



変換効率であるスピホール角を「定量的」に算出する上で、このやり方を確立するところが、一番苦勞し、一番やりがいのあったところなのですが、その部分を説明していると3ページでは終わらなくなってしまうので、本誌では割愛させて頂きます。最終的には3次元スピ伝導モデルを用いてCuIr合金のスピホール角を算出したところ2.3%となり[4]、過去のCuMnIr合金を用いた異常ホール効果から算出された値2.6%[1]と定量的に一致することが分かりました。さらにこのことは、本実験で用いたセットアップでスピホール角が正しく算出できることを暗示しており、同様のモデルを用いると、Ptのスピホール角も2.4%となり、CuIr合金はPtと同程度のスピ流電流変換効率を生み出せることも分かりました[5,6]。

次にスピホール角の値をさらに大きくするために、Irよりスピ軌道相互作用の強いビスマスBiを添加したCuBi合金でスピホール効果の測定を行いました。図2に示す通り、Biをわずか0.5%だけCuに添加するだけで、PtやCuIr合金よりも数倍程度大きな信号を観測することができました[4]。この結果から、CuBi合金のスピホール角はPtやCuIr合金よりも大きいことは容易に想像できるのですが、具体的な値を得るには上記と同じ3次元スピ伝導モデルを用いる必要があります。その結果、CuBi合金では-24%という非常に大きなスピホール角が得られました。ここで、なぜBiが良かったのかということをもう少し説明させて頂きたい。多くの方は(以下の事実を知る前の私もそうだったのですが)、スピ軌道相互作用の大きさは原子番号Zの大きさに比例すると思われています。確かに原子番号の大きさも重要ではあるのですが、その他に重要な因子があって、それは最外殻電子の軌道角運動量です。詳細については[7]を参照して頂きたいのですが、同じ周期の元素を比べた場合、最外殻電子がp軌道の元素は、他の軌道を最外殻にもつ元素よりも圧倒的にスピ軌道相互作用が大きくなります。その中でも原子番号が大きく毒性の少ないBiは、入手できる元素の中でスピ軌道相互作用が最も大きい元素だということがポイントのようです。さらにこの説明を指示する結果として、Biの隣の鉛PbをCuに添加したCuPb合金でも-13%という大きなスピホール角が得られています[6]。

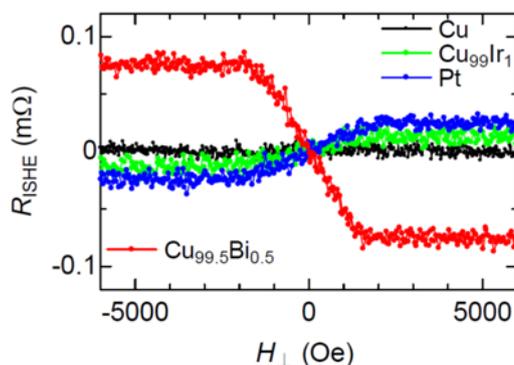


図2: さまざまな金属のスピホール効果[4]。

前述したように、現在に至るまでスピントロニクス分野では、一般的に用いられているPtのスピホール角ですら、統一的な見解が得られていません。これはあくまで個人的な見解ですが、その理由の1つとして、スピホール効果を観測するためには、必ず強磁性体を用いられており、多くの実験ではPtのような強磁性体に近い非磁性体と強磁性体が直に接しており、何らかの近接効果があるのではないかと考えています。最近では、この点を問題視する研究者もスピントロニクス分野で出てきていますが[8]、依然としてマイノリティーです。一方で我々の実験のセットアップでは、スピホール効果を示す非磁性体と強磁性体は直に接しているわけではなく、必ずスピ軌道相互作用の弱いCuを介しているため、上記のような近接効果は非常に小さいと考えています。このような状況で、2011年に[9]のような記事がCornell大のグループから発表され、スピントロニクス分野でかなり話題になりました。この記事の主旨は、Ptのスピホール効果を統一的に理解しようというのですが、あまりに彼らの都合のいいように解釈しており、到底承服できるものではありませんでした。彼らの主張によると、スピホール角を定量的に算出するためには、スピ拡散長という物理量を正しく算出する必要があり、我々のスピ拡散長の見積りに誤りがあるというのです。ちなみに彼らのやり方は強磁性体とPtが直に接しているにも関わらず、その近接効果等に関しては一切言及していません。

