派遣・招へいした機関・組織の成果

(機関等として組織的に若手研究者や招へい研究者を支援する枠組みが構築されたか、機関等の研究者の評価において、海外での研究実績を重視するシステムが構築されたか、また本事業による派遣・招へいが今後も維持・継続されるか等の観点も含めて記載してください。)

物性研究所の本事業を始める以前の海外連携に関わる制度としては、「外国人客員所員」のみであった。この制度では、国外において研究拠点を形成しオリジナルな研究業績をあげているような比較的シニアの著名な研究者を対象としており、滞在条件としても3ヶ月以上でサバティカルを想定している。本事業を機に海外連携制度を見直し、1ヶ月以上からの滞在条件で若手の海外研究者を想定した「外国人客員研究員」と、研究グループを対象として短期的来所する「国際共同研究」の2つの制度を平成29年度から新たに創設した。派遣については、3-①で上述したように、本事業のネットワーク強化に向けて、より連携を強化する目的で海外学生派遣制度を期間中に発足させて4名の学生を派遣した。この制度では1ヶ月以上の滞在を条件としており、事業後もJHUへ制度を利用し派遣している。

更に、1-(2)で上述したように、本事業の実績を元にJHUとのMOUや、MPI-UBC-UTokyoの三者協定では学部生のインターンシップも組み込まれており、物性研究所の国際連携制度の中でも新しくインターンシップ制度を取り入れた。

これらの物性研究所の海外連携制度とともに、JHUとのMOUや、MPIとの協定による本事業の組織的な連携への発展により、事業後においても国際連携は維持・継続されている。

また、上記の新しい制度を契機に導入しているが、財源についてはこれまでの「外国人客員所員」の枠の削減や、スペースへの課金などの直接収入の改善や、間接経費などを利用するなど限りある財源の中から工夫をしていることを申し添えておく。



(5) 若手研究者の派遣実績の詳細【氏名のみ非公表】 ※派遣者毎に作成すること。

派遣者①：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)

磁場や圧力による電子状態の人工的な制御により、トポロジカルな相転移および量子臨界現象の直接観測を目標として、派遣者①は高磁場・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、一連のトポロジカル絶縁体系パイロクロア金属酸化物  $\text{Pr}_2\text{Ir}_2\text{O}_7$ 、量子臨界性の $\alpha$ -、 $\beta$ - $\text{YbAlB}_4$ 、及び、軌道揺らぎから量子臨界性が期待されている  $\text{PrV}_2\text{Al}_{20}$  を対象とした。

更に、 $\alpha$ -、 $\beta$ - $\text{YbAlB}_4$ における本期間中に見出した量子極限に伴うと考えられる異常について、量子臨界性との関係の解明を目的として、量子臨界性の熱力学的検証法である磁気熱量効果測定を行うために、アウグスブルグ大学の主要連携研究者 Gegenwart 教授が開発した高精度磁気熱量効果測定装置を利用する。

また、本期間中に発見されたワイル金属の候補物質である反強磁性体  $\text{Mn}_3\text{Sn}$  の磁気トルク測定も担当した。

(具体的な成果)

$\alpha$ - $\text{YbAlB}_4$  に対する圧力下、磁気抵抗測定の結果、高磁場において量子振動の観測に成功するとともに更に高い磁場で消失することを観測した。これは重い電子状態の磁場による抑制が駆動する新しいタイプの量子極限であると考えられる。また、34 T 近傍でフェルミ面のトポロジーの変化であるリフシツ転移を示唆するふるまいを観測した。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 $\alpha$ - $\text{Yb}(\text{Al}, \text{Fe})\text{B}_4$  (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(論文投稿中)。

$\text{PrV}_2\text{Al}_{20}$  の 20 T 以上の高磁場で観測された量子振動から強く増強された電子の有効質量の存在を明らかにした(論文1)。この結果は非常に高い磁場でも伝導電子と電子軌道が強く結びついていることを示す実験事実であり、一方で本系は 0.7 K 以下で軌道秩序を示し、その臨界磁場は 10 T を超える高いものであることを見出した(論文23)。更に、高磁場磁気抵抗測定により、四極子秩序相が 10 T 以上で強い磁場方位依存性を示すことを明らかにし、主軸三方向([111], [110], [100])に平行な磁場中での異方的磁気相図を完成させた。そしてその結果から、[100]方向にのみ観測されていた四極子秩序変数の磁場スイッチングが[110]においてもみられることを明らかにした(論文準備中)。更に、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、通常系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、 $\text{Mn}_3\text{Sn}$  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②：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)。

輸送・磁気特性・弾性定数等の各種低周波交流物性測定を100T級の超強磁場下で高感度に行なえるようにするため、数値位相検波法をドレスデン強磁場研究所の低温・パルス強磁場に導入した。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、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。

(具体的な成果)

新たなノイズ除去法として数値位相検波法の導入に成功し、100T級のパルス強磁場中で $m\Omega$ 程度の低抵抗の測定法を確立し、複数の希土類金属間化合物の磁気抵抗測定において実際に量子振動を観測することに成功している。これにより、パルス磁場中において通常の金属試料のシュブニコフ＝ドハース振動を観測することが、もはや特殊な事例ではなくなったことになる。具体的な量子振動測定の成功事例としてはPrIr<sub>2</sub>Zn<sub>20</sub>、PrRh<sub>2</sub>Zn<sub>20</sub>があり、四極子間相互作用が超伝導におけるCooper対の引力の起源として、非従来型超伝導におけるフェルミ面のトポロジーについて検討をしている。

また $\alpha$ -YbAlB<sub>4</sub>の超音波の実験においては低温で10T付近に音速の変化を観測し、今後の更なる測定の必要性を確認した。

尚、数値位相検波法で用いられる数あるノイズ除去法のうち、ドレスデン強磁場研究所で行った実験を元に着想を得たものについて職務発明として国際特許の出願を行っている。

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	
ドイツ、ドレスデン高磁場研究所、S. Zherlitsyn 部門長	33 日	290 日	0 日	323 日

派遣者③：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)

本事業に関わる全ての強相関トポロジカル系の量子物質の開発を行うとともに、物質に対する研究戦略を構築し、他の派遣者と協力するとともに、電子構造の知見を得るための光電子分光では物性研究所の研究グループとも協力するなど、他の研究グループを巻き込んで積極的な研究展開を図った。

トポロジカル半導体としての対象となる希土類イリジウムパイロクロア酸化物においては、 $\text{Pr}_2\text{Ir}_2\text{O}_7$ 、 $\text{Nd}_2\text{Ir}_2\text{O}_7$ 、 $\text{Nd}_2\text{Ir}_2\text{O}_7$ 等の単結晶を育成し、電子構造の理論的な考察を主要連携研究者 Balents 教授と、また実験的に検証するために物性研究所の光電子分光のグループとの協力しフェルミノードの存在を明らかにする研究を行った。また、フェルミノードを持つ場合、一軸歪によりワイル金属状態になることが期待されていることから、基板を用いた純良薄膜の作製を行い基板との界面の歪により誘起されるワイル半金属状態の可能性を確認することを行った。また、連携研究者 Armitage 教授と共同でテラヘルツ分光を行っている。この系については、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 Mackenzie 教授と連携研究者 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。

量子スピン液体の候補物質である量子スピニアイス系  $\text{Pr}_2\text{Zr}_2\text{O}_7$  においては、純良単結晶の育成に向け、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派遣者③が、さらに NQR を用いた解析を主担当研究者瀧川教授が行った。この系で期待される量子モノポールの検証実験として磁気熱量効果による研究をアウグスブルグ大学の主要連携研究者 Gegenwart 教授と行った。これまで、量子スピン液体は乱れに対して弱いことが知られているが、非クラマース磁性体においては乱れにより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。量子スピニアイスと乱れとの関係については、主要連携研究者 Broholm 教授と中性子回折を用いた研究を共同で進めた。更に、量子モノポールの中性子回折による動的性質を明らかにする研究については、派遣者⑥連携と協力して進めている。

金属で初めて磁気秩序と無関係な量子臨界性確認した物質である  $\beta\text{-YbAlB}_4$  は、常圧で量子臨界相を形成していることが期待される。一方、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が、 $\beta\text{-YbAlB}_4$  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 で置換する系や磁場中の研究を行った。高磁場における量子振動観測に向けた研究については、派遣者①と主要連携研究者 Balicas 博士と協力して米国国立高磁場研究所で行った。この系で得られる良質な単結晶は非常に小さいため、結晶軸を合わせた 50 個程度の  $\alpha\text{-YbAlB}_4$  の単結晶を並べることで擬似単結晶を作り、磁氣的な情報を得るための中性子回折実験を主要連携研究者 Broholm 教授と行った。また、電子構造を明らかにするために物性研究所のグループと共同で光電子分光の研究も行った。

ワイルノードを持つ状態が反強磁性体において実現すれば、逆格子空間にワイルノード対がつくる大きな仮想磁場が存在する。このような電子構造のトポロジーを起源とする異常ホール効果を持つ磁性体の候補は  $\text{Pr}_2\text{Ir}_2\text{O}_7$  のスピン液体状態以外これまで報告例がほとんどなく、本事業においても中心テーマである強相関電子系における新しいトポロジカル量子効果の探究を進めてきた。その中で本事業でのネットワークでの議論やブ

レインストーミングを活用することにより、 $Mn_3Sn$ という物質がまさに上記の性質を満たす反強磁性体であることを発見した。その後、本事業にこの系の研究活動が加わり、主要連携研究者 Balents 教授とは電子状態の系統的な研究や、電子構造の観測にむけて物性研究所のグループと光電子分光の研究を進めた。また、主要連携研究者 Broholm 教授と中性子回折実験を、同 JHU の連携研究者 Oleg 教授と理論的考察を進めている。また、この自発的の巨大異常ホール効果は  $160^{\circ}C$  の高温まで現れており、応用に向けての展開も非常に期待されることから、薄膜系の研究を派遣者⑤と協力して進めた。

#### (具体的な成果)

希土類イリジウムパイロクロア酸化物においては、半金属・絶縁体転移を示す  $Nd_2Ir_2O_7$  が、半金属領域において  $Pr_2Ir_2O_7$  と同様な Quadratic Band Touching 状態を実現していること(論文 37)、Nd と Ir の組成を制御し半金属・絶縁体転移の温度が  $x$  ( $Nd_{2+x}Ir_{2-x}O_7$ ) の関数として劇的に変化すること、主要連携研究者 Balents 教授と協力し半金属・絶縁体相転移の機構が Nd の 4f モーメントと Ir の 5d 電子の間の相関に依存すること、磁場誘起の金属・絶縁体量子相転移を発見し  $Pr_2Ir_2O_7$  と同様に量子相転移近傍に位置する 2 次の波数分散を持つフェルミノード系であること等を明らかにしている(論文 19)。

