

第4回日本放射光学会若手研究会 「表面電子のスピンの生み出す物理の最前線 —ラッシュバ効果, トポロジカル絶縁体—」報告

矢治光一郎 (東京大学物性研究所)

第4回放射光若手研究会「表面電子のスピンの生み出す物理の最前線—ラッシュバ効果, トポロジカル絶縁体—」が、2012年8月29日から30日に東京大学本郷キャンパス山上会館にて開催されました。本研究会は、広島大学放射光科学研究センターの宮本幸治氏と共同で企画・開催されました。研究会には68名もの参加者をお迎えし、活発なご議論を展開していただき、大盛況のうちに終える事ができました(図1)。講演者の皆様、ご参加いただきました皆様に深く感謝いたします。

放射光若手研究会は、若手研究者のリーダーシップの育成、研究会で議論されるサイエンスを通じた新しいネットワーク形成への貢献、独創的・萌芽的な研究テーマの発掘およびその研究促進に寄与することを目的として行われております。このような目的のもとに毎年一回、放射光学会により公募が行われ、審査を経て開催が決定されております。

第4回目となる本若手研究会では、「表面電子のスピンの生み出す物理の最前線」と題しまして、近年急速な発展を見せている、「固体表面でのラッシュバ効果」と「トポロジカル絶縁体」について議論することを提案いたしました。これら表面電子のスピンのに関する新開拓分野は「スピ

ン軌道相互作用」が重要なキーワードになっています。このスピン軌道相互作用を利用すれば、ゼロ磁場下においてもスピンを識別、制御できることから、将来の低消費電力スピントロニクス技術の構築に向けての基盤技術としても大きく期待されております。このような固体中の電子の「スピン」や「軌道」の情報にアクセスするためには、放射光を利用した光電子分光法が極めて強力なツールとなります。角度分解光電子分光(ARPES)の超高分解能化はもはや言うまでもありませんが、スピン・角度分解光電子分光(SARPES)に関しても、数十~数百ミリ電子ボルト程度の電子のスピン軌道分裂した状態を容易に識別できるほどの高分解能化が達成され、スピン構造を決定するための重要な役割を果たし始めております。一方で、このような固体表面電子のスピンのに関して、包括的に理解するためには、電子分光だけではなく、様々な手法によるアプローチが重要です。例えば、スピントロニクスへの応用を考えるならば、表面輸送測定といった、より“直接的”な実験は欠かせません。

そこで本研究会では、物質科学という観点から、固体表面電子のスピン軌道相互作用系である、「表面ラッシュバ効果」と「トポロジカル絶縁体」にターゲットを絞り議論を



図1 研究会2日目のお昼に撮影した集合写真

行うことにしました。一方、研究手法に関しては、幅広く門戸を開放し、放射光を利用した ARPES, SARPES をはじめ、試料作成、走査トンネル電子顕微鏡 (STM), 電子輸送、さらには有効理論を用いた理論的研究といった幅広い分野から、最先端の研究現場にいる若手研究者より話題を提供していただくことにしました。幸いにも、これらの研究は我が国の若手研究者により精力的に研究されているという現状もございます。普段から放射光を利用しているユーザーと非ユーザーが一同に会して意見交換を行い、より広い視野から見た時に、電子のスピンを研究するためのツールとしての「放射光利用による光電子分光」が今後進むべき道を研究現場レベルから模索することを目的としました。さらに、各分野の若手研究者が集まることで、若手研究者の横のつながりを強化し、分野横断的な若手コミュニティが構築され、若手を中心としたサイエンスの発信につながることも期待されます。

今回の研究会は、東京大学本郷キャンパス山上会館で行いました。その理由として、会場を東京にすることで、各地からのアクセスの利便性が挙げられます。また、研究会の開催について広く周知をし、参加者を募ることも重要です。周知は、以下のいくつかの方法で行いました。まずは本研究会のホームページ (http://www.issp.u-tokyo.ac.jp/labs/sor/jssrr_wakate/index.html) を新たに開設いたしました。ホームページには、研究会の趣旨、プログラム、レジストレーション等のコンテンツを掲載しました。また、放射光学会誌の5月号と7月号に案内の記事を掲載いたしました。また、日本放射光学会、日本物理学会(領域3, 領域4, 領域5, 領域9)のメーリングリストも活用しました。

