

領域略称名：重い電子の秩序化
領域番号：2001

平成25年度科学研究費補助金「新学術領域研究
(研究領域提案型)」に係る事後評価報告書

「重い電子系の形成と秩序化」

(領域設定期間)

平成20年度～平成24年度

平成25年6月

領域代表者 東京大学・物性研究所・教授・上田和夫

目 次

1. 研究領域の目的及び概要	3
2. 研究組織（公募研究を含む）と各研究項目の連携状況	5
3. 研究領域の設定目的の達成度	8
4. 研究領域の研究推進時の問題点と当時の対応状況	12
5. 研究計画に参画した若手研究者の成長の状況	13
6. 研究経費の使用状況（設備の有効活用、研究費の効果的使用を含む）	14
7. 総括班評価者による評価	16
8. 主な研究成果（発明及び特許を含む）	19
9. 研究成果の取りまとめ及び公表の状況（主な論文等一覧、ホームページ、公開発表等）	24
10. 当該学問分野及び関連学問分野への貢献度	30

1. 研究領域の目的及び概要（2 ページ程度）

研究領域の研究目的及び全体構想について、応募時に記述した内容を簡潔に記述してください。どのような点が「我が国の学術水準の向上・強化につながる研究領域」であるか、研究の学術的背景（応募領域の着想に至った経緯、これまでの研究成果を進展させる場合にはその内容等）を中心に記述してください。

研究の学術的背景

我が国における磁性研究の歴史は古く、本多光太郎による KS 鋼磁石の発明をはじめ、戦前から世界的な水準に到達していた。戦後は理論研究を中心に発展し、永宮の反強磁性共鳴理論、金森の強磁性理論、糟谷・芳田の RKKY (Ruderman-Kittel-Kasuya-Yosida) 相互作用、久保の線形応答理論、守谷の弱強磁性および SCR 理論、そして近藤効果など、日本発の概念に枚挙の暇がない。

物質科学の進展には、新物質探索、物性測定、理論の三つの要素が不可欠であるが、我が国の磁性研究は、そのいずれを取っても世界最先端の水準にある。この分野における現代の焦点として「重い電子系」がある。以下に詳しく述べるように、「重い電子系」の問題には物質科学の本質的課題が凝縮された形で存在し、本新学術領域研究の目的とする**重い電子系の形成と秩序化**の解明は磁性研究にとどまらず、物質科学全般にとって重要な意義を持っている。

重い電子系の源となった近藤効果は、磁性不純物を含む金属の抵抗極小現象に端を発する問題であったが、その本質は局在磁気モーメントが伝導電子と混成して生じる非磁性基底状態の形成過程における異常である。その全貌の解明にも日本の研究者が大きく貢献し、現在では金属中の孤立磁性原子の振る舞い（不純物近藤効果）はほぼ完全に理解されたと言える。

一方、希土類あるいはアクチノイドが結晶格子を形成している場合の磁気モーメントの振る舞いは、遙かに複雑である。まず、伝導電子のスピン分極を介した RKKY 相互作用によって磁気モーメントは秩序化しようとする。しかし、同時に伝導電子との混成は、近藤効果による局在モーメントの遮蔽を引き起こす。Ce や U を含む金属間化合物では、混成強度の増大とともに後者の作用が優勢になって、基底状態は磁気秩序状態から非磁性のフェルミ液体状態へと移り変わる、すなわち、量子相転移することがわかっている。このとき、RKKY 相互作用と近藤効果とが拮抗する量子臨界点付近において、有効質量の極めて大きいフェルミ液体状態が実現することが知られており、「重い電子系」と呼ばれている。重い電子系では、遍歴と局在の狭間で顕在化する量子臨界揺らぎが非フェルミ液体状態や非 s 波の異方的超伝導などの概念的に新しい現象を生み出すと考えられている。

このような重い電子系の研究は、約 30 年前、ドイツの Steglich らによる CeCu_2Si_2 の超伝導転移の発見に遡ることができる。そこで初めて、大きな低温電子比熱の起源が重いフェルミ準粒子であることが実証された。以来、重い電子系研究は着実な進歩を遂げてきたと言えるが、未知の物質を開発し、その物性を明らかにしつつ新機能の発現を探索するという現代物質科学の潮流の中で最近著しい進展があり、新たな発展期を迎えつつある。まず、重い電子系最大の特徴であるバラエティーに富んだ異方的超伝導体は、現在、30 を越えるものが見つかっているが、その半数以上は今世紀になって発見されたものであり、そのうち日本人研究者によって発見された「国産」の重い電子超伝導体は 8 個に上る。その新奇超伝導体探索のフロンティアは現在、超ウランにまで拡大しており、研究対象は格段に広がってきている。また、様々な新奇物質が見つかる中で、従来の磁気秩序や軌道秩序では理解できない新しい秩序相が存在することが次第に明らかになってきた。これらの中には、強いスピン軌道相互作用のもとで発現するスピンと軌道の複合自由度である「多極子」が秩序化したもの、すなわち、八極子や十六極子などの高次多極子の自発的秩序状態が我が国の研究者によって明らかにされてきた。

一方、重い電子形成のメカニズムとして従来の電子間相互作用とは別の、「ラットリング」と呼ばれる非調和性局所フォノンに由来するものの存在が、最近改めて注目されている。「重い」という言葉は電子の有効質量の増大を意味しているが、その原因としては、当初から、電子格子相互作用と電子間相互作用の二つが考えられていた。しかし、強相関電子系という言葉に端的に表れているように、これまで後者が強調され、前者は副次的位置に止められることが多かった。重い電子系の形成と秩序化の問題では、再び両者をともに考える必要が明らかになりつつある。

このような新しい重い電子状態や多様な秩序相を理解するには、従来の f 電子の遍歴・局在（磁気秩序）の対立という二元論的描像だけでは不十分であり、電荷とスピンに f 電子の軌道や格子の自由度（フォノン）も絡み合った多自由度性が重要な要素であることがわかってきた。すなわち、遍歴・局在という伝統的な横糸に、複合多自由度性という新たな縦糸が絡まりあって、重い電子系の新現象、新機能が発現すると考えられるのである。

さらに、測定技術の面でも近年、著しい進歩があった。まず、我が国の研究者の努力によって光電子分光の分解能は飛躍的に向上し、現在 $100 \mu\text{eV}$ (温度換算で約 1K) に迫りつつある。これは、まさに重い電子状態の直接観測が可能になりつつあることを意味している。また、角度分解の磁場中熱伝導度測定や磁場中比熱測定による異方的超伝導のギャップ構造を探る実験、多極子秩序構造を探る測定技術にも格段の進歩があり、これまで以上に重い電子系の秩序状態に対する微視的・定量的議論が可能になりつつあった。

以上が、本新学術領域研究に応募した 2008 年時点の状況であった。

研究の目的

本領域で解明を目指している重い電子系の物理は、f 電子の遍歴・局在という従来の重い電子描像に、軌道 (多極子) や格子振動に由来する複合多自由度が絡み合った未知の体系であり、その解明には、結晶育成と様々な手法による高度な実験、および理論的解釈の密接な連携が必要である。一方、重い電子系各分野における最近の進展の多くは我が国の研究者の成果によるものであり、本領域研究を推進することによって格段の進展が期待される。したがって本領域は「多様な研究者による新たな視点や手法による共同研究等の推進により、当該研究領域の新たな展開を目指すもの」に該当する。

また、重い電子系の物理はそれ自体、物性物理学における基本的な重要課題であるばかりでなく、超伝導や磁性、金属絶縁体転移、あるいは格子物性をもカバーする、物性物理のあらゆる重要な基本要素を含んでいる。そして、その解明には、実験技術や理論的解析手法ともにチャレンジングな研究が要求される。したがって、その成果や研究手法は、物性物理学、ひいては物質科学全般の基礎研究の一層の進展に寄与することが期待される。

これらを念頭において、本新学術領域研究では、重点的に推進する研究項目として次の 4 つを設定した。

(1) 重い電子形成の直接観測: 反強磁性量子臨界点近傍の重い電子状態について、純良単結晶育成および圧力による磁気秩序温度の制御により、反強磁性から遍歴状態に至るフェルミ面の変化を高分解能光電子分光 (レーザー光源や放射光源)・ドハース実験・バンド構造計算の密接な協力体制のもとに解明し、併せて超伝導発現との関係を明らかにする。この目的の遂行のために **A01 フェルミオロジー班**を組織し、A01-001「純良単結晶育成とドハース・ファンアルフェン効果によるフェルミ面の研究」(研究代表者: 播磨尚朝) と A01-002「先端光電子分光による f 電子系化合物の高精度バルクフェルミオロジー」(研究代表者: 横谷尚睦) の 2 つの計画班を設置した。

(2) ラットリングによる新奇物性: ゲストイオンを内包する比較的軽い元素から成るカゴ状構造をもつ物質において、ラットリング (非調和性局所フォノン) の重要性が指摘されている。新しいラットリング物質を創製し、ラットリングと電子自由度の複合化による重い電子系の形成の可能性、さらには非調和性フォノンに媒介される“高温”超伝導の可能性も追求する。この目的の遂行のために **A02 ラットリング班**を組織し、A02-001「ラットリング物質の探索・創製と電子・格子物性の研究」(研究代表者: 高島敏郎) と A02-002「巨大振幅原子振動をもたらす新しい電子相の動的分光法による研究」(研究代表者: 藤秀樹) の 2 つの計画班を設置した。

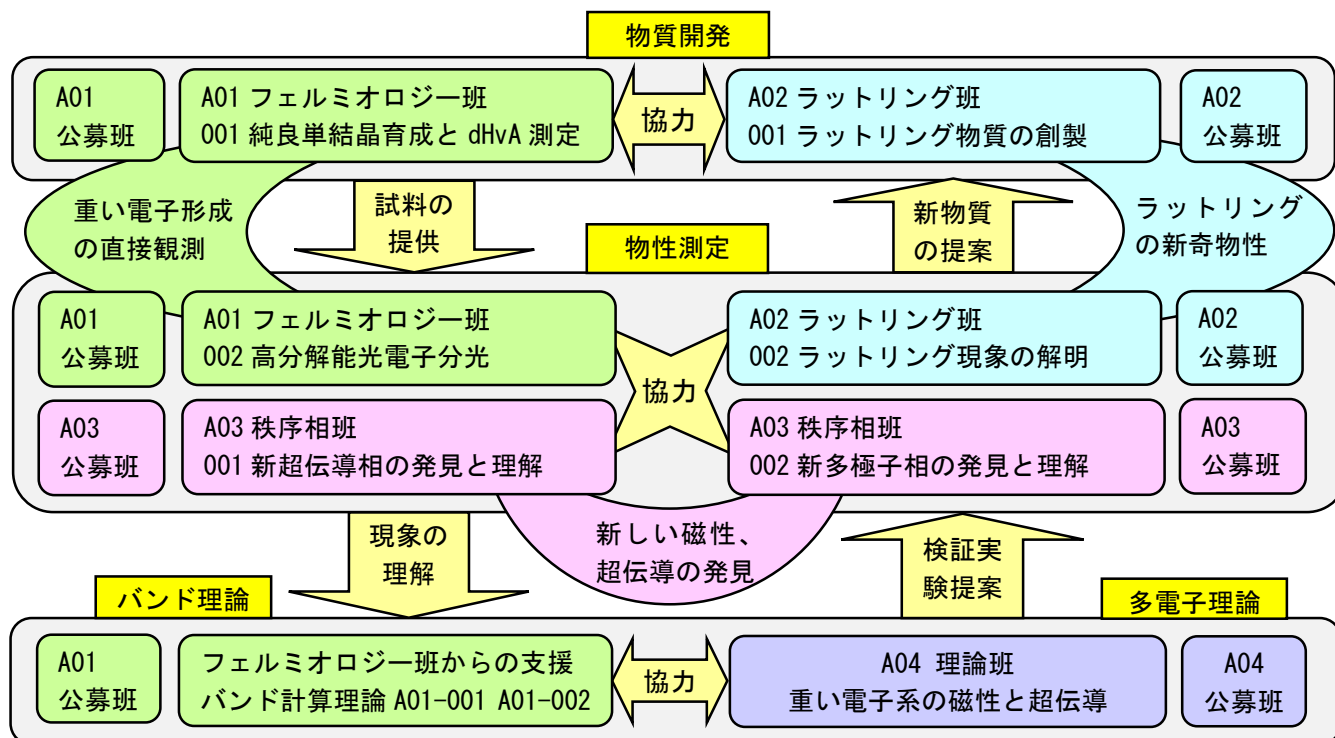
(3) 重い電子系の新奇凝縮相の探索と理解: Pr や Yb などを含む新たな物質開発や加圧効果、人工格子技術を利用して新しい f 電子系超伝導体を創製し、電子輸送現象測定、熱測定、磁気測定、高周波測定、核磁気共鳴およびトンネル顕微鏡測定を通してエキゾチックな超伝導状態を解明する。また、スピンと軌道の複合自由度である多極子の新しい秩序状態や多極子の量子臨界現象、多極子近藤効果などの発見と解明を目指す。さらに多極子由来の新たな重い電子形成機構や超伝導機構の可能性を探る。この目的の遂行のために **A03 秩序相班**を組織し、A03-001「新奇超伝導相の発見と解明」(研究代表者: 石田憲二) と A03-002「多極子自由度に由来する秩序と揺らぎの研究」(研究代表者: 榊原俊郎) を設置した。

(4) 重い電子系の理論: 以上の実験を理論的にサポートすると共に、重い電子系の超伝導および磁性に関する新概念の確立を目指す。領域内のバンド計算研究者と協力して構築した多体 f 電子モデルを、場の量子論的手法や計算物理的手法を駆使して解析し、磁性や超伝導現象、量子輸送現象の研究を行うとともに、新しい理論計算手法の開発も行う。この目的の遂行のため、**A04 理論班**「f 電子の多自由度性に創出する新奇な量子秩序と超伝導の理論」(研究代表者: 堀田貴嗣) を設置した。

2. 研究組織（公募研究を含む）と各研究項目の連携状況（2 ページ程度）

領域内の計画研究及び公募研究を含んだ研究組織と領域において設定している各研究項目との関係を記述し、どのように研究組織間の連携や計画研究と公募研究の調和を図ってきたか、図表などを用いて具体的かつ明確に記述してください。

本領域研究の研究組織と計画班・公募班の連携状況をまとめたものが下図である。本領域研究の推進にあたっては、3つの実験系計画班と1つの理論班を構成したが、実験系の3つの班は、精選された3つ研究テーマに対応した。すなわち、フェルミオロジー班、ラットリング班、秩序相班である。理論班は、これらの実験班の理論面をサポートするとともに、実験結果に立脚して、重い電子系に関する新概念の構築を目指す。また、それぞれの研究テーマに対して公募研究が採択され、計画班と協力しながら研究を推進した。



本領域の研究の連携は数多くあるが、[1] 物質開発グループと物性測定グループの試料の提供による連携、[2] 物性測定グループ間の共同研究、[3] 物性測定グループと理論グループの共同研究、[4] 理論グループの共同研究に分けられる。これらを順に説明する。

[1] 物質開発グループから物性測定グループへの試料提供による連携

低温において磁場や圧力を制御した精密な物性測定を行うためには、純良単結晶が必要不可欠である。特に、重い電子系のように、エネルギースケールが小さくなっていて、外場によって物性が容易に変化させられる場合には、試料の純良性によって結果が大きく左右される。格好の例が、四半世紀以上にわたって謎であった URu_2Si_2 の“隠れた秩序”の研究である。A01-001 班で URu_2Si_2 の超純良単結晶が育成され、それが物性測定グループに提供されたことで、大きく研究が進展した。

A01-001 班からは、全ての実験系計画班に試料が提供された。A01-002 班には CeIrSi_3 , YbCu_2Ge_2 , EuAl_4 , SrAl_4 , NpNiGa_5 , UIr , URu_2Si_2 , UN , UPd_3 , $\text{CeRu}_2(\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x)_2$ が、A02-001 班には YbCu_2Si_2 , $\text{Rh}_{17}\text{S}_{15}$, $\text{U}(\text{Ru}_{1-x}\text{Rh}_x)\text{Si}_2$, URu_2Si_2 , CeCoIn_5 , $\text{YbCo}_2\text{Zn}_{20}$, EuGa_4 , EuAl_4 が、A02-002 班には UBe_{13} , EuGa_4 , EuAl_4 , SrAl_4 , UFe_2 が、A03-001 班には UCoAl , ZrZn_2 , CeIrIn_5 , CePd_5Al_2 , NpPd_5Al_2 , UFeGa_5 , USn_3 , $\text{NpFe}_4\text{P}_{12}$, UIn_3 , PuO_2 , UPt_3 , URu_2Si_2 が、A03-002 班には UPt_3 , CeCoIn_5 , $\text{YbCo}_2\text{Zn}_{20}$, $\text{Yb}_2\text{Pt}_2\text{Pb}$ が提供された。

公募班にも積極的に試料が提供された。A01 撰持には CeRhIn_5 , CeIrSi_3 , CeRhSi_3 , $\text{YbT}_2\text{Zn}_{20}$ (T: Co, Rh, Ir) が、A02 金子には CePt_3Si , EuGa_4 , EuAl_4 , $\text{YbCo}_2\text{Zn}_{20}$ が、A02 柳澤には $\text{UPd}_{20}\text{Si}_6$ が、A03 髭本には CeCoIn_5 が、A03 住山には LaPt_3Si , CePt_3Si , CeCoIn_5 , CeIrIn_5 , LaNiC_2 , UPt_3 が、A03 阿曾には CeRhSi_3 , CeIrSi_3 が、A03 與儀には EuGa_4 , EuAl_4 が、A03 立岩には $\beta\text{-US}_2$, URu_2Si_2 が、A03 橋高には UPt_3 , CeCoIn_5 , $\text{YbCo}_2\text{Zn}_{20}$, $\text{Yb}_2\text{Pt}_2\text{Pb}$ が提供された。

A02-001 班からはラットリング化合物の良質試料が提供された。特に、A02-002 班にはさまざまなクラ

スレート化合物、充填スクッテルダイト化合物、希土類ヘキサボライドが提供された。公募班では、A02 柳澤に $\text{EuOs}_4\text{Sb}_{12}$, $^{154}\text{SmOs}_4\text{Sb}_{12}$ が、A02 真岸には $\text{RPt}_4\text{Ge}_{12}$ ($\text{R}=\text{La}, \text{Pr}, \text{Sr}, \text{Ba}$) が、A02 金子には $\text{PrRu}_4\text{Sb}_{12}$, $\text{PrOs}_4\text{Sb}_{12}$, $\text{Ba}_8\text{Ga}_{16}\text{Sn}_{30}$ が、A03 岡村には SrFe_2As_2 , $\text{PrRu}_4\text{P}_{12}$, $\text{CeRu}_4\text{Sb}_{12}$ が、A02 松平には充填スクッテルダイト化合物が、A03 深澤には $\text{GdRu}_4\text{P}_{12}$ が、A03 興儀には $\text{CeRu}_4\text{Sb}_{12}$, $\text{CeRu}_4\text{Ab}_{12}$ が提供された。

