

訪問日 2016年8月31日

大阪大学大学院 理学研究科物理学専攻 新見 康洋 准教授

研究題名：2次元超伝導体を用いた革新的スピントロニクスデバイスの創製

### 大阪大学・新見康洋先生を訪ねて

当日は研究内容を紹介したプレゼン資料を用意していただき説明を受けました。先生の研究は「超伝導スピントロニクス」で、通常、超伝導と磁性は相容れませんが、ナノサイズのデバイスに超伝導体を用いて、世界で初めて超伝導状態においてスピンホール効果の観測に成功しました。当日は、スピントロニクス、超伝導の説明から、2次元原子層超伝導体を用いて、電界により超伝導転移温度の制御、スピンホール効果の測定、今後の研究予定などをお聞きしました。

スピントロニクスは、電子の持つ電荷の自由度とスピンの自由度を積極的に使う技術で、ハードディスクの読み取りヘッドに使われている GMR（巨大磁気抵抗）素子は、強磁性薄膜と非強磁性薄膜が積層された多層膜で、まさにスピントロニクスデバイスです。電子は究極のナノ磁石です。磁石のような強磁性体に電流を流すと、電子とスピンの両方が同じ方向に流れるスピン偏極電流が生じます。仮に上向きのスピンを持つ電子を左から右へ、下向きの電子を逆方向に流すことができたとしたら、電荷の流れはキャンセルされますが、スピンの流れは存在します。スピントロニクスでいうスピン流は、このような電荷の流れがない純スピン流を指します。スピン軌道相互作用が強い非磁性体、例えば Pt とか、Au でもスピン流を取り出すことができます。磁性絶縁体中のスピン流はマグノンによって運ばれます。スピン流は正味の電荷の流れがないので、ジュール熱が発生せず、低消費電力になることから注目されています。ただ、電荷は保存されますが、スピン流は緩和してなくなりますので、保存量に変える必要があります。そこで使うのがスピンホール効果という現象です。これは、スピン軌道相互作用の強い非磁性金属などに電流を流すと、アップとダウンのスピンの電流と直交する方向にそれぞれ分かれて、スピン流を生成する現象です。逆にスピン流を流すと電流に変換され（逆スピンホール効果）、スピン流の電氣的検出ができます。この時の変換効率は、通常の物質だと精々1%程度です。

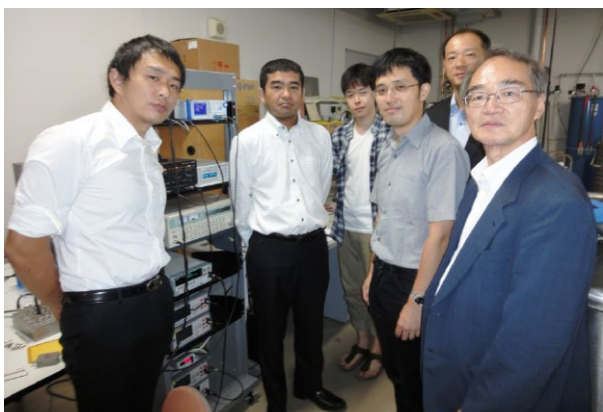
具体的なスピンホール効果の実験です。スピン流の注入ですが、マイクロ波を強磁性体に当て強磁性共鳴を起こさせ、スピン軌道相互作用が強い非磁性体を強磁性体に接続すると、その界面にスピン蓄積が生じ、それが非磁性体中を拡散するスピン流となり、あっという間に緩和します。このマイクロ波を使う方法は、強磁性体に電流を流してスピン偏極電流を使う方法に比べると効率は低いですが、簡便な方法です。また、スピン軌道相互作用が弱い非磁性体はスピン流を遠くまで伝播するために使われます。使用する強磁性体は、幅が 100nm 程度の 1 個の磁区だけのものです。例えばこの非磁性体を Cu にすると、スピン拡散長は室温では 200~300nm 程度ですが、低温だと 1  $\mu\text{m}$  位まで伸びます。拡散スピン流はスピン拡散長の短い物質に選択的に拡散する傾向（スピン吸収）がありますので、Cu 細線などのスピン流を伝える物質の下にスピン軌道相互作用が強い Pt 細線を接続すると、スピン流は接合面に垂直に Pt 内に厚さ方向に流れ込んだ後、直ちに減衰し消失します。Pt のスピン拡散長は高々数ナノメートルレベルですので、Pt の厚さはそれ以下にし、電子線リソグラフィーの制約を受けないで素子を作製できます。ここで、スピン流の偏極方向は、外部磁場により強磁性体の磁化を配向させることで制御できます。それにより Pt 細線に沿って電流を発生させることができ、Pt 細線両端の電位差を測定することで、逆スピンホール効果により発生する電荷蓄積電圧が検出されます。変換効率は、Pt 細線の先にもう一個強磁性体電極を用意、Pt 細線に吸収されないスピン流を検出することで見積もられます。以上がスピン吸収法を用いた逆スピンホール効果の実験です。次は Cu 合金を用いた外因性スピン

