

## 科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成 24 年 6 月 8 日現在

機関番号：12601

研究種目：研究活動スタート支援

研究期間：2010 ～ 2011

課題番号：22840012

研究課題名（和文） スピンホール効果のメカニズムの探索

研究課題名（英文） Search for the mechanism of the spin Hall effect

研究代表者

新見 康洋 (NIIMI YASUHIRO)

東京大学・物性研究所・助教

研究者番号：00574617

研究成果の概要（和文）：本研究では、不純物を添加して発現する外因性スピンホール効果に着目して、その発現起源やどのような母金属と不純物の組み合わせで大きなスピンホール効果が発現するかを実験的に調べた。その結果、スピン軌道相互作用の弱い銅にイリジウム不純物を添加することで、スピンホール効果が発現し、その発現効率を示すスピンホール角が 2% になることを実験的に確かめた。さらに、イリジウムの代わりにビスマスを不純物として僅かに添加することでスピンホール角が 1 桁以上大きくなることが分かった。

研究成果の概要（英文）：We have studied extrinsic spin Hall effect (SHE) in Cu-based alloys. Copper has a very weak spin-orbit (SO) interaction and the SHE of Cu itself is negligibly small. However, by adding impurities with strong SO interactions such as Ir and Bi, the extrinsic SHEs can be generated. Unlike pure SHE materials such as Pt and Pd, one of the big advantages for the extrinsic SHE is that it allows controlling the SH angle, characteristic of the conversion yield between charge and spin, by changing the combination of host and impurity metals as well as by tuning the impurity concentration. By doping with Ir impurities, we observe a clear SHE signal. From the slope of the SH resistivity as a function of doping concentration, we estimate the SH angle to be 2%. When Ir impurities are replaced by Bi ones, the obtained SH angle is more than one order larger than that of CuIr alloys.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2010 年度	1,250,000	375,000	1,625,000
2011 年度	1,150,000	345,000	1,495,000
年度			
年度			
年度			
総計	2,400,000	720,000	3,120,000

研究分野：数物系科学

科研費の分科・細目：物理学・物性 II・磁性

キーワード：スピントロニクス・スピン流・スピンホール効果・強磁性体・メソスコピック系

## 1. 研究開始当初の背景

電子は電荷とスピンという 2 つの性質を持つ。前者は電気素子として、後者は磁気の起源となるため磁気素子としてそれぞれ個別

の分野で古くから研究・利用されてきた。近年の微細加工技術の発展に伴って、これら 2 つの性質を積極的に組み合わせることにより、従来のエレクトロニクス素子を凌駕する

デバイスの実現が可能となった。このような分野はスピントロニクスと呼ばれ、この分野での代表的な成功例が、ハードディスクドライブの磁気ヘッドや磁気ランダムアクセスメモリ (MRAM) であり、これらの起源となる巨大磁気抵抗効果 (GMR) や巨大トンネル磁気抵抗効果 (TMR) の発見に対して 2007 年にはノーベル物理学賞が与えられている。次世代スピントロニクス素子の実現において、極めて重要な物理量がスピン流と呼ばれる量である。電流は電荷の流れであり、これまでの電気素子では電流が全ての情報を運んでいたが、スピントロニクスではスピン流と呼ばれるスピンの流れが情報を運ぶ。その中でも電荷の流れを伴わないスピンのみの流れを『純スピン流』と呼ぶ。この純スピン流は電荷の流れを伴わないために、低電力デバイスとして近年非常に注目を集めており、その実現のためにはスピン流をいかに効率良く生成・制御できるかが最重要課題となっている。

## 2. 研究の目的

### (1) 不純物添加による外因性スピンホール効果の観測とその増強

本研究では、電流からスピン流への変換効率を示す『スピンホール角』という物理量に焦点をあて、スピンホール角をいかに人工的に大きくできるかを調べた。そのためには、スピンホール効果の発現機構を明らかにしておく必要がある。