他の計画班からも試料提供がなされた。A03-001 佐藤からは、公募 A03 岡崎に SmS が、公募 A03 阿曾に CeRhIn_5 が提供された。A03-002 青木からは、公募 A03 深澤に $\text{GdRu}_4\text{P}_{12}$ が、公募 A03 髭本に $\text{PrRu}_4\text{P}_{12}$ が、公募 A03 岡崎に $\text{PrRu}_4\text{P}_{12}$, $\text{SmRu}_4\text{P}_{12}$ が提供された。A03-002 中辻からは、 YbAlB_4 , $\text{Sm}(\text{Ti}, \text{Cr}, \text{V})_2\text{Al}_{20}$, $\text{PrT}_2\text{Al}_{20}$ が A03-001 井澤、公募 A03 の小林、中西、髭本に提供された。

公募班からの試料提供もなされた。特に、新物質開発で公募班の活躍が光った。公募 A03 鬼丸からは、A02-001 高島との共同研究で開発された新超伝導体 $\text{PrT}_2\text{Zn}_{20}$ ($\text{T}=\text{Rh}, \text{Ir}$) が、A02-002 班、A03-001 班、A03-002 班、公募 A02 の金子、中西、髭本、松岡、橘高に提供され、集中的に実験がなされた。公募 A02 広井からは、 β パイロクロア酸化物単結晶が A02-002 班、公募 A02 の金子、寺嶋に提供された。また、 $\text{A}_x\text{V}_2\text{Al}_{20}$ が A03-001 班に提供された。公募 A02 西岡からは、A02-001 高島との共同研究で開発された $\text{RT}_2\text{Al}_{10}$ が、A02-001 班と A02-002 班に提供された。公募 A03 光田からは、 YbPd が A02-002 班と公募 A03 中西に、 EuPtP が公募 A03 水戸と稲見に提供された。公募 A03 横山からは A03-002 班に $\text{CeCo}(\text{In}, \text{Zn})_5$ が提供された。公募 A03 松岡からは A02-002 班に $\text{CeRu}_2\text{Al}_2\text{B}$ が、公募 A03 松村には PrPd_3S_4 , CePd_3S_4 , DyPd_3S_4 が提供された。

[2] 共同実験を通しての実験系計画班と公募班の連携

計画班は日常的な研究協力によって密接に連携をしているが、ここに全てを記すことはできないので、代表的な連携の例を挙げる。重い電子系の電子状態を知るためにはフェルミ面構造の解明が重要であり、その有力手段である dHvA 実験の研究拠点を増やすことは今後のために重要である。A02-001 班の菅原は、dHvA 実験の第一人者である A01-001 大貫らと共同で dHvA 実験を行った。

実験系公募班と計画班の間では、実験施設の利用を通しての連携があった。公募 A03 橘高は、A3-002 榊原が保有する磁場回転比熱測定装置を使用し、異方的超伝導体 UPt_3 や CeCu_2Si_2 のギャップ構造の研究を行った。公募 A03 阿曾は、A03-002 上床の装置を利用して CeTSi_3 の極低温圧力下電気抵抗の測定を行った。また、圧力下での中性子回折実験では圧力容器を A03-002 上床と共同で開発した。 CeTSi_3 ($\text{T}=\text{Rh}, \text{Ir}$) の圧力下熱電能測定は、A01-001 辺土と協力して行った。

公募班と計画班の共同研究も活発に行われた。各測定プローブを相補的に利用するという観点から、中性子散乱を専門とする公募 A02 金子が X 線非弾性散乱を専門とする A02-002 筒井と共同研究を行い、充填スクッテルダイト化合物における非調和フォノンの全容解明を進めた。A02 松平は、A02-002 宇田川、岩佐、筒井らと充填スクッテルダイトに関する共同研究を進めた。A03 松本は、A01-002 辛、A03-001 井澤、A03-002 榊原、公募 A03 小林らと共同で $\beta\text{-YbAlB}_4$ に関するさまざまな実験を行い、非従来型の量子臨界性を明らかにした。A03 深澤は、重い電子質量をもつ鉄系超伝導体 KFe_2As_2 に関して、A03-002 榊原、中辻らと共同研究を行い、低温かつ磁場中での比熱を明らかにした。公募 A03 水戸は、低温下で巨大磁気比熱を示す $\text{YbCo}_2\text{Zn}_{20}$ について、A03-001 石田と共同で NQR 測定によりその特徴を明らかにした。また、公募 A03 深澤と共同で、価数揺動物質 SmB_6 の高圧下 NMR 測定を行うことに成功した。公募 A01 撰待は A01-001 青木らと共同で、空間反転対称性を持たない CeIrSi_3 の超伝導状態の研究を行った。公募 A03 横山は、A03-001 神戸、A03-002 榊原、公募 A03 橘高らと共同で URu_2Si_2 の低温・圧力下での磁化測定を行った。公募 A01 大原は、A01-001 大貫、A03-002 青木、A03-002 上床、評価者の秋光らと共同で、 YbNi_3Al_9 および YbNi_3Ga_9 のさまざまな物性を明らかにした。公募 A01 本多は、A01-001 大貫、公募 A01 撰待、公募 A02 金子らと共同で、 $\text{YbT}_2\text{Zn}_{20}$ ($\text{T}: \text{Co}, \text{Rh}, \text{Ir}$) の圧力下における量子臨界状態の探索や超高压下における YbCu_2Ge_2 の重い電子状態への移行、 $\text{Yb}_2\text{Pt}_2\text{Pb}$ のメタ磁性、その他多くの Yb 化合物の物性や高压下における物性を明らかにした。公募 A03 立岩は、高压下磁化測定を目的としたセラミックアンビル型圧力セルを開発し、公募 A03 小林と共同で、磁化測定精度の向上化を目指した技術的開発（圧力セルの改造）を行った。

[3] 実験系グループと理論の連携

まず、第一原理バンド計算と実験グループの密接な連携があげられる。特に、A01-001 播磨はさまざまな重い電子系物質のバンド計算の第一人者であり、本領域の実験グループに対して大きく貢献した。A03-002 徳永は、 $\text{PrTi}_2\text{Al}_{20}$ のバンド計算を A01-001 播磨に依頼し、その結果をもとに A1-NQR 信号の観測に成功した。公募 A01 撰待は、重い電子系圧力誘起超伝導体 CeRhIn_5 や空間反転対称性を持たない圧力誘起超伝導体 CeIrSi_3 の量子臨界点近傍での超伝導状態と磁場誘起反強磁性相の研究で、A01-001 播磨のバンド計算結果を参考にした。公募 A02 寺嶋は、 β パイロクロア酸化物 KOs_2O_6 について、A01-001 播磨によ

る電子構造計算を基にフェルミ面の全貌を明らかにしただけでなく、質量増強が $\lambda=5-8$ と電子格子相互作用によるものとしては例外的に大きく、かつフェルミ面全体でかなり一様に起こるといふ電子ラットリング相互作用の特徴を発見した。公募 A02 広井は、 AxV_2Al_{20} におけるラットリング現象と超伝導の関係を明らかにしたが、その考察において、A01-001 播磨のバンド計算結果が電子状態の理解に役立った。公募 A02 岡村は、YbS や $CeRu_4Sb_{12}$ の高圧での光学伝導度の研究に関して、A01-001 播磨のバンド構造の理論計算の提供を受けた。特に YbS については、高圧下で測定された格子定数を用いて「高圧でのバンド計算」の結果を提供され、実験結果との比較を行った。公募 A01 大原は、 $YbNi_3Al_9$ の dHvA 実験にあたって、バンド構造計算を A01-001 播磨に依頼し、その結果を実験の解析に利用した。

磁性や超伝導現象については、実験系グループと A04 理論班や理論系公募班との間で連携がなされた。A03-001 石田、佐藤は、強磁性超伝導体 UCoGe における強磁性揺らぎと超伝導の発現に関して、A04 川上や公募 A04 藤本と共同研究を行った。A03-001 井澤は、重い電子超伝導体 UPt_3 の低温の角度分解熱伝導の測定から、超伝導ギャップのノード(節)の位置を決定したが、理論グループとの議論より、群論的な考察から超伝導ギャップの対関数が決定された。A03-001 松田らの重い電子系の人工超格子薄膜の実験研究について、A04 紺谷が実験結果の理論解析を担当した。この実験に関して、公募 A03 柳瀬は、局所的な空間反転対称性がない超伝導が実現している可能性を検討し、それを実証する実験結果を発表した。A03-001 松田、公募 A03 芝内らの URu_2Si_2 の隠れた秩序相に関する実験研究について、A04 楠瀬、公募 A04 藤本、公募 A03 柳瀬らが理論的解釈を行った。公募 A03 鬼丸は、 PrT_2Zn_{20} (T=Rh, Ir) の実験結果について、A04 三宅や公募 A04 服部らに理論計算を依頼し、その解釈を行った。

理論側から実験研究にアプローチする連携も見られた。公募 A01 酒井は、多体効果を考慮した結晶場と近藤効果の競合系の四極子感受率をエクセル上で簡便に求めるプログラムを開発・配布し、A02-002 根本の超音波実験の解析に協力した。公募 A04 椎名は、公募 A03 松村の CeB_6 の共鳴 X 線の実験結果について、多極子ゆらぎに関する理論面からの考察を行った。また、 $PrRu_4P_{12}$ の電荷秩序相における極低温での性質に関して、A03-002 青木および評価者の斯波らとともに、4f 電子が Pr 核スピンと新規な量子束縛状態を形成することを理論的に示し、低温の比熱と磁化の複雑な温度・磁場変化の実験結果を説明することに成功した。また、 URu_2Si_2 の隠れた秩序について、評価者の秋光および公募 A03 網塚が協力し、中性子散乱および放射光 X 線散乱による研究を進めた。A04 楠瀬は、 URu_2Si_2 の隠れた秩序に関して群論的考察を行い、公募 A03 横山の研究に協力した。公募 A03 渡辺は、価数揺らぎに関する新奇な量子臨界性に関する研究をすすめ、A03-002 中辻らの β - $YbAl_{1-x}Fe_xB_4$ 、A03-001 石田、佐藤らの準結晶 $Yb_{15}Au_{51}Al_{34}$ 、A01-002 山上らの $YbRh_2Si_2$ 、公募 A01 本多らの YbT_2Zn_{20} (T=Co, Rh, Ir) に関する実験結果の解釈にそれぞれ協力した。

[4] 理論グループ間の連携

計画班 A04 内の共同研究は日常的に数多く行われた。たとえば、A04 堀田は、A04 上田と共同で振動する磁性イオンの近藤効果の研究に取り組み、フォノンを伴う混成と伴わない混成が拮抗するとき 2 チャンネル近藤効果が実現し、弱結合領域の近藤効果は磁気モーメントではなく電気双極子モーメントの近藤効果および 2 チャンネル近藤効果として特徴づけられることを明らかにした。

計画班 A04 と理論系公募班の連携も密接に行われた。上記の振動する磁性イオンの近藤効果に関して、A04 上田は公募 A04 服部と共同研究を行い、振動する磁性イオンを含む 3 サイト問題が物理的描像を明らかにする上で重要であることを示した。公募 A04 大槻は、重い電子系 Ce 化合物における La 置換効果の理論に関して、A04 楠瀬および倉本と共同研究を行った。また、 f^2 電子配置系の理論に関して、A04 倉本と共同研究を行った。公募 A03 渡辺は、A04 三宅との共同研究により、Ce 系および Yb 系重い電子系の 4f 電子間に働く強いクーロン相互作用の効果を取り入れた上で、Ce や Yb の価数ゆらぎの量子臨界現象の枠組みを理論的に構築した。公募 A04 藤本は、A04 川上と共同研究を行い、UCoGe の超伝導臨界磁場に関する異常現象を理論的に明らかにした。また、強相関トポロジカル絶縁体に関する共同研究を行った。

他計画班との連携も行われた。A04 楠瀬は、A01-001 播磨との URu_2Si_2 に関する共同研究を行い、隠れた秩序の有望な秩序変数とその帰結について詳細に議論した。公募 A01 酒井は、4f 電子系に適用可能な動的平均場理論 (DMFT) による簡便な第一原理バンド計算法を構築し、A01-001 播磨と共同で、DMFT 計算の結果をもとに dHvA 実験の信号の計算を効率的に求めることを可能にした。また、近藤温度の低い $CeIn_3$ では、DMFT は局所密度近似 (LDA) 計算と異なったフェルミ面構造を導くことを見出した。

理論系公募班同士の連携として、公募 A03 柳瀬は、公募 A04 藤本と空間反転対称性がない超伝導に関する著書を共同執筆した。また、公募 A04 宇田川と軌道自由度がある強相関電子系の Van-Vleck 磁化率に関する共同研究を行った。

3. 研究領域の設定目的の達成度（3 ページ程度）

研究期間内に何をどこまで明らかにしようとし、どの程度達成できたか、また、応募時に研究領域として設定した研究の対象に照らしての達成度合いについて、具体的に記載してください。必要に応じ、公募研究を含めた研究項目毎の状況も記述してください。

本領域の設定目的は先に述べたとおりである。そのうち、(1) 重い電子形成の直接観測は、A01-001 および A01-002 班、公募 A01 班の目的となる。(2) ラットリングによる新奇物性は、A02-001 および A02-002 班、公募 A02 班の目的となる。(3) 重い電子系の新奇凝縮相の探索と理解は、A03-001 および A03-002 班、公募 A03 班の目的となる。2つの計画班のうち、超伝導に関する研究は主に A03-001 班、多極子秩序に関する研究は主に A03-002 班が担当した。そして、(4) 重い電子系の理論は、A04 班および公募 A04 班の目的となる。各研究項目の目的およびその達成度合いについて、以下に順を追って説明する。

A01-001 班の目的は以下のとおりであった。(1) 希土類、ウラン、超ウランの系統的なフェルミ面の研究を通して、f 電子系の普遍性と多様な描像を明らかにする。(2) 重い電子形成に関わる f 電子の役割を、温度、磁場、圧力をパラメータとして明らかにする(3) 磁気秩序温度を外部から圧力を加えてゼロにすることが実験的に可能であり、例えば反強磁性体は常磁性体になる。この磁気秩序温度がゼロになる量子臨界点でフェルミ面の性質がどう変貌するかを明らかにする。(4) 非フェルミ液体の性質は、磁気秩序寸前、あるいは重い電子系の形成途上での性質と思われるが、このような電子状態で出現する超伝導とその電子状態の性質を明らかにする。(5) 結晶に反転対称性のない化合物のフェルミ面の性質と、そこに出現する新しいタイプの超伝導が本研究班から生まれようとしている。これを明らかにする。これらの目的は、以下のように達成された。

- 1) Yb の価数が 2 価に近い YbCu_2Ge_2 と、高温では 3 価であるが降温とともに近藤効果で 4f 電子が遍歴電子系になる YbCu_2Si_2 のフェルミ面の性質をドハース・ファンアルフェン効果の実験とバンド計算をつき合わせ、両化合物のフェルミ面の形状は似ているが、4f 電子の寄与が著しく異なる事を明らかにした。
- 2) これまでの CeCu_6 を含めた重い電子系と $\text{YbIr}_2\text{Zn}_{20}$ や $\text{YbCo}_2\text{Zn}_{20}$ 等を含めた、重い電子系の磁化が段階的に増大する、いわゆるメタ磁性は $T_m(k0e) = 15T_{\chi_{\max}}(K)$ 、すなわち $\mu_B H_m = k_B T_{\chi_{\max}}$ の単純な関係式で表されることが分かった。 $T_{\chi_{\max}}$ は磁化率が極大値を表す温度で近藤温度に対応する。なお、 $\text{YbCo}_2\text{Zn}_{20}$ のメタ磁性の測定は A03-003 榊原グループとの協力で成し遂げられた。
- 3) YbCu_2Si_2 と $\text{YbIr}_2\text{Zn}_{20}$ の体積の熱膨張の温度依存性は、 CeRu_2Si_2 などでは 20K の近藤温度付近から著しく収縮するのに反し、これらの重い電子系 Yb 化合物では膨張することを実験的に明らかにした。したがって、圧力を加えると、近藤温度 T_K は減少し、量子臨界点 ($T_K \rightarrow 0$) を経て、磁気秩序状態になることも実験的に明らかにした。 $\text{YbCo}_2\text{Zn}_{20}$ や圧力下での $\text{YbIr}_2\text{Zn}_{20}$ では $10\text{J}/(\text{K}^2 \cdot \text{mol})$ のスーパーヘビーフェルミオンであることも明らかにした。更に、立方晶 $\text{YbCo}_2\text{Zn}_{20}$ に $H//\langle 111 \rangle$ を加えると、反強四極子秩序が 6 テスラから出現することも見出した。
- 4) 結晶反転対称性の破れた正方晶 CeIrSi_3 での加圧下超伝導では $H//[001]$ で超伝導上部臨界磁場 $H_{c2}(0)$ が 40T を超える。これは、(1) この電子状態が反強磁性の量子臨界点である(評価者である北岡のグループの NMR による結果)、(2) 比熱のとびがこれまでの化合物の中で最も大きい強結合であるため、 H_{c2} は降温とともにせり上がって増大する、(3) しかし、通常は常磁性効果で H_{c2} は低温でおさえられるが、 $H//[001]$ のときのみ、結晶反転対称性の破れにより全ての伝導電子のスピンの磁場に垂直のため常磁性効果がはたらかず増大し続ける、という実験結果から明らかにされた。理論的には、A04 川上、公募 A04 藤本らによって明らかにされた。
- 5) 正方晶のシャストリー・サザーランド格子を組む $\text{Yb}_2\text{Pt}_2\text{Pb}$ で 7 次の多極子モーメント(磁気 128 極子)に基づく磁場誘起相を見出した。これは、A03-002 榊原グループとの共同研究である。
- 6) 重い電子系アクチノイド化合物の高純度単結晶試料を育成し、これによる物性研究が進展した。特に、 URu_2Si_2 の隠れた秩序及び超伝導に関して隠れた秩序に由来する電気抵抗異常と超伝導の関係を明らかにした他、領域内外の共同研究を通じて隠れた秩序の特性を明らかにした。
- 7) アクチノイド化合物の新物質探索を行い、反強磁性体 URhIn_5 のほか、 $\text{URu}_2\text{Al}_{10}$ や $\text{Np}_3\text{Ga}_{11}$ などの新物質を発見し、報告した。
- 8) ウランカルコゲナイド半導体 $\beta\text{-US}_2$ では、5f 電子系としては非常に珍しい局在的磁性が観測された。ただしその伝導は、著しい磁場・圧力効果を示す上、電気抵抗から見積もられたギャップエネルギーは、磁性・熱物性に現れる結晶場励起エネルギーに一致しており、磁性と伝導の密接な関係を示唆する。
- 9) 圧力は物性制御パラメータとして重要であるが、静水圧からのずれは物性に大きな影響を与える。超

