

2012 年 3 月

ビスマス添加による外因性スピンホール効果の観測

物質系専攻 106009 川西庸平

指導教員：大谷義近（教授）

キーワード：スピントロニクス、スピン流、非局所スピン注入、スピンホール効果

【研究背景】

電子には電荷とスピンの 2 つの自由度が存在し、前者は電子素子として、後者は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 つの自由度を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。このような新規の概念を「スピントロニクス」と呼ぶ。スピントロニクスにおける研究分野は多岐に渡るが、その中でも「純スピン流」に関する研究が今日盛んに行われている。純スピン流は、電荷の流れを伴わないスピン角運動量のみの流れであるため、将来の低消費電力素子への応用という観点でも非常に重要な物理量である。純スピン流を生成する方法はいくつか挙げられるが、本研究では「スピンホール効果」に着目した。通常のホール効果では、電流と印加磁場に対して垂直な方向に電場が発生するのに対し、スピンホール効果では、磁場を用いることなく電流に対して垂直な方向に純スピン流が生成される。スピンホール効果は、バンド構造などに起因した内因性スピンホール効果と、不純物散乱に起因した外因性スピンホール効果に大別することができる。このうち外因性スピンホール効果は、不純物と母物質の組み合わせや不純物添加濃度を変えることでスピンホール効果の大きさを制御することができる。また、その発現機構はスキュー散乱とサイドジャンプの 2 種類に分類され、これらはスピンホール抵抗率と通常の抵抗率の関係を調べることによって、どちらの散乱機構が支配的であるかを特定することができる。

最近の理論計算において、外因性スピンホール効果による高効率なスピン流生成の可能性が示唆されている[1]。これによると、非磁性体でスピン軌道相互作用（SOI）の弱い Cu に SOI の強い Bi を添加することによって、巨大なスピンホール角（スピン流生成効率を表す指標）が得られると予想している。そこで本研究では、Bi 不純物を添加することで発現する外因性スピンホール効果を実験的に調べた。

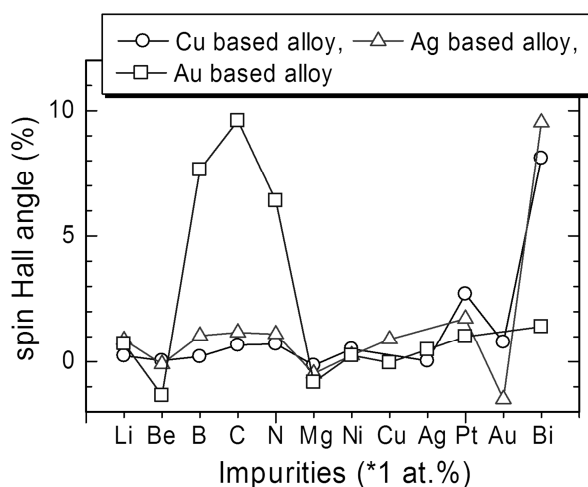


図 1 Cu, Ag, Au を母体とした合金系におけるスピンホール角の理論計算結果[1]。

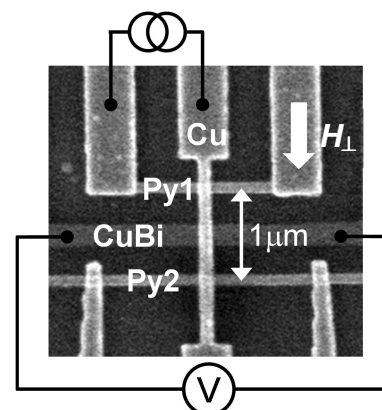


図 2 本実験で用いた面内スピンバルブ素子の SEM 像。また、逆スピンホール効果の測定回路を表している。

【実験方法】

本研究では、電子線リソグラフィーとリフトオフ法を組み合わせ、図2のような面内スピバルブ素子を作製した。2本の強磁性体 NiFe 合金(Py)を非磁性体 Cu で架橋した面内スピバルブ構造に、SOI の強い非磁性体 CuBi 合金が挿入されている。Py1 細線から Cu 細線の上部へと電流を流すことによって、Cu 細線の下部には純スピン流のみを誘起することができる。生成された純スピン流の大部分は、SOI の強い CuBi 細線に吸収され、逆スピンホール効果（純スピン流を電荷の流れへと変換する、スピンホール効果の逆過程）によってスピンホール電圧に変換される。また実際にどのくらいの純スピン流が CuBi 細線に吸収されたかは、Py2 細線を用いた非局所スピバルブ測定から見積ることができる。

