

研究報告書

-2015年度研究会活動-

第23回 研究報告会

2016年7月13日



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 教授

1. 研究構想

新しいステージに入った本スピントロニクス研究会の主テーマは、ナノスピン変換科学、すなわち、スピンを媒介とした、電気、光、音、振動、熱の相互変換現象の科学である。具体的には、このような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。

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を委員に迎えた。委員内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。

2. 2015年度の研究活動の概要

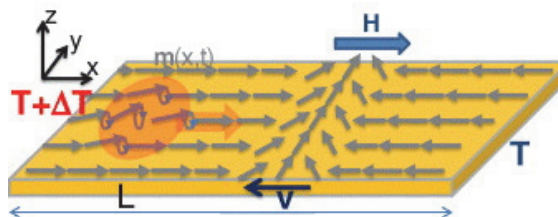
2015年度は、当初の計画以上の3回の研究会を開催することができた。第1回研究会では、東大物性研究所と新学術領域研究ナノスピン変換科学が共催した国際会議“New Perspectives in Spintronic and Mesoscopic Physics (NPSMP2015)”で来日中のTserkovnyak教授(UCLA)とTsymbal教授(ネブラスカ大)にお越しいただき、それぞれ、熱誘起スピン流とトンネル異方性磁気抵抗効果についてご講演いただいた。以下に研究会の概要を纏める。

2.1 第1回スピントロニクス研究会(2015年6月17日 TKP ガーデンシティお茶の水) テーマ: New Perspectives in Spintronic and Mesoscopic Physics

● Prof. Yaroslav Tserkovnyak (UCLA)

「Thermally-induced spin transport in magnetic systems」

最近のスピントロニクスの分野で注目されている熱流とスピン流の相互作用に関する理論的な考察が丁寧に説明された。強磁性絶縁体と常磁性金属の接合に於いて熱的



(図1) 温度勾配によって誘起されるマグノン流がスピントルクを通じて磁壁駆動を引き起こす概念図。

に励起された均一な磁化の運動から生成されるマグノンだけでなく、不均一な磁化の運動から生じる不均一マグノンの輸送とスピン流の相互作用について詳細な議論がなされた。これにより図1に示すような磁壁の熱流による駆動も可能となるだけでなく、逆に磁場を印加して磁壁を駆動することで熱流を誘起することも可能となることが示された。

- Prof. Evgeny Y. Tsymbal (University of Nebraska, Lincoln)

「Tunneling anisotropic magnetoresistance driven by interface resonant states」

トンネル異方性磁気抵抗効果 (TAMR) はスピン軌道相互作用によって発現する磁化方向と電流の方向との相対角度に依存して変化する現象である。良く知られているトンネル磁気抵抗効果 (TMR) と比べ 1/100 程の小さな効果であるが、第一原理計算によるマテリアルデザインの手法を用いて、最適素子材料と構造が設計できれば TMR に新しい機能性を付加することが可能になる。この目的で Fe (001) 面と非磁性金属のトンネル接合と $\text{La}_{0.7}\text{Sr}_{0.3}\text{MnO}_3$ (LSMO) electrodes と SrTiO_3 (STO) からなる TMR についての計算結果が報告された。いずれの場合も TAMR 効果は、スピン軌道相互作用により界面準位に誘起される軌道混成がその大きさを決めていること、また、LSMO と STO のトンネル接合では 500% に及ぶ TMR が期待されることが説明された。



2.2 第2回スピントロニクス研究会(2015年12月15日 TKP ガーデンシティお茶の水)