高圧・低温での物性実験のための圧力媒体の特性評価を行い、 N_2 、 He などのガス媒体は 10GPa までの低温実験において十分静水圧を達成できることを示した。

10) 典型的な重い電子系化合物 $CeRu_2Si_2$ の希釈系の研究を行い、世界で初めて、重い電子状態が形成される様子を明らかにした。

A01-002班では、先端的な光電子分光をA01-001、A02-001、A03-002班との連携のもと純良単結晶試料に適用し、f電子系化合物のフェルミ面や電子構造の温度依存性さらには磁性や超伝導転移等によるエネルギーギャップ構造を明らかにすることを目的として研究を行った。具体的には、(1) f電子系化合物の温度依存電子構造・フェルミ面形状変化の軟X線角度分解光電子分光 (ARPES)、(2) f電子系化合物の相転移の極超高分解能レーザー光電子分光、(3) 超高分解能広域運動量空間スキャンARPES装置の建設、(4) 空間反転対称性のない超伝導体や籠状化合物等の光電子分光を主要な研究項目として掲げた。

(1)に関しては、重い電子系化合物の局在・遍歴電子状態の直接観測を行うために、Ce系、U系に加えてYb系化合物純良単結晶試料に対する軟X線ARPES、軟X線および硬X線光電子分光等により、f電子由来のバンドおよびフェルミ面を直接観測により明らかにした。これにより、個々の物質については遍歴・局在性について信頼性のある実験結果を提供した。一方、全体的には重い電子の形成過程の微視的モデルの検証を進めることができ、従来のモデルでは説明のつかない観測結果も得られるなど更なる進展が得られた。

(2)に関しては、f電子化合物が示す磁気相転移および隠れた秩序転移などの相転移と超伝導との相関を明らかにするために、これらの相転移に伴う電子構造変化を極超高分解能レーザーPESにより研究した。これには、(3)で新しく立ち上げた装置も併用し研究を行った。 URu_2Si_2 においては隠れた秩序相に伴う電子構造変化を同定し、その起源・機構に対して新たな知見を与えるなどの進展が得られた。重い電子系超伝導体の超伝導ギャップ測定に関しては、エネルギー分解能および冷却性能を格段に高めることにより、 UPd_2Al_3 などのU系化合物の超伝導ギャップ観測に成功した。重い電子系物質の超伝導ギャップ測定の実験技術確立した意義は極めて高く、今後超伝導とより高い温度で観測される相転移との関連についての研究が進むと期待される。(4)に関しては、領域内で発見された1-2-10系や1-2-20系などの新物質を中心に、領域内の連携により物性の起源・機構を理解する上で役割を果たした。

以上のように、各研究項目に関して目的を達成したと考えている。

A02-001 班の「ラットリング物質の探索・創製と電子・格子物性の研究」の目的はほぼ 100%達成された。その結果、従来は疎遠であった「強相関電子系」と「フォノン系」の両分野に跨る新しい研究分野を切り拓くことができた。

(1) カゴ状化合物の創製と比熱増強及び熱伝導抑制機構の研究 (高島)

新奇な Ce カゴ状物質を Ce-Pt-Sn 及び Ce-Pt-Al 系で見出すとともに、A02-002 班など他の計画班と共同で I 型クラスレート $Ba_8Ga_{16}Sn_{30}$ における非中心ラットリングによる熱伝導率の抑制機構を解明した。近藤半導体 CeT_2Al_{10} (T= Ru, Os) の相転移は反強磁性転移である事を見出し、高い転移温度の原因として b 軸方向での CDW 不安定性を提案した。

(2) 希土類充填スクッテルダイトの創製と重い電子状態の研究 (菅原、関根)

菅原は Pr, Eu, Sm が充填されたスクッテルダイト化合物、および関連する Ce カゴ状物質の純良単結晶を育成した。関根はこれまでフラックス法では合成できなかった As 系充填スクッテルダイト化合物を高圧合成することによって、P 系と Sb 系の隙間を埋めることができた。それらのラットリングと熱電特性及び磁性との関係について、他の計画班および公募班のメンバーと共同で明らかにした。

(3) 希土類充填プニクタイトの創製と重い電子状態の研究 (武田)

希土類原子がカゴに内包されている $R_2Ni_{12}P_7$ や、逆に希土類原子がカゴを形成する $Ce_6Ni_6P_{17}$ などをフラックス法によって単結晶化し、それらの特異な物性を見出した。

(4) 新規ホウ化物の創製と超伝導体、重い電子系半導体の探索 (伊賀)

軽希土類を内包するホウ化物 RB_{12} については、R=Gd の合成だけが報告されていた。そこで、R=Nd, Sm, Gd 系の超高压合成を試み、得られた微小試料を用いて物性を測定した。近藤半導体 YbB_{12} については、超強磁場と超高压下でギャップの消失過程を調べ、中性子非弾性散乱によってフォノンと磁気励起の相関を見出した。

(5) パイロクロア酸化物の創製と特異な超伝導の研究 (廣井：平成 20 年度のみ連携研究者)

β パイロクロア酸化物 AOs_2O_6 (A=Cs, Rb, K) の超伝導特性と非調和振動の比較から、低エネルギーラットリングが超伝導電子対形成の引力に寄与していることを突き止めた。

A02-002 班の目的は、調和近似を超えて大きく揺らぐ電場を発生する非調和ポテンシャル中の巨大振幅原子振動「ラットリング」によって出現する新しい電子相とラットリングが電子物性へ及ぼす効果について、複数の測定手段による横断的なスペクトロスコーピー実験の連携から統一的理解を与える。ラットリングは THz の振動から MHz の緩和現象までのエネルギー階層構造をもつ電子-格子相互作用の新しい側面をもたらす。特に(1)ラットリングのエネルギー階層構造、(2)重い電子状態形成への効果、(3)超伝導対形成機構との関連、(4)金属-絶縁体転移などの新奇現象を解明する。加えて、室温以上の非調和フォノンの散乱による熱伝導率低下の機構を明らかにし、熱電素子など機能性物質の設計指針を得る。

カゴ状物質におけるゲスト原子のラットリング振動と高温の熱伝導率抑制や低温での増強された電子・格子相互作用に関して、ラットリングと熱伝導率抑制はクラスレート化合物を中心に、ラットリングと電子・格子相互作用は、クラスレートおよび充填スクッテルダイトについて重点的におこなった。(1)については、クラスレートを中心に NMR、超音波、ラマン散乱、中性子非弾性散乱実験から、非中心ラットリングの特徴を捉えることができた。NMR や超音波実験では増強された電子・格子相互作用を明らかにした。また、ラマン散乱や中性子非弾性散乱実験では、ラットリングとカゴのフォノンの相互作用を明らかにした。(2)重い電子の形成については、充填スクッテルダイトにおいて、放射光 X 線実験から、ゲスト・モードが最も低い素励起の場合に電子比熱係数の増大を見出した。このことは、結晶場励起とゲスト・モード励起のエネルギー大小関係が重い電子状態への寄与を決定している。一方、結晶場励起がゲスト・モード励起より小さい $\text{PrOs}_4\text{Sb}_{12}$ では、重い電子形成の起源は結晶場励起が関与していることを明らかにした。(3)超伝導対形成については、 $\text{PrOs}_4\text{Sb}_{12}$ ではとくに多極子揺らぎが関与している可能性を指摘した。(4)充填スクッテルダイト $\text{SmRu}_4\text{P}_{12}$ の金属絶縁体転移は、その転移後の秩序が八極子 T^a かもしくは双極子と八極子 T^b との混合状態であることを明らかにし、転移後の秩序状態を明らかにした。(5)非調和フォノンの散乱による熱伝導率低下には、カゴの格子振動が関与していることを明らかにした。以上のように、重い電子的振舞いと電子・格子相互作用の相関を明らかにする当班の目的はほぼ 100%達成され、スペクトロスコーピーにより「強相関電子系」における「巨大振幅局在原子振動」がもたらす電子・格子相互作用について、新しい視点からの研究分野を開拓した。

A03-001 新奇超伝導班では、以下のように目標を設定し、それを達成した。

- 1) 石田、佐藤らは、2007年に発見された強磁性超伝導体 UCoGe に対し、①強磁性と超伝導の相関、②超伝導対状態の同定、③発現機構の解明、④強磁性超伝導体特有の現象の発見を目指し研究を行っていた。新学術領域の研究期間で、(a)コバルト核の核四重極共鳴実験より強磁性と超伝導の微視的共存を示した。(b)異方的強磁性ゆらぎと超伝導の相関。(c)強磁性磁気モーメントによる「自己誘導渦糸状態」の可能性を指摘した、などの成果を挙げ、当初の目的をほぼ達成した。
- 2) 松田らは、二次元重い電子系の創成及び閉じ込めを目指し、重い電子系の研究に分子線エピタキシャルの手法を持ち込んだ。その結果、(a)三次元重い電子物質 CeIn_3 と通常金属の LaIn_3 を人工超格子の技術により組み合わせ「重い電子の二次元閉じ込め」に成功した。また (b)重い電子系超伝導体 CeCoIn_5 と通常金属 YbCoIn_5 より超格子を作成し「Ce 原子の 2 次元正方格子(二次元近藤格子)における超伝導の実現」に成功した。
- 3) 井澤らは、重い電子系超伝導体 UPt_3 の超伝導対関数の同定を目標にしていた。A01-001 班からの良質な単結晶の提供を受け、本新学術の初年度の予算で希釈冷凍機を購入し実験環境を整えた。低温の詳細な角度分解熱伝導の測定から超伝導ギャップのノード(節)の位置を同定した。さらにナイトシフトによるスピン磁化率の結果も考慮し、超伝導対関数を決定した。

A03-002 班では、(i)多極子転移物質の探索とその秩序構造の解明、(ii)多極子秩序系の量子相転移と新奇超伝導の探索、(iii)多極子自由度による近藤効果の検証を目標に掲げ、研究を行った。研究手段として最も重点を置いたのが、多極子自由度のみを持つ Γ_3 非磁性二重項基底状態を有する純良な立方晶 Pr 金属間化合物の探索であった。その結果、中辻らによって $\text{PrT}_2\text{Al}_{20}$ 系単結晶試料が、また公募研究鬼丸班によって $\text{PrT}_2\text{Zn}_{20}$ 系の単結晶試料が作製された。後者の $\text{PrT}_2\text{Zn}_{20}$ 系については当計画班と共同研究を行い、極低温磁化比熱測定を行っている。これらの化合物に対する詳細な測定の結果、これらは共通して Γ_3 基底状態を持つこと、四極子近藤効果を示唆する異常な金属状態を示すこと、四極子秩序と共存する超伝導転移を示すこと、などが明らかとなった。このうち最も注目すべき成果は、 $\text{PrT}_2\text{Al}_{20}$ において超高压下で四極子転移温度が低下するとともに有効質量の非常に大きい超伝導状態が出現することが見出されたことである。これは四極子秩序の量子臨界点の存在、およびその近傍における新奇超伝導の実現を非常に強く示唆する結果である。以上より設定目的(i)-(iii)が概ね達成できたと考えている。上記以外にも、 $\text{PrRu}_4\text{P}_{12}$

における f 電子・核スピン複合多重項の形成 (青木)、 $\text{Yb}_2\text{Pt}_2\text{Pb}$ における隠れた高次多極子秩序の発見 (榊原)、鉄ヒ素系超伝導体における軌道揺らぎの量子臨界性の発見 (吉澤)、超ウラン化合物 AmO_2 における低温相転移の微視的検証 (徳永) など、当班の研究活動によって多極子の物理の今後の発展に繋がる数多くの新しい知見が得られた。これらの結果から、当班の研究目的は期待どおりに達成できたと考えている。

A04 理論班の研究目的は、本新学術領域研究の実験グループの実験結果の解釈はもちろん、場の量子論的手法や数値計算手法を駆使して、超伝導および磁性に関する新概念の確立を目指すことであった。当班の研究目的は達成されたと考えられる。研究項目ごとの達成の内容は以下のとおりである。

[1] **重い電子の形成機構**：上田や堀田を中心に、公募 A04 の服部も共同で、カゴ状物質においてラットリングと呼ばれる内包イオンの非調和振動が関与する近藤効果の研究を推進した。振動の自由度を考えることにより、自動的に 2 つ以上の部分波が関与することになり、局在スピンを遮蔽する伝導電子のチャンネルは複数となる。これによって、フォノンを伴う混成と伴わない混成が拮抗するとき 2 チャンネル近藤効果が実現することを示した。三宅らは、新しい電荷近藤効果の理論を展開した。具体的には、主量子数の大きい電子配置をとるイオンでは電子間クーロン相互作用によるペアホッピング項が局所クーロン斥力に比べて無視できず、その項の多体効果によって電荷近藤効果が生じることを数値繰り込み群の方法で示した。また、電荷近藤効果とスピン近藤効果を示す領域の境界で新しいタイプの非フェルミ液体状態が存在することがわかった。

[2] **複雑な系の秩序**：整数スピンの 1 次元量子反強磁性体や 1 次元近藤格子系などにおいて、ハルデン相と呼ばれるギャップを持つ相が存在することが知られているが、押川らは、そのハルデン相を保護する対称性を明らかにした。これらの対称性によるハルデン相の保護は、物理的にはそれぞれ別の機構によって解釈できるが、それら全てのケースがエンタングルメントスペクトルの二重縮退によって特徴づけられることも示した。複雑な相を特徴付けるトポロジカル量の概念の確立に貢献することができた。

[3] **重い電子系のエキゾチック磁性**：多極子秩序の理解が進んだことが大きい。楠瀬と倉本は、マックスウェル方程式を満たす物理的な電気・磁気多極子と通常用いられる等価演算子との関係を明らかにし、等価演算子法を一般の多極子に拡張することに成功した。堀田も、それとは独立に、多極子秩序を微視的観点から取り扱う方法を構築した。楠瀬は、A01-001 班の播磨氏と共同で、隠れた秩序の代表物質 URu_2Si_2 の有力な秩序変数とその帰結としての物性、および、秩序下での超伝導対称性について詳細に考察し、実験結果の合理的説明を与えた。倉本らは、偶数電子の結晶場状態を持つ一般化近藤格子の新しい秩序状態に関して、連続時間量子モンテカルロ (CT-QMC) 法と動的平均場理論 (DMFT) を組み合わせて、 $\text{PrFe}_4\text{P}_{12}$ のスカラー秩序の微視的理解を達成した。三宅は、公募 A04 渡辺と共同で、新しい量子臨界性の研究を進めた。局在 f 電子と伝導電子のクーロン相互作用 U_f を含む拡張周期アンダーソンモデルは f 電子の価数転移の臨界点の存在を内包するが、臨界温度がゼロの近傍で新しいクラスの量子臨界性を示すことを、スレーブボソンの平均場により局所相関を取り込んだ上で価数揺らぎに関するモード結合理論に基づいて示した。これは、 $\beta\text{-YbAlB}_4$ や YbRh_2Si_2 など観測されていた反強磁性量子臨界点の振る舞いとは異なる量子臨界性を統一的に説明できる理論であり、当該分野のブレークスルーと云える。

[4] **重い電子系の超伝導**：川上らは、公募 A04 藤本と共同研究で、空間反転対称性の欠如した超伝導体 CeRhSi_3 や CeIrSi_3 の上部臨界磁場の異常なふるまいの起源を、反強磁性量子臨界点近傍での量子ゆらぎに基づき明らかにした。三宅は、公募 A04 渡辺と共同で、 CeRhIn_5 に加圧したときに $P=2.35\text{GPa}$ 近傍で生じる dHvA 振動の周期の変化 (フェルミ面の変化) を、Ce の価数の急激なクロスオーバーに伴い反強磁性が消失することで起こることを説明した。具体的には、f-c クーロン相互作用 U_{fc} を含む拡張周期アンダーソンモデルにスレーブボソン近似を適用し、反強磁性磁化に関する平均場近似の範囲で示した。紺谷らは、電子格子相互作用により四重極相互作用が生じることを見出し、軌道揺らぎの発現を議論した。

[5] **重い電子系の量子輸送現象**：三宅は、公募 A04 服部と共同で、2 不純物アンダーソンモデルの Kondo-Yosida 一重項と RKKY 一重項との競合により生じる量子臨界点の近傍において、磁化率や比熱係数のみならず、f 電子の価数感受率が発散的に増大することを数値繰り込み群の方法を用いて示した。

[6] **量子多体系の新しい計算手法**：柴田らは、長距離相互作用のある電子系の数値計算の精度を向上させるために、エネルギースケールを空間的に変化させ、フェルミ面近傍の電子状態を稠密にするとともに、端の状態をバルクの部分とエネルギー的に分離する新しい計算方法を考案した。楠瀬と倉本は、公募研究の大槻純也氏と共同で、CT-QMC 法を拡張発展させ、DMFT と組み合わせて、近藤格子模型 (置換希釈系を含む) の相図を完成させた。特に $1/4$ フィリングに現れる電荷秩序相の存在を明らかにした。また、温度依存性を詳細に検討し、準粒子形成による小さなフェルミ面から大きなフェルミ面への発達を明瞭に示すことに成功した。

4. 研究領域の研究推進時の問題点と当時の対応状況（1 ページ程度）

研究推進時に問題が生じた場合には、その問題点とそれを解決するために講じた対応策等について具体的に記述してください。また、組織変更を行った場合は、変更による効果についても記述してください。

研究推進時に問題が生じた場合とその解決

A01-001

平成 24 年 3 月に分担者の大貫惇睦が大阪大学を定年で退職することになり、研究の継続が困難になる可能性があった。そこで、従来から公募 A03 阿曾班の連携研究者として新学術領域の研究にも参画していた辺土正人（琉球大学大学院理工学研究科准教授）を本計画研究の連携研究者とし、大貫は客員教授として琉球大学に異動して辺土と共同して研究を遂行することとなった。

大貫が従来から使用していた超伝導磁石の経年劣化が著しく、計画研究の遂行が難しくなっていたが、追加配分により琉球大学に 15T 超伝導磁石が導入されたことにより、琉球大学において強力に研究を推進する体制を整えることができた。

A02-002

2011 年 3 月 11 日の東日本大震災後、分担者である岩佐の所属する東北大学が被害を受け、建物の耐震工事などのため数ヶ月間研究を行うことができなかった。また、岩佐、李が利用・管理している原子力研究開発機構の原子炉も停止し、国内での中性子実験ができなくなった。このため、国外との共同研究により計画を遂行するとともに、フォノンに関しては相補的手法である放射光施設（SPring-8）を利用し、対応した。これらにより、研究の遂行に大きな遅れは生じなかった。

