

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 6 月 11 日現在

機関番号：11301

研究種目：基盤研究(A)

研究期間：2012～2014

課題番号：24244051

研究課題名(和文)絶縁体スピントロニクス of 構築と体系化

研究課題名(英文)Construction and systematization of insulator spintronics

研究代表者

齊藤 英治 (Saitoh, Eiji)

東北大学・原子分子材料科学高等研究機構・教授

研究者番号：80338251

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 36,800,000円

研究成果の概要(和文)：絶縁体スピントロニクス of 物理を探求し、新しいスピン利用技術 of 基盤構築を目指して研究を遂行した結果、以下の成果を得た。

1. 有機ポリマー導体といったエレクトロニクス基盤材料への高効率スピン注入に成功した。2. 磁性絶縁体に接した常磁性金属で発現する新奇な磁気抵抗効果を発見し、その起源が金属・絶縁体界面でのスピン流交換にあることを突き止めた。3. 長距離磁気秩序のない常磁性絶縁体や、表面のみが導電性を持つトポロジカル絶縁体へのスピン注入に世界で初めて成功した。4. 熱流印加により絶縁体中のスピン流生成効率を初めて制御した。逆にスピン流で熱を変位させる新しい非相反熱スピン流効果も発見した。

研究成果の概要(英文)：We obtained following results by the research aiming at exploration of the physics in insulator spintronics and construction of a new spin-utilization technology.

1. We succeeded in efficient spin injection into organic polymer conductors that are fundamental materials in present electronics industry. 2. We discovered novel magnetoresistive effect emerging in paramagnetic metal in contact with the magnetic insulator, and found the origin is the exchange of spin current at the metal-insulator interface. 3. We succeeded in spin injection into paramagnetic and topological insulator despite the former does not have long-range magnetic order and the latter is conductive at the very surface only. 4. The efficiency of spin current generation in the magnetic insulator is successfully controlled by applying a heat flow. Furthermore, novel non-reciprocal thermal spin current effect that the heat is displaced by spin-current conversely was also discovered.

研究分野：固体物理

キーワード：スピントロニクス

1. 研究開始当初の背景

エレクトロニクスは、電流と電圧の制御を目的として体系化された。一方、次世代のエレクトロニクスの候補であるスピントロニクスにおいては、「スピン流」(スピン角運動量の流れ)と「スピン圧」(非平衡スピン流の駆動力)の生成・制御が必須であり、これには全く新しい物理概念・現象の開拓と理解が必要なことが明らかになった。スピン流には、伝導電子によるもの(伝導電子スピン流: 図 1(a))、磁化の交換相互作用によるもの(交換スピン流: 図 1(b))の2つがある。

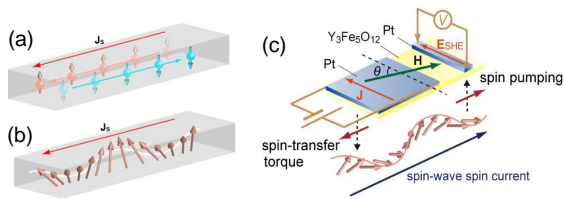


図 1 (a) 伝導電子スピン流 (b) 交換スピン流 (c) 交換スピン流の励起と検出実験の模式図。

スピン流の長所を最大に引き出すためには、電荷の移動なしにスピンだけを駆動することが求められ、伝導電子のない絶縁体の利用が最良である。理論的には絶縁体中でも交換スピン流を流すことができるはずとの認識はあったが、その方法は全く知られていなかった。このような状況の中、我々は、我々が発見した逆スピンホール効果 (Phys. Rev. Lett. (2008), Appl. Phys. Lett.(2006)) を高効率スピン検出器として利用することで、絶縁体/金属界面において伝導電子スピン流と交換スピン流が相互に変換される現象を発見し、絶縁体中の交換スピン流(絶縁体中の角運動量のフラックス)の観測にはじめて成功した (Nature (2010)、図 1(c)参照)。この発見により、従来全く考えられなかった絶縁体を使用したスピントロニクス: 絶縁体スピントロニクスへの扉が開いた。

