

# 物性研だより

第52巻  
第3号

2012年10月

## 目次

- 1 極限コヒーレント光科学研究センターの設立 II . . . . . 辛 埴  
5 中性子科学研究施設の現状と展望 . . . . . 柴山 充弘  
17 物性研での37年間を振り返って . . . . . 八木 健彦  
21 物性研を離れて . . . . . 久保田 実

### 研究室だより

- 25 ○ 押川研究室  
35 ○ 松田巖研究室

### 物性研滞在型国際ワークショップ

- 42 ○ 「MASP2012」報告

### ISSP国際ワークショップ

- 47 ○ 「コヒーレント軟X線科学」

### ISSPワークショップ

- 51 ○ 表面・界面における輸送と変換  
58 ○ 定常中性子源三軸分光器の役割と偏極中性子散乱

- 65 客員教授を経験して . . . . . 梶原 孝志

- 67 平成23年度客員所員を経験して . . . . . 江 偉 華

- 68 物性研究所セミナー

### 物性研ニュース

- 72 ○ 浜根大輔技術職員(電子顕微鏡室)、第9回日本鉱物科学会研究奨励賞を受賞  
73 ○ 平成24年度後期短期研究会一覧  
74 ○ 平成24年度後期外来研究員一覧  
87 ○ 平成24年度後期スーパーコンピュータ共同利用採択課題一覧  
90 ○ 平成25年度前期共同利用の公募について

### 編集後記



東京大学物性研究所

Copyright ©2012 Institute for Solid State Physics,  
The University of Tokyo. All rights Reserved.

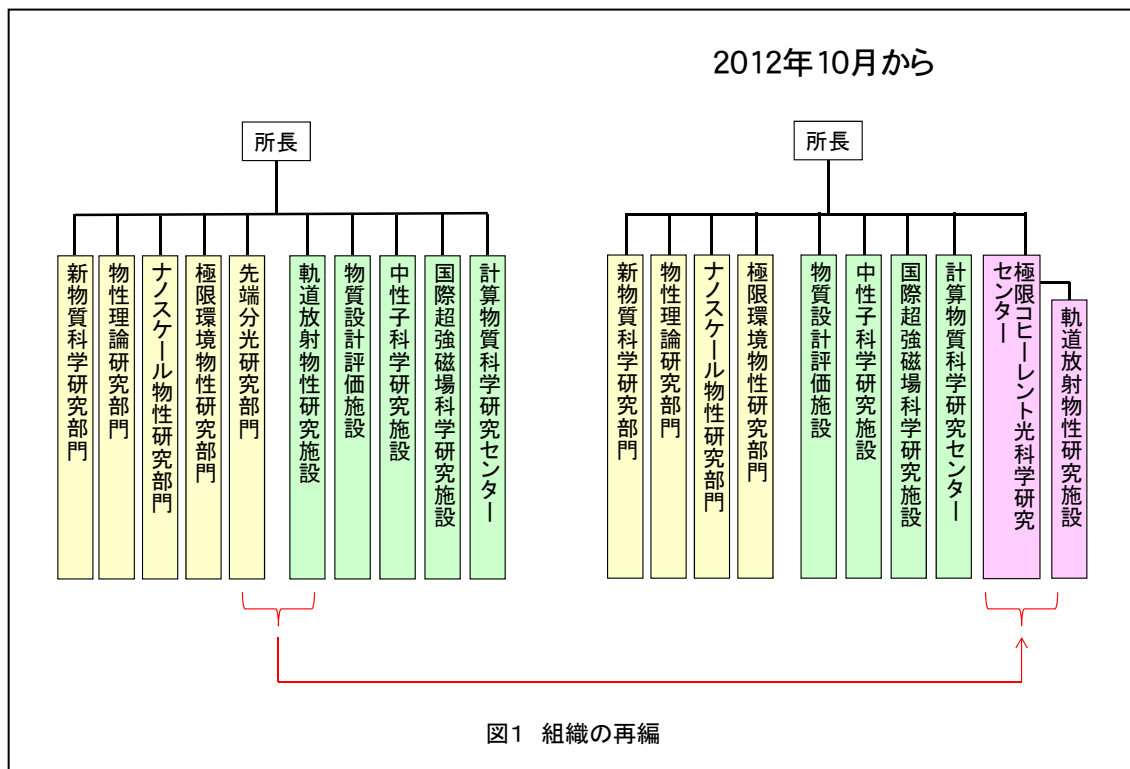
ISSN 0385-9843

# 極限コヒーレント光科学研究センターの設立 II

センター長 辛 埴

前回の物性研だより(第 52 巻第 2 号)では、小森先生から「極限コヒーレント光科学研究センターの設立」の紹介がありました。歴史的な経緯は、小森先生の記事のなかにも書かれてありますので、本記事では、その後編として「極限コヒーレント光科学研究センターの設立」が目指しているサイエンスと共同利用についてももう少し詳しい内容を書かせていただきます。

既に、前号の記事で、お知らせ致しましたように、物性研究所では、先端分光研究部門と軌道放射物性研究施設を統合・再編した新しい組織として、極限コヒーレント光科学研究センターが本年 10 月 1 日に発足しました。英語名は、Laser and Synchrotron Research Center です。由緒ある SOR 施設の名前と、Laser の名前をできるだけ残そうとして、略称は LASOR センターとしました。LASOR センターは、当面、共通の光科学を目指すサイエンス中心のセンターとし、これまで通り軌道放射物性研究施設(SOR 施設)は放射光関係の共同利用の窓口として残します。



LASOR センターは、物性研究所が長い間培ってきた極限物性部門極限レーザー(その後、先端分光研究部門に改組)と軌道放射物性研究施設(SOR 施設)の 2 つの光科学を統合・再編させることによって、新しい光科学を物性研究所から発信できるようにするものです。レーザー科学と放射光科学は、同じ光科学ながら、異なる歴史を持ち、かなり異なる文化を持っているのは皆さんご存じのことです。サイエンスとして融合するのに、5 年、10 年かかるかもしれませんので、時期的に少し早すぎる、あるいは、少し無理があると感じる方がいらっしゃるかもしれません。しかし、レーザー科学と放射光科学の最近の進展や、海外での動向を見据えたときに、これが物性研究所のとるべき方向と考え、関係者の間で長い時間をかけて議論し、この結論を得たものです。この際の経緯は小森先生が前号の記事に詳しく書かれています。

物性研究所の極限レーザーグループは、1980年代に始まった極限物性計画の一環として、高強度超短パルスレーザー、高次高調波、コヒーレント分光などの研究を進め、真空紫外・軟 X 線領域での新光源を開発してきました。近年、小林グループはファイバーレーザーを主として用い、高繰り返しで大強度、高安定な光源を開発し、超高分解能分光や標準光源を用いた精密分光の研究を行っています。一方、板谷グループは、チタンサファイアレーザーをベースにした数 100eV の軟 X 線領域の大強度、フェムト秒・アト秒レーザーの開発を行い、超高速時間分解分光・非線型分光などの物性科学への応用が可能になっています。特に、物性研究所のレーザーグループの特徴は、最先端の極限的な性能を持つレーザーを開発するだけでなく、安定性や高繰り返し性能を重視することによって、物性研究用として使いやすいものを開発し、物性研究や物質開発へのフィードバックをおこなっている点です。更に、これらのレーザーや測定装置を日本全国や海外に共同利用施設として提供しています。物性研究とその共同利用という点が、国内外を含めて、他のレーザー関係の研究所と大きく異なる点です。このような研究は、市販のレーザーを並べただけではとうてい実現できず、自ら、レーザー開発を行う環境がなければできません。レーザーの研究所ではなく、物性研究所にレーザー開発グループがあることによって、はじめて物性研究との緊密な連携が可能となります。これは他の研究機関には見られない著しい特徴と言えます。

一方、物性研究所軌道放射物性研究施設は、物性研究用の放射光リングである SOR-RING を世界で初めて建設しました。最も古い歴史ある研究施設であると言っても過言ではありません。SOR-RING は、元々、物性研究者が主体となつて必要とする光源の開発を行ってきた経緯もあり、光源開発や分光法の開発と同時に、共同利用が極めて重要な位置を占めています。その後、物性研究所がフォトンファクトリーに建設した二つのビームラインと、SPring-8 BL07 に新設した東京大学放射光連携研究機構のアウトステーションビームラインにおいて、真空紫外・軟 X 線を用いた分光測定手法を開拓し、共同利用を推進してきました。アウトステーションではピコ秒領域の半導体表面の時間分解光電子分光と、超高分解能軟 X 線発光分光による水や生体物質、磁性体のオービトンやマグノンの分散、ナノ ESCA による半導体界面の 3 次元電子解析などの研究を行ってきております。近年、放射光も蓄積リングの性能向上や長尺アンジュレータの開発により、輝度やコヒーレンスが著しく向上してきています。今後の放射光科学の進歩は、2 つの方向があります。世界中で計画されている Ultimate Storage Ring というような究極の輝度を目指す一方、線形加速器ベースの X 線自由電子レーザー(XFEL)のように、光学レーザー並みのコヒーレンスやパルス性をもつ光が軟 X 線や X 線領域においても利用可能になりつつあります。放射光においても、レーザーと同じように、高分解能分光と時間パルス特性を重視する研究が、今後は更に重要になってくると思われます。

LASOR センターは、最近、急速に発展しつつあるレーザー科学や放射光科学をもとに、新しい光科学を目指しています。例えば、高分解能光電子分光においては、低エネルギーでの超高分解能はレーザーを使用しますが、エネルギー可変で高エネルギーの軟 X 線領域は放射光と使い分けることになるものと思われます。光電子分光の進歩は著しく、もはや物質科学にはかかせない標準的手法となっていますが、レーザーと放射光それぞれの光源の長所を最大限に生かし、両者が協力し合って行われるべきです。現在では、試料温度 1 K の極低温で  $\mu\text{eV}$  の分解能を持つ光電子分光が、物質科学に多大な影響を与えている事はよく知られていることです。また、時間分解分光では、フェムト秒領域はレーザー、ピコ秒領域は放射光が元々得意な分野ですが、今後は、軟 X 線レーザー、放射光、自由電子レーザーなどの光源を縦横無尽に駆使しつつ発展するものと思われます。軟 X 線領域の時間分解分光は、これまで未開の分野でしたが、今後の発展が期待される研究分野です。軟 X 線時間分解光電子分光では、半導体表面の研究が現在、SPring-8 の BL07 で行われていますが、軟 X 線レーザーや自由電子レーザーを用いて CDW 物質や強相関物質の光誘起相転移、表面ナノ物質の研究が世界中でなされつつあります。

以上の例は現在進行中の光科学ですが、今後は更に新しい光科学が発展することが期待されます。例えば、現在物性研究所では、軟 X 線レーザーや自由電子レーザーを用いて、軟 X 線カー効果による磁性相転移観測や液体、タンパク質の軟 X 線発光の時間分解分光を計画中です。更に、レーザーと放射光両分野で培われた実験技術や概念を持ち寄ることにより、今までは考えも付かなかったような軟 X 線領域のコヒーレンスやアト秒パルスを利用した新しい光科学が生まれ、物性研究に貢献することが期待されます。

図2はLASORセンターが目指しているサイエンスと分光手法です。センターでは3つのサイエンス(横系)を目指しています。(1)極限レーザーや高輝度ビームラインの開発を通してコヒーレント光源を開拓し、(2)それを基にした軟X線分光を開発すると共に物性科学に貢献します。一方、(3)通常のレーザーのコヒーレンスを利用する光科学もこれまで通り推進する予定です。その中核となる分光法(縦系)としては3つの中核的研究を考えています。これまで述べてきたように、(1)超精密分光を基にした高分解能分光、および、(2)超高速分光の開発が分光開発の要です。これらの分光により、高分解能分光による強相関科学、フェルミオロジーの研究を行い、時間分解分光による表面科学、光誘起相転移の研究を行います。一方、物性研究所は、物質科学のための研究所ですから新しい物質科学に対応した分光法も必要になると考えています。その1つの例ですが、(3)オペランド分光が今後更に重要になってくるものと思われまます。これにより、大気圧下の触媒反応を直接観測することや光触媒、生体物質の電子状態などの研究も可能になると思われまます。このような研究はこれまであまり注目されていませんでしたが、物性研究所の他の部門でも既に研究が始まっており、共同研究も今後は盛んになってくるものと思われまます。

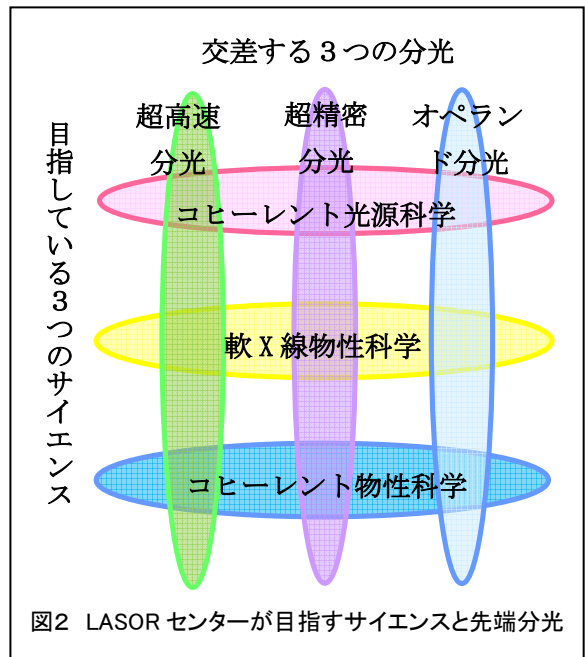
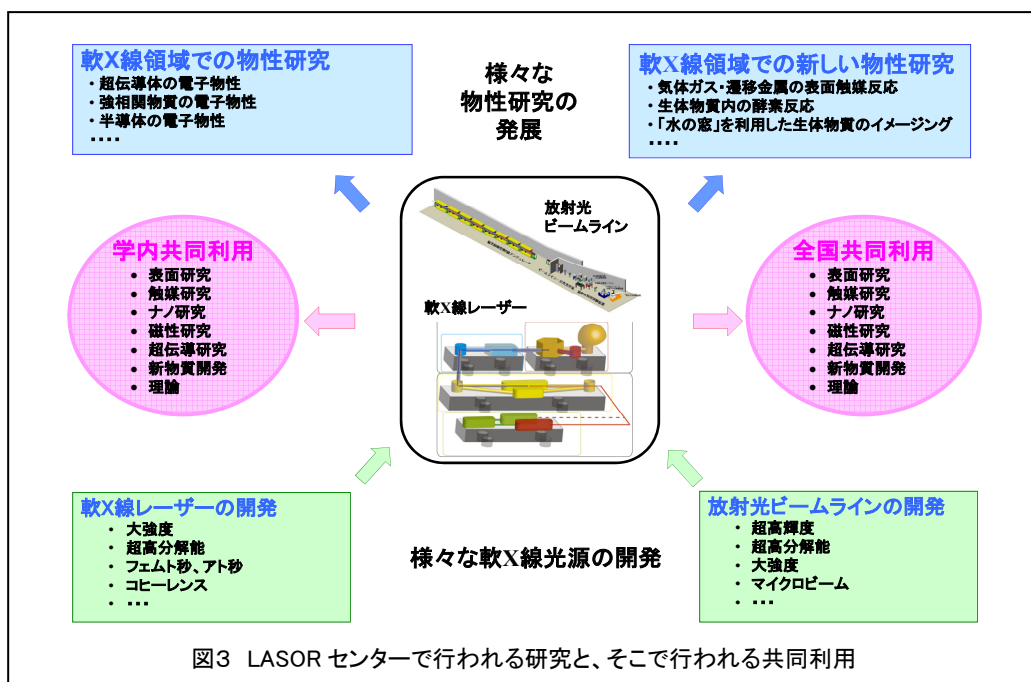


図3はLASORセンターで行われる研究と、そこで行われる共同利用について示しています。LASORセンターは、これまで述べてきたように、先端的放射光ビームラインと軟X線レーザーの開発とを中心とした分光法の開発と物性研究を行う予定です。SPring-8のBL07では東京大学放射光連携機構と物性研究所が中心となって共同利用を今まで通り行います。現在そのための概算要求を行っている最中です。また、現在、つくば分室でもKEK・PF、BL18A、BL19A、Bのビームラインにおいて、共同利用を行っています。PFの物性研ビームラインは建設以来20年以上にわたり、更新できておらず、老朽化が激しいためにやむを得ず、平成25年度いっぱい、閉鎖することになりました。今までは、300eVより上のエネルギー領域はSPring-8、それ以下はPFと言う棲み分けがありましたが、平成26年度からは、SPring-8BL07のみの共同利用となる予定です。





300eV 以下での共同利用が不可能になったことは、これまで共同利用に来てくださったユーザーの方には大変申し訳ないと思っています。しかし、軟 X 線レーザーの開発により、徐々に物性利用が可能な光エネルギーが高くなりつつあります。現在は、真空紫外領域しかレーザーの利用ができませんが、将来は軟 X 線領域まで、物性利用が可能になり、共同利用に提供できるようになると思われます。

柏の物性研究所には、860m<sup>2</sup>の大きなスペースを持つ E 棟があり、これまで高輝度放射光源の準備研究を行ってきました。この建物は高輝度放射光源が中止になった後、現在までほとんど使われていませんでした。物性研究所は、この大きなスペースに所長裁量経費をかけて、レーザー光源を用いた分光測定を行う実験棟に整備・改造する予定です。現在は、基本設計をしている段階です。図 4 はその予想図ですが、今後は、この場所にて物性研究用の高分解能真空紫外レーザー、および、時間分解用軟 X 線レーザーを開発し利用する予定です。将来は、数 10eV までの高繰り返し・高分解能レーザー、1keV までのフェムト秒レーザー、アト秒レーザーの開発をめざしています。本実験室の半分はレーザー用のスペースで、残りの半分の区画は物性研究の測定装置を開発と、共同利用にあてる予定です。ある意味で、世界で初めての極限レーザーと物性研究装置を置くために専用に設計された建物として生まれ変わります。つくば分室が廃止された後のスピン偏極光電子分光装置を最優先で設置し、レーザーを用いた共同利用を始める予定です。また、これに続き高分解能光電子分光装置、表面解析装置などを順次開発設置する予定です。

LASOR センターは、長い将来にわたって、レーザーと、放射光サイエンスを統合した光科学を目指します。光科学だけでなく物性コミュニティにも関係が深く、皆さんの温かい目で見守ってくだされば幸いです。

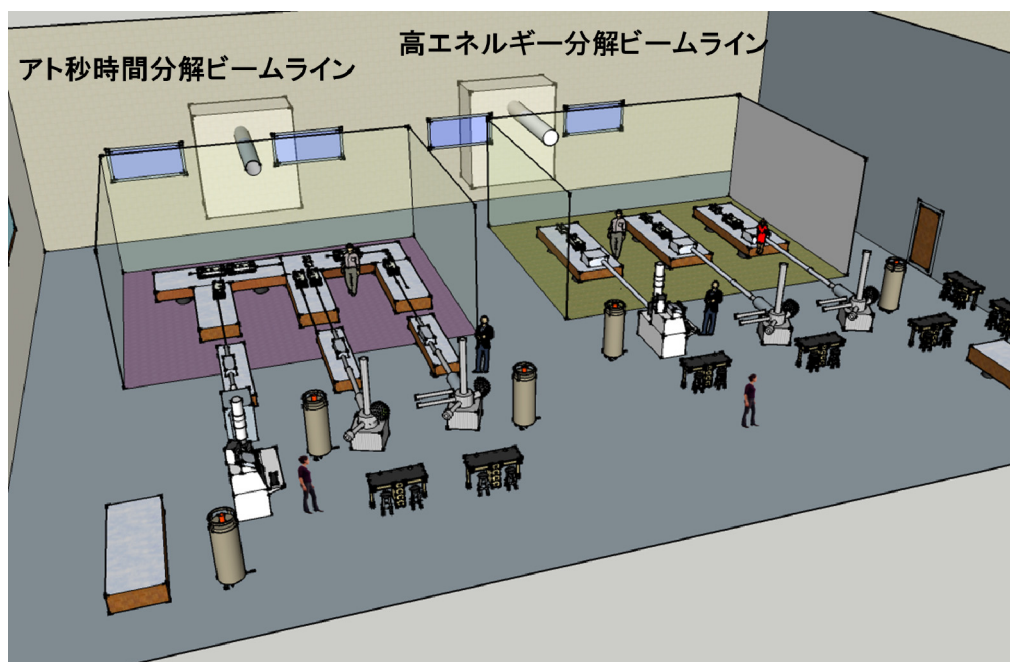


図4 E 棟におけるレーザーを用いた物性研究設備の構想図(小林氏と板谷氏の協力により作成)

# 中性子科学研究施設の現状と展望

中性子科学研究施設長 柴山 充弘

## はじめに

「東大物性研究所附属中性子散乱研究施設」は1993年4月、それまでの中性子回折物性部門を改組・拡充し、中性子散乱研究の大規模共同利用体制の確立と研究分野・共同利用者層の拡大を目的として創設され、日本原子力研究所(現日本原子力研究開発機構)に設置された研究用原子炉 JRR-3 を使った全国共同利用を展開し、全国の大学研究者に中性子散乱研究の場を提供するとともに多くの中性子科学者を育ててきた。2003年には中性子科学研究施設に改組し、現在に至っている。最近では、高エネルギー加速器研究機構(KEK)とともに J-PARC に高分解能パルス分光器(高分解能チョッパー分光器、HRC)を建設し、定常中性子とパルス中性子の両方を使い分けることによる新しい物性研究を展開している。

2種の異なる線源を生かしたサイエンスの近未来像としては、高温超伝導、巨大磁気抵抗等の特異な物性の発現機構、極端条件下(超高圧、超強磁場、超高温など)での新奇物性の探索、広い空間スケールにまたがる複雑な階層構造を有する有機・無機ハイブリッド材料、ドラッグデリバリー用キャリアの微細構造の設計・制御、コントラスト変調法による多成分・多相系ソフトマターの精密構造解析、金属中の水素原子の高速拡散、生体関連物質中のプロトン移動、希土類金属の水素化による金属-絶縁体転移、金属格子欠陥中の水素クラスター形成、ガラス転移の機構解明など、現在、懸案となっているさまざまな物性物理における問題の解明から、応用科学、産業応用に至るまで幅広く波及効果の大きなテーマが並んでいる。

中性子科学研究施設は2009年3月と2010年3月にロードマップを策定したが、2010年3月の物理学会拡大物性委員会での披露と施設の紹介ホームページ(中性子科学研究施設紹介ホームページのアーカイブ欄<sup>2)</sup>)にて公開したほかには公にする機会がなかった。今回、物性研だよりの紙面を借りて中性子科学研究施設の現状と将来計画・夢を披露することとした。読者の方々からの忌憚のないご意見、叱咤激励を仰ぎ、施設運営の糧としたい。

## 1. 沿革

東京大学物性研究所は1960年に日本原子力研究所研究炉 JRR-2 を利用した中性子散乱共同利用を開始し、1969年に中性子回折部門を設置し、国産第1号研究炉 JRR-3 を利用した共同利用へと発展した。表1はその当時から今日までの沿革を日本原子力研究所(現日本原子力研究開発機構、JAEA)のあゆみとともに示している。1990年に JRR-3 が改修され、出力が20MWに増大されるとともにガイドホールが新設された。それを機に、中性子回折物性部門を大々的に再編し1993年からは中性子散乱研究施設(10年時限の研究施設)として、本格的な全国共同利用を展開した。所内配当定員(13名: 予算定員16名)からなる施設の特徴は、

- (1) 東海村に研究宿泊棟を有する中性子散乱研究施設を設置し、そこを拠点にした中性子散乱全国共同利用の推進、
- (2) 日米協力「中性子散乱」実施責任機関(旧文部省側)、
- (3) Instrument Maintenance Team (IMT)による装置維持管理利用、

などであった。この10年間は、装置建設、大規模共同利用体制の確立と研究分野・共同利用者層の拡大が最大のミッションであったと言える。以来、利用課題数および利用者数は飛躍的に増大し、毎年300件、6000人・日レベル、オリジナル論文も年100報程度という大規模な共同利用へと発展した<sup>3)</sup>。

2003年の改組により、「東大物性研究所附属中性子科学研究施設(以下、施設と略称)」と改称したこと、および全国の国立大学が国立大学法人化したことを契機にいくつかの改革をおこなった。

(1) それまで幾つかの装置の装置責任者を所外研究者に委ねていたところを、可能な限り内部スタッフにより行う方式とし、装置の維持管理改良に責任を負うようにした。また、外部装置責任者には物性研嘱託研究員を委嘱し、所属元の機関における身分的な保証を担保した。

- (2) 法的任期制の導入に伴い、助教の転出について支援しやすい体制として、これまでの所員グループ対研究助手グ

ループの関係(ウイークカップリング)から研究室単位で所員-助教の関係(ストロングカップリング)とした。

しかしながら、慢性的なスタッフ不足により職員の負担は軽減されるところか、増大する傾向にあり、さらに職員の定年退職や物性研の定員削減などの影響を受け、施設運営は厳しい状況が続いている。この問題については、将来計画のところでもう少し触れる。

表 1 中性子科学研究施設沿革

	ISSP-NSL	JAEA (旧 JAERI)
1956		日本原子力研究所発足
1957	物性研、共同利用研として発足	JRR-1 臨界
1960	原子炉に分光器を設置し中性子散乱研究を開始	JRR-2 臨界
1962		JRR-3 臨界(国産第1号)
1969	中性子回折部門増設	
1980	中性子回折物性部門へ再編、日米科学技術協力	
1990	第1回中性子解析装置共同利用運営委員会	改3号炉 JRR-3M 臨界、運転開始
1993	中性子散乱研究施設の新設	
1994	研究宿泊棟竣工	
2003	中性子科学研究施設へ改組	
2005		日本原子力研究機構(JAEA)
2010	高強度汎用チョッパー分光器(HRC、J-PARC)	

## 2. 中性子科学研究施設の特徴

物性研中性子科学研究施設は次のような特徴をもっている。(1)東京大学の一部局として中性子散乱装置群を所有し、東北大金属材料研究所/理学部、京都大学原子炉実験所の所有する数台の装置も含めた全国共同利用事業を行っている。(2)独自の実験課題審査委員会の諮問にもとづき、公明公平な共同利用と実験支援を行っている。(3)宿泊施設を保有し、利用者の利便をはかっている。また、旅費支給制度をもち、東京大学大学院工学系研究科原子力専攻共同利用管理本部<sup>4)</sup>(開放研;旧東京大学原子力総合センター)および物性研共同利用を通じて実験者への旅費援助をしている。さらに、(4)液体ヘリウムなどの消耗品援助(物性研予算)などをおこなっている。(5)日米科学技術協力協定に基づく日米協力事業「中性子散乱分野」の日本側実施機関として「中性子散乱日米協力」を推進している。

このような特徴は、それぞれが独自のミッションをもって運営している世界の多くの中性子散乱施設とは一線を画すものであり、常にコミュニティの声を反映した全国共同利用システムの運営や施設スタッフの自発的活動により、常に十分なビーム強度と質の良い中性子ビームを提供することを目標とした施設運営を通して、物質研究の一拠点としての役割を演じている。

## 3. 共同利用の推移

図 1 に共同利用課題数および利用者数の推移を示す。1990 年以前は本格的な共同利用の黎明期とでも言うべき期間であり、共同利用件数は 20 件から 30 件程度、利用者も内部スタッフの利用を含めて 1000 人・日規模であった(黎明期)。その後、上述した JRR-3 の改造と、それを受けて中性子散乱分野の全国共同利用を推進するために文部省省令施設として物性研附属の中性子散乱研究施設が東海村に新設されたことを受けて、爆発的な共同利用数の増大が起こった(高度成長期)。これは、初代施設長の藤井保彦教授(現 CROSS 東海センター長)の指導によるところが大きく、東海村に研究宿泊棟(通称、波紋施設)を建設し、共同利用の拠点とした。当時は本格的な中性子散乱実験を行える共同利用機関は物性研のみであったので、多くの研究や人材がこの共同利用プログラムから産まれた。その一

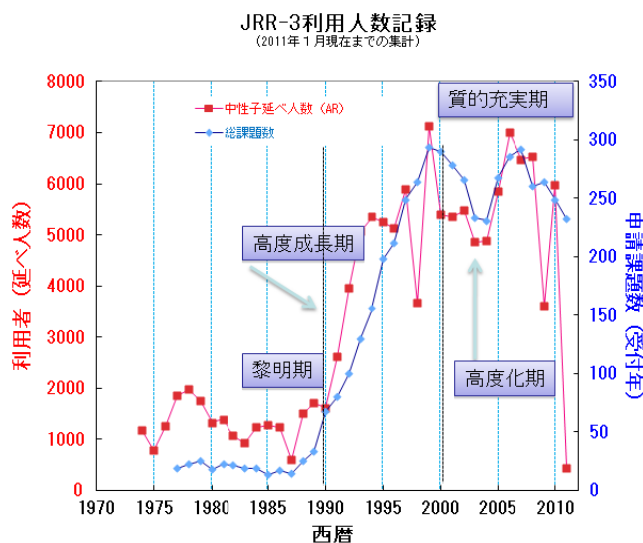
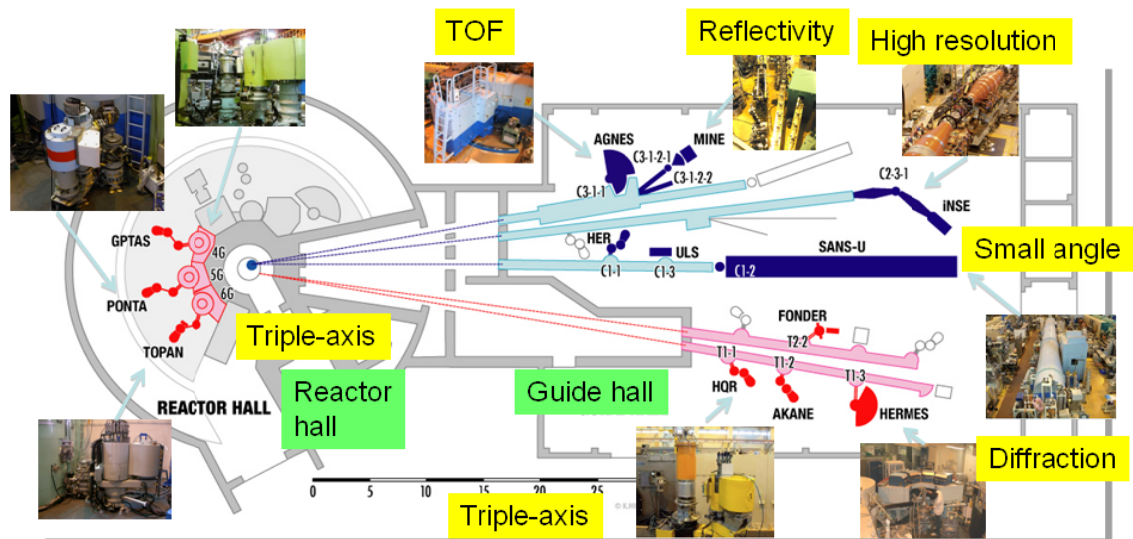


図 1 共同利用課題数および利用者数の推移

方で、共同利用に対する施設職員の負担が大きく、施設発のサイエンスの発信に鈍化が見えてきた。これを改善すべく、2003年から始まった施設第2期(吉澤英樹施設長)においては、施設職員の裁量ビームタイムを増大し、研究の自由度を大きくする改善がなされた(Instrument & Research Team; IRTの創設)。さらに、2002-2004年の期間には、概算要求をもとに老朽化した装置群の改造を大々的に行っている(第1次施設高度化期)。一方で、2009年度にはJRR-3の計画外停止が3サイクルあり、採択課題の実施は1/2程度の実績となった。共同利用は2010年にはほぼ例年度なみに復活したが、残念なことに、2011年3月に起こった東日本大震災によるJRR-3の被災と復旧活動のため、現在に至るまで稼働していない。JRR-3本体および建屋については大きな被災は無かったものの、換気系、排水系を中心に被害があった。また中性子ガイド、分光器についても光軸の乱れ、遮蔽体の不具合などが発生した。これらについてはJAEA関係者ならびに中性子科学研究施設スタッフの尽力により、完全に復旧している。しかし、いまだ、国の認可や地域の了解を得るなどのプロセスが完了していないため、再稼働には至っていない。JRR-3の長期停止の影響は利用者の激減だけにとどまらず、研究の停滞や人材育成などにも深刻な影響をおよぼしているため、一日も早い再稼働を期待している。

#### 4. 共同利用装置の現状

現在、JRR-3には大学の装置として14台の中性子散乱装置が設置され全国共同利用に供されている。図2に示すように、炉室に3台、ガイドホールに11台の装置を展開している。装置の設置ビーム孔名、名称・略称などについては表2を参照されたい。東京大学物性研究所所有装置が9台、東北大学が3台、京都大学が2台である。JRR-3の炉室にはGPTAS(4G; 東大)、PONTA(5G; 東大)、TOPAN(6G; 東北大)の3台の3軸分光器がある。一方、ガイドホールにはHQR(T1-1; 東大)、AKANE(T1-2; 東北大)、HER(C1-1; 東大)の3台の3軸分光器の他、小角散乱装置SANS-U(C1-2; 東大)、中性子スピンエコー装置(iNSE; 東大)、高分解能パルス冷中性子分光器(AGNES; 東大)、金研中性子粉末回折装置(T1-3; 東北大)、中性子干渉計/反射率計(MINE-1, MINIE-2; 京大)、4軸回折装置(T2-2; 東大)などがある。これらの装置はIRTにより維持され、物性研所有の装置のうち5台は施設教員が装置責任者として管理し、残り4台は学外の研究者に装置責任者を委嘱して全国共同利用を推進している。一方、J-PARC/MLFにはBL12に1台の高分解能チョッパー分光器(HRC)を所有し、KEKとの共同運営の元、共同利用に提供されている。



University-owned instruments: **14**, ISSP **9**, Tohoku U. **3**, Kyoto U. **2**  
 No. proposals: **~300**  
 No. users (man.day) : in-house 2000, outside 5000, **total 7000**  
 No. papers : **~100 /y**

図2 JRR-3に設置された共同利用装置



表 2 共同利用装置一覧

ビーム孔	装置名	略称	所 属
4G	汎用三軸型中性子分光器	GPTAS	物性研
5G	熱・偏極中性子3軸型分光器	PONTA	物性研
6G	三軸型偏極中性子分光器	TOPAN	東北大・理
T1-1	高分解能中性子散乱装置	HQR	物性研
T1-2	金研 三軸型中性子分光器	AKANE	東北大・金研
T1-3	金研中性子粉末回折装置	HERMES	東北大・金研
T2-2	中性子4軸回折装置	FONDER	物性研
C1-1	高エネルギー分解能3軸型分光器	HER	物性研
C1-2	小角散乱装置	SANS-U	物性研
C1-3	高分解能後方散乱装置	URS	物性研
C1-3	小型集光型小角散乱装置	mf-SANS	物性研
C2-3-1	中性子スピネコー分光器	iNSE	物性研
C3-1-1	高分解能パルス冷中性子分光器	AGNES	物性研
C3-1-2	多層膜中性子干渉計	MINE-1	京大・原子炉
C3-1-2	中性子反射率計	MINE-2	

こうした装置の多くは中性子科学研究施設が設立された 1993 年前後に建設されたため、施設第 2 期が始まる 2003 年には装置本体や制御装置などの多くが老朽化していた。この問題を解決すべく、概算要求や補正予算、所の援助などを仰ぎ、本格的な高度化を行った(第 1 次設備高度化期)。小角散乱装置 SANS-U の高度化がその一例で、2 次元検出器を単芯線型から多芯線型に更新することにより飛躍的に計数性能を向上させた他、実験制御システムを VAX から WINDOWS-LabVIEW システムに更新など、システムを一新させた(2002)<sup>5,6)</sup>。中性子スピネコー装置も C2 の分岐ラインから C2 のエンドへ移転し、検出器も従来の一次元検出器から 2 次元検出器へと更新した。AGNES においても、検出器の増強、遮蔽体の改造により性能を大きく向上させた。他の装置群も 2000 年頃から継続的に更新している。それらについては、2009 年 8 月に開催された拡大 IRT 研究会シリーズ —3 号炉の将来計画を視野にいれて—(NSL News Letter, 2009-3)<sup>7)</sup> において詳しく述べられている。また、施設の紹介ホームページのアーカイブ欄(上述)<sup>2)</sup> でも紹介されている。

### 5. J-PARC/MLF の運転開始に対応した JRR-3 分光器の高度化

J-PARC/MLF は 2008 年 5 月に最初の中性子ビームが取り出され、2008 年 12 月からビーム利用も行われている。さまざまな分光器が次々と建設され、ビーム強度も順次増大され、現在では 300kW の連続運転が行われる段階に来ている。J-PARC/MLF のパフォーマンスの向上に対応すべく、JRR-3 の今後の利用の在り方が学会や研究会などで数多く検討されているが<sup>8,9,10)</sup>、一言でいうと

定常中性子ビーム(JRR-3)とパルス中性子(J-PARC/MLF)の性質の違いを生かした相補的・相乗的利用が望まれているといえる。図 3 はそれを模式的に示したものである。図の縦軸は時間スケール(エネルギーの逆数)、横軸は空間スケールである。白色のパルス中性子を利用する J-PARC/MLF は短時間(高エネルギー)および小スケールの現象や構造研究を得意としているのに対し、単色定常中性子ビームを利用する JRR-3 での研究は低エネルギー大スケールの現象や構造の研究に向いている。

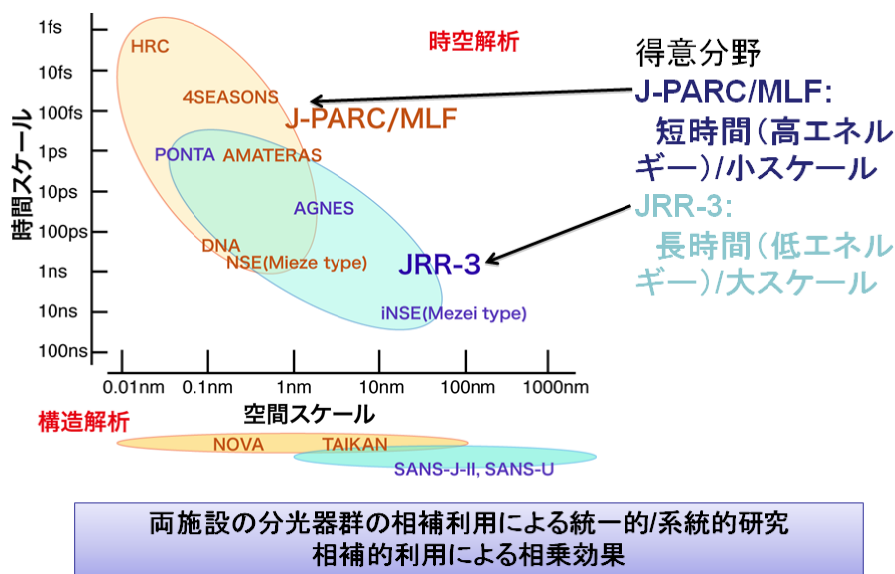


図 3 JRR-3 と J-PARC/MLF 装置の棲分け/相補性

相補的・相乗的利用を目指す一方、分光器の性能を向上させる努力も IRT メンバーにより着々と行われている。それらは、最近の中性子光学を用いた改造で、集光系デバイス(集光モノクロメーター、集光アナライザー、集光ミラー、物質/磁気レンズなど)の導入や高分解能検出器の導入などである。図 4、図 5 にそれぞれ、3 軸分光器・回折計、小角散乱・高分解能・反射率装置の**第 2 次設備高度化**事業を年表で示した。たとえば、GPTAS(4G)においては、JAEA グループとの共同開発により、2 重集光 PG002 モノクロメーターとアナライザーを導入し、強度の 20 倍化を実現した(図 4、6)。また、HER(C1-1)においても集光アナライザーの導入により強度が 14 倍になった。こうした、高強度“一点測定”が後述する偏極オプションの導入とともに、J-PARC 時代における JRR-3 に設置された 3 軸分光器装置群の最大限の活用法とみることができる。さらに、小角散乱装置 SANS-U(C1-2)では、中性子スピネコー装置(iNSE)および小型集光型中性子小角散乱装置(mfSANS)とともに文部科学省原子カイニシアティブ予算により、**第 2 次設備高度化**を実施し、入射ビームの拡大と整形精度の向上、物質レンズの導入、および高分解能検出器(分解能 0.5mm;従来のガス型 2 次元検出器の分解能の 10 倍)を導入することで、測定強度で 3 倍、小角分解能の一桁向上( $Q_{\min} \approx 3.6 \times 10^{-4} \text{ \AA}^{-1}$ )を実現した(図 7)<sup>11)</sup>。余談であるが、この小角分解能はフランスのラウエ＝ランジュバン研究所(ILL)の小角散乱装置(全長 80m)において波長 20Å のピンホール系でようやく実現できる分解能である。それを、全長 32m、波長 7Å の SANS-U で集光レンズと高分解能検出器によって実現した意義は大きい。

