

新物質科学研究部門の研究の現状と将来の可能性

新物質科学研究部門主任 瀧川 仁

はじめに

平成 25 年 4 月の時点で、新物質科学研究部門は榊原、瀧川、中辻、森の 4 所員と大串特任准教授が主宰する 5 研究室からなっている。平成 23 年度末には地球科学を軸に高圧高温物性を推進してきた八木所員が定年退職され、24 年度末には光を用いて有機物質の研究を進めてきた田島所員が転出されたので、大分こじんまりしたグループとなった。物性研の中での新物質部門の果たすべき役割は、新物質の合成と先端的測定手段の緊密な連携により、新現象・新概念の創出につながるような研究を展開することであろう。そのためには、部門内はもとより部門を超えた所内、所外との共同研究が重要である。以下に部門の研究の現状を簡単に紹介した後、現状の課題と将来の可能性について考えてみたい。

研究の現状

5 つの研究室のテーマはいずれも強相関電子物性というキーワードを共有している。そのうち大串研、中辻研、森研は物質開発を中心とした研究スタイルを取っているのに対し、榊原研、瀧川研は独自性のある測定手段によって特色を出している。

大串研：遷移金属化合物の物質開発。鉄系高温超電導体の物性解明を、物性研内の共同研究チームの中心となって進める一方で、地球科学など固体物理との境界分野にも注目して物質探索の可能性を広げている。例えば、地球科学分野で最初に発見されたポストペロブスカイト構造を持つイリジウム酸化物を高圧合成によって作成、放射光 X 線実験によって磁気構造を決定し、キャリアドーピングによる金属絶縁体転移を観測した(図 1)。また同じく高圧合成によって新しい $5d$ 遷移金属酸化物の超伝導体 Hg_xReO_3 を発見し、 Hg 原子のラットリングと呼ばれる非調和イオン振動の重要性を示唆する結果を得ている。

中辻研：遷移金属化合物と希土類化合物の物質開発を通じて、重い電子系の量子臨界現象や、幾何学的にフラストレートした磁性体を舞台として、強相関電子系における新しい量子液体の創出を目指している。前者に関しては、新物質 YbAlB_4 において重い電子系 Yb 化合物として初めての超伝導と、ゼロ磁場における量子臨界現象を発見した(図 2)。また最近では $\text{PrT}_2\text{Al}_{20}$ ($T=\text{Ti}, \text{V}$) において非磁性の四極子秩序に伴う量子臨界現象と重い電子の超伝導状態を見出している。後者に関しては、金属的なスピニアイス物質 $\text{Pr}_2\text{Ir}_2\text{O}_7$ の低温において磁気秩序を伴わないカイラルスピン液体状態が観測され、また $\text{Ba}_3\text{CuSb}_2\text{O}_9$ においてはヤーンテラー効果によって軌道縮退が解けずに、スピンと軌道が結合した新しいタイプのスピン液体が実現している可能性を指摘した。