2. 研究の目的

絶縁体中のスピン流について、電子構造の系統性と固体の各種励起間相互作用を念頭においた広範囲な物質系・環境での系統的实验を行うことで、交換スピン流を取り込んだ新しいスピントロニクスの物理の体系的理解が得られることは明らかである。我々がこれまで培ってきたスピン検出技術により、この研究を世界に先んじて実現し、新しい絶縁体スピントロニクスの物理を基礎から構築および体系化し、国際レベルで発信することを目的として研究を遂行した。具体的には以下の項目を目指した。

- (1) 新規界面評価技術の開発
- (2) 絶縁体におけるスピン流生成効率の制御
- (3) スピンダイナミクスの熱イメージング技術
- (4) スピン流による熱操作技術の開発
- (5) 多様な材料へのスピン注入とその高効率化

(6) 熱スピン流変換現象に重畳する他効果の抽出と除去の方法確立

3. 研究の方法

基本的に絶縁体・金属の二層構造を試料として用い、実験によっては金属部分を十字型の電極(ホールバー)形状に加工した。これらの試料の絶縁体におけるスピン注入、スピン流伝搬、スピン圧検出を、マイクロ波共鳴によるスピンプンピング誘起逆スピンホール効果、磁気抵抗変化率測定、赤外線サーモグラフィ法といった手法により行った。また、絶縁体としては我々が絶縁体スピントロニクスにおいて先鞭をつけた $Y_3Fe_5O_{12}$ (YIG) を基本とし、エレクトロニクス分野で主流となっている有機ポリマー、非常に新しい材料であるトポロジカル絶縁体、などを対象として網羅することで、バルクだけでなく界面におけるスピン流の振る舞いについての系統的な実験研究とした。

4. 研究成果

(1) 新規界面評価技術の開発

・スピンホール磁気抵抗効果の発見

これまで界面でのスピン物性の評価は、マイクロ波分光や熱を用いて強磁性体を励起した上で、その出力を評価する手法しか存在しなかった。これらの評価手法では、煩雑な上に不確定なパラメータも存在し、異なる構造の評価において問題が生じており、より簡素な評価手法が求められていた。本研究では、強磁性絶縁体/金属界面を有する構造におけるスピン輸送現象の物理を精査することで、電流-スピン流-電流変換現象による強磁性体/伝導体界面でのスピン交換に基づく新奇磁気抵抗効果を発見するに至り、界面スピン特性の簡素な評価手法の開発に成功した。

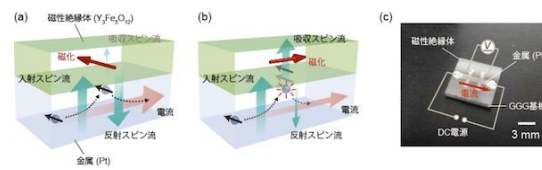
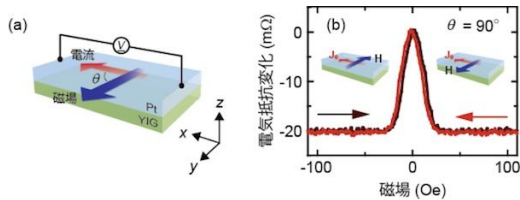


図 2 (a), (b) スピンホール磁気抵抗効果の測定実験に用いた試料の模式図。磁性絶縁体界面におけるスピン流交換によって磁気抵抗効果が実現する。(c) 実験に用いた試料の写真。

図 2 に本測定実験に用いた試料の模式図、および実験に用いた試料の写真を示す。強磁性絶縁体/伝導体二層構造において電流を印可すると、伝導体におけるスピンホール効果によってスピン流が生成される。スピン流-磁化相互作用を考慮すると、生成されたスピン流は強磁性絶縁体に注入されるが、そのスピン流の注入量はスピン流-磁化相互作用の対称性から、スピン流のスピン偏極方向と磁化の相対角によって決定される。注入されなかったスピン流は界面で反射され、逆スピンホー

