

平成26年度～平成30年度 文部科学省科学研究費補助金 新学術領域研究（研究領域提案型）



Newsletter #2

ナノスピンの変換科学

Nano Spin Conversion Science

January 2016

Contents

目次	1
巻頭言 京都大学名誉教授 新庄輝也	2
研究最前線	
松倉研究室（東北大学、A01）	3
勝本研究室（東京大学、A02）	5
安藤研究室（慶應義塾大学、A03）	7
高梨研究室（東北大学、A04）	9
Bauer研究室（東北大学、A05）	12
公募研究紹介	15
領域ニュース	
平成26年度ナノスピントロニクス変換科学年次報告会開催	28
ナノスピントロニクス変換科学公募研究計画発表会	28
New Perspectives in Spintronics and Mesoscopic Physics 開催	28
領域若手研究者紹介	29
若手スクール「スピントロニクスとスピントロニクス流」を終えて	30
新庄先生の喜寿を祝って	31
固体物理特集号発刊	31
国際会議報告	32
受賞	33
領域からの連絡	34
国際会議・会合情報	34
編集後記	34

巻頭言

界面研究の新展開

私が界面磁性をテーマとする研究を始めたのは1970年ごろである。「界面ならいつまでも終わりが来る心配がないという点で良いテーマだ」と冷やかす人もいたが、まさしく45年を経た現在でも未解決の部分が多く、決着には程遠い。しかし顕著な成果が生まれている部分もあり、ようやく界面磁性という分野の総合的な発展が期待できる段階にきたように思われる。

そもそも金属で界面効果が発現するのは界面原子層に限られるため、界面磁性の検証は容易ではない。バルク試料では界面部分のごく僅かであり、界面効果が全体に与える影響は無視できる。そのために、界面磁性はどう転んでも実用性とは無縁の基礎研究のテーマと考えられていた。界面研究の進展が始まった要因の一つはナノスケールの薄膜生成技術の進歩であり、我々も数原子層の磁性金属超薄膜の作成に取り組んだ。80年ごろから、界面研究用試料として異種の金属を積層した多層膜（人工格子）の作成を始めたが、同時に非平衡状態の新物質創成を標榜した。界面効果を用いた新機能材料を生み出すには、界面を多数含有する構造が必要との予想が多層膜合成を推進した理由の一つであった。

GMRは88年に人工格子試料を用いて初めて観測された。始めは多層構造が大きなMR比を得るための必要条件であったために、その後約10年は人工格子が盛んに研究された。しかし多層構造はGMRの原理には無関係で、さらにMR比でGMRを凌駕するTMRが出現したため、その後人工格子は注目されなくなった。今は界面異方性を原因とするFe/Pt多層膜などで、垂直磁化膜としての関心が維持されている程度である。一方、GMR、TMRを始め、スピントロニクス研究の進展が界面の役割の重要性を明らかにした。スピン分極電流やスピン流は界面磁性に大きく影響されるので、界面効果が試料の特性を支配し、より大きなMR比を実現するためには高品質の界面の作成が必要と考えられている。さらに最近注目されているのは電界効果による磁性の制御である。もともと電界は金属の界面原子層にのみ働くので電界効果は界面磁性固有の課題であり、その解明には界面の構造と電子状態の解明が不可欠である。

スピントロニクス研究のさらなる進展と、応用への展開を目指すためには界面磁性が重要な問題との認識は広まってきたが「界面」をキーワードとした総合的考察はまだ活発ではない。今後は界面を非平衡状態の新物質相としてとらえ、種々の金属を接合した人工的界面の構造と、反応や拡散の有無を原子レベルで解明した上で磁性や伝導性を考察し、理論的予測を活用して、望ましい特性を持つ界面の設計図を描き、その実現を目指さなければならない。将来の新機能性材料創製の可能性は、界面磁性を人工的に制御する技術を確立できるかどうか、にかかっている。本学術研究を推進するために、界面の理解が重要となる局面が少なくないと思われるが、逆にスピントロニクスの研究成果から界面を考察するための新しい指針が与えられることにも期待している。（詳細は；T.Shinjo: J.Surf.& Interf. Materials. 3(2015)36参照）

京都大学名誉教授

新庄 輝也



研究最前線

領域の研究を支えるの皆様の研究活動や最新の成果を紹介します。

磁性薄膜・ナノ構造における磁化ダイナミクス

東北大学 原子分子材料科学高等研究機構 松倉文礼

A01班

<http://www.ohno.riec.tohoku.ac.jp/>

強磁性半導体・金属磁性体薄膜とそのナノ構造を対象に様々な手法による磁化ダイナミクスの誘起・制御・検出を行い、新しい物理現象の観測や磁性ナノ構造に特有な現象の理解を行う。



教授 松倉文礼

はじめに

不揮発性磁気メモリ・デバイスは、磁化方向を情報担体として用いる。情報の書き換えには磁化ダイナミクスを介した磁化反転を必要とし、低消費エネルギーでの磁化反転手法が探索されている。デバイス中に電流を流すことで誘起されるスピン移行トルクを用いた電氣的磁化反転は実応用の閾に達している。更なるデバイスの高性能化を視野に入れたスピン軌道相互作用トルクや電界効果を利用した電氣的磁化反転の研究が活発に進められている。本研究においては、電氣的な磁化ダイナミクスの生成・制御・検出を行うための基盤技術の確立を進め、その物理現象の理解と応用に向けた指針を明らかにすることを目的としている。

電界による磁性の制御

III-V族磁性半導体(Ga,Mn)As、(In,Mn)As中で、Mnは磁性スピンを供給すると同時にアクセプタとして働きキャリア(正孔)も供給する。磁性スピンと正孔間の相互作用が強磁性秩序をもたらすキャリア誘起強磁性を示す。従って、強磁性半導体を電極とするキャパシタ構造に電界を印加し正孔濃度を増減することで、電氣的な磁氣的性質の変調が可能となる。これまでに、キュリー温度や磁気異方性の大きさ等が電界印加により変調されることを報告してきた(図1) [1]。本研究では、(Ga,Mn)Asの強磁性共鳴スペクトルを電界下で測定することにより、磁化ダイナミクスを支配する物理量の一つである磁気緩和定数の大きさを電界により変調できることを示し

た(図2) [2]。ダンピング定数は正孔濃度が低い場合に増加する。強磁性半導体では、正孔濃度の低下につれて局在効果により磁氣的乱雑さが増大する。ダンピング定数と磁氣的乱雑さの度合いに相関があることを明らかにした。様々な材料のダンピング定数を決める機構を調べる上で、電界効果が今後も利用されるものと期待される。

磁気特性への電界効果は磁性金属薄膜においても観測される。高性能磁気トンネル接合を構成する基本積層構造であるCoFeB/MgOにおける電界効果とその応用についての研究も進めている。磁気異方性の方向を電界によって切り替えられること、一時的に磁気異方性の方向を変えることで誘起される磁化ダイナミクスを介した磁化反転が可能であることが示されている[1]。垂直磁化容易軸を持つCoFeB/MgOにおいては、その機構は明らかにされていないものの、電界印加により磁気緩和定数の大きさも変調できることを示した[3]。

することで、ナノ磁性体の物性評価とナノ・デバイスの動作特性評価を行っている。最近では、電界効果によりナノ磁性体中に非線形強磁性共鳴を誘起できることを示した[4]。今後、様々な非線形磁化ダイナミクス現象の理解に役立つものになると期待している。

参考文献

- [1] F. Matsukura, Y. Tokura, and H. Ohno, Nat. Nanotech. **10**, 209 (2015).
- [2] L. Chen, F. Matsukura, and H. Ohno, Phys. Rev. Lett. **115**, 057204 (2015).
- [3] A. Okada, S. Kanai, M. Yamanouchi, S. Ikeda, F. Matsukura, and H. Ohno, Appl. Phys. Lett. **105**, 052415 (2014).
- [4] E. Hirayama, S. Kanai, J. Ohe, H. Sato, F. Matsukura, and H. Ohno, Appl. Phys. Lett. **107**, 132404 (2015).

■ ナノ磁性体中の磁化ダイナミクス

100 nm以下のデバイス径を持つCoFeB/MgO中に電界効果等の電気的手法により磁化ダイナミクスを誘起し検出

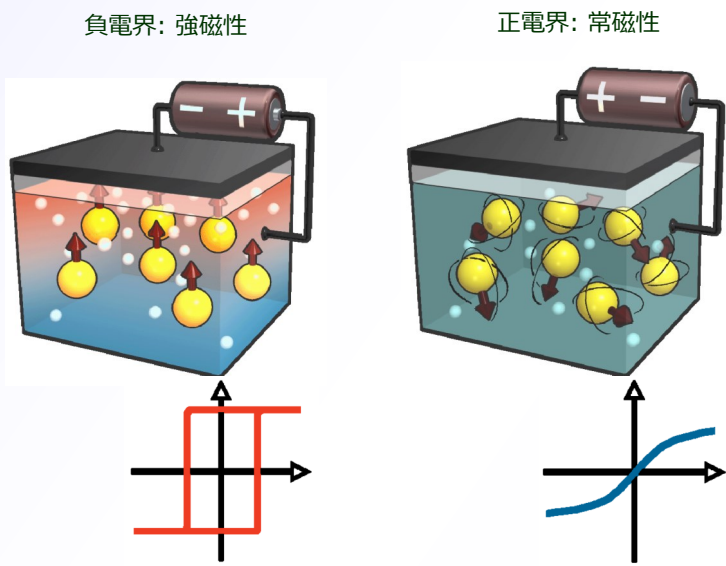


図1：磁性の電界制御

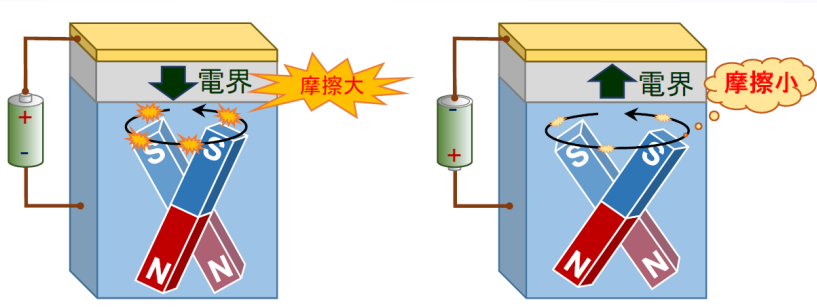


図2：磁化ダイナミクスの電界制御

量子構造によるスピン電気変換：スピン偏極電子系の量子効果

東京大学物性研究所 ナノスケール物性研究部門 勝本信吾、中村壮智

A02班

<http://kats.issp.u-tokyo.ac.jp>

本グループでは、スピン自由度と軌道自由度との結合を通してスピン電気変換を実現することを目標としており、このため、現在はスピン軌道結合系の量子輸送に現れる様々な物理現象の基礎的な研究に注力しているところである。



教授 勝本信吾



助教 中村壮智

はじめに

自由度が少なく空間の変調で作用を及ぼしにくいスピンも、例えばスピン軌道相互作用 (SOI)により軌道自由度と結合すれば、ブロッホ球をフルに使った量子効果が顕著に現れる量子構造を用意でき、また、他の様々な量子現象との関係も調べることができる。本グループでは、SOIに起因する量子輸送現象を軸に、磁性体を用いたスピン注入などの伝統的手法も用いながらスピン偏極した非平衡電子系の量子効果を追求し、そこから新しいスピン電気変換の手法を見出すことを目指している。

スピン偏極電子系の生成

SOIのある系の量子ポイントコンタクト(QPC)では、量子化伝導度の半分での量子化(0.5量子化)が見られ、100%のスピン偏極があるとされてきた[1]。我々は、量子ドットのスピンブロックードを用い、外部磁場を一切用いず極小の擾乱でスピン偏極を測定できる検出器を開発し、0.5量子化状態で高いスピン偏極が実際に存在することを実証した。また、一見普通に見える1.0量子化状態でも高いスピン偏極が存在することを発見した。図1に示したように、特にこちらのスピン偏極は、バイアス電流を増加しても維持されるためスピン注入源とし

ても適していることを見出した(図1)。

スピン自由度の操作

スピン偏極が得られたところで、偏極電子を干渉計に入射し、対向電極に現れる電位信号を測定することで干渉計出力を検出した。干渉計の両経路には電位を変化できるゲート電極が付いており、ゲート電圧と干渉計に印可する磁場の関数として出力を調べた。図2右がこの素子のSEM写真である。このような素子が、スピンフィルターやアナライザーとして働く可能性があることは、理論的に考えられてきた[2]。

図2左には、ゲート電圧と磁場の関数として検出信号をカラープロットしたものである。クロスハッチ状の振動が現れている。磁場に対する振動周期がAB振動の周期と一致することから、量子干渉効果が表れていることは疑いないが、このような振動が現れるのは、エミッターとなっているQPCの伝導度が1.0量子化をしている時のみである。0.5量子化領域では、信号を明瞭に観測するために電流を高く取る必要があったことから、偏極率が低下し、干渉が失われたものと考えられる。いずれにしても、スピン干渉効果を系統的に調べることが、このような素子で可能になったことになる。

現在、この方向で取り組んでいる課題が、SOIを持つ電子系に現れるZitterbewegung (ZB)と呼ばれる、電子が細かい振動をしながら運動する現象の検証である。真空中の電子もDirac方程式に従う限り、ZBを行っているはずとされてきたが、理論的には困難が多く、Dirac方程式の欠陥の1つではないかもされてきた。固体中ではZBはバンドギャップに繰り込まれてしまうが、SOIのある系では真空中と類似の状況が発現し、輸送に影響を与えると期待される。実験によって物理の基本的問題への解答がもたらされる可能性がある。

■ グラフェンのトポロジカル絶縁体化

トポロジカル絶縁体(TI)の概念は、グラフェン格子にSOIを思考実験的に導入することで初めて得られた。しかしながら現実のグラフェンはSOIが極めて小さく、TIではない。ところが2013年に、一部の炭素原子を水素化することでSOIが導入されるとする実験が報告され

[3]、水素化によってTI状態が実現すると期待される。我々は、HSQレジストを用いて一部水素化したグラフェンで、スピン注入に対する逆スピンホール効果を調べ、SOIが導入されていると示唆される実験結果を得ている(図3)。グラフェンのTI化によって端状態が現れれば、磁性体、超伝導体など様々な系との結合素子や、グラフェンそのものの特異な物性との結合系など極めて広範な分野が可能になると考えている。

参考文献

- [1] M. Kohda et al., Nature Commn. **3**, 1082 (2012).
- [2] A. Aharony, Y. Tokura, G. Z. Cohen, O. Entin-Wohlman, and S. Katsumoto, Phys. Rev. B **84**, 035323 (2011).
- [3] J. Balakrishnan et al., Nature Phys. **9**, 284 (2013).