JRR-3 自身、中性子源としてはまだまだ最適化の余地があり、冷中性子源の改良により約 2 倍のビーム強度が得られることが分かっている。また、冷中性子導管をスーパーミラー化することで、さらに 5 倍の強度が得られることもシミュレーション等で分かっている。これらにより、10 倍の強度増が期待できる(冷中性子源 10 倍化計画)。しかしながら、これは JAEA による大工事が必要であるので、少なくとも冷中性子源の改良については現在のところ実施の見込みがないようである。一方で、スーパーミラー化については、C3 ライン、C1 ラインにおいて、それぞれ JAEA と物性研の共同プロジェクトとして獲得した文部科学省原子カイニシアティブ予算、および東大予算により進行中である。これらにより、少なくとも数倍のビーム強度増が期待されている。

	2006	2007	2008	2009	2010	2011
4G:GPTAS	← 集光モノクロメーター、アナライザー			→ 高圧素子開発		
5G:PONTA	← SPICE (WASABI) 導入				→ Cuモノクロメーター、スーパーミラー	
6G:TOPAN	→ マルチアナライザー分光器					
T11:HQR	← スーパーミラー集光	← 第二回折計		→ 高圧素子開発		
T12:AKANE	← 第二回折計		→ パルス高磁場、PGモノクロメーター、偏極オプション			
T13:HERMES				← Geモノクロメーター	→ 第二回折計	
T22:FONDER				→ Geモノクロメーター、2次元PSD		
C11:HER	← 集光モノクロメーター					

図 4 第 2 期高度化事業(3 軸分光器、回折計)

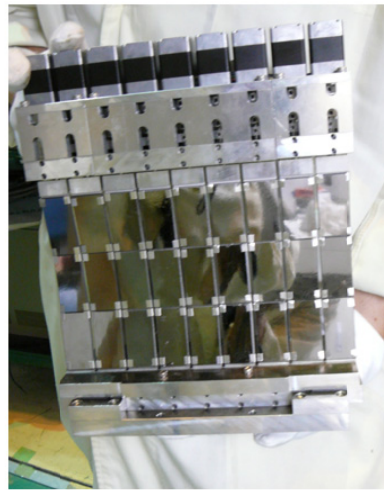
	2006	2007	2008	2009	2010	2011
C12:SANS-U	← VAXからWINDOWSへ		← 集光、大口径化			
C13:ULS	← mfSANSの開発					
C231:iNSE	← C22からC2ガイドエンド(C231)へ		← スピンフリップパーなど			
C311:AGNES	← トップローテイング機構、遮蔽体向上、モニターカウンター				← スーパーミラー	
C312:MINE1	← 新型共鳴スピンフリップパー				← スーパーミラー	
C312:MINE2	← 2経路多層干渉計				← スーパーミラー	

説明 文科省  
原子カイニシアティブ

図 5 第 2 期高度化事業(小角散乱、高分解能、反射率)



Doubly focusing monochromator



Doubly focusing analyzer (V-fix)

図6 GPTAS(4G)に導入した集光デバイス

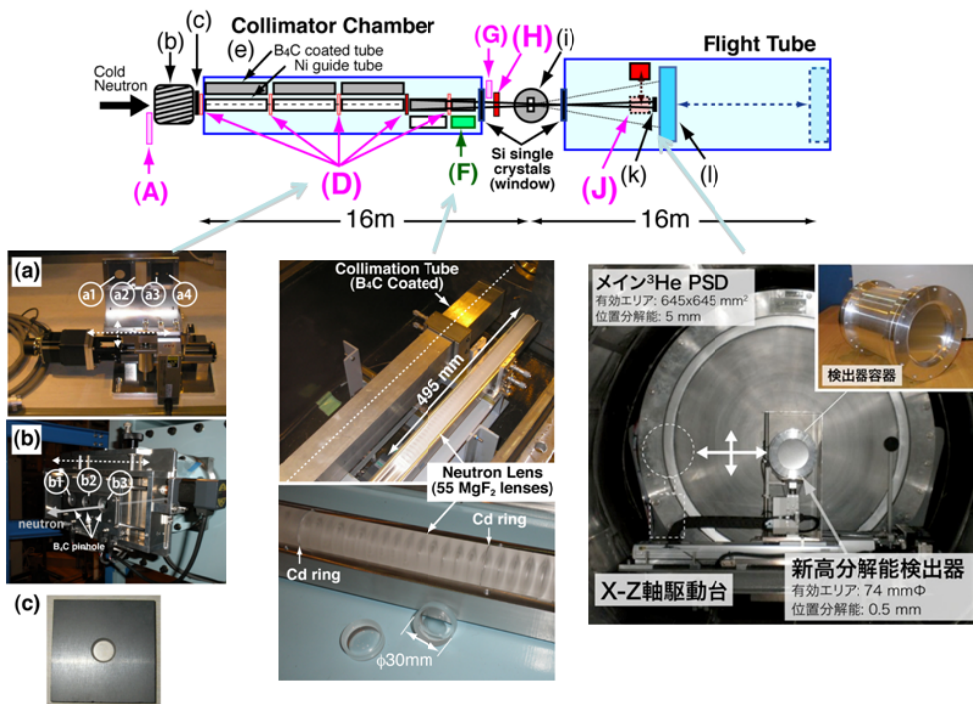


図7 小角散乱装置 SANS-U の高度化。(上段) 装置平面図、(下段 ; 左) ビーム整形器、(中央) 物質レンズ、(右) 高分解能検出器。

## 6. 施設の陣容と将来計画

### 6. 1. 施設の陣容

2012年3月末に佐藤卓所員の東北大学多元研転出後、現在、施設は4研究室体制だが、募集中の新所員を入れると、図8に示すような5研究室体制で施設運営をおこなう。その内訳は、伝統的固体物性研究を行う3研究室(吉澤、益田、新所員)と分子集合体物性を扱う2研究室(柴山、山室)に大別される。前者は多体系の量子状態の解明を目的とし、主として3軸分光器とパルス中性子分光器を使った強相関電子系や磁性などの研究を行い、後者は小角散乱装置、スピネコー装置、飛行時間(TOF)型非弾性散乱装置を用いたソフトマターサイエンス、化学物理などの研究を展開している。こ



れら 5 研究室は個別で、あるいは共同研究などの形で日本中性子科学会<sup>12)</sup>はもとより、物理学会、化学会、高分子学会などを通じて情報発信をおこなう。5 研究室の研究分野および担当装置を時空間上に展開すると図 9 のようになる。JRR-3 単独時代 (~2009)は、吉澤・益田研による高エネルギー/低空間スケールの物理から柴山・山室研における低エネルギー/高空間スケールサイエンスまで広く分布していた。それに J-APRC/MLF の BL12 に HRC が設置されたことによって、さらに高エネルギー/低空間スケールの方向へと領域が広がっていることが分かる。来年 4 月には新所員を迎え、さらに強力に広い時空間にわたってのサイエンスを展開する予定である。

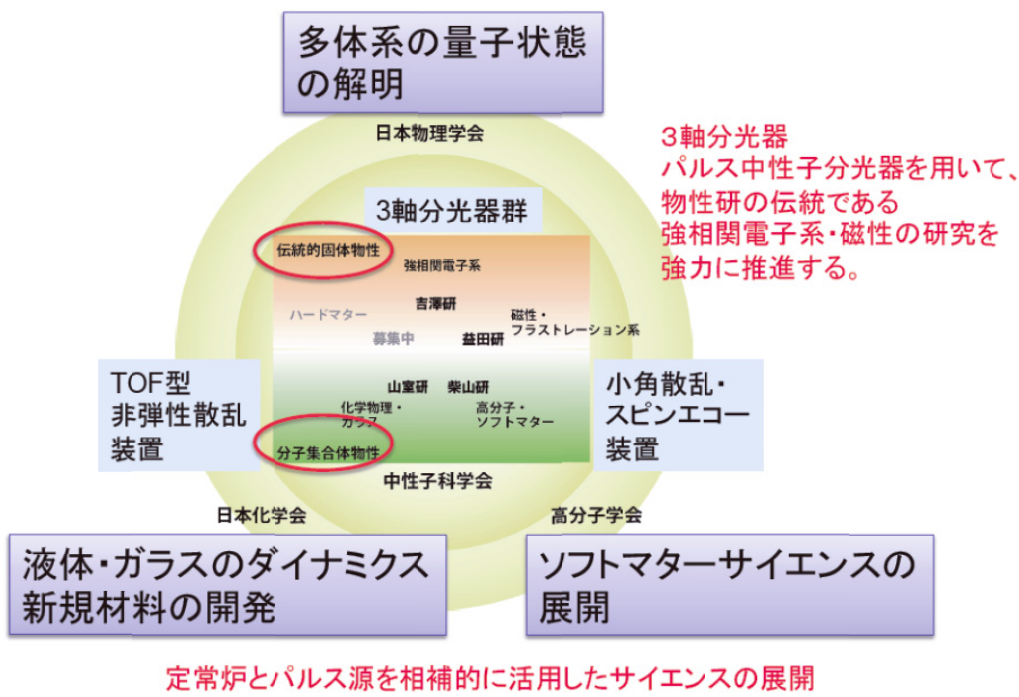


図 8 中性子科学研究施設がめざすサイエンス

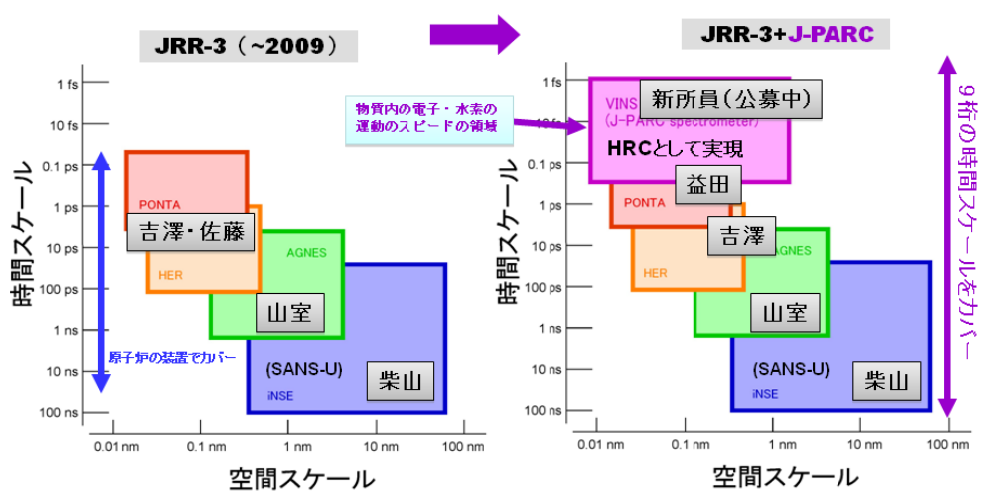


図 9 JRR3 と J-PARC の相補的利用によるサイエンス

### 6. 2. 共同利用申請システムおよび成果検索システムの統合

現在、JRR-3 を使った中性子散乱実験の申請方法としては、東京大学物性研中性子散乱全国大学共同利用<sup>11)</sup>と JAEA の施設利用<sup>13)</sup>がそれぞれ独自に課題募集、課題審査を行っている。そのため、大学の装置と JAEA 装置の相互利用やプログラムの一体的運営などを阻んできた。この問題に対処すべく、現在、JAEA のワーキンググループを中心に課題審査システムの統合化を進め、数年後には「JRR-3 課題審査システム」に統合される予定である。この新システムでは、ユーザー側から

見て利用申請の窓口がひとつであり、個人名でアカウントを管理されるため、各年度の申請内容、マシンタイムの実績、審査結果等の確認が容易にできる。図 10 を使って申請の流れを示す。JAEA の独自利用・共同研究や物性研全国共同利用を問わず、ユーザー、装置責任者、審査員ともに「JRR-3 課題審査システム」に唯一のアカウントをもち、これを使って、申請、審査、報告などを行うことになる。そのため、申請履歴や審査履歴なども含めた申請状況が一元管理できるし、ユーザーにとっても知りたい情報をすぐ得る事ができるようになる。一方で、成果については、過去の実験成果報告書、論文、学位などの成果の検索、閲覧ができる成果検索システムが既の実現し、運用を開始している<sup>3,13)</sup>。

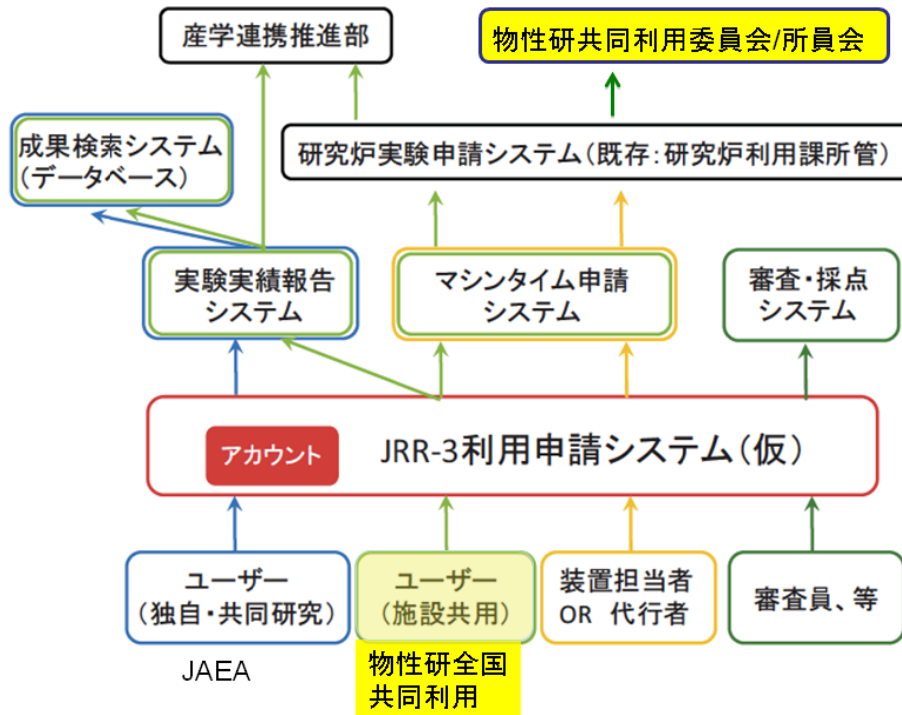


図 10 JRR-3 課題審査システム

### 6. 3. 装置の高度化

JRR-3 という中性子ビーム資源を最大限に生かすべく、さまざまな努力がなされている。図 11、12 は最近、装置責任者グループ(IRT)へのアンケートをもとに作成したそれぞれ、3 軸分光器・回折計、小角・高分解能・反射率装置の高度化ロードマップ(第 3 次施設高度化)を示す。GPTAS(4G)では Ge モノクロメーター/アナライザー、スーパーミラーを導入することでさらに高エネルギー領域の中性子強度の増大を目指す。TOPAN (6G)では、今年度新装置の三軸分光器仕様の整備をし、来年度以降、それを用いた大強度偏極中性子利用の実用化・フィルターなどのインストールによる S/N の改善・2nd モノクロメーターによる冷中性子領域利用(高エネルギー分解能モード)への拡張をおこなう。その他、HQR(T11)、AKANE(T12)、HERMES(T13)、などでも偏極オプションの導入や Cu/Ge モノクロメーターなどの導入が計画されている。特筆すべきは、HERMES(T13)に教育用回折計、HERMES-E(T13)が建設されることである(東北大金研)。これは、T13 ビームの取り出しに際し、使用していなかった結晶面反射のビームを用いて回折計を新たに建設し、教育用専門の回折計として使うというものである。JRR-3 の中性子ビームを無駄なく使うことと人材育成に役立てるという定常ビームを使った施設ならではのアイデアとして評価されている。

小角散乱・高分解能・反射率などの装置の主な高度化計画としては、AGNES(C311)において、検出器回路やチョッパーの更新、新規モノクロメーター(Ge311 および Mica002)の設置、さらには 2011 年度までに終了している C3 ラインのスーパーミラー化による中性子ビームの強度増が期待されており、装置として中性子強度 4-5 倍、3 桁以上のエネルギー領域の実現を目指している。一方、反射率計 MINE 1(C312)は設備を J-PARC/MLF に建設中のスピネコー装置 VIN ROSE への移転をおこなう。その一方で、2 次元集光ミラーを備えた小角散乱装置を建設するというスクラップ・アンド・ビルド計画が進行している(京大原子炉)。

日米協力事業については、物性研が Brookhaven 国立研究所から Oak Ridge 国立研究所に移設した 3 軸分光器 CTAX が 2010 年にはコミショニングを開始し、いよいよ利用が開始された。図 13 は CTAX@ORNL の新光光学系で、数年後には図 14 に示す水平/垂直 2 重集光アナライザーを搭載した高強度高分解能の 3 軸分光器が完成する予定である。

	2012	2013	2014	2015	2016	2017
4G:GPTAS		Ge モノクロメーター、アナライザー、スーパーミラー				
5G:PONTA	試料上流に SEOP 導入		試料下流に SEOP 導入		マルチディテクタ導入による偏極非弾性実験システムのアップグレード	
6G:TOPAN	分光器更新		高S/N、高分解能用偏向素子			
T11:HQR	偏向オプション					
T12:AKANE	モノクロエレベータ化・湾曲結晶アナライザー製作			Cu・Geモノクロ製作		ホイスラー偏極子開発
T13:HERMES	Ge二波長化・短波長化					
T13:HERMES-E			SEOP導入による偏極化			HERMES-E偏極化
T22:FONDER			HERMES-E・PSDバンク設置			
C11:HER						

図 11 第 3 期高度化事業計画(3 軸分光器・回折計)

	2012	2013	2014	2015	2016	2017
C12:SANS-U	ソフトウェア更新		遠隔操作、全自動化測定			
C13:ULS						
C231:iNSE						
C311:AGNES	検出器回路更新 Ge311, Mica002モノクロ利用開始	チョッパー更新	SMガイド設置	強度: 4-5倍、3桁以上のエネルギー領域 (15 $\mu$ eVから50meV)を実現		
C312:MINE1	→VIN ROSE@ J-PARCIに移設 2次元集光ミラーSANS装置の新設					
C312:MINE2	多層膜中性子干渉計					

図 12 第 3 期高度化事業計画(小角散乱・高分解能・反射率)

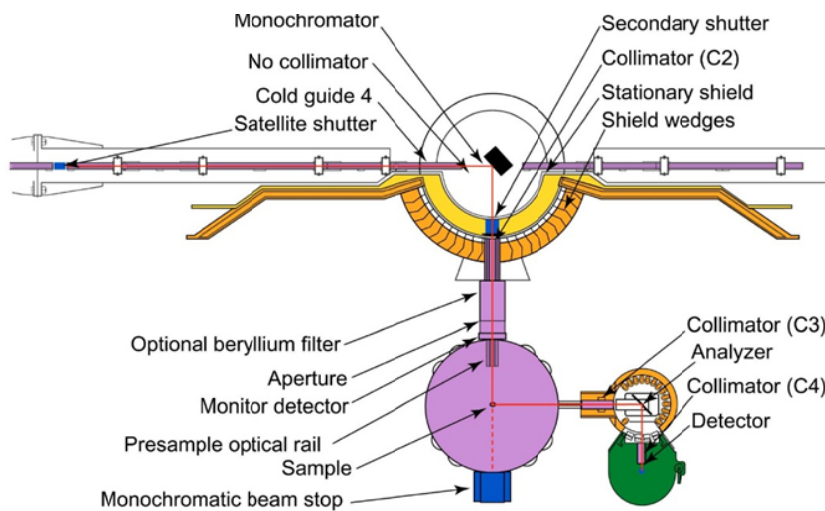


図 13 CTAX@ORNL の新光光学系

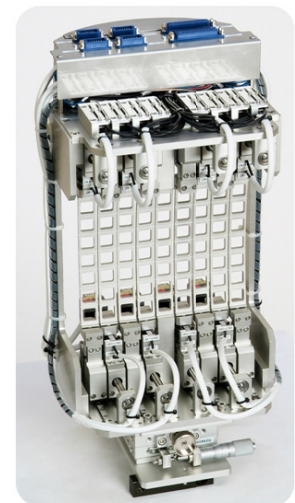


図 14 水平/垂直 2 重集光アナライザー

## 6. 4. PONTA(5G)装置の高度化

施設の将来計画の一大テーマとして、5G ポートに設置された三軸分光器 PONTA の高強度偏極非弾性装置への高度化計画が始まっている。三軸分光器の特徴の一つは、専門的な用途に特化した J-PARC 分光器群とは対照的に、粉末回折、単結晶回折から非弾性散乱、偏極中性子散乱まで、様々な測定に対応可能な汎用性の高さにある。これにより数多くのユーザーに支持され、現在 JRR-3 には 9 台の三軸分光器が運営されるに至っている。しかし、JRR-3 と J-PARC が共存する時代に、今までのようなあり方で数多くの分光器を維持する必要があるのかと考えると、いささか疑問が残る。今後は、少なくともいくつかの三軸分光器については、専門性を高める方向で改良を進めていく必要があるだろう。パルス中性子源分光器では、多波長を効果的に利用する回折実験や、飛行時間法による非弾性散乱実験には威力を発揮するが、偏極中性子実験を行うにはやや難がある。そこで、PONTA 分光器では、偏極機能をアップグレードすることにより、偏極非弾性散乱分光器を目指した高度化を行うことにした。

これまでの偏極中性子実験は、主として、中性子反射率の低いホイスラー結晶が用いられてきた。さらに、非偏極システムで標準装備されている集光機構の導入が困難であるため、非偏極非弾性システムと比較すると中性子強度が 1-5%程度と弱く、主として弾性散乱に用途が限定されてきた。しかし最近では、 $^3\text{He}$  核スピン偏極を利用した Spin Exchange Optical Pumping (SEOP) 法や、Fe-Si 超多層膜中性子スーパーミラーなどといった新しい偏極子が考案されている。これら最新の技術と高反射率集光 PG モノクロメーターとを組み合わせると、高強度偏極非弾性装置が実現可能となる。たとえば、現在よく用いられている  $^3\text{He}$  核偏極率 70% の SEOP を用いると、10meV の熱中性子の中性子偏極率はほぼ 100%、透過率は 14%程度となる。これに集光技術を用いることで、従来のホイスラー偏極子と比較すると一桁程度強い強度が期待される。また、 $^3\text{He}$  偏極率の世界記録 80% の SEOP を用いることができれば、さらなる高強度が期待でき、非偏極中性子フラックスと遜色ない強度となる。

従来の PONTA 偏極弾性散乱システムでは、磁気形状因子の測定、核ピークと磁気ピークの分離、らせん磁性体のカイラリティ測定、軌道秩序の観測、などが行われてきた。今後、新しい偏極子導入により偏極非弾性実験が可能になれば、たとえば、特定の方向のスピン相関を分離測定することにより、ネマティック相関等の新しい磁気相関を検出することや、エレクトロマグノン等の特異な磁気励起の詳細観測、高温超伝導体のスピン揺らぎの解明などが可能となる。また、磁気成分と格子成分の分離測定により、フォノンに隠れて観測が困難であった磁気励起の観測や、磁気・格子ハイブリッド励起の実証なども可能となり、磁性・強相関電子系にとって、これまで以上に強力なマイクロダイナミクスのプロープになる。

従来偏極中性子は、非偏極中性子と比べて 1/20-1/100 程度の強度しか得られなかったために、偏極非弾性散乱実験は相当な動機づけがなければ行われてこなかった。PONTA の高度化は、その敷居を大幅に低くすることにより、偏極非弾性散乱をユーザーにとって身近なものとする。デフォルトで偏極非弾性散乱実験ができる三軸分光器を実現することは、これまでの中性子非弾性散乱実験のあり方を変える大きなインパクトを持つであろう。

## 7. 広報

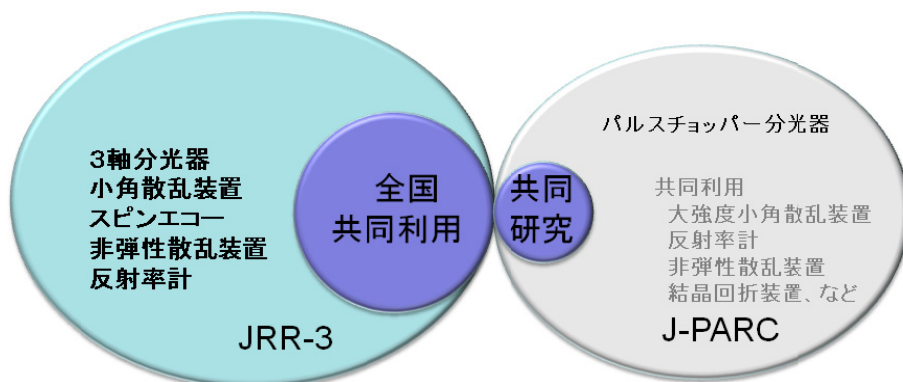
施設の活動は施設ホームページや NSL News、パンフレットなどを通じて広報に努めているが、中性子散乱全国共同利用関係者以外への知名度はまだ低くと言わざるを得ない。施設には広報専門のスタッフを配置する人的・予算的余裕がないのがその一因でもある。2009 年 4 月から施設長が直接、コミュニティに情報発信するアナウンスホームページを試行的に運用している<sup>14)</sup>。そこには、施設からのお知らせを始め、震災復興ニュース、共同利用者の受賞・報道リスト、施設関連協定・覚え書き、などが掲載されている。また、施設研究室や中性子関係機関やデータベースへのリンクも張られている。今後、このようなメディアを通じた情報発信をさらに充実していく予定である。

## 8. コミュニティとの連携

施設にとって、他の中性子施設や中性子関連団体、物性委員会などコミュニティとの連携は非常に重要である。図 15 に示すように、JRR-3 と J-PARC という 2 つの世界的中性子施設に深く関わる中性子科学研究施設としては、両施設の研究資産を生かした運営をおこなっていく。特に、JRR-3 を通じて緊密な関係にある JAEA とは、装置の相互利用、研究成果データベースの統合化、課題審査の一元化などを通じて更なる連携を図っていく。一方、J-PARC、KEK とはパルスチョッパー分光器 HRC(BL12)を介した装置の共同運用を軸として、共同研究を展開していく。KEK 物質構造研究



所(KENS)とは大学連携による装置管理・運営(東北大、京大、茨城大)を目指す。図 16 は平成 20 年 10 月、日本中性子科学会第 4 期大型施設共用問題特別委員会が策定した「中性子利用プラットフォーム」である。この中で、東大物性研(中性子科学研究施設)は原子力機構(JAEA)、KEK と並んで日本の中性子ビーム利用の中心的存在の一つとして位置づけられている。今後、文部科学省の推進する我が国の大型研究施設群の有効利活用を目指したプラットフォーム化を視野に置いて放射光施設(SPring8, KEK PF)、スーパーコンピューター(京)などを念頭に置いた物性研の他研究部門・研究施設との連携を強化するとともに、中性子散乱研究においては、大学・研究機関はもとより、産業界やプロジェクト研究にも対応した基礎研究を推進・牽引するとともに大学に籍を置く施設として若手教育、人材育成を推進していく。



5所員(5研究室)体制\*

\*註: 5所員(5研究室)体制(教員採用可能数再配分獲得)

- ・強力なイニシアティブで共同研究を中心とした共同利用体制へと改変
- ・課題申請業務の一元化(JAEAと協議中)
- ・大学連携による装置管理・運営(東北大、京大、茨城大)

図 15 全国共同利用と J-PARC におけるサイエンス

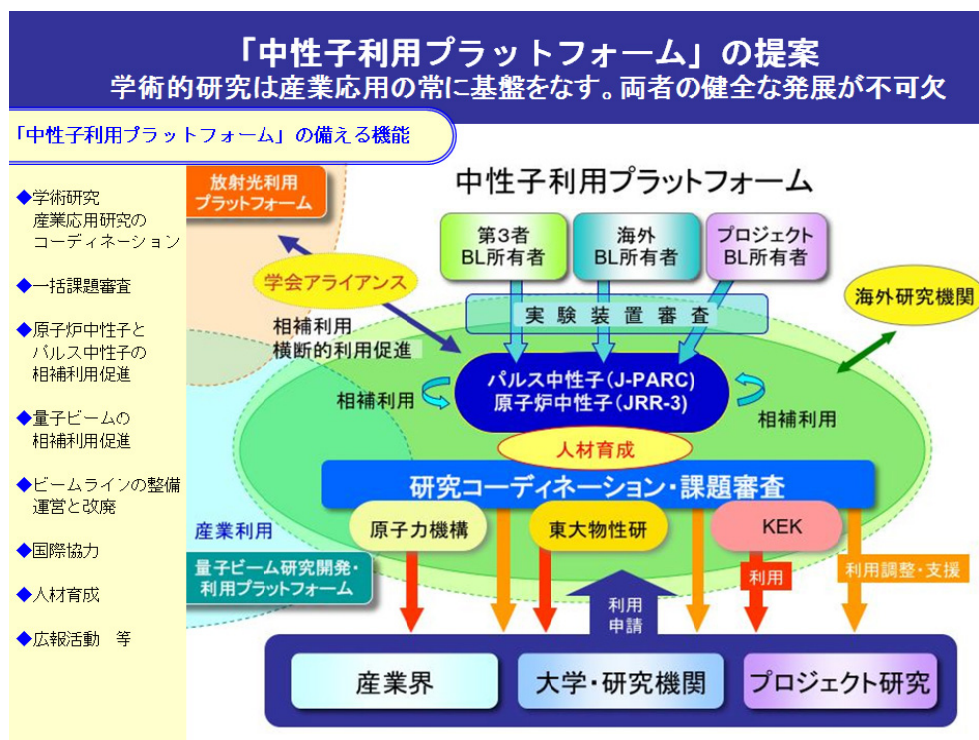


図 16 中性子利用プラットフォーム

## 文献および URL

- 1) <http://neutrons.issp.u-tokyo.ac.jp/>
- 2) <http://www.issp.u-tokyo.ac.jp/labs/neutron/announce/Archives.html>
- 3) 施設論文データベース <http://quasi.issp.u-tokyo.ac.jp/db/index.php>
- 4) <http://kaihoken.nuclear.jp/>
- 5) S. Okabe, et al, J. Appl. Crystallogr. 2005 38 1035-1037 (2005).
- 6) S. Okabe, et al., Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. Sect. A-Accel. Spectrom. Dect. Assoc. Equip., 572, 853-858 (2007).
- 7) NSL News Letter, 2009-3.
- 8) 物性研拡大 IRT 研究会シリーズ、2009.8.4-8, 東大物性研中性子科学研究施設
- 9) 中性子科学会第 8 回年次大会特別セッション、「情報交換会：JRR-3 を取り巻く状況について」、2010.12.10, 東北大学片平キャンパス
- 10) JRR-3 シンポジウム、2011.2.28, 日本原子力研究開発機構主催、日本科学未来館
- 11) H. Iwase, et al., J. Appl. Crystallogr., 44, 558-568 (2011).
- 12) <http://www.jsns.net/jp/>
- 13) JAEA JRR-3 ユーザーズオフィス  
<http://jrr3uo.jaea.go.jp/>
- 14) <http://www.issp.u-tokyo.ac.jp/labs/neutron/announce/>

# 物性研での 37 年間を振り返って

八木 健彦

## はじめに

大学院生時代も含めると合計 37 年間も過ごさせて頂いた物性研究所を、本年 3 月末に定年退職いたしました。物性研以外にも、ポストドク時代はアメリカのカーネギー研究所、助教授時代のはじめは東北大金研と他の研究機関で仕事をする機会もありましたが、研究生活のほとんどを過ごさせて頂いた物性研には、やはり特別な思いがあります。大学院時代以来、高温高圧下の X 線回折実験を用いた地球深部物質の研究が一貫した中心テーマでしたが、私自身が研究を始めた頃は地表から地球中心部までのわずか 2%程度の深さに対応する圧力温度条件が上限だったものが、今や中心部そのものに対応する 360GPa で精密な X 線実験が可能になるまでに実験技術が進歩しました。ちょうどシンクロトロン放射光の硬 X 線が利用できるようになった時期に遭遇し、実験技術の飛躍的進歩が可能になったわけですが、このような発展に微力ながらも貢献できたことをうれしく思っています。その発展の様子を簡単に振り返りながら、このような分野の研究に物性研が果たした役割も紹介して、お礼とごあいさつとさせて頂きたいと思います。

## マルチアンビル装置を用いた X 線実験

大学院生時代は、物性研超高压部門に在籍して秋本俊一先生の指導の下にキュービックアンビル装置と回転対陰極型 X 線源を組み合わせた実験技術の開発を行いました。それまで諸外国で行われていた実験を大きく越える 10GPa 領域での高温高圧 X 線実験を行う実験技術の開発に成功しましたが、これは神戸製鋼で開発された DIA(ダイア)型と名付けられたキュービックアンビル装置の採用が大きかったように思います。それを用いて地球深部の基本鉱物のひとつである SiO<sub>2</sub> の相転移境界を、精密に決定することができました。物理分野の高圧実験では圧力の絶対値の精度はそれほど重要視されませんが、地震波のデータと比較して地球内部の議論を行う高圧地球科学においては圧力の絶対値が重要で、高圧 X 線実験の特徴を生かす研究を行うことができました。

ポストドク時代は全く別の、ダイヤモンドアンビルと呼ばれる高圧装置を使った研究を行いました。しかしその後、助手として再び物性研で研究を始めた頃に筑波のフotonファクトリー建設が開始され、シンクロトロン放射光を用いた高圧 X 線実験のプロジェクトに参画することになって、再び DIA 型装置を使うことになりました。シンクロトロン放射光を用いた高圧 X 線実験は当時米国を中心としてすでに始まっており、いわば後発の日本としては何とか他にない特色ある装置を開発しようとさまざまな検討と議論を重ねた結果、出力 500 トンの大型プレスと組み合わせた大容積の試料を加圧できる装置に決定したわけです。このプロジェクトには日本中の多くの高圧グループが参画しましたが、中心的役割を果たしたのは下村理氏をはじめとする初代の物性研超高压部門(箕村研と秋本研)出身者たちでした。完成した「MAX80」と名付けられた装置は、圧力領域は 10GPa 程度だったものの、放射光の高輝度・低発散という特徴を生かし、それまで全く不可能だったさまざまな実験を可能にしてくれました。例えばケイ酸塩融体の X 線回折や、ラジオグラフィックを用いて試料室中を落下する白金球を観察し粘性を求めるといった実験から、高温高圧下の相転移の時分割測定に基づく転移速度論の研究、黒鉛-ダイヤモンド転移過程のその場観察、といった特徴ある実験が行われ、国際的にも高く評価されました。その結果、米国の Brookhaven 国立研究所やドイツの DESY などにも同型の装置が日本から輸出され、設置されることになりました。

## 焼結ダイヤモンドの利用

このように新たな高圧研究を可能にした MAX80 装置でしたが、私自身が強い興味を持っていた地球の 660km 以深に広がる下部マントル領域での研究を行うには 26GPa 以上の圧力が必要で、それはまだ全く到達できない世界でした。物性研の助手を 5 年間勤め上げ東北大金研に転出して後、秋本先生の退官後に再び物性研に今度は所員として戻ってきた



頃、焼結ダイヤモンドという超硬合金よりはるかに硬い材料が、工具材として実用化され入手できるようになりました。これを使って圧力領域を拡大しようと初代の助手だった内海渉氏とさまざまな試行錯誤を重ねましたが、15GPa 程度までは発生できたものの、それ以上の圧力は簡単ではありませんでした。当時、後に述べるように私の研究室ではダイヤモンドアンビル装置も使っていたことから、対向アンビル型ならもっと高圧が出せるのではないかと考え、大学院に入ってきた船守展正氏と共に新たな装置を焼結ダイヤモンドを用いて作り、何とか 30GPa 領域での高温高压 X 線実験を行うことが可能になりました。下部マントルは地球全体の体積の 50%以上を占めますが、それまでの研究から地表では全く見られないペロフスカイト構造の高密度鉱物から構成されている可能性が高いと考えられていました。しかしペロフスカイト構造のケイ酸塩鉱物は 1 気圧下に準安定状態で回収できるものの、それを高温にするとすぐアモルファス化してしまうことから、地球深部の高温下における安定な構造や状態方程式などの物性はまだ未解明でした。開発されたばかりの装置を用いて我々は、下部マントルに対応する圧力温度条件下での初めての X 線その場観察に成功し、斜方晶ペロフスカイト構造が安定なことやその高压下での熱膨張などを測定し、それが下部マントルを構成する主要鉱物である可能性がきわめて高いことを明らかにすることができました。当時はまだ、10GPa 以上の圧力領域で試料を 1000°C 以上に加熱しながら X 線実験を行える装置は存在せず、これらの研究成果は Royal Institution のシンポジウムや American Geophysical Union の年會に招待されて発表し、高く評価して頂きました。

## ダイヤモンドアンビル装置

時間が少し戻りますが、博士号を取得後ワシントン DC のカーネギー研究所でポスドクとして働いた 2 年間は、ダイヤモンドアンビルと呼ばれる高压装置を使いました。この装置は 2 個の宝石用ダイヤモンドを使って、その間に挟んだ金属板ガスケットの穴の中に入れた極微量の試料を加圧し超高压を発生させるもので、原理としては実に単純なものです。1958 年に米国で高压下の分光測定用装置として初めて発表された頃は、試料の量があまりにも微量で圧力値を正確に決めることも難しく、3GPa 程度でダイヤモンドもすぐ割れてしまい、まさか半世紀後にこれが高压研究の主要な装置になるとは誰も夢想だにしなかったそうです。カーネギー研究所では 1970 年頃から H.K.Mao 博士が中心になって、この装置の圧力限界を拓げる努力が集中的に行われ、さまざまな技術改良の積み重ねの結果、私がポスドクとして参加した頃に初めて、100GPa (=1 メガバー) を越す圧力発生に成功したばかりでした。そのように高压実験技術のきわめてエキサイティングな発展を目の当たりにする機会を持ちましたが、私自身はこの装置には全くの初心者だったので、より基礎的な技術の習得とそれを用いた下部マントル鉱物の物性研究を進めました。当時はちょうどケイ酸塩ペロフスカイトの存在が発見されたすぐ後で、その圧縮率や生成する組成領域など基本的性質すらほとんど解明されておらず、幸いにもそれらの物性に関して初めてとなるいくつかの研究成果を挙げることができました。

帰国して物性研助手に採用されてから、秋本先生の助けを借りながら国内の高温高压グループでは初めてダイヤモンドアンビルを使った実験装置を立ち上げ、回転対陰極型 X 線装置と組み合わせて、それまで 300 時間以上の露出が必要とされていた X 線実験を 10 分の 1 以下の時間で可能にして、世界に先駆けて 100GPa 領域での X 線実験を始めることができました。当時このような圧力領域での X 線実験を行えるところはまだ国際的にもほとんど無く、SiO<sub>2</sub> や FeO などの超高压領域における相転移の解明などを行い、面白い結果を得ることができました。この頃から前述のマルチアンビル装置とシンクロトロン放射光を用いた実験にも深く関わるようになり、いわば二足のわらじを履いたような状態でしたが、結果的にはそれがマルチアンビル装置と対向アンビル型装置という対極的な高压装置それぞれの長所と短所を知り、それらをうまく組み合わせて他では行われていない研究を展開することが可能になりました。