このままではあまりに悔しいので何とか反論したいところですが、かといって自分たちの主張を繰り返しても埒が明きません。やはり実験家たるもの、「論より証拠」ということで、何か全く別の手法で彼らに疑われているスピ拡散長を算出できないかと考えました。そこで考え付いたのが、私がポスドクの時に行っていた弱反局在効果を用いることでした[10]。弱反局在効果の詳細は割愛させて頂きますが、これを正確に測ることで、位相緩和長とスピ軌道長と呼ばれる2つの長さを導き出すことができます。ポスドクをやっていた当時は、温度に敏感な位相緩和長の方に着目していたのですが、実はスピ軌道長 $L_{SO}$ とスピントロニクスで議論されているスピ拡散長 $L_S$ には何か関係があるのではないかと思います。銅や銀、金、白金、さらにはCuBi合金でもスピ拡散長とスピ軌道長を求めたところ、明らかに似たような値が得られ

ました。この事実を加藤先生にお伝えしたところ、スピン拡散長とスピン軌道長には関係があって、当方的なフェルミ面をもつ金属だと  $\sqrt{3}/2(=0.87)$  倍だけ異なることを教えて頂き(図3参照)、これで実験事実を上手く説明することができました。さらに今までのやり方で求めた Pt のスピン拡散長の見積もりにも誤りがないことが、弱反局在の測定から分かりました[6, 11]。

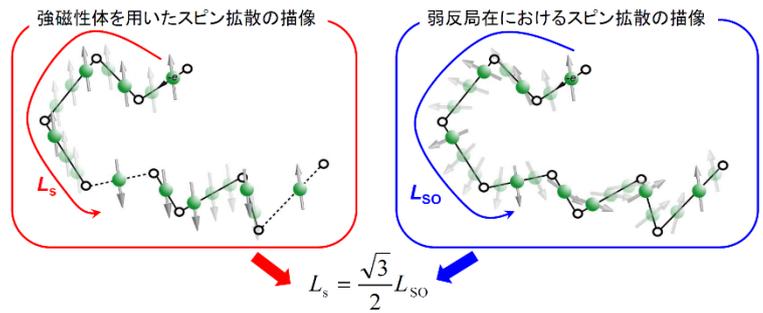


図3: スピン拡散長  $L_s$  とスピン軌道長  $L_{so}$  の関係[6]。

[9]が出てきた時には窮地に立たされ、どうなることかと思っていましたが、今になって思うと、ポスドクで弱反局在の測定方法を身に付けておいてよかったとつくづく思います。またこれを機に、もう少し物性理論の方々と議論して、面白い結果を説明して頂いたり、逆に面白いアイデアを提案して頂き、それを実験で再現できるようになればと考えております。

[1] A. Fert, A. Friederich, and A. Hamzic, *J. Magn. Magn. Mater.* **24**, 231 (1981).  
 [2] M. I. Dyakonov and V. I. Perel, *Sov. Phys. JETP Lett.* **13**, 467 (1971).  
 [3] Y. Niimi *et al.*, *Phys. Rev. Lett.* **106**, 126601 (2011).  
 [4] Y. Niimi *et al.*, *Phys. Rev. Lett.* **109**, 156602 (2012).  
 [5] M. Morota *et al.*, *Phys. Rev. B* **83**, 174405 (2011).  
 [6] Y. Niimi *et al.*, *Phys. Rev. B* **89**, 054401 (2014).  
 [7] 柳瀬陽一, 播磨尚朝, *固体物理* **46**, 229 (2011).  
 [8] S. Y. Huang *et al.*, *Phys. Rev. Lett.* **109**, 107204 (2012).  
 [9] L. Liu, R. A. Buhrman, and D. C. Ralph, arXiv:1111.3702.  
 [10] Y. Niimi *et al.*, *Phys. Rev. Lett.* **102**, 226801 (2009).  
 [11] Y. Niimi *et al.*, *Phys. Rev. Lett.* **110**, 016805 (2013).