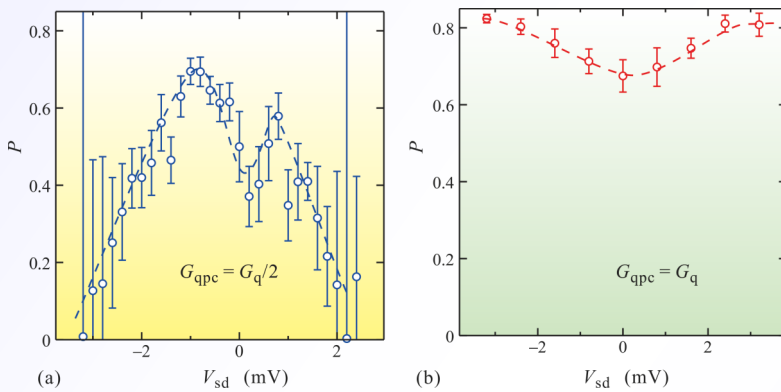


図1 : SOIを持つQPCのスピン偏極をバイアス電流に対して測定した。(a)が0.5量子化状態、(b)が1.0量子化状態。

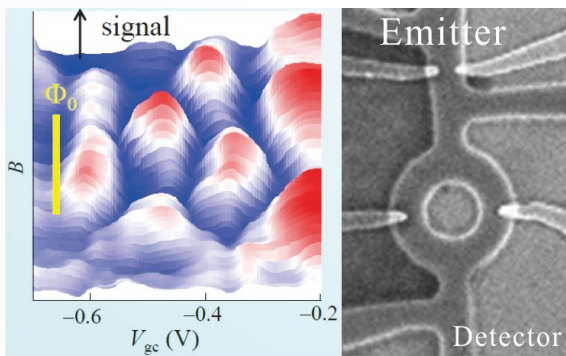
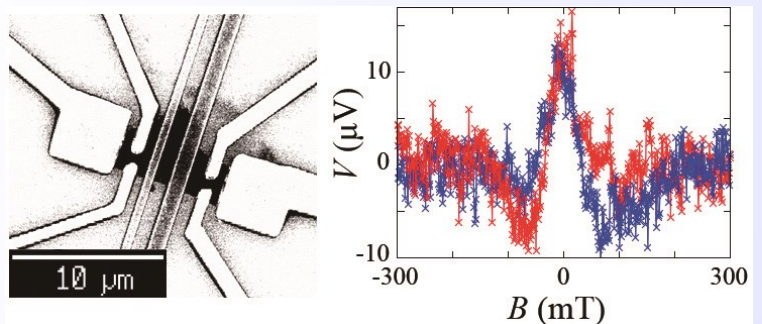


図2 右 : スピン干渉を調べるための素子SEM像。左 : この素子に現れた干渉パターン。

図3 左 : スピンホール効果を検出するためのグラフェン素子。右 : この素子の非磁性電極間に現れたHanle信号。



マグノンスピントロニクス

慶應義塾大学理工学部 物理情報工学科 安藤和也

A03班

<http://www.ando.appi.keio.ac.jp/>

磁気ヘテロ構造におけるマグノン励起は、界面スピン交換を介して伝導電子スピン流と結合する。マイクロ波によるマグノン励起を用いることで、金属/磁性絶縁体接合におけるスピン流生成現象へのマグノン相互作用の効果を明らかにし、スピン変換現象の体系的理解を目指す。



准教授 安藤和也

はじめに

スピン系の素励起「マグノン」をベースとした研究はマグノニクスと呼ばれ、伝導電子スピン流を基盤とするスピントロニクスとは独立して研究が進められてきた。ところが2010年、金属/絶縁体界面において伝導電子スピン流とマグノン間の角運動量移行が存在することが明らかとなり[1]、それまで独立に進められてきたスピントロニクスとマグノニクスが一つに交差した。本稿では、マグノニクスとスピントロニクスの境界にある「マグノンスピントロニクス」形成の端緒となった、金属/絶縁体界面におけるスピン流生成現象に関する最近の研究展開を紹介する。

金属/絶縁体界面におけるスピン流変換現象

マグノンの基礎物性に関する重要な研究成果は、1960年代から1980年代にかけて集中して得られている[2]。これには、この時代に高品質で著しく磁気ダンピングの小さいフェリ磁性体イットリウム鉄ガーネット単結晶の作製が可能となり、スピンダイナミクスの系統的研究の舞台が整ったという背景がある。イットリウム鉄ガーネットの磁気ダンピングは、遷移金属強磁性体と比べ3桁程度も小さい。このような極めて小さい磁気ダン

ピングのため、イットリウム鉄ガーネット中ではマグノンの非線形現象が容易に現れる。最近では、金属/絶縁体界面における伝導電子スピン流と非線形スピンダイナミクスとの相関に関する研究が進められており、この中で、一様モードのマグノンが有限の波数を持った2つのマグノンに分裂する3マグノン分裂過程(図1)によって、絶縁体から金属へと流れ出すスピン流量が増大する現象が観測された[3]。これにより、絶縁体中のマグノン相互作用が金属/絶縁体界面におけるスピン流生成に大きな影響を与えることが明らかとなったが、なぜマグノン分裂がスピン流を増大させるのかというメカニズムは自明ではなかった。

非線形スピン流変換

最近になり、散乱前後のマグノン数を変えるマグノン分裂のみならず、2つの一様モードマグノンが有限波数をもつ2つのマグノンへと散乱される4マグノン散乱によってもスピン流増大現象は発現することが明らかとなった[4]。この結果は、スピン流の増大現象において、散乱前後のマグノン数が非保存であることは本質的では無いことを示している。この一連の実験結果を統一的に理解するための鍵となるのは、スピン系のダンピングである。非平衡マグノンにより生成されたスピン流を時間領域で測定したところ、マグノン分裂によってスピ

ン系のダンピングが減少していることが見出された [4]。すなわちマグノン相互作用の役割は、マイクロ波からスピン系へと移行した角運動量を、マグノンの消滅・生成により長寿命のマグノンへ集中的に受け渡すことによって定常状態における非平衡マグノン数を増大させることにあり、これがスピン流増大現象へと繋がったことを示している。

このように、スピン流の増大現象はマグノンの散乱プロセスに依らず金属/絶縁体界面において一般的に現れる現象である。金属/絶縁体界面という非常にシンプルな構造でありながら、この系におけるスピン流生成はマイクロ波周波数・強度に依存した多様な振る舞いを示すことが報告されてきた。このような振る舞いは、本稿で紹介したマグノン相互作用によって理解できる。マグノン散乱は広範囲の環境で一般に現れ、最近では磁性絶縁体からのスピン流生成の温度依存性は、このようなマグノン散乱による影響を顕著に反映していることが明らかとなっている [5]。図2に示すのは異なるマイクロ波励起周波数 f_0 において測定した金属/絶縁体接合におけるスピン流量であり、同一の試料でありながら全く異なる温度依存性を示している ($f_0 = 7.6$ GHzでは4マグノン散乱、 $f_0 = 4.0$ GHzでは3マグノン散乱が支配的となるスピン流生成が駆動されている)。これまでの膨大な研

究により体系的理解が得られている非線形スピンダイナミクスに関する知見を背景とし、マグノンと伝導電子スピン間のスピンキャリア変換によって可能となったスピントロニクスとマグノニクスの融合により、今後更なる研究の進展が期待される。

参考文献

- [1] Y. Kajiwara, K. Harii, S. Takahashi, J. Ohe, K. Uchida, M. Mizuguchi, H. Umezawa, H. Kawai, K. Ando, K. Takanashi, S. Maekawa, and E. Saitoh, *Nature* **464**, 262 (2010).
- [2] C. E. Patton, *Physics Reports* **103**, 251 (1984).
- [3] H. Kurebayashi, O. Dzyapko, V. E. Demidov, D. Fang, A. J. Ferguson, and S. O. Demokritov, *Nature Materials* **10**, 660 (2011).
- [4] H. Sakimura, T. Tashiro, and K. Ando, *Nature Communications* **5**, 5730 (2014).
- [5] T. Tashiro, S. Matsuura, A. Nomura, S. Watanabe, K. Kang, H. Sirringhaus, and K. Ando, *Scientific Reports* **5**, 15158 (2015).

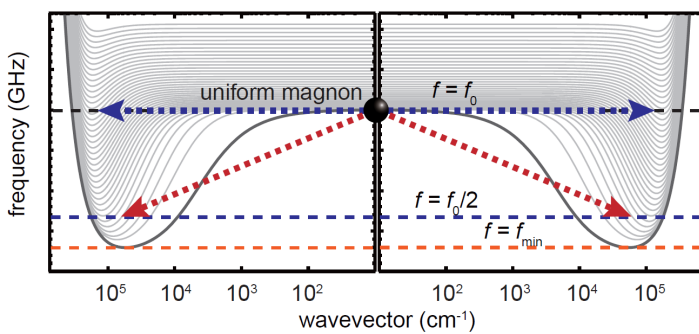


図1：マグノンの分裂・散乱過程

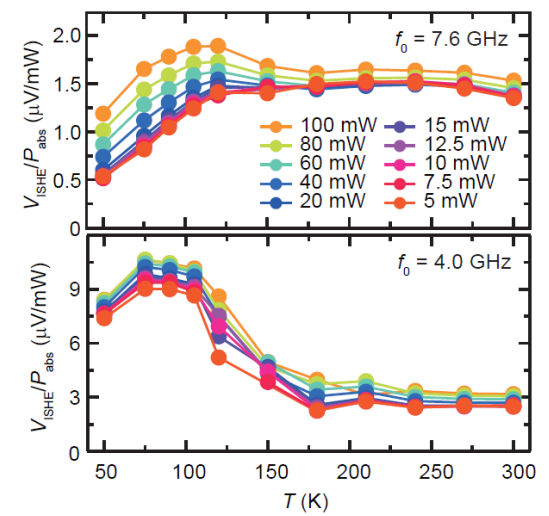


図2：マグノン散乱によるスピン流増大の観測

熱-スピン変換を利用した強磁性金属のスピンホール効果の観測

東北大学金属材料研究所 磁性材料学研究部門 関剛斎、高梨弘毅

A04班

<http://magmatelab.imr.tohoku.ac.jp>

強磁性材料における熱とスピンの相互作用に注目し、熱-スピン変換の学理体系の構築、現象の高効率化およびその応用を目指して材料学の観点から研究に取り組んでいる。スピンゼーベック効果によって熱的に生成されたスピン流を用いると、強磁性体中のスピンホール効果を観測することが可能となる。本稿では、スピン軌道相互作用の大きな強磁性金属であるFePt合金に着目しFePt合金の逆スピンホール効果を観測した研究について紹介する。



助教 関剛斎



教授 高梨弘毅

はじめに

スピン角運動量の流れである「スピン流」を理解し、スピン流を効率良く創出および制御することがスピントロニクスへの更なる発展のためのキーとなる。スピン流の創出方法には様々あるが、例えば、強磁性体に直接電流を通電させると、流れる電流はスピン偏極する。これは、電荷の流れを伴うスピン偏極電流である。一方で、トータルでは電荷の流れを伴わない純粋なスピン流もあり、その場合には、同量の上向きスピン電子と下向きスピン電子が互いに逆方向に流れることで電流はゼロとなるが、スピン角運動量の流れは存在することになる。この純粋スピン流は、エネルギー損失の少ない信号伝達手段としての利用が検討されているのと同時に、電荷を起源とする現象を分離して純粋にスピンに関連する現象のみを取り出すツールとしても活躍している。

スピンゼーベック効果とスピンホール効果

純粋スピン流を創り出す手法の一つとして、熱-スピン変換の代表的な物理現象であるスピンゼーベック効果[1]がある。スピンゼーベック効果は、強磁性物質に温度差

をつけることで温度差の方向にスピン圧が生じ、強磁性物質中にスピン流が生じる現象である。この熱的に生成されたスピン流を検出するには、スピン流から電流への変換が必要となる。これまでの研究では、Ptなどスピン軌道相互作用の強い非磁性金属中の逆スピンホール効果により、スピン流から電流へ変換してきた。スピンホール効果の研究対象は、非磁性半導体から始まり、非磁性金属へと展開し、最近では幾つかの強磁性金属においてスピンホール効果が報告されるようになった[2-4]。スピン軌道相互作用の大きな物質では、スピン流と電流の変換効率の指標となるスピンホール角が大きくなる。非磁性体、強磁性体を問わず、大きなスピンホール角を示す物質探索が現在重要になっている。

スピンゼーベック効果を利用した強磁性FePt合金のスピンホール効果の観測

本研究では、 $L1_0$ 型FePt規則合金のスピンホール効果に注目した。FePt規則合金は大きな異常ホール効果や異常ネルンスト効果を示す材料であり[5]、大きなスピン軌道相互作用が密接に関わっているものと考えられる。そこで、熱によって生成されたスピン流をFePt合金に注入

し、FePt合金におけるスピントール効果の観測を目指した。さらに、FePt合金における $L1_0$ 規則化とスピントール効果との関係について検討した[6]。

図1に、試料構造と測定配置の模式図を示す。 $Gd_3Ga_5O_{12}$ (GGG)上に4.5 mm厚の $Y_3Fe_5O_{12}$ (YIG)を液相エピタキシャル成長させたものを基板材料とし、スパッタリング法により10 nm厚のFePt層を室温で成膜した。成膜直後のFePt合金は不規則相から形成されており、その後500°Cでアニール処理することで $L1_0$ 構造への規則化を促進した。

本研究では、膜面内x方向に磁化して膜面垂直z方向に温度勾配を付ける面内磁化(IM)配置(図1(a))、および膜面垂直z方向に磁化して面内x方向に温度勾配を付ける垂直磁化(PM)配置(図1(b))の二つの測定ジオメトリ[7]を用いた。IM配置では、(1)YIG層中の縦型スピントール効果のスピントール流がFePt層の逆スピントール効果で変換された電圧(V^{SHE})、および(2) FePt中の異常ネルンスト電圧(V^{ANE})が面内y方向に検出される。一方PM配置では、FePt中の V^{ANE} のみが検出されることになる。ここで、良質な絶縁体であるYIGを利用することによりFePtの逆スピントール効果や異常ネルンスト効果のみを測定することが可能となる。本研究では、上記したYIG上のFePtに加え、GGG上に直接FePt層を成膜した試料も評価を行った。GGG上のFePt層では、IM配置、PM配置ともに V^{ANE} のみが検出される。

図2(a)および図2(c)にIM配置、図2(b)および図2(d)にPM配置における熱電係数(測定電圧を端子間距離と温度勾配で割った値)の外部磁場H依存性を図2に示す。図2(a)および図2(b)がYIG上の結果であり、図2(c)および図2(d)がGGG上の結果である。YIG上の $L1_0$ 型

FePt規則合金の熱電係数をIM配置により測定したところ、磁場の掃引に伴って二段の変化が現れた(図2(a))。この二段になった熱電係数のヒステリシスには、二つの異なる磁性体の磁化反転過程が反映されている。一方、PM配置では単一の磁化反転過程(ヒステリシス)が観測されており(図2(b))、挿入図として示したFePt層の極カー効果曲線と比較すると、PM配置で得られた電圧はFePtの V^{ANE} であると考えられる。また、GGG上の $L1_0$ 型FePt規則合金では、IM配置、PM配置ともにFePtの V^{ANE} のみが現れた(図2(c)および図2(d))。これらの結果より、YIG上の $L1_0$ 型FePt規則合金をIM配置で評価して観測された二段のヒステリシスは、YIGおよびFePtの磁化反転に由来し、低磁場で得られた電圧は、YIGのスピントールバック効果で生成されたスピントール流がFePt層の逆スピントール効果で電圧に変換された V^{SHE} であると考えられる。 $L1_0$ 型FePt規則合金の反転磁場がYIGの反転磁場と比べて十分に大きいことが、 V^{ANE} と V^{SHE} を明瞭に分離できた要因となっている。

IM配置における熱電係数をYIG上とGGG上の試料と比較することにより、スピントール電圧と異常ネルンスト電圧の比(V^{SHE}/V^{ANE})を算出することが可能となる[7]。 $L1_0$ 型FePt規則合金とFePt不規則合金について V^{SHE}/V^{ANE} を見積もったところ、 $L1_0$ 規則化することによって逆スピントール効果の寄与が増大していることが明らかとなった。現在のところ、 $L1_0$ 規則化させるためのアニール処理によってFePtとYIGの界面のスピントールミキシングコンダクタンスが向上したことが、および $L1_0$ 規則化によってスピントール軌道相互作用が大きくなったこと、などに起因していると考えている。

