

# 研究報告書

-2016年度研究会活動-

第24回 研究報告会

2017年7月11日

**ATI** 公益財団法人 **新世代研究所**  
FOUNDATION ADVANCED TECHNOLOGY INSTITUTE

## スピントロニクス研究会

### ナノスピン変換科学研究

委員長 大谷義近  
東京大学物性研究所 教授

#### 1. 研究構想

これまでのスピントロニクス研究の中で、巨大磁気抵抗効果やトンネル磁気抵抗効果に代表されるスピン依存伝導からスピン流という角運動流の概念が生まれた。さらに最近では、角運動量保存則に基づくスピンを媒介とした、電気、光、音、振動、熱の相互変換現象であるスピン変換に関する研究がスピントロニクス研究の主要部分を占めている。第2期では、このナノスピン変換科学を主題として研究会を企画・開催している。最終的には研究会での議論や情報交換を通じて、スピン変換現象を伝導電子スピン、局在スピン、核スピン、フォトン、フォノンなど多様な粒子・準粒子が複合的に絡み合ったナノスピン変換科学として物理体系を構築することを目指している。2014年から本研究会の会員が中心となって文部科学省科研費新学術領域研究「ナノスピン変換科学」プロジェクトを立ち上げ、密に連携しながら研究会を運営している。

本研究会では、上述のスピン変換物性に関わる研究を磁氣的、電氣的、光学的、熱・力学的スピン変換機能に細分化し、それぞれの分野で世界を先導する我が国の研究者が構成メンバーである。研究会員から選出した企画委員を中心にして、研究会を企画・開催し、幅広い分野から招聘する講演者と密に議論を交わす事により、スピン変換現象を実験と理論の両面から深く理解し、最終的には新しいスピントロニクス機能を提言することを本研究会の目標としている。

このように本研究会は研究に関する議論の場を提供するだけでなく、本研究会のメンバーを含むスピントロニクスにかかわる研究者コミュニティの拠点形成にも学会活動とともに一翼を担っている。2016年度は、このプロジェクト発足の2014年からちょうど3年目となり、中間評価を終えたところである。幸い、参加メンバーの努力のおかげで、高評価を頂いたが、今後さらに本研究会とともに活動を盛り上げていきたい。

#### 2. 2016年度の研究活動の概要

2016年度は、2回の研究会を開催した。第1回は6月2日に、最近スピン変換科学の分野で研究が活発に行われている「界面相互作用を用いたスピン流・電流相互変換物性(実験及び理論)」をテーマにした研究会とした。現在進行中のスピン流・電流変換に関わる実験と理論を対比するようにプログラムを組むことにより、充実した議論を実現することが出来た。

昨年度は、我々の研究会メンバーが大きくかかわっている新学術領域研究の中間評価の年であったためしばらく間をおいてしまったが、年明け 2017 年 2 月 17 日に光誘起スピントリニクス現象に注目した第 2 回研究会を開催した。円偏光した光は、一種のスピントリニクスとみなせることから、光誘起マグノン伝搬、光・スピントリニクス変換や半導体スピントリニクスレーザー等の新しい現象に関する紹介が実験と理論の両面からなされ、充実した議論が行われた。以下に両研究会の概要を纏める。