ル効果によって電流に変換される。この逆スピホール電流の存在の有無によって、繰り込まれる抵抗率に違いが現れ、強磁性絶縁体/伝導体における新奇磁気抵抗効果が実現される。この磁気抵抗は、スピホール効果と逆スピホール効果によって引き起こされる機構からスピホール磁気抵抗効果と名



付けられた。

図3 スピン流を介した磁気抵抗効果の実験[図3(a)]における電気抵抗測定結果。

図3に本研究で用いた強磁性絶縁体YIG/Pt構造における実験結果を示す。磁化の変化する領域において顕著な抵抗変化を示しており、スピ流に依存した磁気抵抗効果が現れている。

本評価手法の開発によって、異なる構造におけるスピ輸送特性の精密比較を実現し、スピゼーバック効果の研究を加速することができた。また、強磁性絶縁体のプローブを可能にする本磁気抵抗効果の発見は、ジュール熱のない絶縁体を用いたスピトロニクスの研究開発の基礎的な手法を与えるものであり、今後の活発な利用が見込まれる。

(2) 絶縁体中におけるスピ流生成効率の制御

・熱流印加によるスピ流生成効率制御

我々が開拓した絶縁体中のスピ流とその生成方法を更に探究した結果、熱流を印加することで生成効率を制御できることが判った。Pt細線/YIG薄膜試料に対して、YIGの面内に温度勾配を形成し、YIGの片方の端に対しスピポンピングを行う実験を行った。その結果、熱流を加えることで磁性絶縁体YIGからPtに注入されるスピ流を増大させることも抑制することも可能であることが判った。これは、熱によるスピ流の基本原則を与えている。この機構を調べるため、強磁性共鳴分光を行ったところ、YIGの磁化緩和が熱流によって変調されていることがわかった。この結果は、従来のスピポンピングによる緩和変調効果と一見類似しているように見えるが、注入される側のPtはスピに関して回転対称性を有しているため、単純なスピポンピング緩和変調はゼロになるはずである。したがって、全く新しい緩和変調機構が存在することを示しており、現在フォノンの長距離性やスピ蓄積の緩和機構が理論的に提案されており、他グループによる追試

が行われるなど世界的な研究へと展開した。

(3) スピダイナミクスの熱イメージング技術

・熱スピ流測定

MEMS型赤外線サーモグラフィとマイクロ波分光を用いた時間分解マグネトサーモグラフィ法を開発した。これを用いて、磁性絶縁体YIGにマイクロ波を照射することによって励起されたスピ定在波の空間パターンを測定することに成功した。

マイクロ波アンテナ上に設置されたYIGを磁的に励起し、励起されたスピ波が減衰することによる熱生成を赤外線カメラにより観測した。この際、YIG試料中のスピ波は試料中で定在波を形成しており、赤外線カメラでは定在波を構成するスピ波の振幅の大きさに対応した散逸熱の分布が観測された(図4)。このことは、励起するスピ波の定在波モードを変えてそれぞれの定在波モードの腹に相当する位置で散逸熱が極大になることから確認できた。以上より、赤外線カメラによる温度計測はスピ波の散逸熱観測に有用であることを示した。