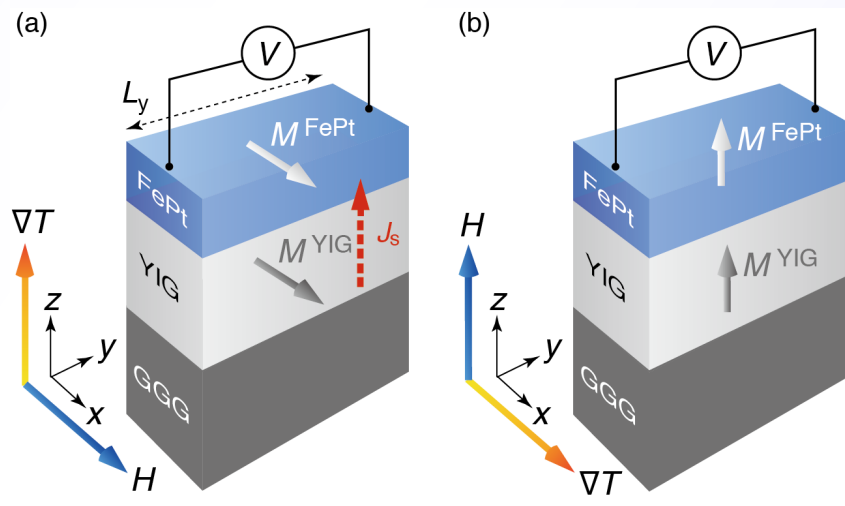


図1：試料構造と測定配置の模式図。 $Gd_3Ga_5O_{12}$ (GGG) | $Y_3Fe_5O_{12}$ (YIG) | FePtの積層構造である。(a) 膜面内x方向に磁化して膜面垂直z方向に温度勾配を付ける面内磁化(IM)配置、および(b) 膜面垂直z方向に磁化して面内x方向に温度勾配を付ける垂直磁化(PM)配置。

まとめと今後の研究展開

スピンゼーバック効果によって生成されたスピン流を利用することで、 $L1_0$ 型FePt規則合金の逆スピンホール効果を観測することに成功した。これは、スピンゼーバック効果によるスピン流生成が強磁性体のスピンホール効果を観測するために有効であることを示唆している。しかしながら、今回の実験手法ではスピンホール角の値を見積もるには至っておらず、定量評価が今後の課題と言える。

さらに、熱-スピン変換の学理体系の構築という目標に向かって、大きな熱磁気効果を示す材料の探索も進めている。特に、昔から知られているが未だ十分に理解されていない異常ネルンスト効果に関して、材料依存性などの系統的な実験を行い、新物質の開拓や機構解明などに現在取り組んでいる[8]。

謝辞

本ニュースレターで紹介した内容は、東北大学金属材料研究所の内田健一准教授、吉川貴史氏、Z. Qiu助教、齊藤英治教授との共同で得られた成果です。ここに感謝いたします。

参考文献

- [1] K. Uchida, S. Takahashi, K. Harii, J. Ieda, W. Koshibae, K. Ando, S. Maekawa, and E. Saitoh, *Nature* **455**, 778 (2008).
- [2] B. F. Miao, S. Y. Huang, D. Qu, and C. L. Chien, *Phys. Rev. Lett.* **111**, 066602 (2013).
- [3] A. Tsukahara, Y. Ando, Y. Kitamura, H. Emoto, E. Shikoh, M. P. Delmo, T. Shinjo, and M. Shiraishi, *Phys. Rev. B* **89**, 235317 (2014).
- [4] S. M. Wu, J. Hoffman, J. E. Pearson, and A. Bhattacharya, *Appl. Phys. Lett.* **105**, 092409 (2014).
- [5] M. Mizuguchi, S. Ohata, K. Uchida, E. Saitoh and K. Takanashi, *Appl. Phys. Expr.* **5**, 093002 (2012).
- [6] T. Seki, K. Uchida, T. Kikkawa, Z. Qiu, E. Saitoh, and K. Takanashi, *Appl. Phys. Lett.* **107**, 092401 (2015).
- [7] K. Uchida, M. Ishida, T. Kikkawa, A. Kirihara, T. Murakami, and E. Saitoh, *J. Phys.: Condens. Matter* **26**, 343202 (2014).
- [8] K. Hasegawa, M. Mizuguchi, Y. Sakuraba, T. Kamada, T. Kojima, T. Kubota, S. Mizukami, T. Miyazaki, and K. Takanashi, *Appl. Phys. Lett.* **106**, 242405 (2015).

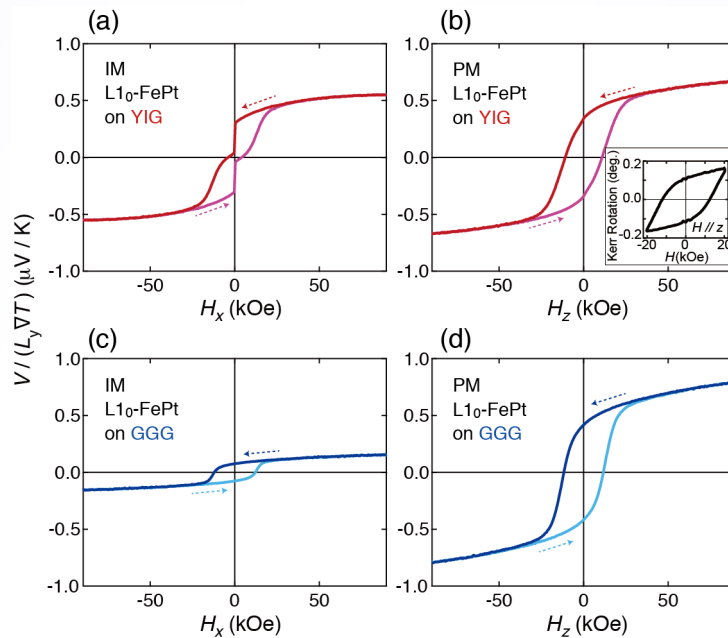


図2： $L1_0$ 型FePt規則合金における熱電係数の外部磁場 H 依存性。(a)IM配置および(b)PM配置で測定したYIG上のFePtの結果と(c)IM配置および(d)PM配置で測定したGGG上のFePtの結果である

Spin(calori)tronics and Spin Mechanics with Magnetic Insulators: Theory

東北大学金属材料研究所 理論G & E-IMR

Gerrit E. W. Bauer

A05班

www.bauer-lab.imr.tohoku.ac.jp

In the past few years, yttrium iron garnet and related compounds have been resurrected from obscurity as platform for novel spin conversion phenomena. We wish to better understand the underlying processes and guide experiments as well as applications by the methods of theoretical physics.



Gerrit Bauer

Introduction

Spintronics based on magnetic and non-magnetic elemental metals generates functionalities that are employed in nanoscale devices such as switches, memories, and sensors. Ferrimagnetic electric insulators such as man-made yttrium iron garnets (YIG) form another class of versatile materials with high magnetic quality. K. Uchida, E. Saitoh, c.s., at the IMR of Tohoku University demonstrated

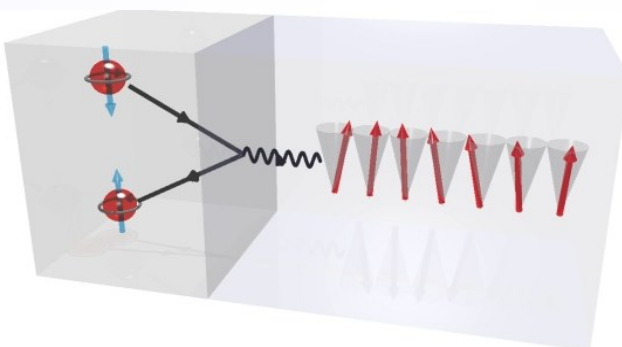


Figure 1: Spinon-magnon conversion at a normal metal/ferromagnet interface representing spin pumping and spin-transfer torques.

that YIG can be actuated thermally and electrically and thereby integrated into conventional electronic and thermoelectric devices, raising the hope for a new and greener spintronics. Theoretical physics, in the Otani Spin Conversion Project represented by the working group A5 lead by Prof. Murakami, can importantly accelerate the progress in this field. The research staff members of the IMR Theory Group that contribute to the activities described in the following are Kentaro Nomura, *Saburo Takahashi*, *Oleg Tretiakov*, and *Joe Barker*.

Theory and computation

In much of condensed matter physics the interaction between theoretical and experimental groups is quite essential. Theoretical results can be useful for the interpretation and understanding of experimental results as well as predict the results of new experiments. This is a highly interactive process. Much insight is gained when experiment and theory do not agree with each other, since it implies that

one (or both) are wrong, thereby necessitating additional efforts. So while a theoretician should not be desperate to explain experiments, the inspiration by new experimental results is an essential ingredient for progress. Access to experimental findings before they are actually being published can give a theoretician the edge against the global competition. National programs such as the present Spin Conversion Project play an important role to strengthen a country's competitiveness in scientific research.

In order to capture the essential physics of a new effect we may resort to analytic derivations and simple calculations based on phenomenological models. A large part of our work is indeed focused on this task. Figure 1 represents the essence of the spin Seebeck effect, viz. the conversion of an elementary excitation of a magnet into a spin-polarized electron-hole pair in an attached normal metal and vice versa. On the other hand, qualitative reasoning is often not enough. The functionalities of a given phenomenon must be optimized and maximized in order to become useful for technological applications. Theory can support such a program by numerical simulations and computational material science, thereby predicting or rationalizing material dependent properties. More often than not such calculations unearth new physics as well that would have been lost in (over)simplified analytical models.

■ Magnetic insulators

Ferrimagnetic yttrium iron garnet is an electric insulator with record magnetic quality factor that by appropriate doping can be tailored to suit many optical or microwave applications. New physics was discovered in heterostructures of YIG with normal metals, including the spin Seebeck and Peltier effects, the spin Hall magnetoresistance, the ac spin Hall effect, rectification of current-induced magnetic resonance, long-distance magnons transport, optically excited magnon-polarons, strong magnon-photon coupling in microwave cavities, etc.

The magnetic and electronic structure of YIG is complex due to the large crystallographic unit cell. Its electronic properties are accessible to first-principles calculations that lead, e.g., to the prediction of strong exchange interaction at the interface to a normal metal as confirmed experimentally in the form of a large spin-mixing conductance.

The spin-dynamics of complex magnets is still out of the reach of first-principles calculations. The next-best thing are atomistic simulations based on the coupled Landau-Lifshitz-Gilbert equations for (classical) atomic magnetic moments. Stochastic random magnetic fields represent the temperature-dependent coupling with the phonon bath. Figure 2 is a plot of the energy and wave vector-resolved computed power spectrum of spin waves in YIG that can be compared with e.g. inelastic neutron scattering experiments. Such simulations give novel insights into, for example, the spin Seebeck effect. The calculations explain the observed double change of sign of the temperature-dependent spin Seebeck effect in gadolinium iron garnet (GIG) and its high-temperature decay in YIG.

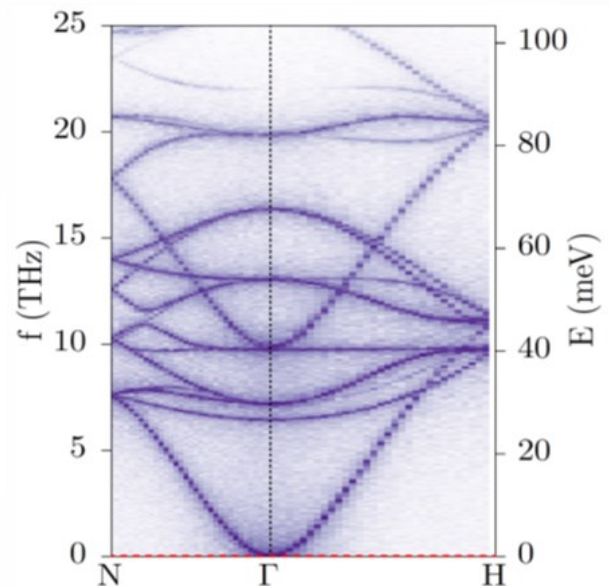


Figure 2: Calculated low-temperature spin wave power spectrum of YIG (J. Barker, unpublished).

■ Novel systems

Magnetic insulators are interesting components for novel hybrid systems. They can be employed to generate proximity-exchange potentials with two-dimensional electron systems such as topological insulators, graphene, dichalcogenides, molecular conductors, etc. The experiments of spin pumping

in graphene by colleagues from the Otani Project motivated us to study the theoretical aspects that differ interestingly from the spin pumping into conventional metals. The proper treatment of the spin orbit interaction is the next big challenge.

While YIG is a ferrimagnet, new interest is focused on antiferromagnets with distinct advantages such as the absence of magnetic stray fields and characteristic current-induced magnetization dynamics. This topic is central to an international workshop organized by us under the auspices of the Tohoku Forum of Creativity in Spintronics.

■ Quantum spintronics

Spin(calori)tronics based on ferr(o/i)magnets is generally well understood in terms of semiclassical concepts such as spin accumulation, spin pumping, and spin transfer torques. Nevertheless, it appears that we stand at the brink of a new area in which quantum effects play a central role in spin transport. The high magnetic quality factor of YIG spheres and thin films make it an ideal system to search for quantum effects.

On one hand, the strong-coupling regime in which the interaction between fields is larger than their broadening due to internal and external losses can be reached quite easily in YIG. The elementary excitations of the system are then strongly hybridized magnon-polarons and magnon-polaritons, best studied in intrinsic or external cavities. The Nakamura group demonstrated quantum coherent coupling between magnons and a superconducting qubit via cavity microwaves, thereby opening a vast new area of research.

The controlled injection of magnonic spin currents into magnetic insulators allows the accumulation of magnons to a density that exceeds the critical one for magnon Bose condensation. The condensed state is predicted to display spin superfluidity and other exotic properties. An urgent task is the realistic modelling of the current-induced magnon distribution function and the experimental proof of a magnon chemical potential.

Both developments sketched above are exciting and we hope to be able contribute as theoreticians to their better understanding in the future.

■ Epilogue

Spintronics remains to be an exciting and lively field that constantly rejuvenates itself. Its attraction derives from the intellectual challenges to discover and understand physical effects that have high relevance for applications. The Japanese spintronics community as united in the Otani Project plays a leading role in the world and it is both an honor and fun to be part of it.

公募研究紹介

今年度から公募研究として13名の研究者が領域に加わりました。今回は分担研究の先生方のご研究を余すところなく紹介します。

A01班公募研究

メタ磁性転移物質を舞台とした磁気界面マグノン変換と伝播・位相制御

東京工業大学応用セラミックス研究所・准教授

谷山智康



スピン波を量子化したマグノンは、低消費電力スピントロニクスにおいて電荷の移動を伴わない情報伝達媒体としての利用が期待されています。強磁性マグノンは、通常強磁性体に交流磁場を印加することで生成され、磁気緩和を伴いながら強磁性体中を伝播します。一方、強磁性マグノンの伝播経路に反強磁性体が挿入され、強磁性/反強磁性界面が形成されると、強磁性マグノンは接合界面での交換結合により反強磁性マグノンに変換されると同時に一部が反射されると予想されます。その際、強磁性/反強磁性界面でのマグノン変換と伝播の過程には興味深い物理現象が潜んでいると考えられます。本研究では、この強磁性/反強磁性界面でのマグノン変換の学理について探求します。

本研究では、特に強磁性-反強磁性メタ磁性転移を示すFeRh規則合金に注目しています[1]-[3]。FeRh規則合金は室温で反強磁性を示しますが、温度の上昇に伴って約370 K付近で強磁性に相転移します。その際に格子の変形を伴います。そのため、外部から人為的に格子変形を導入することで、磁気秩序を制御することが可能となります。つまり局所的にFeRh合金に格子変形を誘起することで、単一の物質で強磁性/反強磁性界面を形成することができると考えられます。実際に、FeRh/強誘電体BaTiO₃ヘテロ界面で弾性ひずみに伴って磁気転移を誘起したり[1]、スピン注入[3]、電流注入[4]により磁気転移を誘起したりすることが実証されています。本研究では、このメタ磁性転移物質FeRhにおける強磁性/反強磁性マグノン変換の研究に取り組んでいます。

本研究を通して得られる強磁性/反強磁性マグノン変換に関する知見は、最近注目されている、反強磁性スピントロニクスへの応用展開も期待されます。反強磁性は外部磁場擾乱に対して高い安定性を持ち、また、反強磁性マグノンのエネルギーはTHz 領域に位置することから、超高速スピン伝送技術への応用展開も期待されます。

参考文献

- [1] I. Suzuki, Y. Hamasaki, M. Itoh, and T. Taniyama, Appl. Phys. Lett. **105**, 172401 (2014).
- [2] I. Suzuki, M. Itoh, and T. Taniyama, Appl. Phys. Lett. **104**, 022401 (2014).
- [3] I. Suzuki, T. Naito, M. Itoh, and T. Taniyama, Appl. Phys. Lett. **107**, 082408 (2015).
- [4] T. Moriyama, N. Matsuzaki, K. -J. Kim, I. Suzuki, T. Taniyama, and T. Ono, Appl. Phys. Lett. **107**, 122403 (2015).