## レーザー加熱ダイヤモンドアンビルとシンクロトロン放射光の組み合わせ

焼結ダイヤモンドを使った対向アンビル装置で 40GPa 程度までは高温高压 X 線実験が可能になったものの、地球中心部の 360GPa をめざすにはやはりレーザー加熱ダイヤモンドアンビル装置を使うほかは無いただろうと考え、さまざまな手段を模索していたところ、申請した科研費の特別推進研究が幸いにも採択されました。2 代目助手の近藤忠氏と協力しながら PF の BL13C に専用実験装置を建設し始めたのが 1995 年で、さらにいろいろと改良を重ね、数年後には 100GPa を越す圧力領域での実験が可能になりました。それを用いて下部マントルの鉱物に関するいろいろな研究を行うことができましたが、最も主要な構成鉱物であるケイ酸塩ペロフスカイト相についての実験はほとんど行いませんでした。

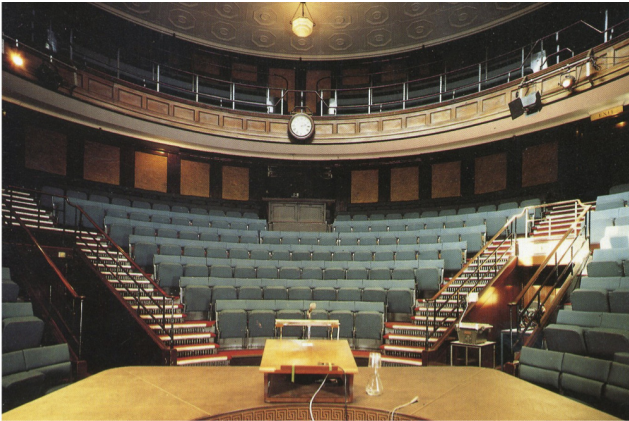
それはすでにペロフスカイトが下部マントル全域で安定であるという(今となつては間違つた)実験結果が報告されていたことや、ペロフスカイトよりも高密度になるケイ酸塩鉱物の予測が全く無かつたこと、かつ 100GPa を越す領域の実験では高価なダイヤモンドアンビルの消耗が非常に激しいこと、などの理由によるものでした。2000 年頃に立ち上がった第 3 世代放射光源の SPring-8 でも高圧 X 線実験ステーションが建設されましたが、まだレーザー加熱の装置はなく、SPring-8 の下村理氏から要請を受けて、われわれが PF で開発したシステムとほぼ同じものを BL10-XU にも建設しました。マンパワーの制約から自分たちでそれを使うことはほとんどできませんでしたが、その装置は BL10 のユーザーグループによってさらに改良を重ねられ、超高輝度で発散が小さいという第 3 世代光源の特色と相まって、国際的にもトップレベルの高温高圧 X 線実験装置になりました。そしてそれを使って東工大の廣瀬グループが 2004 年、高圧地球科学の分野ではちょうど物理分野における酸化物高温超伝導体の発見に較べられる、ポストペロフスカイト相の発見という大きな成果を挙げました。この相の発見によって、それまで謎とされてきた地球の下部マントルとコア境界付近のさまざまな地震波の観測結果を説明できる可能性がでてきて、それ以来今も世界中でポストペロフスカイトの研究が盛んに続けられています。

廣瀬グループはその後も精力的に研究を展開し、アンビル先端径を 50 ミクロン以下という極微小サイズにして、X 線のビームもそれに応じて小さくするなどの工夫により、ついに地球中心部に対応する条件下での実験まで可能になったわけです。一方私の研究室では、少し違う実験手法を組み合わせ、その後もポストペロフスカイトやコア物質の研究を展開してきました。このようにポストペロフスカイトの発見という「大物」は逃したものの、地球深部研究において長年にわたりいろいろとユニークな研究を展開することができ、幸い国際的にも高い評価を受けることができました。英国の Royal Institution やイタリアの Enrico Fermi School of Physics に招かれたり、Humboldt 賞や Bridgman 賞などを頂くこともでき、いろいろと大変楽しい体験もさせて頂きました。本稿の執筆依頼をして下さった勝本委員長にぜひそれらの写真も載せるようにと勧めたので、そのいくつかを添付させていただきます。

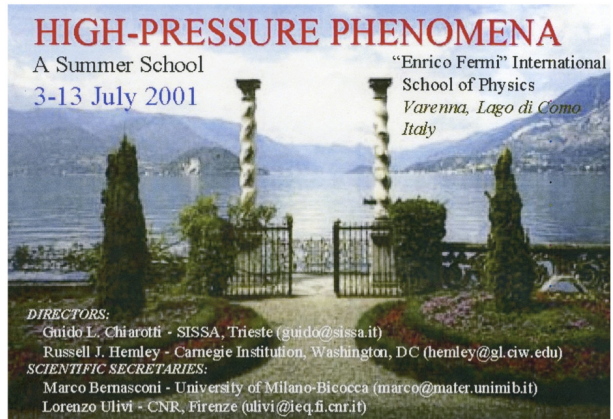
## おわりに

こうして振り返ってみると、物性研究所という新たな実験技術の開発を行うには大変恵まれた環境を生かして目一杯好きなことをさせて頂き、それが高圧分野の発展に幾分なりとも貢献する結果になったことを大変ありがたく思っています。また本稿では地球科学分野の研究しかご紹介しませんが、高圧実験技術は近年物性科学の分野でも大変大きな役割を果たしており、物性研内の多くの方々と共同研究などを通して、物性研の研究活動にも少しはお役に立てたのではないかと考えています。誌面の関係からごく一部しかお名前を記すことはできませんでしたが、このような成果を挙げるのができたのも歴代の研究室メンバーや学生諸君、共同利用研究者の絶大な協力があつたからこそで、ここで改めてお礼を申し上げます。この頃は若手の自主性尊重ということが非常に重視され、研究者 1 名と学生たちだけで実験をするような研究環境が増えていますが、物性研のように所員が助教や技術職員と協力しながらチームを組んで初めて可能になる研究も多いと思います。また共同利用研では、外部の多様な研究者と協力しながら研究を進めていくことにより、研究の幅を大きく広げることが可能です。最後の 3 年間は副所長も経験させて頂き他のさまざまな組織の様子を見る機会もありましたが、物性研のように設立後半世紀経ってもその存在感を保ったまま高いレベルでの活動を続けられている組織はそれほど多くないように思います。物性研がこの先もその特徴を生かしながら、物性科学が関連した広い分野における求心力のある研究の場として一層発展することを祈念して、筆を置かせていただきます。

The Royal Institution, London



“Enrico Fermi School of Physics”, Italy



Bridgman Medal



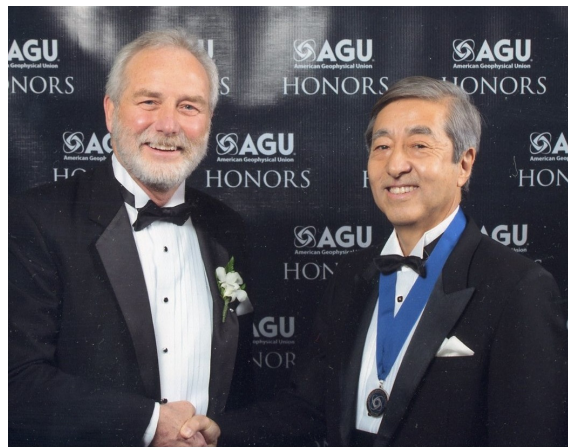
Sicily, Italy



Humboldt Award, Bayreuth



AGU Fellow, San Francisco



# 物性研を離れて

## 超低温とは何か？ 超流動とは何か？ 固体ヘリウムの超流動と量子渦状態

久保田 実

皆様に支えて頂いて 1986 年 10 月からこの 3 月迄の長い年月物性研で御世話になった久保田です。表題の課題を掲げてやって来ました。今も実験結果の解析を進めつつある処ですが、皆様に一緒に考えて頂けたらと思います。

液体ヘリウムを減圧して得られる約 1K の温度は、宇宙を満たす輻射の約 3K の温度よりも低く、それ自体人類が到達した極限状態の始まりであった。この扉を開き(He 液化 1908 年)、超伝導現象を発見(1911 年)し、又、超流動状態(当時は、その実態は理解されて居なかったが)を実現し、様々な磁性研究が、常磁性体の断熱消磁と絡んで始められた研究所をつくった、この中心人物こそが Kammerlingh Onnes だ。しかし超流動現象がそれとして理解され、ボーズ凝縮と絡めて議論されたのは 1938 年の F. London に依る。

1957 年の BCS 理論の成功によって、物性物理学の大問題、超伝導が解決されたかの様に思われたのは一瞬で、引続いて議論されたのが、更にクーパー対を一般化した系の超伝導、超流動の可能性であった。フェルミ粒子系である  $^3\text{He}$  が実験に使える程の量で、入手可能になってきたのも同じ時期であった。1957 年は奇しくも Landau のフェルミ液体論が登場した年でもある。世界の低温研究は、この頃から、スピンも軌道角運動量も 0 である、s 波対に限らないクーパー対、非 s 波クーパー対による超流動、が、殊にハードコアを持つ  $^3\text{He}$  の系で議論される様になった。超流動転移温度の理論的見積もりが、実験環境のより低温へのシフトに連れて低温にシフトして行った時代でもある。ロシアの Peshkov による発見の誤報を鋭く指摘した John C. Wheatley の先を越して、 $^3\text{He}$  の超流動の発見をしたのは、コーネル大の D. M. Lee, R. C. Richardson, D. Osheroff, と J. D. Reppy らのグループであった。これに先立つ 1960 年代、低温実験を様変わりさせる出来事が進行して居た。それは、希釈冷凍機と超電導マグネットの実用化という技術的進展であった。当に「超低温」(1K 以下の温度)が開いて行く時代であった。日本での超低温実験については、1983 年に、物性研の前所長であった中嶋貞雄先生が固体物理 vol.19, No.10,の超低温特集号巻頭に書かれている「超低温開発とその意義」にその時代の背景が紹介されている。

幸か不幸か、この書き物が書かれた時代に、久保田は国内に居らず、ドイツ・ユーリッヒに 1977 年にその活動が始まった、Frank Pobell 教授の超低温グループに 1978 年 4 月から参加して、ドイツではじめての超低温の研究を始めて居た。Frank Pobell 先生は、米国コーネル大での自らの経験から、急速に発展する超低温の活動を具に目にして、自ら超低温の研究グループを立ち上げたのである。そこに集まったのは、Pobell の下で学位を取った Chr. Buchal 博士であり、フロリダ大で固体ヘリウムの研究をして来た Robert M. Mueller 博士であり、久保田であった。幸にして、Pobell 氏の構想のもと、Mueller 氏の詳細なデザインで建設したユーリッヒの 2 段核断熱消磁冷凍機は、世界で初めてのマイクロケルビン温度を大変安定に作り出す事を世に知らしめた。

我々は 1980 年、世界一低い数十マイクロケルビン領域の物質温度を初めて作り出すと共に、寒剤として用いた  $\text{PrNi}_5$  の核磁性をその比熱の詳細な精密測定から、強磁性転移である事、実効核スピンの大きさと、飽和磁化、その間の相互作用の特性を明らかにした。その後、更に周期律表上の元素の未だ知られて居ない基底状態を調べた。Rh の元素として最低温に  $T_c = 325 \mu\text{K}$  を持つ超伝導を発見、当時世界最高純度の Pd を用いて最低温の spin glass 転移を見出したり、Au の超伝導転移温度を見積もったりした。更に、パラメータを変更可能なフェルミ液体である、 $^3\text{He}$ - $^4\text{He}$  混合液の特性を比熱測定から研究し、また、スピンウエーブの観測を NMR 法を用いて行った。この系は、新たな超流動転移が期待されるが、試料を冷やすのが大変困難であり、未だ新しい超流動転移は実現していない。 $\mu\text{K}$ , nK, pK の温度領域は、従来、核スピン系で議論されて来たが、1995 年以降の、希薄原子気体系での BEC や BCS 系の研究の発展で、より多くの人々に馴染みの領域になって来よう。



久保田が物性研に着任したのは、1986年10月、超低温部門主任、小川信二先生の下で、超低温を実現する装置作りから始まった。ベテラン技術職員の五十嵐さん、半年後に着任の柄木助手(後、助教:現琉球大准教授)、更に博士課程の大学院生として白浜君(現慶応大教授)が加わり、研究室作りが始まった。ここでは超流動、超伝導とは何か?と言う大きな命題に関連して、久保田研究室が行って来た事柄を掻い摘んでテーマを絞ってご紹介したい。取りも直さず、凝縮体を殆ど持たない、「孔径を制御した多孔質ガラス中に凝縮させた単原子膜からなる3次元超流動 $^4\text{He}$ 」の基礎研究と、固体のヘリウムで現在も活発に研究活動が進められている、固体の格子の並進対称性と超流動の運動量空間での凝縮が共存する「固体超流動」の研究に就いてである。

超流動現象が、物質構成粒子のボーズ凝縮と結びついている事を最初に指摘したのは、はじめに述べた1938年のFritz Londonであった。しかし現実の系で超流動が実験的に初めに観測されたのは液体ヘリウムであったし、固体中電子のクーパー対の超流動で、どちらも自由粒子というBECの描像とは懸け離れた粒子系での事であった。事を更に押し詰めて、固体でBECの量子凝縮現象が起こりうるかを最初に議論したのは1956年のPenroseとOnsagerであったが、彼らの結論は否定的であった。この議論が間違いであり、固体ヘリウムなど、量子固体と呼ばれる量子性の高い固体では、格子の並進対称性を持ったまま、運動量空間での秩序現象である超流動が可能であり、具体的に非古典的慣性モーメントが観測されるべきだと言う議論が起こったのが1960年代後半から1970年であった。但し、何れの議論も超流動をもたらす基礎は構成粒子或は系に含まれる欠陥がボーズ凝縮すると言う事でその超流動の可能性を議論している。

2次元の超流動がKosterlitzとThoulessに依って1972年、理論的に提唱され、その特徴を明瞭に示す実験結果がBishopとReppyに依って与えられたのは1978年の事である。この新しい超流動を研究する為にReppyとそのグループが開発したのが、高感度捻り振り子法である。この方法がそれ以前の系を用いたAndronikashviliの捻り振り子法と異なる点は、剛性度の高い金属を振り子のバネ材として用い、高いQ値の振り子にする事で、単に慣性モーメントの変化を共鳴周波数の変化から高精度で観測するばかりでなく、共鳴周波数での振幅の変化から振り子系の中で起こるエネルギー散逸を定量的に議論できる様にした事である。殊に、これが2次元超流動の研究に使われた事で、Ambegaokar, Halperin, Nelson, and Siggia(AHNS)[1978,1980]に依る詳しいdynamical KT理論との詳細な対応の定量的な研究を可能とした。

久保田研では、当時の、北大、渡邊昂先生、和田信雄助手(現名大教授)との共同研究として、また、白浜君の研究課題として、この捻り振り子法を用いた「多孔質ガラス中に吸着させたHe薄膜の超流動転移」を取り上げた。この系の初めの仕事は、「孔径に依存するKT転移」として、Shirahama *et al.*, Phys. Rev. Lett. **64**, 1541 (1990)の論文に纏められた。これと平行して、久保田研では、巨視的な超流動性を確認する為に、この系をはじめとする系でのDC回転下の量子渦糸侵入の観測をする事と、この系に超流動流れを作る事によって超流動の次元性の解明と、乱流状態を作り出す事を目指す実験を準備した。前者は、超低温冷凍機全体を回転させる、回転冷凍機を建設する事を意味した。

久保田らが建設した回転冷凍機は、次の点でそれ迄の同様の装置と異なっている。1) 捻り振り子実験を回転下で行う事を当初から想定して居り、これが大変振動に弱いと言う事を念頭に様々な振動を起こさない工夫を行った。2) その一つとして、又装置の信頼性の向上と操作の簡便化を図る為に久保田が独自に蓄えて来た稀釈冷凍技術、取り分け、1K potを廃止し、循環 $^3\text{He}$ を加圧予冷とStill排気管中の熱交換器によって冷却し、機械的、熱的にも振動の起こらない、稀釈冷凍機を開発した。

3次元 $^4\text{He}$ 薄膜の回転実験によって渦糸の侵入を連続的に観測し始めたのは、実は物性研の柏への移転前であった。しかし実験結果をそれ迄に議論されて来た理論に照らして解析する事は、大きな困難を伴った。量子渦糸の専門家であるEdouard Sonin先生と、簗口友紀先生の協力を得て、定量的な解析を発表できたのは2005年になってであった(Fukuda, *et al.*, PRB **71**, 212502 (2005))。この実験は、捻り振り子法によって超流動3次元渦糸侵入を観測した初めてのものとなった。DC回転下の実験結果の解析と共に、非回転時の捻り振り子のAC速度に依存する応答から、この系が、DC超流動流れ速度に対しても同様の速度依存をするエネルギー散逸を起こすと言う仮定のもと、人工的に回転速度に応じた渦糸の本数と、夫々の渦芯の周りの量子化した超流動速度場を見積もり、各速度場に対応する熱励起(2D渦)との相互作用に依ると考

えられるエネルギー散逸を積分、加算して評価し、DC 回転下で得られた実験結果の特徴を再現する事が出来た。こうして殆ど Bose 凝縮体を持たない 3D 超流動が実現できた事を実験的に示した。又捻り振り子法に依る初めての 3D 渦糸観測を行った事になる。この解析法は、次に議論する固体ヘリウムでの「固体超流動」と渦糸侵入の議論にも大いに役立つ事となった。

先にも述べた様に「超流動固体」状態が盛んに議論された 1960 年代後半から 1970 年には、超流動と言え、その基礎は構成粒子や欠陥のボーズ凝縮と言う事を前提に議論が進められていた。しかし、上で述べて来た様にその後の研究で、2 次元系はじめ低次元系を基礎とした超流動が現実存在する事が明らかとなって来た。最近では 1 次元、朝永—ラッチェンジャー状態が有限系で出現するときの超流動的振舞も議論されるに至って、実験と比較される様になって来ている(例えば、T. Eggel, et al., PRL **107**, 275302 (2011)を見よ)。我々自身が研究して来た 2 次元超流動から出発した 3 次元超流動迄を含めると、多様な超流動の出現のメカニズムの可能性が存在する事が予見できる様になって来ている。一方、1986 年に発見された銅酸化物の高温超伝導体の仲間では、量子化した渦が織りなす渦の液体や固体等の「渦状態」が、議論され、そこに低次元系、特に量子渦系の 2 次元性が重要な役割を果たしている事が指摘された[Fisher, Fisher, Huse, Phys. Rev. B **43**, 130 (1991)]。

こうした事柄を時代背景に、固体ヘリウムでの「超流動固体状態」を指し示す、「非古典的回転感受率」が観測されたのではないかとする報告が初めて米国ペンシルバニア州立大の Moses Chan に依る口頭発表であったのが、2003 年夏の QFS2003、量子液体固体国際シンポジウムであった。この会議ではイタリア、ミラノ大学の若手理論家 Davide Galli が有限温度域での超流動固体状態の可能性を数値計算の結果から提案していたのが印象深い。Kim & Chan の Nature 誌上に「Probable observation of a supersolid helium phase」と言う論文が発表されたのは、2004 年 1 月であった。ここでは、約 250 mK 以下の温度で、Vycor という孔径が約 6-7 nm の多孔質ガラス中に形成した固体  $^4\text{He}$  について、捻り振り子法で慣性モーメントの減少が起こって居り超流動を観測したのではないかと、と言う報告であった。一方、久保田は、2003 年 12 月にミニ短期研究会を長岡高専荒木らと主催し、そこで Chan 氏からの上記論文 manuscript も紹介した。が、バルクの固体ヘリウム以外の系での量子固体的振舞と、超流動等の量子現象の可能性の議論が、この研究会の議論の中心であった。

2006 年初頭になると、Chan のグループの実験の追試に成功するグループが、コーネル大 Reppy group、慶応大白浜グループと、物性研久保田研グループに拡大した。この様子は、カルフォルニア大サンタバーバラ校で、Ceperley と Chan が主催して開かれたワークショップ、“The Supersolid State of Matter”(http://online.itp.ucsb.edu/online/smatter\_m06/) で報告されている。この後、少なくとも半年から 1 年毎に世界のどこかでこの系列の研究会が開かれ、その都度、久保田研も発表している。最も最近のものは、国際量子液体固体シンポジウム QFS2012 の中で行われた。

2007 年、カナダ、アルバータ大の John Beamish のグループは、hcp 固体  $^4\text{He}$  のズリ弾性率の測定を行い、Chan 達の捻り振り子実験で異常が出るのと同じ 250 mK 以下でズリ弾性率が上昇、即ち、固体が硬くなるという事を報告した。この変化の温度依存性と、微量の  $^3\text{He}$  に依って異常自体は小さくなるものの、この起こる温度が上昇する事等、Chan 達の捻り振り子実験の結果と共通する事柄がある事から、この現象が  $^3\text{He}$  に依る dislocation の pinning(低温側)と unpinning(高温側)とに依って起こると主張した。

一方、P.W. Anderson は Nature Physics, **3**, 160, (2007)で、2006 年迄の報告で、そもそも異常が現れるとされる温度が大変高い事や、DC 超流動流れが 250 mK 付近では全く観測されていないこと、又、その異常の現れ方が大変ゆっくりである事から、これ迄に報告された捻り振り子実験の結果は、超伝導で議論されている、渦液体状態に対応するものであって、本当の超流動固体転移  $T_c$  は、もっと低い温度にあって未だ観測されていないのではないかと議論した。

Penzev, Yasuta, & Kubota, Phys. Rev. Lett. **101**, 065301(2008)は、捻り振り子応答の AC 速度依存性の詳細な測定から、250 mK ではなく約 500 mK に渦液体状態の Onset 温度があり、この温度以下で、超流動転移ではなく、渦液体状態が出現していると、議論した。更に久保田研は、同じ試料に対して、約 75 mK 以下の温度に巨視的相関がある「超流動固体状態」への転移が出現する事を、次の独立した 3 つの実験事実から議論している。1) 一定温度の下、共鳴振動し

ている捻り振り子の AC 速度を大きい一定値で測定した後、ステップワイズに AC 速度を下げて行き試料の外周で、 $10 \mu\text{ m/s}$  程度にした後、速度を上げて行くと言う操作をすると、ある温度以下で、捻り振り子の応答が履歴に依存する様になる事が見出されている(Shimizu et al., arXiv:0903.1326; Kubota et al., JLTP **162**, 483 (2011)). hcp 49 bar の試料で、我々はこれが  $75 \text{ mK}$  以下で起こる事を見出した。我々は、AC 速度を下げて行く過程の状態を「平衡状態」、AC 速度を上げて約  $40 \mu\text{ m/s}$  以上で出現する状態を励起状態と呼ぶ事にする。この両状態間の差、周波数シフトの履歴成分差は約  $200 \mu\text{ m/s}$  の速度付近で最大値を取る。この差から導かれる「超流動密度成分」を我々は、超流動固体密度  $\rho_{ss}$  であると提案している。2)「平衡状態」にある捻り振り子があるゼロからステップ状に一定速度の下で DC 回転させている状態で、平衡状態を各測定点で保ちながらステップ状に温度を変える事によって、ある一定速度下の捻り振り子の温度に依存する応答を得る。我々は、DC 回転は、超流動密度  $\rho_{ss}$  に変化は与えないが、 $T_c$  以下で extra なエネルギー散逸が現れる事を見出した(Yagi et al., JLTP **162**, 492 (2011)). この事は、先に述べた 3 次元  $^4\text{He}$  薄膜の系と共通の事柄で、これが、渦糸侵入による渦芯の周りの超流動流速と、この系の熱励起との相互作用で引き起こされると考えている。3)「平衡状態」にある試料の捻り振り子の AC 速度依存性を詳しく調べると、Kim 及び Chan が最初に指摘し、Anderson がこれは渦糸の励起に関係していると指摘した  $\log V_{ac}$  に線形に変化する応答が  $500\text{ mK}$  のオンセット温度以下の広範な温度領域で観測されるが、比例常数に跳びがある事が見出された。この跳びの起こる温度が、 $T_c \sim 75 \text{ mK}$  付近である事が見出された(Kubota et al., JLTP **162**, 483 (2011)). こうして我々の実験結果は、 $T_c$  以下での超流動固体状態を支持すると共に、これと共存し、高温迄続く「渦液体」の存在を示唆している。

しかし、今回の QFS2012 で、新たな展開も見られた。その一つは、2004 年始めに報告された Vycor 多孔質ガラス中の He の「転移」は、バルクの  $^4\text{He}$  を注意深く排除したセルでの実験では、消失してしまうと言う事を、当該の Chan 自らが報告したこと。更に、これ迄の捻り振り子による周波数の変化は、試料の慣性モーメントの変化を反映するものとして一般に解釈されて来たが、振り子のおもりの部分に詰めた試料の慣性モーメントの他に、捻り棒の中の固体ヘリウムの弾性特性が実験結果に顔を出して来るとの指摘が ENS Paris の Balibar らに依ってなされた事である。

こうして、事態は大混乱に陥っている様にも見えるが、詳細に上記の影響を検討してみても、確かに一部の試料サイズが大変小さい系等で弾性特性の効果が確かめられはしているが、我々が議論している様な捻り振り子応答の hysteresis のブランチの差を取ったり、回転角速度依存性の係数等では、弾性特性から来る影響を相殺して露には見えない様にしている様に思われる。我々は更なる詳細な検討を経た成果を纏めようとしてつつある処である。Vycor ガラスの孔径は我々が見積もった超流動固体の渦芯の大きさよりも小さく、上記実験は辻褄が合っている様に思われる。

我々が観測したもののマイクロな起源に付いては、未だ解明迄には隔たりがある様に思えるが、一方、可成りの観測事実が、量子化した渦を想定する事で、超伝導等で起こっている現象と対応づけられる様に思われる。Anderson が提唱した様に、量子渦液体状態から超流動状態への転移が、3 次元系の KT 転移に対応するものである可能性も高い様に思っている処である。この問題の解明の為に何らかの寄与が出来たならと切望している。尚、この間明らかになった物性研回転クライオスタットの際立った性能が未解明の現象の研究に大変重要な役割を果たしている事を改めて再認識した。即ち、単純な振動ばかりでなく、回転速度の安定性が、超高精密空気ベアリングの使用によって保たれている事が、微小な速度場に敏感に反応する固体ヘリウムの超流動と渦状態の研究に決定的重要性を持つと言う事である。

本稿では、この他の重要な課題、超流動  $^3\text{He}$  の回転実験や、金属水素系での興味深い研究成果、そして主に柄木助教によって中心的に担われた電子系の物性研究の重要な成果を割愛してしまったが、これらも世界に誇る成果と活動である。歴代の、共同研究者各位、多数の外国人共同研究者各位、そして御世話になった工作室、図書室や事務の方々、国際交流室等の物性研の様々な方々に加え、研究を様々な形でサポートして下さいました業者の方々など、そして、久保田研歴代大学院生、他のメンバーに心からの謝意を表します。

久保田研での固体超流動全般の活動については : M. Kubota, JLTP, DOI 10.1007/s10909-012-0653-0 及び references therein. を参照して下さい。



# 研究室だより

## 押川研究室

物性理論研究部門 押川 正毅

2006年4月に物性研に着任してから、早いもので既に6年以上が経過した。個人的な話になるが、私が物性研に着任したときに娘がちょうど小学校に入学し、今春卒業した。また、物性研着任当初に研究室にいた東工大所属の学生さんも一人ずつ研究室を卒業していき、物性研着任後の東大所属の学生さんに次第に入れ替わっていった。東大で最初に修士課程の学生として研究室に加入した古谷峻介氏も今春博士課程を修了した。従って、物性研に着任してから研究室の学生さんもちょうど一巡入れ替わったことになる。小学生は6年間で目に見えて大きく成長し、また大学院の学生さんも5年間で研究者として大きく成長する。それに比べると自分自身は進歩がないように思えてしまうが、常に若い人達といっしょに研究することができるのは大学にいるものの特権であろう。

以下、物性研での6年間の研究室のアクティビティをいくつか抜粋して紹介する。

### ハルデン相と20年来の宿題

研究者として永遠の課題は、どのような研究テーマを設定するか、ということである。研究者にはそれぞれ専門分野や得意な手法があり、それらを活用することで研究を進展させることができる。まずは得意な手法を確立することが研究者としての第一歩となるが、常に同じ題材で研究しては発展性がなくなってしまうおそれもある。ただし、古い題材から思わぬ発展がもたらされることもある。結局、当然ながら、研究テーマの設定に一般論として正解があるわけではないだろう。

私にとって最初の研究は、修士1年のときに「物性若手夏の学校」に出席し田崎晴明氏の講義[1]に出席したことがきっかけで、量子スピン系のハルデンギャップに関連する問題に取り組んだものである。当時から残っていた疑問が、最近意外な進展があつて解決をみたのでこれについて簡単に述べてみたい。

磁性の基本的な模型である、1次元量子ハイゼンベルグ反強磁性体を考える。スピン1/2の場合、この系はギャップレスの連続的な励起状態を持ち、スピン相関関数はべき的に減衰する。ところが、このような性質は同じハミルトニアンでもスピンの半奇数の場合に限られ、スピンの整数の場合には励起スペクトルにギャップがあり、スピン相関関数が指数関数的に減少するという、当時としては驚くべき「予想」をハルデンが1981年に行った。アフレックら(Affleck-Kennedy-Lieb-Tasaki, AKLT)による厳密に解ける模型の構築など、その後の研究でハルデンの「予想」はほぼ確立し、整数スピンの場合の基底状態は「ハルデン(ギャップ)相」と呼ばれるようになった。ハルデン相は、反強磁性秩序などの秩序を持たない、「乱れた」相のようにみえる。しかし、ハルデン相は単に秩序を持たない相ではないことも認識されてきた。たとえば、1次元量子ハイゼンベルグ反強磁性体に一軸異方性を付け加えた、次のような模型を考える。

$$H = \sum_j \vec{S}_j \cdot \vec{S}_{j+1} + D(S_j^z)^2.$$

$S = 1/2$  の場合、 $D$  に比例する異方性項は定数となって意味がない。しかし、 $S \geq 1$  の場合には異方性項として意味を持つ。 $D = 0$  の場合、通常のハイゼンベルグ模型に帰着し、基底状態はハルデン相にある。一方、 $D$  が無限大の極限では、

基底状態は各サイトが  $S_z = 0$  を持つ、自明な状態となる。この 2 つの状態は、どちらも秩序を持たないように見える。しかし、 $D$  を変化させると、臨界点  $D_c - 1$  で量子相転移が起きる。この量子相転移の存在は、2 つの相が異なることを示唆している。実際、 $S = 1$  のハルデン相は、端状態とストリング秩序の 2 つの特徴を持つ。これら 2 つの特徴は、隠れた対称性の自発的破れとして統一的に理解できることがケネディと田崎によって指摘された。[2]

**However, since our hidden symmetry is always  $Z_2 \times Z_2$ , the ground states which break the hidden symmetry can be divided into only four classes. For  $S = 1$ , the fourfold degeneracy implied by hidden  $Z_2 \times Z_2$  symmetry breaking just corresponds to the fourfold degeneracy of the VBS states on a finite open chain. In contrast, for  $S > 1$ , the hidden  $Z_2 \times Z_2$  symmetry cannot completely specify each of the  $(S + 1)^2$ -fold degenerate ground states of the VBS model. This fact suggests the possibility that there is another hidden symmetry, but we still do not know any such extended symmetries.**

図 1: 私の 1992 年の論文[3]の p. 7475 から引用。  $S = 2$  のハルデン相では隠れた対称性が自発的に破れていないため、 $S > 1$  では未発見の隠れた対称性が存在しそれが破れているものと予想していた。結局そのような対称性はその後も見つからず、最近になって思わぬ形で解決した。すなわち、偶数スピンのハルデン相は自明な相と本質的に区別がつかず、従って、当時私が予想したような隠れた対称性はおそらく存在しない。

私が学生時代の 1992 年に書いた(私にとって最初の)論文[3]では、まず隠れた対称性の概念が一般の整数スピンの拡張できることを示した。ところが、この隠れた対称性はスピンの奇数のハルデン相の場合は破れているが偶数スピンの場合には破れていないこともわかった。このことから、2 つの可能性が考えられる。

- a) 偶数スピンのハルデン相は、実は自明な相と本質的に区別がつかない
- b) 偶数スピンのハルデン相も非自明な相であるが、それを特徴付ける隠れた対称性がまだ見出されていない

当時の私は、偶数スピンのハルデン相も端状態を持つ以上、a)は考え難く、おそらく b)だろうと考えてその後もときどき未発見の隠れた対称性を見つけようとしていたが、うまく行かなかった。

それから 20 年近く経過して 2009 年となっても、この問題については特に進歩は得られなかった。一方、トポロジカル絶縁体が流行のテーマとなりセミナーや研究会で良く話を聞くようになった。ある講演のイントロダクションで、2 次元のトポロジカル絶縁体の端状態が時間反転対称性の存在下でクラマースの定理によって保護される、という話があった。この話はそれ以前にも何度も聞いたはずだが、その日はふと学生時代のハルデン相の問題を思い出した。ハルデン相の端状態の話もこれと同じなのではないか? スピン  $S$  のハルデン相は、端状態としてスピン  $S/2$  を持つ。  $S$  が奇数の場合は端状態のスピンは半奇数、  $S$  が偶数の場合は端状態のスピンは整数となる。時間反転対称性のもとでは、前者の半奇数スピン端状態の縮退(の一部)はクラマースの定理によって保護される。しかし、時間反転対称性が存在しても、偶数スピンのハルデン相が持つ整数スピンの端状態を一般的に保護する機構は存在しない。そうだとすれば、学生時代にはあまり可能性がなさそうに思えた上記のシナリオ a)が成立し、スピン 2 の AKLT 状態と  $D = \infty$  の自明な相が、相転移なしに連続的につながっていても良いように思える。これを実際に示してやろうと思い、それまでさぼっていた行列積状態(Matrix Product State, MPS)の勉強をはじめた。MPS はハルデン相の研究でおなじみの AKLT 状態の一般化であるが、近年は量子情報科学にも応用され、数理的にも大きく発展した分野である。そのぶん、最近のレビューを読んで計算をフォローするのはなかなか骨が折れたが、ついに、時間反転対称性を守りつつスピン 2 の AKLT 状態と  $D = \infty$  の自明な相を断熱的に接続する経路(ハミルトニアンは極めて人工的で複雑なものとなるが)の存在を示すことができた。

これで学生時代からの宿題が一つ片付いたか、と思って喜んでいたら、ちょうどドレスデンのマックス・プランク研究所でワークショップに参加した。ドレスデンで学位を取得し、当時バークレイでポスドクをしていたポールマン(Frank Pollmann)氏と再会し、近況を話し合ったところ、実は彼らも共通する問題について研究していたことがわかった。彼らは奇数スピンと偶数スピンの差異などについては考えていなかったが、スピン 1 の系については MPS を基にか

なり進んだ知見を得ていた。それ以前に、当時 MIT のグー(Zhencheng Gu)とウェン(Xiao-Gang Wen)両氏が  $S = 1$  のハルデン相は時間反転対称性がなくともリンクに関する空間反転対称性があれば非自明な相として保護されることを指摘していたことについても、私は知らなかったのだがポールマン氏に教えてもらった。いろいろ議論するうちに、彼らと共著で論文を書くことになった。[4] ポールマン氏と会う直前に MPS の勉強をしていたことは、大いに議論の助けになった。

これら最近の研究によれば、奇数スピンのハルデン相は「対称性によって保護されたトポロジカル相」(Symmetry-Protected Topological Phase, STP)の一例であり、ハルデン相を保護する対称性としては i) 時間反転対称性 ii)  $x, y, z$  軸まわりの回転対称性( $Z_2 \times Z_2$  対称性) iii) リンクに関する空間反転対称性の 3 つがある。ハルデン相の特徴として指摘されていたストリング秩序パラメータ、あるいは端状態は完全に一般的なものではなく、iii) の空間反転対称性のみが存在して他の対称性がない場合には指標にならない。全ての場合について統一的にハルデン相を特徴付けるのはエンタングルメントスペクトルの二重縮退である。トポロジカル絶縁体も、一般的な見地からは STP の一例である。トポロジカル絶縁体の理解は相互作用のない電子系がベースになっているが、相互作用の強い系でも、対称性によって保護されたトポロジカル相が生じ得る。ハルデン相は、相互作用が本質的に重要な系における STP の例として新たな意義を獲得したことになる。

ポールマン氏との論文での他の共著者であるバーグ(Erez Berg)、ターナー(Ari Turner)両氏とは電子メールのやりとりのみで、論文を投稿した後もしばらく会う機会がなかった。ターナー氏とは 2011 年になってサンタバーバラで、バーグ氏とは 2012 年になってアスペンで初めて会う機会を得た。面識のないまま共同研究ができて論文が出せるのはインターネット時代のおかげ(昔もあったのかもしれないが、より困難だっただろう)であるが、研究がはじまるきっかけとしていわゆる face-to-face の議論が重要であることを示す一例でもあった。いずれにせよ、これら 3 人の素晴らしい若手研究者と共同研究ができたことは大変有り難いことだった。

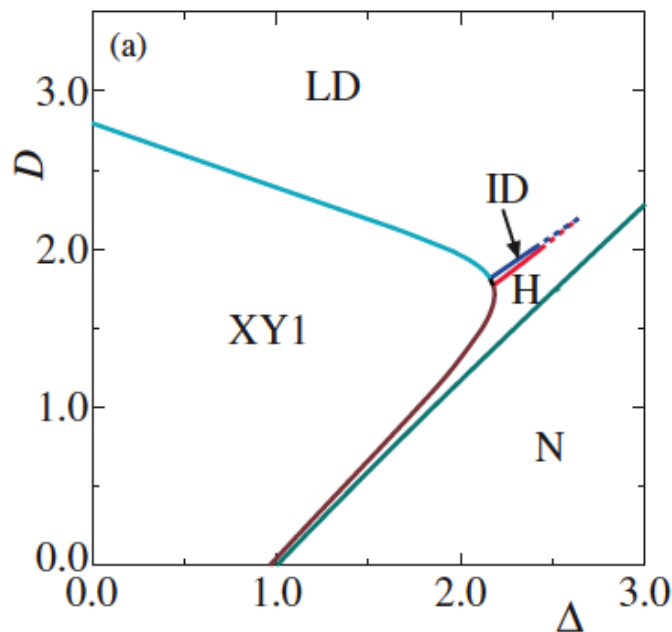


図 2  $S = 2$  の異方的ハイゼンベルグ反強磁性鎖の相図 T. Tonegawa et al., J. Phys. Soc. Jpn. **80**, 043001 (2011) [5] Fig. 3 より引用。  $\Delta$  は  $XXZ$  型異方性のパラメータであり、等方的なハイゼンベルグ反強磁性鎖は  $\Delta = 1, D = 0$  に対応する。等方的なハイゼンベルグ反強磁性鎖は非常に細いハルデン相(H)に含まれるが、このハルデン相は  $D = \infty$  を含む自明な相(D)と相転移なしにつながっている。一方、 $S = 1$  のハルデン相と類似した中間層(ID)も狭い領域に出現している。

その後、我々の議論は数値計算によっても検証されている。神戸大学を定年退職され、その後移った福井工大も定年退職された利根川孝先生は今もお元気に研究に取り組んでおられるが、利根川先生にも興味を持って頂いた。利根川先生らの研究によって、特殊な模型によらずとも、一軸異方性を持つ自然な模型の中でスピン 2 のハルデン相が  $D = \infty$  の自明な相と断熱的につながっていることが示された。[5]さらに、私の 1992 年の論文で予想したが数値的にはそれまで否定されていた中間相の存在も(私の当初の予想とは異なる相図の中ではあるが)見出された。利根川先生らの研究は、厳密対角化と、岡本・野村によるレベルスペクトロスコピー法を組み合わせたものである。レベルスペクトロスコピーは強力な手法であり今まで多くの問題でその有効性が示されているが、対角化ではスピン 2 の系は最大 12 サイト程度の系しか扱えず、そのデータの解析からの結論には疑問が残るかもしれない。しかし、最近の論文[6]では、密度行列くりこみ群とレベルスペクトロスコピーの組み合わせによるより大きな系の計算によって、文献[5]の結果を支持する結論が得られている。

