

# 第7回日本物理学会若手奨励賞を受賞して

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 矢治 光一郎

この度、日本物理学会において、第7回(2013年)日本物理学会若手奨励賞(領域9)を受賞いたしました。本受賞研究は、私が博士研究員として赴任をしていた京都大学理学研究科で主に行われました。まず始めに、この受賞研究の遂行にあたりご指導を賜りました京都大学理学研究科の有賀哲也教授をはじめとする共同研究者の皆様に深く感謝申し上げます。

本受賞の対象となった研究は、「半導体上でスピン分裂した金属表面状態の発見」でした。半導体であるゲルマニウム結晶表面に鉛原子が1層だけ並んだ表面を作り出し、その電子構造を角度分解光電子分光、スピン分解光電子分光を用いて詳細に調べました。その結果、最表面の鉛原子層が電気伝導性を有し、しかも巨大ラシュバ効果により表面を流れる電流中の電子スピンの特定の向きに揃うことを明らかにしました。このような性質を有する半導体表面を世界に先駆けて発見したことが主な受賞理由です。

この研究について、少し詳しく述べさせていただきます。近年、スピントロニクス技術の構築に向けて活発に研究が進められていますが、中でも、ゼロ磁場下でスピンを制御するということが一つのキーワードになっています。その一つの方法として、ラシュバ効果と呼ばれるスピン軌道相互作用の利用が提案されており、半導体ヘテロ接合界面の二次元自由電子ガス等によく研究されてきました。一方、固体表面に注目した場合、このラシュバ効果によりスピン分裂した表面電子バンドのスピン分裂エネルギー幅は、半導体ヘテロ接合界面に比べてはるかに大きくなります。これは、固体表面において極めて高くスピン偏極した電子を作り出せる可能性があることを意味します。本研究を始めた当初、固体表面でのラシュバ効果は、金やビスマスのような重い元素からなる単結晶表面や、これらの重い元素を金属元素基板に吸着した表面について研究されていました。一方で、表面でいくらスピン偏極した電子状態が実現していても、下地がバルク金属的な伝導を持っていると、その下地からの寄与が支配的となり、表面電子のスピン偏極成分はかき消されてしまいます。というわけで、表面スピン輸送研究や応用への展開を考える上では、半導体基板を用いて物質設計をすることが求められていたのです。また半導体ベースにすることで、既存の半導体エレクトロニクスとの親和性も良いと言えます。従って、我々のグループでは、「半導体表面で大きなラシュバスピン分裂を示すこと」、「金属的な表面電子状態を持つこと」という二つの条件を念頭に置いて研究を展開しました。

このような固体表面上でスピン分裂した電子状態を直接観測する手法として、角度分解光電子分光、及びスピン分解光電子分光があります。本研究では、特にスピン分解光電子分光が非常に大きな役割を果たしました。通常、角度分解光電子分光の超高分解能化はもはや言うまでもないのですが、スピン分解光電子分光に関しても、数十ミリ電子ボルトオーダーのスピン軌道分裂した表面電子バンドを容易に識別できるほどの高分解能化が達成され、電子のスピン構造を実験的に決定するために重要な役割を果たしています。

本研究は、これらの実験手法を駆使することにより行われました。鉛原子をゲルマニウム(111)基板上に単原子層蒸着した表面を角度分解光電子分光で観測すると、 $\bar{\Gamma}$ 点を底にして波数方向に2つに分裂した自由電子的な放物線状のエネルギー分散を持つ金属的電子状態が観測されます。この2つに分裂したバンドを、スピン分解光電子分光を用いて観測すると、 $\bar{\Gamma}$ 点でアップスピンバンドとダウンスピンバンドは縮退し、さらに $\bar{\Gamma}$ 点を挟んだ両側で、スピンの向きが反転していることがわかりました。従って、この自由電子的金属バンドはラシュバ効果によりスピン分裂した状態であると結論付けられたのです。またそのスピン分裂エネルギーの大きさは、フェルミ準位で200 meVという巨大なものでした。この発見が、当時世界初の成果で、大きなインパクトを与えることとなりました。

これまで私は「固体表面の電子物性」というものをテーマにして研究を行って参りました。この分野で私が面白いと感じていることは、「試料の作成」、「試料の評価」、「実験と解析」、「これらを試料作成にフィードバックして、また実験」、「成果のまとめ」をいう研究には欠かせないその全てを一貫して自分で行えるということです。苦勞をして試料を作って、それについて実験をして、さらに上述いたしましたような非常に面白い結果に巡り逢ったときには、大きな喜びを感じる