講演者の選定にあたっては、「ラッシュバ効果とトポロジカル絶縁体を様々なアプローチで観る」ということに主眼を置いておりますので、なるべく実験手法が偏らないように意識をしました。研究会では、代表者も含めて17名の方々をお招きし、ご講演をいただきました。図2に、講演内容を主な実験手法で分類した場合の分布(重複有り)を示しております。ここで、通常の ARPES に関しては、もはや一般的なツールになっており、多数の発表に含まれておりましたので省いております。SARPES が5件、光電子分光・吸収分光の円偏光二色性が3件、次世代光源・分光技術に関して3件、表面輸送が3件、走査トンネル顕微鏡 (STM) に関して3件、理論研究が3件とバランスのとれた内容となっております。特に、表面輸送や STM に関しての講演は、普段放射光を利用した分光実験をしている立場の者からみると異分野色が強いのですが、重要分野であることは間違いなく、当初の狙い通りになったと言えます。

プログラム編成では、関連性と全体の流れを考慮して5つのセッションに分類しました(表1)。具体的には、「ラッシュバ効果」、「トポロジカル絶縁体1, 2」、「スピン研究

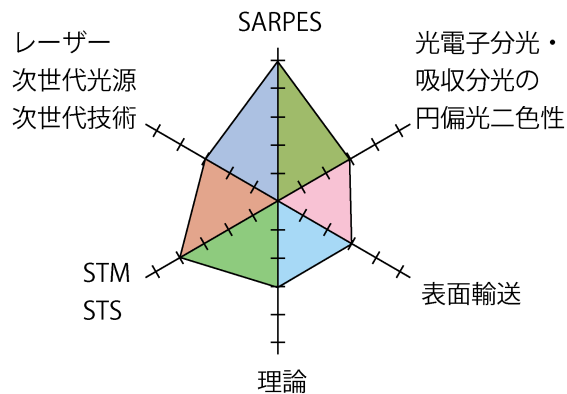


図2 講演内容を実験手法で分類したときの分布

のための分光技術の新展開」、「表面輸送とスピントロニクス」となっております。また、日本女子大の宮原恒昱教授には特別講演を依頼いたしました。さらに、韓国の浦項工大より Han Woong Yeom 教授、中国の上海交通大より劉燦華准教授をお招きし、国際色のある研究会となりました。

初日は、ラッシュバ効果のセッションからスタートいたしました。最初に、「半導体表面上でスピン偏極した金属的表面電子状態」と題しまして、研究会代表者の矢治が発表させていただきました。専門外の方も相当数いましたので、研究会のトップバッターとして、ラッシュバ効果と光電子分光について、基礎的な部分から最近動向まで幅広くお話をいたしました。次に、東北大の高山あかり氏に「高分解能スピン分解光電子分光による Bi 薄膜の Rashba 効果の研究」について発表していただきました。高分解能 SARPES により明らかにされた、典型的な重元素である Bi(111)面の特異なスピン構造についてお話をいただきました。近年格段に性能が上がった SARPES の重要な成果の一つと言えます。千葉大の坂本一之氏には「半導体表面上の特異なラッシュバ効果」についてご講演いただきました。固体表面では、従来のラッシュバ効果の理論だけでは説明できない特異なラッシュバ効果があります。このような「広義なラッシュバ効果」について、実験と理論の両面から丁寧にご解説いただきました。浦項工大の Han Woong Yeom 氏には、「Atomic scale wires on surfaces with giant Rashba effect」について発表をしていただきました。Yeom 教授は、固体表面に形成される一次元原子鎖について研究をされている、世界を代表する研究者の一人です。重元素を含んだ一次元原子鎖が示す巨大ラッシュバ効果の研究は大変興味深いものでした。

初日の第2セッションは、「トポロジカル絶縁体1」と題して行われました。このセッションの最初は、広島大の井村健一郎氏の「トポロジカル絶縁体表面におけるスピン Berry 位相と有限サイズ効果」でした。有効理論を用いた理論的研究で、様々な形状を持つトポロジカル絶縁体のスピン構造についてご講演をいただきました。今後、実験家