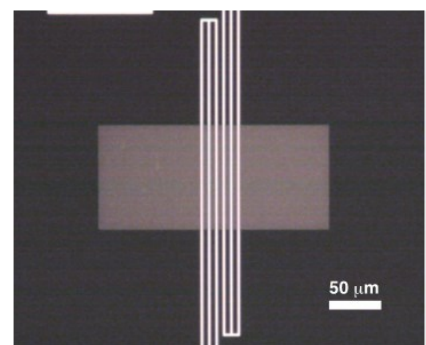
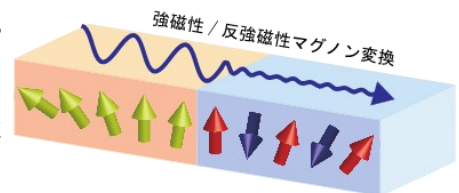


図 (上) 強磁性/反強磁性界面におけるマグノン変換の模式図、(下) マグノン励起・検出用素子の光学顕微鏡写真

磁性体におけるスピン軌道トルクの研究

大阪大学大学院基礎工学研究科 物質創成専攻・助教 三輪真嗣



磁性体の磁化(スピン)には電流や電界による様々なトルクがはたらく。これはスピン変換の一種である。スピントルクの一例としてスピン偏極電流と強磁性体磁化との間におけるスピン角運動量保存で説明される「スピントランスファートルク」がある。スピントランスファートルクによるスピン制御を利用した磁気トンネル接合素子は、信号雑音比が半導体どころか熱力学限界にも肉薄する可能性がある[1]。

最近では新規スピントルクとして物質のスピン軌道相互作用と対称性を利用した「スピン軌道トルク」がPt/FeNiやTa/CoFeB多層膜細線を中心に精力的に研究されている[2]。このスピン軌道トルクはSpin Hall効果、Rashba(-Edelstein)効果などと呼ばれるが、その本質は「系の対称面を限定し非磁性体における伝導電子のスピン依存散乱からスピン蓄積を生じさせること(図1)」である。このスピン蓄積により強磁性体に作用するスピントランスファートルクをスピン軌道トルクと呼んでいる。

非磁性体中のスピン依存散乱に起因するスピン軌道トルクと異なり、強磁性/非磁性界面では界面スピン依存散乱によりトルクが生じる可能性がある[3]。本研究ではこの新規スピン軌道トルクを「界面スピン軌道トルク」と呼ぶことにする。しかし、細線構造では対称性の問題から前述の従来型スピン軌道トルクとこの界面スピン軌道トルクは分離評価できない。

本研究課題では強磁性層一層のみを有する高品質単結晶トンネル接合を作製し、この課題を解決する。具体的には界面スピン軌道相互作用に由来するトンネル異方性磁気抵抗(TAMR)効果を利用し、スピントルク磁気共鳴によるトルク同定を行う[4]。スピントランスファートルクをトンネル磁気抵抗効果の逆効果と考えれば界面スピン軌道トルクはTAMRの逆効果である。これは純粹に界面スピン軌道相互作用に起因する現象である。トルクとTAMRの相関および発現条件を精査し、界面スピン軌道物性の解明に資することが本研究の目的である。

界面スピン軌道相互作用は上述の物性に加え、垂直磁気異方性や界面Dzyaloshinskii-Moriya相互作用、そしてその電圧制御[5]等の物性を生むことが知られている。本研究は界面スピン軌道物性のプローブ手法としても期待できる。バルクと異なり界面は金属人工格子の技術により様々な設計が可能であるため、今後の様々な展開を期待したい。

参考文献

- [1] S. Miwa et al., Nat. Mater. **13**, 50 (2014).
- [2] I. M. Miron et al., Nat. Mater. **9**, 230 (2010). L. Liu et al., Science **336**, 555 (2012). Y. Niimi et al., Phys. Rev. Lett. **109**, 156602 (2012). J. Kim et al., Nat. Mater. **12**, 240 (2012). など
- [3] A. Manchon, Phys. Rev. B **83**, 172403 (2011).
- [4] S. Hatanaka, S. Miwa et al., Appl. Phys. Lett. **107**, 082407 (2015).
- [5] K. Nawaoka, S. Miwa et al., Appl. Phys. Express **8**, 063004 (2015).

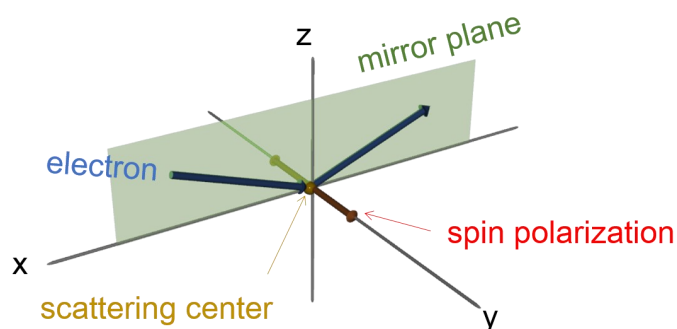


図1：スピン依存散乱。電子の散乱面と系の対称面が一致する時、対称面垂直方向にスピン偏極する。

ダイヤモンドスピンセンサーを用いた室温 ナノスピン変換

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
安 東 秀



A01：「磁気的スピン変換」公募班では、ダイヤモンド中の窒素-空孔複合体中心（NV中心）に含まれる単一スピン状態を用いて“室温で動作するナノスピン検出器”を構築します。このダイヤモンドナノスピン検出器を用いたスピン変換機能と素子機能の実証を目指します。具体的には、まず、(1)強磁性体の磁気共鳴信号からの漏洩磁場を計測し、続いて、(2)スピンホール効果や熱マグノンによるスピントルクを用いて磁気共鳴信号を変調することによりスピン信号を伝送します(図1)。

1997年のGruber等の研究により[1]、ダイヤモンド結晶中の単一のNV中心においてレーザー励起(波長532ナノメートル)による蛍光をモニターしながら蛍光の基底状態にある電子スピン状態をマイクロ波共鳴励起することにより、蛍光強度の変化からNV中心中の単一電子スピン状態を室温・大気中で光学的に検出できることが判ってきました。さらには、最近の研究の進展により、このNV中心ダイヤモンド中の単一スピンは周囲の環境の漏洩磁場に応じて磁気共鳴周波数が変化し、スピンの寿命も変化することを利用して周囲に存在するスピンを検出可能なスピンセンサーとして有用なことが示され(例えば、磁気ドメイン細線からの漏洩磁場観測像やバルクハウゼン効果の磁気ダイナミクスのナノスケールで観測[2])、スピントロニクスへの応用にも有用なことが示されています。

本研究提案では、NV中心を漏洩磁場センサーとしてのみではなく、単一スピンを変換するナノスピン検出器として用い極小のスピン変換素子を作成します。これまでに、表面に分散したナノダイヤモンド粒子中の単一NV中心を用い、イットリウム鉄ガーネット(YIG)薄膜の磁気ドメインからの漏洩磁場計測を確認しています(図2)。

以上、単一NV中心に存在する単一スピン状態を用いて極小なスピン検出器の動作を室温で実証し、ナノスピン変換素子の実現を視野に入れた応用への基礎原理の開拓を目指します。

参考文献

- [1] A. Gruber et al., Science **276**, 2012 (1997).
[2] J.-P. Tetienne et al., Science **344**, 1366 (2014).

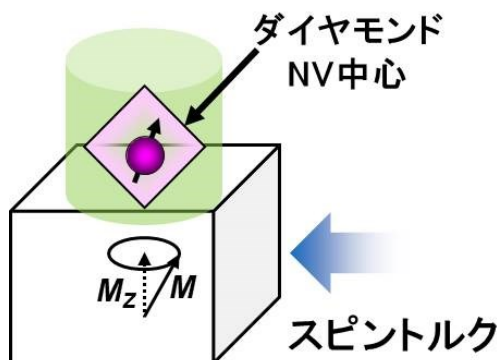


図1, ダイヤモンドNV中心を用いた室温ナノスピン変換の模式図、NV中心より強磁性体中の磁気共鳴信号を読み取り、スピントルクにより変調する。

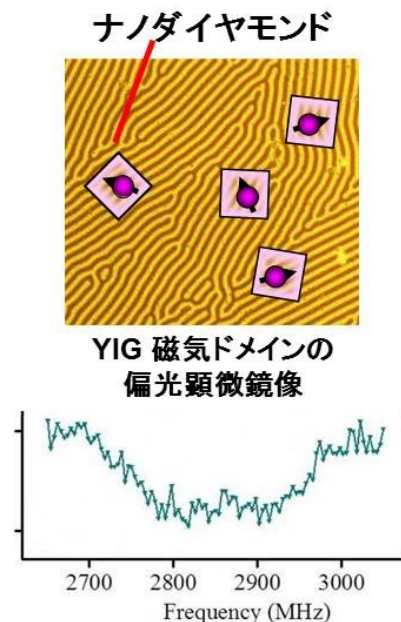
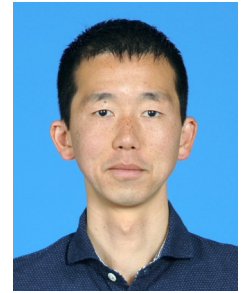


図2, YIG上に分散したナノダイヤモンドNV中心より計測した磁気ドメインからの漏洩磁場信号。

ファンデルワールスヘテロ構造における スピン変換技術の確立

東京大学生産技術研究所基礎系部門・助教 守谷 頼



本公募研究ではファンデルワールス(vdW)界面におけるスピン-電荷変換を目標として研究を行う。グラフェンや MoS_2 などの二次元物質は図1に示すような二次元シート状の結晶構造を持つ。バルク結晶においてはこれらのシートがvdW力によって積層した結晶構造を持つのが特徴である。vdW力によってつながった界面は容易に劈開することが可能であり、図1に示す物質は全て単原子層・単分子層まで劈開しても安定であることがすでに知られている。さらに、これらの二次元物質同士はvdW力によって自由に接合させ、ヘテロ構造を作製することが可能である。vdW界面は結合を持たないため界面での拡散や格子不整合などの問題は原理的に存在しない。原子レベルで平坦な単結晶界面の作製が可能である。このようなvdW物質を用いて作製した強磁性/非磁性ヘテロ界面におけるスピン注入・スピン検出が私の研究で目標とするところである。

そのためにはまず、強磁性の層状物質が必要である。我々が着目したのが $\text{Fe}_{0.25}\text{TaS}_2$ という材料である。この材料は図2(a)に示すように TaS_2 層の間にFeがインターカレートした構造を持っており160 K以下で強磁性になることが知られている。他にも、面直磁気異方性を持つ事、スピン軌道相互作用が大きい事などの特徴がある。我々のグループではテープを用いた劈開法によりこの結晶を100 nm程度まで薄層化することに成功した。さらに図2(b)に示すように2つの $\text{Fe}_{0.25}\text{TaS}_2$ 結晶をvdW積層させた $\text{Fe}_{0.25}\text{TaS}_2/\text{Fe}_{0.25}\text{TaS}_2$ 接合を作製した。低温にて素子の面直伝導を測定し、図3(c)に示すようなトンネル磁気抵抗効果の観測に成功した[1]。これらの実験結果は、vdW接合を介したスピン注入が可能であることを示している。今後は、二次元物質を用いた強磁性/非磁性vdWヘテロ接合におけるスピン伝導への展開を狙う予定である。

参考文献

[1] M. Arai, R. Moriya, N. Yabuki, S. Masubuchi, K. Ueno, and T. Machida, Appl. Phys. Lett. **107**, 103107 (2015).

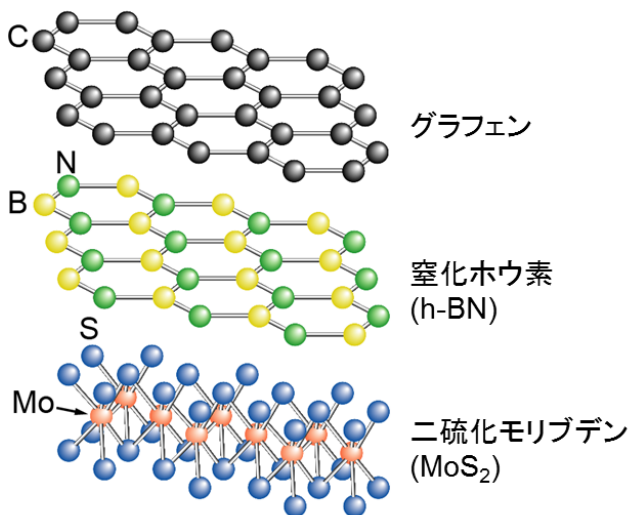


図1: 様々な二次元物質

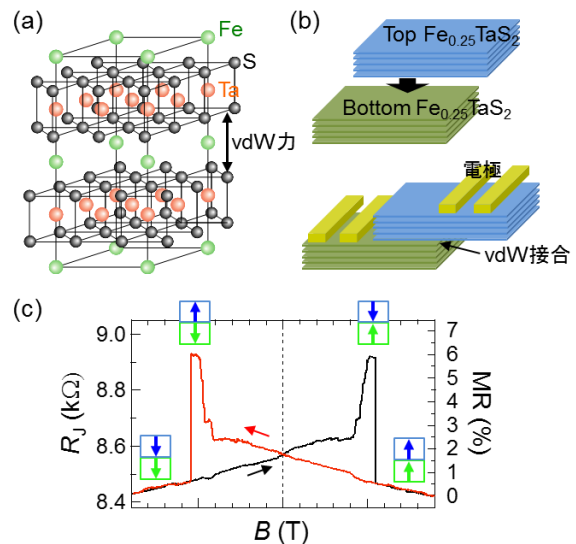


図2: 層状物質 $\text{Fe}_{0.25}\text{TaS}_2$

効率的スピン流生成とスピンホール角制御のための界面制御とバンドエンジニアリング

東京大学大学院工学系研究科 総合研究機構・准教授
大矢忍



半導体材料をベースとしたスピントロニクスデバイスを実現するためには、スピン注入、輸送、検出を高効率に行うことが不可欠である。これらの目的においては、半導体と強磁性体の伝導率不整合により半導体へのスピン注入効率が低下することや、界面でのスピンの散乱、スピン流の検出電圧と関係するスピンホール角を決める物理が未解明であることなどの問題が存在し、デバイス応用上必要な基本的な知見や技術がまだ十分には確立されているとは言えない。本研究では、分子線エピタキシー法により、様々なエピタキシャル単結晶材料系を用いた原子レベルで制御された高品質界面を作製し、スピンポンピングを利用した高効率のスピン注入を目指す。図1 (a)(b)に本研究で用いる材料系（一部）の透過型電子顕微鏡像[1-3]を示す。これらの物質は強磁性半導体と呼ばれており、半導体でありながら強磁性を示すユニークな材料系である。半導体と整合性が良く、半導体と原子レベルで平坦な界面を実現できる。GeFeにおいては、B（ボロン）をドーピングすることにより、Fe濃度などにより決まるキュリー温度とは独立に抵抗率を制御することができ[4]、将来のデバイス応用上大きな問題である伝導率不整合の問題を回避できる可能性があると期待される。その他、酸化物系のエピタキシャル材料系を用いることも検討している。

一方で、図1 (c)に示すようなデバイス構造を用いてチャンネル層にゲートを印加することにより、スピンの注入されるチャンネル層のバンドを選択できるようにし、スピンホール角がどのように変化するかについても調べていく予定である。

参考文献

- [1] S. Ohya, K. Ohno, and M. Tanaka, Appl. Phys. Lett. **90**, 112503 (2007).
- [2] Y. K. Wakabayashi, S. Ohya, Y. Ban, and M. Tanaka, J. Appl. Phys. **116**, 173906 (2014).
- [3] Y. K. Wakabayashi, Y. Ban, S. Ohya, and M. Tanaka, Phys. Rev. B **90**, 205209 (2014).
- [4] Y. Ban, Y. K. Wakabayashi et al., AIP adv. **4**, 097108 (2014).