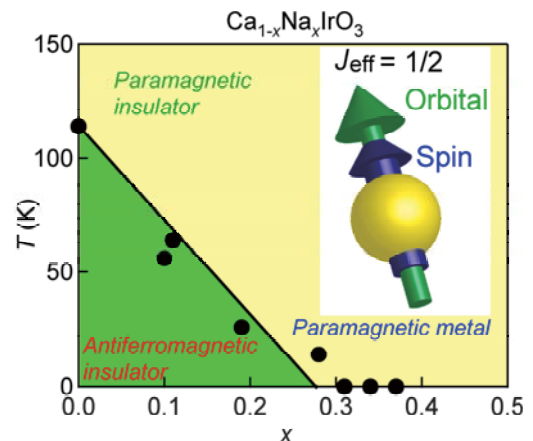


図 1. ポストペロブスカイト系 $\text{Ca}_{1-x}\text{Na}_x\text{IrO}_3$ の相図

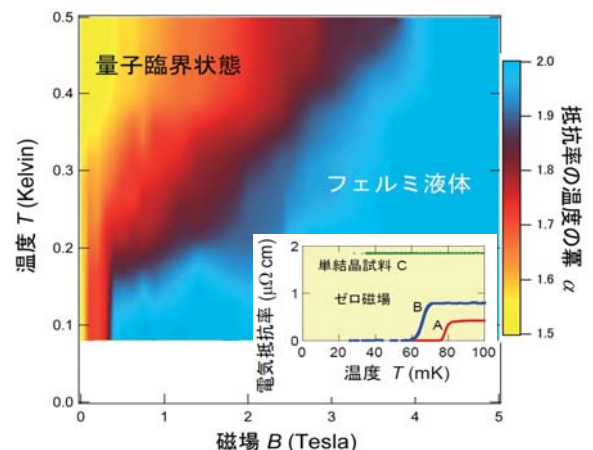


図 2. $\beta\text{-YbAlB}_4$ における超伝導とゼロ磁場量子臨界状態。

極低温においてこのような量子的コヒーレント状態を実現するには、極めて純良な単結晶の育成が必要であり、高純度の結晶育成と、極低温や圧力下における比熱や輸送現象の測定を主要な実験手段としている。

森研：多様性に富む分子性物質を対象とし、従来の物質群では見られない物性創出を目指した物質開発を進めている。これまで、有機伝導体の研究においては、一見複雑に見える構造も、少数のフロンティア分子軌道に由来する比較的単純なバンド構造で表されること、そしてその強相関効果が精力的に研究されてきた。さらに近年、分子の持つ内部自由度と結合した電子系のダイナミカルな現象に着目して物質開発を行っている。その一つは電子-プロトンが相関する新電子状態・新機能の創成で、生体系物質のエネルギー変換でも重要な役割を担っていることが知られている。プロトンは電子のバンド構造に関わるだけでなく、量子効果を示し、水素結合を通して分子の電子状態及び分子間相互作用をダイナミックに制御するなど、多彩な役割を持つ。森グループはそのような電子にプロトンが相関する系として、従来の複数成分から成る電荷移動錯体とは異なり、単一成分内で電荷移動が起こり金属状態を示す、新規純有機伝導体を開発した(図3)。さらに同型の水素体はモット絶縁体であるにもかかわらず、基底状態はスピン液体状態であることを発見し、また重水素体は、その効果で水素体とは全く異なる非磁性絶縁相の基底状態であることを見出した。さらに、分子の自由度を電子系に反映させた物質として、チェッカーボード型電荷秩序系 β -(*meso*-DMBEDT-TTF)₂PF₆を開発し、圧力下で超伝導相、電場、光応答として、非線形現象及び準安定状態を観測し、強相関系で非平衡科学の研究も行っている。

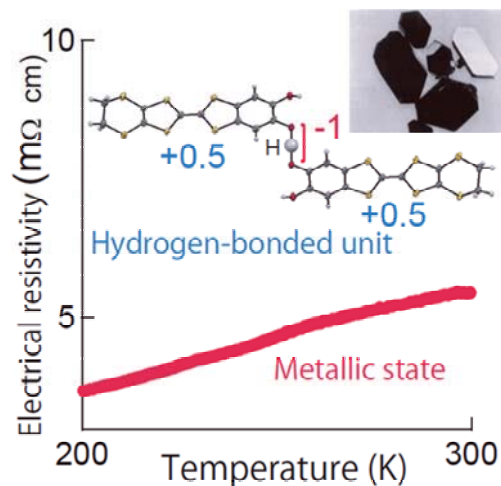


図3. 電子-プロトン相関系の純有機成分伝導体における金属状態。

榎原研：極低温における精密な測定技術を独自に開発し、重い電子系や量子スピン系の広範な研究を行っている。その第1はファラデー法を用いた希釈冷凍機温度領域の精密磁化測定法で(図4)、これまで重い電子系やフラストレートしたスピン系の低温磁気相図の決定や秩序相の同定に大きな威力を発揮してきた。最近では 10^{-6} emu 以下の検出感度(従来より2桁改善)を実現することにより、微小な単結晶試料など適用範囲が大きく広がった。第2は水平面内で方位制御可能な磁場下での低温比熱測定法である。この測定法は異方的超伝導体のギャップノードの構造決定に威力を発揮しており、これまでに CeCoIn₅ を始め、多くの重い電子系超伝導体の実験が行われ、重要な結果が得られている。これらの装置は、汎用性があり、且つ他の測定では得られない重要な情報を提供するので、最近特に所内・所外との共同利用研究が増加している。