第 1 回 2016 年 6 月 2 日

会場：ガーデンシティ御茶ノ水

テーマ：界面相互作用を用いたスピントリニクス・電流相互変換物性（実験及び理論）

13:30-14:15 石井 史之（金沢大学）

「酸化物薄膜・界面における Rashba 効果の第一原理計算」

表面・界面での電場に起因したスピントリニクス軌道分裂を引き起こす Rashba 効果は、スピントリニクス型電界効果トランジスタなどのスピントリニクス応用の観点から、半導体界面（III-V 族量子井戸構造）二次元電子ガス (2DEG) 等において多く調べられてきた。近年、Rashba 効果はスピントリニクス-電流変換現象の起源としても注目されている。Rashba 効果の大きな系としては、Bi や Bi 化合物が知られており、Bi 原子の深いポテンシャルに起因した大きな Rashba 係数が報告されている。他方、酸化物は強い内部電場を反映して大きな Rashba 係数を示すと期待されることから、密度汎関数理論に基づく第一原理電子状態計算手法を用いて、ZnO 薄膜、LaAlO<sub>3</sub>/SrTiO<sub>3</sub>界面、SrTiO<sub>3</sub>薄膜、Bi<sub>2</sub>O<sub>3</sub>薄膜等について、Rashba 係数を系統的に調べた結果が紹介された。

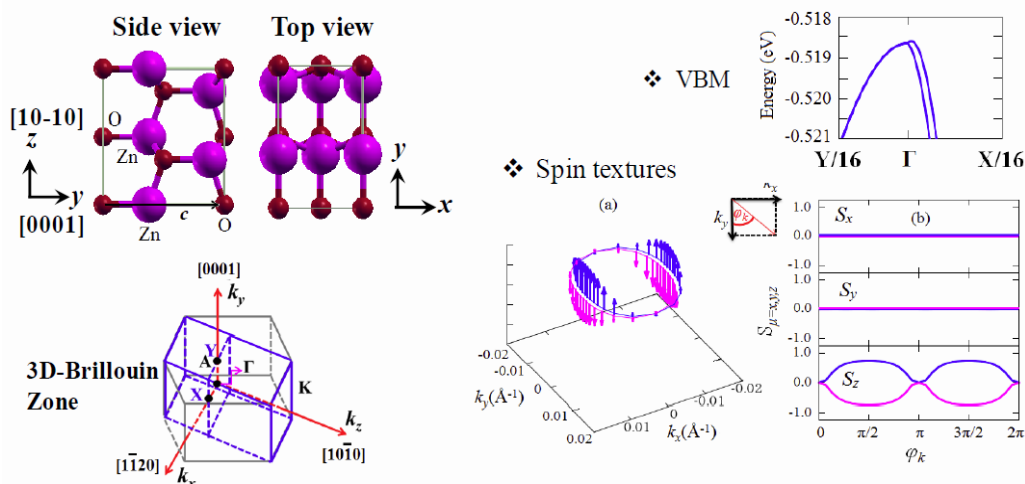
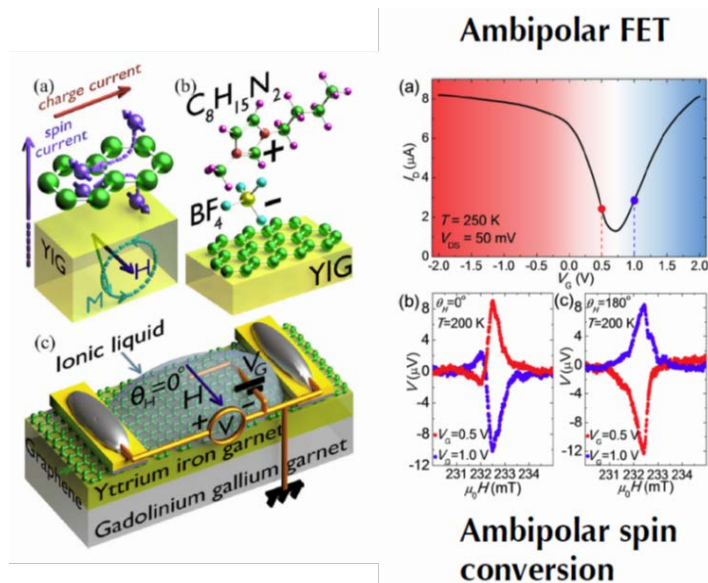


図 1. ZnO の結晶構造と計算によって得られたフェルミ面でのスピントリニクス偏極状態

14:15-15:00 白石 誠司 (京都大学)