このフェルミノードを持つ  $Pr_2Ir_2O_7$  の純良薄膜において、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においては  $40 K$  以上で現れることを見出し、基板との界面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と考えられる(論文投稿中)。更に、テラヘルツ分光では薄膜試料において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ている(論文投稿中)。

量子スピンアイス系  $Pr_2Zr_2O_7$  に結晶の組成条件と純良化において、育成方法と化学的な安定性が明らかにし、パイロクロア化合物全体に応用への知見を得ている(論文投稿中)。磁気熱量効果による研究では、モノポール励起が現れる  $2 K$  以下において磁気熱量効果の発散に伴う量子臨界的なスケールリング則が現れることを発見した。この結果をもとにアウグスブルグ大学の主要連携研究者 Gegenwart 教授と京都大学の松田研究室との熱伝導の共同研究から、量子スピン液体の証拠である、モノポールの量子コヒーレンスと、ゲージ場の揺らぎに対応するフォトンを示唆する結果を得た(論文投稿中) これらの実験結果は、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 Moessner 教授と共同で解析し物理的推測を導出することができ、それに基づいて、磁歪系測定装置を連携研究者 Kuchler 博士を招へいすることにより物性研究所へ導入し、共同で熱膨張、磁歪の測定を進めている。また、中性子回折を用いた実験では、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ている(論文 46)。

$\alpha$ - $YbAlB_4$  における置換系の研究では、Fe を 1.4 % 置換するだけで、 $\beta$ - $YbAlB_4$  と同様の臨界性を示し、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ことを見出した(論文投稿中)。この反強磁性相については、主要連携研究者 Broholm 教授と中性子回折を用いた研究を行っている。磁場中の実験ではの系の 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発見した(論文 5)。そして、この量子臨界現象は、磁気秩序がその臨界磁場近傍に現れないことが核磁気共鳴実験か

ら明らかになった(論文26)。中性子回折の実験では、一軸性の強磁性相関と面内の反強磁性相関の関係について明らかにし(論文準備中)、光電子分光の研究からは、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している(論文投稿中)。

新しいトポロジカル量子効果の探究を進める中で、本事業でのネットワークでの議論やブレインストーミングを活用することにより、 $Mn_3Sn$  のおいて世界で初めて反強磁性体で自発的巨大異常ホール効果を発見した。また、反強磁性体としては初めての異常ネルンスト効果を示すことも見出している(論文48)。さらには派遣者⑤とともに磁気カー効果を発見し、反強磁性体における磁気ドメインの可視化に成功した。(論文投稿中)。また、物性研究所のグループとの共同研究で、新しいタイプのスピホール効果を発見し、それを magnetic spin Hall effect (MSHE) と名付けている(論文投稿中)。そして、連携研究者 Goswami 博士と理論面において連携して光電子分光の結果から、 $Mn_3Sn$  が磁気ワイルと呼べる電子構造を持つことを明らかにした(論文53)。

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：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)

ドイツ・Max Planck 複雑系物理学研究所に滞在し、同研究所の主要連携研究者の Pollmann 氏らと、トポロジカルな時間反転対称性のない超流動体・超伝導体、トポロジカルなエッジ質量流、非平衡強相関系に関する研究について共同研究を行っている。これらの系に関しては、これまで平均場理論による解析しかなされておらず、多体効果を正しく取り入れた研究によって、その理解を確立することが目標となる。

ドイツ滞在中にはケルン大学を訪れ、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 Rosch 氏、Hermanns 氏、及びポスドクや学生と様々な問題について議論している。さらに、カリフォルニア大学サンタバーバラ校の主連携研究者である Balents 氏も訪ねている。

(具体的な成果)

密度行列繰り込み群法を用いた解析(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（論文準備中）。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（論文 41）。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（論文 31）。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、実験を行っている研究者と密接に議論し、理論的支持を行った。

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、理論物理学研究所、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、カリ理論物理学研究所、L. Baletns 教授	0 日	0 日	6 日	6 日

#### 派遣者⑤：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)

カイラリティ起源の多彩な物理の機構解明の為、非共線・非共面スピン構造が現れる幾何学的フラストレート磁性体を用いて、磁気光学応答測定や、詳細な輸送特性評価を行うためのデバイス作成の足掛かりとなるエピタキシャル薄膜作製を担当する。具体的な系に関しては、反強磁性体において初めて自発的的巨大異常ホール効果が観測されたカイラル反強磁性体  $Mn_3Sn$  を対象とし、連携機関先の Johns Hopkins 大学 (JHU) において、DC マグネトロンスパッタ法を用いて、 $Mn_3Sn$  のエピタキシャル薄膜作製を行った。更に多結晶薄膜では、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となることから、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。

7月の帰国以降は、物性研究所にて JHU 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) の移管を行っている。

(具体的な成果)

基板や製膜温度、雰囲気等の薄膜作製に必要な条件の最適化を行った結果、エピタキシャル(単結晶)薄膜、及び、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(論文準備中)。

様式1【公表】  
(資料2)

現在、技術移管が完了し、東大物性研においても JHU 側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、 $Mn_3Sn$  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 連携研究者 Armitage と THz 実験の現在実験が行われている。また、米 NIST の R.D.Shull 研究室での、バルク  $Mn_3Sn$  単結晶試料を用いた磁気光学カー効果の測定で、反強磁性金属で初めて巨大なカー回転角を観測し、反強磁性磁区ダイナミクスのイメージングに成功した(論文投稿中)。

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⑥：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)

量子スピニアイスにおける量子モノポールの動的性質を解明するため、量子スピニアイスの候補物質である  $Pr_2Zr_2O_7$  の純良単結晶育成と試料評価を物性研究所にて行い、その後、連携先である Johns Hopkins 大学において、準備した単結晶を用いて低温での中性子散乱実験を担当する。また、すでに米国に派遣されている派遣者⑤と共に、カイラル反強磁性体  $Mn_3Sn$  の薄膜作製や磁気光学応答の研究を行い、派遣者⑤の帰国後は JHU 側の担当になる。

(具体的な成果)

単結晶育成方法のチューニングを行い、20本以上の単結晶育成の結果、直径 5 mm 長さ 10 cm の円筒状の  $Pr_2Zr_2O_7$  大型純良単結晶の作成に成功した。磁化等の基礎物性測定により、明瞭なメタ磁性転移の期待できる極めて高品質の結晶であることを確認し、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ている(論文準備中)。

反強磁性体  $Mn_3Sn$  においては、派遣者⑤と協力して反強磁性体では初めてのカー効果の検出に成功にも貢献している。

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	125 日	240 日	365 日

(6) 研究者の受入実績の詳細【氏名のみ非公表】 ※招へい者毎に作成すること。

招へい者：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、世界中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。本事業では中性子実験に関わる全般について担当した。彼の管理する実験装置を用いた中性子回折実験とともに、下記するように物性研究所が管理する J-PARC も利用している。また、JHU に派遣している派遣者③とともに、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、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ている。また派遣者⑥は Broholm 教授に師事している。

(具体的な成果)

量子臨界性を示す  $\alpha$ -YbAlB<sub>4</sub> においては、Al サイトを Fe で置換することで、反強磁性状態が現れるが、その反強磁性の秩序について中性子回折実験を行い、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。これを元に、この磁気秩序による量子臨界性と常圧で現れる  $\beta$ -YbAlB<sub>4</sub> の量子臨界性の違いを、今後も中性子実験等で明らかにする方針となっている。

量子スピンアイス候補物質の Pr<sub>2</sub>Zr<sub>2</sub>O<sub>7</sub> 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ている。

自発的的巨大異常ホール効果を示す反強磁性体 Mn<sub>3</sub>Ge においては、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。

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：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)

Tchernyshyov 教授は、スピン液体における素励起であるスピノンについて近年精力的に理論的な研究を行っており、また Johns Hopkins 大学における実験グループとも密接な協力関係を保っている。本事業では、新物質におけるスピン液体を含むトポロジカル相を開拓する上で、どのような実験手法を活用すれば良いか、また逆に実験に対して有益な示唆を行うための理論的課題を整理するために本事業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滞在型ワークショップ TCTM 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 TPFC 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 $\text{Yb}_2\text{Ti}_2\text{O}_7$ 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：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)				
<p>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も有名である。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、初年度及び最終年度には2度招へいして、理論・実験グループと集中的に進捗状況の議論を行った。</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 TCTM の組織委員を務め若手研究者の招聘に尽力した。同期間中に開催したシンポジウム TPFC において、招待講演 <i>Interplay of real and momentum space topological defects</i> を行った。</p>				
(具体的な成果)				
<p>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派遣者③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、物性研究所の光電子分光グループと派遣者③ら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いる。さらに、量子スピンアイス系 <math>\text{Pr}_2\text{Zr}_2\text{O}_7</math> 系についても、今後の中性子回折実験について方針を議論している。</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	
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：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)

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。本事業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ため、派遣者①と共同で、磁気抵抗、ホール抵抗、磁化、磁気トルク等の定常高磁場下での測定を元にした研究を推進している。初年度には、上記した実験の実施後に招へいして、理論家との議論とともに物質開発・測定指針のガイドラインを作る作業に協力を行っている。

(具体的な成果)

初年度に得られた  $\text{YbAlB}_4$  系で得られた量子振動の結果から、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ために圧力や化学置換を行うことが明確になり、その方針に従い、 $\text{YbAlB}_4$  において量子振動の発見し、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。また、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、高磁場実験で得られた量子振動の結果についてさらに解析を進めている。

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	
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	9 日	17 日

招へい者⑥：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 of 技術で世界的に有名であり、まさに 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。本事業で Kuchler 氏を招へいし、キャパシタンス法による熱膨張・磁歪の精密測定装置を He 冷凍機ならびに希釈冷凍機に導入した。

(具体的な成果)

導入した装置を用いて、新しい軌道秩序を示す  $\text{Pr}_2\text{Ti}_2\text{Al}_{20}$  の熱膨張測定から負の熱膨張を観測することに成功した。さらに、 $\alpha\text{-YbAlB}_4$  の熱膨張測定から磁場誘起の量子臨界現象を発見し、また、単結晶試料  $\text{Nd}_2\text{Ir}_2\text{O}_7$  において巨大磁歪効果を発見するなど熱膨張・磁歪の導入により、これら重要な研究成果を得た。