今から振り返ってみると、エンタングルメントスペクトルの話は別にして、時間反転対称性のもとで半奇数スピンの端状態のクラマース縮退(のみ)が保護される、ということは特に高度な理論が必要なわけではなく、1992 年の当時に気づいても良かったような気がしなくもない。そうしていればトポロジカル絶縁体と類似の構造を先んじて見出せたことになるが、まったく思い至らなかった。単に自分がうかつだったと言う面もあるかもしれないが、ハルデン相の研究にはかなりの数の優れた研究者が取り組んだにもかかわらず、長年見過ごされていたのは不思議な気もする。研究に限らず発見というものはそういうもので、重要で簡単なことが意外と見過ごされやすいのかもしれない。

## 制限された空間中での液体ヘリウム 4 の超流動

先ほどの研究とは逆に、全く(少なくとも題材としては)畑違いの分野に取り組むことになった例をあげる。2008 年秋の物理学会(岩手大)で「ボースグラスの物理」というシンポジウムがあり、世話人の田中秀数氏(東工大)に量子スピン系におけるボースグラスについてのレビュー講演を依頼された。私はずっと以前に、量子スピン系  $\text{TlCuCl}_3$  における磁場誘起相転移がマグノンのボース凝縮という描像で理解できると提案したことがあった。このテーマは、その後、田中研究室でこの系のイオンをランダムに置換しボースグラス相を実現する研究に発展していた。私はボースグラス相の研究に直接関わったわけではないので当初辞退したのだが、結局講演を引き受けることになった。シンポジウムの中に、白濱圭也氏(慶応大)の講演「ナノ多孔体に閉じこめた  $^4\text{He}$  の量子相転移と局在 BEC 状態」があった。それまで液体ヘリウムについては全く手がけたことはなかったのだが、白濱氏の講演に興味を持ち考えてみることになった。ちょうど、学会直後の 10 月から、スイスからの留学生エッゲル(Thomas Eggel)氏が研究室に加入したので聞いてみたところ興味を持ってもらえたのでいっしょに研究することになった。

ナノ多孔体に閉じ込められた  $^4\text{He}$  自体は歴史のある研究テーマで、70 年代にはバイコール(Vycor)と呼ばれるガラス多孔体に閉じ込めたヘリウム 4 の研究が盛んに行われた。これがきっかけとなって、フィッシャー(Matthew P. A. Fisher)らの理論研究[7]が行われ、ボースグラス相の概念の提唱に至った。しかし、バイコールの系では実験的にはボースグラス相や量子相転移は確認されなかったようである。近年になって、白濱氏らのグループでジェルシル(Gelsil)という新しいガラス多孔体を用いた実験が行われ、圧力下での量子相転移を示す結果が得られていた。[8] この量子相転移を理論的に理解することが目標となった。ヘリウム 4 はクリーンな物質であるが、多孔体に閉じ込めた系は量子ゆらぎとランダムネスの両方の寄与により理論的には難しい問題となる。フィッシャーらの有名な論文の後にも、さまざまな理論研究が続けられてきた。

しかし、我々は(当初は多分に無知によって)3次元の多孔体に閉じ込めたヘリウム 4 を、単純に 4次元古典 XY 模型の臨界現象にマップすると実験結果とよく適合することに気づいた。多孔体中のヘリウム 4 をボースハバード模型で記述することはフィッシャーらの研究の頃から良く行われてきたが、(ランダムネスのない)ボースハバード模型では動的臨界指数  $z$  が 1 になるのはモット絶縁体相の頂点に相当する多重臨界点のみで、それ以外の点では超流動・絶縁体転移では動的臨界指数は 2 になることが知られている。このとき、系を 4次元古典 XY 模型の臨界現象にマップすることはできな

いはずである。原理的には、系の化学ポテンシャルを調節すれば多重臨界点に到達することができるが、今回考察している系では化学ポテンシャルは制御していないので、特に偶然によらなければ多重臨界点に対応する 4 次元古典 XY 普遍クラスの臨界現象は観測されないことになる。さらに、実際の多孔体中の系にはランダムネスが存在し、系の性質を支配するはずである。なぜ、実験結果が単純な 4 次元古典 XY 普遍クラスの量子臨界現象と良く一致するのだろうか。

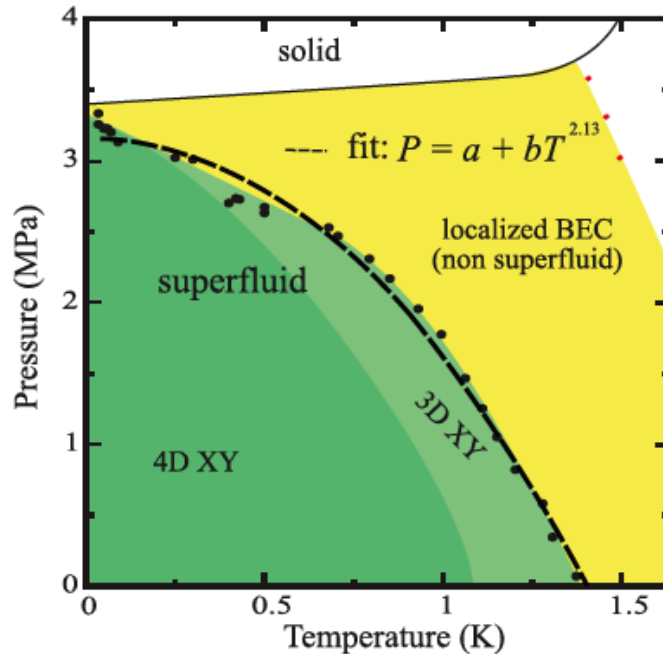


図 3 多孔体ジェルシル中に閉じ込めたヘリウム 4 の相図についての、実験と理論の比較。(9)より引用) 超流動/非超流動相の境界は、4 次元 XY 普遍クラスから導かれる  $T^2$  則とよく適合している。0.1 K 以下の極低温でずれが顕著になるのは、ランダムネスの効果と解釈できる。

この問題にはしばらく悩まされたが、次のように解決をみた。動的臨界指数が 2 になるのは、ボースハバード模型では一般に「粒子」と「ホール」の対称性が破れていることによる。上記のように多重臨界点で動的臨界指数が 1 になるのは、そこで粒子とホールの対称性が回復することによる。さて、多孔体中のヘリウム 4 は、多数の空孔の間に粒子のトンネル経路が存在するとして(ランダムな)ボースハバード模型で記述できる。このとき、それぞれの空孔がボースハバード模型のサイトに対応する。それぞれの空孔のサイズは異なるので、サイトごとに化学ポテンシャルと相互作用がランダムに変化することになる。空孔のサイズの分布はある程度実験的にわかっているため、これから推測すると、それぞれの空孔には平均して 20~30 個程度のヘリウム原子が入るが、個数の分布には数個のオーダーの幅があることになる。すると、空孔ごとに粒子とホールの対称性の破れ方は異なるため、平均としては粒子とホールの対称性はほぼ回復する。(厳密には破れはゼロにはならないが、実験的に到達不可能な極低温にならないとその効果は現れない。)このように、ランダムネスのおかげでむしろ有効理論が簡単になる。ただし、十分に低温では、4 次元 XY 模型におけるランダムネスの効果が重要になるため、臨界現象は 4 次元 XY 普遍クラスから離れていくことになる。実験結果にもその兆候が見えているが、ランダムネスの効果が見えるよりも高温側のかなり広い温度範囲の結果が 4 次元 XY 普遍クラスの量子臨界現象として理解できる、というのが我々の指摘である。

この議論の副産物として、以前のバイコールを用いた実験で量子臨界現象が観測されなかった理由も理解できた。バイコールとジェルシルは基本的には似た系であるが、孔径が異なる。バイコールの空孔の典型的な直径は約 6nm(60Å)であるのに対し、ジェルシルは約 2.5nm(25Å)である。2 倍程度の違いしかないが、まず、実際にはガラス表面は厚さ約 0.6nm のヘリウムの固体層で覆われていると考えられるため、その分を差し引いた有効的な直径は約 4 倍異なる。これは体積にすれば 60 倍程度の差になる。ボースハバード模型において、位相の量子ゆらぎをもたらすのはオンサイトの相

相互作用である。電子系のハバード模型の場合にはオンサイトの相互作用は電子間のクーロン斥力に起因するが、電氣的に中性なヘリウム 4 の場合にはヘリウムの原子間ポテンシャルが短距離では斥力であることに起因するはずである。原理的には、微視的な計算によりこれを定めることもできるだろうが、簡便に考えて空孔中の液体ヘリウムの物性がバルクのものとはほぼ同じと簡便に考えると、オンサイトの相互作用の大きさは液体ヘリウムの圧縮率に反比例し、空孔の体積に反比例する。これより、バイコールの場合はオンサイトの相互作用が 0.02 K 程度であるのに対し、ジェルシルの場合は 1.4K 程度と見積もられる。

オンサイト相互作用の大きさは量子ゆらぎが重要となる温度スケールを与えるので、バイコールの場合には、量子ゆらぎの効果を観測するには 0.02K 以下の極低温を見なくてはならないことになる。一方、ジェルシルの場合にはバルクの超流動転移温度 2.14K の少し下から量子ゆらぎが重要となり、このために実験で量子臨界現象が観測できたものと思われる。上記のように、歴史的にはバイコールの系の実験が量子臨界現象の理論の発展を大いに刺激したが、実は「古典的」な系であったようである。(ただし、これは系の量子力学的な位相の自由度が古典スピンのようにふるまうと言う意味なので、もちろん量子力学と無関係なわけではない。)

これらの結果は[9]の論文にまとめた。これをきっかけに、ヘリウム 4 の超流動に関連する別の現象にも取り組むことになった。超流動はしばしば、非対角長距離秩序、すなわち量子力学的な位相の長距離秩序と関連づけられる。しかし、非対角長距離秩序と超流動は等価ではない。この 2 つの非等価性を示す典型的な例として、ヘリウム 4 の薄膜、すなわち 2 次元系の超流動が知られている。超流動密度は、位相ひねりに対する系の剛性を表すヘリシティモジュラスに比例する。2 次元のヘリウム 4 は(位相の量子ゆらぎを無視できる範囲で)古典 2 次元 XY 模型によって記述できるが、この模型は低温で長距離秩序を持たないもののベレジンスキー・コスタリッツ・サウレス (Berezinskii-Kosterlitz-Thouless, BKT) 転移を起こし、それより低温側では相関関数がベキ的に減衰する。この低温相では、ヘリシティモジュラスが正の値を持つ。従って、超流動密度とヘリシティモジュラスの比例関係から、2 次元のヘリウム 4 は低温相では正の超流動密度を持つ超流体であることになる。さらに、理論的には BKT 転移において超流動密度が普遍的な飛びを持つことも導かれ、これに対する動的な補正とともに 1970 年代に既に実験で見事に確認されている。[10]

さきほど、液体ヘリウムの研究は全く手がけたことがなかった、と書いたが、学生時代に勉強して最も感動したことのひとつがこの 2 次元の超流動の話であった。当時よくわからぬままに読んだ素粒子理論家のポリヤコフ (Alexander M. Polyakov) の奇書(?) ”Gauge Fields and Strings” に、超流動密度とヘリシティモジュラスの比例関係の導出が載っていたことも印象的であった。ただ、今になってみると、超流動密度とヘリシティモジュラスの関係について、自分の中で完全には理解できていなくて常にあやふやなところが残っていた。自分の大学院の講義でも何度かこの関係に触れたことがあるが、偉そうに教えておきながらどうもモヤモヤするところがあった。

さて、ヘリウム 4 の 1 次元系はどうなるだろうか? 理論的には、1 次元系ではヘリシティモジュラスは有限温度(かつ熱力学的極限)でゼロになるので、上記の対応からすると 1 次元系では超流動は起こり得ないように思われる。もし私が実験家に事前に相談されていたらそう答えたかもしれないが、何ごとでもやってみるのは大切なことで、最近のいくつかの実験で 1 次元に閉じ込められたヘリウム 4 が超流動転移(少なくともそのように見えるもの)を起こすことが示されている。たとえば、谷口淳子氏・鈴木勝氏(電通大)らの実験では、1 次元細孔を持つガラス多孔体中にヘリウム 4 を満たし、捻れ振子を用いた測定により「超流動転移」を観測している。[11]これは上記の理論的な結果と矛盾するようだが、どう理解すれば良いだろうか?

実は、当初この問題は簡単に解決できるのではないかと考えていた。というのも、1 次元系でもヘリシティモジュラスがゼロになるのは熱力学的極限(無限に長い系の極限)であって、有限の長さの系であればヘリシティモジュラスは有限温度でもゼロにならない。実験の系では長さは当然有限なので、この有限サイズ効果で理解できるのではないかと思ったのだ。ちょうどこの頃、外国人客員所員としてカザリラ (Miguel A. Cazalilla) [12] 氏が着任したので、エッゲル氏と一緒に

に議論することになった。カザリラ氏は、冷却原子系、特に1次元ポテンシャルに閉じ込めたボース凝縮体のエキスパートなので、彼の着任は非常にタイミングが良かった。議論してみるとすぐに、私が当初予想した有限サイズ効果では「転移温度」が観測値よりもかなり低くなってしまい、明らかに実験の説明ができないことがわかった。(このことは、我々が考える以前から指摘されていた。[13])そこで何か別の機構を考える必要がある。

これは動的な現象ではないかという結論には比較的早期に達したように思うが、これを具体的な理論として実現するにはかなりの労力と時間を要した。また、先に触れたように超流動の議論に良く用いられるヘリシティモジュラスとの関係はどうなっているのだろうか？ここで、昔から超流動とヘリシティモジュラスの関係について理解したような気がして実はよくわかっていなかったということに直面し、再考する必要に迫られた。(理解していなかったのは私だけなのかもしれないが、この機会にいろいろな論文や教科書を読み漁ったがクリアな説明を見つけることができなかった。)そもそも、ヘリシティモジュラスは自由エネルギーにより定義される静的な量であり、超流動は本質的に動的な現象である。これらの間の関係は決して自明ではない。議論を進めるうちに、ヘリシティモジュラスと超流動密度の間の等価性の背後には、ハミルトニアンの変化の後(十分な時間が経過すれば)系が熱平衡に達するという仮定があるということに気づいた。しかし、1次元系には多くの可積分系が存在し、これらは無限個の保存量を持つためにいくら時間が経過しても熱平衡には達しない。現実的な系では可積分性が破れており、最終的には熱平衡に達すると考えられるが、可積分系に小さな摂動が加わった系では熱平衡に達する緩和時間が異常に長いことになる。これらは、量子ダイナミクスの最近の中心的な課題と密接な関係がある。

ヘリウム4の1次元系も、有効模型である朝永・ラッティンジャー液体は可積分であり、これに壁面との相互作用による小さな摂動が加わったものとみなせる。従って、熱平衡に達する緩和時間が異常に長くなり、振動数が2kHz程度で微視的なエネルギースケールに比べ非常に小さい捻れ振子の実験でも有限周波数の(熱平衡に達しない)効果が見えることになる。これが、ヘリシティモジュラスがゼロであるにも関わらず実験で「超流動性」が観測された理由だと考えられる。一方、これはあくまでも有限周波数の効果なので、周波数をゼロに近づければ、「超流動転移」(厳密にはクロスオーバー)の温度は(周波数のべき関数として)ゼロに漸近することになる。これが我々の理論[14]の最も重要な予言であろう。具体的な計算を行うには、記憶関数の方法に基づくかなり骨の折れる計算が必要だったが、カザリラ氏とエッゲル氏が協力して遂行してくれた。この研究については、物性研の外国人客員制度がなければまとめることはできなかったように思う。

この問題については今後もさらなる実験的および理論的研究が必要であり、我々の理論が確立したと言える状況では全くない。しかし、実験に触発されて理論物理の最も基本的な概念の再検討に至ることができた点でも、自分としてはかなりの手ごたえを得られた研究だった。全く新しい分野に取り組む場合、予備知識の欠如に加え、違う分野のコミュニティとのカルチャーギャップが問題となることもあるだろう。しかし、極低温の方々には突然乱入した奇妙な理論屋を温かく受け入れて頂いて感謝している。

## 国際ワークショップ

近年の、特に理論研究の一つの流れとして、滞在型のワークショップが各地で盛んになっている。私自身いろいろところで滞在型ワークショップのお世話になっており、たとえば最初にあげたポールマン氏らとの共同研究の発端はドレスデンでの滞在型ワークショップだった。最近では、素粒子理論の大栗博司氏との共同研究[15]はアスペンでの滞在型ワークショップがきっかけだった。(この原稿も、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の滞在型ワークショップに参加中に書いている。)

物性研でも2006年から滞在型ワークショップの開催を開始し、2008年には甲元眞人所員と私が世話人となって”Topological Aspects of Solid State Physics”を開催した。これは、2008年6月2日から22日の3週間を滞在型ワー



クショップとして物性研で開催し、その翌週 6 月 23 日から 27 日に同テーマのコンファレンスを京都大学基礎物理学研究所で開催したものである。柏と京都、そして 2 つの研究機関をまたいで開催となったこと、また海外からも多数の参加者があったこと、により担当秘書、国際交流室、および事務の方々には多大の負担をおかけした。しかし、そのぶん、内容的にはかなり充実したワークショップとなったように思う。このワークショップの一つの特徴として、海外からシニアな有名研究者だけでなく、若手研究者の参加が多かったことがある。甲元先生には残念ながら体調を崩されてワークショップ期間中には御出席頂けなかったのだが、計画段階で推薦して頂いた若手研究者は今振り返っても非常に素晴らしかったと思う。海外からの若手(その時点で学生もしくはポストドクだった)参加者をあげると、Jason Alicea, Gregory Fiete, Ribhu Kaul, Eun-Ah Kim, Michael Lawler, Mikko Mottonen, Xiaoliang Qi, Rahul Roy となる。彼らのその後の活躍はめざましく、まだ若手のうちに物性研に来てもらうことができた意義は大きいと思う。また、当時甲元研究室の助教としてワークショップの運営にも御尽力頂いた佐藤昌利氏(現・名古屋大学准教授)の研究が発展する一つのきっかけとなったらしいことは大変喜ばしく思う。佐藤氏の物性研究所所長賞学術奨励賞所感[16]より、以下引用させて頂く：

2008 年の 6 月には、物性研で、滞在型ワークショップ「Topological Aspect of Solid State Physics」が行われました。これは、非常に良いワークショップで、この当時、この分野で話題になっていたトピックがほとんど網羅されていました。また、京都大学大学院理学研究科の藤本聡さんとの共同研究をはじめ、今回受賞することになった研究は、ほとんどがこのワークショップをきっかけにして始まっています。

このワークショップは物性研の滞在型ワークショップの一貫として行われたが、テーマとしては単発で開催された。しかし、物性研でのワークショップにも参加したウィーグマン(Paul Wiegmann)氏らが世話人となって「後継」のワークショップが 2009 年に香港で、また 2011 年にトリエステで開催されている。(ウィーグマン氏が、開会のあいさつで物性研でのワークショップがきっかけとなり企画したことを述べられている。)これも、このワークショップが好評で国際的にもインパクトを与えた一つの証拠になるかと思われる。



図 4 2008 年 6 月に開催した滞在型ワークショップ“Topological Aspects of Solid State Physics”より。物性研での滞在型ワークショップ期間は、講演は 1 日 2 件程度にとどめ、写真にあるようなインフォーマルな議論の促進を主眼とした。

上記の他にも、2007 年には国際ワークショップ “New Developments of ESR in Strongly Correlated Systems” および “Physics and Mathematics of Interacting Quantum Systems in Low Dimensions” を、また 2010 年には物性研の隣にできた数物連携宇宙研究機構(IPMU)との共催で “Condensed Matter Physics Meets High Energy Physics” を開催した。

これらも好評のうちに終了したが、紙面の関係で詳細は省略する。個人的に残念なのは、自分が世話人になったこれらのワークショップでは企画に精一杯であり科学的な議論をする余裕がなく、それをきっかけに自分自身の研究が発展したということはあまりないことである。おそらくこれは私のキャパシティが小さいため世話人と研究が両立できていないということなのだろうが、日頃いろいろなワークショップに大変お世話になっているので時々世話人をやってコミュニティに貢献せよということだと納得することにする。

## おわりに

物性研で行った研究も多岐にわたるため、本稿ではいろいろな意味で対照的な 2 つの研究トピックスに限って紹介させて頂いた。ところで、この 6 年間の物性物理の大きな流れとして、トポロジカル絶縁体とそれに関連する物理の興隆があげられるだろう。トポロジカル絶縁体の概念を確立したケーンとメレの有名な論文の出版が 2005 年だったので、ちょうど私が物性研に着任する頃からこの分野の急速な発展が始まったことになる。自分は分野的に近いところにも関わらず、いまのところトポロジカル絶縁体の物理の発展にあまり貢献したとは言えない。このことは残念でもあるが、物性研のスタッフには既に流行となったテーマに乗って成果を挙げるより、新しい潮流を作り出すことが期待されているのだと理解している。これからトポロジカル絶縁体に匹敵する、あるいはそれを超える何かを見いだせるかどうかはもちろん定かではないが、新たな物理を常に目指していきたい。

物性研にしばらく勤めてみて感じることは、やはり物性研は非常に恵まれた環境だということである。たとえば、前任地では海外から招聘するためにビザが必要なとき自分で品川の入国管理局まで行って行列に並んでビザを取った記憶がある(今は違うのかもしれない)が、物性研では国際交流室などのサポートが非常に充実している。このような素晴らしい環境に恥じないように精進したい。

物性研の重要な機能として、若手の育成もあげられる。幸い、最初の助教として東北大学から大久保潤氏という優秀な研究者を迎えることができた。大久保氏はもともとネットワークの統計力学の研究を行っていたが、物性研では量子多体系の技法を確率過程に応用する新しい手法を応用し、在職 3 年で京都大学に栄転した。こちらとしてはもう少し頂いて一緒に研究したかったような気もするが、喜ばしいことだった。その間、高橋實研究室の助手だった城石正弘氏にも 1 年間だけであるが研究室にいて頂く有り難い機会を得た。その後も、2011 年度には京都大学から多田靖啓氏に来て頂くことができ、今後が楽しみである。研究員・学生についても、いろいろなところから優秀な方に来て頂き、活発に研究してくれた。本稿で個々の業績に触れられないのは申し訳ないが、物性研での 6 年間のうちに(東工大所属を含め)学位取得または転出した方々のリストをあげておきたい。(敬称略)

客員所員：田仲由喜夫、Miguel A. Cazalilla

助教：城石正弘、大久保潤

博士研究員：Chyh-Hong Chern, Wei-Feng Tsai, 島田悠彦

共同利用研究員・技術補佐員：佐藤純、中村正明、古谷峻介

博士課程修了：古川俊輔、得能光行、Thomas Eggel、古谷峻介、高吉慎太郎

修士課程修了：石川陽平、三田村陽平、小野友也、平澤梨良、古谷峻介、貝沼稔夫、熊野裕太

学部修了：Sungbin Lee

最後になるが、研究室の秘書として大変お世話になった辻淳子さん、羽部なおみさんをはじめ、理論系研究室秘書、国際交流室、事務の皆さんに日頃の研究活動を支えて頂いていることについて感謝したい。また、上田前所長、家現所長、物性理論研究部門の皆さんをはじめ、所内外で様々な形でお世話になった方々に御礼申し上げる。

## 参考文献

- [1] 田崎晴明、物性研究 **58**(2), 121 (1992).
- [2] T. Kennedy and H. Tasaki, Phys. Rev. B **45**, 304 (1992).
- [3] M. Oshikawa, J. Phys.: Condens. Matter **4**, 7469 (1992).
- [4] F. Pollmann, A. M. Turner, E. Berg and M. Oshikawa, Phys. Rev. B **81**, 064439 (2010); F. Pollmann, E. Berg, A. M. Turner and M. Oshikawa, Phys. Rev. B **85**, 075125 (2012).
- [5] T. Tonegawa, K. Okamoto, H. Nakano, T. Sakai, K. Nomura, and M. Kaburagi, J. Phys. Soc. Jpn. **80**, 043001 (2011).
- [6] Y.-C. Tzeng, Phys. Rev. B **86**, 024403 (2012).
- [7] M. P. A. Fisher, P. B. Weichman, G. Grinstein, and D. S. Fisher, Phys. Rev. B **40**, 546 (1989).
- [8] K. Yamamoto, Y. Shibayama, and K. Shirahama, Phys. Rev. Lett. **100**, 195301 (2008).
- [9] T. Eggel, M. Oshikawa, and K. Shirahama, Phys. Rev. B **84**, 020515(R) (2011).
- [10] D. J. Bishop and J. D. Reppy, Phys. Rev. Lett. **40**, 1727 (1978).
- [11] J. Taniguchi, Y. Aoki, and M. Suzuki, Phys. Rev. B **82**, 104509 (2010); J. Taniguchi, R. Fujii, and M. Suzuki, Phys. Rev. B **84**, 134511 (2011).
- [12] 実は本来のスペイン語の発音はカタカナでは「カザリヤ」に近いそうだが、ここではこれまでの物性研の刊行物での表記にあわせて「カザリラ」とする。
- [13] K. Yamashita and D. S. Hirashima, Phys. Rev. B **79**, 014501 (2009).
- [14] T. Eggel, M. A. Cazalilla, and M. Oshikawa, Phys. Rev. Lett. **107**, 275302 (2011).
- [15] H. Ooguri and M. Oshikawa, Phys. Rev. Lett. **108**, 161803 (2012).
- [16] 佐藤昌利、物性研だより **51**(2), 19 (2011).

# 研究室だより

## 松田巖研究室

極限コヒーレント光科学研究センター・軌道放射物性研究施設 松田 巖

### 1. はじめに

早いもので2006年12月1日に着任してから5年が経過し、間もなく6年目を迎えようとしています。この間、松田巖研究室において常に研究が進められていたのは、私と一緒に研究を行ってくれた研究室メンバー、そして共同研究者の皆様のおかげです。まずはこの場をお借りして、厚く御礼申し上げます。

さて、2006年とは物性研究所における第3世代VUV-SX(vacuum ultraviolet-soft X-ray)放射光光源 SuperSOR施設の建設計画の中止が決まった年でした。当時コミュニティの間では物性研の放射光科学に対するその後の取り組みについて注目が集まり、柿崎先生らを中心に活発な議論が行われていました。着任前、今後の展開を私自身も改めて考えるために、海外出張を利用して BESSY-II(ドイツ)、SLS(スイス)、ELETTRA(イタリア)などの第3世代VUV-SX放射光施設を巡りました。そして久しぶりに帰国して間もなく、物性研究所松田巖研究室の開始日を迎えました。着任日、まだ誰もいない研究室にて、新しい研究環境に心躍ると共に、たくさんの人と活気ある研究室にする夢を描きました。そして図1のように、これまで数多くの方々と一緒に研究することに恵まれ、5年後の2011年12月には研究室誕生から5周年を無事に祝うことができました(図2)。

年度	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012
助教 (施設スタッフ)		奥田太一		10月	山本達		
					10月	矢治光一朗	
			藤澤正美				
PD			成田尚司	12月			
技術職員 (施設スタッフ)					5月	保原麗	
		原沢あゆみ					
		福島昭子					
院生			小河愛実				
				中村史一			
				小宇佐友香(慶応大学)			
						湯川龍	
						北川哲(奈良先端大)	
					Lin Chung Huang (National Tsinghua Univ.)	9月	7月
客員所員						藤川和志	
						山本真吾	
					近藤寛(慶応大学)		
						田中義人(理研)	
					Shu-Jung Tang (National Tsinghua Univ.)	9月	1月
						中村哲也(JASRI)	

図1: 研究室・軌道放射物性(SOR)施設にて一緒に研究を行ってくれたメンバー



図2: 2011年12月にザ・リッツ・カールトン東京ホテルで行われた松田巖研究室5周年記念会の様子。研究室メンバーと当時外国客員所員として来日されていたShu-Jung Tang先生のご家族と。



## 2. 研究

私自身、光物性と表面・ナノ物性を専門としており、研究室ではこれらをテーマにした研究を展開してきました。SPring-8 BL07LSU ビームライン及び時間分解軟 X 線分光実験ステーションの建設[1,2]から、トポロジカル絶縁体のスピン・電子構造の決定[3-6]、2次元電子化合物の特定[7]、酸化物表面の表面金属化[8]、金属量子薄膜のフェルミ面トポロジー制御[9,10]、量子サイズ効果と Rashba 効果の協奏効果[11-14]、表面(磁気)輸送現象[15,16]などの新規物性の研究も行ってきました。本稿ではこれらの中から3つを簡単に紹介したいと思います。

### 2.1 SPring-8 BL07LSU と時間分解軟 X 線分光ステーション

着任した 2006 年は、その 5 月に総長直轄の組織として東京大学放射光連携研究機構(SRRO)が開設した年で、設立理念の 1 つは世界最高の高輝度放射光を用いて物質科学における最先端サイエンスを展開することでした。そして SRRO によりアウトステーション計画が実施され、SPring-8 の長直線部を利用した高輝度軟 X 線ビームライン BL07LSU の建設が 3 年後の完成を目指して開始されました。私は SRRO スタッフを兼任し、このプロジェクトを現地にて行うことになりました。ビームラインは光源から末端装置まで全長 100m に亘り、建設前の現場では当然何もない広大なスペースが広がっていました。そして、そこには SPring-8 実験ホールの壁に完成した光を通すための穴が、大きな鉛ブロックでふさがれているだけでした(図 3)。当時物性研 SOR 施設スタッフとしては私 1 人だけが SPring-8 にいたので、おかげで長尺アンジュレータ光源、フロントエンド、放射線ハッチ、分光器、実験ステーションの建設全てに関わらせていただくことができました。SPring-8 JASRI と理研のスタッフ、そして各業者の方々には共同作業を通じて色々なことを教えていただきました。そして関係者の呼吸が上手に揃い、2009 年 10 月初めに BL07LSU の The first beam を確認が無事にでき、平成 21 年 10 月 9 日に予定通りに完成披露式典を催すことができました(図 4)。ビームラインの詳細については、過去の「物性研だより」記事[17]をご参照ください。



図 3：2008 年度、建設前の SPring-8 BL07LSU の様子。大きな扉は電子蓄積リングに直接つながっています。右側のふさがれた穴が放射光を通すためのものです。

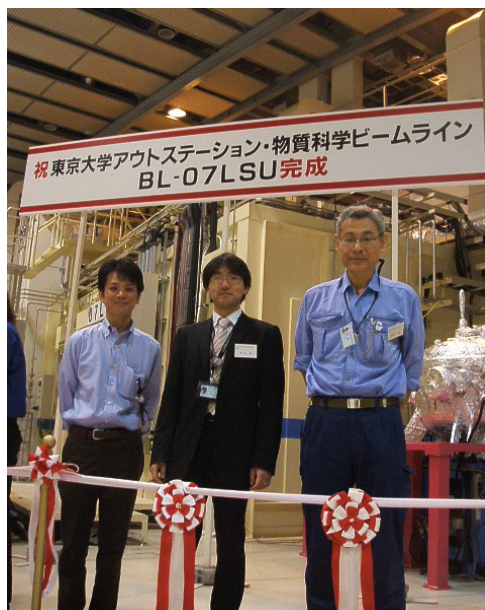


図 4：2009 年 10 月 9 日に行われた SPring-8 BL07LSU 完成式典準備の際に写真撮影。ビームライン分光器の設計をされた SPring-8/JASRI 仙波泰徳さんと、後置鏡系を担当された藤澤正美さんと。

ビームライン BL07LSU は、8 台の水平／垂直偏光型 8 の字アンジュレータを組み合わせた高輝度軟 X 線アンジュレータビームラインとして(1)光エネルギー 250-2000eV、(2)分解能 10,000 以上、(3)スポットサイズ 10 $\mu$ m 以下(ゾーンプレートで 70nm[18]、ミラー集光で 1 $\mu$ m 以下[19])、(4)強度  $\sim 10^{12}$ photons/秒の光学性能を有した軟 X 線が利用できます。また偏光可変型クロス・アンジュレータを用いた(5)高速な偏光切替も可能で、現在 SPring-8 JASRI と理研の



グループとその開発を進めています。ビームライン BL07LSU には現在 4 つの実験ステーションが設置・整備されており[17]、そのうちの時間分解軟 X 線分光実験ステーションを研究室で建設しました。本ステーションでは、BL07LSU において得られる高輝度軟 X 線パルスと超短レーザーパルスを組み合わせたポンプ・プローブ時間分解光電子分光測定を実現し(図 5(a))、光誘起表面相転移や表面化学反応などの動的現象における電子状態・化学状態などの変化をリアルタイムで追跡することができます[1]。現在、時間分解能 50 ピコ秒(放射光パルス幅に相当)での時分割測定が定常的に行われています(図 5(b))。電子分析器には 2 次元角度分解飛行時間型を採用し、試料または電子分析器を回転することとなるフェルミ面などのマッピングが行えます(図 5(c))。SPring-8 の(セベラルバンチモード)運転中には時間分解軟 X 線光電子分光実験が行われますが、それ以外の時間ではビームラインのフェムト秒パルスレーザーによる時間分解真空紫外線光電子分光実験ができます。SPring-8 BL07LSU は放射光とレーザーの両方が使用できる世界でも貴重な実験室です。研究対象として、研究室では現在シリコンや酸化物の清浄及び金属吸着表面におけるキャリアダイナミクスの研究が主に進められています。

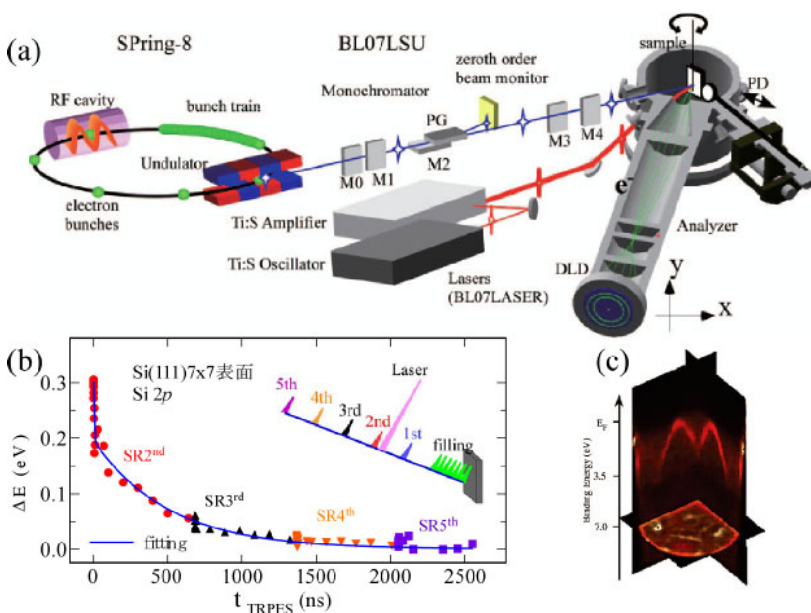


図 5 : SPring-8 BL07LSU における時間分解軟 X 線光電子分光実験ステーション [1]。(a)システムの概観図。(b)Si(111)7x7 における表面起電力効果の緩和過程の時間分解光電子分光の結果。1 つのレーザーポンプ光に対して複数の放射光プローブ光で測定ができます。(c)本 2 次元角度分解飛行時間型電子分析器で測定された 2 次元バンドマッピングの結果。2 次元波数、エネルギーそして光電子強度を一度に測定することができます。



図 6 : ステーション実験装置を組み上げたばかりでの写真撮影。研究室初の院生の小河愛実さんと慶応大学近藤研究室から建設を手伝いに来てくれた小宇佐友香さんです。少しでも楽しんでもらおう、と東京出張のたびに美味しいスイーツを探しては SPring-8 に持って帰ってみんなで味わいました。この習慣は今も研究室で続いています。

## 2.2 トポロジカル絶縁体のスピン・電子構造

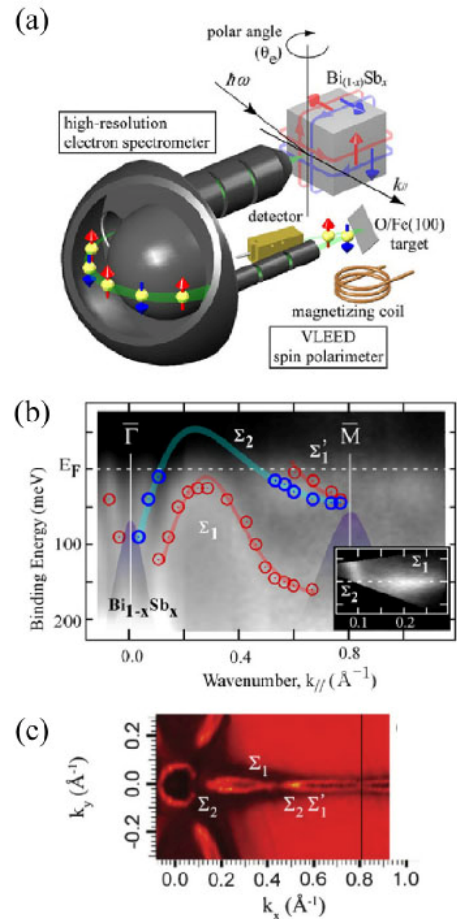
トポロジカル絶縁体は量子スピンホール相とも呼ばれ、最近“新しい物質状態相(a new state of matter)”として量子伝導、場の理論、表面物理などを中心に物性物理の研究分野全体に話題を提供しています[5,6]。この相は 2 次元及び 3 次元系で実現されるもので、バルクが非磁性絶縁体であるのに対して、そのエッジ状態(2 次元の場合)や表面状態(3 次元の場合)はギャップレスです。このエッジ/表面状態はスピン流を運び、しかもこのエッジ/表面状態は非磁性不純物等による散乱からトポロジカルに保護されているなど新奇な物性が理論的に提唱されていました。このように(3 次元)トポロジカル絶縁体は、その表面状態が重要な役割を果たしていることから、表面物性の研究者として世界に先駆けてその実験観測に挑戦しました。

(3 次元)トポロジカル絶縁体を電子構造で特定するには、その表面状態(エッジ状態)のスピン電子構造を決定する必要があります。しかしながら、当時トポロジカル絶縁体として候補に上がっていた  $\text{Bi}_{1-x}\text{Sb}_x$  結晶では、表面状態が存在するバルクバンドギャップが 100meV 以下で、従来の Mott 型検出器を用いた装置ではエネルギー分解能が 100-200meV だった

のでスピン分解測定は困難でした。しかしながら当時、軌道放射物性研究室では高効率スピン検出器(VLEED スピン検出器)が完成し[20]、50meV以下の分解能でスピン分解光電子測定が可能になったばかりでした。開発者である奥田太一さんから研究試料を相談されたときに、すぐにこのトポロジカル絶縁体を候補に入れました。そして、Photon Factory BL-19Aにおいて実験が行われ、そのスピン電子構造の決定し、トポロジカル絶縁体の存在を実験的実証に成功しました[3]。

今ではトポロジカル絶縁体は世界中で盛んに研究され、よりバルクバンドギャップの大きい“第2世代”と呼ばれる試料の合成や、スピン輸送測定、超伝導物質との組み合わせによるマヨラナフェルミオン形成などの研究が行われています[5,6]。私の研究室では現在、光電子フェルミ面マッピングやスピン分解光電子分光法を用いて、トポロジカル量の変化に伴う相転移の研究を行っています[4]。

図 7: (a)VLEED 高効率スピン検出器[20]を用いた  $\text{Bi}_{1-x}\text{Sb}_x$  結晶のスピン・波数分解光電子分光測定の様子。(b)  $\text{Bi}_{1-x}\text{Sb}_x$  結晶( $x=0.12, 0.13$ )のスピン分解バンド分散図。グレースケールはスピン積分で、点がスピン分解の結果(赤: スピニアップ、青: スピンドアウン)に対応します[3]。(c)  $\text{Bi}_{1-x}\text{Sb}_x$  結晶 ( $x=0.21$ )のフェルミ面マッピングの結果[4]。



### 2.3 金属ナノ薄膜のフェルミ面トポロジーの制御～量子効果で銀細工～

ナノテクノロジーに代表される微細化技術は内在する電子の波長程度の大きさに達し、伝導を担うキャリアも古典的な粒子の振舞いに加えて量子力学に基づく波動的な電子状態も形成します。金属薄膜では厚さを 1 ナノメートル(1 nm)程度にすると、いわゆる“量子閉じ込め効果”によって電子状態は 3 次元から 2 次元系へと転移します。1 ナノメートルとは 3~6 原子層に相当し、薄膜内部(バルク)層に対する表面・界面単原子層の割合(表面/バルク比)は極めて大きいです。その結果、表面・界面単原子層をうまく選ぶことで、超薄膜の電子物性を劇的に変えることが期待されます。