表1 本研究会のプログラム

一日目

区分	講演者	所属	タイトル
はじめに	矢治光一郎	東京大	
Rashba 効果	矢治光一郎	東京大	半導体表面上でスピン偏極した金属的表面電子状態
	高山あかり	東北大	高分解能スピン分解光電子分光による Bi 薄膜の Rashba 効果の研究
	坂本一之	千葉大	半導体表面上の特異なラッシュバ効果
	Han Woong Yeom	浦項工大	Atomic scale wires on surfaces with giant Rashba effect
トポロジカル絶縁体 1	井村健一郎	広島大	トポロジカル絶縁体表面におけるスピン Berry 位相と有限サイズ効果
	吉澤俊介	東京大	トポロジカル絶縁体 $\text{Bi}_{1-x}\text{Sb}_x$ 表面の走査トンネル分光測定
	佐藤宇史	東北大	トポロジカル絶縁体 $\text{Bi}_{2-x}\text{Sb}_x\text{Te}_{3-y}\text{Se}_y$ の角度分解光電子分光
特別講演	宮原恒昱	日本女子大	若手への提言—Rashba 効果, トポロジカル絶縁体の物理とその周辺

二日目

区分	講演者	所属	タイトル
スピン研究のための 分光技術の新展開	宮本幸治	広島大	Rashba 効果およびトポロジカル絶縁体の異方的電子スピン構造
	石田行章	東京大	時間分解および偏光依存レーザー ARPES でみるトポロジカル絶縁体
	松田 徹	東京大	次世代光源を活かした表面スピン研究の展開
トポロジカル絶縁体 1	野村健太郎	東北大	トポロジカル絶縁体の Dirac 表面状態における不純物効果
	叶 茂	広島大	Magnetic and non-magnetic impurities on the surface of topological insulator Bi_2Se_3 studied by STM, ARPES and XMCD
	宮脇 淳	理研	Pt の SX-ARPES : トポロジカル物質と円二色性の関係
表面輸送とスピントロ ニクス	八田振一郎	京都大	重元素吸着 Ge(111) 表面のスピン偏極状態と電気伝導
	江藤数馬	大阪大	トポロジカル絶縁体物質の輸送特性測定
	劉 燦 華	上海交通大	Searching for Majorana Fermions on Topological Insulator Films supported by Superconductor
総括	宮本幸治	広島大	

がどのようなことに注目してトポロジカル絶縁体を研究するとよいかという点についても、理論家の立場からご提案をいただきました。東京大の吉澤俊介氏には、「トポロジカル絶縁体 $\text{Bi}_{1-x}\text{Sb}_x$ 表面の走査トンネル分光測定」という題目でご発表いただきました。走査トンネル顕微分光法 (STS) を用いれば、ARPES では得ることができない、物質の非占有電子状態の情報までも得ることができます。講演では、 $\text{Bi}_{1-x}\text{Sb}_x$ だけでなく、最新新たに発見されたトポロジカル絶縁体 $\text{Bi}_{2-x}\text{Sb}_x\text{Te}_{3-y}\text{Se}_y$ の STS による最新の研究成果についてもお話いただきました。東北大の佐藤宇史氏には「トポロジカル絶縁体 $\text{Bi}_{2-x}\text{Sb}_x\text{Te}_{3-y}\text{Se}_y$ の角度分解光電子分光」と題してご講演をいただきました。一つ前の吉澤氏は $\text{Bi}_{2-x}\text{Sb}_x\text{Te}_{3-y}\text{Se}_y$ の STS についての講演でしたが、これを ARPES で観測したことになります。 $\text{Bi}_{2-x}\text{Sb}_x\text{Te}_{3-y}\text{Se}_y$ の組成比をチューンすることにより、一つの物質系でバルク絶縁性を保ちながらフェルミ準位を表面状態のディラック点に対して制御できることを、高分解能 ARPES により明らかにされました。これは、今後トポロ

ジカル絶縁体のデバイスへの応用を考える際の重要な成果であるといえます。

初日の最後には、日本女子大の宮原恒昱教授に「若手への提言—Rashba 効果, トポロジカル絶縁体の物理とその周辺」と題しまして特別講演をご依頼させていただきました。実は、昨冬に宮原教授とスキー旅行をご一緒させていただいたのですが、その際に、今回の若手研究会においてどうしても特別講演をしていただけないでしょうかと、私幹事が無理を申したわけですが、先生は快くお引き受け下さいました。我々若手研究者は、ラッシュバ効果やトポロジカル絶縁体の研究で沸きに沸いているわけですが、そのような若手研究者に対して、基本に立ち返って数々のご提言をしていただきました。先生は「大学学部レベルの物理」とおっしゃられておりましたが、ご講演はとて高度な内容まで発展していったと感じております。宮原教授にはご多忙中のところ、本若手研究会においてご講演をしていただき、心より感謝申し上げます。