組織変更について

A01-001

本新学術研究領域の立ち上げの前後より、反転対称性の無い超伝導体の発見が続き、「反転対称性の無い超伝導体化合物およびそのフェルミ面」の研究の重要性がより明らかになってきた。この分野での研究をさらに強化する目的で、従来から分担者の青木晴善と研究協力関係のあった木村憲彰（東北大学大学院理学研究科助教）を連携研究者として平成 21 年の秋から、計画研究に常時参画して貰うこととした。

上記のように、平成 24 年度から辺土正人（琉球大学大学院理工学研究科准教授）を本計画研究の連携研究者とし、大阪大学を定年退職した大貫は客員教授として琉球大学に異動し、辺土と共同して研究を遂行することとなった。

平成 24 年度は、研究分担者の青木晴善が一身上の都合により分担者を辞退したが、連携研究者として継続して研究は遂行した。

A02-001

平成 20 年度に連携研究者であった伊賀文俊が平成 21 年度から分担者となった。これによってラットリングホウ化物の探索と単結晶育成が促進され、A02-002 班などとの共同研究が進んだ。

A04

平成 20 年度に連携研究者であった紺谷浩、倉本義夫、川上則雄が、平成 21 年度から分担者となった。これによって、多軌道系の磁性と超伝導の研究をより強力に推進することができた。

平成 20、21 年度に連携研究者であった上田和夫が平成 22 年度から分担者となった。これによって、振動する磁性イオンの近藤効果の研究をより強力に推進することができた。

5. 研究計画に参画した若手研究者の成長の状況（1ページ程度）

研究領域内での若手研究者育成の取組及び参画した若手研究者の研究終了後の動向等を記述してください。

本新学術領域研究では、若手の育成に力を注いできた。若手研究者育成のために、主に大学院生、助教層を対象にした「重い電子系若手の学校」を平成21年11月に京都で、平成23年9月に高野山でそれぞれ開催した。講師も助教やポスドク、若手の准教授に依頼し、講義の準備と経験を通して成長を促した。2回とも、大変力のこもった講演がなされ、また、各講師が執筆したテキストもすばらしいものであった。実際、学校の終了後に、各方面の研究者からゼミで使いたいなど、入手の希望が多数あり、増刷して配布したほどである。若手が一線の研究者として自己を確立していくための一歩になったと考えられる。

広報活動の一環として、年に2回、ニュースレターを発行したが、そこでも若手研究者に積極的に記事を書いてもらうようにした。研究会で優れたポスター発表をした大学院生に特別に研究紹介を依頼するなど、若手研究者の奨励につとめた。

最終年度の全体研究会においては、評価者の発案と厚意により、重い電子系研究奨励賞が創設され、その授賞式を行った。大学院生を含む6名の新進気鋭の若手研究者が受賞した。これにより、この研究分野の若手研究者を大いに励ますことができたと考えられる。

本新学術領域研究で雇用したポスドクは9名であった。うち、4名が助教や准教授などの大学の常勤職を得た。3名は、期限付きのポストを得て研究を続けている。2名は民間会社に就職をした。

計画班および公募班の代表者、分担者、連携研究者の研究室に所属する大学院生、若手研究者（ポスドク、助教）の研究終了後の動向について、研究所や大学で職を得た場合は以下のとおりである。

- ・大学院生、ポスドク、特任助教が常勤の助教や講師（あるいはそれと同程度の職位）を得たケースは、全部で23件（うち3件は新学術ポスドク）であった。

- ・助教、ポスドク、特任助教、講師が常勤の准教授や教授（あるいはそれと同程度の職位）を得たケースは、全部で19件（うち1件は新学術ポスドク）であった。

以上のように、本新学術領域研究は、若手研究者の育成という役割を十分に果たしたと考えられる。

6. 研究経費の使用状況（設備の有効活用、研究費の効果的使用を含む）（1 ページ程度）

領域研究を行う上で設備等（研究領域内で共有する設備・装置の購入・開発・運用・実験資料・資材の提供など）の活用状況や研究費の効果的使用について総括班研究課題の活動状況と併せて記述してください。

設備等の活用状況および研究費の効果的使用

A01-001

平成 24 年 3 月に分担者の大貫惇睦が大阪大学を定年で退職したが、従来から公募班の連携研究者として本新学術領域研究に参画していた琉球大学・辺土正人准教授を本計画研究の連携研究者とし、大貫は客員教授として琉球大学に異動して辺土と共同して研究を遂行することとなった。大貫が従来から使用していた超伝導磁石の経年劣化が著しく、計画研究の遂行が難しくなっていたが、追加配分により琉球大学に 15T 超伝導磁石を導入することができ、琉球大学において強力に研究を推進する体制を整えた。

A01-002

分担者である関山により、SPring-8 の共用ビームラインに設置された試料冷却用冷凍機の試料最低温度を 20K から 6K まで更新し、関山グループの f 電子系化合物研究を大きく進展させただけでなく、このビームラインを使って軟 X 線光電子分光研究を行う全世界の研究者の研究に貢献した。

A02-001

分担者である武田は、平成 21 年度にヘリウム 3 冷凍機インサートシステムを導入したが、これを、新潟大学の学内予算で購入したデュワーと 12T 超伝導磁石と組み合わせることで、磁場中低温での電気抵抗や比熱などの測定が可能になった。その結果、 $\text{Yb}_2\text{Ni}_{12}\text{P}_7$ の重い電子状態、幾何学的フラストレート系 $\text{Ce}_6\text{Ni}_6\text{P}_{17}$ 、カゴ状物質 $\text{Lu}_5\text{Ir}_6\text{Sn}_{18}$ や $\text{R}_5\text{Co}_6\text{Sn}_{18}$ ($\text{R}=\text{Y}, \text{Lu}$) の超伝導、新物質 $\text{RT}_2\text{Zn}_{20}$ ($\text{R}=\text{Sm}, \text{Tm}$; $\text{T}=\text{Ru}, \text{Rh}$) などの発見につながった。分担者である菅原は、平成 22 年度に 9T 無冷媒超伝導マグネットシステムを導入したが、低温での磁気抵抗の実験に活用されて、A02-002 班との共同研究で、 CeFePO のメタ磁性を観測することに成功した。

A02-002

代表者の藤は、平成 20 年度に神戸大に核磁気共鳴装置を導入し、 $\text{Ba}_8\text{Ga}_{16}\text{Sn}_{30}$ の電子格子相互作用および $\text{LaT}_2\text{Zn}_{20}$ のラットリング転移を明らかにし、 $\text{PrO}_5\text{Sb}_{12}$ の重い電子状態が結晶場励起と関係していることを指摘した。分担者の岩佐は、平成 22 年度、中性子散乱用極低温冷凍機を日本原子力研究開発機構研究炉に導入し、中性子散乱実験における共同利用実験にも供せるようになった。分担者の筒井は、平成 22 年度 EXAFS 用冷凍機を SPring-8 に導入し、A03-002 班の青木らとともに、ラットリング起源の Sm 価数揺動現象が La 希釈系の $\text{SmO}_5\text{Sb}_{12}$ でも発現することを発見した。分担者の宇田川は、平成 20 年度にレーザー CCD 検出器、平成 21 年度にレーザー用冷却水循環器を導入し、測定速度の迅速化を図るとともに、クラスレートにおける熱伝導率抑制の起源を明らかにした

A03-001

大型備品として、計画初年度に、分担者の井澤および古川が ^3He - ^4He 希釈冷凍機を導入した。井澤氏は、新学術領域研究の始まる 1 年半前に東工大に着任し、実験室を立ち上げたばかりであったので極低温実験が出来る環境は整っていなかったため、今回導入した希釈冷凍機によって実験環境も整い、低温実験が本格的に出来るようになった。古川は、日本原子力研究開発機構研究炉原子炉に日本で重い電子超伝導体の磁束格子の研究が行えるように希釈冷凍機を設置した。また、この装置を多くのユーザーが使えるようにし、関連研究者にも大きく貢献した。

A03-002

分担者の青木は、Cryogenic 社製の 9T 無冷媒式超伝導マグネットを平成 22 年度に導入した。本装置を現有のクライオスタットと組み合わせることにより、低温における磁気抵抗やホール効果の測定に大いに活用している。分担者の徳永は、NMR 実験用希釈冷凍機を平成 21 年度に導入した。その結果、200mK で超伝導が発見された $\text{PrTi}_2\text{Al}_{20}$ において、50mK までの極低温 NQR 実験を速やかに行うことができた。代表者の榊原は、平成 22 年度に希釈冷凍機インサートを導入した。これにより、極低温高磁場比熱測定が可能となった。

理論班では大型装置の導入は必要なかったが、ポストクの人件費が大きな割合を占めたので、その雇用方法には工夫を凝らした。すなわち、総括班が管理する公募制で採用を行った。A04 班補助事業者が出した複数の公募研究テーマに応募して頂き、書類選考と面接によって候補者を決定し、そのテーマの補助事業者の研究機関に配属させる。雇用費は、交付申請の段階で、あるいは年度途中に雇用する補助事業者の研究機関に分配する。この制度により、優秀な人材を効率よく採用し、ポストク雇用費を有効に活用することができる。また、若手研究者に対し、厳格な審査をへて採用することで、キャリアパス形成の一助となることが期待された。実際、理論班で雇用した5名の新学術ポストクのうち、2名は常勤の助教（あるいはそれと同等の職）になり、1名はポストクを継続することとなった。2名は、新学術領域研究でのポストクの経験を活かして、民間会社に職を得た。

総括班研究課題の活動状況と研究費の効果的使用

総括班研究費の有効的な活用として、効果的な広報活動と若手育成があげられる。

[1] 効果的な広報活動

(1) ニュースレターの発行

本新学術領域研究の研究分野の最近の発展をメンバーや領域外の研究者に広く周知するために、ニュースレターを発行した。ニュースレターの発行にあたっては、本領域では、下のような構成のニュースレター編集委員会を設置し、年2回、50ページ前後のニュースレターを発行し（初年度のみ1回の発行、通算9巻）、国内に広く配布した。領域内の研究成果の紹介はもちろんのこと、シニアの方から若手の方まで領域外の研究者にも幅広く執筆して頂き、重い電子の研究の「面白さ」が伝わるような内容になるよう努力をした。

委員長：井澤公一（A03-001 分担）

委員：芳賀芳範（A01-001 分担）、関山明（A01-002 分担）、関根ちひろ（A02-001 分担）、岩佐和晃（A02-002 分担）、青木勇二（A03-002 分担）、楠瀬博明（A04 分担）

アドバイザー：播磨尚朝（A01-001 代表）、事務担当：堀田貴嗣（A04 代表）

(2) ホームページの整備

web を用いて領域内外に広く研究成果を発信した。URL は <http://www.heavy-electrons.jp/> である。研究成果の発表をこまめに行うように心がけた。特に、論文リストは事務担当が常時更新し、本領域の研究成果が広く国民の目に触れるように最大限つとめた。

(3) JPSJ オープンセレクトの活用

本新学術領域研究が発足した2008年1月に、日本物理学会の欧文誌 Journal of the Physical Society of Japan でオープンアクセスの制度が始まった。これは JPSJ オープンセレクトと呼ばれ、著者負担で論文をオープンアクセスにするものである。本領域研究の成果を広く世界に発信するために、重要な成果を選定し、オープンアクセスの費用を総括班として手当てした。

(4) 国際会議議事録の発行

2010年9月に首都大学東京南大沢キャンパスで開催された重い電子系国際会議 ICHE2010 の会議録を、Journal of The Physical Society of Japan Supplement から2011年7月に発行した。143編の論文を収録した。JPSJ Supplement はオープンアクセスであり、次の URL から全論文が自由にダウンロードできる。
<http://jpsj.ipap.jp/journal/JPSJS-80SA.html>

(5) 固体物理特集号の発行

本新学術領域研究の最終年である2012年の11月に、固体物理特集号「重い電子系の最近の発展」を出版した。本領域の主な研究成果を網羅するようにし、それらを広く国民に知らせるようにした。英文の論文は成果としてももちろん重要であるが、邦文でのまとまった内容の成果報告も意義があると考えられる。

[2] 若手の育成

当分野に関連する若手研究者育成の一助として、主に大学院生、助教層を対象にした「重い電子系若手の学校」を平成21年11月に京都で、平成23年9月に高野山でそれぞれ開催した。重い電子系の研究分野は、研究に必要な概念が多岐にわたるため、博士課程後期の学生も広範囲にわたる専門的な知識を必要としており、合宿形式の勉強会などを通じた効果的な学習の機会が不可欠と判断し、当分野に関連する若手研究者育成の一助として、大学院生や助教層を対象にした「学校」が有効であると考えた。

2回とも、100名を超える参加者があった。また、若手の講師による講演は大変力のこもったもので、テキストについては各方面の研究者から入手の希望があり、増刷して配布したほどである。若手が一線の研究者として自己を確立していくための一歩になったと考えられる。

7. 総括班評価者による評価（2 ページ程度）

総括班評価者による評価体制や研究領域に対する評価コメントを記述してください。

本領域研究は、重い電子系の分野で先導的な成果をあげつつある研究者を中心に、この学術領域で我が国の研究者が研究のピークを形成し、世界の研究をリードしていく体制を構築することを目的としていた。総括班の第一の役割は、こうした観点から構成されている計画研究班の有機的連携を図ることにあった。当該学術領域における我が国の研究者の広がり厚く大きく、こうしたすそ野から新たなピークを育てることが総括班の第二の役割であった。公募研究については、平成 21、22 年度分と平成 23、24 年度分の 2 期に分けて公募をしたが、計画研究についても平成 22 年度末に評価を行い、平成 23、24 年度については一部計画の見直しを行った。以上の役割の達成のために、総括班には計画研究班の代表者に加え、当該分野の経験豊かな 5 名の研究者（Joe Thompson、秋光純、斯波弘行、北岡良雄、佐藤英行）に評価者として参加して頂き、随時助言を頂いた。5 名の評価者のコメントを以下に記す。

Evaluation comments J. D. Thompson

By any measure, the project ‘Emergence of Heavy Electrons and Their Ordering’ has been exceptionally successful, not only in achieving its scientific goals but more broadly by providing excellent training of young scientists and opening exciting new frontiers of research to the international materials physics community. The discovery of new heavy-electron materials and orderings, resolving new and long-standing problems, and the development of new theory and new experimental techniques are among the many achievements that have been reported in well over 1000 publications. Accomplishments of this project have had a major impact in shaping the course of scientific research internationally and ensure that the study of heavy electrons and their ordering will remain a vibrant area of discovery science for years to come. It is impractical to summarize adequately even a small subset of the most important accomplishments, but just a few of many possible highlights include:

- the discovery of heavy-electron superconductivity that coexists with quadrupole order and evidence that (antiferro)quadrupole fluctuations play a crucial role in forming Cooper pairs;
- the theoretical discovery that a vibrating magnetic ion in a cage-like crystal structure leads to a robust heavy-electron state;
- the discovery of the first example of an Yb-based heavy-electron superconductor whose superconductivity emerges from a quantum-critical state with strong mixed valence;
- a breakthrough in the first successful layer-by-layer synthesis of artificial superlattices of heavy-electron materials by molecular beam epitaxy and the discovery of new physics enabled by it;
- uncovering the rich physics of states and orders in a new family of RM_2Z_{20} cage-structure compounds, where R=rare earth or Ga, M=d-electron element and Z=Al or Zn;
- the key insight from band-structure calculations and microscopic theory as well as photoemission and dHvA measurements that the multi-orbital character of iron-pnictide superconductors is essential for a description of their physics; and,
- the creation of new conceptual frameworks for understanding heavy-electron materials and their orderings, including electron-rattling states, the nature of the ‘hidden order’ state in URu_2Si_2 , and the consequences of a lack of structural inversion symmetry on superconductivity.

Qua Vadis Heavy Fermion ? 秋光 純

我々がある分野を研究する時、残された大きな問題は何かということについていつも考えてみる必要がある。まさに「Qua Vadis Heavy Fermion ? (重い電子系はどこへいくのか?)」ということであろうか。

それでは「重い電子系の物理の最近の発展」とは何であろうか。それについては最近「重い電子系の物理の発展」と題する企画が石田憲二氏と堀田貴嗣氏によって雑誌「固体物理」に提案され、出版された。これは取りも直さず上田新学術領域のある意味での集大成といっても良かろう。その keyword をあげると

- 1) Doniach の相図と量子臨界性
 - 2) 新物質（人工格子を含む）の開発とそれに伴う新現象、特に新奇超伝導
 - 3) 多極子秩序、特に URu_2Si_2 の「hidden order」の起源
- 等があげられる。

1) については最近 JPSJ に 2 つの論文が発表され、いずれも Editors’ Choice に選ばれている。1 つは東北大学の青木晴善氏を中心としたグループの研究で JPSJ 81 (2012) No. 5 に掲載されている。他は分

子研の木村真一氏を中心としたグループの研究で JPSJ 81 (2012) No. 4 に掲載されている。これらはいずれも Doniach 相図の、より定量化を目指した研究である。前者は LaRu_2Si_2 の La を 2% Ce に置き換えた合金において、近藤温度よりも十分高い温度領域で局在していた f 電子が温度の降下と共に近藤シングレットを作ることによって次第に遍歴的となり、十分低い温度では遍歴する重い電子となっていることをド・ハース・ファン・アルフェン効果を用いて実験的に明らかにしたことである。これは Doniach の相図に定量的な基礎を与えた点で注目に値する。又後者は、Doniach の相図で量子臨界点を越えて、重い電子を形成する c-f 混成が、反強磁性相でも残っているかどうかは理論的な論争の一つであったが、 CeIn_3 を高圧化で調べた結果 c-f 混成が磁性を持った状態で既に重い電子が存在することを見出した。これらは量子臨界点で何が起きているかを実験的に示した面白い仕事であるが、将来より一歩進んでこの近傍でなぜ超伝導などの面白いことが起きるかという点まで実験的に踏み込んでもらいたいものである。

2) については上田新学術領域だけのテーマではないが、カゴ状物質に閉じ込められた原子のインシュタインモード (いわゆるラットリング)、多極子秩序の果たす役割、最近京大の松田グループによって始められた人工 2 次元近藤格子における量子臨界制御、Yb 系の量子臨界現象、などの新しい物理が新物質作成により開かれつつある。超伝導に関しても空間反転対称性の破れに伴う超伝導の対称性の問題、FFLO 相や磁性と超伝導の本当の意味での共存状態の明確化など今後の発展が期待される。特に相容れないと思われていた強磁性と超伝導の共存は筆者にとっても大きな驚きであった。