本研究では代表的な半導体であるシリコン(Si)結晶を基板として、導電性が高い銀(Ag)の 1nm 厚の超薄膜を自己組織的に成長させ、まずは内在する電子系が 2 次元系であることを示しました。実験は放射光を用いた角度分解光電子分光法により直接的にその電子構造(フェルミ面)を確認しました。3 次元系の自由電子はフェルミ球(sphere)を成していますが、量子閉じ込め効果が実現された 1nm 厚の Ag 超薄膜では、電子は量子井戸状態を形成して系は 2 次元系となり、そして光電子分光測定においてフェルミ円(circle)が確認されました(図 8)。次に Si 結晶基板上へのインジウム(In)原子の蒸着と加熱処理により、太さが原子 4 個分の In 原子鎖の列を約 1nm 周期で作製しました。そしてこの上に、銀(Ag)の薄膜を自己組織的に同様に成長さ

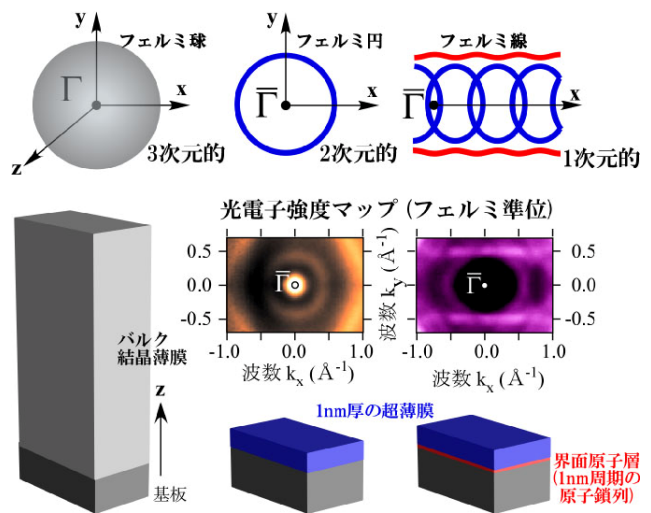


図 8: 3 次元系の(自由)電子のフェルミ面は球(フェルミ球)を成しますが、系を薄くして 2 次元系にするとフェルミ円となります。さらに 1 次元の相互作用を取り入れると、フェルミ線やフェルミ円の鎖が形成します。本研究では 1nm 厚の Ag 薄膜を作製し、さらに界面に 1 次元界面超構造を導入することで、このフェルミ線やフェルミ鎖の形成に成功しました[9]。

せると膜内 1 次元相互作用が発生し、その結果、図 8 のようにフェルミ線(line)が形成されることが光電子分光法で観測しました[9]。本研究ではこのような電子状態解析を X 線回折法による構造解析と系統的に行い、この 1 次元相互作用の起源を超薄膜の原子構造から明らかにしました。また超薄膜内に形成された 1 次元電子状態と界面原子層の 1 次元電子状態が相互作用することで、系全体が安定化する新奇な低次元の薄膜物性も詳細な解析により今回発見しました[9]。

エレクトロニクスなどにおいて電気伝導の異方性は極めて重要であり、そのためには伝導を担うキャリア系の次元性を制御することが最も有効です。従来法では薄膜の厚さを制御することで系を 3 次元から 2 次元へと変化させていましたが、本研究では界面原子層も組み合わせることでさらに 1 次元へと転移(トポロジカル転移)できることを自己組織化金属ナノ薄膜において示しました。多機能及び省エネデバイスにおいて電子素子の微細化は重要であり、本研究が見出したわずか長さ 1nm の微小空間における特有な電子状態の制御方法は、量子効果を利用した新しい“金属細工”法として今後のデバイス開発において新たな可能性を生み出す、と期待しています。

### 3. 社会・地域貢献活動

研究室では、お世話になっている SPring-8 放射光施設主催の学校や一般公開に協力してきました。春は SPring-8 一般公開にて一般参加のイベント展示を催し、夏は SPring-8 夏の学校の講義と実習を担当し、秋は国際スクールの講師を行ってきました。大学の業務以外での仕事は大変でしたが、施設スタッフとの親睦が深まり、何より社会・地域に貢献できたことは大変意義がありました。図 9 の写真は 2010 年 G.W.に行われた SPring-8 一般公開での我々のイベント展示「ひかり電話」の様子です。紙コップの底にアルミホイルを貼って懐中電灯やレーザーポインタで照らし、反射した光を太陽電池に当てます。太陽電池を音源につなぐと紙コップの音が光を通じてそこから聞こえてくる、というものです。家庭で手に入るもので製作できるよう配慮をしたのでたくさんの人に「身近にあるサイエンスの面白さ」を味わっていただくことができました。



図 9：(上) SPring-8 一般公開での参加型展示「ひかり電話」の様子。放射光連携研究機構のみなさんと協力して行いました。写真の中心では山本達さんが丁寧に説明をしています。(下) 機構の 1 人が作った「SPring-8 キティちゃん」。スピーカーが内蔵しており、「ひかり電話」がうまく製作できると、キティちゃんがしゃべって踊ります。光学チョッパーを利用して音階を作り、自身との演奏で音楽も奏でました。



## 4. 今後

私自身のこれまでの専門として、真空紫外線～軟 X 線を用いて表面・薄膜試料を中心にその電子状態のエネルギー、運動量、スピンを調べてきましたが、SPring-8 BL07LSU での時間分解軟 X 線分光ステーションの完成を機に、さらにピコ秒～ナノ秒スケールでの状態の時間変化も追うことができるようになりました。今後は 2012 年 10 月に開所される極限コヒーレント光科学研究センターでの真空紫外線～軟 X 線レーザーや、X 線自由電子レーザー施設 SACLA において、さらにフェムト秒～アト秒の時間スケールでの真空紫外線～軟 X 線の分光・散乱実験を展開し、新物質・新材料の非平衡ダイナミクス研究も行う予定です。

研究室を始めてから、これまで様々な試料について時間分解測定を行ってきました。しかしながら、その変化は多種多様で解釈は困難なことばかりでした。実際、時間スケールに応じて(現象論的な)ダイナミクスモデルが存在し、非平衡系の理論もまだまだ発展中のようです。一方、歴史と同様、現在の事象には過去の影響が大きい場合もあります。放射光とレーザー光源を上手に使いこなし、各時間スケールの Time-resolved spectroscopy 実験を展開するだけでなく、それらを総括するような Chrono-spectroscopy 研究も実施していきたいと思います。

## 5. 謝辞

最後に、いつも私を支えてくれている同じ研究者(毎日新聞 2012 年 08 月 22 日 東京夕刊)の妻に感謝の意を伝えたいと思います。

## 参考文献

1. **Development of soft X-ray time-resolved photoemission spectroscopy system with a two-dimensional angle-resolved time-of-flight analyzer at SPring-8 BL07LSU**, Manami Ogawa, Susumu Yamamoto, Yuka Kousa, Fumitaka Nakamura, Ryu Yukawa, Akiko Fukushima, Ayumi Harasawa, Hiroshi Kondo, Yoshihito Tanaka, Akito Kakizaki, and Iwao Matsuda, *Rev. Sci. Instrum.* **83**, 023109 (2012).
2. **Design of a new soft X-ray beamline for a long undulator source of SPring-8**, Y. Senba, S. Yamamoto, H. Ohashi, I. Matsuda, M. Fujisawa, A. Harasawa, T. Okuda, S. Takahashi, N. Nariyama, T. Matsushita, T. Ohata, Y. Furukawa, T. Tanaka, K. Takeshita, S. Goto, H. Kitamura, A. Kakizaki and M. Oshima, *Nucl. Instr. and Meth. A* **649**, 58 (2011).
3. **Direct mapping of the spin-filtered surface bands of a three-dimensional quantum spin Hall insulator**, A. Nishide, A. A. Taskin, Y. Takeichi, T. Okuda, A. Kakizaki, T. Hirahara, K. Nakatsuji, F. Komori, Y. Ando, and I. Matsuda, *Phys. Rev. B* **81**, 041309 (2010).
4. **Topological transition in Bi<sub>1-x</sub>Sb<sub>x</sub> studied as a function of Sb doping**, F. Nakamura, Y. Kousa, A. A. Taskin, Y. Takeichi, A. Nishide, A. Kakizaki, M. D'Angelo, P. Lefevre, F. Bertran, A. Taleb-Ibrahimi, F. Komori, S. Kimura, H. Kondo, Y. Ando, and I. Matsuda, *Phys. Rev. B* **84** 235308 (2011).
5. 「トポロジカル絶縁体の物理」村上修一、平原徹、松田巖、*日本物理学会誌* **65**, 840 (2010).
6. 「トポロジカル絶縁体の電子構造」松田巖、*表面科学* **32**, 182 (2011).
7. **Electron compound nature in a surface atomic layer of two-dimensional hexagonal lattice**, I. Matsuda, F. Nakamura, K. Kubo, T. Hirahara, S. Yamazaki, W. H. Choi, H. W. Yeom, H. Narita, Y. Fukaya, M. Hashimoto, A. Kawasuso, S. Hasegawa, and K. Kobayashi, *Phys. Rev. B* **82**, 165330 (2010).
8. **Hydrogen-induced surface metallization of SrTiO<sub>3</sub>(001)**, M. D'Angelo, R. Yukawa, K. Ozawa, S. Yamamoto, T. Hirahara, S. Hasegawa, M. G. Silly, F. Sirotti, and I. Matsuda, *Phys. Rev. Lett.* **108**, 116802 (2012).
9. **Controlling the topology of Fermi surfaces in metal nanofilms**, M. Ogawa, A. Gray, P. M. Sheverdyaeva, P. Moras, H. Hong, L. C. Huang, S. Jung Tang, K. Kobayashi, C. Carbone, T.-C. Chiang, and I. Matsuda, *Phys. Rev. Lett.* **109**, 026802 (2012).

10. **Substrate dependence of anisotropic electronic structure in Ag(111) quantum film studied by angle-resolved photoelectron spectroscopy**, T. Okuda, Y. Takeichi, K. He, A. Harasawa, A. Kakizaki, and I. Matsuda, *Phys. Rev. B* **80**, 113409 (2009).
11. **Direct Spectroscopic Evidence of Spin-Dependent Hybridization between Rashba-Split Surface States and Quantum-Well States**, K. He, Y. Takeichi, M. Ogawa, T. Okuda, P. Moras, D. Topwal, A. Harasawa, T. Hirahara, C. Carbone, A. Kakizaki, and I. Matsuda, *Phys. Rev. Lett.* **104**, 156805 (2010).
12. **Spin-polarization of quantum well states in Ag films induced by Rashba effect at surface**, K. He, T. Hirahara, T. Okuda, S. Hasegawa, A. Kakizaki, and I. Matsuda, *Phys. Rev. Lett.*, **101**, 107604 (2008).
13. **Enhanced spin relaxation in a quantum metal film by the Rashba-type surface**, N. Miyata, H. Narita, M. Ogawa, A. Harasawa, R. Hobara, T. Hirahara, P. Moras, D. Topwal, C. Carbone, S. Hasegawa, and I. Matsuda, *Phys. Rev. B*, **83**, 195305 (2011).
14. **Electronic structure study of ultra thin Ag(111) films modified by Si(111) substrate and by the  $\sqrt{3}\times\sqrt{3}$ -Ag<sub>2</sub>Bi surface**, M. Ogawa, P. M. Sheverdyeva, P. Moras, D. Topwal, A. Harasawa, K. Kobayashi, C. Carbone, and I. Matsuda, *J. Phys.: Condens. Matter* **24** 115501 (2012).
15. **Conductivity of the Si(111)7×7 dangling-bond state**, M. D'angelo, K. Takase, N. Miyata, T. Hirahara, S. Hasegawa, A. Nishide, M. Ogawa, and I. Matsuda, *Phys. Rev. B* **79**, 035318 (2009).
16. **Development of a surface magneto-transport measurement system with multi-probes and the in situ measurement of Bi nanofilms prepared on Si(111)7×7**, N. Miyata, R. Hobara, H. Narita, T. Hirahara, S. Hasegawa, and I. Matsuda, *Japanese Journal of Applied Physics* **50**, 036602 (2011).
17. **SPring-8 BL07LSU の現状**、松田巖、物性研だより 第50巻 第3号 (2010).
18. **Scanning photoelectron microscope for nanoscale three-dimensional spatial-resolved electron spectroscopy for chemical analysis**, K. Horiba, Y. Nakamura, N. Nagamura, S. Toyoda, H. Kumigashira, M. Oshima, K. Amemiya, Y. Senba, and H. Ohashi, *Rev. Sci. Instrum.* **82**, 113701 (2011).
19. **Ultrahigh resolution soft x-ray emission spectrometer at BL07LSU in SPring-8**, Y. Harada, M. Kobayashi, H. Niwa, Y. Senba, H. Ohashi, T. Tokushima, Y. Horikawa, S. Shin, and M. Oshima, *Rev. Sci. Instrum.* **83**, 013116 (2012).
20. **A New Spin-polarized Photoemission Spectrometer with Very High Efficiency and Energy Resolution**, T. Okuda, Y. Takeichi, Yuuki Maeda, A. Harasawa, I. Matsuda, T. Kinoshita, and A. Kakizaki, *Rev. Sci. Instrum.* **79**, 123117 (2008).



# 物性研滞在型国際ワークショップ

## 「MASP2012」報告

物性研(理論部門)と計算物質科学イニシアティブ(CMSI)の共催による滞在型国際ワークショップ MAterial Simulation in Petaflops era (MASP2012) が6月25日から7月13日まで開催された。本ワークショップでは、ペタフロップスの時代を迎えたスーパーコンピュータを活用することにより、どのような計算物質科学の新展開が図れるかを議論しようという趣旨のもとで、23名の講師と26名の講演者による講義と講演を中心に、ポスター発表やインフォーマルセミナーも含めて3週間の間、精力的に議論や情報交換が行われた。本ワークショップは、一日に二コマのゆったりとしたスケジュールで行われるワークショップの部と、研究会形式のシンポジウムの部から構成されたものであり、前者における講義では、大学院生や分野外の研究者にもわかるよう配慮されている。大学院生から物性研 OB まで、のべ408人(シンポジウムは149人)の参加者があった。

具体的な内容は、精密波動関数理論(量子モンテカルロや配置間相互作用)、多体摂動論、励起状態理論、励起状態の動力学、非平衡系(電子系、格子系)、超伝導密度汎関数理論、ファンデルワールス密度汎関数理論、超大規模系密度汎関数計算、固液界面、電気化学系であり、それぞれ最近著しく発展しているトピックが選ばれている。プログラムは以下の通りである。(なお、物性研ホームページ <http://www.issp.u-tokyo.ac.jp/public/masp2012/public/Program/workshop.html> には講義に用いられたファイルが用意され、受講者等が復習できるように公開されている。)

### ワークショップ:

#### **June 25 (Mon.)** Accurate electronic structure calculation

morning session: Yasutami Takada (ISSP)

"Many-Body Non-Perturbative Approach to the Electron Self-Energy"

afternoon session: Jun-ya Hasegawa (Kyoto University)

"Configuration Interaction in Quantum Chemistry"

#### **June 26 (Tue.)** Accurate electronic structure calculation

morning session: Lubos Mitas (North Carolina State University)

"Quantum Monte Carlo: introduction"

#### **June 27 (Wed.)** Excited states

morning session: Hardy Gross (Max Planck Institute of Microstructure Physics)

"Time-dependent density functional theory"

afternoon session: Kazuhiro Yabana (University of Tsukuba)

"Real-time electron dynamics in solids under strong electromagnetic fields"

#### **June 28 (Thurs.)** Superconductivity

morning session: Hardy Gross (Max Planck Institute of Microstructure Physics)

"How to predict the critical temperature of superconductors: An ab-initio perspective"

afternoon session: Yasutami Takada (ISSP)

"Theory for Reliable First-Principles Prediction of the Superconducting  $T_c$ "

free discussion on relative topics

**June 29 (Fri.)** Excited states and electron-phonon

\*morning session (120 min., ISSP main building A615): Michael Rohlfing (University of Osnabruck)

"Many-Body Perturbation Theory"

\*\*afternoon session (120 min., ISSP main building A612): Andrea Marini (National Research Council)

"Finite temperature calculations of the electronic and optical properties of solids and nanostructures: the role of electron-phonon coupling from an Ab-Initio perspective"

\*\*free discussion on relative topics (ISSP main building A612)

**July 3 (Tue.)** van der Waals interaction

morning session: O. Anatole von Lilienfeld (Argonne National Laboratory)

"Van der Waals"

afternoon session: John Dobson (Griffith University)

"Some issues concerning dispersion interactions"

**July 4 (Wed.)** Interface

morning session: Minoru Otani (National Institute of Advanced Industrial Science and Technology)

afternoon session: Tadashi Ogitsu (Lawrence Livermore National Laboratory)

"Solid-liquid interface for energy applications -Connecting atomistic view and reality-"

\*afternoon short session (40min., 16:00-16:40): Marc Koper (Leiden University)

**July 5 (Thurs.)** Interface

morning session: Yoshitaka Tateyama (National Institute for Materials Science)

afternoon session: Michiel Sprik (University of Cambridge)

"Computation of electrode Potentials and Alignment of Electronic Energy Levels"

**July 6 (Fri.)** Thermal physics

morning session: Junichiro Shiomi (The University of Tokyo)

afternoon session: Takahiro Yamamoto (Tokyo University of Science)

"Phonon Thermal Transport at Nanoscale"

**July 9 (Mon.)** Transport

morning session: Massimiliano Di Ventra (University of California)

"Fundamental aspects of transport in nanostructures and atomic physics"

afternoon session: Hisao Nakamura (National Institute of Advanced Industrial Science and Technology)

"First Principles Nonequilibrium Transport Theory of Real Molecular Electronics"

\*afternoon short session (45min., 16:00-16:45): Joost VandeVondele (Eidgenössische Technische Hochschule Zürich)

**July 10 (Tue.)** Interface

morning session: Mårten Björketun (Technical University of Denmark)

"Modeling electrocatalysis from first principles"

afternoon session: Ryosuke Jinnouchi (TOYOTA Central R&D lab., Inc)

**July 11 (Wed.)** Large-scale calculation

morning session: Francois Gygi (University of California)

afternoon session: Taisuke Ozaki (Japan Advanced Institute of Science and Technology)

シンポジウム :

**July 2 (Mon)**

- 9:30 - L. Mitas (North Carolina State University)  
Spins as quantum variables in electronic structure quantum Monte Carlo calculations
- 10:00 - I. Solovyev (National Institute for Materials Science)  
Magnetic inversion symmetry breaking and ferroelectric activity in perovskite manganese oxides
- 10:30 - H. Gross (Max Planck Institute for Materials Physics)  
Reduced-density-matrix functional theory of weakly and strongly correlated systems
- 11:00 - R. Arita (The University of Tokyo)  
High-temperature Superconductivity in Layered Nitrides: Insights from Density-functional Theory for Superconductors
- 11:30 - S. Shin (ISSP)  
Laser-ARPES study on Fe-pnictide superconductors
- 13:30 - C. Hu (Tokyo University of Science)  
Nonadiabatic couplings from time-dependent density functional theory: Progress and challenges
- 14:00 - K. Nobusada (Institute for Molecular Science)  
Near-Field Excitation Dynamics in Nanostructures: Nonuniform and Self-Consistent Light Matter Interaction
- 14:30 - K. Misawa (Tokyo University of Agriculture and Technology)  
Vibrational wave-packet control in cyanine dye molecules
- 15:00 - T. Tahara (RIKEN)  
Nuclear dynamics of reacting molecules studied by ultrafast spectroscopy with 10-fs pulses
- 16:00 - M. Rohlfing (University of Osnabruck)  
Many-body perturbation theory: from molecular adsorbates to paired nanotubes
- 16:30 - A. Marini (National Research Council)  
Excitonic collapse in solids driven out-of-equilibrium by ultra-strong laser pulses
- 17:00 - Y. Noguchi (ISSP)  
Massively parallel all-electron GW+Bethe-Salpeter calculations: development and application
- 17:30 - K. Yamauchi (Osaka University)  
Charge-order-induced multiferroicity in transition-metal oxides
- 18:00 - Banquet

**July 12 (Thurs)**

- 13:00 - M. Di Ventra (University of California)  
Stochastic Time-Dependent Current-DFT: a functional theory of open quantum systems
- 13:30 - K. Ando (Kyoto University)  
Electron transfer pathway analysis in large biomolecules
- 14:00 - Y. Gohda (The University of Tokyo)  
First-principles interface science: Structures and electronic states

- 14:30 - H. Katayama-Yoshida(Osaka University)  
 Computational Nano-Materials Design of High-Efficiency Photovoltaic Solar Cells in Cu(In,Ga)Se<sub>2</sub> and Cu<sub>2</sub>ZnSn(Se,S)<sub>4</sub> by Two-dimensional Spinodal Nano-decomposition: Beyond-LDA and Multi-scale Simulation
- 15:30 - J. Dobson(Griffith University)  
 Some 5th rung correlation energy functionals
- 16:00 - O. Anatole von Lilienfeld(Argonne National Laboratory)  
 Fast and accurate modeling of interatomic energies with machine learning
- 16:30 - T. Ono(Osaka University)  
 First-principles study on transport properties of carbon based nano-systems
- 17:00 - POSTER
- 18:00 - Banquet

### July 13 (Fri)

- 9:40 - M. Sprik(University of Cambridge)  
 Density functional theory modeling of transition metal oxide-water interfaces
- 10:10 - M. Bjorketun(Technical University of Denmark)  
 Atomic-scale modeling of the electrochemical interface
- 10:40 - T. Ogitsu(Lawrence Livermore National Laboratory)  
 Improving performance of electrochemical devices: How can ab-initio simulations help?
- 11:30 - F. Gygi(University of California)  
 Acceleration of Hartree-Fock and Hybrid Density Functional Simulations using Recursive Subspace Bisection
- 12:00 - J. Iwata(The University of Tokyo)  
 Real-space grid density functional theory calculations
- 12:30 - I. Hamada(Tohoku University)  
 Van der Waals density functional applied to adsorption systems

### イベント

- 6月26日 遠足 (布施弁天)
- 6月27日 茶の湯
- 7月10日 浴衣着付け

組織委員：常行真司(東大理)、山下晃一(東大工)、大野隆央(物材)、館山佳尚(物材)、宮本良之(産総研)、大谷実(産総研)  
 所内組織委員：川島直輝、野口博司、野口良史、杉野修 (委員長)

## ISSP-CMSI 国際ワークショップ MASP2012 参加者数

### Pedagogical Talk 参加者数

	学内	(外国籍)	学外	(外国籍)	合計	(外国籍)
June 25	11	(1)	16	(5)	27	(6)
June 26	8	(1)	11	(5)	19	(6)
June 27	10	(1)	19	(5)	29	(6)
June 28	10	(1)	12	(5)	22	(6)
June 29	6	(0)	11	(6)	17	(6)
July 3	5	(0)	17	(10)	22	(10)
July 4	6	(2)	19	(7)	25	(9)
July 5	6	(2)	19	(11)	25	(13)
July 6	9	(1)	10	(7)	19	(8)
July 9	5	(0)	15	(8)	20	(8)
July 10	3	(1)	13	(9)	16	(10)
July 11	6	(2)	12	(7)	18	(9)
12 日間合計のべ 人数	85	(12)	174	(85)	259	(97)

### Symposium 参加者数

	学内	(外国籍)	学外	(外国籍)	合計	(外国籍)
July 2	14	(1)	35	(11)	49	(12)
July 12	18	(2)	42	(12)	60	(14)
July 13	10	(1)	30	(7)	40	(8)
3 日間合計のべ 人数	42	(4)	107	(30)	149	(34)

### Pedagogical Talk および Symposium 参加者数合計

	学内	(外国籍)	学外	(外国籍)	合計	(外国籍)
15 日間合計	127	(16)	281	(115)	408	(131)



# ISSP 国際ワークショップ

## 「コヒーレント軟 X 線科学」

期間：2012年6月27日～2012年6月29日(3日間)

場所：東京大学柏図書館メディアホール

提案者：辛 埴、小林 洋平、板谷 治郎

報告：板谷 治郎

第5回コヒーレント X 線の発生と応用に関するアジアワークショップ(5th Asian Workshop on Generation and Applications of Coherent XUV and X-ray Radiation, 略称 5th AWCXR)を物性研究所で開催することとなり、物性研の ISSP 国際ワークショップ「コヒーレント軟 X 線科学」と共催にして、二日半のワークショップを柏図書館メディアホールにて開催した。AWCXR は日中韓の三カ国を中心としてこれまで約一年半おきに開催されており、日本国内では理研の第二回に引き続いて二度目の開催となった。過去の AWCXR は、高強度レーザーを用いたプラズマ軟 X 線レーザーや高次高調波が主なテーマであった。今回、ISSP 国際ワークショップと共催することによって、レーザーだけでなく、X 線自由電子レーザーなどの加速器ベースの短波長光源や、時間分解軟 X 線分光などの物性応用を含む幅広いテーマを扱うワークショップにすることが出来た。これは、コヒーレント短波長光の発生と応用が、「放射光」と「レーザー」という二つの異なる光技術で同時に進展している現状を踏まえたものである。本ワークショップは、レーザーと放射光におけるコヒーレント短波長光の発生と応用についての現状を俯瞰し、今後の光科学と物質科学の方向性について活発な意見交換を行うことを目的として開催された。

2 日半のプログラムでは、2 件のチュートリアル講演(X 線自由電子レーザーおよびレーザー光電子分光に関するホットトピック的な講演)、35 件の口頭講演、20 件のポスター発表が行われた。参加人数は、約 120 名(のべ人数で約 230 名)、そのうち海外からの参加者は、韓国 6 名、中国 12 名、台湾 1 名であった。

初日の「X 線自由電子レーザー」のセッションでは、光源・光学素子技術、原子分光・イメージング・物性への応用に関する最新の成果について発表が行われた。日本の X 線自由電子レーザー(XFEL)は昨年はじめてレーザー発振を記録したこともあり、非常にタイムリーな講演と活発な議論が行われた。初日午後のセッションは、「レーザープラズマ誘起軟 X 線レーザー」に関するものであり、日中韓で開発が進められているプラズマ X 線レーザーの現状や、空間コヒーレンスを利用した時間分解干渉イメージングやスペックルによる誘電体ドメインの揺らぎ観察などの興味深い応用が報告された。初日夜は物性研本館前のカフェテリアで懇親会が開かれ、国内外から多くの参加者があり盛況となった。

2 日目午前は「短波長光を用いた物質科学」に関するセッションであり、物性研におけるレーザー光電子分光や SPring-8 における東大アウトステーションでの物性研究の紹介や、放射光における時間分解測定による強相関物質研究、X 線領域での非線形光学、高強度レーザーに基づく高光子フラックス極端紫外ビームラインの開発など、様々な実験手法が紹介され、物質科学における利用研究の現状と展望が議論された。午後は「アト秒科学」のセッションであり、世界各国で精力的に進められている高強度超短パルスレーザー光源の現状や、アト秒精度の時間分解分光について報告された。とくにレーザー高調波によるアト秒軟 X 線パルスの利用研究では、高強度レーザー光源だけでなく軟 X 線光学系や光電子分光装置などのビームライン設計が重要となってきている。アジア各国で、アト秒分光実験を実現するために広範な技術を結集した集中的な開発が進められていることが報告された。夜はポスターセッションが開かれて、若手研究者を中心に活発な議論や交流が行われた。

3 日目は、「高強度光電場中での原子分子過程」に関するセッションから始まり、XFEL ではじめて可能となった原子のイオン化実験とそれを解釈する理論についての紹介があった。また、レーザー高調波の発生過程に関する定量的な理論についても報告された。これらの発表を通して、特に XFEL の登場によって原子分子に関する様々な知見が実験的理論的に得られつつある現状について、整理と議論が行われた。高強度光電場中での原子分子に関する理論は、今後のコヒー

レント短波長光源の開発において基礎となるものであり、講演して頂いた国内の若手研究者が世界的にも重要な貢献を果たしている。ひきつづいて、短波長光発生のためのレーザー新技術として、「真空紫外域における周波数コム」と「高強度レーザーの新技術」に関するセッションが開かれた。周波数コムに関しては、次世代原子時計や真空紫外域での原子の精密分光についての発表が行われた。これらは、周波数領域での極限的な精密分光を目指すものであり、コヒーレント短波長光の新しい応用である。高強度レーザーの新技術に関しては、透過型回折格子による平均出力の向上や、波長変換による高強度長波長光発生や狭帯域短波長光の発生などの新手法が紹介された。これらの発表は、高強度レーザー技術において技術革新が続いていることを示す一例であり、コヒーレント短波長光発生への応用に関しても今後の展開が期待される。ワークショップ終了後には、先端分光部門の極限レーザー実験室(辛研究室、小林研究室、板谷研究室)の見学会が行われた。特に海外からの参加者からは「おもしろかった」という感想を多数頂いた。物性研究所では市販の光源システムをまるごと導入することはせず、光源のかなりの部分を自前で開発、製作している。また、東日本大震災以降、個別空調設備などのインフラ整備を進めており、さまざまな工夫を見て取れることも好評につながったものと思われる。

今回のワークショップでは、「レーザー・放射光・物質科学」という三分野からバランスよく、若手からシニアな研究者まで参加していただけた。その結果、現状と将来展望について非常に有意義なディスカッションや情報交換ができた。特に、物性研究所で本ワークショップを開催できたことが、レーザー以外の分野からの積極的な参加につながったと思われる。折しも物性研では、軌道放射物性部門と先端分光部門の合併と新センター設立の準備が進められている。レーザーと放射光という二つの光科学の融合と新しい物質科学の追求が今後の大きな課題であるが、このような分野横断的なワークショップを期せずして同時期に開催することとなり、国内外の関連分野の方々とは忌憚のない意見交換をできたことは非常に有意義であった。スケジュール的にも密な 2 日半のワークショップであったが、多くの方が泊まりがけで参加してください、活発なご議論をして頂いたことに、厚くお礼申し上げます。

## ワークショップ・プログラム

ISSP 国際ワークショップ「コヒーレント軟 X 線科学」および

5th Asian Workshop on Generation and Applications of Coherent XUV and X-ray Radiation (共催)

**6月27日(木)**

### Opening Remarks

J. Itatani ISSP, University of Tokyo

K. Midorikawa RIKEN

### Session I. XFEL – current status and perspectives

M. Yabashi RIKEN Spring-8 Center

K. Ueda Tohoku University

T. Togashi JASRI

A. Hishikawa Nagoya University

K. Yamauchi Osaka University

D. -Y. Noh GIST, Korea

M. Newton RIES, Hokkaido University

N. Sarukura ILE, Osaka University

A. Iwasaki University of Tokyo

### Session II. Plasma-based soft-x-ray lasers and their applications

T. Kawachi JAEA

K. Janulewicz      GIST, Korea  
L. Chen              CAS, China  
Y. Zhao              Harbin Institute of Technology, China  
K. Namikawa        Tokyo University of Science  
T. Suemoto          ISSP, University of Tokyo

**Get-together party(カフェテリア)**

**6月28日(金)**

**Session III. Material sciences using short-wavelength radiation**

S. Shin              ISSP, University of Tokyo  
S. Koshihara        Tokyo Institute of Technology  
K. Tamasaku        RIKEN Spring-8 Center  
T. Sekikawa        Hokkaido University  
I. Matsuda          ISSP, University of Tokyo

**Session IV. Intense laser sources for attosecond sciences**

Y. Nabekawa        RIKEN  
C. H. Nam            KAIST, Korea  
Q. Zhang            Huazhong University of Science and Technology, China  
D. E. Kim            POSTECH, Korea  
H. Xu                SIOM, China  
Z. Zeng              SIOM, China  
S. Gong              East China University  
N. Ishii              ISSP, University of Tokyo

**Session V. Poster presentations(20件)**

**6月29日(土)**

**Session VI. Atoms and molecules in intense laser fields**

K. L. Ishikawa      PSC, University of Tokyo  
T. Morishita        University of Electro-Communications  
H. Xu                Jinlin University, China  
R. Itakura          JAEA

**Session VII. VUV frequency comb and their applications**

T. Ido                NICT  
A. Ozawa            ISSP, University of Tokyo  
J. Zhang             CAS, China

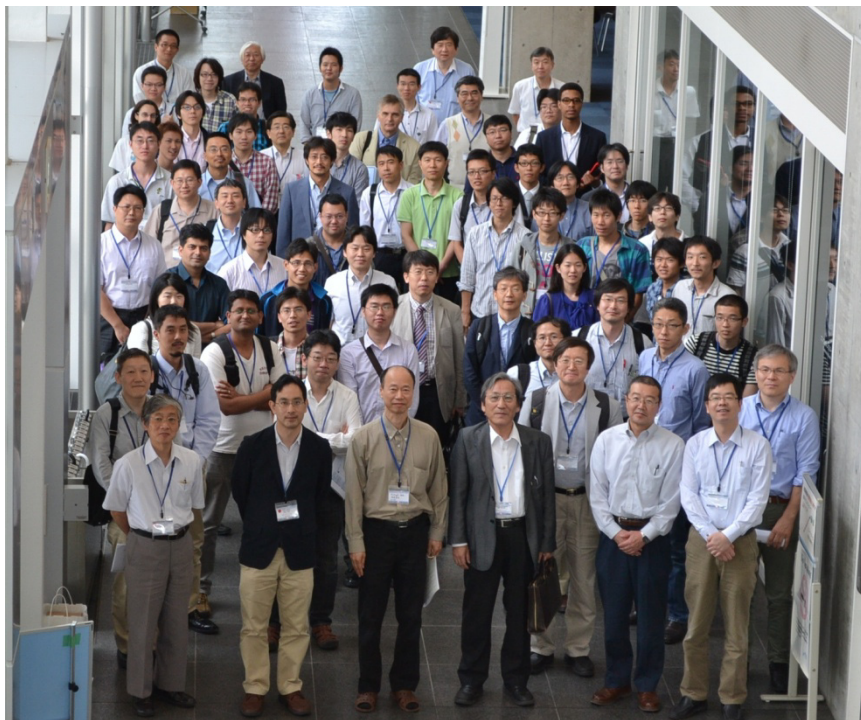
### Session VIII. New technologies for intense laser sources

C. Zhou           Tokyo University of Science  
K. Yamakawa      JAEA  
N. Miyanaga      ILE, Osaka University  
Z. Wang           CAS, China  
S. Adachi         Kyoto University

### Closing Remarks

Y. Iye            ISSP, University of Tokyo  
C. H. Nam         KAIST, Korea

### Lab Tour(先端分光研究棟 D101)



集合写真（6月27日、柏図書館にて）。

# ISSP ワークショップ

## 表面・界面における輸送と変換

期間：2012年7月13日～7月14日

場所：東京大学物性研究所 第一会議室

研究会提案者：松本 吉泰（代表）、大西 洋、福谷 克之、小森 文夫、杉野 修、原田 慈久、吉信 淳

電荷、プロトン、エネルギー移動は自然界における普遍的過程であり、分子や物質の性質や反応性において重要な役割を果たしている。特に、表面・界面でのこれらの移動過程は、自然界における光合成や光触媒の不均一界面を用いた人工光合成に見られるように極めて重要なエネルギー変換を担っていることは明らかである。表面・界面におけるこれらの移動過程においては、大きな電場勾配下での物質間のエネルギー準位アライメント、電荷とカップルしたプロトン移動ダイナミクス、また、これらに関与する溶媒の役割、光照射下での非断熱過程、力学的外力が働く界面でのエネルギー損失過程など、解明すべき課題は多く、その学術的意義は高い。しかし、これらの諸問題に関する分子論的理解はまだきわめて不十分な状態にある。一方、これらの移動過程は、燃料電池、太陽光発電、有機デバイス、摩擦など、応用面でもきわめて重要な過程である。

本研究会は、平成 23 年度後期に開催された物性研短期研究会「エネルギー変換の物性科学」で議論されたテーマの中から、表面・界面における電荷、プロトン、エネルギー移動における諸問題を理論・実験の両面から検討し、さらに異分野間の交流を促進し将来を展望することを目的に企画された。

両日で延べ 70 名を超える参加者があり、異なるコミュニティに属する研究者間で活発な議論と情報交換が行われた。後日、参加者の一人から、「通常の学会とは異なった切り口のワークショップで、exciting な二日間でした。非常に有意義な会合だったと思います。」との感想をいただいた。今後もこのような研究会を物性研で開催したいと考えている。

### プログラム

#### 2012/7/13

Opening	13:30-13:40	吉信 淳	東大物性研	はじめに
Leader1	13:40-14:00	松本 吉泰	京大院理	表面・界面での電子-格子相互作用
依頼講演 1	14:00-14:30	星 永宏	千葉大工	構造規制電極上の電気化学反応
依頼講演 2	14:30-15:00	山方 啓	豊田工大	時間分解赤外分光法でみた光触媒のキャリアダイナミクス
依頼講演 3	15:00-15:30	館山 佳尚	物材機構	TiO <sub>2</sub> /水界面の電子・正孔状態に関する第一原理計算解析
依頼講演 4	15:30-16:00	工藤 昭彦	東京理科大	固体光触媒表面上での水分解による水素および酸素生成反応
Coffee break	16:00-16:20			
Leader2	16:20-16:40	大西 洋	神戸大理	固液界面液体の AFM 計測
依頼講演 5	16:40-17:10	平山 朋子	同志社大	トライボロジーにおける界面創成の重要性
依頼講演 6	17:10-17:40	立川 仁典	横浜市大	量子多成分系分子理論による水素系の量子シミュレーション

#### 2012/7/14

依頼講演 7	9:00-9:30	久保 百司	東北大	第一原理分子動力学法と Tight-Binding 量子分子動力学法による固液界面の化学反応ダイナミクス
--------	-----------	-------	-----	--



依頼講演 8	9:30-10:00	三浦 浩治	愛知教育大	ナノ構造体の剥離・凝着
依頼講演 9	10:00-10:30	栗原 和枝	東北大	共振ずり測定より見るトライボロジー現象
Coffee break	10:30-10:50			
Leader3	10:50-11:10	福谷 克之	東大生研	表面における水素の移動と電子状態変化
依頼講演 10	11:10-11:40	原田 慈久	東大物性研	軟 X 線分光で捉える水の構造と電子状態
依頼講演 11	11:40-12:10	北川 宏	京大院・理	ナノ金属と水素
ending	12:10-12:20	小森 文夫	東大物性研	まとめ

## 表面・界面での電子-格子相互作用

松本 吉泰 (京都大学大学院理学研究科 化学専攻)

電荷移動は化学現象全般において中心的な役割を果たしている。表面・界面における現象もその例外ではない。吸着種と表面間との電荷移動に伴い、表面での吸着・脱離・反応などを含むさまざまな過程が誘起される。したがって、表面・界面における電子-格子相互作用、すなわち、電子励起がどのように原子核運動と結合しているかを微視的な観点から明らかにすることが重要である[1]。本講演では、アルカリ金属が吸着したよく規定された金属表面[1]と可視光応答型の光触媒である  $\text{BiVO}_4$  微結晶表面という大きく異なる表面系を取り上げ、表面電子系の超高速励起がどのように表面におけるフォノン励起を誘起するかについて紹介する。そして、表面・界面における電荷移動に関わる問題点を提起し、本講演に続く電荷移動に関するいくつかのトピックスの導入としたい。

### 参考文献

- [1] Y. Matsumoto and K. Watanabe, Chem. Rev. **106**, 4234 (2006).  
 [2] K. Watanabe, Y. Matsumoto, T. Yasuike, and K. Nobusada, J. Phys. Chem. A **115**, 9528 (2011).