二日目は、「スピン研究のための分光技術の新展開」と

いうセッションからスタートしました。このセッションは、今後、固体表面電子のスピン研究がどのように展開していくかを考える上で、とても重要なセッションとして位置付けておりました。まず始めに、本研究会の共同代表者である広島大の宮本幸治氏に「Rashba 効果およびトポロジカル絶縁体の異方的電子スピン構造」と題しましてご講演いただきました。従来のスピン検出器とは全く異なる原理を採用した、新しいタイプのスピン検出器を用いて得られた最新の結果にご紹介いただきました。また、今後の方針として、この新しいスピン検出器を用いた三次元スピン解析への展開などをご紹介いただきました。東京大の石田行章氏には、「時間分解および偏光依存レーザー ARPES でみるトポロジカル絶縁体」について発表をいただきました。近年急速に発展しているレーザーを用いた電子分光は、放射光と相補的な役割を持つ次世代分光として重要な位置付けとなります。講演では、レーザーのパルス特性を生かした時間分解光電子分光、偏光特性を生かした偏光依存 ARPES についてお話いただきました。またスピン流を光で制御する方法や非線形光電効果を利用した分光法についてもご紹介いただきました。東京大の松田厳氏には、「次世代光源を活かした表面スピン研究の展開」としてご講演を賜りました。今後、放射光がどのように進化し（第四世代放射光）、その進化を遂げた放射光源を利用すると新しく何がわかるか、そして表面スピン研究がどのように展開していくかについてお話していただきました。また、世界で取り組みが始まっている新しいスピン研究についてもご紹介いただきました。内容は多岐に渡り今後の展開を概観する意味でも非常に有意義なものでした。

二日目の第2セッションは、「トポロジカル絶縁体2」でした。東北大の野村健太郎氏には「トポロジカル絶縁体の Dirac 表面状態における不純物効果」についてご講演いただきました。不純物が入った際のトポロジカル絶縁体の表面状態について、時間反転対称性が保たれる場合と破られる場合に分けて、理論的にご解説いただきました。広島大の叶茂氏には「Magnetic and non-magnetic impurities on the surface of topological insulator Bi_2Se_3 studied by STM, ARPES and XMCD」という題目でお話をいただきました。トポロジカル絶縁体表面に磁性不純物をドーピングして、その表面構造、電子状態を詳細に観測されました。さらに、 Bi_2Se_3 上に Fe 原子を微量吸着すると、Fe の軌道磁気モーメントの極端な増大が XMCD より観測されたこともご報告いただきました。理研の宮脇淳氏には「Pt の SX-ARPES : トポロジカル物質と円二色性の関係」と題してご講演をいただきました。円偏光による軟 X 線角度分解光電子分光 (SX-ARPES) を用いて Pt のフェルミ面を測定すると、Pt の大きなスピン軌道相互作用による明瞭な二色性が観測されておりました。SX-ARPES が表面電子スピンを観測するための有力な手法となりうることを示されました。

本研究会の最後のセッションとなる、二日目第3セッションは「表面輸送とスピントロニクス」です。これまで、各種の分光法、STM、理論的手法からラッシュバ効果やトポロジカル絶縁体を観て参りましたが、これらの応用への展開を考える上では輸送現象の観測は欠かせません。京都大の八田振一郎氏には「重元素吸着 Ge (111) 表面のスピン偏極状態と電気伝導」の発表をお願いいたしました。八田氏は、固体表面におけるスピン輸送を測ることを目指し、独自に装置開発を行い、研究を推進しています。今回は、その第一歩として、Ge 基板上に単原子層の鉛やビスマスを吸着した表面の電気伝導測定についてお話をいただきました。阪大の江藤数馬氏には、「トポロジカル絶縁体物質の輸送特性測定」というお話をさせていただきました。 $\text{Bi}_{1-x}\text{Se}_x$ はバルクの伝導キャリアの寄与が多く金属的な振る舞いを示すが、 $\text{B}_{2-x}\text{Sb}_x\text{Te}_{3-y}\text{Se}_y$ では低温に向けて抵抗率が増大し、100 K 以下で表面状態の寄与のため抵抗率の上昇が飽和するという結果が示されました。八田氏、江藤氏いずれの結果も ARPES や第一原理電子状態計算と良い一致を示しており、まさにマイクロからマクロへということで、今後の展開がますます期待されます。最後の講演は、中国の上海交通大学より劉燦華氏をお招きし、「Searching for Majorana Fermions on Topological Insulator Films supported by Superconductor」というタイトルでご講演をいただきました。これは実験的に固体中でマヨラナ粒子を観測しようという試みです。超伝導体 NbSe_2 基板の上にトポロジカル絶縁体 Bi_2Se_3 , Bi_2Te_3 薄膜を成長させ、その表面構造と電子状態を STM, STS, ARPES を用いて研究されました。この系においてマヨラナ粒子が存在している可能性を感じさせるお話をしていただき、非常に興味深いものでした。