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	
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 前年より継続	0 日	59 日

招へい者⑧：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)

Hicks 博士は Mackenzie 教授が所長を務める Max Planck 固体化学物理学研究所のグループリーダーであり、彼が開発した一軸圧力セルは、これまでの圧力セルの常識を破る負の一軸圧を印加可能である。これにより、正負両極の圧力をかけることで、さまざまな物質の対称性をコントロールすることができる。これは物質の対称性に敏感であるトポロジカル量子相の研究になくはならない技術である。最終年度の招へいでは、トポロジカル絶縁体  $\text{Pr}_2\text{Ir}_2\text{O}_7$  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。また、シンポジウム TPFIC では、招待講演 *Lifting lattice symmetries with uniaxial pressure* 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。Hicks 氏は、平成 30 年平成 30 年 5 月から 4 ヶ月間物性研に客員所員として招へいし、圧力下での低温実験を実施することになっている。

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 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⑩：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)

Zherlitsyn 氏は、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。それらの知見を研究に生かすために招へいし、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ともに、物性研における強磁場施設との共同のセミナーを開催し講演を行った。

ドレスデン強磁場研究所では、派遣者②とともに強磁場中物性測定を担当し主に、弾性定数の異常などを観測する超音波測定を担当している。

(具体的な成果)

量子スピニアイス系  $\text{Pr}_2\text{Zr}_2\text{O}_7$  におけるモノポールやフォトンの励起による弾性定数の異常について超音波実験の可能性についての示唆が得られている。また、 $\beta\text{-YbAlB}_4$  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、派遣者②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	3 日 前年より継続	0 日	10 日

招へい者⑫：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)

Rosch 教授は、量子臨界現象に関して多くの重要な貢献を行ってきており、新しい量子相には既知の相との間に新しい量子相転移が伴うはずであり、逆に新しい量子相を特徴付けるには量子相転移近傍での臨界現象の理解が本質的に重要となる。このため、Rosch 教授とは、新奇量子相に伴う量子相転移と臨界現象の分類についての押川担当研究者とともに派遣者④との共同研究を行う。招へいでは、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 TPFC において、招待講演 “Pumping Approximately Integrable Systems”を行った。

(具体的な成果)

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。

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：助教

(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)

同ケルン大学の研究者 Trebst 教授との議論を踏まえ、Hermanns 氏は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担当した。本事業の期間を通じ毎年比較的長い期間の招へいを行い、物性研究所における実験的研究と Hermanns 氏の関連研究について集中的な議論を行う機会を得ている。初年度においては、ワイルスピン液体を含むKitaev型スピン模型に関する議論や、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。次年度においては、格子変形がワイルスピン液体にもたらす効果や、磁性体におけるKitaevスピン模型の実現について議論を行っている。

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 TCTM 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Kitaev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。

(具体的な成果)

Hermanns博士との議論をもとに、Kitaev模型の金属有機構造体を用いた新たな実現について理論的提案を行った（論文52）この成果はHermanns博士の理論の実験的検証への寄与も期待され、Hermanns博士らによる最近のレビュー記事でも紹介されている。

(<https://arxiv.org/abs/1705.01740>)

押川担当研究者の研究室を中心に、Hermanns 博士のグループとの共同研究をさらに続け

<p>ており、既に3次元 Kitaev スピン液体に関するプレプリント (<a href="https://arxiv.org/abs/1707.00898">https://arxiv.org/abs/1707.00898</a>) を発表している。</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⑮：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） 同所属の主要連携研究者 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り、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、同グループにおける若手理論家との共同研究にも期待が持たれる。その中でも Hsieh 博士は新進気鋭の若手理論家であり、SnTe がトポロジカル結晶絶縁体を実現していることの予言など、多くの注目される業績をあげていることから、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 TCTM に招へいした、招待講演“Topological Bootstrap: Fractionalization from Kondo Coupling”はである。</p> <p>（具体的な成果） 分数化を伴う新奇トポロジカル相を、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ト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	12日	12日

招へい者⑯：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） Pollmann 氏は、特に1次元において量子多体系の波動関数を効率的に表現する行列積</p>				
---	--	--	--	--

状態(MPS)と、それに基づく数値計算手法である密度行列くりこみ群(DMRG)や Time-Evolving Block Decimation (TEBD)法について近年めざましい成果をあげている。本事業で、相関の強い系におけるトポロジカル相について新たな理論的發展を生み出すためには、信頼性の高い数値的手法の開発も不可欠である。招へいにおいては、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 TCTM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。

また、Pollmann氏は、本事業の2年目まではマックスプランク複雑系物理学研究所に所属し派遣者④の受入担当であり共同研究を行っている。最終年度においてミュンヘン工科大学に異動している。

(具体的な成果)

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。

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: 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)

He氏は、本事業のネットワーク強化のために物性研究所に長期滞在が可能な若手研究者として、Max-Planck 複雑系物理学研究所の主要連携研究者 Moesnner 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形で招へいした。特に、押川担当研究者の研究室と Pollmann 博士の間で推進してきた共同研究をさらに発展させるとともに、物性研における実験的研究にも提案を行うことも目標にした。

初年度の滞在では、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。2年目では、カゴメ格子上的反強磁性体の基底状態相図に関する最近の研究について詳細な講義を行い、特に時間反転対称性を破るカイラルスピン液体相との間の相転移を手がかりに、時間反転対称性を保つギャップレス臨界相の性質について議論を行った。最終年度においては、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、Pollmann 博士、押川担当研究者らとともにに行った。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。

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 TCTM

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。

(具体的な成果)

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。(論文 51)

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：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)

Petrova 博士は、連携機関である Johns Hopkins 大学で学位取得、Max-Planck 複雑系物理学研究所で博士研究員を務めており、それぞれ Tchernyshyov, Moessner 両教授とスピンアイスに関する理論研究を精力的に展開しており、本事業での招聘に理想的な若手研究者である。招へいでは、Petrova 博士と Moessner 教授によるベーテ格子上的スピンアイスにおけるグリーン関数の厳密解についての解説とより現実的な格子系への応用について議論を行っている。

(具体的な成果)

ベーテ格子上的スピンアイスについて、グリーン関数の厳密解による解法を理解することができ、一般の格子についてはこの解法で直接厳密解を求めることはできないが、グリーン関数に基づく系統的な近似の定式化が可能であることを明らかにした。

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	
Max Planck 複雑系物理学研究所、 ドイツ・押川正毅（東京大学）	0 日	7 日	0 日	7 日

招へい者⑲：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)

Rademaker 博士はエキシトンの理論、多体局在、モット転移に伴う臨界現象など、物性理論の広範な分野で活躍しており、メルティングポット期間中の招へいによって、連携機関である KITP との研究交流の強化に加え、抽象的な理論研究と実験研究の間の橋渡しへの貢献を期待した。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 TCTM 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：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)				
Trebst 氏は連携機関であるケルン大学理論物理学研究所の教授であり、量子モンテカルロ法など数値的手法による量子多体系の研究の世界的第一人者である。Trebst 教授には、メルティングポット期間に招聘してシンポジウムでの講演とともに、同期間に開催するワークショップの組織委員として若手研究者の推薦に貢献している。このように、Trebst 教授は、連携機関の教授として本事業における中核的な役割を担っている。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 TPFC 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キタエフスピン液体や関連する量子相についての明快な解説を行い、Hermanns 博士との共同研究を進展させる上でも有意義な効果をもたらした。				
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	
ケルン大学、理論物理学研究所、ドイツ 押川正毅（東京大学）	0 日	0 日	10 日	10 日

招へい者㉑：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)			
Armitage 氏は THz 分光をトポロジカル絶縁体に応用し、最近、量子スピンホール効果の発見など顕著な業績がある。招へいでは、強相関電子系に現れる新しいホール効果の研究を分光的視点からどのように研究を展開するべきか、また、共同研究として進めている量子スピンホール効果が観測された HgTe の強相関電子系バージョンの Pr <sub>2</sub> Ir <sub>2</sub> O <sub>7</sub> の系において現れる巨大な誘電率の効果について等の議論を行っている。また、JHU では派遣者⑤と共同研究を行い、Mn <sub>3</sub> Sn 薄膜のテラヘルツ分光を担当している。			
(具体的な成果)			
テラヘルツ分光により、Pr <sub>2</sub> Ir <sub>2</sub> O <sub>7</sub> の薄膜試料がフェルミノード系に電子相関が重要な系			



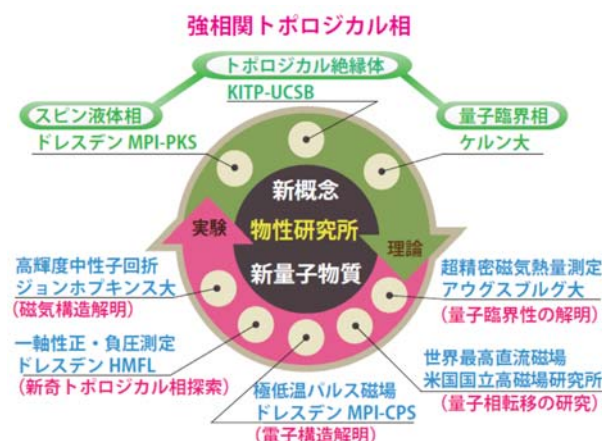
様式1【公表】  
(資料2)

に特徴的な巨大な誘電率を持つことを見出している。				
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 瀧川仁（東京大学）	0 日	0 日	5 日	5 日

資料3 国際共同研究の計画概要・方法

(1) 実施期間中における研究のスケジュールと実施内容の概要

右図に示すような理論と実験の各拠点が有機的に研究協力を行う組織を構築し、トポロジカル相の3つの典型：トポロジカル絶縁体、スピン液体相、量子臨界相の各相について、物性研究所における物質開発と欧米の実験研究拠点、および理論的な解釈を理論拠点が互いに協力をして、新しいトポロジカル量子現象を明らかにしていくとともに、理論が先行した当該分野の特性から、各トポロジカル相の理論面での展開を理論拠点がガイドラインの構築を目指す。具体的な各テーマ別の計画は以下に示すが、理論と実験の各拠点が有機的に研究協力を行う組織の構築に向けては、各年度毎に各拠点の担当および連携研究者の多くが一堂に会するワークショップ及びシンポジウムを開催し、全体の理論・実験の研究の統括と今後の方針を議論した。初年度の平成26年度は日本、平成27年度はドレスデン、最終の平成28年度は、滞在型ワークショップとシンポジウムを日本で開催している。最終年度のワークショップとシンポジウムは、共同利用・共同研究拠点として、全国への普及も目的である。