テーマ：流体を用いたスピン流生成とスピン流とスピン揺らぎの相関物性

- 松尾 衛 (日本原子力研究開発機構先端基礎研究センター)
「流体運動を用いたスピン流生成理論」

● 高橋 遼（東北大金属材料研究所）

「液体金属流を用いたスピン流生成実験」

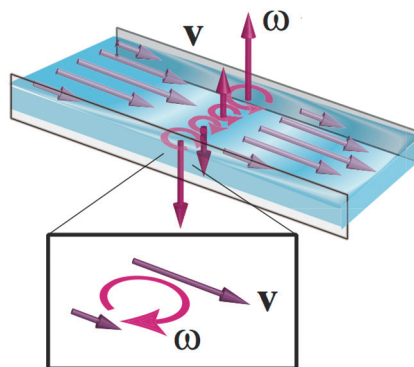
スピン流生成の研究はこれまで主に個体を用いて行われてきた。上述の2つの講演では、電子スピンと周囲の物体の振動や回転運動との相互作用に関する理論及び実験研究について丁寧な解説がなされた。最初の講師の松尾氏は物体中を流れるスピンの現象を理論的に研究し、液体金属の流れの中に電子のスピン流を生み出す方法を見いだした。具体的には、液体金属を細管に流すと、管の内壁と液体金属の間の摩擦によって、液体金属中に渦運動が発生する（図2）。この渦の強さは、管の内壁で最大であり、内壁から管の中心に向かって弱まる。このような渦運動の分布によって、液体金属中の電子スピンの密度分布が影響を受け、渦運動の強いところから弱いところに向かって、スピン流が流れること、また、管の内壁から中心に向かって生成されたスピン流は、さらに液体金属中でスピンホール効果により、管に沿った方向に電圧を発生することを理論的に明らかにした。

続く高橋遼氏の講演では、水銀やガリウム合金を用いた実験手法の詳細が説明された。直径数百ミクロンの細管に液体金属を流す際に生じる液体金属の渦運動を用いて、その液体金属中にスピン流を生み出し、その結果生じる100ナノボルト（1000万分の1ボルト）の電気信号を取り出すことに世界で初めて成功した。この実験で示された出力電圧は100ナノボルトと微弱だが、この手法はタービンや磁石といった外部装置が不要なため小型化が可能であるとのこと。さらなる発展が期待される。

● 新見 康洋（大阪大学大学院理学研究科）

「磁気揺らぎのスピン流への効果」

後半部の新見氏の講演では、スピングラス合金 CuMnBi のスピンホール効果についての実験が紹介された。この3元系金属は、強いスピンホール効果を示す Cu-Bi 希薄合金を Mn でドーピングしたものである。これによりこの系は局在スピンを有し、スピングラス特性とスピンホール効果の両方を兼ね備えた磁気特性を示す。この合金でスピン吸収法により、スピングラス温度 T_g よりも高温側から低温側まで系統的にスピンホール効果が測定された。その結果、スピングラス温度 10 K よりも十分高い温度でも Cu-Bi 希薄



（図2）液体金属流の流速分布。流速は管の中心で最大であり、そこから管壁に向かって弱まっていく。このように場所ごとに流速の差があるために、渦運動 ω （オメガ）が発生する。この渦運動の強さは、流速の差が最も大きい管内壁付近で最大となり、管中心ではゼロになる。

合金で観測されたのと同じ大きさのスピホール角が測定されること、またスピングラス温度より十分高い温度 $4T_g$ からスピホール角が減少し、 $0.5T_g$ では $1/7$ まで減少することを実験的に発見した。また、これらの効果が相対的なスピンのダイナミクスを考慮したモデルで説明できることを説明した。さらにこれらの結果からスピホール効果を用いたスピン揺らぎの高感度計測への応用が提案された。

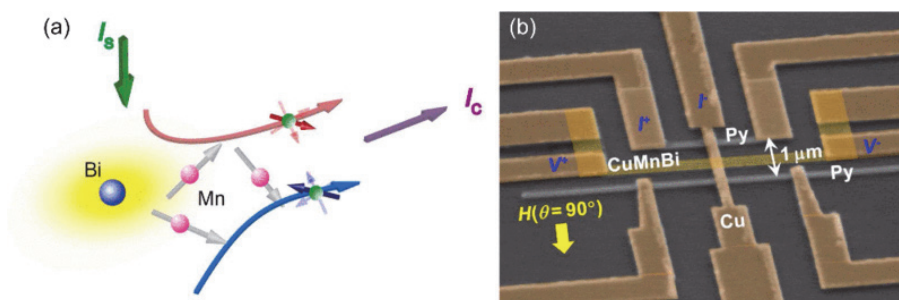


図3 (a)CuMnBi₃ 原型合金中スピホール効果の概念図。スピン流 I_s はBi サイトでの散乱により電流 I_c に変化される。伝導電子スピンの向きはランダムに配向したMnの巨磁モーメントとの相互作用により乱雑化される。(b)測定に用いたスピホール効果測定用の素子の電子顕微鏡像と端子配置の説明。