## 構造規制電極上の電気化学反応

星 永宏 (千葉大学 大学院工学研究科)

固液界面の電荷移動をともなう電気化学反応の活性および電極の耐久性は、電極の表面構造によって大きく変化する。燃料電池の開発では、酸素還元反応(ORR)の活性化と電極触媒である Pt ナノ微粒子の耐久性向上が重要な課題である。

Pt および Pd の高指数面の表面構造を系統的に変化させて、ORR の活性サイトを、回転リング電極を用いて検討した。Pt 電極の場合は(111)テラスエッジ[1]、Pd 電極の場合は(100)テラスが ORR 活性サイトであることを明らかにした[2]。

-0.05 と 1.6 V(RHE)の間で電極電位をサイクルさせながら、10 nm サイズの立方体および立方八面体型 Pt ナノ微粒子の溶解過程を、高速 AFM でリアルタイム観測した。立方八面体型の方が立方体型よりも高い耐久性を持つことが分かった。

**謝辞** 本研究は NEDO『固体高分子形燃料電池実用化推進技術開発／基盤技術開発／低白金化技術』の委託を受けて実施された。

### 参考文献

- [1] A. Hitotsuyanagi, M. Nakamura, and N. Hoshi, Electrochim. Acta 10.1016/j.electacta.2012.03.133.  
 [2] A. Hitotsuyanagi, S. Kondo, M. Nakamura, and N. Hoshi, J. Electroanal. Chem. **657**, 123 (2011).

## 時間分解赤外分光法でみた光触媒のキャリアダイナミクス

山方 啓 (豊田工業大学 大学院工学研究科)

太陽光を用いて水を水素に分解し、有害物質を無害化する光触媒が注目されている。この光触媒の反応活性はバンドギャップを光励起して生成したキャリアの再結合速度や反応分子への電荷移動速度に支配される。したがって、反応機構を理解しさらなる活性の向上を実現するには、これらの光励起キャリアの挙動をよく理解する必要がある。時間分解赤外分光法を用いると光励起電子の挙動を詳しく調べることができる[1-3]。本講演ではこの手法を用いていくつかの光触媒や光電極系の光励起キャリアの挙動を調べた結果について発表する。

### 参考文献

- [1] A. Yamakata, T. Ishibashi, and H. Onishi, *J. Phys. Chem. B* **105**, 7258 (2001).
- [2] A. Yamakata, M. Yoshida, J. Kubota, M. Osawa, and K. Domen, *J. Am. Chem. Soc.* **133**, 11351 (2011).
- [3] F. Zhang, A. Yamakata, K. Maeda, Y. Moriya, T. Takata, J. Kubota, K. Teshima, S. Oishi, and K. Domen, *J. Am. Chem. Soc.* **134**, 8348 (2012).

## TiO<sub>2</sub>/水界面の電子・正孔状態に関する第一原理計算解析

館山 佳尚 (物材機構 WPI-MANA、JST さきがけ、JST-CREST、京大触媒・電池元素戦略ユニット)

固液界面における電荷・プロトン・エネルギー移動は様々な触媒・電池に共通する基本過程である。すでに様々な触媒・電池応用が実現しているが、この界面過程の分子論・電子論的理解および理論計算予測はまだ未熟な状態にある。特に問題なのは、最近容易に実行可能になってきた第一原理 DFT 計算から得られる物理量と電気化学で用いられる物理量のミスマッチが挙げられる。

そこで我々は第一原理 DFT 分子動力学フレームワークを用いた界面酸化還元(電気化学)物理量の記述を目指し、まず触媒・電池に頻用されている酸化物/溶液界面の構造および電子状態解析に取り組んできた。さらに最近では溶液中に実際に反応物を入れて、酸化還元反応の始・終状態を比較することも試みている。本講演では我々が行った TiO<sub>2</sub>/H<sub>2</sub>O 界面の電子状態解析を中心に固液界面系の第一原理計算解析について議論する。

### 参考文献

- [1] M. Sumita, C. Hu, Y. Tateyama, *J. Phys. Chem. C* **114**, 18529-18537 (2010).
- [2] Y. Tateyama, M. Sumita, submitted.
- [3] M. Sumita *et al.* *J. Phys. Chem. C* **115**, 19849-19855 (2011).
- [4] K. Sodeyama *et al.* *J. Phys. Chem. Lett.* **3**, 472-477 (2012).

## 固体光触媒表面上での水分解による水素および酸素生成反応

工藤 昭彦 (東京理科大学理学部・総合研究機構エネルギー・環境光触媒研究部門)

太陽光エネルギーを使った水素などの燃料を合成する技術や、二酸化炭素の削減・資源化技術の早急な開発が強く望まれている。このようなプロセスで得られた燃料は、「ソーラーフェュエル」と呼ばれている。これを目指した化学的方法として、光触媒を用いた水分解や二酸化炭素固定が注目されている。水の光分解は、光エネルギーが水素という化学エネルギーに変換されるエネルギー蓄積型の反応(アップヒル反応)である。これは、植物が行っている光合成の明反応と同じ意

味を持つことから、人工光合成と呼ぶことができる。本講演では、人工光合成を実現するためのパーツとなる水素生成光触媒や酸素生成光触媒を紹介する。具体的には、可視光で水素生成に活性な SrTiO<sub>3</sub>:Rh 光触媒、酸素生成に活性な BiVO<sub>4</sub> 光触媒、さらには二酸化炭素の還元活性な Ag/ BaLa<sub>4</sub>Ti<sub>4</sub>O<sub>15</sub> 光触媒などを紹介し、それらの作動メカニズムや表面反応機構の研究を進める上での問題提起をする。

#### 参考文献

[1] A. Kudo and Y. Miseki, *Chem. Soc. Rev.* **38**, 253 (2009).

## 固液界面液体の AFM 観察

大西 洋 (神戸大学 理学研究科)

固液界面を走査する原子間力顕微鏡 (AFM) の探針にかかる力を 10 pN の分解能で計測すると、固体表面の凹凸ばかりでなく、液体密度分布の濃淡に起因する力の変調を二次元画像として検出できることが明らかとなってきた。化学修飾した単分子膜[1-3]や金属酸化物[4-6]に接する水と有機溶媒の測定結果を紹介する。固液界面における機械的エネルギーの散逸や化学反応の分子論的理解に不連続的な発展をもたらす可能性について議論したい。

#### 参考文献

[1] T. Hiasa, K. Kimura, and H. Onishi, *PCCP*, **14**, 8419 (2012).

[2] T. Hiasa, K. Kimura, and H. Onishi, *Coll. Surf. A*, **396**, 203 (2012).

[3] T. Hiasa, K. Kimura, and H. Onishi, *Jpn. J. Appl. Phys.*, **51**, 025703 (2012).

[4] T. Hiasa, K. Kimura, H. Onishi, M. Ohta, K. Watanabe, R. Kokawa, N. Oyabu, K. Kobayashi, and H. Yamada, *J. Phys. Chem. C*, **114**, 21423 (2010).

[5] K. Kimura, S. Ido, N. Oyabu, K. Kobayashi, Y. Hirata, T. Imai, and H. Yamada, *J. Chem. Phys.*, **132**, 194705 (2010).

[6] T. Hiasa, K. Kimura, H. Onishi, M. Ohta, K. Watanabe, R. Kokawa, N. Oyabu, K. Kobayashi, and H. Yamada, *Jpn. J. Appl. Phys.*, **48**, 08JB19 (2009).

## トライボロジーにおける界面創成の重要性

平山 朋子 (同志社大学 理工学部 エネルギー機械工学科)

機械工学技術において、要素間の摩擦およびそれに伴う摩擦の発生に関する諸問題は極めて重要な課題であり、トライボロジー分野において多くの研究が進められている。エンジンを始めとする摺動表面の多くは潤滑油中に晒されており、潤滑下でのトライボロジー現象を真に理解するには、摺動場における固液界面の状態を正確に把握することが重要である。本発表では、潤滑下における摩擦の三態(境界潤滑、混合潤滑、流体潤滑)とそのメカニズムを紹介するとともに、それぞれの状態において低摩擦を実現するためのキー技術と考え方について概説する。

## 量子多成分系分子理論による水素系の量子シミュレーション

立川 仁典 (横浜市立大学 大学院生命ナノシステム科学研究科)

水素結合系やプロトン(水素)移動反応など、多くの過程において水素原子核の量子力学的性質が重要であることが見出されている。これまで我々は、そのような核・電子混合系を量子力学的に取り扱うため、波動関数レベルでの(I)多成分系分子軌道(MC\_MO)法[1]と(II)多成分系量子モンテカルロ(MC\_QMC)法[2]を、また温度効果をも考慮するために(III)第一原理経路積分分子動力学(*ab initio* PIMD)法[3]を展開してきた。今回は低障壁水素結合系として、 $\text{H}_3\text{O}_2^-$ イオン[4,5]およびポルフィセン分子の分子内二重水素移動[6]に着目し、PIMD法によるH/D幾何学的同位体効果やその温度依存性を報告したい。また、グラフェンへの水素付加過程に対するセントロイド分子動力学法による結果も併せて紹介したい。

### 参考文献

- [1] T. Ishimoto, M. Tachikawa, and U. Nagashima, *J. Chem. Phys.* **128**, 164118 (2008).
- [2] Y. Kita, R. Maezono, M. Tachikawa, M. Towler, and R. J. Needs, *J. Chem. Phys.* **131**, 134310 (2009).
- [3] K. Suzuki, M. Tachikawa, and M. Shiga, *J. Chem. Phys.* **132**, 144108 (2010).
- [4] M. Tachikawa and M. Shiga, *J. Am. Chem. Soc. (Communication)* **127**, 11908 (2005).
- [5] K. Suzuki, M. Shiga, and M. Tachikawa, *J. Chem. Phys.* **129**, 144310 (2008).
- [6] T. Yoshikawa, S. Sugawara, T. Takayanagi, M. Shiga, and M. Tachikawa, *Chem. Phys.* **394**, 46 (2012).

## 第一原理分子動力学法と Tight-Binding 量子分子動力学法による固液界面の化学反応ダイナミクス

久保 百司 (東北大学大学院工学研究科附属エネルギー安全科学国際研究センター)

近年のナノテクノロジーの発展により、ナノスケールで起こる「化学反応」がマクロスケールの機械特性・性能に大きく影響を与えるようになり、重厚長大な機械システムと言えども、化学反応の電子レベル制御が必須となっている。特に、機械システムは「動き」によって初めて機能が発現することから、「化学反応と「流体、摩擦、衝撃、応力、流体、電位、伝熱」などが複雑に絡み合ったマルチフィジックス現象の電子レベルでの理解が重要課題である。そこで著者らは、独自に開発した第一原理分子動力学法と Tight-Binding 量子分子動力学法を活用し、機械工学分野における固液界面の化学反応ダイナミクスの解明とそれに基づく機械システムの理論設計を実現してきた。そこで本講演では、そのいくつかのトピックスについて紹介する。

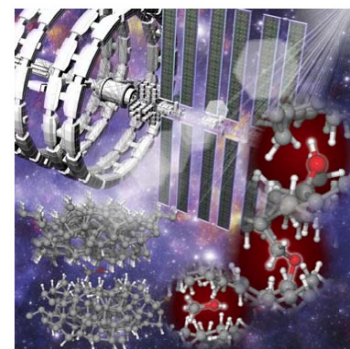


図 機械工学における「化学反応制御」のコンセプト図

## ナノ構造体の剥離・接着

三浦 浩治 (愛知教育大学 自然科学系)

剥離・接着は、日常的な現象である。しかしながら、詳細なミクロスコピックな測定が簡単にできないため、剥離や接着機構を詳しく調べることは非常に難しい。一方、最近ではヤモリの吸着機構をまねて作ったカーボンナノチューブ(CNT)からなるテープがヤモリの10倍以上の吸着力をもつことが報告されている。このように剥離・接着に関する研究は、古くて新しいテーマであり産業上極めて重要な課題と言えよう。

本研究会では、CNTとグラフェンを原子間力顕微鏡のカンチレバーに取り付けたCNT探針[1]とグラフェン探針[2]を

用いて、グラファイト基板上での引き剥がし実験から、CNT やグラフェンの剥離・接着過程に現れるナノ力学特性やトライボロジー特性について紹介する。このような剥離・接着過程は、原子間力顕微鏡を用いる生体高分子鎖の延伸分光によるアンフォールディング機構や、破壊過程における亀裂の進展機構と深い関係にあり、また、摩擦とも関係深い。

#### 参考文献

- [1] M. Ishikawa, R. Harada, N. Sasaki, and K. Miura, *Phys. Rev. B* **80**, 193406 (2009).
- [2] M. Ishikawa *et al.*, *APEX*, **5**, 065102 (2012).

## 共振ずり測定より見るトライボロジー現象

栗原 和枝 (東北大学 原子分子材料科学高等研究機構&多元物質科学研究所)

摩擦は固-液界面の関わる動的で複雑な過程であり、その科学的な解明は難しいとされてきた。最近の表面・界面評価法の進展により、その解明が期待されている。共振ずり測定(RSM)も新規手法のひとつである。二つの固体表面の間に挟まれた液体の性質がバルクとは異なることはよく知られており、その性質の解明は潤滑油の作用機構を理解するうえで必須である。RSM では、液体をはさむ上部表面をばねで吊り、一定の振動数でずり、その振幅を計測し、上部ユニットの共振ピークを得る。表面間距離を変えて測定した共振カーブの位置と強度より束縛液体の粘性、構造化、トラクション性、潤滑性などが評価できる。本発表では、雲母ならびにシリカ表面間に挟まれた水あるいはイオン液体など、いくつかのトピックスを紹介したい。

#### 参考文献

- [1] M. Mizukami and K. Kurihara, *Rev. Sci. Inst.* **79**, 113705 (2008).
- [2] H. Sakuma, K. Otsuki, K. Kurihara, *Phys. Rev. Lett.* **96**, 046104 (2006).
- [3] M. Ueno, M. Kasuya, M. Watanabe, M. Mizukami and K. Kurihara, *Phys. Chem. Chem. Phys.* **12**, 4066 (2010).

## 表面における水素の移動と電子状態変化

福谷 克之 (東京大学生産技術研究所)

固体表面は、光触媒における水素生成や吸蔵合金での解離と会合、炭化水素の水素化反応などの舞台として重要な役割を担っており、その際、表面での「水素の移動」が鍵となる。水素は、周囲の環境により中性、正、負、いずれの荷電状態も取ることができ、それに応じてサイズが変わるため、水素の移動には大きな影響を与える。さらに、表面の電子系・フォノンとの結合や、核のトンネル効果も水素の移動には影響する。本講演では、表面での「水素移動」を概観した後、金属表面での水素化反応[1,2]と酸化物表面での水素誘起電子状態変化[3]の研究結果を紹介する。

#### 参考文献

- [1] M. Wilde *et al.*, *Angew. Chem. Int. Ed.* **47**, 9289 (2008).
- [2] S. Ohono *et al.*, in preparation.
- [3] K. Takeyasu *et al.*, in preparation; K. Fukada *et al.*, in preparation.

## 軟 X 線分光で捉える水の構造と電子状態

原田 慈久 (東京大学物性研究所、東京大学放射光連携研究機構)

水の水素結合に関わる電子状態のわずかな変化を捉え、水のミクロな構造を議論しようとする試みがこの 10 年の間に始まっている。2004 年アメリカとスウェーデンの研究グループは、水の軟 X 線吸収分光の結果から水の 1 分子あたりの水素結合数が実効的に 2 個程度しかないことを主張し、氷を出発点とする水のモデルに疑問を投げかけた[1]。これをきっかけに理論計算、X 線回折、中性子散乱、ラマン分光等、水の構造を議論してきた各国の研究グループの間で論争が始まった。2008 年我々は軟 X 線発光分光を用いて液体の水の酸素の占有電子状態を観測し、水が本質的に不均一であることを主張した[2]。これらの研究に対し、当初は大多数の研究者、研究グループが 30 年以上前に打ち捨てられたモデルを復活させたと懐疑的な見方を示したが、徐々に氷を出発点とするモデルから脱却し、不均一モデルを支持する最新の実験や理論が出始めている。

講演では軟 X 線分光と他の分光法の接点もふまえて、水の構造をめぐる議論を振り返る。

### 参考文献

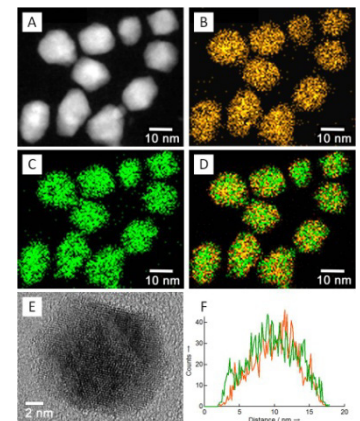
- [1] Ph. Wernet *et al.*, *Science* **304**, 995 (2004).
- [2] T. Tokushima *et al.*, *Chem. Phys. Lett.* **460**, 387 (2008).

## ナノ金属と水素

北川 宏 (京都大学 大学院理学研究科 化学専攻、JST/CREST)

水素は最も軽く量子波動性を有することから、電子の自由度(電子・正孔・ポーラロン・バイポーラロン・電子スピンなど)に加えて、水素の自由度(プロトン・プロチウム・ヒドリド・核スピンなど)が利用できれば、より自由度に富み柔軟性のある新しい融合技術「プロトエレクトロニクス」が誕生することになる。本講演では、ナノ金属格子中に存在する水素に関する我々の最新の研究を紹介する。

周期表において、Rh、Pd、Ag は順に並んでおり、全て fcc 構造を有する第 5 周期の遷移金属である。これら三金属の中で Pd のみが水素吸蔵特性を示す。III-V 半導体で見られるようなバンドフィリング効果を考えると、 $\text{Ag}(4d^{10}\cdot 5s^1)$  と  $\text{Rh}(4d^8\cdot 5s^1)$  が 1 : 1 の金属組成比で原子レベルに混じり合った固溶体型構造を形成した場合、その合金は周期表で両元素の間に位置する  $\text{Pd}(4d^{10}\cdot 5s^0)$  に類似した電子状態をとることが期待される。Ag と Rh はほとんど全ての組成領域で相分離構造を示し、2000 °C 以上の液相でさえ分離してしまう。我々は、非平衡合成法を用いて Ag-Rh 合金ナノ粒子を作製し、STEM-EDS 分析を行った結果、粒子全体にわたって両元素が均一に分布していることが確認された(図 B : Ag 元素、図 C : Rh 元素)。Ag : Rh = 50 : 50 の混合比率の時に、最大の水素吸蔵量を示すことを明らかにした。



### 参考文献

- J. Am. Chem. Soc.* **132**, 15896 (2010).



## ISSP ワークショップ

# 定常中性子源三軸分光器の役割と偏極中性子散乱

日時：2012年7月23日～7月24日

場所：物性研究所本館6階 第2セミナー室

提案者・報告者：益田 隆嗣（東大物性研）

中性子科学研究施設では、定常中性子源である研究用原子炉 JRR-3 に 9 台の分光器(内 4 台が三軸分光器)を所有し、大学共同利用に提供している。一方、パルス中性子源を有する大強度陽子加速器施設 J-PARC では、2011 年 12 月の再稼働以降、物性研所有の HRC 分光器をはじめとして多くの分光器が共同利用に供されるようになり、JRR-3 と J-PARC の共存時代が始まった。本ワークショップは、これまで中性子散乱の主役でありつづけてきた三軸分光器の今後の役割について議論することを目的に開催された。

最初に、原子力機構の目時氏から、国内外の中性子分光器の現状についての総説的な講演がなされた。1980 年代までは研究用原子炉が主力中性子源であったが、以降 KENS, IPNS, ISIS, SNS, J-PARC などパルス中性子源が設置されるようになり、現在では世界的に定常・パルス中性子源の共存時代となっている。両中性子源の長所と短所について、各種分光器との相性、各中性子源固有の実験方法から、原子炉に関する政治的問題、我が国の経済状況まで、多角的な観点からの議論がなされた。定常中性子源に設置された最新の分光器の例として、米国 NIST の MACS 分光器と仏国 ILL の Flatcone 分光器が紹介された。これらの分光器では、マルチディテクタにより広い波数空間での効率的測定が可能となっており、三軸分光器の最終形となっている。既存の三軸分光器に関しては、分かりやすい原理に基づいていることと、安価に数多くの分光器が設置可能であるという特徴を生かすことにより、人材育成・教育目的に大きな役割が期待される。

佐藤氏(東北大)から、三軸分光器の今後についての総説的な講演がなされた。J-PARC のチョッパー分光器が、幅広い波数-エネルギー空間での効率的測定を得意とする一方で、現在の三軸分光器は、狭い波数-エネルギー空間において、磁場、温度、圧力をパラメータとした測定を得意としている。また、(1)多波長の中性子を偏極させることが技術的に困難であることから、現状では偏極中性子実験は三軸分光器に利がある、(2)非弾性散乱から粉末回折、単結晶回折まで様々な測定が可能であり使い勝手が良い、(3)中性子装置の開発に関わる人材の教育に不可欠である、等も三軸分光器の特徴である。これらを踏まえ、将来構想として、(1)偏極非弾性散乱分光器、(2)偏極大強度弾性散乱装置、(3)教育・開発用分光器、などの建設が提案された。

益田氏(物性研)、松浦氏(東北大)、脇本氏(原子力機構)、および有馬氏(東大)からは、三軸分光器の偏極機能を高度化した場合に期待されるサイエンスについて講演がなされた。現状では、強度不足のために、偏極中性子実験は弾性散乱にほぼ限定されている。高強度偏極中性子の生成により非弾性実験が可能となれば、磁気多極子相関など新規磁気相関の検出、スピン揺らぎの特定方向成分の測定、磁気励起とフォノン励起の分離などが可能となる。さらに、強化された三軸スピネコー機能は、超高エネルギー分解能非弾性散乱を可能とし、フォノンの精密寿命測定、Skyrmion 格子のダイナミクス観測、リラクサー強誘電体の低周波数モードの測定などに威力を発揮する。また、クライオパッドによる三次元偏極非弾性散乱を行えば、スピン揺らぎの方向に関する詳細な情報が収集可能となり、複雑な磁気構造を舞台とする交差相関物理系の理解に大きく貢献する。このように、三軸分光器の偏極機能の強化は、磁性・強相関電子系の研究にとって極めて重要であることが議論された。

二日目は、主に中性子偏極技術に関する講演がなされた。平賀氏(東北大)により、偏極中性子用モノクロメータに用いるホイスラー合金の結晶育成と評価に関する講演がなされた。現在ホイスラー合金は、仏国 ILL のベンチャー企業 1 社による供給となっており、各国の中性子施設での偏極システム導入のボトルネックとなっている。東北大金研では、日本発のホイスラー偏極子の提供と、アジアでの偏極技術の普及を目指して研究・開発が行われていることが報告された。猪野氏(KEK)からは、 $^3\text{He}$  偏極フィルタ技術(SEOP)の現状についての講演がなされた。SEOP は、中性子が  $^3\text{He}$  を透過

する際に、中性子スピンと  $^3\text{He}$  核スピンが平行な場合の透過率は高く、反平行な場合はほぼゼロである、という性質を利用した中性子偏極フィルタ技術であり、1990 年頃から世界各国で開発されてきた。高反射率の PG モノクロメータと高透過率 SEOP の併用により、従来のホイスラー偏極子より高強度の偏極中性子の生成が可能とされている。KEK では、ここ数年で高性能 SEOP を実現し、中性子偏極実験の実用レベルに達していることが報告された。これを物性研ビームライン 5G、東北大 6G、原子力機構 TAS1 などに設置することにより、偏極中性子システムの革新的高度化を実現することが議論された。梶本氏 (J-PARC) と大山氏 (東北大) からは、J-PARC-MLF 施設の分光器の紹介と、J-PARC における偏極中性子分光器開発計画についての報告がなされた。

本ワークショップの講演者数は 10 名、のべ出席者数は 41 名であった。二日間の期間中、三軸分光器の役割と偏極技術についての忌憚ない議論がなされ、現在の三軸分光器は、高度な偏極解析分光器に特化していくことが、有効な選択肢の一つであると結論された。

## プログラム

### 7月23日

14:00 – 14:05 柴山 充弘 (東京大学) はじめに

座長 脇本 秀一

14:05 – 14:30 目時 直人 (原子力機構) 三軸分光器の今後について

14:30 – 14:55 佐藤 卓 (東北大) 大学共同利用の三軸分光器の今後について

14:55 – 15:20 益田 隆嗣 (東京大学) 5G の偏極システムの目指すもの

休憩 15:20-15:35

座長 佐藤 卓

15:35 – 16:00 松浦 直人 (東北大) 3 軸分光器スピンエコー-PONTA-TASSE の現状と今後の展望

16:00 – 16:25 脇本 秀一 (原子力機構) TAS1 の偏極中性子オプションとサイエンス

16:25 – 16:50 有馬 孝尚 (東京大学) 偏極非弾性中性子散乱への期待：非共線磁気秩序の低エネルギー励起

### 7月24日

座長 益田 隆嗣

10:00 – 10:25 平賀 晴弘 (東北大) 金研における中性子偏極結晶素子開発

10:25 – 10:50 梶本 亮一 (J-PARC) J-PARC・MLF の分光器の紹介

10:50 – 11:15 大山 研司 (東北大) J-PARC 偏極分光器 POLANO 計画および HERMES での SEOP 偏極回折実験

11:15 – 11:35 猪野 隆 (KEK) SEOP (spin-exchange optical pumping) 法による  $^3\text{He}$  スピン偏極技術の現状

11:35 – 11:40 吉沢 英樹 (東京大学) まとめ

# アブストラクト

## 三軸分光器の今後について

目時 直人（日本原子力研究開発機構）

三軸分光器は中性子散乱断面積を位相空間上で一点ずつ測定する最も原理的な装置である。Shull, Brockhouse らに与えられた 1994 年ノーベル物理学賞の受賞対象装置といえれば格調が高いが、弾性非弾性を問わず、結晶や液体・非晶質の構造と励起、磁性や超伝導の研究にこれまで重要な役割を担ってきた。イメージング、小角、TOF、そして照射装置を除けば、定常炉における散乱装置は多かれ少なかれ、三軸分光器の発展版と言えなくもない。1990 年代からは大強度パルス中性子源における高性能の分光器との共存併用を目指して(1)エネルギー範囲拡大と大強度化、(2)自由度の増大、(3)偏極高度化、(4)極端条件、以上の観点から世界的規模で装置の高度化が実施されてきた。例えば NIST における MACS は（もはや三軸どころか多軸！）結晶分光装置の性能を最大限向上させて成熟した域に達している。JRR-3 には今のところ同型の装置は存在しないが、5G が偏極フィルターと解析部の大強度化を実施し、さらに TASSE や弾性散乱用の大型  $^3\text{He}$  検出器のオプションも搭載可とすれば（速度選別機導入や各デバイスの高度化等の細かい改良は未来永劫の課題であろうが）、定常炉における結晶型分光器の最終形の一形態を実現したと言えるであろう。自由度の増加として 4 次元空間を自由にアクセスできるオプションも考えられる。少なくとも現状では中性子非弾性散乱測定、特に三軸分光器を用いた中性子偏極解析による単結晶の測定は、大学や公的機関による基礎研究のための実験であり、国内の制度上の制約から、全国共同利用の一環として広く共同利用に供せられる形態の装置建設が最も望ましい。その研究成果や技術発展がシーズとして他分野や産業界にまで中長期に影響が及ぶことを期待したい。講演では JRR-3 における三軸分光器の歩んできた歴史と、J-PARC そして 20 年先の次期炉検討状況や国内の情勢等をふまえながら、若干の未来予測と周辺部の話題を提供する。

## 大学共同利用の三軸分光器の今後について

佐藤 卓（東北大学多元物質科学研究所）

現在大学側が JRR-3 に所有する三軸型分光器は 6 台ある。この中で C11 分光器は冷中性子を用いた高エネルギー分解能型三軸分光器であるが故そのターゲットとするエネルギー領域に特徴があるが、他の 5 台の三軸分光器はどれも熱中性子を用いた分光器であり性格に大きな差は無い。これまで、ユーザーからの強力な需要に支えられて存在してきた多数の熱中性子三軸分光器であるが、J-PARC 時代を迎え（むしろサイエンスの変化を前に、と言うべきだろうか？）このような多数の同型分光器が本当に必要なかは検討の必要がある。さらに、各分光器は建設以来の継続的な高度化により差別化すべく努力して来た所であるが、J-PARC で稼働を始めたチョッパー分光器や単結晶弾性散乱装置等との比較により、その差別化・高度化の方向に再検討の余地があるかもしれない。講演ではこれまでの三軸分光器の高度化を簡単にまとめ、J-PARC 時代における今後の三軸分光器の進むべき方向性に関する私見を述べたい。

## 5G 偏極システムの目指すもの

益田 隆嗣 (東大物性研)

JRR3 の炉室ビームポート 5G に設置されている三軸分光器 PONTA は、汎用的な非偏極実験と偏極中性子弾性散乱実験の装置として、これまで多くの成果を上げてきた。しかし、現在 JRR3 には合計 9 台もの三軸分光器があることと、J-PARC が本格稼働し、これまで三軸分光器で行われてきた実験の一部が TOF 分光器で行われるようになってきたことを考慮すると、PONTA 分光器をどのように運営していくべきか、再検討する時期がきていると考えられる。物性研中性子施設では、SEOP を導入することで PONTA の偏極機能をアップグレードし、偏極非弾性散乱が可能な分光器としていくことを検討している。本講演では、物性研の SEOP 導入計画と、偏極非弾性散乱実験で期待されるサイエンスについて話をする。

## 3 軸分光器スピネコーPONTA-TASSE の現状と今後の展望

松浦 直人 (東北大金研)

任意の  $Q$  で格子やスピンの揺らぎを調べる事が出来るという点で、中性子散乱は揺らぎを測定するプローブの中でも重要な位置を占めている。しかしエネルギー分解能という点では、NMR や $\mu$ SR、ラマン分光や Brillouin 分光に比べると数桁悪い。ビームの平行度を高くする事によりエネルギー分解能を上げる事が出来るが、この場合分解能と強度は trade-off の関係にある為、高分解能化は強度の大幅な減少を伴う。中性子スピネコー法は、偏極中性子スピンが磁場中で示す Larmor 歳差運動の位相角を試料前後の中性子速度の差の検出に用いる方法で、強度の減少なしに、サブ $\mu$ eV の非常に高いエネルギー分解能を達成できる。スピネコー法では中性子が感じる磁場積分値が一定である事が重要であるが、divergence の強い定常中性子源の熱中性子ビームに対しても、この条件をクリアする小型コイルが開発され<sup>1)</sup>、3 軸分光器のオプションとして中性子スピネコーが導入されたのが PONTA-TASSE である<sup>2)</sup>。

中性子スピネコー法の分解能は、偏極中性子スピンを回転させるだけ上がるので、磁場に比例し、また中性子の速度が遅いほど向上する( $\propto \lambda^3$ )。その為、冷中性子源やパルス中性子源に取り付けられた中性子スピネコー専用装置と比べると、PONTA-TASSE のエネルギー分解能は悪いが、それらの分光器には無い以下の特徴がある。1. 非弾性条件でのスピネコーにより励起の寿命を精密に測定できる。2. 比較的大きな  $Q$  領域 ( $>1.5\text{\AA}^{-1}$ ) での実験が可能である。3. 単色化に結晶を用いている為、 $Q$  分解能が非常に高い。講演では、これら PONTA-TASSE の特徴と関連したサイエンス、そして今後の PONTA-TASSE の展望、upgrade に期待する点について述べる。

[1] C. M. E. Zeyen and P. C. Rem, *Meas. Sci. Technol.*, **7**, 782 (1996)

[2] C. M. E. Zeyen, K. Kakurai, N. Nishi, N. Nakajima, T. Sakaguchi, Y. Kawamura, S. Watanabe, M. Berneron, K. Sasaki, and Y. Endoh, *Neutron News*, **8**, 7 (1997).

## TAS-1の偏極中性子オプションとサイエンス

脇本 秀一 (原子力機構量子ビーム応用研究部門)

偏極中性子散乱実験では、入射及び散乱中性子の偏極ベクトル  $P_i$ ,  $P_f$  を関係づける偏極マトリックスを決定することができる。2G ポートに設置された三軸分光器 TAS-1 では、偏極マトリックスの対角成分のみの情報を得るための1次元偏極オプション(右上写真)と、非対角成分についても情報を得る3次元偏極オプション CRYOPAD(右下写真)を備えている。これまでのホイスラーモノクロとアナライザーの高度化により、偏極強度が増加し、多くの実験で利用されてきた。1次元偏極はマルチフェロイック物質の研究などに活用され、CRYOPAD は楕円らせんなどの複雑な磁気構造の研究に活用されている。本発表の前半ではこれらのオプションの原理と、それらを用いた研究例について報告する。

現在、TAS-1 では高エネルギー領域の偏極中性子非弾性散乱を目指して Cu モノクロと in-situ SEOP 型の  $^3\text{He}$  偏極スピフィルターを導入を進めている。Cu モノクロについては東北大、物性研との共同で進んでいるプロジェクトであり、スピフィルターについては量子ビーム基盤技術開発プログラムの枠組みで J-PARC センターと共同で進めている。これまでの検討結果からスピフィルターの仕様が概ね決定し、製作へと進んでいる。本発表後半では、これらの新たなオプションの詳細と、展開するサイエンスについて報告する。



## 偏極非弾性中性子散乱への期待：非共線磁気秩序の低エネルギー励起

有馬 孝尚、佐賀山 基 (東大新領域)

局在スピン系の低エネルギー物理はスピンハミルトニアンの中で考えることが可能であり、中性子非弾性散乱や磁気共鳴の実験はスピン波描像でよく理解できる。したがって、共線な強磁性体、フェリ磁性体、反強磁性体のスピン波の研究においては、偏極中性子の主な必要性はスピン波とフォノンとの区別にある。一方、フラストレーションに起因して生じる非共線、あるいは非共面的な磁気秩序の場合は、磁気秩序パターンや磁気励起の理論予測は容易ではなく、非弾性中性子散乱による実験的な磁気励起モードの同定が鍵を握る。その重要性は、いわゆる電気マグノン、すなわち、マルチフェロイック物質のマグノンがテラヘルツの振動電場で励起されることが発見されて以降、強く認識されて来たが、現実実験を行おうとすると、それほど容易ではない。例えば、Pimenov らによって最初に報告された電気マグノンのモードの同定は、現在でも不完全なままである[1-3]。本講演では、強誘電らせん磁性[4]、スカーミオン結晶状態[5]、パイロクロア格子スピン系[6]などを例にとって、非共線磁気秩序物質の磁気励起への興味について議論し、偏極中性子非弾性散乱が最も重要な実験となることを述べたい。

- [1] A. Pimenov *et al.*, Nat. Phys. **2**, 97 (2006).
- [2] D. Senff *et al.*, J. Phys.: Condens. Matter **20**, 434212 (2008).
- [3] N. Kida *et al.*, J. Opt. Soc. Am. B **26**, A35 (2009).
- [4] T. Arima, J. Phys. Soc. Jpn. **80**, 052001 (2011).
- [5] X. Z. Yu *et al.*, Nature **465**, 901 (2010).
- [6] J. Yamaura *et al.*, Phys. Rev. Lett. **108**, 247205 (2012).

## 金研における中性子偏極結晶素子開発

平賀 晴弘、山口 泰男、大山 研司、小野寺 貢<sup>A</sup>、戸澤 慎一郎、宍戸 統悦、湯蓋 邦夫、山田 和芳<sup>B</sup>  
(東北大金研、東北大院理<sup>A</sup>、KEK 物構研<sup>B</sup>)

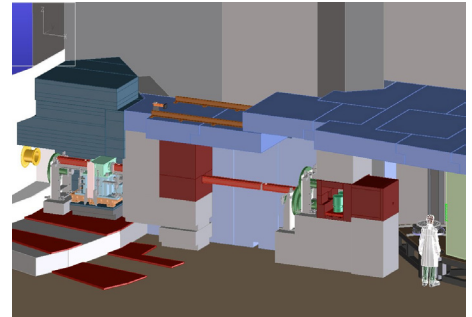
中性子分光にとって、中性子モノクロメータは最も重要なコンポーネントの一つである。我が国における中性子科学の草創期以来、モノクロメータ開発を研究者自らが行ってきたが、成功した例は決して多くない。

強磁性ホイスラー $\text{Cu}_2\text{MnAl}$  単結晶の(111)ブラッグ反射を利用すれば、簡便に偏極中性子ビームを得ることができる[1]ものの、日本国内において、 $\text{Cu}_2\text{MnAl}$  偏極モノクロメータ製作に必要とされる大型単結晶育成とそのアニール処理に関する技術的蓄積はない。世界でも ILL 研究所(仏)の一拠点だけが現在その実用化・製品化を独占的に行なっているため、 $\text{Cu}_2\text{MnAl}$  偏極素子の入手には莫大な金額と時間を要する。このような閉塞状況を打破するため、金研の中性子グループとバルク結晶作製グループが協力連携し、 $\text{Cu}_2\text{MnAl}$  偏極モノクロメータ製作プロジェクトをスタートさせた[2]。

本講演では、ブリッジマン法による単結晶育成と中性子・X線による結晶評価の現状、及び、今後の展望について報告する。

[1] A. Delapalme *et al.*, Nucl. Instr. Meth. **95**, 589 (1971).

[2] H. Hiraka *et al.*, poster presentation in *1st Asia-Oceania Conference on Neutron Scattering*, Tsukuba, Nov. 2011.



## J-PARC・MLF の分光器の紹介

梶本 亮一 (総合科学研究機構 東海事業センター)

大強度陽子加速器施設(J-PARC)の物質・生命科学実験施設(MLF)は2008年5月に初めて中性子ビームを生成して以来4年目を迎えているが、その間に中性子散乱実験装置の数も順調に増え、現在では全23本の中性子ビームライン中、実に18本のビームラインに装置が設置され、運用またはコミッショニングを行っている[1]。研究成果が現れ始めたところに起こった震災により一時運用が中断したものの、今年3月からはビーム出力も200 kWへ復帰し、6月には300 kW弱での運転も行われ、今後のますますの研究成果の創出が期待されているところである。

本講演では、MLFの中性子実験装置群の中でも定常線源の三軸分光器と最も相補的利用が見込まれるチョッパー分光器の現状を紹介するとともに、MLFで現在中性子偏極解析を利用した実験を行っている装置の概要についても紹介する。

[1] <http://www.j-parc.jp/researcher/MatLife/ja/instrumentation/ns.html>.