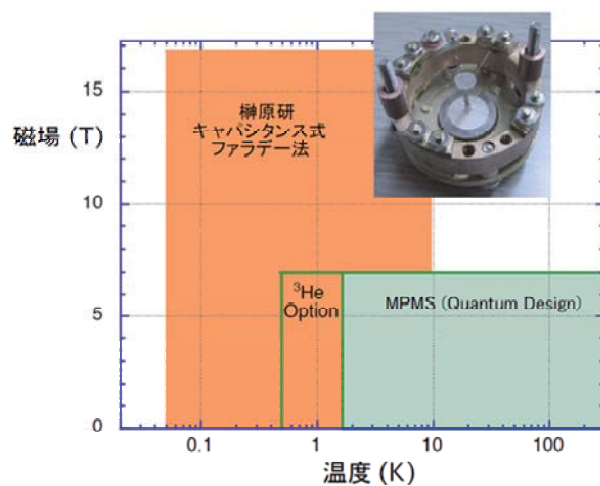


図4. 磁化測定装置の比較。写真はキャパシタンスセル。

瀧川研：核磁気共鳴(NMR)を用いて量子スピン系や強相関電子系の研究を行っている。特に、磁場中で精密な角度分解スペクトルを得るプローブを開発し、結晶中の局所サイト対称性の正確な情報から、多様な対称性の破れやエキゾチックな秩序相の構造を決定する実験を試みている。また、このような測定を希釈冷凍機温度領域、強磁場、高圧下などの極限環境下でも行うための技術開発を行っている(図5)。最近の研究例としては、フラストレートしたスピン系が示す磁場中量子相転移の観測、特に磁化プラトーにおけるスピン超構造の決定、鉄系超伝導体における反強磁性と超伝導の共存や整合-非整合転移、*f* 電子系における多極子秩序の同定、などがある。また海外の定常強磁場施設との共同研究も積極的に行っている。

共同研究の現状：所員 1 助教 1 の基本単位で、専門性の強い実験手法をベースとする小研究室の集まりである新物質では、インパクトのある研究成果を出すには部門内、或いは部門を超えての共同研究が欠かせない。多様な専門性を持つ研究室が一体となって一つのテーマを追求するとき、物性研の強みが最大限に発揮されるであろう。鉄系超伝導体の研究が、大串研物質合成グループを中心として、輸送現象、角度分解光電子分光、中性子散乱、NMR、高圧下物性、強磁場下物性など、広汎な実験手段を駆使した共同研究として展開されたのは、その例である。最近では、中辻研で開発された重い電子/価数揺動系の研究が、輸送現象、磁化測定、光電子分光、高圧物性、NMR を用いて組織的に進展している。こうして見ると、共同研究チームの核となるのは物質開発であるケースが多い。新物質開発は新物質部門以外に物質設計評価施設でも行われており、この施設と新物質の間でもフラストレート磁性などの分野で精力的に共同研究が行われている。

現状の課題

小研究室の集合体である新物質では、いかに強力な共同研究体制を作るかが重要である。特に物性研には光科学(放射光・レーザー)、中性子散乱、パルス強磁場など大型の先端の実験施設があり、その性能を十分に発揮するような多くのテーマが新物質から発信されることが望まれる。上述したように、そのような例は既にいくつか現れているが、まだ十分とはいえないように思われる。また、実験と理論との連携に関しては大きな改善の余地がある。実験、理論を問わず研究室間の連携を強めるには、日頃からお互いに何に興味があり何ができるのか、といった自発的なコミュニケーションを活発にする必要があるだろう。

一方で物質探索においては研究の指針も重要であるが、その成否は偶然に左右される部分があり、何らかの試行錯誤、したがってある程度のマンパワーが欠かせない。これは今に始まった問題ではないが、近年定員削減や博士課程学生が減少する中で、物質開発グループの規模拡大への系統的な取り組みが必要となっているように思う。