3) については、最近本グループを中心として大きな進展 (特に理論的に) をみた URu_2Si_2 の hidden order についての最近の発展である。これは 20 年以上も解けない大きな“謎”である。これに対して最近、矢継ぎばやに多極子を基礎にした新しいモデル、Harima model、Thalmeir-Takimoto model、Kusunose-Harima model など、上田新学術領域メンバーを中心として多くのモデルが提案され、つい最近では京大の池田氏を中心として 32 極子 model が提案された。これらは数多くの実験事実と理論グループの格闘の結果であり、単に多極子の数を増やしていったというものではない。これらの model がなんとか日本で検証されることを祈ってやまない。これら多くの成果は、日本特に上田新学術のメンバーが中心となって達成された成果であり、それだけでも本領域は初期の目的を十分達したといっても過言ではない。勿論本領域が終了しても研究は続いていくであろうが、この熱気をなんとか次の若手にバトンタッチしてしてもらいたいものである。

評価コメント 斯波弘行

この新学術の下で大きい進展を期待して関心を持ってきた課題がいくつかある。(1)1 つは、4f 電子を 2 つ以上持つ希土類元素を含む化合物の研究である。とりわけ、重い電子系超伝導が多く研究されてきた Ce イオンの対極にある Yb イオンを含む Yb 化合物の物質探索を通して、重い電子系超伝導の「量子臨界点シナリオ」の普遍性の検証が進むことに関心を持ってきた。この 5 年間に $\beta\text{-YbAlB}_4$ 、 YbRh_2Si_2 、 $\text{YbT}_2\text{Zn}_{20}$ (T:Co, Ir) の 3 つのタイプの Yb 化合物が研究されてきたことは大いに評価している。新学術の期間内の研究結果をみると、これらの物質の中には量子臨界点の実現しているかに見える物質があるが、良質の Yb 化合物の合成は容易でなく、結晶の質の問題もさらに吟味が必要と思われ、最大の課題である「超伝導の発見」は確実にはなされていない。(2) この新学術のスタート前に重い電子系超伝導におけるスピンの揺らぎの重要性はほぼ確立していたが、価数揺らぎについて注目されることが少なかった。価数揺動の役割については三宅和正らの努力によって、一部の物質で謎となっていた振る舞いが価数揺動を考慮すると理解できることが指摘された。この新学術において価数揺らぎについて研究者の関心が高まったことは評価できる。また、(1)に関連して、価数揺らぎのみでなく、価数秩序の問題にも関心が向けられるようになった。一部の研究者が、このような観点から Eu 化合物への研究が始めている。この中から今後新しい発見があることを期待している。(3) URu_2Si_2 の 17K 以下の秩序相の性格 (秩序パラメータ) に長年のなぞであった。本新学術の中で理論的、実験的に活発に研究されたが、17K における比熱の異常は大きいにもかかわらず、それ以外の物性での異常が見いだされていなかった。この新学術で私が最も注目したのは芝内ら (京大) が SPring-8 によって結晶の変化の兆候を検出したことである。新学術としては時間切れになってしまったが、近いうちに結論が出ることを期待している。(4) 新しい系として、松田祐司 (京大) のグループが CeCoIn_5 と YbCoIn_5 のエピタキシャル超格子の作成人工格子を作ること成功した。これは高度な技術で特筆すべき成果である。これによって 3 次元結晶 CeCoIn_5 に YbCoIn_5 を挟んで 2 次元結晶を作れるようになり、重い電子系超伝導のメカニズムの解明につながる新しい系がえられたことになる。

なお、総括班評価者のうち日本人 4 名は、評価活動の一環として、この新学術の中で優れた成果を挙げ、今後の活躍が期待される若手研究者 6 名に対して 2013 年 1 月「重い電子系研究奨励賞」を授与したことを記しておく。

評価コメント 北岡良雄

新学術領域研究「重い電子系の形成と秩序化」では、自由な発想で行う基礎研究を発展させた。内在的動機に基づく「物事の本質を突く基礎的学術研究の推進」のためには、熾烈な国際競争の中、分散的な個人研究には限度があり、社会の要請を踏まえつつ、学際的、国際的に専門知を結集した学際研究や分野間連携・融合を進める研究体制を構築することが必要となっている。この視座から、本新学術領域研究は、以下に述べるように、注目すべき重要な基礎的学術研究を推進し、成果を挙げたと高く評価が出来る。さらに、学生や若手研究者の創造性を育むこと、若手研究者の支援、とくに課題設定の無い自由な発想で主体的、自律的に行う基礎研究を支援したことは高く評価できる。特に最終年度に、顕著な成果を挙げた若手研究者に対して「重い電子系研究奨励賞」を授与することによって顕彰したことは、本新学術領域研究の重要な成果指標の一つとなるものである。

本領域は、研究課題「重い電子系の形成と秩序化」を設定し、重い電子系における多彩で風変わりな超伝導、反強磁性、強磁性、多極子自由度に関わる「隠れた秩序化」は、f 電子の局在性と遍歴性、および多彩な結晶構造に起因する多バンド効果が絡み合っただけで多様であることを明示した。なかでも、①磁気秩序の消失後に発現する磁気揺らぎに起因する強結合超伝導、②磁気秩序とは関係なく発現する価数（電荷）揺らぎによる超伝導、③多極子自由度を媒介とする超伝導、④磁気秩序と共存する超伝導など、多彩な超伝導現象の解明とそれらの発現機構に関して、大いに理解が前進したことは高く評価できる。今後の課題は、発現機構をミクロな観点から同定するために、「的を絞った系統的な実験と理論解析を深化」させることである。さらに、発見以来 25 年経過しても、なお未解明であった URu_2Si_2 に見られる「隠れた秩序 ($T_N=18\text{K}$)」についての研究では、大きな進展があった。f 電子系の複雑なバンド構造を忠実に再現する現実に即した遍歴モデルを構築し、永年の謎であった「隠れた秩序変数は、32 極子という高次の多極子密度波状態」であることを提唱した研究は、今後の本研究領域が、さらに発展する契機となるものである。以上、本新学術領域研究は、凝縮系科学分野における基礎的学術研究を推進し、多彩な研究成果を挙げた。今後、新たな視座からさらに発展を促すことによって、たとえば「強相関電子系の超伝導現象を俯瞰する学理」が生み出されることが大いに期待される。

評価コメント 佐藤英行

物性研究の成否は、興味深い特性を表す新物質の探索と、その本質を探るために必要な試料の純良化に係っている。領域計画書にも物質開発を重視して二つの実験計画班（フェルミオロジー班とラットリング班）が進めることが記載されており、その視点から重要と思われる例を中心に本領域研究の評価を述べる。

カゴ状物質、多極子、超伝導など領域のキーワードに広く関わる系として、希土類イオン (R) が 16 個の X (Al, Zn) がつくるカゴに内包された物質群 $\text{PrTr}_2\text{X}_{20}$ (Tr: 遷移金属) の純良単結晶が育成され、精力的な研究が進められた。非磁性二重項基底状態を持つ $\text{PrTr}_2\text{Zn}_{20}$ において、それまで実現されなかった反強四極子秩序と共存する超伝導が初めて見出された。更に、c-f 混成効果がより強い $\text{PrTr}_2\text{Al}_{20}$ において非フェルミ液体的温度依存など四極子自由度が絡んだ多様な振舞が見出され、機構の解明が行われた。特に、強四極子 (FQ) 秩序と超伝導 (SC) が共存する $\text{PrTi}_2\text{Al}_{20}$ に圧力を加え FQ が抑制された領域で T_{sc} の急激な上昇を見出したことは、FQ 秩序臨界点近傍で誘起された重い電子 SC の初めての例と考えられ、重要な成果といえる。関連して、Yb 系で初めての重い電子超伝導体であり、しかも常圧で量子臨界点近傍にある $\beta\text{-YbAlB}_4$ も、本研究領域の期間のスタート時に育成され、本領域でその興味深い特性が明らかになった新物質として評価される。

新たな試料育成手法として、半導体や金属人工格子育成に用いられてきた分子線エピタキシー法が、初めて $\text{CeIn}_3/\text{LaIn}_3$ 及び $\text{CeCoIn}_5/\text{YbCoIn}_5$ の人工格子作製に成功裏に適用された。前者では、重い電子を二次元に閉じ込めて量子臨界点の次元による制御を行い、後者では CeCoIn_5 層の減少にともなう上部臨界磁場の上昇を観測するなど、3次元系とは質的に異なる、重い電子系研究の新たな展開への道を開いた。実験自体が非常に困難であり、現時点では他には真似のできない手法であり、高く評価できる。一方、Au-Al-Yb 準結晶物質の基礎物性測定において、磁気量子臨界的な振舞いが見出された。比較的最近の進展であるため、十分に研究が進んだとは言えないが、この領域で蒔かれた新たな研究の種となることが期待できる。

一方、 UCoGe の強磁性と超伝導の共存や UPt_3 の超伝導秩序変数など、重要物質で長く未解決のまま残された大事な問題が、領域内の純良結晶を用いた詳細な実験と理論とのやり取りにより解決されている。 URu_2Si_2 の隠れた秩序の起源の解明が研究期間内に間に合わなかったのは残念であるが、相転移に伴う対称性の低下が実験的に初めて観測され、矛盾しない理論的モデルも提案されたことから、間もない決着が期待できる。

8. 主な研究成果（発明及び特許を含む）〔研究項目毎または計画研究毎に整理する〕

（3 ページ程度）

新学術領域研究（公募研究含む）の研究課題を元に発表した研究成果（発明及び特許を含む）について、図表などを用いて研究項目毎に計画研究・公募研究の順に整理し、具体的に記述してください。なお、領域内の共同研究等による研究成果についてはその旨を記述してください。

A01-001

（1）結晶反転対称性の破れた超伝導（CeRhSi₃, CeIrSi₃, CeRhGe₃, CeCoGe₃）の特性を明らかにした。詳細は、3. 研究領域の設定目的の達成度の4）に記述したとおりである。

（2）重い電子系超伝導体、正方晶 URu₂Si₂ は、四半世紀にわたり活発に研究されている物質の一つである。特に、超伝導（T_c=1.4K）が別の秩序相（T₀=17.5K）と共存している事は当初から知られていたが、世界中の研究者による実験的理論的研究にも関わらず、その秩序変数は現在も不明である（隠れた秩序相）。本計画班では、本物質の純良単結晶育成に取り組み、世界最高純度の単結晶試料の育成に成功した。これにより、超伝導転移及び隠れた秩序の不純物効果を明らかにしたほか、高圧下での電気抵抗の振舞いから、隠れた秩序相が伝導電子に異常な散乱を与え、これと超伝導転移温度が密接に関わっている事を始めて示した。また、高純度単結晶を用いた物性測定が、新学術領域内外への試料提供及び共同研究を通じて進展した。隠れた秩序の形成に伴う電子構造の変化が、最近急速に発展した超高分解能光電子分光実験により初めてとらえられた。さらに磁場中でのフェルミ面の変化がシュブニコフ・ドハース振動でとらえられ、これはその後他のグループの実験でも追認された。また、磁気異方性及びサイクロトロン共鳴実験では隠れた秩序相で、電子系が正方晶からさらに低対称に秩序化する事が見いだされた。これまでの研究では、このような対称性の低下は見つかっておらず、従って理論的考察においても見逃されていた点であったため、大きなインパクトを与えた。その後、理論実験ともに研究が発展し続けており、隠れた秩序の本質の理解に近づいていると言える。

（3）典型的な重い電子系化合物 CeRu₂Si₂ の希釈系の研究を行い、世界で初めて、重い電子状態が形成される様子を明らかにした。その結果の一部を図1に示す。

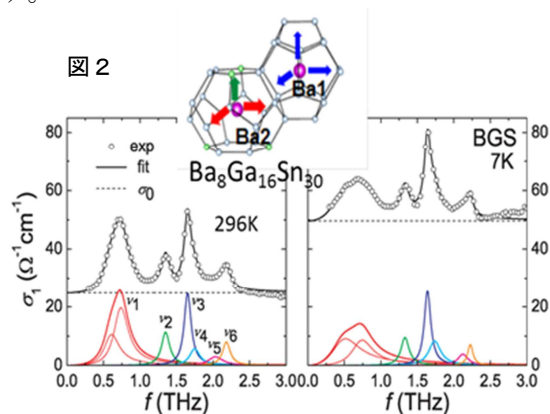
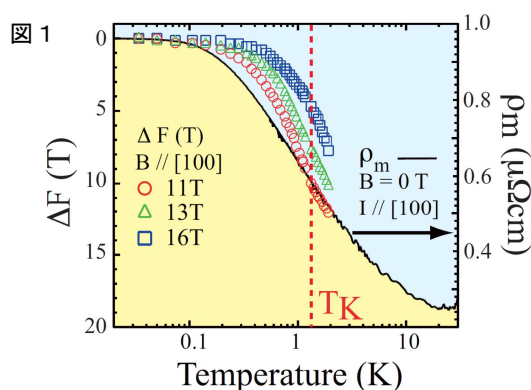


図1：(Ce_{0.02}La_{0.98})Ru₂Si₂の電気抵抗の温度変化（LaRu₂Si₂の寄与を除いてある）と3つの磁場における ω と呼ばれるフェルミ面の振動数の温度変化。図2：タイプIクラスレートBa₈Ga₁₆Sn₃₀の光学伝導率（実数部）の周波数依存性：296Kと7Kにおける違い。

A01-002

（1）軟X線ARPESによる電子構造およびフェルミ面形状の変化

① 典型的重い電子化合物であるCeRu₂Si₂の希釈系化合物（CeRu₂Si₂、CeRu₂(Si_{0.82}Ge_{0.18})₂、LaRu₂Si₂）に対するCe 3d-4f共鳴軟X線ARPESを行い、各試料において重いフェルミ面の観測に成功した。また、量子臨界点(QCP)をまたぐ組成の試料のフェルミ面形状に大きな変化が観測されないことを見いだした。この結果は、提案されているモデルへの制約を課した。これは、A01-001班との共同研究の成果である。

② 重い電子系化合物CeNi₂Ge₂のCe 3d-4f共鳴軟X線ARPESを行い、近藤温度T_K前後の電子構造の比較からT_Kより高温側の電子構造について従来の4f電子局在描像では説明の難しい結果を観測した。今後の研究により重い電子の形成過程の理解を更に深めるだけでなく、準粒子という基礎的概念に新たな知見を与える可能性がある。これは、A01-001班との共同研究の成果である。

（2）硬X線PESによる価数評価

外場なしでQCP近傍に位置するYbAlB₄超伝導体に硬X線内殻光電子分光からYb価数の評価を行い、YbAlB₄

において QCP 近傍で顕著な混合原子価状態が実現していることを示した。これは、A03-002 班との共同研究の成果である。

(3) 低エネルギー光電子分光によるフェルミ準位近傍の電子構造

URu₂Si₂ の隠れた秩序相の研究においては、Laser-PES のバルク敏感性と高いエネルギー分解能により、隠れた秩序相に特徴的な極めてエネルギー幅の狭い電子構造とその温度依存性の詳細な観測に成功した。加えて、多体効果を反映すると考えられる準粒子分散の微細構造を観測し、高分解能光電子分光が重い電子系の研究により重要な貢献ができる可能性を示した。これは、A01-001 班との共同研究の成果である。

(4) 装置建設、新手法開発等

① Ce 化合物において 4f 軌道と混成する軌道を実験的に同定可能な偏光依存硬 X 線光電子分光法の開発に世界で初めて成功し、特許を取得した。

名称: 原子軌道解析装置およびその解析方法 発明者: 関山明 権利者: 国立大学法人大阪大学 出願番号: 特願 2009-038656 出願年月日: 平成 21 年 2 月 20 日 国内外の別: 国内

② 重い電子系超伝導体の超伝導ギャップ観測を目標として装置性能が一段と向上し、試料温度 1K、エネルギー分解能 75 μeV 達成した。これにより、UPd₂Al₃(T_c=1.9K) の超伝導ギャップの直接観測に成功した。

A02-001

ラットリング (巨大振幅非調和振動) の典型例として、タイプ I クラスレートの Ba₈Ga₁₆Sn₃₀ を取り上げ、A02-002 班と共同で種々の分光法で徹底的に調べた。この物質の 14 面体中の Ba 原子は中心から 0.4Å も離れた四つの分裂サイトを特性エネルギー 20K でラットリングしている。この非中心のラットリングの特徴をラマン散乱、超音波分光、テラヘルツ分光、核磁気共鳴を用いて調べた。例としてテラヘルツ分光から求めた光学伝導率の実数部の周波数依存性を前頁図 2 に示す。室温から 7K に冷やすと、14 面体の Ba (2) の面内振動に起因する ν₁ のピーク位置は低周波数側にずれて、幅は 2 倍にも広がっている。この幅の広がり、非中心ラットリングモードがカゴのフォノンまたは伝導キャリアと相互作用して、モードの寿命が短くなったことを意味する。このラットリングの特性エネルギーと特性時間は、ラマン散乱実験では E_g モードにおける 20cm⁻¹ 付近の過剰ピーク、超音波実験では弾性定数 C₄₄ のソフト化と超音波吸収係数の温度依存性における熱活性型のピーク、NMR ではスピン格子緩和率 1/T₁T の温度依存性における熱活性型のピークとして観測された。これらの特徴は強い電子-格子相互作用によるものであることが A04 理論班のサポートにより明らかとなった。

次のような特許を取得した。

・名称: クラスレート化合物、熱電変換材料、およびそれらの製造方法 発明者: 高島敏郎他 5 名 権利者: 広島大学、(株) デンソー 種類: H01L35/34 出願番号: 特願 2010-108524 出願年月日: 平成 22 年 5 月 10 日 国内外の別: 日本 (国内)

・名称: 極低温冷凍機 発明者: 西岡孝 (公募 A02) 出願番号: 特願 2007-326028 出願日: 平成 19 年 12 月 18 日 登録日: 平成 24 年 7 月 6 日 出願人: 国立大学法人高知大学 国内外の別: 国内

・名称: 冷凍機用ポット 発明者: 西岡孝 (公募 A02) 出願番号: 2012-163103 出願日: 平成 24 年 7 月 23 日 出願人: 国立大学法人高知大学、昭和螺旋管製作所 国内外の別: 国内

A02-002

(1) クラスレートにおける熱伝導度抑制

Ba₈Ga₁₆Ge₃₀ は、キャリアが n 型の場合には結晶的な格子熱伝導率を示し、p 型では熱伝導率が抑制される。両者の違いはラマン散乱スペクトルの E_g スペクトルに現れ、ピーク強度が n-型で増強される。一方、T_{2g} では両者の差が無いことから、カゴを形成する 6c サイトの Ga とゲスト Ba²⁺間の相互作用が重要であることを明らかにした。n 型(p 型)では 6c サイトの振動振幅が大きい(小さい)ことに対応し、Ba ゲストイオンの非中心振動が抑え込まれ(増強され)ることを意味する。また、非中心距離が 6c カゴ原子の振幅で決まることを明らかにした。このことは、格子熱伝導率抑制にはゲストの非中心運動だけでなく、ゲスト振動と関連したカゴ振動が重要であることを明らかにした。