研究会の最後には、広島大の宮本幸治氏に研究会の総括をしていただきました。研究会で行われた講演の概要を振り返り、それを受けて今後の展望についてご意見を述べられました。研究会のトピックとしては、ラッシュバ効果とトポロジカル絶縁体に関してであったが、様々な手法を通してのアプローチがあったことで、より厚みのある議論ができたというご指摘もありました。今後、これらの若手研究者から次々と新しいサイエンスが発信されていくことが期待されます。

今回の研究会では、アンケートも準備し、参加者の皆様にご協力いただきました。会議終了後に受付にて回収をし、53%の方からご回答をいただきました。アンケートの結果を図3に示しております。設問1は、「参加者の身分を教えてください」というものでした。その結果、教授が11%、准教授が11%、助教が19%、博士研究員が14%、大学院生が28%、学部生が6%、その他が6%でした。助教、博士研究員、学生の割合を合わせると7割弱となり、若手研究会の名にふさわしい会議になったと思います。設問2の、「日本放射光学会の会員ですか」に対して

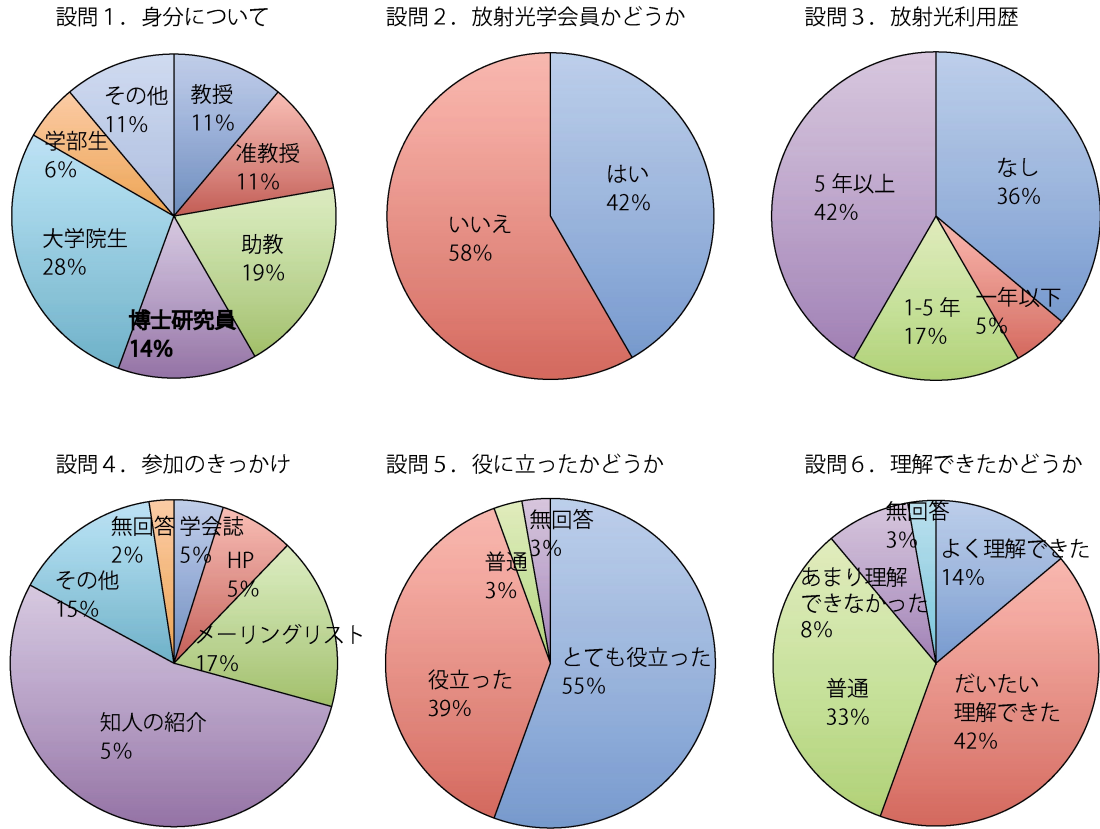


図3 本研究会に関するアンケート結果

は、放射光学会員が42%、非会員が58%でした。また、設問3の、「これまでの放射光利用経験年数を教えてください」に対して、5年以上の経験者が42%、1-5年が17%、1年以下が5%、なしが36%でした。設問2、3より、放射光ユーザーにだけでなく、他分野からも多数の方にご参加いただいたことが伺えます。分野横断的な研究会にするという本研究会の目的になかったものになったことをうれしく思います。設問4は、「本研究会開催をどのようにしてお知りになりましたか」というものでした。その結果、学会誌が5%、ホームページが7%、メーリングリスト（放射光学会）が10%、メーリングリスト（物理学会）が10%、知人の紹介が54%、その他が15%でした。その他では、Twitterというような媒体が挙げられておりました。設問5では、「本研究会は役に立ちましたでしょうか」という問いでした。結果は図に示している通りです。皆様より心温かいご回答をいただき、幹事として大変うれしく思っております。いただいたコメントをいくつか紹介させていただきますと、「理論の方の話が新鮮だった」、「この研究分野の動向がよくわかった」、「知らない領域を見ることができ、幅が広がった」などがございました。設問6は、「本研究会のわかりやすさについて」でした。多数の方に理解できたという回答をいただきました。講演者の皆様にわかりやすくご説明いただいたおかげであると存じま

す。この問いに対して頂戴したコメントを紹介させていただきますと、「講演者のスライド構成がわかりやすかった」、「噛みくだいた説明で、よくわかった」、「専門外だったので、事前に知識を入れておくべきだった」等がありました。