通常のホール効果は、磁場中に電流を流すことでローレンツ力により電子が片側に蓄積して電圧を生じる現象であるが、スピンホール効果は磁場を印加することなく電流を流すとアップスピンとダウンスピンの電子が『スピン軌道相互作用』によってそれぞれ別側の端に蓄積する現象である。通常の非磁性金属中では、アップスピンとダウンスピンが同数存在するために、スピン流は生じていても両端での電荷の差はゼロとなり、電圧として観測することはできない。しかし逆にスピン流を非磁性金属に注入した場合、アップスピンとダウンスピンが同じ側に蓄積するため電圧信号として測定することができ、将来のスピントロニクスデバイスとしての拡張も期待される。

スピンホール効果にはスピン軌道相互作用が重要な役割を果たすが、大きく分けて 2 種類のメカニズムが理論的に提唱されている。1 つは、物質のバンド構造に起因した内因性スピンホール効果で、もう 1 つは不純物散乱に起因した外因性スピンホール効果である。これまでに Pt や Pd など単一の遷移金属で大きなスピンホール効果が観測されているが、これらについては現在までのところ、主に内因的な機構でスピンホール効果が発

現していると考えられている。しかしながら、これらは希少な貴金属であり、将来のスピントロニクス素子への応用にはコスト面であまり向いていない。さらには単一金属なので、これ以上スピンホール角を変調できないという問題点がある。そこで本研究では、過去の異常ホール効果の測定から大きなスピンホール効果が期待される Ir を用い、それを非磁性金属の Cu に不純物として添加したときの外因性スピンホール効果の観測を目指した。スピンホール効果の Ir 添加量依存性を広範囲に調べることで、side jump 機構なのか skew 散乱機構で発現しているのかを正確に特定することが可能となる。さらに最近の光電子分光などの研究から Ag の清浄表面に Bi を蒸着した系では、Rashba 効果が増強されることが知られている。このような知見を基に、AgBi や CuBi でもスピンホール効果の観測を目指し、Bi 添加量依存性を詳細に調べることを目的として実験を行った。

### (2) スピン流干渉効果

さらに本研究では、純スピン流に着目し、その干渉効果の実験的観測を目指した。通常、 $1\ \mu\text{m}$  程度の大きさの微小リングに電流を流した場合、Aharonov-Bohm (AB) 効果による振動パターンが抵抗に現れることが知られている。同様の干渉効果が純スピン流でも起こると考えられるが、それに関する実験は皆無である。Cu の場合、スピン流の減衰を表すスピン拡散長は低温で  $1\ \mu\text{m}$  程度と長いために、十分干渉効果が期待できる。

## 3. 研究の方法

### (1) 不純物添加による外因性スピンホール効果の観測とその増強

不純物添加による外因性スピンホール効果の測定は、図 1 にあるような非局所スピン吸収法及び逆スピンホール効果を用いて行った。2 本の  $\text{Ni}_{81}\text{Fe}_{19}$  (以後 Py と呼ぶ) 細線とその間に  $\text{Cu}_{100-x}\text{Ir}_x$  細線を並べ、それら 3 本の細線を Cu 線で橋渡しする。電流を Py1 から Cu に流すことでスピン流を Cu 細線内に発生させる。このとき Cu 細線内に流れるスピン流は電荷の移動を伴っていないので、純スピン流が流れている。この純スピン流はスピン軌道相互作用の強い CuIr 細線内に吸収され、Ir 不純物のスピン軌道相互作用によって、アップ・ダウンスピン共に同じ側に蓄積し、電圧として測定される。また CuIr 細線がある場合とない場合とで、Py2 細線におけるスピン蓄積量を測定することにより、実際 CuIr 細線にどれだけのスピン流が吸収されたかを正確に見積もることができる。このような