ホール効果の実験です。測定に使ったデバイスは、線幅が 100nm の強磁性体のパーマロイ (Ni と Fe の合金) 2 本を 1  $\mu\text{m}$  の間隔に置き、その間に Bi をドーブした Cu を使うと、24% と高い変換効率が得られます。Cu 自身はスピンを全く溜めなく、むしろスピン緩和が起きにくく、スピンを長く伝播させる物質ですが、Bi を微量混ぜてやると、散乱中心ができ、非常に強い散乱が起きるので、高い変換効率になるようです。Bi は入手可能な元素の中でスピン軌道相互作用が最も大きいのが要因のようです。

次は超伝導体の利用で、超伝導体に NbN を使ったスピンホール効果の最近の実験です。前述の素子構造と全く同じですが、非磁性体の Pt の代わりに NbN を使い、吸収されたスピン流は NbN 中で逆スピンホール効果によって電流に変換され、NbN 細線の両端に電圧が生じます。NbN の  $T_c$  は 10K 位です。このスピン流—電流変換の実験を、NbN の常伝導状態 (20K) と超伝導状態 (3 K) で行いました。その結果、超伝導状態でもスピンホール効果の信号を観測することに成功し、通常スピン注入電流に依存しないスピンホール効果が、超伝導状態ではスピン注入電流の減少とともに大きく増大し、常伝導状態の千倍とかに大きくなることを発見しました。測定された信号が、スピンホール効果に由来することが証明され、準粒子がこの効果に寄与していることを明らかにしました。超伝導体中ではアップとダウンのスピンはクーパー対を組んでフェルミレベルの所に存在しますが、超伝導ギャップを超えるエネルギーを与えると、その上の準位では準粒子になり、それは緩和するまで 1  $\mu\text{m}$  掛かるとい性質を持っています。一方、クーパー対はコヒーレント長 ( $\sim 10\text{nm}$ ) で減衰します。常伝導体ではありえないことですが、超伝導の準粒子は緩和長以上の所では信号が消滅します。このような超伝導に特有のスピンホール効果を測ることができます。超伝導ギャップが開くことにより、ギャップの上に分布する準粒子の数が減少するため、超伝導体がスピン伝導に対して少数キャリア系として振る舞うこととなります。このことを反映して、低温では準粒子の抵抗はギャップの大きさに対して指数関数的に大きくなるので、スピンホール効果の大きさはこの抵抗に比例しますので、この異常な増大が説明されるようです。