2.3 第3回スピントロニクス研究会(2016年3月4日 TKP ガーデンシティ御茶ノ水) テーマ：スピン変換機能設計

- 石井 史之 (金沢大学)

「異常熱電効果の第一原理的研究」

省エネ促進が求められる今日、未利用熱の有効利用を実現する熱電変換の普及が望まれる。材料レベルで高効率化を図るには、熱起電力の大きさを示す係数(対角：ゼーベック係数 S , 非対角：ネルンスト係数 N)を増大させることが特に重要である。従来は、 S の寄与のうち対角伝導度のフェルミエネルギー ϵ_F 依存性によって規定されるものに注目した研究が主であった。石井氏は、高効率化を模索する新たな方向性として、異常ホール効果による非対角伝導度の ϵ_F 依存性が規定する異常ネルンスト効果が大きな S や N を生む系の物質デザインをめざしている。このアプローチの最初の適用例として、スピントロニクス分野で注目される“スカーミオン結晶”のモデルについて興味深い結果が得られたので紹介された。また現実の物質での巨大な異常熱電効果の可能性が議論された。

- Oleg Tretiakov (東北大学金属材料研究所)

「Dynamical and Thermal Properties of Antiferromagnetic Skyrmions」

スピントロニクスでも最も注目されている機能の一つが1ビットの記録単位となる微

小さな磁気構造の電流駆動である。Tretiakov氏は、最近注目されているジャロシンスキー・守谷相互作用を有する強磁性体中に生じるスカーミオン構造の電流駆動に関する研究を行っている。本講演では、特に特殊な反強磁性スカーミオン構造に注目し、従来のスカーミオンと比較して漏れ磁束を生じないことから駆動速度も速く、また速度ベクトルに横向き成分がないことが示された。

- 宮原 慎 (福岡大学)

「マルチフェロイック物質におけるスピン波スピン流」

マルチフェロイック物質は、強誘電性と(反)強磁性が共存した物質であり、電気分極とスピンの強い結合を示す。こうしたマルチフェロイック物質の典型例として、らせん磁性体があり、スピンと電気分極の結合により、電場活性なスピン波励起(エレクトロマグノン過程)が存在することが知られている。宮原氏により、理論的に明らかになった外部磁場中のらせん磁性体における磁場活性かつ電場活性なスピン波励起の特異な性質が紹介された。

- 小野田 繁樹 (理化学研究所)

「量子スピン液体におけるスピン変換」

電子状態の特性を利用して、エネルギーや情報を効率よく物質に蓄積し、電磁波や熱などの異なる形態で物質から外部に効率よく取り出す原理を与えることは、物性理論の重要なテーマのひとつである。電子状態にアクセスするにはコヒーレンスをもった準粒子の励起・輸送を活用することが多い。特に、磁性絶縁体(Mott絶縁体)は、金属・半導体での電子輸送・励起に付随して生じる散逸が大幅に抑制されるという特長をもつ。磁性絶縁体で生じる準粒子は、磁気秩序に伴ってコヒーレンスを示す集団的スピン励起子、マグノンだけではない。絶対零度まで磁気秩序を示さない量子スピン液体系においては、スピン励起はコヒーレンスを示さない一方、スピン量子数を1/2だけ変える、分化した準粒子がコヒーレンスを示す。この準粒子はスピノンと呼ばれている。

小野田氏は、上述のスピノンが発現する舞台としてパイロクロア磁性絶縁体 $R_2B_2O_7$ に注目して行った理論研究を紹介した。この系は、頂点を共有して繋がった正四面体のその各頂点に希土類元素 $R = Pr, Tb, Yb$ が位置し、 R^{3+} イオンの磁気二重項のモーメントが正四面体の中心方向に強い容易軸磁気異方性を示す。この系では、スピノンがエネルギー分散を持ち、熱・スピン輸送に寄与する。理論的には、このスピノンはクーパ対にも見立てることが可能であり、電磁気学での光子励起に対応する集団磁気励起がギャップレス励起として出現する。これらの励起子に期待されるバリスティック輸送、共鳴現象に関する理論が紹介された。特に、 $Yb_2Ti_2O_7$ では、スピノンがボーズ凝縮してギャップレス励起が消失した強磁性秩序を極低温で示すことが実験・理論から示唆されて