「重元素・軽元素を用いた表面・界面スピノービトロニクス」

固体中のスピノービ相互作用を活用したスピノービ制御は近年スピノービトロニクスとして大きな注目を集めている。スピノービ相互作用は重い元素ほど顕著になるため、これまではPtやTa、Wなどを中心に研究が進められてきており、更に最近ではトポロジカル絶縁体研究の勃興に伴いBiも大きな関心を集めている。重い元素におけるスピノービトロニクスの好例は逆スピノービホール効果(ISHE)であるが、最近では異種接合界面における強いラシュバ場による逆ラシュバ=エーデルシュタイン効果(IREE)という新しい効果も観測されBi/AgやBi/Cuの系が盛んに研究されている。このIREEは空間反転対称性の破れた場で発現することから必ずしも重元素の導入は必須ではなく、そのため最も軽い元素の一つである炭素からなるグラフェンなどの2次元材料はIREEとISHEの相関を議論する興味深い材料ステージとなりうる。



以上の背景を考慮して講演者が最近取り組んでいるBi/YIG、Bi/Ag/YIG、BiSbTeSe、単層グラフェン/YIG、単層カーボンナノチューブ YIG などの重元素と軽元素という両極端な材料群におけるスピノービトロニクスをテーマに、その物性やスピノービ相互作用によるスピノービ変換機構が紹介された。

15:30-16:15 近藤 浩太 (理研)

「スピノービ分裂した表面および界面状態を用いた電流-スピノービ流変換」

トポロジカル絶縁体表面やラシュバ効果が働く界面では、スピノービ分裂した電子バンドが光電子分光測定により観測されている。近年、このような表面や界面を利用したスピノービトロニクスデバイスが数多く提案され、表面科学・スピノービトロニクスの両分野で注目

を集めている。その中でも、スピントロクスデバイスの駆動源となるスピンの生成を、表面や界面で行う”界面電流-スピン流変換現象(Edelstein 効果)”に着目して多くの研究が行われている。本講演では、界面での電流-スピン流変換メカニズムを紹介されたのちに、最近の結果であるトポロジカル絶縁体の表面状態を用いた電流-スピン流変換とラシュバ効果起因と考えられる金属/酸化物界面における電流-スピン流変換に関する実験結果が紹介された。

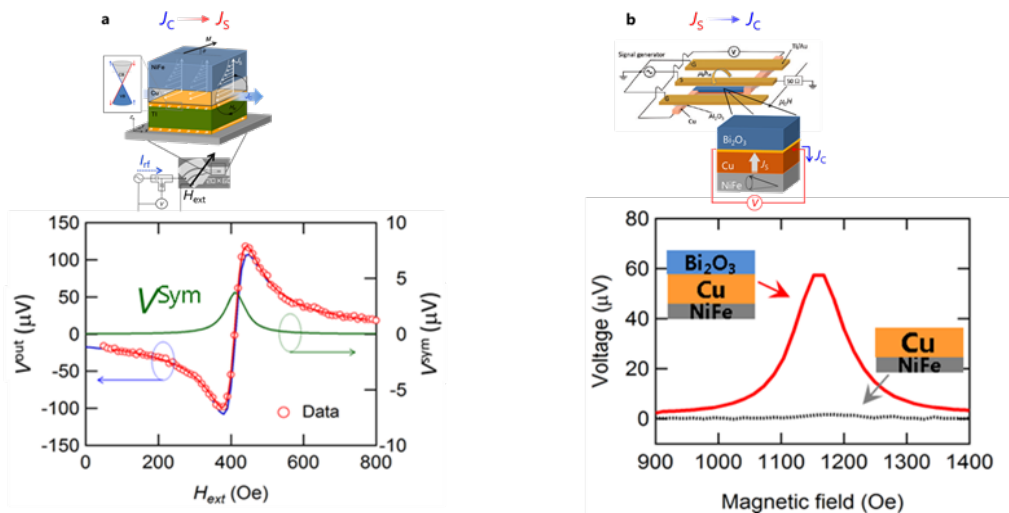


図3 素子構造および界面電流-スピン流変換現象の測定結果 (a) トポロジカル絶縁体を用いた電流-スピン流変換 (b) 金属/酸化物界面におけるスピン流-電流変換