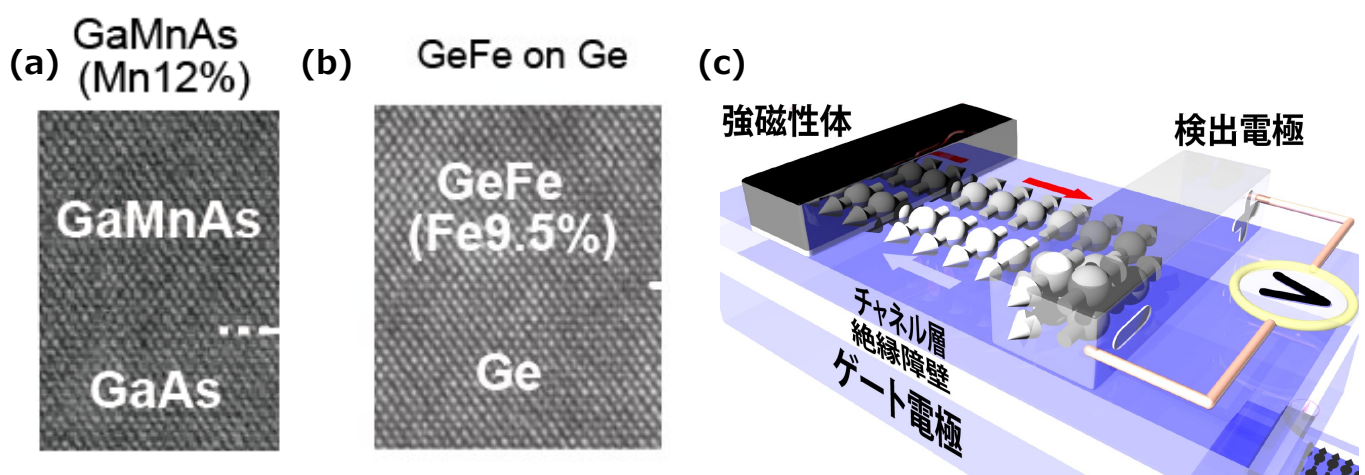


図1 (a)(b)本研究で利用する材料系（一部）の透過型電子顕微鏡写真 (c)スピン注入に用いるデバイス構造

電子スピン制御技術を用いたもつれ光子対の計測実験



東京大学大学院工学系研究科・助教 松尾貞茂

光の偏光状態や電子のスピン状態は、それぞれ量子ビットとなることが知られており、量子情報処理の実現を目指して活発に研究が行われてきました。その中でも、この二種類の量子ビット間のインターフェースは光の長距離コヒーレンスと固体デバイスの集積性の両方の強みが反映されるため、将来的な量子情報処理デバイスの応用上、非常に重要です。我々の研究グループでは、このインターフェースでの物理の解明と制御技術の確立のために、単一光子偏光からGaAs/AlGaAsヘテロ接合の2次元電子系に形成した量子ドットの単一電子スピンへの状態転写に関する研究を行ってきました(1,2)。現在、安全な量子情報通信の実現に不可欠な量子中継器の実装のため、もつれ光子対と電子スピンのインターフェースの研究が急務となっています。

そこで、新学術領域公募研究では、主にもつれ光子対から電子スピンへの状態転写の技術開発を目的に研究を行っています。(図1に本研究の位置づけの概念図を示します。)もつれ光子対とは、二つの光子の偏光状態が、互いに量子もつれ相関を持っている状態のことです。このもつれ光子対は非線形光学効果を利用して作ることができます(3)。図2のような特徴的な二つの円状の光が非線形光学効果で発生します。この二つの円の交点を取り出すともつれ光子対が得られます。我々は、このもつれ光子対のどちらか一方の光子の偏光状態をGaAs/AlGaAsヘテロ接合の量子ドットの電子スピン状態へと転写する技術の確立を目指して現在実験を行っています。もつれ光子対の一方の偏光状態がコヒーレントに電子スピンの状態へと転写された際には、光子偏光と電子スピンとの量子もつれ相関が得られると考えられます。このような異種量子ビット間での量子もつれ相関はこれまで実現されていません。これを達成することで、異種量子ビット間の量子もつれ相関の特性を明らかにするとともに、量子中継器の実現のための礎を築きたいと考えています。

参考文献

- [1] T. Fujita et al., Phys. Rev. Lett. **110**, 266803 (2013).
- [2] T. Fujita et al., arXiv 1504.03696.
- [3] P. G. Kwiat et al., Phys. Rev. Lett. **75**, 4337(1995).

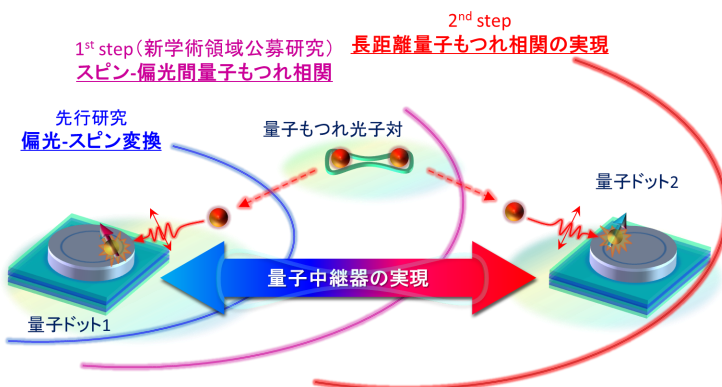


図 1: 量子中継器実現にむけた本公募研究の位置づけの概念図。量子中継器実現の1stステップとして本公募研究を行っています。

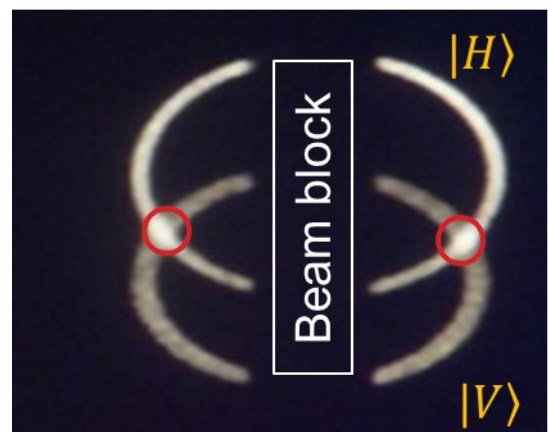


図2: 非線形光学効果で発生する光の分布。二つの円の交点に同時に来る光子が量子もつれ相関を持つもつれ光子対となっています。

光制御型高スピン多核錯体の開発

九州大学先導物質化学研究所・教授 佐藤 治



光、電場、磁場、温度等の外部刺激により物性（磁性¹⁻²、電導性、機械特性³）を自在にスイッチングできる分子性物質の開発を目指して研究を行っている。本新学術領域では特に、光や電場により磁性が可逆にスイッチする新しい外場応答性分子磁性体の開発を試みている。以下では、我々の最近の研究成果について紹介する。

光応答性一次元磁性体の開発：光誘起スピン転移により磁気特性を制御できる単一次元鎖磁石 $\{[\text{Fe}^{\text{III}}(\text{Tp}^*)(\text{CN})_3]_2\text{Fe}^{\text{II}}(\text{bpmh})\}_2\text{H}_2\text{O}$ （錯体 $\mathbf{1}$ ）を開発した[1]。錯体 $\mathbf{1}$ は図1に示すように二重ジグザク鎖構造を有し、 Fe^{II} イオンが約175 Kでスピン転移を示す。この物質に5 Kで532 nmの光を照射すると Fe^{II} イオンが低スピンから高スピンへと変換し、一軸異方性を有する強磁性一次元鎖が生成した。光誘起準安定状態の磁気特性を測定したところ、交流磁化率の実部、虚部共に周波数依存性を示し、錯体 $\mathbf{1}$ が光応答性単一次元鎖磁石であることが分かった。

高スピン多核錯体の開発：光応答性高スピン多核錯体の開発を目指し、鉄42核錯体 $\{[\text{Fe}(\text{Tp})(\text{CN})_3]_{24}\{[\text{Fe}(\text{H}_2\text{O})_2]_6\{[\text{Fe}(\text{dpp})(\text{H}_2\text{O})]_{12}(\text{CF}_3\text{SO}_3)_6\}18\text{H}_2\text{O}$ を開発した（錯体 $\mathbf{2}$ ）[2]。錯体 $\mathbf{2}$ は $\text{Fe}^{\text{II}}_{24}\text{Fe}^{\text{III}}_{18}$ の混合原子価状態をとり、 Fe^{II} と Fe^{III} がシアノ基で架橋された籠型中空構造を有する（図2）。また、磁性の測定により Fe^{III} のスピンがシアノ基を介して強磁性的に相互作用し、錯体 $\mathbf{2}$ が $S = 90/2$ を有する高スピン錯体であることが分かった。これまで報告された物質の中で最高のスピン量子数を有する錯体は2006年に報告された $S = 83/2$ を有するマンガン19核錯体である。従って、錯体 $\mathbf{2}$ はこれまで合成された中で最大のスピン量子数を有する分子であると言える。現在、この物質、及びその類似物質に光応答性を付与し、新しい光制御型高スピン多核錯体を開発することを目指している。

参考文献

- [1] O. Sato et al., Nat. Commun., **4**, 2826 (2013).
 [2] O. Sato et al., Nat. Commun. **6**, 5955 (2015).
 [3] O. Sato et al., Nat. Chem. **6**, 1079 (2014).

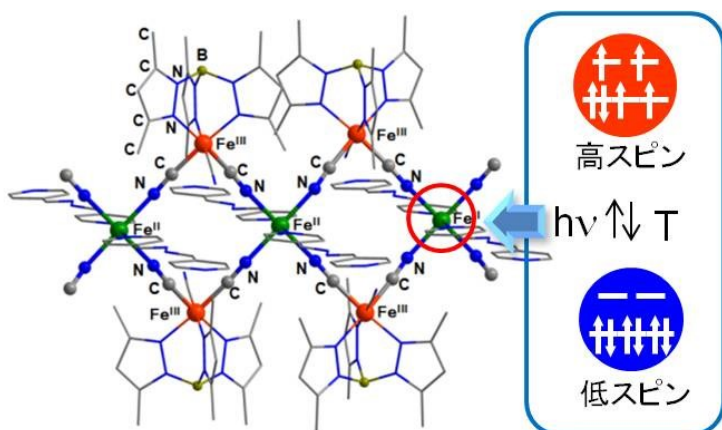
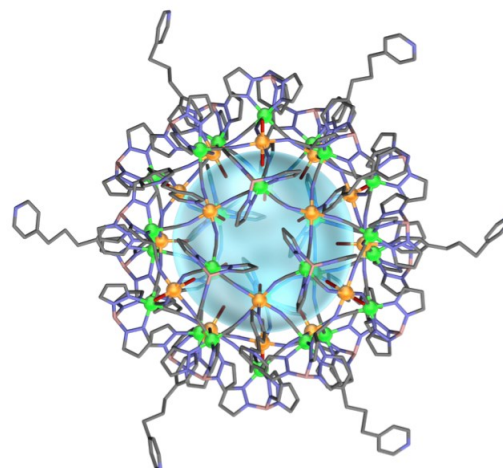
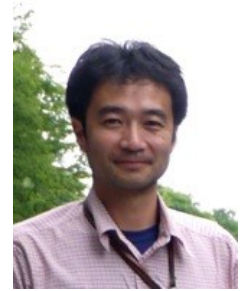


図1. 光応答性一次元磁性体 [1]

図2. 最大のスピン量子数($S = 90/2$)を有する鉄42核錯体 [2]

角運動量はどこへ？ 光子→気体原子→固体容器のスピンの移行とその制御

東京農工大学大学院工学研究院先端物理工学部門・准教授
畠山 温



私の専門分野は、気体原子のレーザー分光や量子操作です（日本物理学会の領域でいうと、領域1・量子エレクトロニクスに該当します）。気体原子、特に希薄な気体アルカリ原子は、光ポンピングとよばれる手法でそのスピンを容易にほぼ100%偏極することができます。この過程では、光子のスピスが原子のスピスに移行し、そこに蓄積されます。そして、偏極した気体原子は閉じ込められた容器の壁に衝突し、そこでスピス偏極緩和します。このスピス偏極の損失は、偏極気体原子を使う多くの精密計測にとって問題で、表面でのスピス緩和過程の理解と抑制は長い間の重要な研究課題です。

一方、「失われた」スピスはどこにいくのでしょうか。角運動量保存則を考えると、最終的に固体容器の自転運動（古典的なスピス運動）に移行するはずですが。今回の私たちの公募研究では、図1に示すようなねじり秤装置を組み立て、気体原子の固体表面でのスピス緩和を容器の回転運動として力学的に検出する新しい試みに挑戦します。この測定により、気体原子が起こす固体表面での複雑なスピス緩和過程を、新たな視点から調べることができます。量子力学的なスピスがマクロな物体の回転運動に移行する過程を実際に観測するこの実験に、私たちは物理の基礎的な興味からもわくわくしています。

さらに私たちは、固体表面での緩和を、図1に示すように周期的に配列した電流で作る周期磁場で意図的に誘起することにより、気体原子並進運動の容器中心まわりの角運動量を容器に移すというアイデアも持っています。原子スピスだけの場合に比べて、角運動量移行は何桁も増やせると見込んでいて、研究期間中にチャレンジします。

上述の研究は、気体原子の角運動量が固体にどのように移行するかを、力学的回転という新たな視点から調べる研究ですが、私たちは、気体のスピス物理と固体のそれとをつなげることに広く興味を持っています。本新学術領域研究において研究交流を深め、新しい研究の芽を生み出して行きたいと思っています。

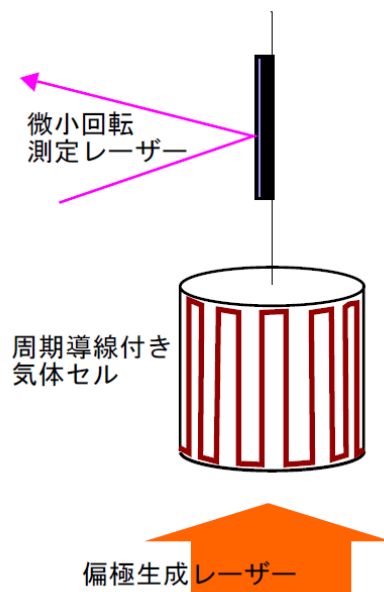


図1：実験装置の概略図

力学的回転運動の回転スピン流変換



慶應義塾大学理工学部物理学科・准教授 能崎 幸雄

ジュール熱損を伴わないスピン流は、スピンドバイスの高速・省電力動作を実現するキーテクノロジーとして注目を集めており、その高効率生成と磁気トルクへの高効率変換の実現が渴望されています。動的磁化過程において歳差運動を伴う磁化に効率よくトルクを与えるためには、歳差運動に同期して時間変調するスピン流が必要です。本研究では、このような交流スピン流を効率よく生成する技術として、力学的回転運動のスピン変換[1, 2]に注目しました。古くから知られるバーネット効果のスピン트로ニクス版ともいえるこの技術は、CuやAlなどのスピン軌道相互作用の小さな材料において大きなスピン流を生成できる可能性が理論的に指摘されており、スピン트로ニクスデバイスの設計自由度を飛躍的に高める可能性があります。一方、スピン流強度が回転周波数の4乗に比例することも予想されており[1,2]、周波数の高い力学的回転を与えることが肝要です。そこで、GHz帯の力学的回転を生成可能な弾性表面波(SAW)を利用した交流スピン流生成とその検出を目指しています。さらに、位相の異なる弾性表面波を干渉させることにより、高速磁化反転に適した回転スピン流を生成したいと考えています。SAWは、フィルタや共振・発振器、信号処理デバイスに広く応用されている技術です。したがって、既存のSAWデバイスとの整合性が極めて高く、SAWデバイスの高性能化や高機能化に新しい道を拓く可能性があります。また、強磁性体の磁化と強く結合する回転スピン流の性質を利用することにより、各種磁気センサーの高感度化が実現できます。このように、磁気メモリや磁気ストレージの高性能化に留まらず、幅広いデバイスへの応用が期待できるため、応用物理学的観点から大きな波及効果が予想されます。

参考文献

- [1] M. Matsuo et al., Phys. Rev. B **87**, 180402(R) (2013).
 [2] J. Ieda et al., Solid State Commun. **198**, 52 (2014).