1. 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実現可能性が高い系である  $\text{Pr}_2\text{Ir}_2\text{O}_7$  について、圧力や磁場による電子状態の人工的な制御により、 $\text{Pr}_2\text{Ir}_2\text{O}_7$  の絶縁体/半金属状態からのトポロジカルな相転移およびその量子臨界現象の直接的な観測を狙う。

2. 磁性体における量子スピン液体相

量子スピン液体の候補物質である量子スピンアイス系  $\text{Pr}_2\text{Zr}_2\text{O}_7$  において、中性子回折実験等の実験結果と理論による解析で、この系で期待されるトポロジカルな量子欠陥であるモノポールの動的性質を解明する。

また、スピン液体を実験的に確定することは極めて難しく、その方法を確立することは喫緊の課題である。そのためには、基底状態からのトポロジカル素励起が観測可能な物理量にどのように寄与するのかを理論的に明らかにしていく。

更にこの系においては、今回期間中に発見された、 $\text{Mn}_3\text{Sn}$  における反強磁性体自発的巨大大異常ホール効果の理論的な解明を行う。

3. 強相関電子系  $\text{YbAlB}_4$  における量子臨界相

$\text{YbAlB}_4$  における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。連携先のケルン大学の理論グループではフェルミ面のトポロジーの変化が指摘されており、実験的な検証として磁場誘起の量子相転移を様々なプローブで観測を行う。

(2) 成果の概要

本事業における国際ネットワーク構築面における成果については、JHU との MOU や、マックスプランクと東大の国際協定に代表されるように（参照 1. (2)）、以前では個人ベースの連携活動であったところ、本事業により組織的な連携に発展していることであり、ハイクラスの研究者交流とともに若手研究者及び学生の国際交流においてレール

が引かれている状況になっている。そして、本事業のネットワーク活用を元にして、物性研究所における国際交流制度も見直され（参照1.（2））、それまでの外国人客員所員に加えて、外国人客員研究員、国際共同研究、海外学生派遣制度等の制度を新たに制定し、インターンシップについても協定に対応するかたちで国際連携制度に組み込まれることになった。

本事業による物性研究所への波及効果としては他にも、物性研究所の将来計画に基づいた改組と連動する形で、担当研究者押川教授と派遣者③が中心となった、分野横断的な研究グループとして量子物質研究グループが期間中に設置されたことがある。この量子物質研究グループでは、新規な量子現象を実現する物質開発やナノ構造作成による新機能開発を目的としており、本事業の強相関トポロジカル相を主題に置いている。本事業が組織内の新しい研究グループ創設の起点となった。

また、本事業で行ったメルティングポットとしての滞在型ワークショップや国際シンポジウムは、共同利用・共同研究拠点として国内の物性科学の研究者への波及効果に貢献している（参照1.（2））。本事業の目標でもある強相関トポロジカル相と言うべき新しい分野創成に向けては、後述するような研究成果自体の面に加えて、国際的・国内的なコンセンサスが本事業を通して得られつつある。

研究成果の発信状況においても、連携機関との共著論文数が本事業により増加し、特に、ハイインパクトの雑誌へ投稿が顕著に増えており、世界的にも先端的な研究とともに質の高い研究が本事業により生まれていることになる（参照1.（2））。以下に、各テーマにおける成果概要を述べるが、本事業の目標でもある強相関トポロジカル相と言うべき新しい分野創成に向けては、研究成果において大きく進展していると思われる。特に、本事業で期待を上回る成果となった、反強磁性体における自発的異常ホール効果の発見は、米国エネルギー省の研究戦略に掲載されるなど注目を浴びており、この強相関トポロジカル相の象徴的な成果となると考えられる。この成果については、特許取得とともに、外部資金（CREST）獲得に繋がっており、また、この自発的異常ホール効果の現象は室温以上でも起こっており、デバイス応用に向けても研究が進展している。

（以下、各トポロジカル相における象徴的な成果のみを記載）

### 1. 強相関電子系におけるトポロジカル絶縁体

イリジウムパイロクロア酸化物  $\text{Pr}_2\text{Ir}_2\text{O}_7$  と  $\text{Nd}_2\text{Ir}_2\text{O}_7$  おいて、強相関電子系におけるトポロジカル絶縁体を実現していることを電子構造の直接観測の立場から突き止めており、一連の成果は *Nature Commnucation*、*Nature Physiscs* 及び *Physical Review Letter* に掲載されている。更に、強相関電子系トポロジカル絶縁体実証への周辺事実として、基板を用いた薄膜作製による基板との界面の歪を利用した実験で自発的異常ホール効果の状態がより高温で現れることや、テラヘルツ分光では薄膜試料が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見出しており、これらの論文は準備中である。

### 2. 磁性体における量子スピン液体相

量子スピンアイス系  $\text{Pr}_2\text{Zr}_2\text{O}_7$  において、中性子によるモノポールの直接観察、磁気熱量効果の発散に伴う量子臨界的なスケーリング則の発見、更に熱伝導の実験から量子スピン液体の証拠となるモノポールの量子コヒーレンスとゲージ場の揺らぎに対応するフォトンを示唆する結果が得られている。中性子の成果については *Physical Review Letter*

に掲載され、後者は *Nature Physics* に投稿中であり、この系で期待されるトポロジカルな量子欠陥であるモノポールの動的性質の解明に向けて実験による検証が進んでいる。

新しいトポロジカル量子効果の探究を進める中で、本事業でのネットワークでの議論やブレインストーミングを活用することにより、反強磁性体での自発的巨大大異常ホール効果を世界で初めて  $Mn_3Sn$  において発見し、更に、反強磁性体としては初めての異常ネルンスト効果を示すことも見出した。これらは、それぞれ *Nature*、及び *Nature Physics* に掲載されている。また、磁気カー効果の発見及び反強磁性体における磁気ドメインの可視化、及び、新しいタイプのスピンホール効果をこの系において発見し、論文投稿中である。そして、これらの特異な現象はトポロジカルな電子構造に起因すると考えているが、それが決定的な証拠となる磁気ワイルと呼べる電子構造を持つことが光電子分光の実験から明らかになり、*Nature Material* に掲載される。(8月15日時点でアクセプトされている)

### 3. 強相関電子系 $YbAlB_4$ における量子臨界相

$\beta$ - $YbAlB_4$  において量子臨界相の形成を金属としては世界で初めて実証し、*Science* に掲載されている。また、 $\alpha$ - $YbAlB_4$  においては高磁場測定による量子振動の観測に成功し、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、フェルミ面のトポロジーの変化を実験的に検証する可能性があるとして、*Journal of Physical Society of Japan* に投稿中である。同組成で構造の異なる核磁気共鳴実験などから量子臨界相が磁気臨界性とは関係なく現れていることを見出し、これはトポロジカル量子相転移の可能性を示唆していることから理論的な面からも研究を進めている。

#### (3) 本事業を契機として新たに始まった国際共同研究

(件)

合計	うち、相手先機関以外
9	8

以下、新たに始まった相手先機関以外の共同研究相手  
 ラトガース大学(米国)、テキサス大学オースティン校(米国)、  
 カルフォルニア大学バークレー校(米国)、プリンストン大学(米国)、  
 トロント大学(カナダ)、ボストンカレッジ(米国)、オハイオ州立大学(米国)、  
 KAIST(韓国)

資料4. 共同研究成果の発表状況

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

	<p>論文名・著書名 等                      (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。)                      ・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。                      ・本事業の研究成果で、DP(ディスカッション・ペーパー)、Web等の形式で公開されているものなど速報性のあるものも、3件以内で付記することができます。                      ・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、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>、担当研究者には<u>下線</u>、派遣した若手研究者には<u>波線</u>、海外の主要連携研究者には<u>斜体・太下線</u>、連携研究者には<u>斜体・破線</u>を付してください。                      ・共同研究の相手側となる海外の研究機関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については番号の前に「○」印を付してください。速報性のあるものについては番号の前に「□」印を付してください。                      ・当該論文の被引用状況について特筆すべき状況があれば付記してください。                      ・上記のうち、主な発表論文のコピー(A4版)を2件以内で添付し、添付したコピーの表紙等の右上にそれぞれに「事業番号」を記入するとともに、当該論文の番号の前に「★」印を付してください。</p>
◎ 1	<p>※Y. Shimura, M. Tsujimoto, B. Zeng, <u>L. Balicas</u>, A. Sakai, and <u>S. Nakatsuji</u>                      “Field-induced quadrupolar quantum criticality in PrV<sub>2</sub>Al<sub>20</sub>”  <i>Phys. Rev. B</i> 91, 241102(R)(1-5) (2015) 【査読有】</p>
2	<p>※T. Terashima, Y. H. Matsuda, K. Kuga, S. Suzuki, Y. Matsumoto, <u>S. Nakatsuji</u>, A. Kondo, K. Kindo, N. Kawamura, M. Mizumaki and T. Inami                      “Synchrotron X-ray spectroscopy study on the valence state and magnetization in <math>\alpha</math>-YbAl<sub>1-x</sub>Fe<sub>x</sub>B<sub>4</sub> (x = 0.115) at low temperatures and high magnetic fields”  <i>J. Phys.: Conf. Ser.</i> 592, 012020 (2015) 【査読有】</p>
3	<p>※T. Tomita, K. Kuga, Y. Uwatoko and <u>S. Nakatsuji</u>                      “High Pressure Measurements of the Resistivity of <math>\beta</math>-YbAlB<sub>4</sub>”  <i>J. Phys.: Conf. Ser.</i> 592, 012019 5pages (2015) 【査読有】</p>
○ 4	<p>※L. Holanda, G. Lesseux, E. Magnavita, R. Ribeiro, <u>S. Nakatsuji</u>, K. Kuga, Z. Fisk, S. Oseroff, R. Urbano, C. Rettori and P. Pagliuso                      “Conduction electron spin resonance in the <math>\alpha</math>-Yb<sub>1-x</sub>Fe<sub>x</sub>AlB<sub>4</sub> (0 ≤ x ≤ 0.50) and <math>\alpha</math>-LuAlB<sub>4</sub> compounds”  <i>J. Phys.: Condens. Matter</i> 27, 255601/1-5 (2015) 【査読有】</p>
○ 5	<p>※T. Tomita, K. Kuga, Y. Uwatoko, P. Coleman, <u>S. Nakatsuji</u>                      “Strange metal without magnetic criticality”  <i>Science</i> 349, 506-509 (2015) 【査読有】</p>
○ 6	<p>※M. L. Sutherland, E. C. T. O’Farrell, W. H. Toews, J. Dunn, K. Kuga, <u>S. Nakatsuji</u>, Y. Machida, K. Izawa, and R. W. Hill                      “Intact quasiparticles at an unconventional quantum critical point”  <i>Phys. Rev. B</i> 92, 041114 (1-5) (2015). 【査読有】 <i>Viewpoint in Physics</i></p>
◎ 7	<p>※D.E. MacLaughlin, O.O. Bernal, L. Shu, J. Ishikawa, Y. Matsumoto, J.-J. Wen, M. Mourigal, C. Stock, G. Ehlers, <u>C.L. Broholm</u>, Y. Machida, K. Kimura, <u>S. Nakatsuji</u>, <u>Y. Shimura</u>, and <u>T. Sakakibara</u>                      “Unstable spin-ice order in the stuffed metallic pyrochlore Pr<sub>2+x</sub>Ir<sub>2-x</sub>O<sub>7-δ</sub>”,  <i>Phys. Rev. B</i> 92, 054432(1-7) (2015) 【査読有】 <i>Editors' Suggestion</i></p>
8	<p>※D. Uematsu, H. Sagayama, T.-h. Arima, J. J. Ishikawa, <u>S. Nakatsuji</u>, H. Takagi, M. Yoshida, J. Mizuki, K. Ishii                      “Large trigonal-field effect on spin-orbit coupled states in a pyrochlore iridate”  <i>Phys. Rev. B</i> 92, 094405 (1-6) (2015) 【査読有】</p>
★ 9	<p>※<u>S. Nakatsuji</u>, N. Kiyohara, <u>T. Higo</u>                      “Large anomalous Hall effect in a non-collinear antiferromagnet at room temperature”  <i>Nature</i> 527, 212-215 (2015) 【査読有】</p>