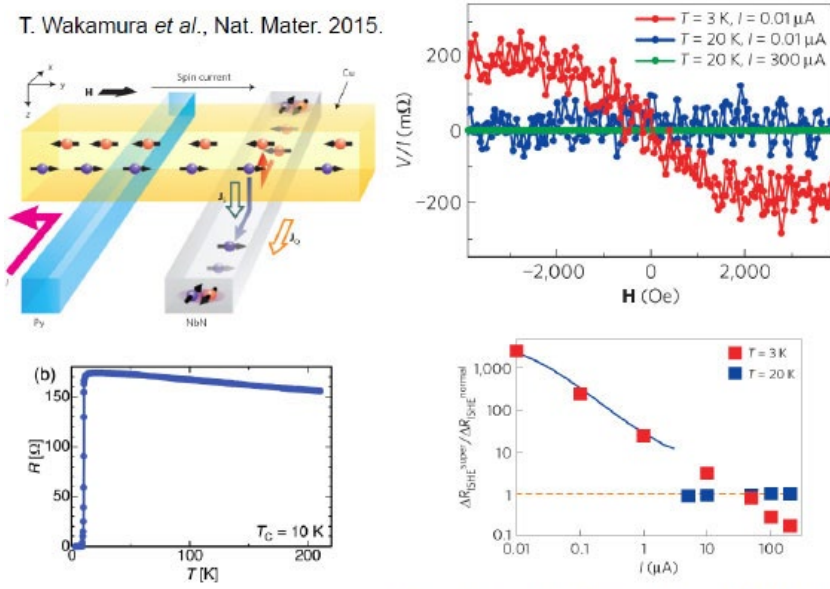
次に今後の研究ですが、先生が注目したのは層状超伝導体です。潤滑材に使われる  $\text{MoS}_2$  を極限まで薄くし、イオン液体中で電界を印加するとその大小により、絶縁体であったものが、金属的になり、超伝導になったりします。電界により電子密度を高くし、超伝導を誘起させ、超伝導転移温度 ( $T_c$ ) を電界で制御させます。まず層状超伝導体として  $\text{NbSe}_2$  を使い、前述と同じような強磁性体と非磁性体を配置したデバイス構造を作製します。そのとき  $\text{NbSe}_2$  に電界を印加し、 $T_c$  を上げてやることで、超伝導ギャップが大きくなるので、 $T_c$  以下ではもっと増幅した信号がでるのではないかと考えています。更には、 $\text{NbSe}_2$  とグラフェンを顕微鏡下で重ね合わせたヘテロ構造の作製にもチャレンジしています。グラフェンは Cu よりスピン緩和が弱く、スピン拡散長が大きくなり、それと層状超伝導体を組み合わせます。これの最大のメリットは、緩和時間とか緩和長とかをゲートで制御でき、二次元原子層超伝導体もゲートで  $T_c$  を上下できます。上手いけば、例えば微小な磁化の揺らぎとかを高感度で検出できるセンサになり、現在の SQUID の代替にもなり、目指したいとのことでした。

難しい話で物理の深淵を垣間見た訪問でした。(2016年8月31日、技術参与・飯塚)



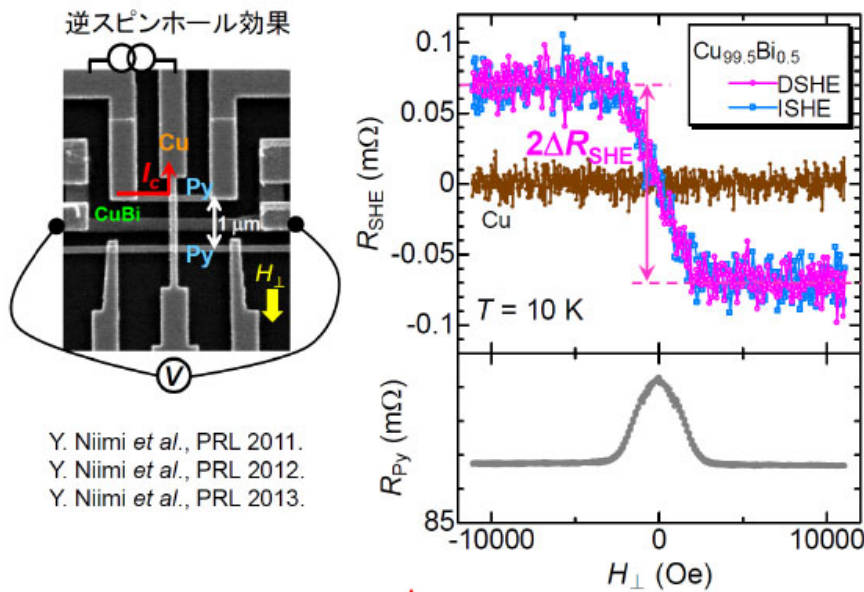
右から3人目が新見先生

T. Wakamura *et al.*, Nat. Mater. 2015.

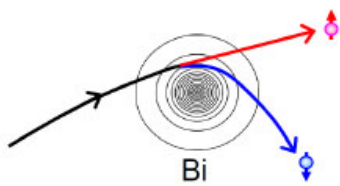


Pyに流す電流を小さくするだけで、2000倍に！

超伝導スピンホール効果



Y. Niimi *et al.*, PRL 2011.  
Y. Niimi *et al.*, PRL 2012.  
Y. Niimi *et al.*, PRL 2013.



$$\alpha_H^{\text{CuBi}} = -24(\pm 9)\%$$

外因性スピンホール効果 (Cu+Bi)