ところですが、今でも覚えているのですが、今回のテーマについての最初の光電子分光実験は私一人実験室で行っていました。ファーストデータを見て、「これはすごい結果なのでは。」と一人でドキドキしていたのを覚えています。指導教官にすぐにも報告したい気持ちをグッと抑えて、その夜は一人で興奮しながら美味しいビールを飲みました。次の日、再実験を行って、この結果は間違いないという確信を持ち、その後指導教官と議論をし、一気に研究が展開していったのでした。そのようにして得た成果が、日本物理学会若手奨励賞の受賞まで至るとは、当時はもちろん想像すらしていませんでした。今回の受賞について非常に光栄に感じますと共に、私の現在の研究生活においても大きな励みとなっているところです。

最後に、日々の生活を支えてくれている私の家族に感謝し、結びといたします。

# 第7回日本物理学会若手奨励賞を受賞して

ナノスケール物性研究部門 吉田 靖雄

2013年3月に広島大学で行われた第68回日本物理学会年次大会において、領域9の第7回日本物理学会若手奨励賞を賜りました。推薦して下さった現在の上司の長谷川幸雄先生と、受賞理由となった三つの論文の共同研究者たちに心から感謝を申し上げたいと思います。

今回の受賞理由となった三つの論文は、すべて私が物性研に着任する以前に、ドイツ・ハンブルク大学の Roland Wiesendanger 教授のグループで行った三年間の研究に関するものです。物性研着任時の記事(第51巻、第2号、2011年7月)でも書かせて頂きましたが、ほんの5年前には STM のド素人(未だにという噂も、)だった私が、このような賞を頂くに値するかは疑問であり、また現在36歳という年齢からも“若手”という点に関しても若干の疑問符がつきますが、審査の結果選んで頂けたということで、今後はこの賞を重く受取り、責任感を持って研究を行っていきたいと考えています。この三つの論文[1-3]は、非常に密接に関係している研究でありまして、いずれもスピン偏極 STM を実験手段として、タングステン表面上のマンガンのらせん磁性単層膜を研究の舞台として行われました。そして三つの研究の面白い共通点は、どれも実験開始当初に意図していなかった実験結果を元に発展していったという点です。自我を全面に出して行ってきたそれまでの研究とは全く異なる形で研究が進展したという点で、私にとっては非常にエポックメイキングな経験でした。今後の研究生活においても、あの頃の状況をいつも心に刻み、謙遜さを忘れずに研究を行いたいと日々思われています。

まず一つ目の論文のエピソードからお話したいと思います。ハンブルク大学に私が着任した当時、低温 STM 業界では金属表面に絶縁薄膜を作り、その上に磁性単原子を蒸着させ、その量子スピン性を非弾性トンネル分光を用いて議論するスピン励起の研究が非常に盛んに行われていました。それまで量子スピン系の物理に従事してきた私には、非常に分かりやすく興味深い内容で、また配属された実験室の至上命題であったこともあり、私も同僚の David Serrate 博士と共にこれまでとは異なる系を用いて研究を開始しました。また同じ実験室では、サブグループリーダーの Andre Kubetzka 博士が我々の実験の空き時間を使って我々の系とは異なる系の探索を行っていました。研究を初めて数ヶ月後、私と Serrate 博士との実験もそれなりの成果を出し始めていたのですが、Kubetzka 博士が、期待していたものとは異なるが、どうも妙な現象を見つけて研究グループの話題になりました。それは、らせん磁性を示すマンガン単層膜にコバルトの単原子を蒸着させ、スピン偏極 STM を行ったところ、単原子の形状が吸着サイトに依存して明らかに変化しているということでした。非磁性の探針を用いた際には、この違いが見えないことからこれがコバルト原子の磁氣的性質に何らかの関わりを持っていることが予想されました。そこで、研究費の申請書などの理由でそれ以上実験に時間を取れない Kubetzka 博士に代わって、Serrate 博士と私が研究を引き継ぐことになりました。その後の研究は、多くの同僚からの実験的・理論的支援のおかげもあって瞬く間に進みました。そして、観察された原子像の違いが、スピン偏極したコバルトの多数スピンチャンネルと少数スピンチャンネルを主に構成する電子軌道の違いを反映して見えているということが明らかになりました。その後いくつかの優れた研究が行われたために少々薄れてしまいましたが、この実験はスピン偏極 STM と原子マニピュレーションを組み合わせたとはい意味では世界初の研究成果でした[1]。

二つ目の論文は、一つ目の論文で基板に用いていたタングステン表面上のマンガン単層膜の上にもう一層のマンガンをのせた、マンガン第二層目の薄膜の磁性に関するものです。実は、この第二層目の薄膜は一つ目の研究を遂行する上で、Serrate 博士と私の試料作成の知識不足からできてしまったものでした。前述の実験では、できるだけフラットなマンガン単層膜上にコバルト単原子を蒸着させる必要があったのですが、我々はその試料作成の詳細(基板の温度が高い状態でマンガンを蒸着させる)を知らずに行ったために第二層が多く存在する試料ができてしまっていました。しかし、スピン偏極 STM を行ってみると、この第二層が単層よりも強い磁気コントラストを示すことが分かりました。ただ、そのコントラストは(スピン偏極 STM をやっているものにとっては)非常に単純なものでしたので、考えられるスピン構造を提案して、理論家に第一原理計算をしてもらいました。しかし、我々の提案するモデルではどんなに計算を行っても安定状態にならないばかりか、考えるスピン構造のいずれも我々の実験結果を再現しないことが分かりました。一年以上かけて非