10	<p>※T. T. Terashima, Y. H. Matsuda, K. Kuga, S. Suzuki, Y. Matsumoto, <u>S. Nakatsuji</u>, A. Kondo, K. Kindo, N. Kawamura, M. Mizumaki, T. Inami</p> <p><b>“X-ray Absorption Spectroscopy in the Heavy Fermion Compound <math>\alpha</math>-YbAlB<sub>4</sub> at High Magnetic Fields”</b></p> <p><i>J. Phys. Soc. Jpn.</i> 84, 114715 (1-4) (2015) 【査読有】</p>
◎ 11	<p>※T. Kondo, M. Nakayama, R. Chen, J. J. Ishikawa, E.-G. Moon, T. Yamamoto, Y. Ota, W. Malaeb, H. Kanai, Y. Nakashima, Y. Ishida, R. Yoshida, H. Yamamoto, M. Matsunami, S. Kimura, N. Inami, K. Ono, H. Kumigashira, <u>S. Nakatsuji</u>, <u>L. Balents</u> and S. Shin</p> <p><b>“Quadratic Fermi node in a 3D strongly correlated semimetal”</b></p> <p><i>Nature Communications</i> 6, 10042 8pages (2015) 【査読有】</p>
○ 12	<p>※A.B. Sushkov, J. B. Hofmann, G. S. Jenkins, J. Ishikawa, <u>S. Nakatsuji</u>, S. Das Sarma, and H. D. Drew</p> <p><b>“Optical evidence for a Weyl semimetal state in pyrochlore Eu<sub>2</sub>Ir<sub>2</sub>O<sub>7</sub>”</b></p> <p><i>Phys. Rev. B</i> 92, 241108(R) (1-4) (2015) 【査読有】</p>
○ 13	<p>※T. Tomita, K. Kuga, Y. Uwatoko, P. Coleman and <u>S. Nakatsuji</u></p> <p><b>“Unconventional quantum criticality in <math>\beta</math>-YbAlB<sub>4</sub> detached from its magnetically ordered phase”</b></p> <p><i>Physics Procedia</i> 75, 482-487 (2015) 【査読有】</p>
◎ 14	<p>※Y. Fuji, <u>F. Pollmann</u>, <u>M. Oshikawa</u>,</p> <p><b>“Distinct Trivial Phases Protected by a Point-Group Symmetry in Quantum Spin Chains”</b></p> <p><i>Phys. Rev. Lett.</i> 114, 177204 (1-5) (2015) 【査読有】</p>
○ 15	<p>※<u>Y. Tada</u>, W. Nie, <u>M. Oshikawa</u>,</p> <p><b>“Orbital Angular Momentum and Spectral Flow in Two-Dimensional Chiral Superfluids”</b></p> <p><i>Phys. Rev. Lett.</i> 114, 195301 (1-5) (2015) 【査読有】</p>
◎ 16	<p>※Y. Nambu, J.S. Gardner, D.E. MacLaughlin, C. Stock, H. Endo, S. Jonas, T.J. Sato, <u>S. Nakatsuji</u>, <u>C. Broholm</u>,</p> <p><b>“Spin Fluctuations from Hertz to Terahertz on a Triangular Lattice”</b></p> <p><i>Phys. Rev. Lett.</i> 114, 195301 (1-5) (2015) 【査読有】</p>
○ 17	<p>※<u>Y. Tada</u> and R. Peters,</p> <p><b>“Spin fluctuations and superconductivity in layered f-electron superlattices”</b></p> <p><i>Phys. Rev. B</i>, 92, 035129 (1-8) (2015) 【査読有】</p>
18	<p>※<u>Y. Tada</u>,</p> <p><b>“Equilibrium surface current and role of U(1) symmetry: Sum rule and surface perturbations”</b></p> <p><i>Phys. Rev. B</i> 92, 104502(1-15) (2015) 【査読有】</p>
◎ 19	<p>※Z. Tian, Y. Kohama, T. Tomita, H. Ishizuka, <u>T. H. Hsieh</u>, J. J. Ishikawa, K. Kindo, <u>L. Balents</u>, <u>S. Nakatsuji</u></p> <p><b>“Field-induced quantum metal–insulator transition in the pyrochlore iridate Nd<sub>2</sub>Ir<sub>2</sub>O<sub>7</sub>”</b></p> <p><i>Nature Physics</i> 12, 134-138 (2016) 【査読有】</p>
20	<p>※Y. Sakaguchi, S. Ikeda, K. Kuga, S. Suzuki, <u>S. Nakatsuji</u>, N. Hirao, Y. Ohishi, and H. Kobayashi,</p> <p><b>“Pressure-Induced Local Structural Changes in Heavy Fermion <math>\beta</math>-YbAlB<sub>4</sub>”</b></p> <p><i>J. Phys. Soc. Jpn.</i> 85, 023602 (1-4). (2016) 【査読有】</p>
21	<p>※<u>H. Mitamura</u>, R. Watanuki, N. Onozaki, Y. Amou, Y. Kono, S. Kittaka, <u>Y. Shimura</u>, I. Yamamoto, K. Suzuki, <u>T. Sakakibara</u></p> <p><b>“Field-induced phase transitions and magnetoferroelectricity in the perfect triangular lattice antiferromagnet RbFe(MoO<sub>4</sub>)<sub>2</sub> in a vertical magnetic field”</b></p> <p><i>J. Magn. Magn. Mater.</i> 400, 70-72 (2016) 【査読有】</p>
22	<p>※Z. M. Tian, Y. Kohama, T. Tomita, J. Ishikawa, H. Mairo, K. Kindo and <u>S. Nakatsuji</u>,</p> <p><b>“Experimental exploration of novel semimetal state in strong anisotropic Pyrochlore iridate Nd<sub>2</sub>Ir<sub>2</sub>O<sub>7</sub> under high magnetic field”</b></p> <p><i>Journal of Physics: Conference Series</i> 683, 012024(1-4) (2016). 【査読有】</p>
◎ 23	<p>※<u>Y. Shimura</u>, M. Tsujimoto, B. Zeng, Q. Zhang, <u>L. Balicas</u>, A. Sakai, and <u>S. Nakatsuji</u></p> <p><b>“Very Low Temperature Magnetoresistance in the Quadrupole Ordered System PrV<sub>2</sub>Al<sub>20</sub>”</b></p> <p><i>Journal of Physics: Conference Series</i> 683, 012012(1-4) (2016). 【査読有】</p>

◎ 24	※A. Magata, Y. Matsumoto, M. Tsujimoto, T. Tomita, <u>R. Kuchler</u> , A. Sakai, <u>S. Nakatsuji</u> “ <b>Low-temperature thermal expansion measurements in PrV<sub>2</sub>Al<sub>20</sub></b> ” <i>Journal of Physics: Conference Series</i> 683, 012014(1-5) (2016). 【査読有】
○ 25	※S. Suzuki, T. Tomita, <u>Y. Shimura</u> , K. Kuga, Y. Matsumoto and <u>S. Nakatsuji</u> “ <b>High Magnetic Transition Temperature and Semiconductor like Transport Properties of Mn-doped <math>\alpha</math>-YbAlB<sub>4</sub></b> ” <i>Journal of Physics: Conference Series</i> 683, 012009(1-4) (2016). 【査読有】
○ 26	※S. Takano, M. S. Grbic, K. Kimura, M. Yoshida, <u>M. Takigawa</u> , E. C. T. O'Farrell, K. Kuga, <u>S. Nakatsuji</u> and H. Harima, “ <b>Site-selective <sup>11</sup>B NMR studies on YbAlB<sub>4</sub></b> ” <i>Journal of Physics: Conference Series</i> 683, 012008(1-4) (2016). 【査読有】
27	※T. Tomita, K. Kuga, Y. Uwatoko and <u>S. Nakatsuji</u> “ <b>Quantum Criticality Beneath the Superconducting Dome in <math>\beta</math>-YbAlB<sub>4</sub></b> ” <i>Journal of Physics: Conference Series</i> 683, 012007(1-4) (2016). 【査読有】
28	※石田 憲二, 服部 泰佑, 佐藤 憲昭, 出口 和彦, 多田 靖啓, 藤本 聡, 「ウラン系強磁性超伝導における強磁性ゆらぎが誘起するスピン三重項超伝導」 固体物理 50, 123-132 (2015) 【査読有】
29	※三田村裕幸、綿貫竜太、金子耕士、榊原俊郎 「三角格子反強磁性体のスピンカイラリティと強誘電性」 固体物理 50, 821-832 (2015) 【査読有】
○ 30	※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, “ <b>Dimensional Reduction in Quantum Dipolar Antiferromagnets</b> ” <i>Phys. Rev. Lett.</i> 116, 197202 (1-5) (2016) 【査読有】
○ 31	※ <u>Y. Tada</u> , S. Takayoshi, S. Fujimoto, “ <b>Magnetism and superconductivity in ferromagnetic heavy-fermion system UCoGe under in-plane magnetic fields</b> ” <i>Phys. Rev. B</i> 93, 174512 (1-7) (2016) 【査読有】
○ 32	※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, “ <b>Low-Energy Excitations and Ground State Selection in Quantum Breathing Pyrochlore Antiferromagnet Ba<sub>3</sub>Yb<sub>2</sub>Zn<sub>5</sub>O<sub>11</sub></b> ” <i>Phys. Rev. B</i> 93, 220407 (1-5) (2016) 【査読有】
33	※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> , “ <b>Chemical and orbital fluctuations in Ba<sub>3</sub>CuSb<sub>2</sub>O<sub>9</sub></b> ” <i>Phys. Rev. B</i> 93, 245117 (1-13) (2016) 【査読有】
34	※小濱芳允、Zhaoming Tian、富田崇弘、石川洵、金道浩一、石塚大晃、中辻 知, 「パイロクロア型イリジウム酸化物 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】
35	※N. Kiyohara, T. Tomita, and <u>S. Nakatsuji</u> , “ <b>Giant Anomalous Hall Effect in the Chiral Antiferromagnet Mn<sub>3</sub>Ge</b> ” <i>Phys. Rev. Applied</i> 5, 064009 (1-10) (2016) 【査読有】
○ 36	※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, “ <b>Quantum criticality and inhomogeneous magnetic order in Fe-doped <math>\alpha</math>-YbAlB<sub>4</sub></b> ” <i>Phys. Rev. B</i> 93, 214421 (1-8) (2016) 【査読有】
◎ 37	※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, “ <b>Slater to Mott Crossover in the Metal to Insulator Transition of Nd<sub>2</sub>Ir<sub>2</sub>O<sub>7</sub></b> ” <i>Phys. Rev. Lett.</i> 117, 056403 (1-6) (2016) 【査読有】 <i>Editors' Suggestion</i>