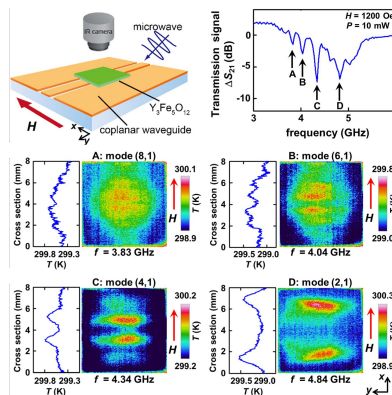


図4 スピ熱散逸イメージングマイクロ波アンテナによって励起された各種のスピダイナミクスの赤外線カメラによるイメージング。

(4) スピ流による熱操作技術の開発

・スピ波熱コンベヤー効果の発見

磁性体には磁化に垂直方向の表面に進む静磁表面スピ波が存在する。このスピ波はヘリカルなモードであり、磁性体表面を反時計回りに一方通行で回るとい著しい特徴を有する。この試料をマイクロ波導波路に接触させ非一様励起することで、スピ波スピ流を強く励起することができる。この方法を用いて、スピ波による熱の輸送現象(スピ波熱コンベヤー効果)をサーモグラフィ法で測定することに成功した。これは、スピ流を用いて熱を変位させる原理であり、新しい非相反熱スピ流効果である。

試料には、YIG を用い、YIG 上に設置したマイクロ波アンテナを利用して、表面に局在しており、かつ進行方向に相反性のあるスピン波を励起することで、スピン波スピン流を生成した(図 5 (b))。励起されたスピン波スピン流は試料表面に局在し、印加した静磁場に垂直、且つ、一方向にしか伝播しない表面スピン波によって構成されている。生成されたスピン波スピン流は、試料である YIG 内を伝播したのち、試料端に到達する。試料端まで伝播したスピン波スピン流は反射することができないため、フォノンにそのエネルギーを受け渡し、試料端で減衰し熱を放出する。この際、温度勾配は試料端からマイクロ波源へ向けて通常の発熱とは逆向きの温度勾配が生成される(図 5)。また、スピン波スピン流のキャリアとなる表面スピン波の電波方向は、磁場の印加方向によってコントロール可能であることから、任意の方向に熱を輸送することが可能である。

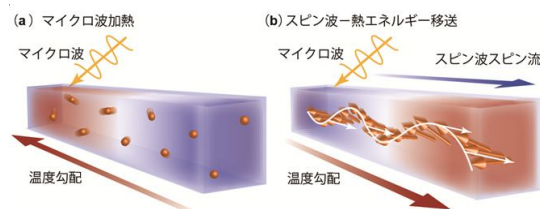


図 5 スピン波 - 熱エネルギー移送の原理
スピン波 - 熱エネルギー移送の原理
(a) 通常のマイクロ波加熱。
(b) スピン波 - 熱エネルギー移送の概念図。

実験系の概略図を図 6 (a)に示す。マイクロ波アンテナ上に円盤状の YIG を設置し、磁場を印可する。マイクロ波磁場を印可し、試料中のスピン波が共鳴的に励起され、特定の条件でスピン波スピン流を形成可能になる。

外部磁場(630 Oe)を印可した際のマイクロ波吸収スペクトルを理論計算と比較して解析した結果、Damon-Eshbach モード(DE モード)と呼ばれる特殊なスピン波が励起されていることが分かった。DE モードは、試料の表面にしか存在せず、進行方向が磁場および局在した表面の両方に垂直な方向に限定される特徴を有する。つまり、この DE モードで進行方向が相異なるスピン波の成分の均衡を破ることで、スピン波スピン流が効率的に生成できるのである。本実験では、マイクロ波アンテナと試料の形状を制御することで、上面の DE モードよりもマイクロ波アンテナに接する底面の DE モードの成分を大きくし、スピン波スピン流を生成した。

温度分布イメージングを観測した結果、DE モードでは熱の分布が試料の一端に偏っていることがわかった。これが、スピン波スピン流による熱コンベヤー効果であることは、磁場方向の反転により確かめられる。図 6 (b)に磁場印加方向を反転させた結果を示す。磁場印加方向の反転に伴い、温度勾配が逆転し

ている様子わかる。この結果より、局所に励起されたスピン波スピン流のエネルギーを数ミリメートル離れた試料端まで、スピン流を用いて輸送し最終的に散逸熱に変換することが実証できた。