16:15-17:00 大矢 忍 (東京大学)

「エピタキシャル単結晶薄膜およびその接合界面を生かしたスピントロクス」

スピン自由度を生かした新しい半導体デバイスを実現する上で、強磁性体/半導体界面の結晶性を制御して、界面でのスピン散乱を低減させることは極めて重要な課題である。講演者は格子整合性の良い様々なエピタキシャル単結晶強磁性ヘテロ界面の開拓と、それらにおける新規物性探索を行ってきた。まず、そのような界面を実現できるひとつの材料として研究を行っている強磁性半導体について、室温強磁性実現に向けた新規材料の開拓、量子ヘテロ構造で観測された新規物性や、縦型スピントランジスタの基礎動作実証への試み等が紹介された。また、スピン流デバイスへの応用が期待され、半導体と格子整合性の良いトポロジカル結晶絶縁体 SnTe についても、スピンプンピングを用いたスピン注入の研究が紹介された。

第2回 2017年2月17日

会場：ガーデンシティ御茶ノ水

テーマ：多様な光学的スピン変換現象

13:30-14:15 佐藤 琢哉 (九州大学)

「逆ファラデー回転、マグノン伝搬制御」

近年、光パルスを用いた磁化制御が精力的に研究されている。非熱的な磁化制御の方法の一つが逆ファラデー効果を用いたものであり、透明媒質に円偏光パルスを照射することで、媒質中に光線の進行方向に平行に有効磁場パルスが生じ、スピン波が誘起される。有限の大きさを持つ磁性体中では、サンプル端面でのスピン波の反射や磁性体のないギャップを越えるスピン波の伝播などが起こりうる。

講演者は、CCD カメラを用いた時間分解ポンプ・プローブスピン波イメージング法により、光で誘起されたスピン波波束がギャップを透過する様子を時間分解、位相分解してイメージングした。試料として厚さ 110  $\mu\text{m}$  のビスマス添加希土類鉄ガーネット単結晶試料を用いた。パルス幅約 150 fs の円偏光ポンプパルスを用いて逆ファラデー効果によって試料を励起し、時間遅延されたプローブ光パルスのファラデー回転を測定した。幅約 40~350  $\mu\text{m}$  のギャップを持つ試料の左側で励起されたスピン波が右側に透過する様子の詳細な観測結果を基にスピン波の透過率および位相に対するスピン波の波長、ギャップ幅の関係について考察した結果が報告された。

14:15-15:00 小川 直毅 (理研)

「トポロジカル絶縁体の光スピン流生成」

ラシュバ型スピン分裂を示す半導体中やトポロジカル絶縁体の表面状態においては、スピンの向きが運動量に直交するスピン-運動量ロッキング現象が発生する。このような試料系に電流を印可するとスピン蓄積が起これ (Rashba-Edelstein 効果)、トポロジカル絶縁体表面から隣接物質へのスピン流注入などが可能となる。もしこのような電子系の電流をパルス光で制御できれば、原理的にはフェムト秒スケールでの光誘起スピン注入が可能となる。これまで、トポロジカル絶縁体においても円偏光ガルバニック効果を用いた光電流制御が報告され、試料調整による最適化も実証されてきたが、その発生効率は比較的小さな値にとどまっている。講演者等は、トポロジカル絶縁体に磁性元素をドーピングし時間反転対称性を破ることによって、表面のディラック電子状態を変調し(図 4)、より大きな光電流を発生することに成功した。中赤外波長における表面電子状態の選択励起によって、理論予測に近い値の光電流とその磁場制御ができることが示された。表面電子による光電流は光学遷移程度の時間で発生するとされることから、今後、積層デバイスにおいて高速のスピン注入の実証が期待される。