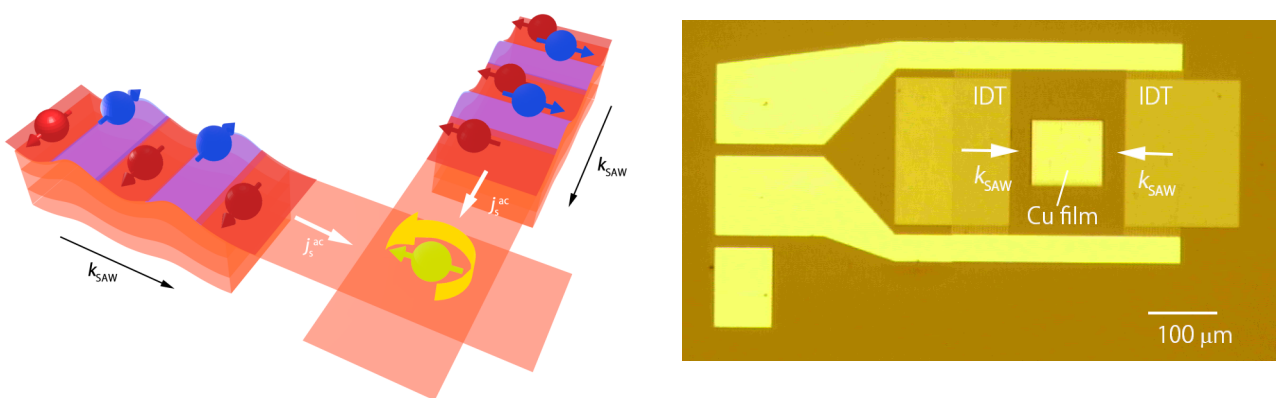


図 (左) 弾性表面波の回転スピン流変換の模式図。(右) 交流スピン流生成素子の写真。

Efficient Spin Conversion and Propagation Using Antiferromagnetic Skyrmions

Tohoku University, Institute for Materials Research,
Assistant Professor, Oleg A. Tretiakov



Introduction

As a part of Theory Team A5 led by Prof. Murakami, my research group works on efficient spin conversion and spin current propagation in spin spiral magnetic systems. Contributing research group members of this project are Dr. Joseph Barker and Dr. Koji Sato from Tohoku University.

Theory and Simulations of Antiferromagnetic Skyrmions

Manipulating small spin textures, which can serve as bits of information, by electric and spin currents is one of the main challenges in the field of spintronics. Ferromagnetic skyrmions recently attracted a lot of attention because they are small in size and are better than domain walls at avoiding pinning while moved by electric current. Meanwhile, ferromagnetic skyrmions still have disadvantages such as the presence of stray fields and transverse dynamics, making them harder to employ for spintronic applications. In this project, we propose a novel topological object: the antiferromagnetic (AFM) skyrmion. This topological texture has no stray fields (see Fig. 1) and we show that its dynamics are faster compared to its ferromagnetic analogue.

We obtain the dependence of AFM skyrmion radius on the strength of Dzyaloshinskii-Moriya interaction coming from relativistic spin-orbit effects and temperature. Generally Dzyaloshinskii-Moriya interaction leads to spin spiral structures, but in the case of AFM skyrmion it helps to stabilize this topological object.

Moreover, we find that the thermal properties, e.g. such as the AFM skyrmion radius and diffusion constant, are rather different from those for ferromagnetic skyrmions. More importantly, we show that due to unusual topology the AFM skyrmions do not have a velocity component transverse to the current and thus may be perfect candidates for spintronic applications [1].

The next step is to employ temperature gradients for efficient propagation of skyrmions in antiferromagnetic insulators and build the theory of spin-orbit torque driven AFM skyrmion motion.

References

- [1] J. Barker and O.A. Tretiakov, ArXiv: 1505.06156 (2015).

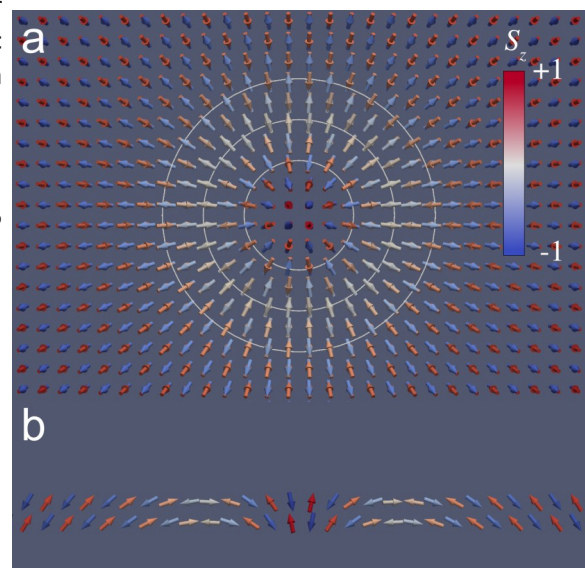


Figure 1 : Antiferromagnetic skyrmion

第一原理手法による界面電場・スピン軌道結合係数の見積りとスピン変換物質デザイン

金沢大学 理工研究域数物科学系・准教授

石井史之



本新学術の研究で、我々が目指すところは異種物質間の接合が生み出す特異なスピン軌道場を第一原理手法によって明らかにし、「ナノスピン変換」現象を記述する有効ハミルトニアン の物質固有のパラメータを評価し、スピン変換による新物性の創出に貢献しようというものです。具体的な研究内容としては以下で述べる、二つのサブテーマに関する研究を進めて参ります。

(1) バリー曲率が誘起する熱電変換効果

我々は、これまでの研究で殆ど考慮されてこなかった、バリー曲率その積分値である内因性の異常ホール伝導率の熱電係数への影響を調べています。Rashba型のスピン軌道相互作用を考慮したモデル計算では、現実的なパラメータで数10パーセント程度はゼーベック係数を変化させる可能性があることが明らかになりました[1]。現在、第一原理手法によって、酸化トポロジカル絶縁体[2]、スキルミオン系を中心に、異常ゼーベック係数、異常ネルンスト係数が大きな系を探索しています。

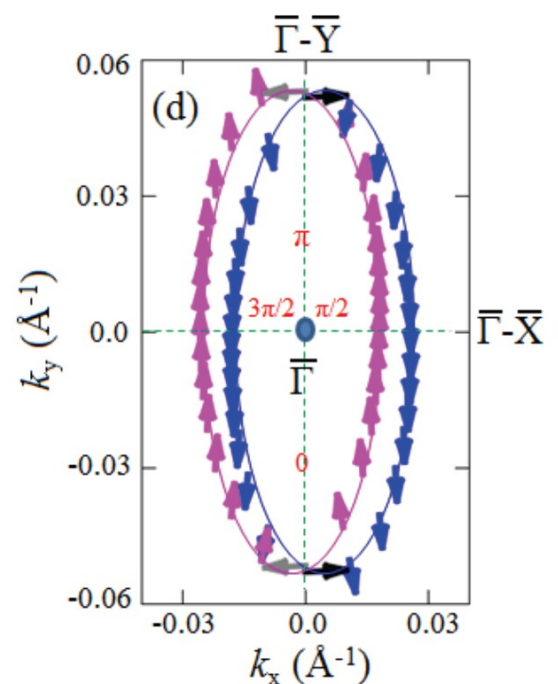
(2) 非Rashba型スピンが誘起する物性

物質の表面・界面や内部電場で誘起される電場起因したスピン軌道分裂の代表的なものとしてRashba効果があります。我々はこれまで、酸化バルクや界面のRashba効果を調べてきました。また、界面や表面の面内方向に電気分極がある場合、“persistent spin helix”というスピン状態を示すことを明らかにし、ホールドープしたZnO(10 $\bar{1}$ 0)表面でスピン寿命が大きくなる可能性を示しました[3]。現在、半導体界面を中心に、特異なスピン状態を示す系の探索と物性への影響について調べています。

本新学術の実験・理論の研究者の方々との交流による新たな研究課題にも積極的に取り組んで参りたいと思います。

参考文献

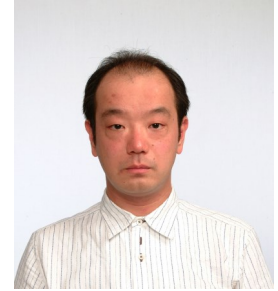
- [1] Y. P. Mizuta and F. Ishii, JPS Conf. Proc. **3**, 017035(2014),
ibid. **5**, 011023 (2015).
- [2] F. Ishii, Y. P. Mizuta, T. Kato, T. Ozaki, H. Weng, and S. Onoda, J. Phys. Soc. Jpn. **84**, 073703 (2015).
- [3] M. A. Absor, F. Ishii, H. Kotaka, and M. Saito, Appl. Phys. Express **8**, 073006 (2015)



図：ZnO(10-10)面のスピン構造

エレクトロマグノン過程に伴うスピン波スピン流の生成理論

福岡大学理学部物理科学科・准教授 宮原 慎



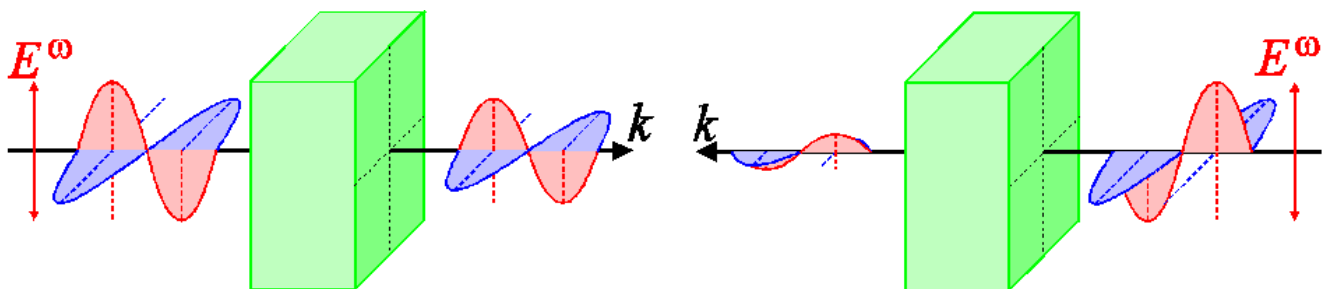
スピン系において、スピン軌道相互作用や軌道秩序の効果を取り入れることで、スピンと電気分極の結合を誘起できる。近年、スピンと電気分極の強い結合を示すマルチフェロイックス物質[強誘電性と(反)強磁性が共存する物質]が発見され注目を集めている。一般に、固体中では、外部印加された磁場は磁化を、電場は電気分極を誘起するが、スピンと電気分極が結合するマルチフェロイックス系では、電場によって磁化を、磁場によって電気分極を制御することができる(電気磁気効果)。

静的な電気磁気応答に対応する動的な相関、すなわち、物質中の磁気励起過程における磁場成分の応答(いわゆる磁気共鳴過程)と電場成分の応答(いわゆるエレクトロマグノン過程)とに結合があれば、電場応答と磁場応答の干渉が起こる。こうした干渉効果は、光吸収の方向二色性[光の吸収強度が進行方向に依存する現象(図)]や自然旋光性として、観測することが可能であり、我々は、磁場中磁性体のマグノン励起がこれらの性質を示すことを明らかにした[1-3]。こうした方向二色性を示す励起は、通常、ギガヘルツからテラヘルツの周波数領域に存在している。そのため、方向二色性の効果は、高速通信スイッチや光回路におけるテラヘルツ光信号の効率的な光スイッチングに応用できる可能性があるなど、応用面でも今後更なる発展が期待されている。

本公募研究では、マグノン励起と電場との結合に関する微視的理論と原理の構築を行い、光励起されたエレクトロマグノンを用いてスピン波スピン流を生み出す機構を理論的に予見することを目指して研究を進めている。

参考文献

- [1] S. Miyahara, N. Furukawa, Phys. Rev. B **89**, 195145 (2014).
- [2] S. Miyahara and N. Furukawa, J. Phys. Soc. Japan **81**, 023712 (2012).
- [3] S. Bordacs, et al., Nature Physics **8**, 734 (2012)



図：方向二色性。吸収強度が光の進行方向によって異なる。

ナノスケールスピン液体におけるスピノン 超流動によるスピン変換理論

理化学研究所 古崎物性理論研究室、創発物質科学センター・専任研究員
小野田繁樹

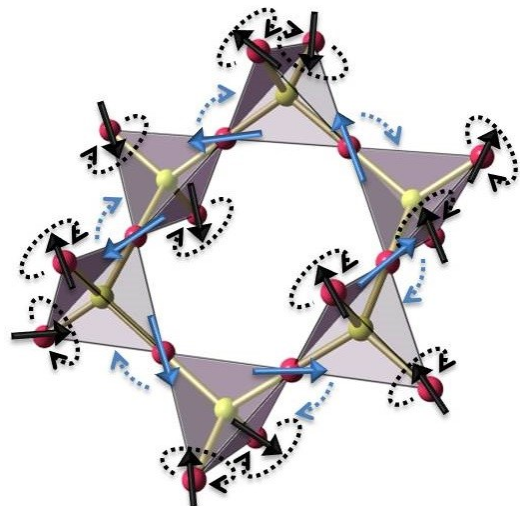


電子状態の特性を利用して、エネルギーや情報を効率よく物質に蓄積し、電磁波や熱などの異なる形態で物質から外部に効率よく取り出す原理を与えることは、物性理論の重要なテーマのひとつである。電子状態にアクセスするにはコヒーレンスをもった準粒子の励起・輸送を活用することが多い。特に、磁性絶縁体（Mott絶縁体）は、トポロジカル絶縁体と同様、金属・半導体での電子輸送・励起に付随して生じる散逸が大幅に抑制されるという特長をもつ。磁性絶縁体で生じる準粒子は、磁気秩序に伴ってコヒーレンスを示す集団的スピン励起子、マグノンだけではない。絶対零度まで磁気秩序を示さない量子スピン液体では、スピン励起はコヒーレンスを示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

希土類元素 $R = \text{Pr, Tb, Yb}$ を正四面体頂点で共有した構造（図1）をもつパイロクロア磁性絶縁体 $R_2B_2O_7$ では、強い磁気異方性のために、縮退した2状態で記述される R^{3+} イオンの磁気モーメントが正四面体の中心に向かってインかアウトを向きやすい強い磁気異方性をもつ。最近接間ではインとアウトのモーメント対を安定にする相互作用がはたらき、冷却とともに、各正四面体で2-イン・2-アウトとなる巨視的に縮退したスピン構造に凍結する（スピンアイス）[1]。そのとき3-イン・1-アウトのように正四面体中心に磁化のモノポール（スピノン）をもつような状態が励起として現れる。実際には、インとアウトの対を量子力学的に交換し、スピノンをホップさせる相互作用が付加的にはたらくため[2]、スピノンはエネルギー分散をもち、熱・スピン輸送に寄与する。また、基底状態の縮重も解け、閉曲線上のスピンを全て回転するような集団励起モード（仮想的光子）がギャップレス励起として出現する[3-5]。これらの励起子に期待されるバリスティック輸送、共鳴現象を公募研究期間で理論的に解明していく。特に、 $\text{Yb}_2\text{Ti}_2\text{O}_7$ では、スピノンがボーズ凝縮して仮想光子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[6]。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・熱流変換が期待される。

参考文献

- [1] S.T. Bramwell, M.J.P. Gingras, *Science* **294**, 1495 (2001).
- [2] S. Onoda, Y. Tanaka, *Phys. Rev. Lett.* **105**, 047201 (2010); *Phys. Rev. B* **83**, 094411 (2011).
- [3] Y. Kato, S. Onoda, *Phys. Rev. Lett.* **115**, 077202 (2015).
- [4] RIKEN RESEARCH (<http://www.riken.jp/en/research/rikenresearch/highlights/8138/>)
- [5] 小野田繁樹, *数理物理* **613**, 32 (2014).
- [6] L.-J. Chang, S. Onoda, Y. Su et al., *Nature Communications* **3**, 992 (2012).