## J-PARC 偏極分光器 POLANO 計画および HERMES での SEOP 偏極回折実験

大山 研司 (東北大金研)

KEK-東北大および韓国との連携により、J-PARC 偏極度解析中性子分光装置 POLANO(ポラーノ:右上図)の建設を目指している。POLANOはPOLarisation Analysis Neutron spectr Ometerの略称であり、同時に東北地方を代表する作家である宮澤賢治の小作品「ポラーノの広場」にもちなんでいる。POLANOはコンパクトなチョッパー型(L1=17.5m,L2=2.5m)で、最終的なターゲットを100meV超領域を含む広範囲での磁気励起観測においている。大面積



アナライザーに技術的課題があることから、技術的にもサイエンスとしても段階的に進めたい。まず第 1 期は、偏極子として Spin exchange optical pumping(SEOP)法  $^3\text{He}$  フィルター(GE180 ガラス製、直径 70–100mm)を用いるが、アナライザーは扇型スーパーミラー( $m=3.5$ )を用い  $E_f \leq 30\text{meV}$  のサイエンスに集中する。第二期では円弧型 SEOP 石英セルをアナライザーとし  $E \leq 100\text{meV}$  領域をめざす。さらに、最終的に  $E \geq 100\text{meV}$  での実験実現のため、動的陽子偏極法の導入を検討している。動的陽子偏極法は本プロジェクトの枠内で KEK で開発が続けられている。

POLANO で用いられる SEOP 法はその安定した偏極率が重要なメリットで、現在、東北大-JAEA-KEK の連携で開発が順調に進められている。現在の技術ですでに  $E \leq 60\text{meV}$  なら最適化条件が実現可能である。すでに金研粉末回折装置 HERMES において off-beam SEOP フィルターによる偏極回折実験を実現し、ナノコンポジット磁石材料での強磁性成分の観測に成功している。この実験では直径 3cm の GE180 セルを用いたが、東北大学では直径 100mm の GE180 セルの作成に成功している(右下図)。これを用いれば JRR3 と J-PARC の多くの装置で偏極が可能であり、かつ PASTIS 型マグネットの利用により大立体角アナライザーとして使用できる可能性がある。

## SEOP(spin-exchange optical pumping)法による $^3\text{He}$ スピン偏極技術の現状

猪野 隆 (高エネルギー加速器研究機構・物質構造科学研究所)

偏極  $^3\text{He}$  ガスによる中性子スピフィルターは、ここ 10 年程度の間には様々な技術開発や改良が進み、これを利用した研究がようやく軌道に乗り出した状況といえる。 $^3\text{He}$  の核偏極は、主として SEOP(spin-exchange optical pumping)法あるいは MEOP(meta-stability optical pumping)法により得られる。SEOP 法では、レーザー偏極(偏光)→ルビジウム原子偏極→ $^3\text{He}$  核偏極で、MEOP 法では、レーザー偏極(偏光)→準励起 He 原子偏極→ $^3\text{He}$  核偏極のプロセスで  $^3\text{He}$  核のスピ偏極が実現される。SEOP 法では偏極に時間がかかり、MEOP 法では低圧でしか  $^3\text{He}$  ガスを偏極できないなど、各々一長一短があり、NIST では SEOP 法、ILL では主として MEOP 法による利用が進んでいる。KEK/JAEA/J-PARC では、東北大学金研とのコラボレーションで SEOP 法による  $^3\text{He}$  偏極技術開発が進められている。現在の SEOP 技術では、 $^3\text{He}$  偏極を保持する磁場の一様性が充分高ければ偏極緩和の時定数が数百時間にも及ぶため、偏極した  $^3\text{He}$  ガスの長距離移動も比較的容易に行える。実際、KEK で  $^3\text{He}$  ガスを偏極し、偏極を保持するためこれをソレノイド磁石内に納めた状態で自動車により 80 km 離れた JRR-3 や J-PARC まで輸送し、中性子実験に供することができる。このように、ビームラインでない場所で  $^3\text{He}$  を偏極し、偏極  $^3\text{He}$  ガスのみをビームラインへ移して実験に供するオフビーム偏極では、 $^3\text{He}$  偏極率が時間と共に減少する不便はあるものの装置自体が簡便になるというメリットがある。一方、 $^3\text{He}$  偏極装置をビームラインに設置するオンビーム偏極(in situ 偏極)の場合、レーザー光学系や温度制御系に加えオプションとして NMR 装置などを用意する必要がありシステムが複雑になるものの、一定の偏極率を長時間保つことが可能である。 $^3\text{He}$  偏極装置は、中性子偏極磁気ミラーと違って、システムが複雑なため簡便に利用できるものではないが、高いエネルギー領域まで中性子を偏極することが可能で、また広い角度領域をおおうこともできるメリットは大きい。この装置を上手に使えば、中性子散乱研究で新たな可能性を開くことができるに違いない。

# 客員教授を経験して

奈良女子大学理学部 梶原 孝志

2011 年度の後期に山室准教授のホストで客員教授を経験しました。私の専門は合成に主軸をおいた錯体化学で、金属イオンの電子状態を配位構造の設計により制御し、特異な磁気物性の発現を目指すものです。日本において金属錯体を研究対象とする研究者の人口は海外に比べて格段に多く、錯体化学会が主催する討論会が 1000 人を超える規模で毎年開催されているほどです。その中でも物性、特に分子磁石を指向した磁気物性の研究が非常にディープに展開されています。私が研究対象としているのもそのような分子磁性体であり、特に希土類を基盤とした単分子磁石と呼ばれる錯体について合成法の確立、磁気特性の解明を目指した研究を行って来ました。そのような中、山室准教授、古府博士のお二人と共同研究をする縁があり、物性研の客員教授のお声をかけていただいた次第です。

単分子磁石とは、その名のとおりに、分子レベルで磁石として振る舞う化合物を言います。磁石といってもその  $T_c$  は極めて低く、液体ヘリウム温度でも数ミリ秒の間磁化を保持することができる程度の化合物で、超常磁性的な振る舞いをする分子といったほうが理解しやすいかもしれません。単分子磁石において磁化反転の遅延を引き起こすポテンシャル障壁は数十～数百 K 程度の大きさで、主に熱的な要因により磁化が反転し、その反転過程はアレニウス式に従うことが知られています。90 年代の後半に混合原子価を持つ  $Mn_{12}$  核錯体で遅い磁化緩和が観測されて以来、分子磁性の研究領域において最も活発な議論がかわされてきた化合物群でした。2005 年に希土類金属であるテルビウム(III)イオンを含む四核錯体が単分子磁石として振る舞うことが報告され、それ以降は希土類金属イオンを含む錯体に研究の中心がシフトしました。磁化反転を妨げるポテンシャル障壁の構築に必要な因子として、高いスピン多重度に基づく大きな磁化と容易軸型の磁気異方性の 2 つの共存が挙げられます。容易軸型の磁気異方性が強くなり、磁化ベクトルが大きくなるほど磁化ベクトルの反転を妨げるポテンシャル障壁も高くなり、単分子磁石の特性が強化されます。バルク磁石ではスピンキャリア間の磁氣的相互作用が磁化反転を凍結させる要因となりますが、単分子磁石においては、分子内に形成されたエネルギー障壁がまさしくその役割をはたしています。希土類元素では軌道角運動量がクエンチされずには残っているため、ジスプロシウム(III)イオン一個でも総角運動量は  $J = 15/2$  と大きいこと、軌道角運動量をとおして配位子場の異方性の影響を強く受け、大きな磁気異方性を発現することが希土類金属の特徴です。このような利点から、希土類を基盤とする単分子磁石構築を指向した研究が盛んに展開されるようになり、私もそういった点に着目し、合成化学の視点から錯体の設計を行っています。

2009 年ころより山室准教授、古府博士と共同研究が始まりました。当時、幾つかの錯体において配位構造と磁気異方性の相関を確認していたのですが、その磁気異方性を分光学的な方法で直接観測できないかを模索していました。そうしたところ、大阪大学大学院工学研究科の中野元裕准教授のご紹介で山室准教授とお話をする機会を得ました。異方的な配位子場中において希土類の基底状態は  $J_z$  を量子数とする副準位に分裂し、その分裂の形態により容易軸型から容易面型までの様々な磁気異方性が発現します。そのような磁気微細構造を直接観測する手法として、中性子の非弾性散乱法をご提案いただきました。私には全く馴染みのない手法であるとともに、サンプル調製にかなりの困難を伴うことから初めは躊躇していたのですが、希土類系単分子磁石において初めての試みであり、磁気微細構造を直接的に観測できるという魅力も手伝って、合成に関する 1 年間の検討期間を経て、正式に共同研究を開始することとなりました。

中性子散乱により磁気微細構造を観測するためには、サンプル中の軽水素を重水素に置換する必要があります。私のサンプルは化学式で書くと  $[TbCu(C_8H_7O_3)_2(NO_3)_3(C_3H_6O)]$  というふうに多数の水素原子を含みます。不慣れな有機合成の試行錯誤を繰り返し、重水素化したサンプル  $[TbCu(C_8D_7O_3)_2(NO_3)_3(C_3D_6O)]$  数グラムの合成に成功した時は、山室准教授、古府博士には大変喜んでいただきました。2010 年、物性研の AGNES、J-PARC の AMATERAS による予備測定を終え、2011 年度には本格的な測定に入ろうと計画していた矢先におきたのが、あの 3 月 11 日の東日本大震災です。実はその翌日、合成を担当してくれた学生とともに柏キャンパスや AMTERAS を見学しに伺う予定でした。物性研、J-PARC

ともに大きな被害を受け、関東以北の交通、通信網がずたずたになっており、山室准教授はじめ皆さんの安否が確認されるまでずいぶん気をもむことになりました。幸い人的な被害はなかったとのことですが、国内における中性子実験がストップしてしまったことはご存知のとおりです。ある意味、大変な時期に物性研の客員を経験することになりました。

昨年一年間は国内での中性子散乱実験はかないませんでした。古府博士のご尽力で、ミュンヘン工科大学の FRM II で一週間弱の期間、中性子散乱の測定をする機会をもてました。また、半年の間に講演会や物性測定で何度か柏キャンパスに滞在し、他の研究者の皆さんとお話をする重要な機会ももてました。私達化学者は物質合成についてのノウハウはあるものの、その物性の本質をきちんと見ていないのではないか、あるいは見ることにあまり貪欲では無いのではないか、と思うことがあります。理由として、物性測定について保守的な面が強く、新たな測定手段に対し及び腰になることがあるからです。私にとって幸いだったのは山室准教授、古府博士ともに化学者側のそのような側面に理解を持たれているということで、お二人との議論に高い敷居を感じることはありませんでした。そのおかげで有意義な議論へスムーズに取り組むことができました。合成化学、物理化学、物性物理という背景の異なる研究者が分業と連携を行ったのですが、物質開発の視点からもチームとして研究を進めていくことの重要性を改めて考えさせられました。半年という期間はすぐに過ぎてしまいましたが、今回の経験を一つの足がかりとして、今後も物性研の皆様とは幅広い共同研究を展開していきたいと願っています。

# 平成 23 年度客員所員を経験して

## 「超強磁場発生における極限エネルギー密度工学」

長岡技術科学大学 極限エネルギー密度工学研究センター 江 偉華

平成 23 年度後期に、嶽山先生にホストとなって頂き、客員所員として物性研を訪問滞在させて頂きました。私は、これまでに物性研との接点がほとんどなかったのですが、このたび国際超強磁場科学研究施設で推進されている最先端研究基盤事業“次世代パルス最強磁場発生装置の整備”に参加し、微力ながら自分の専門分野パルスパワー工学の側面から当該研究プロジェクトに貢献できたことを心から嬉しく思っています。また、物性研での滞在を通じて、広範囲の研究協力および学術交流を推進し、本学における教育研究活動に対しても非常に有益な結果となりました。この機会を借りまして、嶽山先生をはじめ、お世話になった物性研の皆様にお礼申し上げます。

私は長岡技術科学大学において約 25 年にわたってパルスパワー技術の開発と応用に関する研究に携わってきました。高電圧と大電流を特徴とするパルスパワー工学は、20 世紀 50 年代以後主に核融合研究と軍事関連技術開発の推進を受けて急速に発展し、90 年代から材料、環境、生物などの分野にも応用を広げています。そこで、パルス大電流を限界まで駆使する超強磁場発生研究にも、パルスパワー技術のノウハウが重要な役割を果たしています。

物性研の国際超強磁場科学研究施設では、世界最高レベルの強磁場発生と応用研究を行っています。既に 700 テスラの磁場発生に成功し、現在 1000 テスラ磁場発生を目指す計画が進められています。今回の客員所員としての研究テーマは、数値シミュレーションモデルに基づいた磁場コイルのインピーダンス特性およびそれとパルスパワー電源との整合性というもので、電源側から見た負荷インピーダンス挙動に重点を置いています。目標は、密接にリンクしている回路の電気パラメーターとコイルの物理挙動を統一のモデルを用いて解析し、両者の相互作用をリアルタイムで処理することによって磁場コイルの爆縮過程を高精度で再現することです。更にこのモデルを用いて、開発中の新規整備超強磁場システムを用いた場合の到達領域を予測し、電源システムの耐圧限界およびコイルのインダクタンス許容範囲について検討する計画です。

関連する共同研究がスタートしたのは平成 22 年秋頃でした。同年度後期共同利用プロジェクトとして、「1000 テスラ超強磁場発生プロセスの数値解析」と題する研究テーマで外来研究員として物性研を訪問し、電源仕様に関する打ち合わせおよび本研究の準備作業を行っていました。

超強磁場の発生は、パルス大電流の電磁力で加速されたライナー爆縮(電磁濃縮)によって実現されます。世界最高レベルへの挑戦に伴い、巨大実験システムの各コンポーネントは、ぎりぎりまでの過酷条件において最大限の性能を取り出せるように設計されています。このため、実験システムの内部パラメーターに対する正確な見積りは極めて重要な意味を持ち、実験結果の再現性だけでなく、実験装置の安定性と信頼性にも直接関わっています。これまでに、ライナーの挙動について 2 次元数値シミュレーションモデルを用いた詳細な解析を行ってきましたが、その結果を電気回路へのフィードバックが充分行われておらず、特に接続部の寄生インダクタンスと接触抵抗の影響を正確に考慮されていなかった結果、モデルで得られた回路の電氣的挙動は実測値との間に一定のギャップがありました。

これを踏まえて今回の研究着目点は、回路の電氣的特性とライナーの物理的特性を包括して取り扱うセルフコンシステントなモデルの作成でした。ライナーの動きについて比較的簡易な一次元モデルで扱いますが、蓄積コンデンサーからライナーまで一連の回路コンポーネント間のエネルギー転送過程とマッチング状況を明確かつ詳細に取り入れ、特に目に見えない寄生パラメーターの定量評価に力を入れました。そこで重要なのは、計算で得られた回路電気パラメーターを実験で得られた測定結果と比較し、モデルの改善を重ねることでした。任期中の物性研訪問は、基本的に計算結果の検証および新たな実験データによるモデルの最適化作業のためでした。

この作業に直接参加した本学側のメンバーは私と修士課程学生 1 名でした。結果として、統一モデルを用いることによりシステムの電氣的挙動についてより深く理解することができたと同時に、寄生回路パラメーターの定量評価を更に詳しく行う必要性についても一層認識しました。特に MA 級の大電流における接続部の接触抵抗の評価方法は興味深い問題と思われます。関連成果を第 18 回国際パルスパワーコンファレンスにおいて口頭発表しました。

六ヶ月の任期はあっという間のような感じでした。物性研の立派な高層研究棟、快適で安価な宿泊施設および便利な学食は印象的でした。これからも本研究の延長となる共同研究を継続し、物性研との関係を今後の教育研究活動に生かすように期待しています。引き続きご支援とご指導を宜しくお願い致します。

# 物性研究所セミナー

標題：理論セミナー：Quantum Monte Carlo insights into many-body correlations: pairing wave functions, fermion node optimizations and topologies

日時：2012年6月29日(金) 午後4時～午後5時

場所：物性研究所本館6階 第5セミナー室 (A615)

講師：Prof. Lubos Mitas

所属：North Carolina State University

要旨：

Quantum Monte Carlo (QMC) holds an important place in computational methodologies for quantum systems. In particular, QMC provides new and unique insights into the many-body effects represented by a number of recognized results such as high-accuracy correlation energies for homogeneous electron gas, the first many-body estimation of total energy of unitary (ultracold) fermions, estimations of gaps or equations of state of transition metal systems from many-body wave functions, etc. For fermions the remarkable accuracy of QMC is limited by the so-called fixed-node approximation that is used to avoid the fermion sign problem. We will illustrate the node behavior and impact on the accuracy using recent applications to systems such as transition metal oxides. In order to overcome this limitation, the knowledge of fermion nodes (zero locus) of many-body wave functions is therefore of paramount importance and, at the same time, of notorious difficulty. For a long time, the basic properties of nodes such as nodal domain topologies, nodal shapes, relationships to the types of wavefunctions, etc, have been unknown even for noninteracting systems. Recently, we have proved that fermionic ground states of noninteracting and mean-field interaction models in  $d > 1$  have minimal number of two nodal domains for any system size. For systems with interactions we have shown that wavefunctions based on pair orbitals have the necessary variational freedom to describe the correct nodal topologies. To this end, we have proposed and tested pfaffian wavefunctions with both singlet and triplet pairing orbitals as an elegant and easy to evaluate form which captures the correct topological properties. Very recently, we have introduced the so-called nodal domain averages as another probe of nodal properties that enables to better characterize the nodes, eg, show equivalency of nodes for two different states. We have also found that the nodal surface possesses a particular type of holography, ie, one can estimate the total energy of any state solely from the knowledge of certain properties of the wave function at the node and from the knowledge of the node itself.

標題：中性子セミナー：Disorder and localization in quantum magnets

日時：2012年7月20日(金) 午後3時～午後4時

場所：物性研究所本館6階 第5セミナー室 (A615)

講師：Andrey Zheludev

所属：Laboratory for Solid State Physics, ETH Zurich, Switzerland.

要旨：

Disorder is relevant in one and two dimensions, where no quantum transport can occur due to localization. Even at higher dimensions (up to  $d=6!$ ), disorder is relevant at phase transitions. Consequently, disorder should have a profound effect on the ground states and excitation spectra of low-dimensional quantum spin systems, and on quantum phase transitions in spin liquids. An experimental investigation of these disorder-related phenomena

presents a formidable challenge, and correct interpretation of the data is often a delicate issue. More or less convincing hints of the so-called Bose Glass and Random Singlet states have begun to emerge, but controversy abounds. It is clear that neither bulk method, nor neutron scattering or local-probe techniques are alone sufficient to tackle the problem. As I will try to illustrate, a more systematic approach that combines various experimental methods is more promising.

**標題：理論インフォーマルセミナー：Detection of Symmetry Protected Topological Phases in 1D**

**日時：2012年7月23日(月) 午前11時～午後0時**

**場所：東京大学 柏図書館コンファレンスルーム**

**講師：Dr. Frank Pollmann**

**所属：Max-Planck-Institute for the Physics of Complex Systems**

**要旨：**

A topological phase is a phase of matter which cannot be characterized by a local order parameter. It has been shown that gapped, symmetric phases in 1D systems can be completely characterized using tools related to projective representations of the symmetry groups. An example of a symmetry protected topological phase is the Haldane phase found in  $S = 1$  chains. First, we give a numerical approach of how to directly extract the projective representations from a matrix-product state representation. Second, we derive non-local order parameters for inversion, and time reversal symmetry and discuss a generalized string-order for internal symmetries. We furthermore point out that non-local order parameters for these "topological phases" are actually related to topological surfaces.

**標題：理論セミナー：Hydrodynamic synchronization and collective dynamics of flagella and cilia:  
a minimalist's view**

**日時：2012年7月23日(月) 午後4時～午後5時**

**場所：物性研究所本館6階 第5セミナー室 (A615)**

**講師：内田 就也**

**所属：東北大学理学研究科**

**要旨：**

Unicellular organisms such as *E. Coli* and *Paramecium* swim in viscous environment using actively rotating filaments called flagella or cilia.

Their coordinated motion, known as flagella bundling and ciliary metachronal waves, are important for achieving efficient propulsion.

The roles of long-range hydrodynamic interaction in their synchronized motion are recently attracting increasing attention.

In this talk, we present minimal models of hydrodynamic synchronization consisting of self-driven rigid-body rotors.

They exhibit rich collective behaviors such as orientational ordering, spiral waves, traveling waves, frustrated disorder, and order-disorder transition. We discuss them from the general perspectives of non-equilibrium phase transitions and non-linear coupled oscillators.



**標題：**シリーズセミナー 極限コヒーレント光科学 13 回目 「生細胞を染めずに見る ～ コヒーレント・ラマン分光によるマルチカラー・イメージング～」

**日時：**2012年7月23日(月) 午後1時～

**場所：**物性研究所本館6階 大講義室 (A632)

**講師：**加納 英明

**所属：**筑波大学 数理物質科学研究科

**要旨：**

コヒーレント・アンチストークス・ラマン散乱(CARS)は、微弱なラマン散乱光を増幅し、生細胞内の分子分布やそのダイナミクスを、非染色・非侵襲・非破壊で高速に可視化することのできる、非常に強力な方法である。本発表では、スペクトルとイメージを取得することのできる、CARSを基盤とした新しい非線形ラマン分光イメージング法について、その特徴と応用例などを紹介する。

**標題：**理論セミナー：量子 i.i.d. 状態の仮説検定問題における数値計算

**日時：**2012年7月27日(金) 午後4時～午後5時

**場所：**物性研究所本館6階 第5セミナー室 (A615)

**講師：**坂下 達哉

**所属：**物性研究所 計算物質科学研究センター 神戸分室

**要旨：**

量子情報理論において、量子 i.i.d.状態( $n$  次のテンソル積で表現される状態)に関する極限式が重要である。本研究では、 $2 \times 2$  の密度行列から成る量子 i.i.d.状態の仮説検定における誤り確率を数値的に計算する問題を扱う。この計算には、 $2^n \times 2^n$  という非常に大きなサイズの行列の固有値問題が現れるが、数学の表現論で知られる「テンソル積の既約分解」を用いることによって、最大サイズ $(n+1) \times (n+1)$ までのいくつかの行列の固有値問題を解くことに帰着できる。

本研究ではこの方法を用い、多倍長化、MPI による並列化を施すことによって効率的な実装を実現した。その結果、スーパーコンピュータを用いて  $n=1200$  程度までの誤り確率の計算が可能となった。また、上記の計算手法を新種の量子中心極限定理という数学的予想の検証に応用した。

**標題：**国際超強磁場科学研究施設セミナー：GaAsN における支配的な電子散乱機構に関する研究

**日時：**2012年8月7日(火) 午後2時～午後3時

**場所：**物性研究所C棟セミナー室 (C-124)

**講師：**稲垣 充

**所属：**豊田工業大学大学院 半導体研究室

**要旨：**

InGaAsN は光電変換効率が 50%を超える 4 接合太陽電池の新材料として期待されている。N を III-V 族化合物半導体に添加することによって、格子定数とともにバンドギャップエネルギー( $E_g$ )の減少が可能となる。しかし、N 添加は、電子移動度の大きな減少を引き起こし、これが GaAsN の太陽電池特性を劣化させている要因の一つである。この低い電子移動度の起源として、合金散乱・窒素の不均一分布に起因するポテンシャルゆらぎなどが起源として考えられている。しかし、GaAsN の良質な結晶は、大きなミッシェリティギャップのため得ることが難しく、これが GaAsN の電子移動度の理解を妨げていると考えられる。我々は、これまで化学ビームエピタキシー法(CBE)を用いて、長い少数キャリア寿命を高い電子移動度を有する高い結晶性を有する GaAsN の成長に成功してきた。

本研究では、CBE によって作製した n-GaAsN 中の支配的な電子散乱機構および、低い電子移動度の起源について考察を行った。フォトルミネッセンス(PL)を用いて、バンド間遷移に対応する発光の半値幅を調べた。この半値幅が N 組成

に依存しなかったことから、バンド端のポテンシャルのゆらぎは、この試料群に関しては電子移動度の低減の起源ではないと考えられる。電子移動度の温度依存性の解析により、室温における支配的な電子散乱機構は、N 濃度増加に伴い、極性フォノン散乱から合金散乱への変化した。GaAsN の最も支持されているバンドモデルではなく、実験的に得られた電子有効質量を用いて、計算された上記の散乱機構によって決定される電子移動度は、実験値を極めてよく再現した。以上のことから、GaAsN の低い電子移動度は、合金散乱および極性フォノン散乱、大きな電子有効質量が主な起源であると考えられる。

本報告では、上に述べた流れに沿って、太陽電池に関する研究背景から今後の課題までをお話しさせて頂く予定です。

豊田工大 ○稲垣 充、池田 和磨、幸脇 広幸、小島 信晃、大下 祥雄、山口 真史

## 浜根大輔技術職員(電子顕微鏡室)、第9回日本鉱物科学会研究奨励賞を受賞

浜根大輔技術職員(物質設計評価施設／電子顕微鏡室)が第9回日本鉱物科学会研究奨励賞を受賞することになりました。本賞は鉱物科学および関連分野において顕著な業績を挙げた若手会員に贈呈されるものです。浜根氏は透過型電子顕微鏡・放射光 X 線回折などを研究に応用し、「巨大惑星深部の鉱物構成」、「Missing Xenon 問題」、「新鉱物記載」という多様なテーマで顕著な業績を挙げ、これら一連の研究活動が高く評価されて今回の受賞となりました。同氏は透過型電子顕微鏡技術を基礎として材料科学・物性科学分野においても活発な共同研究を展開しており、今後もさらに新たな研究分野を開拓することが期待されます。

表彰式と受賞記念講演は本年9月20日、京都大学にて開催される鉱物科学会2012年総会において行われます。

## 平成 24 年度後期短期研究会一覧

研 究 会 名	開 催 期 日	参加人数 (旅費支給者)	提 案 者 [○は提案代表者]
第 3 回 極限コヒーレント光科学ワーク ショップ —新センターにおけるレーザーと放 射光の融合研究分野の策定—	24. 11. 28～24. 11. 30 ( 3 日間)	4 3 ( 2 7)	○末元 徹 (東京大学物性研究所) 辛 埴 (東京大学物性研究所) 小森 文夫 (東京大学物性研究所) 松田 巖 (東京大学物性研究所) 吉信 淳 (東京大学物性研究所) 尾嶋 正治 (東京大学工学研究科) 谷村 克己 (大阪大学産業科学研究所)
スパコン共同利用成果発表会	25. 1. 9～25. 1. 11 ( 3 日間)	4 5 ( 2 0)	○杉野 修 (東京大学物性研究所) 川島 直輝 (東京大学物性研究所) 野口 博司 (東京大学物性研究所) 藤堂 眞治 (東京大学物性研究所) 渡部 宙志 (東京大学物性研究所)

# 平成 24 年度後期外来研究員一覧

## 嘱託研究員

氏 名	所 属	研 究 題 目	関係所員
河 江 達 也	九州大学大学院工学研究院 准教授	$^3\text{He}$ - $^4\text{He}$ 希釈冷凍機を用いた走査トンネル顕微鏡の改良と極低温スピン偏極 STM の開発	長谷川
林 伸 彦	大阪府立大学学術研究院 特別講師	二次元超伝導の渦糸に関する理論研究	〃
山 田 豊 和	千葉大学大学院工学研究科 特任准教授	低温スピン偏極走査トンネル顕微鏡の開発	〃
坂 本 一 之	千葉大学大学院融合科学研究科 准教授	表面薄膜超伝導体の探索	〃
大 西 剛	物質・材料研究機構 MANA 研究者	極性結晶のイオン散乱分光	リップマー
河 江 達 也	九州大学大学院工学研究院 准教授	AgPdCu 合金圧力セルを用いた磁場中比熱測定	上 床
村 田 恵 三	大阪市立大学大学院理学研究科 教 授	有機伝導体の圧力効果	〃
高 橋 博 樹	日本大学文理学部 教 授	多重極限関連装置の調整	〃
藤 原 哲 也	山口大学大学院理工学研究科 助 教	Ce 化合物の単結晶試料評価とその圧力効果	〃
巨 海 玄 道	久留米工業大学 教 授	磁性体の圧力効果	〃
藤 原 直 樹	京都大学大学院人間・環境学研究科 准教授	圧力下 NMR 測定法に関する開発	〃
池 田 伸 一	産業技術総合研究所ナノエレクトロニクス研究部門 主任研究員	新しい 1 2 2 化合物の単結晶成長の試みと圧力効果	〃
片 野 進	埼玉大学大学院理工学研究科 教 授	中性子回折に用いる圧力装置の開発	〃
糸 井 充 穂	日本大学医学部 助 教	擬一次元有機物質の圧力下物性研究	〃
梅 原 出	横浜国立大学工学部 准教授	高圧下の比熱測定装置の開発	〃
松 本 武 彦	物質・材料研究機構 技術参事	NiCrAl を用いた圧力装置の開発	〃
名 嘉 節	物質・材料研究機構 主席研究員	磁化測定装置の開発	〃
鹿 又 武	東北学院大学 客員教授	3d 遷移金属化合物の圧力下における磁気特性	〃
磯 田 誠	香川大学教育学部 教 授	重い電子系物質における圧力下電気抵抗測定	〃
中 嶋 誠	千葉大学理学部 准教授	テラヘルツパルス電磁波によるスピン秩序の制御の研究	末 元
藤 森 淳	東京大学大学院理学系研究科 教 授	高温超伝導体の高分解能光電子分光	辛
石 坂 香 子	東京大学大学院工学系研究科 准教授	60-eV レーザーを用いた時間分解光電子分光の開発	〃
下志万 貴 博	東京大学大学院工学系研究科 助 教	鉄系超伝導体のレーザー光電子分光	〃
吉 田 鉄 平	東京大学大学院理学系研究科 助 教	鉄ニクタイトの高分解能光電子分光	〃

竹内恒博	名古屋大学エコトピア科学研究所 准教授	Bi系超伝導体の角度分解光電子分光	辛
木須孝幸	大阪大学大学院基礎工学研究科 准教授	光電子分光法を用いた各種分子性結晶の電子状態の研究及び装置の低温化	〃
横谷尚睦	岡山大学大学院自然科学研究科 教授	高分解能光電子分光による強相関物質の研究	〃
江口律子	岡山大学大学院自然科学研究科 助教	酸化バナジウムの高分解能光電子分光	〃
金井要	東京理科大学理工学部 准教授	有機化合物の光電子分光	〃
田村隆治	東京理科大学基礎工学部 講師	準結晶の高分解能光電子分光	〃
藤森伸一	日本原子力研究開発機構量子ビーム応用部門 研究副主幹	重い電子系ウラン化合物の高分解能光電子分光	〃
小野寛太	高エネルギー加速器研究機構物質構造科学研究所 准教授	レーザーPEEMによる磁性体の研究	〃
津田俊輔	物質・材料研究機構若手国際研究拠点 研究員	レーザー光電子分光による酸化物薄膜の研究	〃
松波雅治	自然科学研究機構分子科学研究所 助教	4f電子系物質の高分解能光電子分光	〃
中川剛志	自然科学研究機構分子科学研究所 助教	超高空間分解能光電子顕微鏡による磁区構造観察	〃
大川万里生	東京理科大学理学部 助教	Mn化合物の時間分解光電子分光	〃
関山明	大阪大学大学院基礎工学研究科 教授	時間分解光電子分光による重い電子系の研究	〃
藤原秀紀	大阪大学大学院基礎工学研究科 助教	高分解能光電子分光による酸化バナジウムの研究	〃
中村元彦	奈良教育大学理科教育講座 准教授	鉄シリコンの円2色性光電子分光の研究	〃
吉松公平	東京大学大学院理学系研究科 特別研究員	角度分解光電子分光法による遷移金属酸化物の表面/界面電子状態の研究	〃
秋本晃一	日本女子大学理学部 教授	X線回折法による表面近傍の半導体微小格子ひずみ解析に関する研究	高橋
近藤寛	慶應義塾大学理工学部 教授	高輝度放射光軟X線を用いた時間分解光電子分光による表面ダイナミクス研究	松田(巖)
雨宮健太	高エネルギー加速器研究機構物質構造科学研究所 教授	軟X線アンジュレータビームラインの分光光学系の開発研究	〃
伊藤健二	高エネルギー加速器研究機構物質構造科学研究所 教授	高輝度光源計画における直入射ビームラインおよびその利用計画の検討	〃
奥田太一	広島大学放射光科学研究センター 准教授	光電子スピン検出器の開発・研究	〃
木下豊彦	高輝度光科学研究センター 主席研究員	光電子顕微鏡による磁性ナノ構造物質の磁化過程	〃
小野寛太	高エネルギー加速器研究機構物質構造科学研究所 准教授	高輝度極紫外ビームラインの設計・評価	〃
木村真一	自然科学研究機構分子科学研究所 准教授	〃	〃
後藤俊治	高輝度光科学研究センター放射光研究所 ビームライン部門長	高輝度光源ビームラインにおける分光光学系の設計・開発	〃
大橋治彦	高輝度光科学研究センター放射光研究所 副主席研究員	〃	〃
組頭広志	高エネルギー加速器研究機構物質構造科学研究所 教授	高輝度軟X線を利用した強相関物質の電子状態研究	〃
小澤健一	東京工業大学大学院理工学研究科 助教	時間分解光電子分光法による光触媒材料のキャリアダイナミクス研究	〃
木村昭夫	広島大学大学院理学研究科 准教授	軟X線時間分解分光実験による磁性研究	〃
坂本一之	千葉大学大学院融合科学研究科 准教授	高輝度軟X線を利用する光電子顕微鏡装置の設計・開発	〃



大 門 寛	奈良先端科学技術大学院大学物質創成科学研究科 教 授	二次元表示型スピン分解光電子エネルギー分析器の開発	松 田 (巖)
朝 倉 大 輔	産業技術総合研究所エネルギー界面技術グループ 研究員	軟 X 線吸収/発光分光法によるリチウムイオン電池電 極材料の電子物性研究	原 田
関 場 大 一 郎	筑波大学数理物質系 講 師	超高分解能軟 X 線発光分光による水素吸蔵合金中の水 素の波動関数の局在性に関する研究	〃
古 坂 道 弘	北海道大学大学院工学研究院 教 授	小型集束型小角散乱装置の高性能化及びそれによる応 用研究	柴 山
金 子 純 一	北海道大学大学院工学研究院 准教授	中性子極小角散乱実験装置のアップグレード	〃
野 田 幸 男	東北大学多元物質科学研究所 教 授	中性子散乱装置 FONDER のアップグレード後の研究計 画の実施と共同利用の推進	〃
岩 佐 和 晃	東北大学大学院理学研究科 准教授	中性子散乱装置の共同利用・開発による強相関電子系物 質の構造物性の研究	〃
木 村 宏 之	東北大学多元物質科学研究所 准教授	中性子モノクロメータの改良と中性子 4 軸回折計 FONDER の制御プログラムの改良	〃
藤 田 全 基	東北大学金属材料研究所 准教授	中性子散乱装置のアップグレードと共同利用研究の推進	〃
大 山 研 司	東北大学金属材料研究所 准教授	中性子散乱装置のアップグレード後の研究計画の実施 と共同利用の推進	〃
平 賀 晴 弘	東北大学金属材料研究所 助 教	〃	〃
田 畑 吉 計	京都大学大学院工学研究科 准教授	〃	〃
松 村 武	広島大学大学院先端物質科学研究科 准教授	〃	〃
松 浦 直 人	東北大学金属材料研究所 助 教	J-PARC/MLF と JRR-3 共存時代に向けた 3 軸型中性子 散乱装置の高度化	〃
桑 原 慶太郎	茨城大学大学院理工学研究科 准教授	中性子分光器を用いた強相関電子系物質の微視的研究	〃
横 山 淳	茨城大学理学部 准教授	高度化した 3 軸分光器を用いた共同利用の推進と物質 科学研究の実施	〃
田 崎 誠 司	京都大学大学院工学研究科 准教授	冷中性子スピン干渉計の応用と MINE ビームラインの 整備	〃
中 野 実	富山大学大学院医学薬学研究部(薬学) 教 授	膜貫通ペプチドのフリップフロップ誘起能の評価	〃
杉 山 正 明	京都大学原子炉実験所 教 授	C1-3 ULS 極小角散乱装置 IRT	〃
日 野 正 裕	京都大学原子炉実験所 准教授	集光テスト用小型 SANS の開発及び冷中性子反射率 計・干渉計のアップグレード	〃
北 口 雅 暁	京都大学原子炉実験所 助 教	〃	〃
藤 原 哲 也	山口大学大学院理工学研究科 助 教	中性子散乱用高圧セルの開発および高圧下における中 性子散乱実験	〃
高 橋 良 彰	九州大学先端物質化学研究所 准教授	流動場でのソフトマターの構造変化に関する研究	〃
阿 曾 尚 文	琉球大学理学部 准教授	三軸分光器を用いた極端条件下における物質科学研究 の実施	〃
川 端 庸 平	首都大学東京大学院理工学研究科 助 教	非イオン界面活性剤水溶液におけるベシクル系の高分 子添加効果	〃
伊 藤 晋 一	高エネルギー加速器研究機構 教 授	中性子散乱研究計画の実施と共同利用の推進	〃
大 竹 淑 恵	理化学研究所仁科加速器センター 前任研究員	冷中性子干渉イメージング装置開発研究	〃
佐 藤 卓	東北大学多元物質科学研究所 教 授	高度化した三軸分光器を用いた共同利用の推進とスピ ンダイナミクスの研究	〃
南 部 雄 亮	東北大学多元物質科学研究所 助 教	高度化した三軸分光器を用いた強相関電子系物質の研究	〃
鳴 海 康 雄	東北大学金属材料研究所 准教授	強磁場量子ビーム科学のためのパルスマグネットの開発	金 道

一 般

氏 名	所 属	研 究 題 目	関係所員
佐々木 豊	京都大学低温物質科学研究センター 准教授	回転超流動ヘリウム3のテクスチャーダイナミクスの研究	榊 原
吉 澤 正 人	岩手大学大学院工学研究科 教 授	強相関伝導系のパルス磁場中の超音波測定	〃
中 西 良 樹	岩手大学大学院工学研究科 准教授	〃	〃
シャラムジャン スマイ	岩手大学大学院工学研究科 博士課程2年	〃	〃
坂 野 幸 平	岩手大学大学院工学研究科 修士課程2年	〃	〃
横 山 淳	茨城大学理学部 准教授	強相関電子系化合物の秩序相に対する結晶対称性および軌道縮退の効果	〃
石 川 沙 羅	茨城大学大学院理工学研究科 修士課程1年	〃	〃
青 木 悠 樹	東京工業大学大学院総合理工学研究科 助 教	固体ヘリウム4の非古典的回転慣性の遮断効果	〃
岩 佐 泉	神奈川大学理学部 非常勤講師	〃	〃
安 井 幸 夫	明治大学理工学部 准教授	磁気フラストレートした一次元量子スピンをもつ CuO <sub>2</sub> リボン鎖系の磁場相図	〃
町 田 一 成	岡山大学大学院自然科学研究科 特命教授(研究)	重い電子系超伝導体の対称性の決定	〃
山 口 明	兵庫県立大学大学院物質理学研究科 准教授	新しいスピンフィルターを用いた超流動ヘリウム3 スピン流制御の研究	〃
鎌 田 尚 史	兵庫県立大学大学院物質理学研究科 修士課程1年	〃	〃
高 津 浩	首都大学東京大学院理工学研究科 助 教	量子スピン液体 Tb <sub>2</sub> Ti <sub>2</sub> O <sub>7</sub> の磁化測定	〃
谷 口 智 洋	首都大学東京大学院理工学研究科 修士課程1年	〃	〃
吉 村 一 良	京都大学大学院理学研究科 教 授	一次元フラストレート磁性体におけるSDW相関とネマティック相関の異方性	瀧 川
那 波 和 宏	京都大学大学院理学研究科 博士課程3年	〃	〃
篠 崎 彩 子	東京大学大学院理学系研究科 特任研究員	高温高压下における石英の水素流体への溶解メカニズム	〃
那 波 和 宏	京都大学大学院理学研究科 博士課程3年	純良化試料を用いた擬二次元磁性体 Sr <sub>2</sub> VO <sub>4</sub> の磁気低温相の解明	〃
鳥 塚 潔	法政大学理工学部 非常勤講師	有機薄膜の低温物性測定	田 島
松 田 真 生	熊本大学大学院自然科学研究科 准教授	有機薄膜素子の物性研究	〃
清 島 啓 太	熊本大学大学院自然科学研究科 修士課程2年	〃	〃
山 下 靖 文	日本大学工学部総合教育 助 教	1/4 フィールド・チェッカーボードハバードモデルの基底状態相図	上 田 (和)
伊 高 健 治	弘前大学北日本新エネルギー研究所 准教授	太陽電池応用を目指したエネルギー材料の研究	リップマー
松 本 祐 司	東京工業大学応用セラミックス研究所 准教授	パルスレーザー堆積法による多成分系ナノ相分離酸化物薄膜の構造と物性	〃
神 戸 士 郎	山形大学大学院理工学研究科 教 授	Pb置換Bi <sub>2</sub> 201相超伝導体のCu価数とホール濃度の精密測定	家
エムデイザキール ホサイン	群馬大学先端科学研究指導者育成ユニット 助 教	グラフィン表面の化学修飾	吉 信
成 島 哲 也	自然科学研究機構分子科学研究所 助 教	機械的応力のシリコン表面化学への影響に関する研究	〃