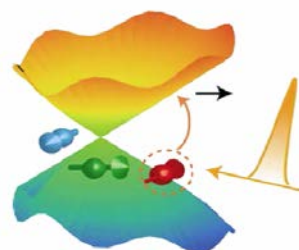


図 4 磁性トポロジカル絶縁体表面における光電流発生の様式図



15:30-16:15 Ka Shen (デルフト工科大学)

「光誘起マグノン伝搬の理論」

超高速レーザー光を強磁性薄膜に照射すると、逆ファラデー効果や熱によって誘起されるコヒーレントな磁化ダイナミクスの理論研究の成果が報告された。講演では、磁気弾性結合を媒介して発生するスピン波とフォノン間の運動変換が角運動量の効率的な伝搬を可能にしていることが示された。その結果、静磁気的な結合の異方性がスピン波伝搬の角度依存性を与えること、特にその形態が熱的なものと比熱的なもので大きく異なることが理論的に示された。実験条件にも大きく依存するが、この理論研究の結果が、これまで未解決の問題とされてきた円偏光誘起超高速磁化ダイナミクスの発現機構を理解する上で重要な役割を果たすことが報告された。

16:15-17:00 揖場 聡 (産総研)

「円偏光で発振する半導体スピンレーザーの開発」

近年、半導体中の電子スピン自由度を積極的に利用した半導体レーザー“スピンレーザー”が注目を集めている。スピンレーザーは円偏光のコヒーレント光を出力できるため、偏光-磁性体磁化間での情報転写や制御、また、カイラル物質のセンシングなど次世代光源として期待が大きい。これらの応用ではレーザー出力光として高い円偏光度( $>0.9$ )が必要であるが、先行研究では低温(50 K)においても円偏光度が0.3程度に留まっていた。高い円偏光度を持つスピンレーザーを実現するためには、磁性電極によるスピン注入部でのスピン注入効率の向上だけでなく、スピン・円偏光変換が行われる活性層のキャリア再結合寿命とスピン緩和時間の比率も重要である。また、一般的な半導体レーザーと同様に活性層として優れた発光特性や表面・界面平坦性も要求される。講演者のグループは活性層の特性向上を目指し、長い電子スピン緩和時間が期待できる(110)

面 GaAs 量子井戸の開発に取り組んできた。その結果、分子線エピタキシー法による系統的な結晶成長実験を通して、一般的な(100)面 GaAs 試料と同程度の表面平坦性を得るとともに、発光特性・スピン特性の大幅な向上を達成した(図5)。本成果により(110)面 GaAs 量子井戸を利用した高性能なスピンレーザーの実現が期待される。

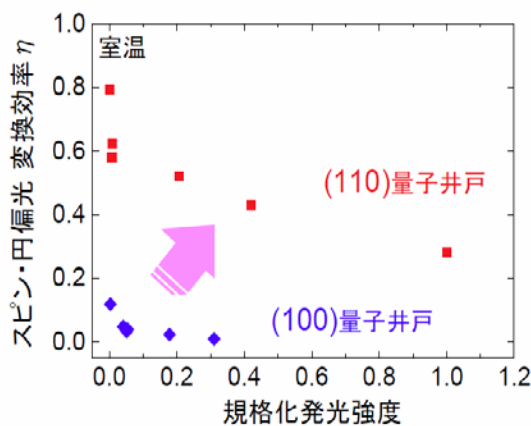


図5 結晶成長条件を変えた試料のスピン・円偏光変換係数と規格化発光強度

### 3. まとめと今後の計画

上述したように、2016年度は2回の研究会を開催した。第1回は6月2日に、最近のスピン트로ニクス分野で研究が活発に行われている「界面相互作用を用いたスピン流・電流相互変換物性（実験及び理論）」をテーマにした研究会とした。現在進行中のスピン流・電流変換に関わる実験と理論を対比するようにプログラムを組むことにより、充実した議論を実現することが出来た。昨年度は我々の委員会メンバーが大きくかかわっている新学術領域研究の中間評価のヒアリングが9月であったため研究会の開催を年内中にすることが出来ず、第2回は年明け2017年2月17日に、光誘起スピン変換現象に注目した研究会を開催した。円偏光は、一種のスピン流とみなせることから、光誘起マグノン伝搬、光・スピン流変換や半導体スピンレーザー等の新しい現象に関する紹介が実験と理論の両面からなされ、活発な議論が行われた。



