

極限環境物性研究部門

極限環境物性研究部門主任 上床 美也

極限環境物性研究部門は、超強磁場グループ(3 研究室)、極低温グループ(2 研究室)、超高压グループ(1 研究室)の 5 研究室から構成されていた。2006 年度の国際超強磁場施設の創設により 2 研究室が独立し 4 研究室に、さらに 2009 年度末に石本所員が退職し、2010 年度から八木および榊原所員が兼任所員として部門に参加し、2011 年度末には久保田所員が退職した。現在、強磁場グループとして長田研究室、高压グループとして上床研究室および併任研究室として榊原研究室が活動している。また、2013 年 4 月には、極低温グループとして山下研究室が open する。超低温グループとしては、これまでの He を対象物質とした研究から、極低温環境下での新物質の物性に研究対象を拡張する予定である。

これまで、極限環境部門では、低温、磁場、超高压の各環境の特徴や技術を生かした極限環境下において、それぞれ特徴ある研究を押し進め来た。特に、核断熱冷凍機や超高压発生装置および強磁場を用いた量子現象の研究は、部門の特徴を生かした独自の研究である。今後もこれまで以上に、極限環境発生技術を駆使した精密物性測定による先端研究を行っていく予定である。

また、次世代の研究計画として、“超高压科学研究拠点整備”計画を概算要求として申請している。本概算要求は、10GPa 以上の極限環境下での物質創成および複合極限環境下での構造物性や精密物性測定の研究を目標に掲げ、全国共同利用の拠点形成を目指している。

以下、部門に所属する研究室毎に、これまでの研究経緯および今後の研究計画を記す。

長田研究室

本研究室は柏移転の前年の 1998 年 4 月に先端研から物性研の極限環境物性研究部門に移り、強磁場下電子物性の研究を行ってきた。2005 年に内田和人技術専門職員が本研究室に異動になり、2006 年度には神戸大学准教授に転出した大道英二助手の後任として鴻池貴子助教が着任し現在に至っている。柏移転当初は C 棟設置のパルス強磁場装置群を使用した極限物性計測を軸に研究を展開したが(この詳細は既に「物性研だより」(2004)に記した)、2006 年の国際超強磁場科学研究施設発足以後は、定常強磁場実験に研究方向を転換した。現在の保有装置は、超伝導磁石、小型パルス磁場装置、希釈冷凍機、微細加工装置、成膜装置など競争的資金で揃えた標準的なもので、目的に応じて機動的に再構成・運用している。

2005 年に機械的劈開法によるグラフェンの作製と質量ゼロの 2 次元 Dirac 電子系が実証されて以来、グラフェン研究は基礎・応用両面で爆発的進展を示すと共に、トポロジカル絶縁体などの新分野に重大な影響を及ぼしてきた。この Dirac 電子系を強磁場物性の観点から眺めると、「弱磁場で強磁場電子状態を実現できる系」と映る。これは Landau 準位間隔が大きく、容易に強磁場量子極限が実現できるからである。特に Dirac 系の $N=0$ Landau 準位は電子性と正孔性を併せ持つと共にスピンの自由度も有する興味深い状態である。そこで 2006 年以降、現有装置で研究可能な強磁場電子物性の対象として「固体中 Dirac 電子系」に研究の舵を切った。具体的な研究対象は①有機 Dirac 電子系と②グラフェン系である。

①2006 年に有機導体 α -(BEDT-TTF) $_2$ I $_3$ の压力下金属相がゼロギャップ Dirac 電子系であることが強束縛バンド計算で指摘されたことを受けて、2008 年、本系の長年の未解決問題であった層間伝導の巨大負性磁気抵抗を量子極限下多層 Dirac 電子系の物性として半定量的に説明した。同様に異常な角度依存性を持つ層間 Hall 効果の理論的解明にも成功し、本系における Dirac 電子系の存在を確実なものとした。一方、鴻池助教は単結晶試料の作製を行うと共に、本系の比熱や熱電効果などの熱物性測定を压力下で試み、Dirac 電子系特有の振舞の実験的観測に成功した。一般に 2 次元 Dirac 電子系の量子極限では $N=0$ Landau 準位の縮退が自発的に解け、ヘリカル・エッジ状態を有する量子 Hall 強磁性相と量子 Hall 絶縁相の何れかが非ドープ系の基底状態として実現する。佐藤光幸特任研究員は複数の検証実験により、ヘリカル