測定をさまざまな Ir 濃度で行い、スピンホール抵抗率  $\rho_{\text{SHE}}$  を  $\rho_{\text{CuIr}}$  の関数としてプロットすることで、skew 散乱 ( $\rho_{\text{SHE}} \propto \rho_{\text{CuIr}}$ ) か side jump ( $\rho_{\text{SHE}} \propto \rho_{\text{CuIr}}^2$ ) かを決定できる。さらに上記と同じ手法を用いて、AgBi や CuBi でもスピンホール効果の観測及び Bi 添加量依存性を詳細に調べた。

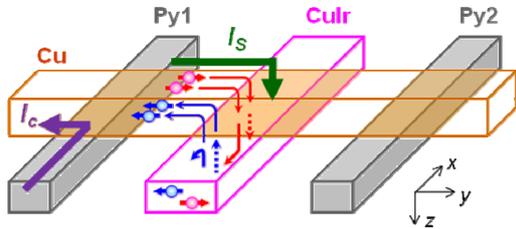


図 1: スピンホール素子の概念図。

(2) スピン流干渉効果

上記のスピンホール効果測定用素子を、図 2 に示すような直径 1  $\mu\text{m}$  程度のリングに変え、さらに磁場を垂直方向に印加する。通常の AB 効果の場合(つまり左側の Py 細線が Cu 細線である場合)、リングを貫く磁束が  $h/e$  の整数倍の周期で抵抗に振動が現れ、その振動の大きさは電子が位相のコヒーレンスを保てる長さ、つまり位相緩和長  $L_\phi$  の平方根に比例するために、低温するに従って大きくなる。またこのような AB 振動は図 2 に示すような非局所測定法でも観測されることが知られている。従って、電流を流す側の端子を Py 細線に変更し、スピンホール効果の測定と同様に、純スピン流をリングに流したときに、その干渉効果が期待できる。実際の測定は、Cu のスピン拡散長  $L_{\text{sf}}$  及び位相緩和長  $L_\phi$  がリング径よりも十分大きくなるように最低温度 350 mK の  $^3\text{He}$  冷凍機を使用し、比較のために通常の AB 効果の測定も行った。特にスピン流干渉効果の実験には、スピン拡散長をリングの片側だけ変調する必要があるため、絶縁体を挟んで電流を流し、アンペール磁場で局所的なスピン拡散長の変調を試みた。

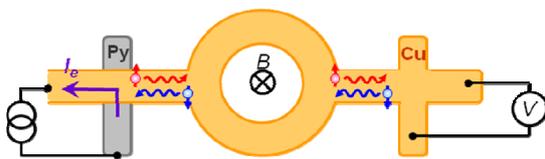


図 2: 純スピン流を用いた干渉効果の測定回路図。

4. 研究成果

(1) 不純物添加による外因性スピンホール効果の観測とその増強

図 3 に  $T = 10 \text{ K}$  で測定された CuIr 合金の逆スピンホール抵抗の結果を示す。磁場は Py 細線の困難軸方向に印加されている。Ir を全く添加しない Cu ではスピンホール効果は全く観測されなかったが、Ir の添加濃度を増やしていくと、逆スピンホール抵抗の大きさも大きくなっていく様子が観測された。

次に、CuIr 合金のスピンホール角を定量的に算出するために、非局所スピバルブ測定を、逆スピンホール抵抗を測定した素子と同じ素子で行った。このときには磁場は Py 細線の容易軸方向に印加されている。CuIr 細線を挿入しない場合と挿入した場合のスピン吸収量を比較することによって、実際に Py1 から注入された純スピン流が、どのくらい CuIr 細線に吸収されたかを見積ることができる。