(2) ラットリングと電子・格子相互作用

弾性異常やゲストスペースと非中心ラットリングの相関を見だし、非中心ラットリングを示す系で電子・格子相互作用が増強されていることを明らかにし、光学フォノンと音響フォノンとの強い相互作用を見いだした。さらに、1K 以下で量子トンネル状態が実現していることを明らかにした。

(3) カゴ状物質 RT₂Zn₂₀ のラットリング転移と反強四極子秩序

RT₂Zn₂₀ では Zn イオンのラットリングの存在を明らかにし、構造転移がラットリングの凍結 (ラットリン

グ転移)であることを明らかにした。また、ラットリング転移に関し Pr イオン周りの空間対称性の変化を明らかにした。PrT₂Zn₂₀ (T=Ru, Rh)では、相転移が Pr4f 電子による反強四極子秩序であることを明らかにした。これらにより、RT₂Zn₂₀ の電子自由度や結晶構造の不安定性のために多彩な物性が現れることを指摘した。

(4) 充填スクッテルダイトにおける重い電子の起源

充填スクッテルダイト化合物では、PrOs₄Sb₁₂ での結晶場励起による重い電子状態の可能性、PrOs₄P₁₂ の伝導電子と f 電子間の相互作用を明らかにし、カゴ状構造に共通する電子間相互作用の一般性を指摘した。また、SmRu₄Sb₁₂ では、MI 転移温度以下で八極子 T^α もしくは双極子と T^β 混合状態による長距離反強磁性秩序を観測した。R₀S₄Sb₁₂ の R 依存性の系統的な研究から、伝導電子とゲスト・モード間の電子・格子相互作用、および f 電子とゲスト・モードの間の相互作用があることを明らかにした。SmOs₄Sb₁₂ では、価数における特性温度と重い電子的振舞いの間に相関があることを明らかにした。

(5) 希土類ヘキサボライド系における電子・格子相互作用

GaB₆、DyB₆ では希土類イオンの非調和大振幅振動と電子・格子相互作用を実験から明らかにし、電子状態計算とともに電子・格子相互作用が強く出現する構造的な条件を指摘した。

(6) 次のような特許を取得した。

・名称：圧力によって超伝導体から絶縁体へ遷移する超伝導体薄膜を用いた圧力検出装置 発明者：鈴木孝至 権利者：広島大学 出願番号：特願 2009-525838 特許番号：特許第 4394751 号 特許取得日：平成 21 年 10 月 23 日 出願種別：日本 (国内)

・名称：圧力によって超伝導体から絶縁体へ遷移する超伝導体薄膜を用いたジョセフソン素子および超伝導量子干渉計技術 発明者：鈴木孝至 権利者：広島大学 出願番号：特願 2009-213934/特開 2010-041060 特許番号：特許第 4460021 号 特許取得日：平成 22 年 2 月 19 日 出願種別：日本 (国内)

・名称：Pressure detection apparatus, Josephson device, and superconducting quantum interference device that include superconductor thin film that undergoes transition from superconductor to insulator by pressure 発明者：鈴木孝至 権利者：広島大学 出願番号：US12/601790 出願日：平成 21 年 11 月 24 日 出願種別：国際出願 (米国)

A03-001

(1) 人工超格子による二次元重い電子状態の創製

松田らは、京都大学の寺嶋教授のグループと共同して人工格子の技術を重い電子系の研究に取り込んだ。具体的には、三次元重い電子物質 CeIn₃ と通常金属の LaIn₃ を人工超格子の技術により組み合わせ「重い電子の二次元閉じ込め」に成功した (図 3 (A) 参照)。また、重い電子系超伝導体 CeCoIn₅ と通常金属 YbCoIn₅ による超格子の作成し「Ce 原子の 2 次元正方格子 (二次元近藤格子) における超伝導の実現」に成功した (図 3 (B) 参照)。前者は、次元による量子臨界点の制御という概念をもたらし、後者は二次元化による超強結合超伝導の創出である。

(2) 強磁性超伝導 UCoGe における①強磁性と超伝導の共存、②自己誘導渦糸状態の発見、③イジング型の異方性を持つ強磁性ゆらぎにより引き起こされる超伝導

強磁性超伝導体 UCoGe (強磁性転移温度 T_{Curie} ~ 2.5 K、超伝導転移温度 T_{sc} ~ 0.6 K) は 2007 年に発見された新しい超伝導体である。佐藤らにより良質な単結晶試料が育成され、石田らは NMR 測定から強磁性と超伝導の関係を調べた。⁵⁷Co 核の核四重極共鳴 (NQR) の実験から、T_{sc} < T < T_{Curie} の 1 K では強磁性領域からのみの信号になること、この強磁性の信号に超伝導転移の異常が見られることから強磁性領域で超伝導が起こっていることを示し、強磁性と超伝導が微視的に共存していることを明らかにした。またこの物質ではイジング的な強磁性縦ゆらぎを持ち、超伝導はこの縦ゆらぎが大きな領域でのみ見られることを示し強磁性縦ゆらぎと超伝導の関係を指摘した。さらに DC 磁化率の測定から UCoGe には通常の超伝導体で見られるマイスナー状態や下部臨界磁場による kink が見られないことから、自己誘導渦糸 (SIV) 状態の可能性も指摘した。SIV 状態は理論研究から存在が指摘されていたが今まで発見の報告はなかった。UCoGe は SIV 状態が実現している最初の超伝導体である可能性がある。

(3) 熱伝導率の角度回転による UPt₃ のギャップ構造の決定

重い電子系超伝導体 UPt₃ は超伝導の多重相や Pt-NMR からスピン三重項超伝導状態が指摘されていたが、実現している超伝導ギャップ構造は完全には同定されていない。今回、井澤らは、A01-001 大貫、芳賀らが作成した UPt₃ の単結晶を用い、詳細な熱伝導率の磁場方向依存性を行いギャップ構造の同定に努めた。その結果高磁場に現れる C 相においては a 軸に沿ったノードの存在を示唆する ab 面内での二回対称、B、C 相においてフェルミ面の赤道の上下にノードの存在を示唆する振る舞いも見出した。これらのノードの情報と Knight-shift の実験結果、対称性の議論から、UPt₃ のギャップ構造は E1u の対称性を持つことを示した。

図 3

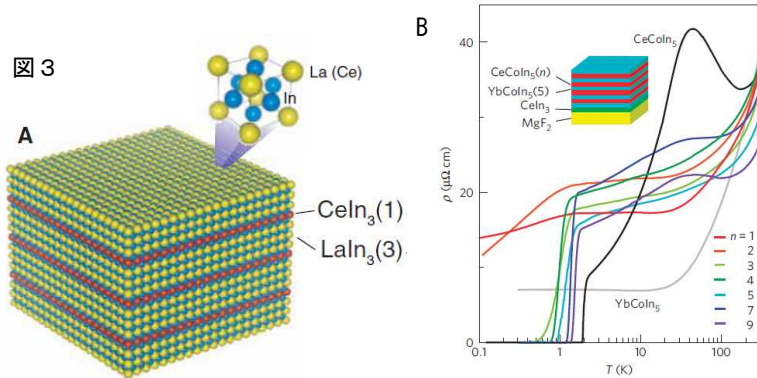
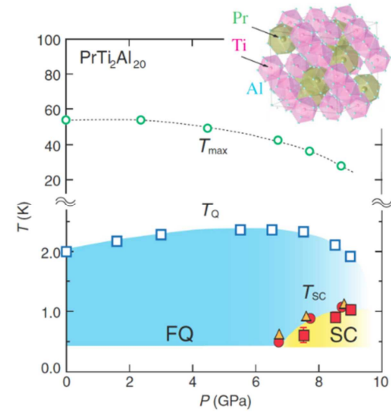


図 3 : (A) 重い電子物質 CeIn_3 と通常金属物質 LaIn_3 による人工超格子の概念図。(B) 通常金属物質 YbCoIn_5 の厚みを 5 層に固定し、重い電子超伝導体 CeCoIn_5 の厚み n を変化させた時の電気抵抗の温度依存性。3 層 ($n=3$) 積み重ねた時より超伝導が見られるようになる。図 4 : $\text{PrTi}_2\text{Al}_{20}$ の圧力・温度相図。

図 4



A03-002

計画の中で最も重視したものは、多極子自由度のみを有する立方晶 Γ_3 を基底状態を持つ純良な金属化合物の開発であった。中辻らは物質探索の結果、カゴ状構造を持つ $\text{PrT}_2\text{Al}_{20}$ ($T=\text{Ti}, \text{V}$)の単結晶作製に成功した。また公募研究鬼丸班でも、類似物質である $\text{PrT}_2\text{Zn}_{20}$ の純良単結晶の作製に成功した。これらの化合物に対して低温比熱・磁化、中性子非弾性散乱、超音波音速測定、NMRなどを行った結果、結晶場基底状態が確かに Γ_3 であることが確認された。またこれらの化合物は0.1-2 Kの低温で四極子転移を示すことから、格子の乱れが少ないクリーンな物質であると考えられる。さらに興味深いことに、常圧下で四極子秩序と共存する超伝導転移が $\text{PrTi}_2\text{Al}_{20}$ ($T_c=0.2$ K)、 $\text{PrIr}_2\text{Zn}_{20}$ ($T_c=0.05$ K)、 $\text{PrRh}_2\text{Zn}_{20}$ ($T_c=0.06$ K)において観測された。 Γ_3 基底状態を持つ多極子自由度が超伝導機構にどのように関与しているかが注目される。一方これらの系の四極子転移より上の温度領域において、比熱や電気抵抗、磁化率などに特異な温度依存性が見出され、四極子近藤効果を示唆する結果が得られた。

上床らは小型化したキュービックアンビルセルを用いて、 $\text{PrTi}_2\text{Al}_{20}$ の電気抵抗、交流磁化率および比熱の測定を行った。その結果、約7 GPa以上で超伝導転移温度 T_c が急速に上昇し、8.7 GPaで1.1 Kに達することを見出した(図4参照)。また T_c での上部臨界磁場 B_{c2} の立ち上がりから $B_{c2}(0)$ が8.7 GPaで4.7 Tに達すること、準粒子の有効質量が $106m_0$ と非常に重いことがわかった。一方、四極子転移温度 T_* ははじめ圧力とともに上昇したのち、7 GPa以上で急に下降に転じている。これらの結果からこの圧力誘起の重い電子超伝導は四極子転移の量子臨界点の近傍で現れている可能性が強く示唆され、新奇の現象として極めて注目される成果である。今後、より低圧力で類似の現象が実現できる系の探索が望まれる。

A04

カゴ状物質においてラットリングと呼ばれる内包イオンの非調和振動が関与する近藤効果の研究が進んだ。振動の自由度を考えることにより、自動的に2つ以上の部分波が関与することになり、局在スピンを遮蔽する伝導電子のチャンネルは複数となる。フォノンを伴う混成と伴わない混成が拮抗するとき2チャンネル近藤効果が実現する。振動する磁性イオンの近藤効果の基底状態を数値繰り込み群の手法を用いて解析した結果を図5にまとめた。局在軌道のクーロン斥力 U が大きい場合は磁気モーメントが発生するが、それは基底状態でs部分波、およびフォノンを伴うp波の部分波によって遮蔽され、両者が拮抗するとき非フェルミ液体の2チャンネル近藤効果の不安定固定点を実現する。この分岐は弱結合領域まで連続的に存在し基底状態の二つの相の間の境界をなしている。2つの基底状態はパリティの違いによって特徴づけられる。弱結合領域の近藤効果は磁気モーメントではなく電気双極子モーメントの近藤効果および2チャンネル近藤効果として特徴づけられることが明らかになった。

2007年に発見された鉄系超伝導体は、複数フェルミ面をもつ超伝導という意味で、重い電子系との接点があり、本新学術領域研究でも、紺谷を中心に理論研究が進んだ。鉄系超伝導体はd電子の5軌道2次元系であり、3次元系である重い電子系よりも理論解析が容易であるという利点がある。ゆえに、鉄系超伝導体の研究は、重い電子系における多重極秩序(揺らぎ)を理解する上で貴重な知見をもたらすものと期待できる。特に、鉄系超伝導体の正常状態において、軌道揺らぎ(電荷四重極揺らぎ)の重要性を示唆する実験が相次いで報告された。これらはクーロン相互作用 U の乱雑位相近似(RPA)では理解できない。紺谷らは、電子格子相互作用により四重極相互作用 g が生じることを見出し、軌道揺らぎの発現を議論した。得られた

U-g 状態相図を図 6 に示す。また、軌道揺らぎにより発現が期待される符号反転のない s 波超伝導状態 (s_{++} 波状態) の不純物効果や中性子散乱も議論した。

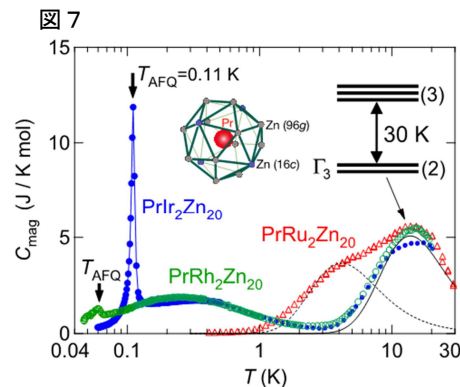
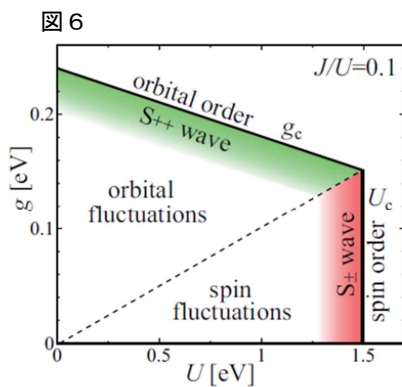
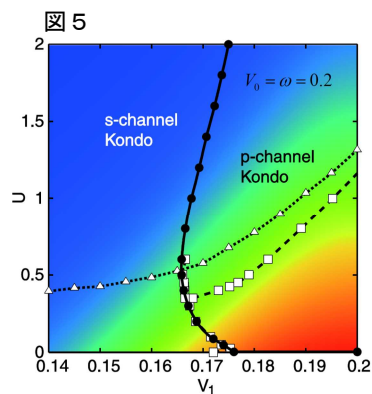


図 5 : 金属中で振動する磁性イオンの近藤効果の基底状態相図。図 6 : クーロン相互作用 U +四重極相互作用 g 模型における g - U 相図。図 7 : $\text{PrT}_2\text{Zn}_{20}$ ($T=\text{Ru}, \text{Rh}, \text{Ir}$) の比熱の温度依存性。

公募研究の研究成果について、ここに全てを示すことはできないので、代表的な 2 つの成果を記す。

公募 A03 鬼丸 :

研究課題「Pr 内包カゴ状金属間化合物における新規物性の発現」(平成 21~22 年度)

研究課題「Pr 内包カゴ状化合物で発現する超伝導と電子軌道自由度の相関」(平成 23~24 年度)

Pr イオンを内包する新規カゴ状化合物 $\text{PrT}_2\text{Zn}_{20}$ ($T=\text{Ru}, \text{Rh}, \text{Ir}$) の良質単結晶を育成し、これらの系が超伝導転移をはじめ、四極子秩序や構造相転移など、 $4f^2$ 配位に起因する多彩な強相関現象を示すことを見出した。 $\text{PrT}_2\text{Zn}_{20}$ ($T=\text{Ru}, \text{Rh}, \text{Ir}$) の単結晶試料は、A02-001 班と共同で融液固化法により作製した。13 K 付近のショットキー異常による比熱のピークと磁化の異方性より、Pr イオンの結晶場基底状態は電気四極子の自由度を持つ非磁性の Γ_3 二重項であることが示唆された。実際、その後の A02-002 班による非弾性中性子散乱と超音波による弾性定数の測定により、図 6 の内挿図の非磁性基底二重項が確認された。 $T=\text{Ru}$ の系は $T_S=138$ K で構造相転移を起こす。その原因として、二つの Pr イオンの中心に位置する Zn 原子のラットリングの存在が、A02-002 ラットリング班による ^{139}La -NMR と超音波の測定から指摘された。また、A03-002 班や公募 A03 班と共同で、希釈冷凍機を用いて 0.1 K 以下までの比熱を測定した。図 6 に示すように、 $T=\text{Rh}$ と Ir の系の磁気比熱はそれぞれ $T_0=0.06$ K と 0.11 K でピークを示し、反強四極子秩序が起こっている。さらに、 T_0 より低温の $T_c=0.06$ K と 0.05 K で超伝導転移を示す。両系において、 T_c が T_0 以下であること、および絶対零度から T_0 までのエントロピーが $T=\text{Rh}$ と Ir の系でそれぞれ $R\ln 2$ の 10% と 20% しかないことから、 T_0 以下でも四極子揺らぎが活性であり、それが超伝導クーパー対の形成に参与している可能性が示唆される。

公募 A03 渡辺 :

研究課題「局所相関の強い遍歴電子系における新しい量子臨界現象の解明」(平成 23~24 年度)

Ce 系および Yb 系重い電子系の $4f$ 電子間に働く強いクーロン相互作用の効果を取り入れた上で、Ce や Yb の価数ゆらぎの量子臨界現象の枠組みを理論的に構築した。 f 電子と伝導電子間の斥力を取り入れた拡張周期アンダーソン模型において、オンサイトの f 電子間のクーロン斥力が強い極限で重い準粒子状態が形成されている状態から出発して、 f 電子と伝導電子の間の電荷移動のゆらぎのモード結合理論を構築した。注目すべき結果として、 f 電子間の強い局所相関のために、ほとんど分散のない臨界価数ゆらぎのモードが運動量空間の波数 $q=0$ 近傍に出現することを見出した。その結果、価数転移の量子臨界点では、絶対零度にむかって一様静的価数帯磁率が発散するとともに、一様磁気帯磁率も同じ温度依存性を示しながら発散することを明らかにした。すなわち、一様磁気帯磁率が $\chi \approx T^{-\zeta}$ ($0.5 \leq \zeta \leq 0.7$) のように、従来型のスピンゆらぎの量子臨界現象とは異なる新しいタイプの臨界指数をもつことを見出した。さらに、NMR/NQR 核磁気緩和率も同様の発散 ($(T_1T)^{-1} \sim T^{-\zeta}$ ($0.5 \leq \zeta \leq 0.7$)) を示すことを示した。電気抵抗率は温度に比例し $\rho \approx T$ 、電子比熱係数は $C/T \sim -\log T$ のように低温にむかって増大することを示した。これらの結果は、強相関電子系で非従来型の量子臨界現象として大きな問題となっている重い電子系金属 YbRh_2Si_2 や $\beta\text{-YbAlB}_4$ で観測されている低温の各物理量の振る舞いを統一的に説明できることを指摘した。

9. 研究成果の取りまとめ及び公表の状況（主な論文等一覧、ホームページ、公開発表等）（5ページ程度）

新学術領域研究（公募研究含む）の研究課題を元に発表した研究成果（主な論文、書籍、ホームページ、主催シンポジウム等の状況）について具体的に記述してください。論文の場合、計画研究・公募研究毎に順に記載し、研究代表者には二重下線、研究分担者には一重下線、連携研究者には点線の下線を付し、corresponding author には左に*印を付してください。また、一般向けのアウトリーチ活動を行った場合はその内容についても記述してください。

主な論文：

本新学術領域研究が平成20年11月13日に採択後、1252編の原著論文が出版された（平成25年3月末まで）。ここに全てを記載することはできないので、代表的な成果である以下の70編の論文（計画研究29編、公募研究41編）を記載するにとどめる。なお、全て「査読あり」である。

計画研究

A01-001

- [1] *Y. Ōnuki, R. Settai, T. Takeuchi, K. Sugiyama, F. Honda, Y. Haga, E. Yamamoto, T. D. Matsuda, N. Tateiwa, D. Aoki, I. Sheikin, H. Harima, and H. Yamagami: “High-Quality Single Crystal Growth and Unique Electronic States under Magnetic Field and Pressure in Rare Earth and Actinide Compounds”, J. Phys. Soc. Jpn. **81** (2012) SB 001-1-18
- [2] *T. D. Matsuda, E. Hassinger, D. Aoki, V. Taufour, G. Knebel, N. Tateiwa, E. Yamamoto, Y. Haga, Y. Ōnuki, Z. Fisk, and J. Flouquet: “Details of Sample Dependence and Transport Properties of URu₂Si₂”, J. Phys. Soc. Jpn. **80** (2011) 114710-1-10.
- [3] *S. Ikeda, H. Sakai, N. Tateiwa, T. D. Matsuda, D. Aoki, Y. Homma, E. Yamamoto, A. Nakamura, Y. Shiokawa, Y. Ota, K. Sugiyama, M. Hagiwara, K. Kindo, K. Matsubayashi, M. Hedo, Y. Uwatoko, Y. Haga, and Y. Ōnuki: “Possible Existence of Magnetic Polaron in Nearly Ferromagnetic Semiconductor β-US₂”, J. Phys. Soc. Jpn. **78**, 114704 (2009).
- [4] *Y. Matsumoto, T. Terashima, S. Uji, N. Kimura, and H. Aoki: “How Are Heavy and Itinerant Electrons Born in a Dilute Kondo Alloy?”, J. Phys. Soc. Jpn. **81** (2012) 054703-1-7.