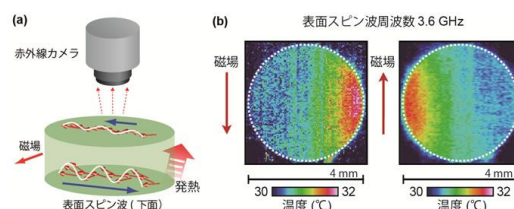


図 6 表面スピン波を用いたスピン波 - 熱エネルギー移送。

(5) 多様な材料へのスピン注入とその高効率化

・有機ポリマー導体へのスピンポンプ

動的スピン流注入手法を用いた材料の開拓によって、有機物において十分に大きなスピン流-電流変換現象を得ることに成功した。本研究で開発した有機材料は塗布工程で形成可能であり、従来のスピンゼーベック効果を用いたスピン熱電コーティングにおいて必要であった金属によるスピン流-電流変換層を塗布工程で作製可能になった。これにより全層の塗布工程による作製が実現され、スピンゼーベック素子を全工程で真空を必要としない低コストのプロセスによって形成可能にし、スピン熱電コーティングの競争力が高められた。

・常磁性絶縁体からのスピンポンプ

磁気転移点が室温付近にあるダブルペロプスカイト構造の単結晶物質を用いて、常磁性状態におけるスピンポンピングを初めて観測することに成功した。常磁性体においては長距離磁気秩序が存在しないにも関わらず、非常に強力なスピン流信号が得られた。従来、強磁性体のみを対象としていたスピンポンピングという概念を、今後は常磁性体にも拡張する必要性を示した画期的な成果である。

・トポロジカル絶縁体からのスピンポンプ

近年理論的に存在が予言され、その後実際に発見されたトポロジカル絶縁体は、バルク部分が絶縁体でありながら、表面では Dirac フェルミ粒子の存在により導電性を示す稀有な物質である。これまで、この性質を正しく反映した材料系においてスピン流-電流変換現象を観測した例はなかった。今回我々はミリメートルという厚さを持つトポロジカル絶縁体に強磁性金属を接触させた系において、初めてトポロジカル絶縁体の表面状態を反映したスピン流-電流変換現象を観測した。観測された効率はまだ小さいものの、原理的には、トポロジカル絶縁体特有の極めて高い

スピン流-電流変換効率が今後得られるものと期待される。

(6) 熱スピン流変換現象に重畳する他効果の抽出と除去の方法確立

・スピンゼーベック効果と異常ネルンスト効果の分離

これまでスピンゼーベック効果の研究においては、重畳する異常ネルンスト効果の寄与を含めたまま議論がなされていた。今回我々は、試料の磁性層を面内と面直に磁化させた場合の縦型熱起電力を比較することで、これら2つの効果を分離することに成功した。その結果、これまで観測されていた磁性絶縁体と白金の二層膜における熱起電力は、そのほとんどがスピンゼーベック効果によるもので、ネルンスト効果の寄与は無視できる程度であることが示された。逆にこの結果から、白金の代わりに磁性金属を用いることで、積極的に異常ネルンスト効果を重畳させたハイブリッド熱電変換が極めて高い変換効率を示すことを発見した。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文](計55件)

K. Uchida, H. Adachi, D. Kikuchi, S. Ito, Z. Qiu, S. Maekawa, and E. Saitoh, "Generation of spin currents by surface plasmon resonance", *Nature communications* 6 (2015) 5910.

DOI: 10.1038/ncomms6910

Y. Shiomi, and E. Saitoh, "Paramagnetic spin pumping", *Physical Review Letters* 113 (2014) 266602_1-266602_5.

DOI: <http://dx.doi.org/10.1103/PhysRevLett.113.196601>

Y. Shiomi, K. Nomura, Y. Kajiwara, K. Eto, M. Novak, K. Segawa, Y. Ando, and E. Saitoh, "Spin-Electricity Conversion Induced by Spin Injection into Topological Insulators", *Physical Review Letters* 113 (2014) 196601_1-196601_4.

DOI: <http://dx.doi.org/10.1103/PhysRevLett.113.196601>

N. Okamoto, H. Kurebayashi, T. Trypiniotis, I. Farrer, D. A. Ritchie, E. Saitoh, J. Sinova, J. Masek, T. Jungwirth, and C. H. W. Barnes, "Electric control of the spin Hall effect by intervalley transitions", *Nature materials* 13 (2014) 932-937.