図：パイロクロア格子上的局在スピン。2-イン・2-アウト構造、および、仮想光子励起[4]。

領域ニュース

平成26年度ナノスピントロニクス変換科学年次報告会開催

平成27年3月3日と4日の二日間にわたり京都大学桂キャンパスローム会館において、平成26年度年次報告会が開催されました。学会の多い時期にもかかわらず、91名の方にご参加いただきました。報告会では大谷先生の領域代表の挨拶のあと、各班による成果発表が行われました。今回は特別講演として、東京大学物性研究所の木俣先生と九州大学物理学科 佐藤琢哉先生にご発表いただきました。各セッションでは、各班長が班の研究内容と成果の概要を紹介した後、2名の班員が詳細な研究成果の報告を行いました。またポスター発表も総数44件を数え、活発な議論が交わされました。本領域の第一回にふさわしい報告会となりました。（文責：大岩顕）



集合写真

ナノスピントロニクス変換科学公募研究計画発表会

平成27年6月9日に柏の葉カンファレンスセンターにおいて公募研究計画発表会が開催され、今年度公募研究として新しく領域に加わった13名の先生方が、それぞれの研究計画を発表されました。各公募研究と先生方について本ニュースレターでご紹介しております。領域の計画研究を相補的な研究やあるいはまったく違った切り口の研究課題で、今後、公募研究との共同研究により、領域の研究の幅が大きく広がってゆくことを期待します。

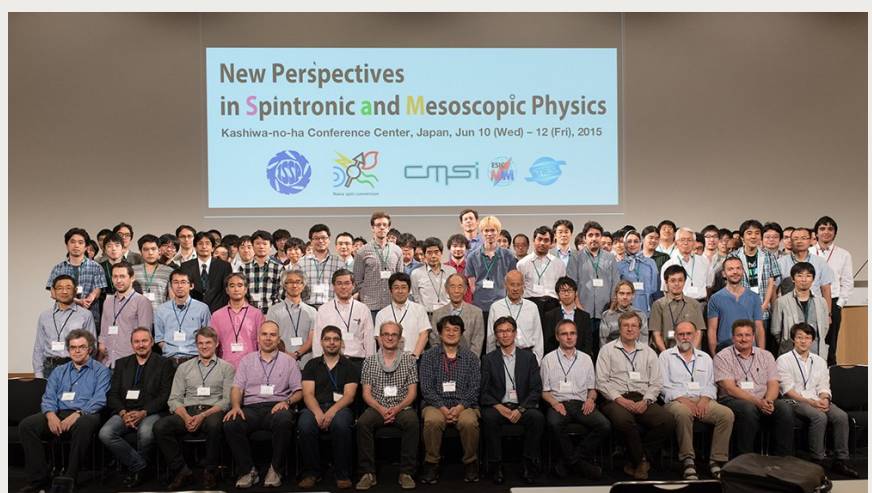
（文責：大岩顕）

New Perspectives in Spintronic and Mesoscopic Physics 開催

2015年6月10日から12日にかけて、柏の葉カンファレンスセンターにおいて、New perspective in Spintronic and mesoscopic physics 2015が開催された。スピントロニクスとメソスコピックサイエンスの学際領域をテーマとした会議であり、3日間の会議期間中、40人におよぶ国外の研究者を含む130人以上の研究者が30を超える招待講演と50以上のポスター講演を行った。その中で、新たな現象や素子構造など最新の実験・理論の知見についての発表がなされ、熱い議論が交わされた。概要集や会議の写真などは下記サイトにまとめられている。

<http://www.issp.u-tokyo.ac.jp/public/npsmp2015>.

（文責：針井一哉）



集合写真

領域若手研究者紹介

このコーナーでは、本領域に新しく加わった若手研究者の方々を紹介します。

中山 裕康

慶應義塾大学理工学部物理情報工学科 安藤研究室 特任助教

私は2013年3月に齊藤英治教授のご指導のもと東北大学大学院理学研究科物理学専攻より博士(理学)の学位を取得しました。その後、東北大学電気通信研究所附属ナノ・スピン実験施設半導体スピントロニクス(大野英男教授)研究室 日本学術振興会特別研究員を経て、本年度から慶應義塾大学理工学部物理情報工学科安藤研究室の特任助教としてスピン-電荷相互変換に関する研究を進めています。これまでの研究成果として、スピンホール効果によるスピン流-電流相互変換を介して発現する新しい磁気抵抗効果「スピンホール磁気抵抗効果」の発見があります。将来的には既存の枠組みを超えたデバイスの駆動原理を構築することで、省エネルギー社会の実現に貢献していきたいです。この「ナノスピン変換科学」における研究や交流を通じて、私自身も成長していければと考えています。



Muduli Prasanta Kumar

東京大学物性研究所 大谷研究室 特任研究員

I am a postdoctoral researcher in the Otani group at ISSP, University of Tokyo. My research interest is mainly aimed at exploring mesoscopic physics in devices based on the principles of magnetism and superconductivity. All my research so far has been based on the creation and manipulation of spin-polarized current in devices employing quantum mechanical tunneling phenomena. I obtained PhD degree in Physics from Indian Institute of Technology (IIT), Kanpur, India. During my PhD I worked on magnetic tunnel junctions (MTJs) made of half-metallic manganites. I developed a new lithography-free shadow masking technique to fabricate micron-scale tunnel junctions and used exchange bias effect to engineer the coercivity contrast between $\text{La}_{0.67}\text{Sr}_{0.33}\text{MnO}_3$ and Co. Besides tunneling study, I also made detailed investigation on the magnetic and electrical properties of epitaxial manganite thin films. After my PhD I did 18 month postdoctoral research at Leipzig University, Germany. My research there was to study spin-transport in submicron graphite flakes in a non-local geometry. I was also involved in high magnetic field measurements on thin flakes of graphite targeted at solving some unsolved puzzles in graphite electronic structure. From 2012 to 2015, I worked as a research associate in Device Materials Group (DMG) at the University of Cambridge. I studied spin-filtering phenomena in a completely new class of materials, the rare-earth mononitrides (ReNs). I showed that the spin-filter efficiency in tunnel junctions with ReNs can be tuned with applied electric and magnetic field. I also fabricated new kind of pseudospin-valve and double spin-filter devices sandwiched between two superconducting NbN electrodes. These devices will be pivotal for the manipulation of spin-polarized current in the rapidly growing research field of superconducting spintronics.



若手スクール「スピントロニクスとスピン流」を終えて

東北大学原子分子材料科学高等研究機構 (WPI-AIMR) ・助教 新関智彦

9/24(木)-25(金)の二日間にわたって開催された第一回スピントロニクス若手スクール「スピントロニクスとスピン流」は、本学術領域の強力なサポートのもと、関係各位のご尽力を賜った結果、80名を超える参加者を集め、成功裏に終了した。この場を借りて関係者の皆様方に厚く感謝申し上げたい。

初日は東北大学片平キャンパスのWPI-AIMR本館2階セミナー室において行われ、スピントロニクスの黎明期から現在に至るまでを5名の豪華な講師陣がわかり易く、かつ迫力あるプレゼンにより若手研究者らに伝えた。定員100名の会場は関係者を含めるとほぼ満席となり、非常に活発な質疑が展開された。

初日のプログラム終了後は、会場を変えて自由討論会・意見交換会が行われた。特に事前に席決めもせず、自由に着座してもらったので、幹事として会が盛り上がるか若干不安であったが、蓋を開けてみると全くの杞憂であった。浴衣姿のざっくばらんな形式も奏功して、初対面の若手研究者同士、大いに親交を深めたようであった。また、講師陣との膝を突き合わせた議論も大盛況で、一次会場から各部屋に戻った後も一部の講師を囲んで白熱した議論が続いていた。

二日目は大会議室を使って3名の講師によりスピン流の物理について講義がなされた。特に最終講演者の岡本氏はプレゼンの後半部分で、理数系研究者の潜在的なキャリアパスが、実は世間一般に知られるよりも非常に多岐にわたるという内容をご自身の経験も踏まえて熱く語られ、会場は大いに盛り上がった。交流会のおかげか講師、聴衆ともに初日の固さが取れ、さらに活発な質疑がなされた。

今回のスクールを通して、冒頭の挨拶で齊藤教授が述べた「将来のライバルを育てるための講義」をスピントロニクスのみならず様々な分野の若手研究者に対して届けることができたのは無上の喜びである。また、講師陣の知名度は言わずもがな、非常にインパクトがあると好評だったポスターによる周知も相まって、直接参加した若手研究者に留まらず、全国の関連研究者のコミュニティにおいて、本学術領域のプレゼンスが圧倒的に高められたものと自負している。

最後に、本スクールは金研国際共同研究センター (ICC-IMR)、原子分子材料科学高等研究機構 (WPI-AIMR)、ならびにERATO-SQR「スピン量子整流プロジェクト」からも人的物的に手厚い支援をいただいたことを申し添える。



図：上から佐藤勝昭先生（科学技術振興機構）、湯浅裕美先生（九州大学）、十倉好紀先生（理化学研究所）、齊藤英治先生（東北大学）、質問風景

参加者の声

本スクールでは、講師の方々が最前線の研究をわかりやすく解説してくださいました。研究の面白さを再確認し、将来、スピントロニクスを支える研究者へ成長するという目標をより強く意識できるようになりました。また、同年代の意欲ある若手との交流を経て、自分の枠に囚われずに切磋琢磨することが大切だと実感できました。

東北大学齊藤研究室 M1 大柳洸一さん

スカーミオンの講義に興味をもち参加しましたが、どの講義も分かりやすく、またスピンによって描かれる物理への好奇心が非常にかき立てられる素晴らしい内容でした。欲を言えば、各々のトピックについてもう少し時間をかけて聞きたかったのですが、スクール参加は研究に対するモチベーションへつながり貴重な2日間となりました。

慶應義塾大学能崎研究室 M1 高橋真央さん

多様な切り口から語られる最先端の講義はどれも面白く、様々な分野へと興味が広がりました。その後の懇親会もまた刺激的な時間となりました。集まった学生はスピントロニクスという共通の関心を持っている一方で、行っている研究内容はそれぞれ幅広く、話を聞く度に自分の認識の狭さを痛感させられるとともに自分の研究へのモチベーションの高まりを感じました。

大阪大学大岩研究室 M1 中川智裕さん



新庄輝也先生の喜寿を祝って

現在のスピントロニクス研究の礎を築かれ、長きにわたり分野を牽引されてこられた新庄輝也先生が今年、喜寿をお迎えになりました。そこで本領域に関連する先生方の中で特に新庄先生にゆかりの深い京都大学 小野先生と同じく京都大学 白石先生からお祝いのお言葉をいただきました。

新庄輝也先生が喜寿を迎えられましたこと、心からお祝いを申し上げます。僕が新庄研に入った頃、新庄先生は人工格子の開拓者として既に世界的に著名でありましたが、毎週のように稚拙なアイデアをぶつける僕を歓迎してくれていたように思います。ある時、メスバウアースペクトルの細かい解析結果をお見せしたところ、「スペクトルを一目見て分かるような実験でないとなあ」と仰いました。研究とは何かを一言で教えて頂きました。新庄先生が切り開かれた道はスピントロニクスという魅力的な分野へと成長し、本新学術領域研究に代表されるように、ますます活気溢れるものとなっています。今後とも後進育成と分野の発展にお力添え頂きたいと思っております。

京都大学化学研究所 教授 小野輝男

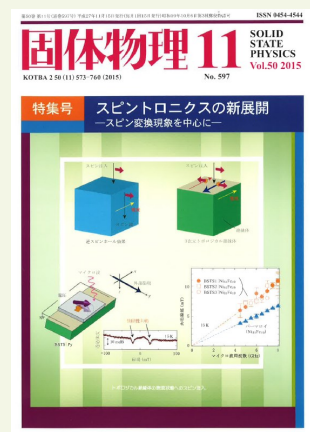
本新学術領域のアドバイザーともいべきお立場でいらっしゃる新庄輝也先生が今年で喜寿を迎えられましたこと、心からお祝いを申し上げます。新庄先生には前職の大阪大学時代から足掛け10年以上研究室のゼミナールにご出席いただき、折々で貴重なアドバイスを頂いておりますが、先生の着眼点の鋭さ、枯れることのない好奇心、稀に発せられる鋭い(辛口?)コメントに、いつも感謝している次第です。現在もゼミのない週には各種剛体球を用いた力学実験を定期的になさっておられるように大変お元気でいらっしゃいますが、これからも益々お元気で、そして我々後輩たちを叱咤激励頂きたいと願っております。先生、今後共宜しくお願い致します。



京都大学大学院工学研究科 教授 白石誠司

「固体物理」誌2015年11月特集号「スピントロニクスの新展開—スピン変換現象を中心に—」発刊

「固体物理」誌(株)アグネ技術センター)では、固体物理に関する多様な記事を掲載する月刊誌で、1年に12号発行しています。うち毎年1号は、特定のテーマに沿った記事をまとめた特集号としています。先日発行された2015年11月号(Vol.50 No.11)は「スピントロニクスの新展開—スピン変換現象を中心に—」と題し、スピン変換現象をテーマとした14編の記事を掲載した特集号となっています。編集委員(敬称略)は江藤幹雄(慶應大)、大岩顕(阪大)、大谷義近(東大)、齊藤英治(東北大)、村上修一(東工大)で、執筆者は当領域代表の大谷を始めとして領域関係者が多数入っています。特集号のみでも購入できますので定価4,536円)、ぜひご覧ください。(文責:村上修一)