渡辺量朗	東京理科大学大学院総合化学研究科 准教授	表面プラズモンを支持する金属単結晶表面の作成と解析(2)	吉信
長井健太	東京理科大学大学院総合化学研究科 修士課程1年	〃	〃
金沢育三	東京学芸大学自然科学系 教授	Al系準結晶及び近似結晶中の構造欠陥の陽電子ビーム法による分析	小森
齋藤誠	東京学芸大学大学院教育学研究科 修士課程2年	〃	〃
栃原浩	九州大学大学院総合理工学研究院 学術研究員	Mo及びSiC上のエピタキシャル酸化シリコン超薄膜の作製とSTM/STS観察	〃
金沢育三	東京学芸大学自然科学系 教授	キャリアドープボロンクラスター物質の作製と陽電子ビーム法による分析する。	〃
山田浩平	東京学芸大学大学院教育学研究科 修士課程2年	〃	〃
河村紀一	日本放送協会放送技術研究所 主任研究員	金属/半導体表面上ナノ構造の形成とその非線形発光の時間分解測定	〃
大野真也	横浜国立大学大学院工学研究院 特別研究教員	磁性金属シリサイドの光電子分光	〃
中辻寛	東京工業大学大学院総合理工学研究科 准教授	半導体基板上に成長したグラフェンおよびシリシンの電子物性	〃
高村由起子	北陸先端科学技術大学院大学マテリアルサイエンス研究科 准教授	エピタキシャルシリセンの低温走査トンネル顕微鏡観察	長谷川
ライナーフリードライン	北陸先端科学技術大学院大学マテリアルサイエンス研究科 准教授	〃	〃
アントワヌフロランス	北陸先端科学技術大学院大学マテリアルサイエンス研究科 助教	〃	〃
繁岡透	山口大学大学院理工学研究科 教授	(Ho,Gd)Rh <sub>2</sub> Si <sub>2</sub> 単結晶の磁気転移	上床
大河原遊	山口大学大学院理工学研究科 修士課程2年	〃	〃
松村武	広島大学大学院先端物質科学研究科 准教授	CeTeにおける圧力誘起四極子秩序と近藤効果	〃
林佑弥	広島大学大学院先端物質科学研究科 修士課程1年	〃	〃
高津浩	首都大学東京大学院理工学研究科 助教	Dy <sub>2</sub> Ti <sub>2</sub> O <sub>7</sub> のスピンダイナミクスと磁気モノポール	〃
後藤和基	首都大学東京大学院理工学研究科 修士課程2年	〃	〃
藤原哲也	山口大学大学院理工学研究科 助教	EuRu <sub>2</sub> P <sub>2</sub> の高圧力下磁化測定	〃
蔵田裕也	山口大学大学院理工学研究科 修士課程1年	〃	〃
藤原哲也	山口大学大学院理工学研究科 助教	HoRh <sub>2</sub> Si <sub>2</sub> の単結晶育成	〃
長谷川貴大	山口大学大学院理工学研究科 修士課程2年	〃	〃
小山佳一	鹿児島大学大学院理工学研究科 教授	Mn <sub>2-x</sub> Co <sub>x</sub> Sbの高圧下磁気緩和	〃
折橋広樹	鹿児島大学大学院理工学研究科 修士課程2年	〃	〃
阿曾尚文	琉球大学理学部 准教授	セリウム系磁性超伝導体における微小磁気モーメントの圧力下磁化測定II	〃
田中秀和	琉球大学大学院理工学研究科 修士課程1年	〃	〃
伊藤昌和	鹿児島大学大学院理工学研究科 准教授	ホイスラー化合物Fe <sub>2</sub> MnSiの圧力下電気抵抗率	〃
杉山清寛	大阪大学大学院理学研究科 准教授	圧力下での磁気および価数ゆらぎが生み出すEu化合物の新しい電子状態の探索	〃
大貫惇睦	琉球大学理学部 客員教授	〃	〃

本多史憲	大阪大学大学院基礎工学研究科 特任准教授	圧力下での磁気および価数ゆらぎが生み出す Eu 化合物 の新しい電子状態の探索	上床
広瀬雄介	大阪大学大学院理学研究科 博士課程3年	〃	〃
森晶宣	大阪大学大学院理学研究科 修士課程2年	〃	〃
本山岳	兵庫県立大学大学院物質理学研究科 助教	圧力下磁場中点接合分光実験の試み	〃
太刀掛勇哉	兵庫県立大学大学院物質理学研究科 修士課程1年	〃	〃
光田暁弘	九州大学大学院理学研究院 准教授	価数転移及び価数秩序を示す Eu 化合物の高圧下物性	〃
眞鍋栄樹	九州大学大学院理学府 修士課程2年	〃	〃
仲間隆男	琉球大学理学部 教授	価数揺動物質の高圧力中輸送特性の研究	〃
仲村愛	琉球大学大学院理工学研究科 博士課程1年	〃	〃
平仲裕一	琉球大学大学院理工学研究科 修士課程1年	〃	〃
中野智仁	新潟大学工学部 助教	希土類化合物における低温物性の圧力効果	〃
武田大地	新潟大学大学院自然科学研究科 修士課程1年	〃	〃
仲間隆男	琉球大学理学部 教授	希土類金属間化合物の高圧下における磁性と輸送特性	〃
内間清晴	沖縄キリスト教短期大学総合教育系 教授	〃	〃
照屋淳志	琉球大学大学院理工学研究科 修士課程2年	〃	〃
杉山清寛	大阪大学大学院理学研究科 准教授	強磁性 Ce 化合物の高圧下における量子臨界点の探索	〃
大貫惇睦	琉球大学理学部 客員教授	〃	〃
本多史憲	大阪大学大学院基礎工学研究科 特任准教授	〃	〃
広瀬雄介	大阪大学大学院理学研究科 博士課程3年	〃	〃
石田一裕	大阪大学大学院理学研究科 修士課程2年	〃	〃
村山茂幸	室蘭工業大学大学院工学研究科 教授	強相関型セリウム化合物および合金の量子相転移と磁性	〃
雨海有佑	室蘭工業大学大学院工学研究科 助教	〃	〃
森岡敦	室蘭工業大学大学院工学研究科 修士課程2年	〃	〃
小山佳一	鹿児島大学大学院理工学研究科 教授	狭バンドギャップ半導体 FeSb <sub>2</sub> の高圧下精密磁化測定	〃
出口拓也	鹿児島大学大学院理工学研究科 修士課程1年	〃	〃
阿曾尚文	琉球大学理学部 准教授	空間反転対称性のない CeTSi <sub>3</sub> (T=Rh, Ir) の圧力下電気抵抗 II	〃
高江洲義尚	沖縄キリスト教短期大学 非常勤講師	〃	〃
田中秀和	琉球大学大学院理工学研究科 修士課程1年	〃	〃
白濱圭也	慶應義塾大学理工学部 教授	固体ヘリウムの超流動的挙動に対する回転効果	〃
高橋大輔	足利工業大学共通課程 講師	〃	〃

立木智也	慶應義塾大学大学院理工学研究科 修士課程1年	固体ヘリウムの超流動的挙動に対する回転効果	上床
藤原哲也	山口大学大学院理工学研究科 助教	磁化測定用対抗アンビル型高圧力発生装置の開発	〃
長谷川貴大	山口大学大学院理工学研究科 修士課程2年	〃	〃
関根ちひろ	室蘭工業大学大学院工学研究科 准教授	充填スクッテルダイト化合物 $\text{LaFe}_4\text{P}_{12}$ における超伝導の圧力効果	〃
川村幸裕	室蘭工業大学大学院工学研究科 博士研究員	〃	〃
川合拓馬	室蘭工業大学大学院工学研究科 修士課程1年	〃	〃
河江達也	九州大学大学院工学研究院 准教授	重い電子系物質における $^3\text{He}$ 温度領域での磁化測定	〃
佐藤由昌	九州大学大学院工学府 博士課程1年	〃	〃
中野智仁	新潟大学工学部 助教	新規希土類化合物の作成と圧力下物性	〃
青山悠司	新潟大学大学院自然科学研究科 修士課程1年	〃	〃
谷口弘三	埼玉大学大学院理工学研究科 准教授	層状有機物質 $(\text{BPDT-TTF})_2\text{I}_3$ の超高压下新電子相探索	〃
新川貴晃	埼玉大学大学院理工学研究科 修士課程2年	〃	〃
三浦康弘	桐蔭横浜大学大学院工学研究科 准教授	導電性ラングミュア・プロジェクト膜の高圧下の電気的性質に関する研究	〃
石川修六	大阪市立大学大学院理学研究科 教授	超流動ヘリウム3-A相の新奇渦状態の探索	〃
國松貴之	大阪市立大学大学院理学研究科 博士研究員	〃	〃
片野進	埼玉大学大学院理工学研究科 教授	空間反転対称を持たない炭化物 $\text{CeNiC}_2$ の圧力下での磁気秩序の安定性	〃
安藤正海	東京理科大学総合研究機構 教授	角度分析板厚と空間解像度に関する理論・実験研究	高橋
窪谷茂幸	東京大学大学院新領域創成科学研究科 助教	高N濃度(In)GaAsN系混晶薄膜の構造解析(4)	〃
武田さくら	奈良先端科学技術大学院大学物質創成科学研究科 助教	歪み半導体の表面近傍の歪み量の精密測定	〃
矢口裕之	埼玉大学大学院理工学研究科 教授	窒素デルタドーブ GaAs 中の等電子トラップからの発光の光子相関測定	秋山
高宮健吾	埼玉大学大学院理工学研究科 博士課程2年	〃	〃
吉田直史	埼玉大学大学院理工学研究科 修士課程2年	〃	〃
丹羽健	名古屋大学大学院工学研究科 助教	新規遷移金属炭化物の高圧合成と物性評価	上田(寛)
廣戸孝信	東京理科大学大学院基礎工学研究科 博士課程1年	正20面体準結晶およびその近似結晶の磁性	〃
山口周	東京大学大学院工学系研究科 教授	超高压プレスを用いた新規プロトニクス酸化物のソフト化学的合成法の検討	〃
三好正悟	東京大学大学院工学系研究科 助教	〃	〃
田中和彦	東京大学大学院工学系研究科 技術職員	〃	〃
ドロクサリブ ティンプル	東京大学大学院工学系研究科 博士課程3年	〃	〃
関根ちひろ	室蘭工業大学大学院工学研究科 准教授	超伝導を示す As 系充填スクッテルダイト化合物の探索	〃
川田友和	室蘭工業大学大学院工学研究科 修士課程2年	〃	〃

山口 周	東京大学大学院工学系研究科 教授	溶融亜鉛メッキ合金相の応力誘起変態	上田 (寛)
三好 正悟	東京大学大学院工学系研究科 助教	”	”
田中 和彦	東京大学大学院工学系研究科 技術職員	”	”
小林 洋治	京都大学大学院工学研究科 助教	イオン交換性層状酸化物を基にしたアモルファス酸化物の合成とキャラクタリゼーション	”
スボード ガネサン ポッティ	京都大学大学院工学研究科 博士研究員	”	”
浅井 啓	京都大学大学院工学研究科 修士課程 1年	”	”
平賀 晴弘	東北大学金属材料研究所 助教	高品質単結晶中性子モノクロメータの開発	益田
真中 浩貴	鹿児島大学大学院理工学研究科 助教	三角スピントラップのスピンドイナミクス	”
阿曾 尚文	琉球大学理学部 准教授	中性子散乱研究用大型単結晶試料の結晶性評価	”
横尾 哲也	高エネルギー加速器研究機構物質構造科学研究所 講師	電荷注入された低次元量子スピン系の結晶育成とその評価	”
松浦 直人	東北大学金属材料研究所 助教	遍歴反強磁性体 $\text{Ni}(\text{SSe})_2$ における磁気励起スペクトラムの研究	”
門脇 広明	首都大学東京大学院理工学研究科 准教授	$\text{Tb}_2(\text{Sn}_{1-x}\text{Ti}_x)_2\text{O}_7$ におけるスピン液体状態の研究	吉澤
松澤 光司	首都大学東京大学院理工学研究科 修士課程 1年	”	”
門脇 広明	首都大学東京大学院理工学研究科 准教授	$\text{Tb}_2\text{Ti}_2\text{O}_7$ における量子スピン液体状態の研究	”
谷口 智洋	首都大学東京大学院理工学研究科 修士課程 1年	”	”
藤原 哲也	山口大学大学院理工学研究科 助教	重い電子系新物質 $\text{Ce}_2\text{Pt}_3\text{Ge}_5$ の比熱測定	”
歳田 裕也	山口大学大学院理工学研究科 修士課程 1年	”	”
繁岡 透	山口大学大学院理工学研究科 教授	多形性化合物 $\text{TbIr}_2\text{Si}_2$ の磁気転移	”
大河原 遊	山口大学大学院理工学研究科 修士課程 2年	”	”
佐藤 卓	東北大学多元物質科学研究所 教授	鉄系超伝導体 111 系の比熱測定	”
矢口 宏	東京理科大学理工学部 教授	鉄系超伝導体 $\text{Fe}_{1-y}\text{Te}_{1-x}\text{S}_x$ における酸素中アニールによる物性変化	”
山崎 照夫	東京理科大学理工学部 助教	”	”
櫻井 辰弥	東京理科大学大学院理工学研究科 修士課程 2年	”	”
繁岡 透	山口大学大学院理工学研究科 教授	$\text{HoRh}_2\text{Si}_2$ 単結晶における磁化の角度依存	金道
長谷川 貴大	山口大学大学院理工学研究科 修士課程 2年	”	”
浅野 貴行	九州大学大学院理学研究院 助教	クロミック化合物の結晶粒径と磁気的性質の相関	”
福井 博章	九州大学大学院理学府 修士課程 1年	”	”
稲垣 祐次	九州大学大学院工学研究院 助教	パルス強磁場下における比熱測定技術の開発	”
廣井 政彦	鹿児島大学大学院理工学研究科 教授	ホイスラー化合物 $\text{Ru}_{2-x}\text{Fe}_x\text{CrSi}$ の強磁場磁化	”
光田 暁弘	九州大学大学院理学研究院 准教授	価数揺動 Eu 化合物の強磁場磁化過程	”



浜野 卓	九州大学大学院理学府 修士課程 2年	価数揺動 Eu 化合物の強磁場磁化過程	金 道
海老原 孝雄	静岡大学理学部 准教授	希土類金属間化合物の強磁場物性研究	”
中井 裕人	静岡大学大学院理学研究科 修士課程 2年	”	”
菊池 彦光	福井大学 大学院工学研究科 教授	幾何学的フラストレート磁性体の磁化研究	”
藤井 裕	福井大学遠赤外線域開発研究センター 准教授	”	”
高田 晋弥	福井大学大学院工学研究科 修士課程 1年	”	”
柏木 隆成	筑波大学数理物質系 助教	強磁場を用いたトポロジカル絶縁体の輸送特性に関する研究	”
鈴木 悠介	筑波大学大学院数理物質科学研究科 修士課程 2年	”	”
稲田 貢	関西大学システム理工学部 准教授	金属ナノクラスターネットワークの磁気抵抗測定	”
小川 智矢	関西大学大学院理工学研究科 修士課程 1年	”	”
稲田 貢	関西大学システム理工学部 准教授	金属ナノクラスターの磁化測定	”
吉原 義浩	関西大学大学院理工学研究科 修士課程 2年	”	”
植田 浩明	京都大学大学院理学研究科 准教授	新規フッ化物フラストレート磁性体の強磁場磁性	”
原口 祐哉	京都大学大学院理学研究科 修士課程 1年	”	”
萩原 政幸	大阪大学極限量子科学研究センター 教授	複合極限装置のためのワイドボアパルスマグネットの開発	”
谷口 一也	大阪大学極限量子科学研究センター 技術専門職員	”	”
道岡 千城	京都大学大学院理学研究科 助教	遍歴電子メタ磁性体 SrCo <sub>2</sub> P <sub>2</sub> 周辺物質の強磁場測定	”
小林 慎太郎	京都大学大学院理学研究科 博士課程 1年	”	”
今井 正樹	京都大学大学院理学研究科 修士課程 2年	”	”
佐藤 桂輔	茨城工業高等専門学校自然科学 講師	LaCoO <sub>3</sub> 系の強磁場誘起スピン転移の研究	”
稲垣 充	豊田工業大学大学院工学研究科 博士課程 3年	GaAsN の電子輸送特性およびバンド構造の解明	松田 (康)
佐藤 桂輔	茨城工業高等専門学校自然科学 講師	コバルト酸化物の磁気形状記憶効果	徳 永
松平 和之	九州工業大学大学院工学研究院 助教	パイロクロア型イリジウム酸化物の強磁場下の物性研究	”
水鳥 雄斗	九州工業大学大学院工学府 修士課程 1年	”	”
矢口 宏	東京理科大学理工学部 教授	パルス強磁場を用いたグラファイトの強磁場相の研究	”
香取 浩子	東京農工大学大学院工学研究院 教授	幾何学的フラストレート磁性体の強磁場下での振る舞い	”
安藤 悠一	東京農工大学大学院工学府 修士課程 1年	”	”
太田 寛人	東京農工大学大学院工学府 助教	遍歴電子系磁性体の強磁場下での振る舞い	”
野口 大介	東京農工大学大学院工学府 修士課程 1年	”	”
小山 佳一	鹿児島大学大学院理工学研究科 教授	Mn <sub>3</sub> Si の超強磁場磁化測定	嶽 山

折橋 広樹	鹿児島大学大学院理工学研究科 修士課程 2年	Mn <sub>3</sub> Si の超強磁場磁化測定	嶽山
仲間 隆男	琉球大学理学部 教授	EuNiSi <sub>3</sub> の圧力誘起価数転移の探索と低温異常の解明	上床
平川 先太郎	琉球大学大学院理工学研究科 修士課程 2年	〃	〃
仲間 隆男	琉球大学理学部 教授	立方晶 CeT <sub>2</sub> Sn <sub>3</sub> (T=Ni, Rh) の高圧輸送特性	〃
渡部 晋太郎	琉球大学大学院理工学研究科 修士課程 2年	〃	〃

## 物質合成・評価設備 P クラス

氏名	所属	研究題目	関係実験室
陰山 洋	京都大学大学院工学研究科 教授	Ruddlesden-Popper 型ペロブスカイト酸化物における構造相転移	上田(寛)研究室
セドリック タツセル	京都大学大学院工学研究科 助教	〃	X線測定室 上田(寛)研究室
山本 隆文	京都大学大学院工学研究科 博士課程 3年	〃	〃
吉井 龍太	京都大学大学院工学研究科 修士課程 1年	〃	〃
植田 浩明	京都大学大学院理学研究科 准教授	スピン・電荷・軌道の自由度を有する新規フラストレート磁性体の物性評価	化学分析室 電子顕微鏡室 電磁気測定室 上田(寛)研究室
小林 慎太郎	京都大学大学院理学研究科 博士課程 1年	〃	〃
後藤 真人	京都大学大学院理学研究科 修士課程 1年	〃	〃
シュタウス スヴェン	東京大学大学院新領域創成科学研究科 助教	時間分解分光法を用いた超臨界流体中パルスレーザープラズマによるダイヤモンドドイド合成における反応メカニズムの探索	光学測定室
加藤 暢	東京大学大学院新領域創成科学研究科 修士課程 2年	〃	〃
瀬戸 雄介	神戸大学大学院理学研究科 助教	炭素質コンドライト隕石にみられる水質変成組織の微細組織観察	電子顕微鏡室
松本 恵	神戸大学大学院理学研究科 博士課程 1年	〃	〃
宇津木 綾香	神戸大学大学院理学研究科 修士課程 2年	〃	〃
中山 則昭	山口大学大学院理工学研究科 教授	強相関係遷移金属酸化物の透過電子顕微鏡法による研究	電子顕微鏡室 電磁気測定室
松平和之	九州工業大学大学院工学研究院 助教	パイロクロア型希土類酸化物の単結晶育成と磁気フラストレーションの研究	物質合成室

物質合成・評価設備 G クラス

氏名	所属	研究題目	関係実験室
大友 順一郎	東京大学大学院新領域創成科学研究科 准教授	高温高压水中における固体酸塩基触媒反応の速度論的解析	X線測定室
秋月 信	東京大学大学院新領域創成科学研究科 博士課程3年	〃	〃
大友 順一郎	東京大学大学院新領域創成科学研究科 准教授	高温高压水中における固体酸触媒反応の速度論的解析	〃
佐野 恵二	東京大学大学院新領域創成科学研究科 修士課程2年	〃	〃
大原 繁男	名古屋工業大学大学院工学研究科 教授	重い電子系反強磁性体 Yb(Ni <sub>1-x</sub> Cu <sub>x</sub> ) <sub>3</sub> Al <sub>9</sub> の結晶構造	〃
大友 順一郎	東京大学大学院新領域創成科学研究科 准教授	超臨界水を用いた有機・無機複合廃棄物からのマテリアルリサイクル	〃
松本 祐太	東京大学大学院新領域創成科学研究科 博士課程3年	〃	〃
大友 順一郎	東京大学大学院新領域創成科学研究科 准教授	ケミカルループ法における鉄系酸素キャリア材料の酸化還元反応特性と担体効果	X線測定室 電子顕微鏡室
磯貝 俊介	東京大学大学院新領域創成科学研究科 修士課程1年	〃	〃
大友 順一郎	東京大学大学院新領域創成科学研究科 准教授	固体酸化物形燃料電池の劣化挙動におけるインピーダンススペクトルの解析	〃
伊原 冬樹	東京大学大学院新領域創成科学研究科 修士課程1年	〃	〃
大友 順一郎	東京大学大学院新領域創成科学研究科 准教授	高温高压水を利用した有機修飾微粒子の連続式合成技術の開発	〃
生駒 健太郎	東京大学大学院新領域創成科学研究科 博士課程3年	〃	〃
佐々木 岳彦	東京大学大学院新領域創成科学研究科 准教授	酸化セリウムナノマテリアルのキャラクタリゼーション	〃
梶 智大	東京大学大学院新領域創成科学研究科 修士課程1年	〃	〃
大友 順一郎	東京大学大学院新領域創成科学研究科 准教授	酸化物イオン伝導体とプロトン伝導体を用いた新規二次電池の開発	〃
櫻井 健一郎	東京大学大学院新領域創成科学研究科 修士課程1年	〃	〃
大友 順一郎	東京大学大学院新領域創成科学研究科 准教授	中温作動プロトン伝導型燃料電池における多様な燃料の直接利用	〃
嶋田 五百里	東京大学大学院新領域創成科学研究科 博士課程3年	〃	〃
大友 順一郎	東京大学大学院新領域創成科学研究科 准教授	中温作動型燃料電池におけるプロトン伝導型固体電解質の開発	〃
庄野 洋平	東京大学大学院新領域創成科学研究科 修士課程1年	〃	〃
大友 順一郎	東京大学大学院新領域創成科学研究科 准教授	複合固体電解質の合成と大容量蓄電池の開発	〃
高坂 文彦	東京大学大学院新領域創成科学研究科 博士課程1年	〃	〃
大友 順一郎	東京大学大学院新領域創成科学研究科 准教授	プロトン伝導性中温作動燃料電池における新規リン酸ガラス-セラミックス電解質の開発	〃
川村 亮人	東京大学大学院新領域創成科学研究科 修士課程2年	〃	〃
有馬 孝尚	東京大学大学院新領域創成科学研究科 教授	幾何学的フラストレーションを有する強相関電子系の設計	〃
阿部 伸行	東京大学大学院新領域創成科学研究科 助教	〃	〃
佐賀山 基	東京大学大学院新領域創成科学研究科 助教	〃	〃
新居 陽一	東京大学大学院新領域創成科学研究科 博士研究員	〃	〃

マイエンドウーイカーン	東京大学大学院新領域創成科学研究科特別研究生	幾何学的フラストレーションを有する強相関電子系の設計	X線測定室 電磁気測定室
豊田新悟	東京大学大学院新領域創成科学研究科修士課程1年	〃	〃
大友順一郎	東京大学大学院新領域創成科学研究科准教授	SOFC 空気極における製造プロセス由来微量成分の電極特性に対する影響評価	化学分析室 X線測定室 電子顕微鏡室
大石淳矢	東京大学大学院新領域創成科学研究科博士課程3年	〃	〃
大友順一郎	東京大学大学院新領域創成科学研究科准教授	超臨界水を反応場としたナノ材料の創成	〃
横哲	東京大学大学院新領域創成科学研究科修士課程1年	〃	〃
大友順一郎	東京大学大学院新領域創成科学研究科准教授	複合型酸化イオン伝導体の合成と金属-空気二次電池への応用	〃
山本高史	東京大学大学院新領域創成科学研究科修士課程2年	〃	〃
シュタウスヴェン	東京大学大学院新領域創成科学研究科助教	超臨界二酸化炭素中パルスレーザープラズマによるナノ微粒子の合成	光学測定室
加藤智嗣	東京大学大学院新領域創成科学研究科修士課程1年	〃	〃
占部継一郎	東京大学大学院新領域創成科学研究科博士研究員	超臨界二酸化炭素中レーザープラズマ生成現象の分光学的基礎研究	〃
バイデビッド	東京大学大学院新領域創成科学研究科特別研究員	超臨界流体中プラズマによるダイヤモンドドイド合成における反応機構の探索	〃
金沢育三	東京学芸大学自然科学系教授	Al系準結晶の熱電特性及びSEMによる組成分析	電子顕微鏡室
齋藤誠	東京学芸大学大学院教育学研究科修士課程2年	〃	〃
田村隆治	東京理科大学基礎工学部准教授	SPS法によるAl基準結晶の作製と電気抵抗への熱処理の効果	〃
中村敬人	東京理科大学大学院基礎工学研究科修士課程1年	〃	〃
金沢育三	東京学芸大学自然科学系教授	Vドーブβ-ボロンのSEMによる組成分析	〃
山田浩平	東京学芸大学大学院教育学研究科修士課程2年	〃	〃
細野英司	産業技術総合研究所エネルギー技術研究部門研究員	ナノ構造制御による二次電池等の機能性材料開発	〃
澤井理	東京大学環境安全研究センター博士研究員	下水汚泥の超臨界水ガス化プロセスにおける栄養塩回収・固定化の実験的検討	〃
陶究	産業技術総合研究所ナノシステム研究部門研究員	高温高圧水とマイクロミキサを用いた機能性ナノ粒子の連続合成	〃
齋藤哲治	千葉工業大学工学部教授	新規磁石材料の微細構造解析	〃
永嶋真理子	山口大学大学院理工学研究科講師	低結晶性クリノサイトの非晶質特性の実態と原因の解明	〃
山崎照夫	東京理科大学理工学部助教	鉄カルコゲナイド超伝導体 $FeTe_{1-x}S_x$ における表面の酸化状態と超伝導性	〃
櫻井辰弥	東京理科大学大学院理工学研究科修士課程2年	〃	〃
右田稔	横浜国立大学大学院工学府博士課程3年	様々な不純物をドーブした超伝導体の結晶構造解析	〃
李林	北海道大学大学院理学院博士課程2年	MnSiO <sub>3</sub> 成分のMgSiO <sub>3</sub> 組成とCaSiO <sub>3</sub> 組成のケイ酸塩ペロブスカイトへの分配	〃
李東海	横浜国立大学大学院工学府博士課程2年	Cu-Ni-Co系合金中のCo微粒子の析出過程と磁気特性の関係	電磁気測定室
和泉充	東京海洋大学大学院海洋科学技術研究科教授	バルク高温超伝導体および関連磁性酸化物の磁性と構造組織観察	電子顕微鏡室 電磁気測定室
都築啓太	東京海洋大学大学院海洋科学技術研究科博士課程3年	〃	〃

周 迪 帆	東京海洋大学大学院海洋科学技術研究科 博士課程 2 年	バルク高温超伝導体および関連磁性酸化物の磁性と構造組織観察	電子顕微鏡室 電磁気測定室
李 備 戦	東京海洋大学大学院海洋科学技術研究科 博士課程 2 年	”	”
原 章 悟	東京海洋大学大学院海洋科学技術研究科 修士課程 2 年	”	”
西 本 一 恵	東京大学生産技術研究所 東京大学特別研究員	正 20 面体クラスター固体の構造に関する研究	電子顕微鏡室
服 部 賢	奈良先端科学技術大学院大学物質創成科学研究科 准教授	Mn シリサイド薄膜試料の SQUID 測定	電磁気測定室
木 村 明日香	奈良先端科学技術大学院大学物質創成科学研究科 修士課程 2 年	”	”
重 田 出	鹿児島大学大学院理工学研究科 助 教	ハーフメタル型ホイスラー合金の磁性と輸送特性に関する研究	”
春 森 浩 平	鹿児島大学大学院理工学研究科 修士課程 1 年	”	”
村 岡 祐 治	岡山大学大学院自然科学研究科 准教授	パルスレーザー堆積法により作製した TaO <sub>2</sub> 薄膜の物性評価	”
藤 本 佑 樹	岡山大学大学院自然科学研究科 修士課程 1 年	”	”
廣 井 政 彦	鹿児島大学大学院理工学研究科 教 授	ホイスラー型化合物の磁性と伝導の研究	”
諏 訪 秀 和	鹿児島大学大学院理工学研究科 修士課程 1 年	”	”
吉 田 喜 孝	いわき明星大学科学技術学部 教 授	金属炭化物微粒子の超伝導磁気特性	”
木 村 薫	東京大学大学院新領域創成科学研究科 教 授	13 族クラスター固体の電子物性に関する研究	物質合成室 化学分析室 X 線測定室 電子顕微鏡室 電磁気測定室
住 吉 篤 郎	東京大学大学院新領域創成科学研究科 博士課程 3 年	”	”
北 原 功 一	東京大学大学院新領域創成科学研究科 博士課程 1 年	”	”
松 浦 裕 介	東京大学大学院新領域創成科学研究科 修士課程 2 年	”	”
竹 田 真帆人	横浜国立大学大学院工学研究院 准教授	Cu-Ni-Co 系合金中の Co 微粒子析出過程と磁気特性の関係	物質合成室 電磁気測定室
桃 沢 愛	東京大学大学院新領域創成科学研究科 客員連携研究員	ホウ化物セラミックスサンプルの相形成及び酸化挙動の研究およびアーク風洞の開発	電子顕微鏡室
糸 井 充 穂	日本大学医学部 助 教	多重安定性を示す光誘起分子磁性体のサイズ効果の研究	化学分析室 電子顕微鏡室
北 垣 亮 馬	東京大学大学院工学系研究科 講 師	セメント硬化体・セラミック系建材の分光反射率測定と日射熱制御に関する研究	光学測定室

## 長期留学研究員

氏 名	所 属	期 間	研 究 題 目	関係所員
山 本 貴 士	東京理科大学大学院理学研究科 博士課程 2 年	24. 10. 1 -25. 3. 31	極紫外レーザー時間分解光電子分光による光誘起トポロジカル相転移の研究	辛

# 平成 24 年度後期 スーパーコンピュータ共同利用採択課題一覧

代 表 者	所 属	タ イ ト ル
宮 崎 州 正	筑波大学数理物質科学研究科物理学専攻 准教授	ガラス転移とジャミング転移の統一
坂 下 達 哉	東京大学物性研究所 特任研究員	スピン系の厳密対角化パッケージの並列化と高精度化
星 野 晋太郎	東北大学理学研究科物理学専攻 博士研究員	連続時間量子モンテカルロ法による強相関電子系の研究
観 山 正 道	東北大学原子分子材料科学高等研究機構(WPI-AIMR) 助 手	剪断外力下の修正 XY モデルが示す非平衡相転移と位相欠陥
初 田 浩 義	大阪大学産業科学研究所 助 教	次世代電子・スピンドバイス材料の第一原理電子構造計算
寺 尾 貴 道	岐阜大学工学部 准教授	コロイド結晶に関する計算機シミュレーション
川 村 光	大阪大学理学研究科 教 授	地震の統計モデルの数値シミュレーション
石 原 純 夫	東北大学大学院理学研究科 准教授	多自由度強相関系の新奇量子相と非平衡状態
正 木 晶 子	東京大学物性研究所 特任研究員	大規模計算のための新しい量子モンテカルロ法のアルゴリズム 開発
清 野 智 史	大阪大学大学院工学研究科 講 師	燃料電池用電極触媒の高耐久化に向けた第一原理計算に基づく 理論設計
石 井 史 之	金沢大学理工研究域数物科学系 准教授	極性絶縁体におけるスピン分裂の第一原理計算
櫻 井 誠 大	東京大学物性研究所 特任研究員	電子自己エネルギーの高精度計算
松 下 勝 義	大阪大学 CMC PD	電流誘起の磁壁運動のカオスの研究
藤 本 義 隆	東京工業大学大学院理工学研究科物性物理学専攻 特任助教	不純物ドーブされたナノカーボン物質の原子構造と電子特性
佐 藤 徹 哉	慶應義塾大学理工学部 教 授	第一原理計算による表面に酸素吸着された Pd 薄膜の磁性に関する 研究
田 中 宗	東京大学 学振特別研究員	量子情報理論と統計力学の接点
川 崎 猛 史	京都大学大学院理学研究科 日本学術振興会特別研究員 PD	ガラス系における協同再配置と集団運動の時空間解析
芝 隼 人	東京大学物性研究所 助 教	剪断流下の生体膜系における破裂と結合のダイナミクス
古 賀 昌 久	東京工業大学 准教授	幾何学的にフラストレートした系における超固体状態の安定性
田 村 亮	物質・材料研究機構 ポストドク研究員	ネットワーク成長模型における臨界現象
野 口 博 司	東京大学物性研究所 准教授	膜曲面における膜蛋白質の凝集現象
大 澤 一 人	九州大学応用力学研究所 助 教	金属間化合物中の水素の研究
坂 井 徹	日本原子力研究開発機構量子ビーム応用研究部門 研究主幹	カゴメ格子反強磁性体の磁化過程の数値対角化による研究
阪 上 雅 昭	京都大学人間・環境学研究科 教 授	長距離相互作用系の準定常状態の進化
瀧 崎 員 弘	愛媛大学理工学研究科 教 授	非平衡準安定状態での遅い緩和過程

足立高弘	秋田大学工学資源学部機械工学科 准教授	微細横溝加工を施した鉛直平板を流れる凝縮液膜流の熱輸送特性
川上則雄	京都大学大学院理学研究科物理学宇宙物理学専攻 教授	スピン軌道相互作用が誘起する強相関係の異常量子凝縮相の解析
下條冬樹	熊本大学大学院自然科学研究科 教授	高圧力下における共有結合性液体の構造と電子状態の第一原理計算
初貝安弘	筑波大学大学院数理物質科学研究科物理学系 教授	トポロジカル相の数値的研究
斎藤峯雄	金沢大学理学部計算科学科 教授	ナノ物質の電子物性シミュレーション
鈴木隆史	兵庫県立大学大学院工学研究科 准教授	二次元ボーズ・スピン系の量子状態に関する数値的研究
大久保毅	東京大学物性研究所 特任研究員	フラストレート磁性体におけるトポロジカル励起の秩序化とダイナミクス
幾原雄一	東京大学大学院工学系研究科総合研究機構 教授	ペロフスカイト系酸化物における界面誘起金属-絶縁体遷移機構
黒木和彦	電気通信大学 教授	ニッケル硼化物における非従来型超伝導の可能性に関する研究
渡辺一之	東京理科大学理学部 教授	外場に応答するナノ構造の励起電子状態と非断熱過程の第一原理計算
山田淳夫	東京大学工学部 教授	新型リチウムとナトリウムイオン電池材料の第一原理計算
内田尚志	北海道工業大学 教授	第一原理分子動力学法による Mn <sub>3</sub> Pt の磁気構造解析
笠井秀明	大阪大学大学院工学研究科 教授	第一原理量子シミュレーションによる固体表面・界面ナノ領域における反応解析
尾関之康	電気通信大学情報理工学研究科 教授	非可換ゲージグラスモデルを中心とした相転移・臨界現象の非平衡緩和解析
原田健自	京都大学大学院情報学研究所 助教	テンソルネットワーク変分法の開発
川村光	大阪大学理学研究科 教授	フラストレート磁性体における新奇秩序
江上喜幸	長崎大学先端計算研究センター 助教	第一原理に基づく電子輸送ダイナミクスシミュレータの開発と応用
濱田幾太郎	東北大学原子分子材料科学高等研究機構 助教	Si(111)-(7x7)表面上における金属ナノクラスターの構造と電子状態
首藤健一	横浜国立大学・工学部 准教授	ラディカル有機薄膜の電子状態
松浦弘泰	東京大学理学研究科物理学専攻 助教	多軌道・多バンド系の新奇電子状態における理論的研究
渡邊聡	東京大学大学院工学系研究科マテリアル工学専攻 教授	ナノデバイスに向けた電子/イオン/熱輸送特性の理論解析
柳澤将	琉球大学理学部物質地球科学科物理系 助教	色素増感太陽電池と関連あるバルク・クラスター・表面の第一原理的研究
小野倫也	大阪大学大学院工学研究科精密科学・応用物理学専攻 助教	実空間差分法に基づく大規模第一原理電子状態・輸送特性計算手法の開発とシミュレーション
稲垣耕司	大阪大学大学院工学研究科 助教	第一原理計算による CARE 加工プロセスの解明-溶液を含む系-
舘野賢	兵庫県立大学大学院生命理学研究科 教授	ハイブリッド ab initio 電子構造計算による生体システムの機能解析
柳沢孝	産業技術総合研究所 主任研究員	量子モンテカルロ法と第一原理計算による強相関電子系の研究
佐藤年裕	東京大学物性研究所 特任研究員	幾何学的フラストレート電子系における伝導特性の研究 2
宇田川将文	東京大学大学院工学系研究科物理工学専攻 助教	幾何学的フラストレーション系の新奇輸送現象と動的性質の研究
川島直輝	東京大学物性研究所 教授	ワームアルゴリズムの並列化
木崎栄年	大阪大学大学院工学研究科 特任助教	光触媒固液界面の第一原理反応シミュレーション



押山 淳	東京大学工学系研究科 教授	ハード及びソフトナノ物質の原子構造と電子物性
館山 佳尚	物質・材料研究機構国際ナノアーキテクニクス研究拠点 グループリーダー	固液界面の酸化還元・光化学過程の第一原理 MD サンプルング解析
森川 良忠	大阪大学大学院工学研究科精密科学・応用物理学専攻 教授	界面における構造・電子状態、および、反応過程の第一原理シミュレーション
小田 竜樹	金沢大学理工研究域数物科学系 教授	磁性薄膜の磁気異方性および電界効果の解析

# 平成 25 年度前期共同利用の公募について

東大物性研第 324 号  
平成 24 年 10 月 1 日

関係各研究機関長 殿

東京大学物性研究所長  
家 泰 弘 (公印省略)

## 平成 25 年度前期東京大学物性研究所共同利用の公募について (通知)

このことについて、下記のとおり公募しますので、貴機関の研究者にこの旨周知いただくとともに、申請に当たっては遺漏のないようよろしくお取り計らい願います。

記

### 1 公募事項

- |                                  |                              |
|----------------------------------|------------------------------|
| (1) 一般、スーパーコンピュータ、物質合成・評価設備の共同利用 | (平成 25 年 4 月～平成 25 年 9 月実施分) |
| (2) 中性子科学研究施設の共同利用               | (平成 25 年 4 月～平成 26 年 3 月実施分) |
| (3) 長期留学研究員                      | (平成 25 年 4 月～平成 26 年 3 月実施分) |
| (4) 短期留学研究員                      | (平成 25 年 4 月～平成 25 年 9 月実施分) |
| (5) 短期研究会                        | (平成 25 年 4 月～平成 25 年 9 月実施分) |

### 2 申請資格

国・公立大学法人、私立大学及び国公立研究機関（以下「大学等」という）の教員、研究者並びにこれに準ずる者。ただし、上記の者が行う大学等の研究活動に限ります。大学院学生にあつては大学等の教員の指導の下、研究を行う者。

### 3 申請方法等

本研究所ホームページ (<http://www.issp.u-tokyo.ac.jp/contents/kyoudou/index.html>) の募集要項を参照願います。

### 4 申請期限

- |                    |                      |
|--------------------|----------------------|
| (1) 中性子科学研究施設の共同利用 | 平成 24 年 11 月 8 日 (木) |
| (2) その他            | 平成 24 年 12 月 3 日 (月) |

〒277-8581 千葉県柏市柏の葉 5-1-5 東京大学物性研究所共同利用係  
電話：04-7136-3209 e-mail：issp-kyodo@kj.u-tokyo.ac.jp

## 編集後記

ロンドンオリンピックの閉会から一ヶ月が経ち、ようやく朝夕には秋の気配が感じられるようになってきました。10月からは極限コヒーレント光科学研究センター(LASOR)が始動します。センターで目指すサイエンス、そして共同利用のあり方等、辛先生の記事が今号のトップです。また、柴山先生の中性子科学研究施設の記事がそれに続きます。先日の共同利用施設専門委員会では、物性研における施設・センターと研究部門とのバランスについて、ある委員の先生からご意見をいただきました。今後の物性研の発展において考えていくべき課題の一つかなと感じます。さて、来週には横浜国立大で秋の物理学会があり、科研費申請や修論・博論研究の仕上げなど、研究活動が忙しくなってきます。同い年の阪神、金本選手が昨日引退表明をしましたが、歳を重ねる度に重くなる体を励まして研究の合間にスポーツの秋も楽しみたいと思います。

松田 康弘