

次世代スピントロニクス材料であるグラフェンにおいて スピンを電圧に変換する新しい機能を発見

京都大学（大学院工学研究科電子工学専攻教授・白石誠司[しらいし まさし]及び日本学術振興会外国人特別研究員 Sergey Dushenko [せるげい どうしえんこ]博士）らは九州大学先導物質化学研究所・大阪大学・早稲田大学と共同で次世代スピントロニクス材料として大きく注目を集めるグラフェンにおける新しいスピン機能を発見しました。

グラフェンは炭素原子層 1 層で形成される分子材料であり 2007 年にノーベル物理学賞がその発見に与えられ、現在エレクトロニクスだけでなく次世代スピントロニクス(*1)材料として大きく注目を集める材料です。共同研究グループはグラフェンにスピンを注入することでスピン角運動量(*2)を電氣的に電圧に変換することに成功し、この材料の新しいスピン機能を発見しました。これはグラフェンという魅力的な材料の新たな機能開拓という意義があり、今後のスピントロニクス研究の広がりが期待されます。

本研究成果は米国物理学会科学誌 *Physical Review Letters* 誌の電子版に 4 月 22 日（米国時間 4 月 21 日）に公開されました。

1. 研究の背景と意義

CMOS(相補型金属酸化膜半導体)トランジスタ(*3)の微細化によって低消費電力化と高速動作を可能としてきたシリコンベースの集積回路は、微細加工による性能向上の限界に直面しつつあります。また、CMOS トランジスタを用いた集積回路は一般に情報を保持するために電圧をかけ続けなければいけないために、省エネルギーの観点からも大きな課題を抱えています。そのため、次世代の高度情報化社会の中核を担う革新的情報デバイスの実現のために様々な角度から鋭意研究が進められています。

このような革新的情報デバイスを実現するためには主に①材料面、②技術面という 2 つのアプローチが存在します。①の材料面では、シリコンが本質的に実現できる移動度（電子またはホールがデバイス中を移動する速さ）の限界に近づきつつあるため、シリコンに変わる材料開発が希求されています。その中でグラフェンはシリコンを凌駕する移動度が実験的にも実現されており、ポストシリコン材料の中でも最も有力な材料と期待されています。②の技術面では、スピントロニクスと呼ばれる電子の有する電荷自由度とスピン自由度を同時に制御する技術が有力な技術の 1 つと考えられており、半導体材料を対象とした半導体スピントロニクスという分野は世界中で活発な研究が進められています。

これらの理由からグラフェンを用いたスピントロニクスは大きな関心を集めており、

世界中の研究者が研究を進めている状況にあります。これまでの研究の中心はグラフェンにスピンを長距離伝導させることにありましたが、スピンの輸送だけでなく、スピンを別の物理量、例えば電圧や光などに変換するような新しいスピン機能の開拓に近年は興味広がっています。スピン角運動量を別の物理量に変換する「スピン変換」はその重要な研究対象ですが、グラフェンでこのスピン変換を実現することに大きな注目が集まっていました。

2. 研究成果の展望

今回の成果はグラフェンが単純にスピン角運動量を運ぶだけでなく、スピン角運動量を電気に変換できるという驚きがあります。スピン角運動量の観測は直接的な方法がないために、このような電気への変換が可能になると、スピン角運動量の輸送と電氣的観測を同じ1つの材料でできるという利点があります。グラフェンを用いたスピン素子にこのような多機能を搭載できるという点で非常に意義深い結果です。

3. グラフェンにおけるスピン変換の詳細

今回、研究グループが実験に用いた構造を図1に示します。原子層1層からなる単層グラフェンを磁性体であるイットリウム=鉄=ガーネット(YIG)基板上に転写し、YIGに強磁性共鳴と呼ばれる現象を誘起すると、グラフェンにスピン角運動量が注入されます。これをスピンプンピング現象と呼びます(*4、図1(a))。注入されたスピン角運動量は、グラフェンの有するスピン軌道相互作用(*5)により散乱を受けますが、スピン角運動量の向きによって散乱される方向が決まっているため、その方向に電流が流れるという現象が生じます。その電流を電圧として観測することができますが(図1(b)(c))、その結果が図2になります。ここで注目すべきは、グラフェンの上にイオン液体を塗布し、そこで強い電界をかけることでスピン角運動量の受け手を電子または正孔に自由に制御できる点です。電子と正孔は互いに逆の電荷をもつため、同じ方向に移動した場合、電圧が逆に出るといった特性があります。実験結果は明らかに電子がスピン角運動量の受けてである場合(青丸)と正孔が受けてである場合(赤丸)で信号の極性が反転していることから、両極性(ambipolar)のスピン角運動量変換に成功していることがわかります。さらに外部磁場方向を反転させた場合に電圧の符号も反転することから、現象が逆スピンホール効果(*6)と呼ばれる効果に起因することもわかりました。