【結果・考察】

CuBi における外因性スピンホール効果の測定結果を示す。図3(a)は、 $T = 10\text{ K}$ における $\text{Cu}_{99.5}\text{Bi}_{0.5}$ (Bi : 0.5 at.%) 細線の逆スピンホール効果の結果である。縦軸は得られたホール電圧を印加電流で割った値（スピンホール抵抗）、横軸は印加磁場 H_{\perp} (Py 細線の磁化困難軸方向に印加) を表す。また、図3(c)は Py 細線の異方性磁気抵抗効果 (AMR) を示しており、Py 細線の磁化方向に応じた抵抗変化を表している。得られたスピンホール抵抗と AMR を比較すると、同一の磁場下（2000 Oe 付近）において一定の値に収束していることが分かる。これは以下のようにして説明される。非局所スピン注入によって生成された純スピン流のスピン向きは、Py 細線の磁化方向に依存している。Py 細線の磁化方向は、2000 Oe までは印加磁場に応じて変化し、2000 Oe 以上では完全に困難軸方向に配向する。このとき観測されるホール電圧は、Py 細線の困難軸方向に向いたスピン成分しか寄与しないので、図3(a)のような磁場依存性を示す。次に、不純物添加によるスピンホール抵抗への影響に着目する。Cu 単体ではスピンホール効果を示さなかったが、わずか 0.5% の Bi を添加することによって外因性スピンホール効果が発現していることが分かる。また、スピンホール抵抗の変化の大きさ ΔR_{ISHE} に着目すると、その値は $75\text{ }\mu\Omega$ 程度となった。これは、同程度の抵抗率を有する $\text{Cu}_{99}\text{Ir}_1$ （スピンホール角： $\alpha_{\text{SH}} = 2.1\%$ [3]）の場合よりも5倍以上大きな値であり、極めて大きなスピンホール効果が発現していることが分かる。

CuBi 合金のスピンホール効果の発現機構の解明、及びスピンホール角の定量的な評価をするため、同様の実験を Bi 添加濃度を変えながら行った。得られたスピンホール抵抗率の Bi 濃度依存性をプロットすると図4のようになる。縦軸は CuBi のスピンホール抵抗率、横軸は Bi によって誘起された通常の抵抗率（不純物抵抗率）である。Bi 濃度が 0.5% まではスピンホール抵抗率が線形的に変化し、Bi 濃度が 1% 以上の場合には一定、又はわずかに減少していくような結果となった。このような振る舞いは、CuBi の固溶状態を考えることによって説明することができる。図5は、Bi 濃度が 0.5% と 1% の場合における Cu/CuBi 接合部の走査透過電子顕微鏡像及びエネルギー分散型 X 線分光 (STEM-EDX) の結果である。Bi 濃度が 0.5% の場合には Bi が均一に分布しているため目立った偏析は見られないが、1% の場合には Bi が Si 基板付近に析出するような結果となっている。これより、CuBi の固溶限界が 0.5% 付近であると考えられる。また析出による効果は、図4の挿入図に示した CuBi の抵抗率にも表れている。Bi 濃度が増えるにつれて、抵抗率の線形則から外れていく振る舞いが見られている。以上のことから、CuBi 合金におけるスピンホール効果の評価は、Bi 濃度が 0.5% 以下についてのみ行った。スピンホール抵抗率と不純物抵抗率は比例の関係にあることが分かる。これは、外因性スピンホール効果の発現機構としてスキュー散乱が支配的に働いている場合の特徴である。また、この比例関係の傾きからスピンホール角を見積もることができ、得られた値は $\alpha_{\text{SHE}} = -12\%$ と非常に大きな値となった。これは、理論の予想と一致する結果である。