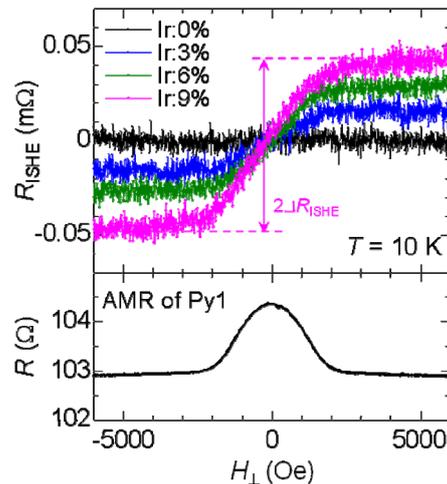


図 3: 逆スピンホール抵抗の Ir 添加濃度依存性。磁場は Py の困難軸方向に印加されている。2000 Oe までは Py の磁化が完全に飽和していないため、逆スピンホール抵抗は磁場とともに線形に増加するが、Py の磁化が飽和する 2000 Oe 以上では、逆スピンホール抵抗も飽和する。下図は Py の異方性磁気抵抗。

これらの結果からスピンホール抵抗率を求めることができる。図 4 にスピンホール抵抗率  $\rho_{\text{SHE}}$  を、Ir を添加したことによって増加した不純物抵抗率  $\rho_{\text{imp}}$  の関数としてプロットしたものを示す。Ir 添加濃度 12% まで、スピンホール抵抗率は Ir の不純物抵抗率  $\rho_{\text{imp}}$  に比例関係で増大していくことが分かった。このことは、CuIr で発現するスピンホール効果が skew 散乱機構であることを示している。さらにその直線の傾きから、CuIr 合金でのスピン

ホール角が 2.1%と見積られ、この値はこれまでスピンホール角が大きいと報告されてきた Pt と同程度のスピンホール角をもつことが分かった。

さらに本研究では、Ir の代わりに Bi 添加による外因性スピンホール効果の観測も行った。その結果、Cu に Bi をわずか 0.5%程度添加することで、大きな逆スピンホール抵抗を観測し、上記と同様の解析を行った結果、スピンホール角が CuIr 合金よりも一桁以上大きくなることが分かった。この結果は現在投稿準備中である。

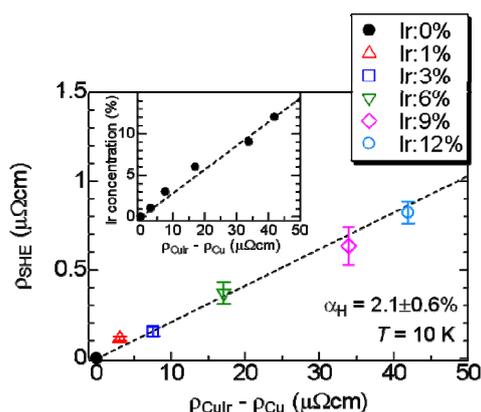


図 4: CuIr のスピンホール抵抗率。挿入図は、Ir 添加による CuIr 合金の抵抗率依存性を示している。

## (2) スピン流干渉効果

スピン流干渉効果の実験を行う前に、まずは通常の電子の干渉現象、つまり AB 振動が観測できるかを厚さ 20 nm の Cu 細線のリングで確かめた。図 5 に示すように、半径 350 nm の Cu 単一リングを用いて、 $T = 370$  mK で AB 振動を観測することに成功した。さらに当初の計画通り、図 2 のように電極の片側に強磁性体細線を用いて、スピン流干渉効果の実験を試みたが、スピン流による干渉効果は観測されなかった。その原因として、抵抗率の大きな強磁性体に電流を流すことでヒーティングが起き、そのために電子温度が上昇している可能性が考えられる。また AB 振動を観測するためには、素子の抵抗をある程度大きくする必要があるので、膜厚を 20 nm としたが、スピン流干渉に重要となるスピン拡散長が、膜厚を薄くすると短くなることが予備実験で分かり、そのために干渉効果が明瞭に観測できなかった可能性が考えられる。発熱による電子温度の上昇に関しては、強磁性体細線直下に熱を積極的に逃がす shunt 層を敷くことで、問題を解決できる可能性がある。