DOI: 10.1038/nmat4059

Y. Ohnuma, H. Adachi, E. Saitoh, and S. Maekawa, "Enhanced DC Spin Pumping into a Fluctuating Ferromagnet near T_c ", *Physical Review B* 89 (2014)

174417_1-174417_10.

DOI: <http://dx.doi.org/10.1103/PhysRevB.89.174417>

S. Watanabe, K. Ando, K. Kang, S. Mooser, Y. Vaynzof, H. Kurebayashi, M. Heeney, E. Saitoh, and H. Sirringhaus, "Polaron spin current transport in organic semiconductors", *Nature physics* 10 (2014) 308-313.

DOI: 10.1038/nphys2901

T. Kikkawa, K. Uchida, S. Daimon, Y. Shiomi, Z. Qiu, D. Hou, H. Adachi, S. Maekawa, X.-F. Jin, and E. Saitoh, "Separation of longitudinal spin Seebeck effect from anomalous Nernst effect: Determination of the origin of transverse thermoelectric voltage in metal/insulator junctions", *Physical Review B* 88 (2013) 214403_1-214403_11.

DOI: 10.1103/PhysRevB.88.214403

Y. Kajiwara, K. Uchida, T. An, Y. Fujikawa, and E. Saitoh, "Spin-relaxation modulation and spin pumping control by transverse spin wave spin current in $Y_2Fe_5O_{12}$ ", *Applies Physics Letters* 103 (2013) 052404_1-052404_4.

DOI: 10.1063/1.4817076

T. An, K. Yamaguchi, K. Uchida, and E. Saitoh, "Thermal imaging of standing spin waves", *Applies Physics Letters* 103(2013) 052410_1-052410_3.

DOI: 10.1063/1.4816737

K. Ando, S. Watanabe, S. Mooser, E. Saitoh, H. Sirringhaus, "Solution-processed organic spin-charge converter", *Nature materials* 12 (2013) 622-627.

DOI: 10.1038/NMAT3634

M. Matsuo, J. Ieda, K. Harii, E. Saitoh, S. Maekawa, "Mechanical generation of spin current by spin-rotation coupling", *Physical Review B Rapid* 87 (2013) 180402_1-180402_5.

DOI: 10.1103/PhysRevB.87.180402

H. Nakayama, M. Althammer, Y.-T. Chen, K. Uchida, Y. Kajiwara, D. Kikuchi, T. Ohtani, S. Geprägs, M. Opel, S. Takahashi, R. Gross, G. E. W. Bauer, S. T. B. Goennenwein, E. Saitoh, "Spin Hall Magnetoresistance Induced by a Non-Equilibrium Proximity Effect", *Physical Review Letters* 110 (2013) 206601_1-206601_5.

DOI: 10.1103/PhysRevLett.110.206601

T. An, V. I. Vasyuchka, K. Uchida, A. V. Chumak, K. Yamaguchi, K. Harii, J. Ohe, M. B. Jungfleisch, Y. Kajiwara, H. Adachi, B. Hillebrands, S. Maekawa, and E. Saitoh, "Unidirectional spin-wave heat conveyer", *Nature materials* 12 (2013)

549-553.

DOI: 10.1038/NMAT3628

R. Ramos, T. Kikkawa, K. Uchida, I. Lucas, M.H. Aguirre¹, H. Adachi, P. Algarabel, L. Morell¹, S. Maekawa, E. Saitoh, and M.R. Ibarra, "Observation of the spin Seebeck effect in epitaxial Fe₃O₄ thin films", *Applies Physics Letters* 102 (2013) 072413_1-072413_5.

DOI: <http://dx.doi.org/10.1063/1.4793486>

Y. Ohnuma, H. Adachi, E. Saitoh, and S. Maekawa, "Spin Seebeck effect in antiferromagnets and compensated ferrimagnets", *Physics Review B* 87 (2013) 014423_1-014423_7.