本研究会終了後に、参加者の方々から、多くのご意見、ご助言を頂戴いたしました。それらのうち、来年以降の若手研究会につながりそうなものをいくつかご紹介いたします。まず、若い人から多くあったのが、「若手研究会ということで気軽に参加できる」、「若手が発言しやすい雰囲気がある」というものでした。確かに、講演後の質疑応答では、若手がどんどん発言し、活発な議論がなされておりました。若手が積極的に研究発表をする場として、来年以降も継続的にこのような研究会が開催されることが期待されます。一方で、「ポスターセッションがあると良いのでは」という意見もありました。今回の若手研究会ではポスターセッションはありませんでしたが、例えば前回の第3回若手研究会ではポスターセッションも行い、活発な議論の場になったと伺っております。ポスターセッションを取り入れていけば、さらに多くの方々、特に学生の皆さんが発表する機会が増え、より若手研究会らしくなっていくかもしれません。次回の幹事の方には是非ご検討いただければと存じます。また、このような若手研究会のプロシーディ

ングスを学会誌の特集号として製作すると良いのではという意見もありました。

今回、私は初めてこのような研究会を企画させていただきました。これまでは、研究会に参加する側だけだったのですが、初めて企画する側になりとてもいい経験になりました。当初は不安も大きかったのですが、多くの方々にご助力をいただき、無事に終了することができました。研究会では、一つのテーマに対して様々な視点からの研究動向が知りたいという思いから、それを意識した構成にしました。その結果、放射光若手研究会ということでしたが、その垣根を越え、多数の放射光非ユーザーの方々にもお集りいただきました。また、海外からも著名な研究者をお招きし、国際色のある研究会となりました。固体表面の電子スピンの研究は、今後ますます発展していくと考えられます。そのときに、分野横断的な幅広い視点を持ちながらそれを放射光科学にフィードバックする、さらには放射光を利用したからこそという新しいサイエンスが発信されることを期待しております。

本研究会開催にあたって、多くの方々にご支援をいただきました。まず、本研究会を企画する機会を与えて下さいました日本放射光学会関係者に感謝申し上げます。共同代表者である広島大学放射光科学研究センターの宮本幸治氏には、講演者との窓口としてご尽力をいただきました。放射光学会事務局の佐藤亜己奈さんには、講演者への旅費の支払い等の会計、研究会当日の受付、各種事務作業で大変お世話になりました。東大物性研と日本女子大の学生アルバイト4人には、会場設営、受付業務、要旨集の印刷、写真撮影などでお世話になりました。メーリングリスト配信に当たっては、東京大学物性研究所の小森文夫教授と広島大学大学院理学研究科の木村昭夫准教授に大変お世話になりました。最後に、放射光学会行事幹事である東大物性研の松田厳准教授には、研究会全体の運営に関しまして、親身にご相談にのっていただきました。本若手研究会が無事に終了できましたのも、皆様の温かいご助力のおかげでございます。本研究会に関わっていただきました全ての方に厚く御礼申し上げます。