# 第7回日本物理学会若手奨励賞を受賞して

新物質科学研究部門 大串 研也

## はじめに

この度、第7回日本物理学会若手奨励賞(領域8)を受賞する榮譽に恵まれました。こつこつと行ってきた地味な物質開発研究を評価して頂いたことに喜びを感じると同時に、この賞に恥じない仕事をしていきたいと気持ちを新たにしております。以下に、受賞対象となった研究の背景と内容を紹介します。紙面の制約のため断片的な記述となりますので、興味を持たれた方は原論文にあたって下されば幸いです。

## 5d 電子系における強相関電子物性の研究

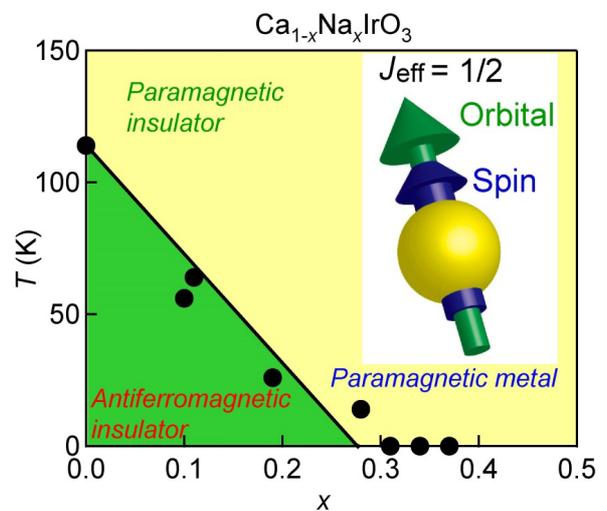
物質中で電子間に強い相互作用が働く場合、磁性や超伝導など多彩な現象が発現することが知られています。新奇な量子多体现象を示す物質を開発することは、新たな物理概念を構築する上で極めて重要です。物質開発の舞台は多岐に亘りますが、銅酸化物高温超伝導体が発見された1986年以降は、3d 遷移金属化合物が主たる対象となってきました。一方で、さほど注目を浴びていなかった5d 遷移金属(Hf, Ta, W, Re, Os, Ir, Pt, Au)を含む化合物も、新たな量子物性発現の良いプラットフォームである可能性があります。3d 電子系と比較した5d 電子系の特徴は、以下のように纏めることができます。

- ① 幅広い価数のカチオンとして安定に存在します。
- ② 電気陰性度が大きいため、アニオンとの共有結合が顕著になります。
- ③ 波動関数が空間的に広がっているため、電子相関効果が実効的に弱くなります。
- ④ 大きなスピン軌道相互作用が働きます。

これらの特徴のうち①②は、共有結晶をとる未知物質の存在を予感させ、超高压などの極限的環境で物質探索を行うことの有効性を示唆しています。また、特徴②③は、量子スピン系などの局在系より、むしろ遍歴磁性・超伝導などの遍歴系の科学を展開することの意義を示しています。さらに、特徴④は、傾角反強磁性・異方的磁気抵抗効果・スピンホール効果など、相対論的相関系に特有の新奇物性発現を期待させます。

このような背景の下、私は5d 遷移金属化合物における強相関電子物性の研究を推進してきました。高压合成法を駆使した物質探索・ラボベースでの基礎物性測定・量子ビームを用いた精密測定を組み合わせた総合的研究を通して、以下のような成果を得ました。

- ① 新物質  $\text{Hg}_x\text{ReO}_3$  が7.7Kで超伝導転移を示すことを見出し、六方晶ブロンズファミリーの転移温度更新に成功しました。一次元トンネル構造内において水銀原子が大きく揺らいでいることを明らかにしました。水銀の6s電子が電気伝導を担っている可能性が示唆され、「伝導電子を付随するラットリング原子」という新しいパラダイムを提供しています[1]。
- ② パイロクロア型酸化物  $\text{A}_2\text{Re}_2\text{O}_7$  が示す反転対称性の破れを伴う構造相転移が、特定の化学結合の共有結合性に支配されることを明らかにしました。これは、絶縁体である強誘電体で知られていた学理が、金属においても適用可能であることを意味しています。また、反転対称性の破れた金属相近傍において、小さな電気抵抗率の温度依存性という新奇な現象を見出し、その微視的起源として特異な電子格子結合を提案しました[2]。



ポストペロブスカイト型イリジウム酸化物の電子相図