○ 38	※H. Ryu, M. Abeykoon, E. Bozin, Y. Matsumoto, <u>S. Nakatsuji</u> and C. Petrovic, “ <b>Multiband electronic transport in <math>\alpha</math>-Yb<sub>1-x</sub>Sr<sub>x</sub>AlB<sub>4</sub> [x = 0, 0.19(3)] single crystals</b> ” <i>J. Phys. Condens. Matter</i> 28, 42 (1-5) (2016) 【査読有】
39	※富田崇弘、中辻 知, 「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).
40	※R. Peters, <u>Y. Tada</u> , and N. Kawakami, “ <b>Magnetism in f-electron superlattices</b> ” <i>Phys. Rev. B</i> 94, 205142 (1-6) (2016) 【査読有】
41	※ <u>Y. Tada</u> , T. Koma, “ <b>Two No-Go Theorems on Superconductivity</b> ” <i>J. Statist. Phys.</i> 165, 455-470 (2016) 【査読有】
42	※T. Tomita, K. Kuga, Y. Uwatoko, and <u>S. Nakatsuji</u> , “ <b>Pressure-induced magnetic transition exceeding 30 K in the Yb-based heavy-fermion <math>\beta</math>-YbAlB<sub>4</sub></b> ” <i>Phys. Rev. B</i> 94, 245130 (1-6) (2016) 【査読有】
43	※三田村裕幸 「物性物理学における‘スピンカイラリティ’はカイラルか？」 日本物理学会誌 71 no.12 (2016)857-858. 【査読有】
44	※N. Kawamura, N. Kanai, H. Hayashi, Y.H. Matsuda, M. Mizumaki, K. Kuga, <u>S. Nakatsuji</u> , and S. Watanabe, “ <b>Lifetime-Broadening-Suppressed X-ray Absorption Spectrum of <math>\beta</math>-YbAlB<sub>4</sub> Deduced from Yb 3d <math>\rightarrow</math> 2p Resonant X-ray Emission Spectroscopy</b> ” <i>J. Phys. Soc. Jpn.</i> 86, 014711 (1-7) (2017). 【査読有】
◎ 45	※T. Liang, <u>T.H. Hsieh</u> , J. J. Ishikawa, <u>S. Nakatsuji</u> , L. Fu, N.P. Ong, “ <b>Orthogonal magnetization and symmetry breaking in pyrochlore iridate Eu<sub>2</sub>Ir<sub>2</sub>O<sub>7</sub></b> ” <i>Nature Physics</i> doi:10.1038/nphys4051 (1-5) (2017) 【査読有】
◎ 46	※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> , “ <b>Disordered Route to the Coulomb Quantum Spin Liquid: Random Transverse Fields on Spin Ice in Pr<sub>2</sub>Zr<sub>2</sub>O<sub>7</sub></b> ” <i>Phys. Rev. Lett.</i> 118, 107206 (1-5) (2017) 【査読有】
47	※ <u>S. Nakatsuji</u> , <u>H. Higo</u> , M. Ikhlas, T. Tomita, Z. Tian, “ <b>Large spontaneous Hall effects in chiral topological magnets</b> ” <i>Philosophical Magazine</i> (2017) doi:10.1080/14786435.2017.1352106 【査読有】
48	※M. Ikhlas, T. Tomita, T. Koretsune, M.-T. Suzuki, D. Nishio-Hamane, R. Arita, Y. Otani, <u>S. Nakatsuji</u> “ <b>Large anomalous Nernst effect at room temperature in a chiral antiferromagnet</b> ” <i>Nature Physics</i> (2017), doi:10.1038/nphys4181 【査読有】
◎ 49	Y. Matsumoto, K. Kuga, T. Tomita, <u>R. Kuchler</u> , <u>S. Nakatsuji</u> , “ <b>Anisotropic Thermal Expansion of <math>\alpha</math>-YbAlB<sub>4</sub></b> ” <i>Journal of Physics: Conference Series</i> 807, 022005 (1-6) (2017). 【査読有】
50	※S.C. Furuya, <u>M. Oshikawa</u> , “ <b>Symmetry Protection of Critical Phases and a Global Anomaly in 1+1 Dimensions</b> ” <i>Phys. Rev. Lett.</i> 118, 021601 (1-5) (2017) 【査読有】
★ ◎ 51	※ <u>Y.-C. He</u> , M.P. Zaletel, <u>M. Oshikawa</u> , <u>F. Pollmann</u> , “ <b>Signatures of Dirac Cones in a DMRG Study of the Kagome Heisenberg Model</b> ” <i>Phys. Rev. X</i> 7, 031020 (1-16) (2017) 【査読有】
52	M.G. Yamada, H. Fujita, <u>M. Oshikawa</u> “ <b>Designing Kitaev Spin Liquids in Metal-Organic Frameworks</b> ” <i>Phys. Rev. Lett.</i> 118, 021601 (1-5) (2017) 【査読有】
◎ 53	※K. Kuroda, T. Tomita, M.-T. Suzuki, C. Bareille, A. A. Nugroho, <u>P. Goswami</u> , M. Ochi, M. Ikhlas, M. Nakayama, S. Akebi, R. Noguchi, R. Ishii, N. Inami, K. Ono, H. Kumigashira, A. Varykhalov, T. Muro, T. Koretsune, R. Arita, S. Shin, Takeshi Kondo, <u>S. Nakatsuji</u> ,



	<p><b>“Evidence for Magnetic Weyl Fermions in a Correlated Metal”</b>  <i>Nature Materials</i> (2017) <i>accepted</i> 【査読有】</p>
54	<p>※中辻知  <b>「反強磁性体における巨大異常ホール効果」</b>  <i>応用物理</i> 86 no.4 (2017) 310-314. 【査読有】</p>

## ②学会等における発表

	<p>発表題名 等</p> <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。)</p> <p>(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"> <li>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>、担当研究者には<u>下線</u>、派遣した若手研究者には<u>波線</u>、海外の主要連携研究者には<u>斜体・太下線</u>、連携研究者には<u>斜体・破線</u>を付して下さい。</li> <li>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。</li> <li>さらに数がある場合は、欄を追加して下さい。</li> <li>共同研究の相手側となる海外の研究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。</li> </ul>
○ 1	<p><u>M. Oshikawa</u>  <b>“Orbital Angular Momentum and Spectral Flow in Two Dimensional Chiral Superfluids”</b> 【招待講演】  <i>Frontiers in Condensed Matter Physics</i>, Dec 9-12, Korea Institute for Advanced Study, Seoul</p>
○ 2	<p><u>M. Oshikawa</u>  <b>“Symmetry protection of critical phases and global anomaly in 1+1 dimensions”</b> 【招待講演】  <i>ISSP-MPIPKS Joint Workshop, “Dynamics of Strongly Correlated Systems”</i>, Mar 30-31, ISSP, Univ. of Tokyo, Japan (2015).</p>
3	<p><u>S. Nakatsuji</u>,  <b>“Quantum Melting of Spin Ice”</b> 【招待講演】  <i>Edgar Lüscher Seminar 2015 “Neues aus der Festkörperphysik”</i>, (Hotel-Sport Klosters/Schweiz, Switzerland 07 – 13. February 2015) (2015)</p>
4	<p><u>S. Nakatsuji</u>,  <b>“Strange metal without magnetic instability in <math>\beta</math>-YbAlB<sub>4</sub>”</b> 【招待講演】  <i>2015 American Physical Society March Meeting, Invited Session: Emergent Quantum Phases and Their Transitions in Correlated Electron Systems</i>, (March 2–6, 2015; San Antonio, Texas, USA) (2015)</p>
5	<p><u>S. Nakatsuji</u>,  <b>“Emergent quantum excitations in spin ice through coupling with electrons”</b> 【招待講演】  <i>Quantum Matter and Materials Colloquia, Universität zu Köln</i>, (February, 6<sup>th</sup> 2015, Universität zu Köln, Germany) (2015).</p>
6	<p><u>S. Nakatsuji</u>,  <b>“Emergent critical phases in correlated electron systems”</b> 【招待講演】  <i>Seminar in Department of Physics and Astronomy</i>, (March 11<sup>th</sup> 2015, Johns Hopkins University) (2015).</p>
7	<p>中辻 知、  <b>「量子スピニアイスと量子伝導現象」</b> 【招待講演】  <i>磁気学会第52回スピニエレクトロニクス専門研究会</i>、(2015年1/28(水)13:00～ 東北大学 金属材料研究所 講堂) (2015)</p>
○ 8	<p>Y. Matsumoto, K. Kuga, E. C. T. O’Farrell, T. Tomita, <u>Y. Shimura</u> and <u>S. Nakatsuji</u>,  <b>“Novel quantum criticality in valence fluctuating YbAlB<sub>4</sub> systems”</b> 【招待講演】  <i>Workshop on Recent Developments in the Kondo Problem</i>, Jan 9-10, ISSP, Univ. of Tokyo, Japan (2015).  <b>【招待講演】</b></p>