A01-002

- [5] *R. Yoshida, S. Shin (8番目), T. Yokoya (11番目) 他8名: “Signature of hidden order and evidence for periodicity modulation in URu₂Si₂”, Phys. Rev. B **82** (2010) 205108-1-6. [Editors suggestion]
- [6] *M. Okawa, S. Shin (15番目) 他13名: “Strong Valence Fluctuation in the Quantum Critical Heavy Fermion Superconductor β-YbAlB₄: A Hard X-Ray Photoemission Study”, Phys. Rev. Lett. **104** (2010) 247201-1-4
- [7] *T. Okane, H. Yamagami (7番目) 他11名: “4f-derived Fermi surfaces of CeRu₂(Si_{1-x}Ge_x)₂ near the quantum critical point: Resonant soft x-ray ARPES study”, Phys. Rev. Lett. **102** (2009) 216401-1-4.

A02-001

- [8] T. Mori, K. Iwamoto, S. Kushibiki, H. Honda, H. Matsumoto, *N. Toyota, M. A. Avila, K. Suekuni, and T. Takabatake: “Optical conductivity spectral anomalies in the off-center rattling system β-Ba₈Ga₁₆Sn₃₀”, Phys. Rev. Lett. **106** (2011) 015501-1-4.
- [9] *C. Sekine, K. Akahira, K. Ito, and T. Yagi: “Magnetic properties of new filled skutterudite compounds EuT₄As₁₂ (T = Fe, Ru, and Os) synthesized under high pressure”, J. Phys. Soc. Jpn. **78** (2009) 093707-1-4.
- [10] T. Nakano, K. Tsuchiya, A. Ohashi, T. Nashimoto, H. Ono, *N. Takeda, and N. Shirakawa: “Magnetization, resistivity and specific heat of hexagonal R₂Ni₁₂P₇ with filled-Cr₁₂P₇ structure”, J. Phys. Soc. Jpn. **81** (2012) 074601-1-8.

A02-002

- [11] *H. Tou, Y. Inaoka, M. Doi, M. Sera, K. Asaki, H. Kotegawa, H. Sugawara, and H. Sato: “Possible Mass Enhancement by Multipole Fluctuations Excited via the Singlet-Triplet Crystal Electric Field States in PrOs₄Sb₁₂: Sb-NMR Studies Using a Single Crystal”, J. Phys. Soc. Jpn. **80** (2011) 074703-1-17.
- [12] *Y. Takasu, T. Hasegawa, N. Ogita, M. Udagawa, M. A. Avila, K. Suekuni, and T. Takabatake: “Off-center rattling and cage vibration of the carrier-tuned type-I clathrate Ba₈Ge₁₆Ge₃₀ studied by Raman scattering”, Phys. Rev. B **82** (2010) 134302-1-7.
- [13] *S. Tsutsui, H. Uchiyama, J. P. Sutter, A. Q. R. Baron, M. Mizumaki, N. Kawamura, T. Uruga, H. Sugawara, J. Yamaura, A. Ochiai, T. Hasegawa, N. Ogita, M. Udagawa, and H. Sato: “Atomic Dynamics of Low-Lying Rare-Earth Guest Modes in Heavy Fermion Filled Skutterudites RO₈Sb₁₂ (R: Light Rare-Earth)”, Phys. Rev. B **86** (2012) 195115-1-13.
- [14] *C. H. Lee, S. Tsutsui, K. Kihou, H. Sugawara and H. Yoshizawa: “Study of Neutron Diffraction on ¹⁵⁴SmRu₄P₁₂ Single Crystal”, J. Phys. Soc. Jpn. **81** (2012) 063702-1-4.

A03-001

- [15] *H. Shishido, T. Shibauchi, K. Yasu, T. Kato, H. Kontani, T. Terashima, and Y. Matsuda: “Tuning the Dimensionality of the Heavy fermion compound CeIn₃”, *Science* **327** (2010) 980-983.
- [16] *Y. Mizukami, H. Shishido, T. Shibauchi, M. Shimozawa, S. Yasumoto, D. Watanabe, M. Yamashita, H. Ikeda, T. Terashima, H. Kontani and Y. Matsuda: “Extremely strong-coupling superconductivity in artificial two-dimensional Kondo lattices”, *Nature Physics* **7** (2011) 849-853
- [17] *T. Ohta, T. Hattori, K. Ishida, Y. Nakai, E. Osaki, K. Deguchi, N. K. Sato, and I. Satoh: “Microscopic Coexistence of Ferromagnetism and Superconductivity in Single-Crystal UCoGe”, *J. Phys. Soc. Jpn.* **79** (2010) 023707-1-4. [Papers of Editors' Choice]
- [18] *K. Deguchi, E. Osaki, S. Ban, N. Tamura, Y. Simura, T. Sakakibara, I. Satoh, and N. K. Sato: “Absence of Meissner State and Robust Ferromagnetism in the Superconducting State of UCoGe: Possible Evidence of Spontaneous Vortex State”, *J. Phys. Soc. Jpn.* **79** (2010) 083708-1-4.
- [19] *T. Hattori, Y. Ihara, Y. Nakai, K. Ishida, Y. Tada, S. Fujimoto, N. Kawakami, E. Osaki, K. Deguchi, N. K. Sato, and I. Satoh: “Superconductivity Induced by Longitudinal Ferromagnetic Fluctuations in UCoGe”, *Phys. Rev. Lett.* **108** (2012) 066403-1-5. [Selected for a Viewpoint in *Physics*]
- [20] *Y. Machida, A. Itoh, Y. So, K. Izawa, Y. Haga, E. Yamamoto, N. Kimura, Y. Ōnuki, Y. Tsutsumi, and K. Machida, “Twofold spontaneous symmetry breaking in a heavy fermion superconductor UPt₃”, *Phys. Rev. Lett.* **108** (2012) 157002-1-5.

A03-002

- [21] *K. Matsubayashi, T. Tanaka, A. Sakai, S. Nakatsuji, Y. Kubo and Y. Uwatoko, “Pressure-Induced Heavy Fermion Superconductivity in the Nonmagnetic Quadrupolar System PrTi₂Al₂₀”, *Phys. Rev. Lett.* **109** (2012) 187004-1-5.
- [22] *Y. Aoki, T. Namiki, S. R. Saha, T. Tayama, T. Sakakibara, R. Shiina, H. Shiba, H. Sugawara and H. Sato, “f-Electron-Nuclear Hyperfine- Coupled Multiplets in the Unconventional Charge Order Phase of Filled Skutterudite PrRu₄P₁₂”, *J. Phys. Soc. Jpn.* **80** (2010) 054704-1-7. (2010). [JPSJ 注目論文]
- [23] Y. Shimura, *T. Sakakibara, K. Iwakawa, K. Sugiyama, and Y. Ōnuki, “Low Temperature Magnetization of Yb₂Pt₂Pb with the Shastry-Sutherland Type Lattice and a High-Rank Multipole Interaction”, *J. Phys. Soc. Jpn.* **81** (2012) 103601-1-4. [JPSJ 注目論文]

A04

- [24] S. Onari and *H. Kontani: “Self-consistent Vertex Correction Analysis for Iron-based Superconductors: Mechanism of Coulomb Interaction-Driven Orbital Fluctuations”, *Phys. Rev. Lett.* **109** (2012) 137001-1-5.
- [25] *T. Hotta and K. Ueda: “Electric Dipolar Kondo Effect Emerging from a Vibrating Magnetic Ion”, *Phys. Rev. Lett.* **108** (2012) 247214-1-5.
- [26] S. Hoshino, J. Otsuki and *Y. Kuramoto: “Diagonal Composite Order in a Two-Channel Kondo Lattice”, *Phys. Rev. Lett.* **107** (2011) 247202-1-5.
- [27] *N. Shibata and C. Hotta: “Grand canonical finite-size numerical approaches: A route to measuring bulk properties in an applied field”, *Phys. Rev. B* **86** (2011) 041108-1-5(R).
- [28] *H. Kusunose: “Self-Consistent Fluctuation Theory for Strongly Correlated Electron Systems”, *J. Phys. Soc. Jpn.* **79** (2010) 094707-1-13.
- [29] F. Pollmann, A. M. Turner, E. Berg, and *M. Oshikawa: “Entanglement spectrum of a topological phase in one dimension”, *Phys. Rev. B* **81** (2010) 064439-1-10.

公募研究

A01

- [1] M. Matsunami, *H. Okamura, A. Ochiai, and T. Nanba, “Pressure Tuning of an Ionic Insulator into a Heavy Electron Metal: An Infrared Study of YbS”, *Phys. Rev. Lett.* **103** (2009) 237202-1-4.
- [2] *O. Sakai and H. Harima: “Band Calculations for Ce Compounds with AuCu₃-Type Crystal Structure on the Basis of Dynamical Mean Field Theory: II. CeIn₃ and CeSn₃”, *J. Phys. Soc. Jpn.* **81** (2012) 024717-1-13.
- [3] *R. Settai, K. Katayama, D. Aoki, I. Sheikin, G. Knebel, J. Flouquet, and Y. Ōnuki: “Field-Induced Antiferromagnetic State in Non-centrosymmetric Superconductor CeIrSi₃”, *J. Phys. Soc. Jpn.* **80** (2011) 094703-1-9.
- [4] *S. Tonegawa, K. Hashimoto, K. Ikada, Y. H. Lin, H. Shishido, Y. Haga, T. D. Matsuda, E. Yamamoto, Y. Ōnuki, H. Ikeda, Y. Matsuda, and *T. Shibauchi, “Cyclotron Resonance in the Hidden-Order Phase of URu₂Si₂”, *Phys. Rev. Lett.* **109** (2012) 036401-1-5.
- [5] *Y. Utsumi, H. Sato, S. Ohara, T. Yamashita, K. Mimura, S. Motonami, K. Shimada, S. Ueda, K. Kobayashi, H. Yamaoka, N. Tsujii, N. Hiraoka, H. Namatame, and M. Taniguchi: “Electronic structure of Kondo lattice compounds YbNi₃X₉ (X = Al, Ga) studied by hard x-ray spectroscopy”, *Phys. Rev. B* **86** (2012) 115114-1-9.

[6] *F. Honda, T. Takeuchi, S. Yasui, Y. Tag, S. Yoshiuchi, Y. Hirose, Y. Tomooka, K. Sugiyama, M. Hagiwara, K. Kindo, R. Settai, and Y. Ōnuki: “Metamagnetic Behavior and Effect of Pressure on the Electronic State in Heavy Fermion Compound $\text{YbRh}_2\text{Zn}_{20}$ ”, J. Phys. Soc. Jpn. **82** (2013) in press.

A02

[7] *K. Kaneko, N. Metoki, H. Kimura, Y. Noda, T. D. Matsuda, and M. Kohgi: “Visualizing Rattling in $\text{PrOs}_4\text{Sb}_{12}$ by Single Crystal Neutron Diffraction and Maximum-Entropy Analysis”, J. Phys. Soc. Jpn. **78** (2009) 74710-1-4.

[8] *K. Matsuhira, C. Sekine, M. Wakeshima, Y. Hinatsu, T. Namiki, K. Takeda, I. Shirovani, H. Sugawara, D. Kikuchi, H. Sato: “Systematic Study of Lattice Specific Heat of Filled Skutterudites”, J. Phys. Soc. Jpn. **78** (2009) 124601-1-6.

[9] *K. Magishi, H. Sugawara, T. Saito, K. Koyama, F. Kanetake, H. Mukuda, Y. Kitaoka, K. M. Itoh, E. E. Haller: “ ^{73}Ge -NQR study of superconducting skutterudites $\text{MPt}_4\text{Ge}_{12}$ ($M = \text{Sr}, \text{Ba}$)”, J. Phys. Soc. Jpn. **80** (2011) SA028-1-3.

[10] *T. Yanagisawa, Y. Ikeda, H. Saito, H. Hidaka, H. Amitsuka, K. Araki, M. Akatsu, Y. Nemoto, T. Goto, P. C. Ho, R. E. Baumbach, and M. B. Maple: “Magnetic-Field-Independent Ultrasonic Dispersions in the Magnetically Robust Heavy Fermion System $\text{SmOs}_4\text{Sb}_{12}$ ”, J. Phys. Soc. Jpn. **80** (2011) 043601-1-4.

[11] *Z. Hiroi, A. Onosaka, Y. Okamoto, J. Yamaura and H. Harima: “Rattling and Superconducting Properties of the Cage Compound $\text{Ga}_x\text{V}_2\text{Al}_{20}$ ”, J. Phys. Soc. Jpn. **81** (2012) 124707-1-11.

[12] *T. Terashima, N. Kurita, A. Kiswandhi, E. S. Choi, J. S. Brooks, K. Sato, J. Yamaura, Z. Hiroi, H. Harima, and S. Uji: “Large and homogeneous mass enhancement in the rattling-induced superconductor KOs_2O_6 ”, Phys. Rev. B **85** (2012) 180503(R)-1-5.

[13] M. Matsumura, N. Tomita, S. Tanimoto, Y. Kawamura, R. Kobayashi, H. Kato, *T. Nishioka, H. Tanida, and M. Sera: “Nuclear Spin–Lattice Relaxation Study for 4f Electron State in $\text{CeT}_2\text{Al}_{10}$ ($T = \text{Ru}, \text{Os}, \text{and Fe}$): Comparison with RKKY System $\text{NdRu}_2\text{Al}_{10}$ ”, J. Phys. Soc. Jpn. **82** (2013) 023702-1-4.

A03

[14] *N. Aso, K. Ishii, H. Yoshizawa, T. Fujiwara, Y. Uwatoko, G.-F. Chen, N. K. Sato, and K. Miyake: “Switching of Magnetic Ordering in CeRhIn_5 under Hydrostatic Pressure”, J. Phys. Soc. Jpn. **78** (2009) 073703-1-4.

[15] *T. Onimaru, K. T. Matsumoto, Y. F. Inoue, K. Umeo, T. Sakakibara, Y. Karaki, M. Kubota, and T. Takabatake: “Antiferroquadrupolar Ordering in a Pr-based Superconductor $\text{PrIr}_2\text{Zn}_{20}$ ”, Phys. Rev. Lett. **106** (2011) 177001-1-4.

[16] Y. Aoki, *A. Sumiyama, M. Shiotsuki, G. Motoyama, A. Yamaguchi, Y. Oda, T. Yasuda, R. Settai, and Y. Onuki: “Josephson Effect between Noncentrosymmetric LaPt_3Si and a Conventional Superconductor”, J. Phys. Soc. Jpn. **79** (2010) 124707-1-6.

[17] Y. Ikeda, S. Araki, *T. C. Kobayashi, Y. Shimizu, T. Yanagisawa, and H. Amitsuka: “A Study of Ni-Substitution Effects on Heavy-Fermion CeCu_2Si_2 -Similarities between Ni-Substitution and High Pressure Effects-“, J. Phys. Soc. Jpn. **81** (2012) 083701-1-4.

[18] *E. Matsuoka, D. Usui, Y. Sasaki, M. Watahiki, K. Iwasa, H. Shida, K. Ohoyama, and H. Onodera, “Antiferromagnetic Alignment of Magnetic Dipolar Moments Observed by Neutron Powder Diffraction in Rare-Earth Palladium Bronze PrPd_3S_4 ”, J. Phys. Soc. Jpn. **79** (2010) 064708-1-6.

[19] *T. Matsumura, T. Yonemura, K. Kunimori, M. Sera, F. Iga, T. Nagao, and J.-I. Igarashi: “Antiferroquadrupole order and magnetic field induced octupole in CeB_6 ”, Phys. Rev. B **85** (2012) 174417-1-10.

[20] Y. Matsumoto, *S. Nakatsuji, K. Kuga, Y. Karaki, N. Horie, Y. Shimura, T. Sakakibara, A. H. Nevidomskyy, P. Coleman: “Quantum Criticality Without Tuning in the Mixed Valence Compound $\beta\text{-YbAlB}_4$ ”, Science **331** (2011) 316-319.

[21] *H. Fukazawa, R. Kobayashi, M. Shimizu, H. Amanuma, K. Hachitani, Y. Komaki, Y. Kohori, K. Akahira, C. Sekine, and I. Shirovani, “ ^{31}P Nuclear Magnetic Resonance and ^{101}Ru Nuclear Quadrupole Resonance Measurements of Filled Skutterudites $\text{GdRu}_4\text{P}_{12}$ and $\text{TbRu}_4\text{P}_{12}$ ”, J. Phys. Soc. Jpn. **80** (2011) 044713-1-5.