DOI: <http://dx.doi.org/10.1103/PhysRevB.87.014423>

T. Satoh, Y. Terui, R. Moriya, B. s A. Ivanov, K. Ando, E. Saitoh, T. Shimura, and K. Kuroda, "Directional control of spin wave emission by spatially shaped light", *Nature photonics* 6 (2012) 662-666.

DOI: 10.1038/nphoton.2012.218

A. Kirihara, K. Uchida, Y. Kajiwara, M. Ishida, Y. Nakamura, T. Manako, E. Saitoh, and S. Yoroazu, "Spin-current-driven thermoelectric coating", *Nature materials* 11 (2012) 686-689.

DOI: 10.1038/nmat3360

K. Uchida, T. Ota, H. Adachi, J. Xiao, T. Nonaka, Y. Kajiwara, G. E. W. Bauer, S. Maekawa, and E. Saitoh, "Thermal spin pumping and magnon-phonon-mediated spin-Seebeck effect", *Journal of Applied Physics* 111(2012) 103903_1-103903_12.

DOI: <http://dx.doi.org/10.1063/1.4716012>

G. E.W. Bauer, E. Saitoh, and B. J. van Wees, "Spin Caloritronics", *Nature materials* 11 (2012) 391-399.

DOI: 10.1038/nmat3301

〔学会発表〕(計 44 件)

齊藤英治、"Insulator spintronics", 2012 Materials Research Society Spring Meeting, 2012 年 4 月 11 日、ワシントン (アメリカ)

齊藤英治、"Spintronic effects in insulators", Intermag 2011, 2012 年 5 月 9 日、バンクーバー (カナダ)

齊藤英治、"Dynamical spin current generation", International Conference on Magnetism, 2012 年 7 月 11 日、釜山 (韓国)

齊藤英治、"(Semi Plenary) Dynamical generation of spin currents", Joint European Magnetic Symposia 2012, 2012 年 9 月 12 日、パルマ (イタリア)

齊藤英治、"Spin caloritronics (Tutorial)", American Physical Society March Meeting, 2013 年 3 月 24 日、ボルチモア (アメリカ)

齊藤英治、"Longitudinal Seebeck effect",

American Physical Society March Meeting, 2013 年 3 月 25 日、ボルチモア (アメリカ)

齊藤英治、"Spin pumping and spin Seebeck effect", Spintech VII, 2013 年 7 月 31 日、シカゴ (アメリカ)

齊藤英治、"(plenary talk) From spin pumping to spin Seebeck effect", SpinCat workshop 2013, 2013 年 10 月 9 日、マインツ (ドイツ)

齊藤英治、"Spin current physics and material science", 2014 E-MRS Spring Meeting, 2014 年 5 月 27 日、リール (フランス)

齊藤英治、"Various spin current exchange phenomena", Magnetism and Magnetic Materials Conference 2014, 2014 年 11 月 5 日、ホノルル (アメリカ)

〔図書〕(計 1 件)

齊藤英治、村上修一、共立出版、「スピン流の物理とトポロジカル絶縁体」、2014、1-160 ページ

〔産業財産権〕

出願状況 (計 2 件)

名称: 光-スピン流変換素子

発明者: 内田健一、齊藤英治

権利者: 同上

種類: 特許

番号: 2012-147846

出願年月日: 2012 年 6 月 29 日

国内外の別: 国内

名称: スピントロニクスデバイス

発明者: 安藤和也、齊藤英治

権利者: 同上

種類: 特許

番号: 2012-231849

出願年月日: 2012 年 10 月 19 日

国内外の別: 国内

〔その他〕

ホームページ等

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

6. 研究組織

(1) 研究代表者

齊藤英治 (SAITOH, EIJI)

東北大学・原子分子材料科学高等研究機構・教授

研究者番号: 80338251

(2) 研究分担者

前川 禎通 (MAEKAWA, SADAMICHI)

国立研究開発法人 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

研究者番号: 60005973