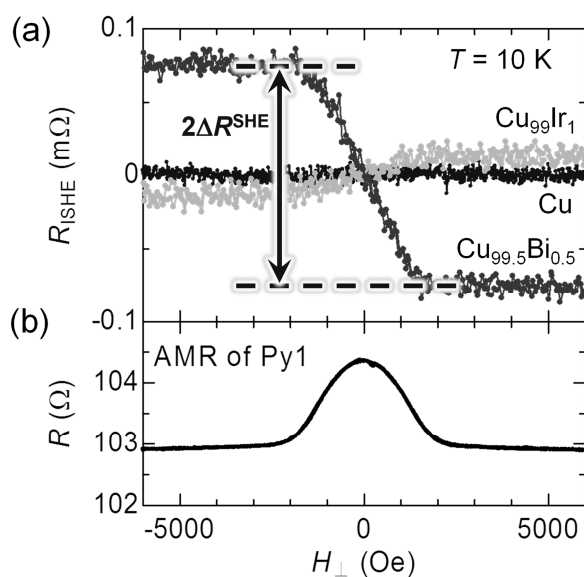


図 3 (a) $T = 10$ K におけるスピホール抵抗の磁場依存性。(b) Py1 細線における異方性磁気抵抗効果 (AMR)。

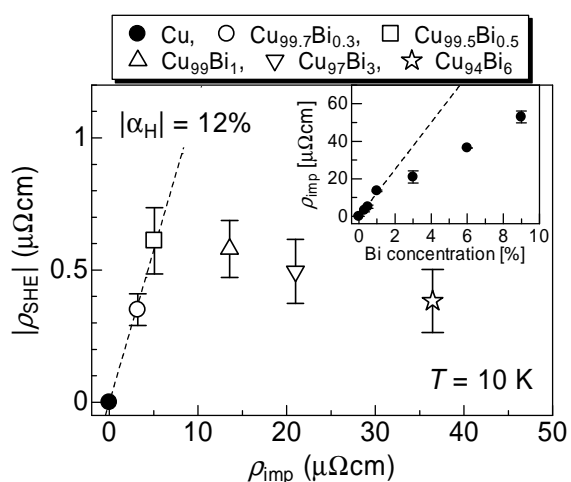


図 4 スピホール抵抗率の不純物抵抗率依存性。

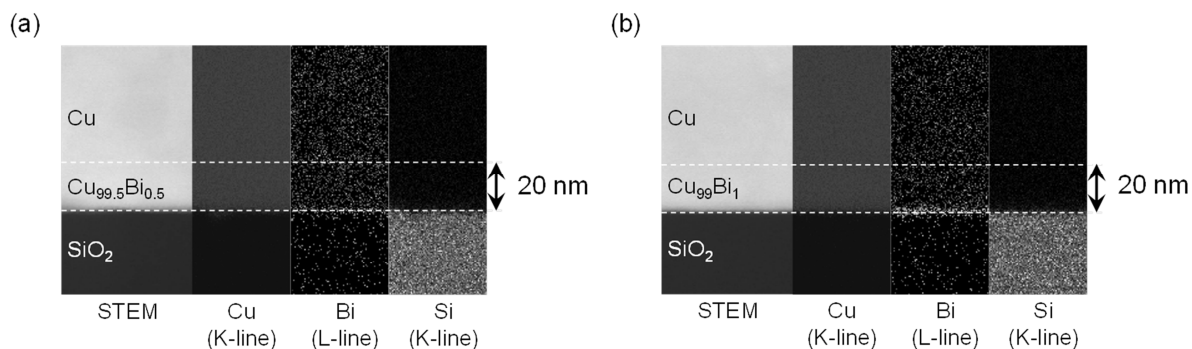


図 5 (a) $\text{Cu}_{99.5}\text{Bi}_{0.5}$ 及び (b) $\text{Cu}_{99}\text{Bi}_1$ の Cu/CuBi 接合断面における STEM-EDX 分析。左から STEM 像、Cu 元素マップ、Bi 元素マップ、Si 元素マップ。 $\text{Cu}_{99}\text{Bi}_1$ のみに Bi の偏析が Si 基板との境界付近に現れている。

【まとめ】

本研究では、面内スピバルブ素子による外因性スピホール効果の測定を行った。その結果、①Cu に Bi を添加することによって、外因性スピホール効果が発現することが分かった。また、それがスキュー散乱によって発現していることを確認した。②CuBi 合金が非常に大きなスピホール角を示すことが判明し、理論の予想と一致することが分かった。これより、CuBi 合金を使うことで、非常に効率よく純スピ流を生成・検出できるようになった。スピホール効果による純スピ流の検出は、実際にスピゼーベック効果の観測に用いられている。これまでは、貴金属である Pt を用いて純スピ流の検出を行っていたが、本研究によって、安価な Cu 合金でも容易に検出できることが判明した。

参考文献：[1] M. Gradhand *et al.*, Phys. Rev. B **81**, 245109 (2010).

[2] Y. Niimi *et al.*, Phys. Rev. Lett. **106** 126601 (2011).

学会発表：日本物理学会 2011 年秋季大会「ビスマス添加による巨大スピホール効果の観測」、他 3 件。