○ 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-MPIPKS 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 <sup>th</sup> 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】 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 「 $\alpha$ -YbAl <sub>1-x</sub> Mn <sub>x</sub> B <sub>4</sub> 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 「多重極限環境下における $\beta$ -YbAlB <sub>4</sub> のX線吸収分光II」口頭発表【審査無】 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 $\alpha$ -YbAl <sub>1-x</sub> Fe <sub>x</sub> B <sub>4</sub> 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>志村蒸通</u> 、久我健太郎、富田崇弘、松本洋介、 <u>中辻知</u> 「単結晶 $\alpha$ -YbAl <sub>1-x</sub> Mn <sub>x</sub> B <sub>4</sub> の磁気物性と輸送特性」口頭発表【審査無】 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 <sub>2</sub> Ir <sub>2</sub> O <sub>7</sub> の結晶構造と磁性」ポスター発表【審査無】 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压下での結晶構造と輸送特性」口頭発表【審査無】 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】 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）
◎ 19	※ <u>S. Nakatsuji</u> “Novel quantum and functional phases in correlated electron systems: from spin liquids to anomalous Hall effect in chiral antiferromagnets”【基調講演】 MPIPKS/ISSP International Workshop “Topological Phenomena in Novel Quantum Matter: Laboratory Realization of Relativistic Fermions and Spin Liquids”, Max Planck 複雑系物理学研究所、ドレスデン・ドイツ、2016年2月29日
◎ 20	※ <u>T. Higo</u> “Large anomalous Hall effect in the non-collinear antiferromagnet Mn <sub>3</sub> Sn at room temperature” (口頭発表) MPIPKS/ISSP International Workshop “Topological Phenomena in Novel Quantum Matter: Laboratory Realization of Relativistic Fermions and Spin Liquids”, Max Planck 複雑系物理学研究所、ドレスデン・ドイツ、2016年3月2日【審査有】

◎ 21	<p>※<u>Y. Shimura</u>, M. Tsujimoto, B. Zeng, Q. Zhang, L. Balicas, A. Sakai, <u>S. Nakatsuji</u>  <b>“Field-Induced Quadrupolar Quantum Critical Phenomena in PrV<sub>2</sub>Al<sub>20</sub>”</b>  MPIPKS/ISSP International Workshop “Topological Phenomena in Novel Quantum Matter: Laboratory Realization of Relativistic Fermions and Spin Liquids”, Max Planck 複雑系物理学研究所、ドレスデン・ドイツ、ポスター発表、2016年2月29～3月3日【審査有】</p>
22	<p>※H. Fujita, <u>M. Oshikawa</u>  <b>“Universal transport and resonant current from Chiral Magnetic Effect”</b>  MPIPKS/ISSP International Workshop “Topological Phenomena in Novel Quantum Matter: Laboratory Realization of Relativistic Fermions and Spin Liquids”, Max Planck 複雑系物理学研究所、ドレスデン・ドイツ、ポスター発表、2016年2月29～3月3日【審査有】</p>
23	<p>※富田崇弘, 清原直樹, ムハンマド イクラス, 中辻知  「反強磁性金属体 Mn<sub>3</sub>Ge の室温で誘起する巨大異常ホール効果」(口頭発表)  日本物理学会 第71回年次大会, 東北学院大学 和泉キャンパス、2016年3月21日【審査無】</p>
◎ 24	<p>※<u>M. Oshikawa</u>  <b>“Symmetry-Protected trivial Phases”</b> 【招待講演】  Entanglement in Fudan, Fudan University, Shanghai, 2015年12月22日</p>
25	<p>※<u>S. Nakatsuji</u>  <b>“Exotic topological states near a quantum metal-insulator transition in pyrochlore iridates”</b> 【招待講演】  Symposium on strongly correlated electron materials (Rice University, Houston, Texas, Dates: 11/20/2015-11/21/2015)</p>
◎ 26	<p>※富田崇弘, 鈴木慎太郎, Robert Kuchler, Kamran Benia, Zhaoming Tian, 松本洋介, 中辻知,  「パイロクロア型イリジウム酸化物における低温下の熱膨張と熱電能測定」(ポスター発表), 第9回物性科学領域横断研究会凝縮系, 2015年11月13-15日【審査無】</p>
◎ 27	<p>※<u>Y. Shimura</u>, M. Tsujimoto, B. Zeng, Q. Zhang, L. Balicas, A. Sakai, <u>S. Nakatsuji</u>  <b>“Field-Induced Quadrupolar Quantum Criticality in the Heavy Fermion Superconductor PrV<sub>2</sub>Al<sub>20</sub>”</b>  (口頭発表)  TMU International Symposium on New Quantum Phases Emerging from Novel Crystal Structure、首都大学東京、2015年9月25日【審査有】</p>
28	<p>※T. Tomita, K. Kuga, U.Yoshiya, <u>S. Nakatsuji</u>  <b>“Strange Metal Phase Separated from Magnetic Instability in β-YbAlB<sub>4</sub>”</b> (口頭発表)  TMU International Symposium on New Quantum Phases Emerging from Novel Crystal Structure、首都大学東京、2015年9月25日【審査有】</p>
◎ 29	<p>※<u>Y. Shimura</u>, M. Tsujimoto, B. Zeng, Q. Zhang, L. Balicas, A. Sakai, <u>S. Nakatsuji</u>  <b>“Field-Induced Quadrupolar Quantum Criticality in the Heavy Fermion Superconductor PrV<sub>2</sub>Al<sub>20</sub>”</b>  (口頭発表)  TMU International Symposium on New Quantum Phases Emerging from Novel Crystal Structure、首都大学東京、2015年9月25日【審査有】</p>
30	<p>※<u>多田靖啓</u>、  「平衡表面流における U(1) 対称性の役割」 (口頭発表)  日本物理学会 2015 年秋季大会、関西大学、口頭発表、2015 年 9 月 19 日【審査無】</p>
◎ 31	<p>※富田崇弘, 鈴木慎太郎, Robert Kuchler, Kamran Benia, Zhaoming Tian, 松本洋介, 中辻知,  「パイロクロア型イリジウム酸化物における低温下の熱膨張と熱電能測定」(ポスター発表)  J-Physics : 多極子伝導系の物理キックオフミーティング, (神戸大学総合拠点コンベンションホール、2015年09月14-15日【審査無】</p>
32	<p>※<u>M. Oshikawa</u>  <b>“Absence of Quantum Time Crystals”</b> 【招待講演】  KITPC Program on Holographic Duality for Condensed Matter Physics, Kavli Institute for Theoretical Physics China, Chinese Academy of Sciences, Beijing, 2015年7月31日</p>

33	<p>※<u>M. Oshikawa</u>  <b>“Symmetry protection of critical phases and global anomaly in 1+1 dimensions”</b>【招待講演】            KITPC Program on Holographic Duality for Condensed Matter Physics, Kavli Institute for Theoretical Physics China, Chinese Academy of Sciences, Beijing, 2015年7月29日</p>
34	<p>※<u>S. Nakatsuji</u>  <b>“Fermi node, Chiral Spin Liquid, and Quantum Metal-Insulator Transition in Correlated Semimetals”</b>【招待講演】            KITP conference on Novel States in Spin-Orbit Coupled Quantum Matter: from Models to Materials (KITP, UC Santa Barbara, USA, 27-31 July 2015)</p>
35	<p>※<u>H. Mitamura</u>, R. Watanuki, N. Onozaki, Y. Amou, Y. Kono, S. Kittaka, <u>Y. Shimura</u>, I. Yamamoto, K. Suzuki, <u>T. Sakakibara</u>  <b>“Field-induced phase transitions and magnetoferroelectricity in the perfect triangular lattice antiferromagnet <math>\text{RbFe}(\text{MoO}_4)_2</math> in a vertical magnetic field”</b> (口頭発表)            International Conference on Magnetism 2015, スペイン・バルセロナ, 2015年7月7日【審査有】</p>
36	<p>T. Tomita, K. Kuga, Y. Shimura, Y. Matsumoto, Y. Uwatoko, <u>S. Nakatsuji</u>  <b>“Strange Metal Without Magnetic Criticality”</b>, (ポスター発表),            International Conference on Magnetism 2015, スペイン・バルセロナ, 2015年7月7日【審査有】</p>
37	<p>※<u>H. Mitamura</u>, R. Watanuki, K. Kaneko, N. Onozaki, Y. Amou, Y. Kono, S. Kittaka, R. Kobayashi, <u>Y. Shimura</u>, I. Yamamoto, K. Suzuki, S. Chi, <u>T. Sakakibara</u>  <b>“Multiferroicity in the perfect triangular lattice antiferromagnet <math>\text{RbFe}(\text{MoO}_4)_2</math>”</b>            Reserch in High Magnetic Fields (RHMF2015), フランス・ゲルノーブル, 2015年7月2日【審査有】</p>
38	<p>※<u>M. Oshikawa</u>  <b>“Entanglement/Valence Bond/Shannon Entropies and Boundary Field Theory”</b>【招待講演】            KITP Program on Entanglement in Strongly Correlated Quantum Matter, Kavli Institute for Theoretical Physics, UC Santa Barbara, 2015年5月18日</p>
◎ 39	<p>※<u>Y. Shimura</u>, M. Tsujimoto, B. Zeng, Q. Zhang, L. Balicas, A. Sakai, T. Tomita, K. Matsubayashi, Y. Uwatoko, <u>S. Nakatsuji</u>  <b>“Searching for the Field-Induced Non-Magnetic Phase Transition and the Quantum Criticality”</b>【招待講演】</p>
◎ 40	<p>※Y. Matsumoto, A. Magata, <u>Y. Shimura</u>, T. Tomita, <u>R. Kuchler</u>, M. Brando, <u>S. Nakatsuji</u>  <b>“Field Induced Quantum Criticality without Magnetism in <math>\alpha\text{-YbAlB}_4</math>”</b> (口頭発表)            International conference on strongly correlated electron systems (SCES 2016), Hangzhou, China, 2016年5月9日【審査有】</p>
41	<p>※<u>S. Nakatsuji</u>  <b>“Large anomalous Hall effect in chiral antiferromagnets at room temperature”</b>【招待講演】            International conference on strongly correlated electron systems (SCES 2016), Hangzhou, China, 2016年5月11日</p>
42	<p>※<u>S. Nakatsuji</u>  <b>“Novel Topological Phases in Correlated Electron Systems”</b>【基調講演】            Annual Conference of the Institute for Complex Adaptive Matter, Kent State Univ., 2016年5月16日</p>
43	<p>※<u>S. Nakatsuji</u>, N. Kiyohara, A. Sakai, T. Higo, and T. Tomita,  <b>“Large anomalous Hall effect in chiral antiferromagnets <math>\text{Mn}_3\text{Sn}</math>, <math>\text{Mn}_3\text{Ge}</math>”</b> (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>
44	<p>※Y. Matsumoto, M. Tsujimoto, T. Tomita, A. Sakai and <u>S. Nakatsuji</u>  <b>“Multipolar ordered states and heavy fermion superconductivity in <math>\text{PrT}_2\text{Al}_{20}</math> (T = Ti, V)”</b> (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>
○ 45	<p>※<u>M. Oshikawa</u>  <b>“Renyi-Shannon Entropy and Boundary Field Theory”</b>【招待講演】            YKIS conference “Quantum Matter, Spacetime and Information”, Yukawa Institute for Theoretical Physics, Kyoto University, June 13-17, 2016</p>