表面状態を伴う量子 Hall 強磁性相の発現を確認し、量子 Hall 絶縁相が現れるグラフェンとの相違を明らかにした。

②グラフェン系については、2005 年に多層グラファイト結晶の Dirac 粒子性の研究を開始した。2009 年以降大学院生全員の参加を得て、単層グラフェン試料作製上の諸問題を整理・解決して実験技術が確立した。内田技術専門職員は個々の問題解決と技術開発に大きく貢献すると共に、グラフェンの視認性向上を目的とした新装置を発明・試作し、2011 年に特許出願を行った。本研究室では主にグラフェン単層/2 層接合などの新奇量子伝導の解明と応用を目標に研究を進めている。量子 Hall 状態の単層/2 層界面は「バルク-エッジ対応」の様子を調べる格好の舞台であり、チャンネル数を最小化した界面金属状態が実現することが明らかになっている。

今後の研究展開方針としては、主に電気伝導を手段として新奇電子系の磁場中量子現象の研究を継続していく予定である。特徴ある大規模・高性能のハードウェアはないため、ソフトウェアに重点を置いた機動的な展開を図る。そのためには研究対象の選定が重要になるが、当面は Dirac 電子系、トポロジカル絶縁体周辺のシンプレクティックな電子系を扱うことになるだろう。現在、外国人客員員として滞在中の Kang 教授 (Bi 研究で著名な Behnia 教授の共同研究者) も Dirac 電子系としての Bi 関連物質に興味を持っており、有意義な共同研究が展開できればと期待している。

上床研究室

上床研は 2001 年 4 月発足し、同年辺土正人氏を助教として迎え (2006 年に琉球大学に准教授として転出)、また 2007 年 4 月より松林和幸氏を助教と迎え、高圧力下での物性研究を行っている。

高圧下の物性研究を行うためには、良い静水圧環境の実現が必須であると共に、試料セットが容易に出来る広い圧力発生空間、広いエネルギー領域での研究を可能とする超高圧力の発生、複合極限環境下での物性研究を容易にする小さな装置が求められる。これらの相反する条件を満足する圧力発生装置の開発を行い、4 GPa 程度まで発生可能な二層式ピストンシリンダー型圧力装置、キュービックアンビル圧力発生装置、対向アンビル式圧力装置を整備している。現在、個々の研究目的に合わせた最適の圧力装置と、冷凍機や超電導磁石を組み合わせた複合極限環境下 (圧力 ~10 GPa、温度 ~0.05 K、磁場 20 T) での精密物性測定が可能となっている。

チューニングパラメータとして圧力や磁場を駆使する複合環境下での研究は、幅広い研究分野にまたがっている。その中で強相関係物質、特に磁性体の示す様々な興味深い諸物性については、非磁性-磁性、金属(磁性)-超伝導、絶縁体-金属-超伝導等の種々の相転移の起源(機構)解明や新奇物性現象の発見がなされている。最近研究室で得られた、希土類金属間化合物 $\text{YbCo}_2\text{Zn}_{20}$ における圧力誘起磁気秩序相の発見や磁場誘起のメタ磁性転移の圧力依存性の研究は、これまでの未解決問題を解決する可能性が秘められている。また、四極子秩序を持つ近藤物質 $\text{PrTi}_2\text{Al}_{20}$ における 5 GPa 程度以上の高圧下で出現する重い電子状態の超伝導の発見は、その出現機構として四極子秩序が関与している可能性を示唆している興味深い結果であり、その転移温度は 1.1 K(at 8.7 GPa) にも達する。これらの実験結果は圧力や磁場が臨界現象を連続的にチューニング出来る良いパラメータであることを改めて示していると同時に、相転移前後での諸物性の精密測定が今後の物性研究に重要であることを示唆している。

現在、物性研究の基本測定としては、電気抵抗測定、磁化測定、比熱測定およびそれぞれの磁場効果が測定可能である。特に ~10 GPa、~0.45 K、5 T までの圧力・温度・磁場の複合極限環境下での測定は、比較的簡便に誰でも精度良い測定が可能となっており、新物質探索と既成物質の未解決問題の解明が大幅に進むと期待される。また、常圧下での測定に遜色ない圧力下での精密測定は、これまでの単なる圧力相図を探索する研究を前進させ、高圧下でも常圧と同様にその絶対値を議論することが可能となり、物理を統一的に理解する事が可能となる。将来的には、この測定圧力範囲をさらに広げた複合極限環境下での高精度な物性測定を可能とする事を目指している。