いること、超伝導におけるマイスナー効果の磁氣的類似現象が期待されることが紹介された。この場合に生じるスピノンのスーパーカレントと位相コヒーレンスを用いることで、ナノ接合系で低散逸の革新的スピン干渉効果、スピン流・熱流変換等の原理が提案された。

3. まとめと今後の計画

上述したように2015年度は、第1回研究会としては、6月17日に東大物性研究所滞在型ワークショップと「ナノスピン変換科学」が共催する国際シンポジウム“New Perspectives in Spintronic and Mesoscopic Physics 2015”で来日された外国人研究者のYaroslav Tserkovnyak氏 (UCLA) と Evgeny Y. Tsymbal氏 (University of Nebraska) に熱誘起スピン伝導およびトンネル異方性磁気抵抗効果について講演をしていただいた。次に、最近新しく発見されたスピン変換現象に着目して、流体を用いたスピン流生成とスピン流とスピン揺らぎの相関物性についての研究会を開催した。当初の計画では、2回の開催を予定していたが、本委員会の企画委員で新学術領域ナノスピン変換科学のスピン変換機能設計班班長の村上氏から公募理論班の成果報告会をスピントロニクス研究会として開催してはとの提案を受け、伊達理事長にお願いしたところ、お認め下さり、実験家からのフィードバックも得られる充実した議論の場を設けることができた。この場をお借りして、伊達理事長に感謝と御礼の意を表す。

2016年度は、すでに第1回研究会を、テーマを「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）」として開催した。この研究会では、最近急速に進展している表面あるいは界面特有の電子状態から生じるスピン運動量ロッキング現象を利用した実験と理論の研究者が一堂に会し、有効な情報交換を行うこととした。その結果、具体的な共同研究にも発展しつつある。今後もこのスピントロニクス研究会を通して共同研究の縁結びができるような研究会を企画して行きたい。

最後になるが、本年度もまた嬉しい報告である。昨年度の新見康洋氏に続き、今年度もスピントロニクス研究会から推薦した日本原子力研究開発機構先端基礎研究センタースピン・エネルギー変換材料科学研究グループの家田淳一氏が文部科学大臣表彰若手科学者賞を受賞した。委員会をより活性化して来年度の推薦・受賞にもつなげられるよう願っている。これは、一重にスピントロニクスに関わる研究者に議論を通じて新奇な研究のアイデアや将来構想を練る場を（公財）新世代研究所が提供してくださるお陰である。心から感謝申し上げる。

4. 研究会開催記録

【第1回】2015年6月17日（水） 於）TKPガーデンシティ御茶ノ水

1. 「Thermally-induced spin transport in magnetic Systems」

Prof. Yaroslav Tserkovnyak (University of California)

2. 「Tunneling anisotropic magnetoresistance driven by interface resonant states」
Prof. Evgeny Y. Tsymbal (University of Nebraska)

【第2回】2015年12月15日(火) 於) TKPガーデンシティ御茶ノ水

1. 「流体運動を用いたスピン流生成理論」
松尾 衛 (日本原子力研究開発機構先端基礎研究センター)
2. 「液体金属流を用いたスピン流生成実験」
高橋 遼 (東北大学金属材料研究所)
3. 「磁気揺らぎのスピン流への効果」
新見 康洋 (大阪大学大学院理学研究科)

【第3回】2016年3月4日(金) 於) TKPガーデンシティ御茶ノ水

1. 「異常熱電効果の第一原理的研究」
石井 史之 (金沢大学)
2. 「Dynamical and Thermal Properties of Antiferromagnetic Skyrmions」
Oleg Tretiakov (東北大学)
3. 「マルチフェロイック物質におけるスピン波スピン流」
宮原 慎 (福岡大学)
4. 「量子スピン液体におけるスピン変換」
小野田 繁樹 (理科学研究所)

スピントロニクス研究会委員

委員長	大谷 義近	東京大学物性研究所 教授
委員	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 教授
	門脇 和男	筑波大学大学院数理物質科学研究科 教授
	齊藤 英治	東北大学原子分子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 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
	木村 崇	九州大学大学院理学研究院 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 教授
	安藤 康夫	東北大学大学院工学研究科 教授
	水上 成美	東北大学 原子分子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	東京工業大学大学院理工学研究科 教授
	新見 康洋	大阪大学大学院理学研究科 准教授

(2016年3月現在 所属・役職は当時)