特集号表紙

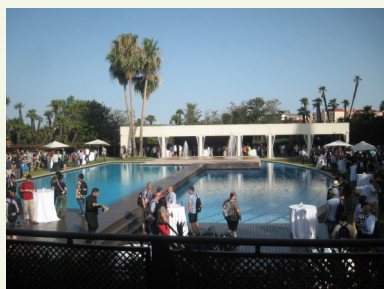
国際会議報告

20th International Conference on Magnetism (ICM2015)

July 5-10, 2015, Barcelona, Spain

第20回磁性国際会議 (ICM2015) が2015年7月5日 (日) から10日 (金) までの6日間、バルセロナ観光の中心である旧市街から地下鉄で20分程度の郊外に位置する国際会議場 (Palau de Congressos) で開催されました。日曜の午後に、Givord (CNRS) の特別講演「Highlights from 30 years of Magnetism」を皮切りに多くの講演と活発な議論が行われました。印象に残っているものとして、まずJungwirth (Nottingham大) (招待講演) などに代表される反強磁性体やそのスピン軌道トルクを用いた研究が多くなってきたことがあげられ、これまでの強磁性体をベースとするスピン移送トルクの研究は若干少なくなった気がしました。スピン軌道相互作用を中心としたスピントロニクス、いわゆるスピンオービトロニクスが一つのセッションにまとめられ、IUPAP Young Scientist Medalsを受賞した林氏 (NIMS) などの多くの講演があったことも今回の会議の特徴であったと思います。初日のGivord (CNRS) の講演でも、磁性研究のキーワードがスピン軌道相互作用であるというメッセージが感じられ、研究の潮流がスピン軌道相互作用を中心とするスピン物性研究にシフトしてきていることを実感しました。また、もう一つ印象に残っているのは、半導体などへのスピン注入の研究手法としてスピンポンピング効果を用いた報告が非常に多くっており、世界中で広く使われるようになっていくことが実感され、Chien (Johns Hopkins大) のIUPAP Magnetism Award & Neel Medal受賞記念講演でもこれについて議論されておりました。今回の会議では、本新学術領域からも講演が多数行われました。代表的なところとして、A05班の前川 (JAEA) はスピン起電力とスピンゼーベック効果について準基調講演を行い、領域総括の大谷 (ISSP) は金属系スピントロニクスの招待講演、A05班の村上 (TIT) はトポロジカルなマグノニクス研究の招待講演を行いました。A04班の齊藤 (AIMR) は基調講演「Spin Current Generator」で、まさにナノスピン変換科学の関わる一連の研究成果を紹介しました。会場の空席はほとんどなく、まさにこの分野を牽引しているのだということを実感しました。

(文責: 水上成美、安立裕人)



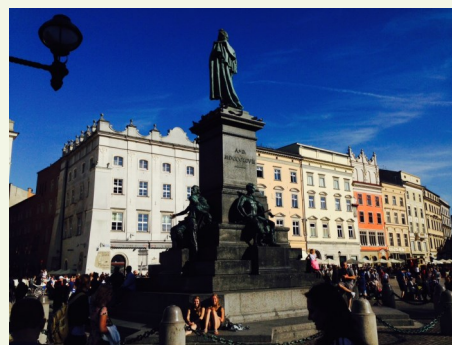
(左) ウェルカムレセプションの様子。(中) A04班の齊藤先生による基調講演の様子。(右) 市内・サグラダファミリア。

22nd International Colloquium on Magnetic Films and Surface

July 12-17, Cracow, Poland

ICMFSは磁性薄膜を対象とした小規模な会議です (口頭発表: 約80件、ポスター発表: 約140件)。口頭発表は一つのセッションで行われますので、研究成果を他領域の研究者に報告したり、分野外の研究内容を理解する良い機会になります。初心者向けに発表して下さる方が多く、大変勉強になりました。開催場所はポーランドのクラクフでした。アウシュビッツ強制収容所の見学の見学拠点であるほか、映画「シンドラーのリスト」の工場やユダヤ人ゲットー地区の跡地があります。悲しい過去とは対照的に旧市街の街並みは美しく、気候も穏やかでした。会議中で最も印象的だったのは、ポスターセッションです。ジョッキを片手に青空の下で議論するのは非常に新鮮でした。

(文責: 安藤裕一郎)



旧市街の街並み。

受賞

皆様おめでとうございます。

平成27年4月15日

大矢 忍 東京大学工学系研究科 (A02班、公募研究)

平成27年度 科学技術分野の文部科学大臣表彰 「スピン自由度を生かした半導体バンドエンジニアリングの研究」
http://www.mext.go.jp/b_menu/houdou/27/04/1356509.htm

平成27年7月6日

河野 慎 大阪大学大学院基礎工学研究科 浜屋研究室 (A02班)

20th International Conference on Magnetism, Best Poster Award
「Spin transport through high-quality epitaxial Ge/Fe₃Si heterostructures in Cu-based lateral spin valves」
http://www.icm2015.org/best_posters.html

平成27年9月9日

飯浜 賢志 東北大学 水上研究室 (A03班)

日本磁気学会 学術奨励賞 (内山賞)
Magnetization Dynamics and Damping for L10-FePd Thin Films with Perpendicular Magnetic Anisotropy, J. Magn. Soc. Japan **39**, p.57-61 (2015).
www.magnetics.jp/wp-content/uploads/list27.pdf

平成27年9月9日

佐藤 哲也 日本大学理工学部 塚本研究室 (A03班)

日本磁気学会 学生講演賞 (桜井講演賞)
GdFeCo二層膜における長短パルス光照射極短時間加熱・熱拡散過程の誘電体中間層厚依存性
www.magnetics.jp/wp-content/uploads/list27.pdf

平成27年9月16日

石井 友章 東京大学工学系研究科 大矢研究室 (A02班、公募研究)

第38回 (2015年春季) 応用物理学会講演奨励賞
「Band structure of GaMnAs near the Fermi level studied by time-resolved light-induced reflectivity measurements」
<http://www.jsap.or.jp/activities/award/lecture/dai38kai.html>

平成27年9月16日

若林 勇希 東京大学工学系研究科 大矢研究室 (A02班、公募研究)

応用物理学会第3回英語講演奨励賞
「Room-temperature local ferromagnetism and its nanoscale domain growth in the ferromagnetic semiconductor Ge_{1-x}Fe_x」
<http://annex.jsap.or.jp/spintro/>

平成27年9月17日

岡孝保 大阪大学大学院基礎工学研究科 浜屋研究室 (A02班)

日本金属学会 2015年秋季講演大会 優秀ポスター賞
「Co₂FeSi_{0.5}Al_{0.5}ホイスラー合金電極を用いたn-Ge中の室温スピン伝導観測」
http://jim.or.jp/MEETINGS/2015_atmn/program/mobile/src/poster_award.php

平成27年9月29日

永田 祐吾 東京農工大学工学部 畠山研究室 (A04班、公募研究)

第16回原子衝突学会若手奨励賞 「反水素原子ビームの研究」
<http://www.atomiccollision.jp/youngprize/youngprize.html>

平成27年11月1日

大沼 悠一 東北大学金属材料研究所齊藤研究室/日本原子力研究開発機構 (A05班)

日本物理学会領域3 (磁性) 第1回学生奨励賞 「マグノンによるスピン流生成の線形応答理論」
<http://r3.div.jps.or.jp/>

平成27年11月1日

若村 太郎 東京大学物性研究所大谷研究室/パリ南大学Marie-Curie Fellow (A01班)

日本物理学会領域3 (磁性) 第1回学生奨励賞 「超伝導体におけるスピン注入とスピン輸送」
<http://r3.div.jps.or.jp/>

平成27年11月1日

谷口 卓也 京都大学化学研究所小野研究室 (A01班)

日本物理学会領域3 (磁性) 第1回学生奨励賞 「スピンホールトルクによる磁壁クリープ現象の研究」
<http://r3.div.jps.or.jp/>

平成27年12月1日

S. E. Moussaoui 日本大学理工学部 塚本研究室 (A03班)

Magnetics and Optics Research International Symposium 2015 Best Poster Award 「Ultrafast Demagnetization in Gd₂₃Fe_{77-x}Co_x」,
S. E. Moussaoui, H. Yoshikawa, T. Sato, A. Tsukamoto
<http://moris2015.org/awards.html>

平成27年12月1日

吉川 大貴 日本大学理工学部 塚本研究室 (A03班)

Magnetics and Optics Research International Symposium 2015 Best Poster Award 「The magnetic layer thickness dependency of all-optical magnetization switching in GdFeCo thin films」, H. Yoshikawa, S. Terashita, R. Ueda, S. E. Moussaoui, and A. Tsukamoto
<http://moris2015.org/awards.html>

領域からの連絡

◇ 領域ホームページをご活用ください <http://www.spinconversion.jp/>

- * 今後、成果発表やイベント情報など、様々な領域の情報を発信してまいります。是非ホームページを研究にご活用ください。
- * 領域メンバー専用ページから皆様の成果が入力できるようになっています。入力方法は簡単ですので、領域の広報活動の一環として論文など発表された際には、入力にご協力お願いいたします。

◇ 英語版成果紹介誌「Research Highlights vol.1」を発行しました。

主に海外の研究者へ向けて、本領域から発表された論文をダイジェストで紹介しています。領域ホームページからダウンロード可能ですので、海外の研究者の方へ本領域のご紹介される際にお役立てください。
http://www.spinconversion.jp/rh/NSCS_Research_Highlights1.pdf

◇ 今後の領域の予定

- 平成28年夏頃、国際ワークショップ開催予定
詳細は今後、領域ホームページやメーリングリストを通じて連絡いたします。

◇ スピン物性未踏開拓支援制度 若手交流支援をご活用ください

本領域では若手研究者の研究支援と領域内研究交流を目指して、若手交流支援制度を推進しています。領域内で共同研究を行ってみたい若手研究者の方、是非本制度をご利用ください。詳細は領域ホームページ (<http://www.spinconversion.jp/act.html>) をご覧ください。

◇ 謝辞について

本研究領域での成果による論文発表では以下のように謝辞を入れていただくようお願い申し上げます。

This work was supported by Grant-in-Aid for Scientific Research on Innovative Area, "Nano Spin Conversion Science" (Grant No.###).

には、A01班は 26103002、A02班は26103003、A03班は26103004、A04班は26103005、A05班は26103006 が入ります。

国際会議・会合情報

9th International Conference on Physics and Applications of Spin-Related Phenomena in Solids (PASPS 9)

日時：平成28年8月8日（月）～8月11日（木）

場所：神戸国際会議場

ホームページ：<http://www.pasps9.org/>

Abstract deadline：平成28年4月1日（金）

編集後記

本号の巻頭言のように平成27年4月から13名の先生方が公募研究として新たに領域に参加されました。そこで本号では計画研究の分担者の先生方に加えて、公募研究の先生方に領域で行う研究をご紹介いただきました。このニュースレターにより領域の皆様の相互の理解が深まると共に共同研究へとつながるきっかけになればと願っています。もう一つ、これまでスピントロニクスの開拓と発展に多大なご尽力と貢献をされてきた新庄先生が喜寿をお迎えになりました。本号でそのお祝いの記事を掲載させていただけたことは大変な喜びです。お忙しい中、執筆依頼を快くお引き受けいただいた皆様には大変感謝いたします。またニュースレターにご要望がございましたら是非お寄せください。最後に、ニュースレターWGの先生方にはニュースレターとResearch Highlightsの編集・校正に多大なご協力をいただいたこと感謝いたします。（文責 大岩顕）

新学術研究領域「ナノスピントロニクス変換科学」研究体制

総括班

研究代表者	大谷義近	東京大学物性研究所・教授
研究分担者	齊藤英治	東北大学原子分子材料科学高等研究機構・教授
研究分担者	白石誠司	京都大学大学院工学系研究科・教授
研究分担者	村上修一	東京工業大学大学院理工学研究科・教授
研究分担者	大岩 顕	大阪大学産業科学研究所・教授
連携研究者	高梨弘毅	東北大学金属材料研究所・教授
連携研究者	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
学術調査官	小島 磨	神戸大学大学院工学研究科・准教授
学術調査官	熊田亜紀子	東京大学大学院工学系研究科・准教授

計画研究

A01：磁気的スピントロニクス変換班

研究代表者	大谷義近	東京大学物性研究所・教授
研究分担者	木村 崇	九州大学大学院理学研究院・教授
研究分担者	松倉文礼	東北大学原子分子材料科学高等研究機構・教授
研究分担者	Ronald Jansen	産業技術総合研究所ナノスピントロニクス研究センター・首席研究員
研究分担者	新見康洋	大阪大学大学院理学系研究科・准教授
連携研究者	小野輝男	京都大学化学研究所・教授
公募研究	谷山智康	東京工業大学応用セラミックス研究所・准教授
公募研究	三輪真嗣	大阪大学大学院基礎工学研究科 物質創成専攻・助教
公募研究	安 東秀	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

A02：電気的スピントロニクス変換班

研究代表者	白石誠司	京都大学大学院工学系研究科・教授
研究分担者	浜屋宏平	大阪大学大学院基礎工学研究科・教授
研究分担者	勝本信吾	東京大学物性研究所・教授
研究分担者	齋藤秀和	産業技術総合研究所ナノスピントロニクス研究センター・半導体スピントロニクスチーム長
連携研究者	辛 埴	東京大学物性研究所・教授
公募研究	守谷 頼	東京大学生産技術研究所・助教
公募研究	大矢 忍	東京大学大学院工学系研究科 総合研究機構・准教授

A03：光学的スピントロニクス変換班

研究代表者	大岩 顕	大阪大学産業科学研究所・教授
研究分担者	塚本 新	日本大学理工学部・教授
研究分担者	水上成美	東北大学原子分子材料科学高等研究機構・教授
研究分担者	安藤和也	慶應義塾大学理工学部・准教授
公募研究	松尾貞茂	東京大学大学院工学系研究科・助教
公募研究	佐藤 治	九州大学先端物質化学研究所・教授

A04：機械・熱的スピントロニクス変換班

研究代表者	齊藤英治	東北大学原子分子材料科学高等研究機構・教授
研究分担者	小野正雄	日本原子力研究開発機構先端基礎研究センター・研究副主幹
研究分担者	高梨弘毅	東北大学金属材料研究所・教授
公募研究	畠山 温	東京農工大学大学院工学研究院先端物理工学部門・准教授
公募研究	能崎幸雄	慶應義塾大学理工学部物理学科・准教授

A05：スピントロニクス変換機能設計班

研究代表者	村上修一	東京工業大学大学院理工学研究科・教授
研究分担者	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
研究分担者	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
研究分担者	永長直人	東京大学大学院工学系研究科・教授／理化学研究所 創発物性科学研究センター・副センター長
研究分担者	Gerrit E. W. Bauer	東北大学金属材料研究所・教授
公募研究	Oleg A. Tretiakov	東北大学金属材料研究所・助教
公募研究	石井史之	金沢大学 理工研究域数物科学系・准教授
公募研究	宮原 慎	福岡大学 理学部 物理科学科・准教授
公募研究	小野田繁樹	理化学研究所 古崎物性理論研究室/創発物質科学センター・専任研究員

ナノスピントロニクス変換科学 領域ホームページ : <http://www.spinconversion.jp/index.html>

[領域全般に関するお問い合わせ]

大谷 義近 (領域代表/A01班代表)
inquiry@spinconversion.jp

[領域事務に関するお問い合わせ]

白石 誠司 (領域事務担当/A02班代表)
jimuj@spinconversion.jp

[ホームページに関するお問い合わせ]

村上 修一 (広報担当/A05班代表)
webmaster@spinconversion.jp

[ニュースレターに関するお問い合わせ]

大岩 顕 (ニュースレター担当/A03班代表)
newsletter@spinconversion.jp

ニュースレターWG

大岩 顕 (阪大)、森山 貴広 (京大 小野研)、山田 晋也 (阪大 浜屋研)、水上 成美 (東北大)、
針井 一哉 (原研)、安立 裕人 (原研)