[22] *T. Mito, T. Koyama, K. Nakagawara, T. Ishida, K. Ueda, T. Kohara, K. Matsubayashi, Y. Saiga, K. Munakata, Y. Uwatoko, M. Mizumaki, N. Kawamura, B. Idzikowski, and M. Reiffers: “Mechanism of Field Induced Fermi Liquid State in Yb-Based Heavy-Fermion Compound: X-ray Absorption Spectroscopy and Nuclear Magnetic Resonance Studies of $\text{YbCo}_2\text{Zn}_{20}$ ”, J. Phys. Soc. Jpn. **81** (2012) 033706-1-4.

[23] Y. Hatakeyama and *R. Ikeda: “Emergent antiferromagnetism in a d-wave superconductor with strong paramagnetic pair-breaking”, Phys. Rev. B **83** (2011) 224518-1-17.

[24] Y. Nakanishi, T. Kumagai, M. Yoshizawa, K. Matsuhira, S. Takagi, and Z. Hiroi, “Elastic properties of the rare-earth dititanates $\text{R}_2\text{Ti}_2\text{O}_7$ ($R = \text{Tb}, \text{Dy}, \text{and Ho}$)”, Phys. Rev. B **83** (2011) 184434-1-7.

[25] S. Zhang, *T. Tayama, T. Mizushima, T. Kuwai, and Y. Isikawa: “Magnetic Phase Diagram in NdCu_4Ag Single Crystal”, J. Phys. Soc. Jpn. **79** (2010) 043704-1-4.

[26] *W. Higemoto, T. U. Ito, K. Ninomiya, T. Onimaru, K. T. Matsumoto, and T. Takabatake: “Multipole and superconducting state in $\text{PrIr}_2\text{Zn}_{20}$ probed by muon spin relaxation”, Phys. Rev. B **85** (2012) 235152-1-4.

- [27] *S. Kawasaki, J. Fukui, T. Motoyama, Y. Suzuki, S. Shibusaki, and G.-q. Zheng: “The Mott State and Superconductivity in Face-Centred Cubic Structured Cs_3C_{60} : A ^{133}Cs -Nuclear Magnetic Resonance Study under Pressure”, J. Phys. Soc. Jpn. **82** (2013) 014709-1-6.
- [28] *Y. Yanase and M. Sigrist, “Antiferromagnetic Order and π -Triplet Pairing in the Fulde-Ferrell-Larkin-Ovchinnikov State”, J. Phys. Soc. Jpn. **78** (2009) 114715.
- [29] S. Takagi, S. Ishihara, M. Yokoyama, and H. Amitsuka: “Symmetry of the Hidden Order in URu_2Si_2 from Nuclear Magnetic Resonance Studies”, J. Phys. Soc. Jpn. **81** (2012) 114710-1-13.
- [30] *R. Okazaki, Y. Nishina, Y. Yasui, S. Shibusaki, and I. Terasaki, “Optical study of the electronic structure and correlation effects in $K_{0.49}RhO_2$ ”, Phys. Rev. B **84** (2011) 075110-1-4.
- [31] *S. Kittaka, Y. Aoki, T. Sakakibara, A. Sakai, S. Nakatsuji, Y. Tsutsumi, M. Ichioka, and K. Machida: “Superconducting gap structure of $CeIrIn_5$ from field-angle-resolved measurements of its specific heat”, Phys. Rev. B **85** (2012) 060505(R)-1-4.
- [32] *A. Mitsu, S. Hamano, N. Araoka, H. Yayama, and H. Wada: “Pressure-Induced Valence Transition in Antiferromagnet $EuRh_2Si_2$ ”, J. Phys. Soc. Jpn. **81** (2012) 023709-1-4.
- [33] *H. Kobayashi, S. Ikeda, Y. Sakaguchi, Y. Yoda, H. Nakakura, and M. Machida, “Observation of a pressure-induced As-As hybridization associated with a change in the electronic state of Fe in the tetragonal phase of $EuFe_2As_2$ ”, J. Phys.: Condens. Matter **25** (2013) 022201-1-6.
- [34] *S. Watanabe and K. Miyake: “New Universality Class of Quantum Criticality in Ce- and Yb-based Heavy Fermions”, J. Phys.: Condens. Matter **24** (2012) 294208-1-12.
- [35] *N. Tateiwa, T. D. Matsuda, Y. Haga, E. Yamamoto, Z. Fisk, and Y. Ōnuki: “Strong correlation between anomalous quasiparticles scattering and unconventional superconductivity in the hidden order of URu_2Si_2 ”, Phys. Rev. B **85** (2012) 054516-1-5.
- [36] *M. Yogi, H. Niki, H. Mukuda, Y. Kitaoka, H. Sugawara, and H. Sato: “Spin Susceptibility of $CeOs_4Sb_{12}$ Probed by ^{121}Sb -NMR”, J. Phys. Soc. Jpn. **81** (2012) SB048-1-4.

A04

- [37] *J. Otsuki, H. Kusunose and Y. Kuramoto: “Effect of Disorder on Fermi surface in Heavy Electron Systems”, J. Phys. Soc. Jpn. **79** (2010) 114709-1-5.
- [38] *R. Shiina: “Multipolar Interaction Derived from d-f Hybridization in Pr-Based Filled Skutterudite Compounds”, J. Phys. Soc. Jpn. **81** (2012) 024706-1-11.
- [39] Y. Tada, N. Kawakami, and *S. Fujimoto: “Spin fluctuations and superconductivity in noncentrosymmetric heavy fermion systems $CeRhSi_3$ and $CeIrSi_3$ ”, Phys. Rev. B **81** (2010) 104506-1-16.
- [40] T. Misawa, Y. Yoshitake, and *Y. Motome: “Charge Order in a Two-Dimensional Kondo Lattice Model”, Phys. Rev. Lett. **110** (2013) 246201-1-5.
- [41] *K. Hattori: “Continuous-Time Quantum Monte Carlo Approach for Impurity Anderson Models with Phonon-Assisted Hybridizations”, J. Phys. Soc. Jpn. **82** (2013) 064709-1-5.

書籍：

- [1] 倉本義夫、朝倉書店、「量子多体物理学」、2009年、179ページ
- [2] Y. Kuramoto and Y. Kato, Cambridge University Press, “Dynamics of One-Dimensional Quantum Systems: Inverse-Square Interaction Models”, 2009年、488ページ
- [3] 上田和夫、裳華房、「磁性入門」、2011年、167ページ
- [4] 上田和夫、朝倉書店、「物性物理学ハンドブック」、2012年、pp.175-182
- [5] 佐藤憲昭・三宅和正、名古屋大学出版会、「磁性と超伝導の物理—重い電子系の理解のために」、2012年、400ページ
- [6] N. Kimura et al., Springer, “Non-Centrosymmetric Superconductors: Introduction and Overview (Lecture Notes in Physics)”, eds. E. Bauer and M. Sigrist, 2012年, pp. 35-79 (全 357 ページ)
- [7] Y. Ōnuki et al., Springer, “Non-Centrosymmetric Superconductors: Introduction and Overview (Lecture Notes in Physics)”, eds. E. Bauer and M. Sigrist, 2012年, pp. 81-126 (全 357 ページ)
- [8] Y. Yanase and S. Fujimoto, Springer, “Non-Centrosymmetric Superconductors: Introduction and Overview (Lecture Notes in Physics)”, eds. E. Bauer and M. Sigrist, 2012年, pp. 171-209 (全 357 ページ)
- [9] S. Fujimoto and S. K. Yip, Springer, “Non-Centrosymmetric Superconductors: Introduction and Overview (Lecture Notes in Physics)”, eds. E. Bauer and M. Sigrist, 2012年, pp. 247-266 (全 357 ページ)
- [10] 池田隆介、丸善出版、「超伝導転移の物理」(シュプリンガー現代理論物理学シリーズ)、2012年、157ページ
- [11] S. Suga and A. Sekiyama, Springer, “Photoelectron Spectroscopy: Bulk and Surface Electronic Structures”, 2013年発行予定(印刷中)、358ページ(予定)

領域ホームページによる成果発信：

URLは <http://www.heavy-electrons.jp/> である。本新学術領域研究の活動や研究成果の詳細がアップロードされている。特に、ホームページの論文リストは事務担当が常時更新し、本領域の研究成果が広く国民の目に触れるように努めた。

主催シンポジウム：

研究領域の発展のためには、地道な研究成果の積み重ねの上に立って、研究テーマによってはピークとして育てていく戦略的研究推進が重要である。本研究領域では、前者については主として全体研究会と国際会議を、後者についてはテーマを絞り込んだワークショップを開催することで機動的に対応してきた。特に、中間評価ヒアリングで、計画班と公募班の連携についてのコメントがあったことを受け、公募班主導のワークショップを開催するようにした。具体的には、公募班からテーマを募り、関係する計画研究代表者も協力してワークショップを公募研究代表者に開催して頂くような形にした。

新学術領域研究終了後ではあるが、領域代表の上田和夫が Co-chair をつとめる強相関電子系国際会議 (SCES2013) が 2013 年 8 月 5 日(月)～9 日(金)に東京大学伊藤国際学術研究センターで開催される。これは、本新学術領域研究の国際会議ではないが、本新学術領域研究の研究成果が数多く発表されることになっており、実質的には本新学術領域研究の集大成という位置づけになる。

(1) 全体研究会および国際会議

① 第 1 回全体研究会

日時：2009 年 3 月 9 日 (月) ～3 月 11 日 (水)

場所：東京大学柏キャンパス・柏図書館メディアセンター

参加者：約 200 名、発表：147 件

② 第 2 回全体研究会

日時：2009 年 8 月 18 日 (火) ～8 月 20 日 (木)

場所：広島大学東広島キャンパス

参加者：約 150 名、発表：115 件

③ 重い電子系国際会議 International Conference on Heavy Electrons (ICHE2010)

日時：2010 年 9 月 17 日 (金) ～9 月 20 日 (月)

場所：首都大学東京南大沢キャンパス

参加者：約 260 名、発表：236 件

④ 第 3 回全体研究会

日時：2011 年 6 月 23 日 (木) ～6 月 25 日 (土)

場所：東京大学物性研究所

参加者：約 190 名、発表：163 件

⑤ 第 4 回全体研究会

日時：2013 年 1 月 12 日 (土) ～14 日 (月、祝)

場所：東京工業大学大岡山キャンパス西 9 号館デジタル多目的ホール

参加者：約 180 名、発表：154 件

(2) ワークショップ

① Mini Workshop on Heavy-Fermion Materials

日時：2009 年 5 月 21 日 (木)

場所：首都大学東京南大沢キャンパス

参加者：約 20 名、発表：6 件

② 先端光電子分光による重い電子系研究

日時：2009 年 12 月 25 日 (金) ～12 月 26 日 (土)

場所：岡山大学津島キャンパス理学部大会議室

参加者：約 50 名、発表：22 件

③ 小さなフェルミ面と大きなフェルミ面

日時：2010 年 5 月 10 日 (月) ～5 月 11 日 (火)

場所：富山大学五福キャンパス理学部棟 2F 多目的ホール

参加者：約 40 名、発表：19 件

④ 希薄 f 電子格子系の新しい秩序

日時：2010 年 8 月 1 日 (日) ～8 月 2 日 (月)

場所：高知大学朝倉キャンパス総合研究棟 2F 会議室 1

参加者：約 70 名、発表：28 件

⑤ 強相関物質に関する理論研究の新潮流

日時：2010 年 9 月 8 日（水）～10 日（金）

場所：千葉県生命の森リゾート

参加者：約 30 名、発表：29 件

⑥ 多自由度強相関系の新しい量子相

日時：2010 年 11 月 11 日（金）～11 月 12 日（土）

場所：新潟大学理学部 B 棟 B303 号室

参加者：約 75 名、発表：34 件

⑦ 超伝導、多極子の物理における最近の話題

日時：2012 年 1 月 10 日（火）～11 日（水）

場所：東京大学物性研究所 6F 大会議室

参加者：約 85 名、発表：62 件

⑧ 重い電子系における格子・フォノンの役割

日時：2012 年 6 月 9 日（土）9 時～10 日（日）15 時

場所：岩手大学北桐ホール 総合教育研究棟（教育系）

参加者：約 50 名、発表：37 件

⑨ The Fourth International Workshop on the Dual Nature of f-Electrons

日時：2012 年 7 月 4 日（水）～6 日（金）

場所：姫路市じばさんセンター

参加者：約 70 名、発表：54 件

⑩ カゴ状構造に宿る強相関物性

日時：2012 年 9 月 26 日（水）～28 日（金）

場所：首都大学東京南大沢キャンパス 11 号館 204 室

参加者：約 75 名、発表：56 件

⑪ 純良単結晶育成と重い電子系のフェルミ面

日時：2012 年 11 月 23 日（金）9 時～11 月 24 日（土）17 時

場所：琉球大学研究者交流施設（50 周年記念会館）

参加者：約 40 名、発表：31 件

アウトリーチ活動：

・日本学術振興会ひらめき☆ときめきサイエンス

「ようこそ、マテリアルサイエンスの世界へ～超伝導・超流動と磁石の不思議発見～」(実施代表者：A04 堀田貴嗣) というタイトルで 2012 年 11 月 3 日に首都大学東京南大沢キャンパスで実施した。A03-002 青木勇二が講義やデモ実験を担当し、カゴ状構造を持つ重い電子系化合物を中高生に紹介した。

・一般向けの講演会

[1] 金子耕士：大学公開講座「単結晶中性子回折を用いたカゴ状化合物の精密構造解析」、広島大学、2009 年 10 月 29 日

[2] 柳澤達也：「超音波で観る固体中の電子 ～赤ちゃんのガラガラから iPod まで～」、北海道大学・九州大学合同活動報告会、都市センターホテル（東京都千代田区）、2009 年 12 月 10 日

[3] 大貫惇睦：第 56 回物性若手夏の学校講義「重い電子系の物理」、2011 年 8 月 2 日～8 月 4 日

[4] 松田祐司：京都大学 GCOE 第 4 回市民講座、2011 年 10 月 10 日

[5] 佐藤憲昭：日本磁気歯科学会第 20 回大会特別講演「超伝導になる磁石の物理学」、愛知学院大学、名古屋、2011 年 10 月 31 日

[6] 芳賀芳範：2012 年度日本原子力研究開発機構サイエンスカフェ講師、2012 年 3 月 17 日

[7] 芳賀芳範：2012 年度日本物理学会科学セミナー講師、2012 年 8 月 10 日

[8] 大貫惇睦：日本物理学会 2012 秋の分科会市民科学講演会「新しい物質が拓く物理」、2012 年 9 月 25 日

[9] 石田憲二：物理学会大阪支部公開シンポジウム、2012 年 10 月 21 日

[10] 大貫惇睦：第 118 回日本物理学会九支部例会特別講演「物性物理学の魅力」、2012 年 12 月 8 日

10. 当該学問分野及び関連学問分野への貢献度（1 ページ程度）

研究領域の研究成果が、当該学問分野や関連分野に与えたインパクトや波及効果などについて記述してください。

当新学術領域研究では、重い電子系形成の機構として従来から議論されてきた磁気秩序に関する量子相転移から視野を広げ、さまざまな物質系における、さまざまな秩序変数に関する量子臨界性を追求することをその目的とした。スピン 1/2、素電荷 e 、電子質量 m と云う普遍的な性質で特徴づけられる電子の集団が、格子という舞台の中で相互作用をすることによって多様な物質相が形成されるというのは物質科学の普遍的パラダイムである。重い電子系の形成と秩序化はその普遍的パラダイムの典型例である。

重い電子系における長年の謎の一つである URu_2Si_2 の隠れた秩序は当新学術領域において集中的に研究がなされ、最終的解決にはまだ時間が必要であるが、多極子秩序の観点から格段に研究が進んだ。多極子、分野によっては軌道とも呼ばれるが、の自由度の重要性は、鉄ヒ素系を含む遷移金属化合物でも強く認識されるようになっている。

UPt_3 は最も古くから研究されている重い電子系の超伝導であり、超伝導の多重相図や、NMR の実験から p 波超伝導の可能性が指摘されて久しいが、その超伝導秩序変数の具体形については未確定であった。磁場中で角度回転をして熱伝導度を精密に測定することによって、秩序変数の関数形が絞られた。また、反転対称性のない系における超伝導の研究、強磁性と超伝導の共存を示す実験などの進展もこの新学術領域研究から生じて、超伝導秩序変数の概念が広がった、ということが出来る。

URu_2Si_2 の隠れた秩序に関しては、秩序状態における新しい準粒子状態の出現が、レーザー光源を用いた角度分解光電子分光の開発によって可能となった。光電子分光では、放射光源・レーザー光源を問わず、バルク敏感性と分解能が著しく向上した。また、 UPt_3 で用いられた磁場中熱伝導の角度回転による精密実験も重い電子系に限らず、超伝導体で広く応用されることが期待される実験手段である。重い電子系の研究では純良単結晶を用いた精密な実験が不可欠であり、最先端の単結晶育成手法と低温精密物性実験技術が培われるフィールドになっている。

$\text{YbCo}_2\text{Zn}_{20}$ は特に有効質量の大きな物質として知られていたが、同じ 1-2-20 構造をもつ Pr の系がこの新学術領域研究において新たに合成され多極子秩序と超伝導が発見された。これは多極子秩序に関する量子臨界性の観点からも重要であるが、研究対象とする物質群と云う観点からも重要で、重い電子系の物質群が従来の Ce, U 化合物から Yb, Pr 化合物に広がったこともこの領域の重要な成果である。研究対象となる物質群の拡張は当該分野及び、関連分野への重要な貢献であると考えられる。

エピタキシャル成長は、量子デバイス研究の基礎であるナノスケールサイエンスで基本となる技法であるが、これまで重い電子系のエピタキシャル成長の成功例の報告はなかった。この新学術領域研究の成果の一つとして、 CeIn_3 - LaIn_3 や CeCoIn_5 - YbCoIn_5 の人工超格子の作成に成功したことも再度強調しておきたい。重い電子系物質を用いた人工構造における強相関電子系の研究は新たなフロントを構成することになると期待される。

最後に、この分野の研究における国際的な貢献について触れておきたい。応用研究と基礎研究の関連は常に微妙で難しい問題であるが、たがいに刺激しあってはじめて両者の健全な発展を望むことが出来ることは言うまでもない。重い電子系の形成と秩序化の研究はそれ自体としては純粋な基礎科学であるが、物質科学全般の基本となる分野である。そうした認識は諸外国でも共有されていると見えて、当新学術領域研究の存在は好意をもって迎えられただけでなく、中国では一昨年から同様な趣旨の研究プロジェクトが中国科学院と浙江大学で始まったと聞いている。国際的な規模での当該学問分野への貢献といえよう。