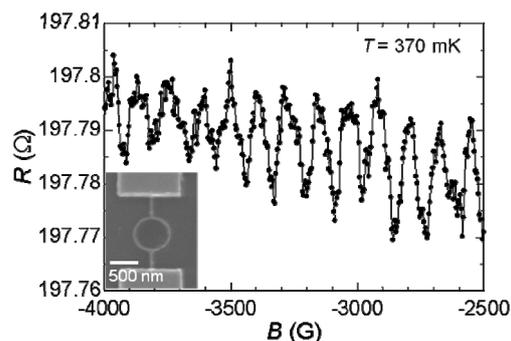


図 5: Cu リングを用いた AB 振動。挿入図は AB リングの電子顕微鏡像。

## 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 3 件)

(1) Y. Niimi, M. Morota, D. H. Wei, C. Deranlot, M. Basletic, A. Hamzic, A. Fert, and Y. Otani, “Extrinsic spin Hall effect induced by iridium impurities in copper”, *Physical Review Letters* **106**, 126601-1~4 (2011). 査読有。

DOI: 10.1103/PhysRevLett.106.126601

(2) M. Morota, Y. Niimi, K. Ohnishi, D. H. Wei, T. Tanaka, H. Kontani, T. Kimura, and Y. Otani, “Indication of intrinsic spin Hall effect in 4d and 5d transition metals”, *Physical Review B* **83**, 174405-1~5 (2011). 査読有。

DOI: 10.1103/PhysRevB.83.174405

(3) T. Wakamura, K. Ohnishi, Y. Niimi, and Y. Otani, “Large spin accumulation with long spin diffusion length in Cu/MgO/Permalloy lateral spin valves”, *Applied Physics Express* **4**, 063002-1~3 (2011). 査読有。

DOI: 10.1143/APEX.4.063002

[学会発表] (計 10 件)

(1) 新見 康洋、「外因性スピンホール効果の発現機構の探索」、スピン流の創出と制御 研究会、京都大学 (2010/6/24)。

(2) 新見 康洋、「外因性スピンホール効果の発現機構の探索」、日本物理学会 (秋季大会)、大阪府立大学 (2010/9/24)。

(3) Y. Niimi, “Extrinsic spin Hall effects in Cu induced by Ir impurity”, 55th Annual Conference on Magnetism and

Magnetic Materials, Atlanta, USA  
(2010/11/15).

(4) Y. Niimi, “Search for the mechanism of extrinsic spin Hall effect”, International Conference of AUMS (ICAUMS2010), Jeju, Korea (2010/12/7).

(5) 新見 康洋、「軽元素を用いた外因性スピ  
ンホール効果」、日本物理学会（第66回年次  
大会）、新潟大学（2011/3/28）。

(6) Y. Niimi, “Extrinsic SHE induced by  
Ir impurities in copper”, 5th  
International Workshop on Spin Currents  
(invited), Sendai, Japan (2011/7/25).

(7) Y. Niimi, “Extrinsic SHE induced by  
Ir impurities in copper”, Spintech6,  
Matsue, Japan (2011/8/3).

(8) 新見 康洋、「Cu合金における外因性スピ  
ンホール効果」、日本物理学会（秋季大会）、  
富山大学（2011/9/22）。

(9) Y. Niimi, “Extrinsic spin Hall  
effects in Cu-based alloys”, 56th Annual  
Conference on Magnetism and Magnetic  
Materials, Scottsdale, USA (2011/11/2).

(10) 新見 康洋、「巨大スピン蓄積の生成と  
検出」、日本磁気学会 スピンエレクトロニ  
クス専門研究会 「スピン流と熱効果の新現  
象」（招待講演）、東北大学（2011/11/15）。

[その他]

ホームページ等

<http://www.riken.jp/lab-www/nanomag/indexjpn.html>

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

新見 康洋 (NIIMI YASUHIRO)

東京大学・物性研究所・助教

研究者番号：00574617

### (2) 研究分担者

なし

### (3) 連携研究者

なし