共同利用も新物質の重要な使命である。物質合成に関しては主として物質設計評価施設の試料合成室が共同利用を受け入れているが、物性測定に関しては新物質も一定の共同利用を受け入れている。ただし、測定の内容が次第に高度になり、角度分解など精密な情報が必要となるにつれて、一つの課題に対し多大な実験日数(数週間以上)を要するものが多くなり、今の共同利用の枠組みでは困難な部分も出てきている。

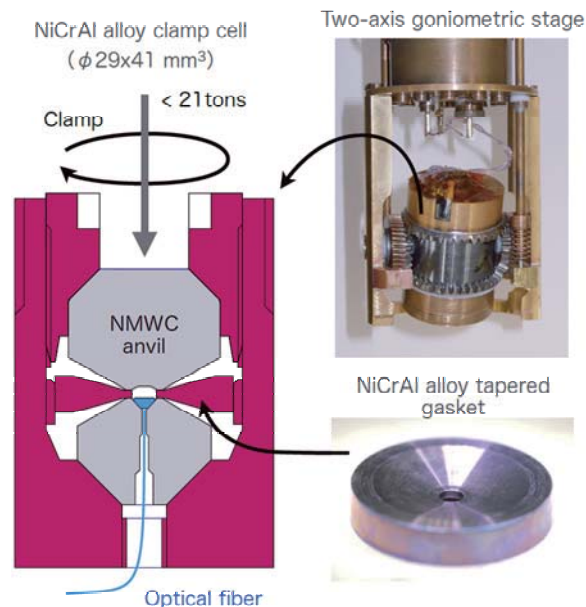


図5. 10GPa までの高圧を発生し、磁場中で回転可能なNMR用対向アンビル圧力セル。

将来の可能性：

将来計画の議論に際しては、ある程度確立された分野に精緻で豊かなサイエンスを实らせる研究と、新しい分野を開拓する活動の 2 つの視点を考える必要がある。物性研ではこれまで前者で成果が出ているが、後者では物足りないということがよく言われてきた。新物質部門は現在全て強相関電子系の研究グループからなっている。前者の視点での課題は、強相関電子系の研究を更に発展させることであろう。4 月に極限環境物性部門に着任する山下所員の研究テーマは、新物質の所員と共通するところが多く、強相関電子系の極低温輸送現象測定を通して、共同研究が進むことが期待される。また、八木、田島 2 所員が抜けた後、オリジナルな実験手法を開発しながら強相関系の物理を展開する研究者を迎えたい。今後展開すべきサイエンスについてここで詳述はできないが、例えば、強相関系においてベリー位相が関係する新規な量子現象や、近年注目されている表面や界面におけるトポロジカルな効果が強相関系において引き起こす現象などが考えられる。これらについては理論グループとの連携が必要であり、更にナノスケール物性との連携が生まれると、物性研のオリジナルな方向が出ることも期待される。

過去の物性研究の歴史を見ると、有機導体、重い f 電子系、銅酸化物、炭素系物質など新物質の発見が新しい分野を作ってきた。その意味では、新分野の開拓という第 2 の課題に対しては、対象とする物質の枠を広げることを考えるべきであろう。現在物性研における物質開発の活動は大きく無機酸化物固体、金属間化合物、有機固体と分けることができるが、将来、金属錯体、クラスター、生体系物質などが物性研究の対象となることにより、新しい機能性物質の発見につながる可能性がある。具体的にどのような方向に進むべきかについては慎重な検討が必要で、まずは個々のテーマについてのワークショップなどを通じて、物性研所外との共同研究体制を作るところから始めるべきであろう。

最後に組織再編の可能性について。1996 年に物性研の第 3 世代の組織が出来て以来、中性子、強磁場、LASOR、CMSI など、大型装置を維持する施設の組織が変化した結果、残された small science を担う組織形態が必ずしも最適とは言えない状況になっている。何らかの組織改編が必要であると思われるが、研究室間の連携や緊密なコミュニケーションを活性化するための、ベストなあり方を今後考えていきたい。

(平成 25 年 3 月記す。)