◎ 46	※三田村裕幸, E. Kampert, T. Förnster, K. Götze, <u>S. Zherlitsyn</u> , J. Wosnitza, 榎原俊郎, 脇舎和平, 松本圭介, 鬼丸孝博, 高島敏郎, 鈴木慎太郎, 辻本真規, Zhaoming Tian, 志村恭通, 中辻知 「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
○ 47	※ <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
○ 48	※ <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
◎ 49	※押川正毅 「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
50	※ <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
51	※押川正毅 「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
○ 52	※ <u>M. Oshikawa</u> “Polarization and Gauge Invariance”【招待講演】 BIRS Workshop “Geometrical Degrees of Freedom in Topological Phases”, Banff International Research
53	※M. Ikhlas, T. Tomita, N. Kiyohara, H. Narita, <u>S. Nakatsuji</u> , Y. Otani”, “Large Anomalous Nernst Effect in Non-Collinear Antiferromagnets $Mn_3Z$ ( $Z=Sn, Ge$ )” (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
◎ 54	※志村 恭通, Q. Zhang, B. Zeng, <u>L. Balicas</u> , 中辻 知”, 「 $a-YbAlB_4$ 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
○ 55	※富田崇弘, M. Ikhlas, 志村恭通, A. A. Nugroho, 中辻 知 「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」(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
○ 56	※酒井明人, A.A. Nugroho, 西川尚, 中辻 知, 「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
◎ 57	※酒井明人, 木村健太, <u>P. Gegenwart</u> , 中辻 知, 「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
◎ 58	※三田村裕幸, E. Kampert, T. Förster, K. Götze, <u>S. Zherlitsyn</u> , J. Wosnitza, 榎原俊郎, 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)
○ 59	※ <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
60	※ <u>M. Oshikawa</u> “Symmetry Protection of Critical Phases and Global Anomaly in 1+1 Dimensions”【招待講演】 627 <sup>th</sup> WE-Heraeus Seminar, Physikzentrum Bad Honnef, Germany, November 2, 2016

◎ 61	※M. Oshikawa <b>“Signatures of Dirac cones in Kagome antiferromagnet”</b> 【招待講演】 MPI-UBC-UTokyo Symposium, Hongo Campus, University of Tokyo, December 6, 2016
62	※M. Oshikawa <b>“Quantum Many-Body Problem and Relativistic Field Theory: Where Do We Stand Now?”</b> 【招待講演】 CHIRAL MATTER from quarks to Dirac semimetals, RIKEN, December 8, 2016
63	※富田崇弘、志村恭通、M. Ikhlas、西川尚、中辻知、大谷義近、 <b>「カイラル反強磁性体 Mn<sub>3</sub>Sn における回転磁場中の異常ホール効果と磁気抵抗」</b> (ポスター発表) 第 10 回 物性科学領域横断研究会-凝縮系科学の最前線-、神戸大学、2016 年 12 月 9 日
64	※M. Oshikawa <b>“Absence of Quantum Time Crystals”</b> 【招待講演】 Bangkok Workshop on Discrete Geometry and Statistics, Chulalongkorn University, Thailand, February 3, 2017
◎ 65	※Y. Nagaoka, Y. Shimura, A. Sakai, M. Tsujimoto, <u>P. Gegenwart</u> , Y. Matsumoto, A. Magata and S. <u>Nakatsuji</u> <b>“Field-Induced Quantum Critical Phenomena in PrV<sub>2</sub>Al<sub>20</sub>”</b> (ポスター発表)
66	※S. Suzuki, K. Takubo, K. Kuga, T. Tomita, Y. Shimura, Y. Matsumoto, H. Wadati, C. Bareille, S. Shin, S. <u>Nakatsuji</u> <b>“High temperature antiferromagnetism and Kondo insulating behavior in <math>\alpha</math>-YbAl<sub>1-x</sub>Mn<sub>x</sub>B<sub>4</sub>”</b> (ポスタ
67	※M. Tsujimoto, A. Sakai, S. Nakatsuji <b>“Non-Fermi liquid behaviors due to 2 channel Kondo effect in multipolar system PrV<sub>2</sub>Al<sub>20</sub>”</b> (ポスター発表) <b>Topological Phases and Functionality of Correlated Electron Systems 2017</b>
◎ 68	※H. Man, N. Tang, J. Wen, N. Butch, S. Nakatsuji, <u>C. Broholm</u> <b>“Quantum Fluctuations in the Kagome spin ice state of Pr<sub>2</sub>Zr<sub>2</sub>O<sub>7</sub>”</b> (ポスター発表) <b>Topological Phases and Functionality of Correlated Electron Systems 2017 (TPFC2017)</b> , 東京大学柏
69	※T. Higo, K. Iritani, M. Halim, W. Higemoto, T. U. Ito, K. Kuga, K. Kimura, S. Nakatsuji <b>“Geometrical frustration in the Heisneberg pyrochlore antiferromagnets AYb<sub>2</sub>X<sub>4</sub> (A = Cd, Mg, X = S, Se)”</b> (ポスター発表) <b>Topological Phases and Functionality of Correlated Electron Systems 2017</b>
70	※Z. Tian, T. Tomita, Y. Kohama, S. Nakatsuji <b>“Field inversion asymmetric behavior of magnetoresistance in anisotropic Nd<sub>2</sub>Ir<sub>2</sub>O<sub>7</sub> single crystal”</b> (ポスター発表) <b>Topological Phases and Functionality of Correlated Electron Systems 2017</b>
71	※Y. Shimura, Q. Zhang, B. Zeng, <u>L. Balicas</u> , S. Nakatsuji <b>“Quantum Limit in the Heavy Fermion Metal <math>\alpha</math>-YbAlB<sub>4</sub>”</b> (ポスター発表) <b>Topological Phases and Functionality of Correlated Electron Systems 2017 (TPFC2017)</b> , 東京大学柏
72	※T. Tomita, K. Kuga, Y. Shimura, Y. Matsumoto, Y. Uwatoko, S. Nakatsuji <b>“Strange metal phase without magnetic criticality in heavy fermion superconductor beta-YbAlB<sub>4</sub>”</b> (ポスター発表) <b>Topological Phases and Functionality of Correlated Electron Systems 2017</b>
73	※A. Sakai, Y. Matsumoto Z. Tian, S. Nakatsuji <b>“Anomalous Hall effect in nodal metallic spin ice Pr<sub>2</sub>Ir<sub>2</sub>O<sub>7</sub>”</b> (ポスター発表) <b>Topological Phases and Functionality of Correlated Electron Systems 2017 (TPFC2017)</b> , 東京大学柏
◎ 74	※H. Man, J. Wen, N. Butch, S. Nakatsuji, <u>C. Broholm</u> <b>“Quantum Fluctuations in the Kagome spin ice state of Pr<sub>2</sub>Zr<sub>2</sub>O<sub>7</sub>”</b> (口頭発表) APS March meeting 2017, Ernest Morial Convention Center New Orleans, USA, 2017 年 3 月 13
75	※永岡靖浩、酒井明人、辻本真規、中辻知 <b>「四極子近藤格子 PrV<sub>2</sub>Al<sub>20</sub> における低温熱膨張と磁歪」</b> (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
76	※辻本真規、酒井明人、松本洋介、中辻知 <b>「四極子自由度による重い電子系 PrV<sub>2</sub>Al<sub>20</sub> の多極子転移点以上における 2 チャンネル近藤効果」</b> (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
○ 77	※肥後友也, H. Man, D.B. Gopman, Y.P. Kabanov, O.M.J. van't Erve, Y. Li, M. Ikhlas, R.D. Shull, C-L. <u>Chien</u> , 中辻知 <b>「カイラル反強磁性体 Mn<sub>3</sub>Sn における磁気光学効果とドメイン観測」</b> (口頭発表)

◎ 78	<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, 榊原 俊郎, W. Zheng, Q. Zhou, <u>L. Balicas</u>, 中辻 知</p> <p>「反強四極子秩序系 <math>\text{PrV}_2\text{Al}_2</math> の高磁場相と異方的磁気抵抗効果」(口頭発表)</p>
79	<p>※富田崇弘、清原直樹、M. Ikhlas、西川尚、中辻 知、大谷義近</p> <p>「カイラル反強磁性体 <math>\text{Mn}_3\text{X}(\text{X}=\text{Sn},\text{Ge})</math>における強磁場回転磁気効果」(口頭発表)</p> <p>日本物理学会 72 回年次大会、大阪大学、2017 年 3 月 17 日</p>
80	<p>※酒井明人、松本洋介、Zhaoming Tian、中辻知</p> <p>「フェルミノードを持つ金属スピナイス <math>\text{Pr}_2\text{Ir}_2\text{O}_7</math>における異常な輸送特性」(口頭発表)</p> <p>日本物理学会 72 回年次大会、大阪大学、2017 年 3 月 17 日</p>
81	<p>※多田靖啓、高麗徹</p> <p>「超伝導における不可避定理：永久電流と <math>U(1)</math>対称性の破れ」(口頭発表)</p> <p>日本物理学会 72 回年次大会、大阪大学、2017 年 3 月 20 日</p>