第1回研究会@ガーデンシティ御茶ノ水の様子

2017年度は、既に4月14日に第1回研究会を「ナノスピン変換科学のこれから」と題して新学術スピン変換科学と共催で、公募研究班の第2期採択課題の発表会として開催した。今後も、可能ならば、新学術の研究会と共催で10月と年明け2月ごろ、合わせて2回のスピン트로ニクス研究会の開催を考えている。このような研究会の開催形態をお認め下さった伊達理事長にこの場を借りて感謝と御礼の意を表す。話題として昨年度網羅できなかった「反強磁性スピン트로ニクス」と「超伝導スピン트로ニクス」の2つのトピックスを考えている。



## 研究会開催記録

【第1回】2016年6月2日（木）御茶ノ水

テーマ：「界面相互作用を用いたスピン流・電流相互変換物性（実験及び理論）」

1. 「酸化物薄膜・界面における Rashba 効果の第一原理計算」  
石井 史之（金沢大学）
2. 「重元素・軽元素を用いた表面・界面スピンオービトロニクス」  
白石 誠司（京都大学）
3. 「スピン分裂した表面および界面状態を用いた電流-スピン流変換」  
近藤 浩太（理研）
4. 「エピタキシャル単結晶薄膜およびその接合界面を生かしたスピントロニクス」  
大矢 忍（東京大学）

【第2回】2017年2月17日（金）御茶ノ水

テーマ：「多様な光学的スピン変換現象」

1. 「逆ファラデー効果を用いたマグノン生成と伝播制御」  
佐藤 琢哉（九州大学）
2. 「トポロジカル絶縁体の光スピン流生成」  
小川 直毅（理研）
3. 「Laser-Induced Spatiotemporal Dynamics of Magnetic Films」  
Ka Shen（デルフト工科大学）
4. 「円偏光で発振する半導体スピンレーザの開発」  
揖場 聡（産総研）

## スピントロニクス研究会員名簿

大谷 義近	東京大学 物性研究所ナノスケール物性研究部門	教授 研究会委員長
前川 禎通	日本原子力研究開発機構 先端基礎研究センター	センター長
大野 英男	東北大学 電気通信研究所	所長・教授
小野 輝男	京都大学 化学研究所 材料機能化学研究系4磁性体化学領域	教授
門脇 和男	筑波大学 藻類バイオマス・エネルギーシステム開発研究センター 兼、数理物質系	副センター長・教授
齊藤 英治	東北大学 材料科学高等研究機構	教授
新庄 輝也	京都大学	名誉教授
鈴木 義茂	大阪大学大学院 基礎工学研究科物質創成専攻	教授
高梨 弘毅	東北大学 金属材料研究所	所長・教授
永長 直人	理化学研究所 創発物性科学研究センター	副センター長・教授
木村 崇	九州大学 大学院 理学研究院 物理学部門	教授
福岡 康裕	九州工業大学 若手研究者フロンティア研究アカデミー	准教授
三谷 誠司	物質・材料研究機構 環境・エネルギー材料部門	グループリーダー
白石 誠司	京都大学大学院 工学研究科電子工学専攻	教授
安藤 康夫	東北大学大学院 工学研究科応用物理学専攻	教授
水上 成美	東北大学 材料科学高等研究機構	教授
多々良 源	理化学研究所 創発物性科学研究センター	チームリーダー
大岩 顕	大阪大学 産業科学研究所	教授
村上 修一	東京工業大学 理学院物理学系	教授
新見 康洋	大阪大学大学院 理学研究科 物理学専攻	准教授

2017年3月現在