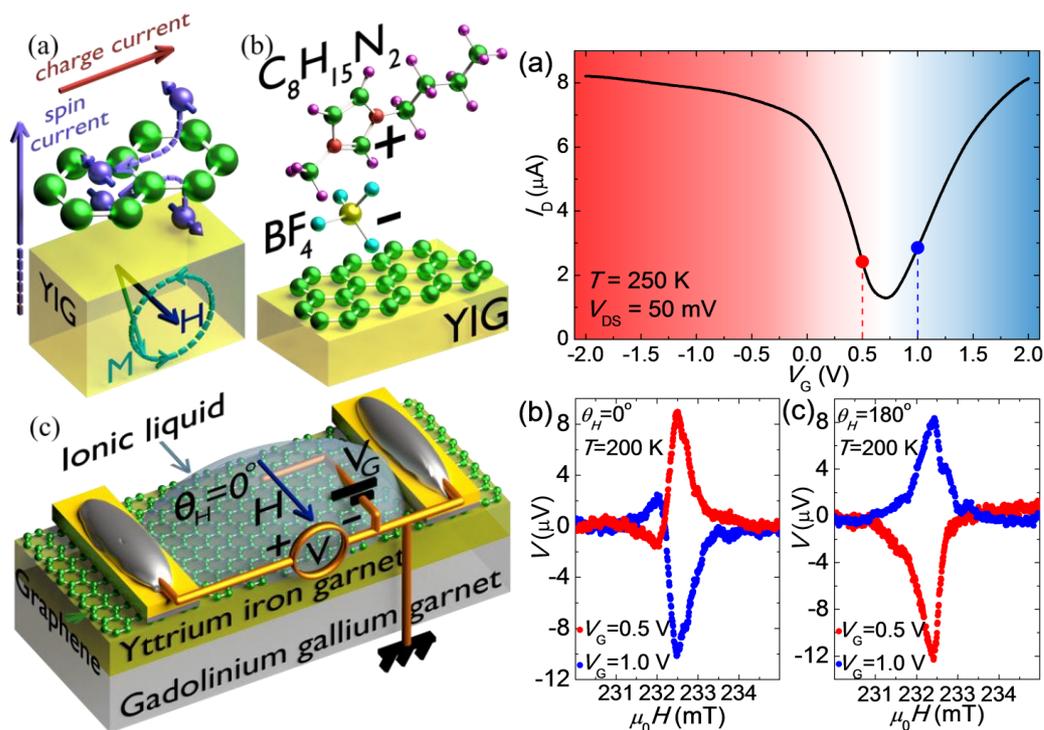


図 1. (a) 強磁性共鳴によって YIG からグラフェンにスピ角運動量が注入される概念図。(b) イオン液体をグラフェン上に塗布した様子。イオン液体は BF_4 を用いた。(c) グラフェンにおけるスピ角運動量変換で生じる電圧を計測する概念図。

図 2 (a) グラフェンにおける両極性特性。赤の領域が正孔、青の領域が電子がスピ角運動量の受けてとなっている。(b) グラフェンにおけるスピ軌道相互作用によって生成される電圧。赤は正孔、青は電子によるスピ角運動量変換の結果。互いに逆の極性の信号になっている。(c) 外部磁場方向を反転させた場合の電圧。(b)の場合と逆になっている。

<用語解説>

*1 スピントロニクス

電子のもつ電荷という自由度を制御する技術がエレクトロニクスですが、電子のもう 1 つの自由度であるスピンも同時に制御することで、更に高度なエレクトロニクス分野を構築してゆく研究領域です。スピエレクトロニクス、と呼ばれることもあります。

*2 スピ角運動量

磁石のもつ磁性の起源で、電子の自由度の 1 つです。量子力学的な量で、離散的な 2 つの値を持ち、アップスピンとダウンスピンと呼ばれます。

*3 CMOS

CMOS(シーモス)は Complementary Metal Oxide Semiconductor の略で、日本語では相補型金属酸化膜半導体といます。これは MOS-FET(金属酸化膜半導体電界効果トランジスタ)を相補形に配置した情報処理構造を意味し、CMOS トランジスタとは CMOS 構造を組み合わせた情報処理素子を指します。CMOS トランジスタは他のトランジスタに比べると消費電力をかなり抑えられるため、半導体素子において標準的に用いられています。一方で近年、半導体への更なる微細化の要求により、リーク電流の問題が発生し、結果的に電力消費が増えています。

*4 スピンポンピング

強磁性体に強磁性共鳴等を用いて外部からトルクを与えることにより、強磁性体からスピンを(スピン角運動量を)外部に強制的に流し出す現象をスピンポンピングと呼びます。強磁性体に非磁性体を接合する場合、スピンポンピングにより非磁性体中にスピンの流れを生成できます。強磁性体に外部トルクを与える主な方法として、強磁性共鳴を用いる方法が一般的でして、例えば、電子スピン共鳴装置による高周波磁場を印加する方法や、伝送線を用いてパルス磁場を強磁性体に印加する方法などがあります。

*5 スピン軌道相互作用

物質中でスピンを曲げる効果の指標であり、専門的には電子のスピンの角運動量との間の相互作用を言います。一般的傾向として原子番号の大きな元素のほうが、強いスピン軌道相互作用を有します。例えば金属ならば、パラジウム(Pd)や白金(Pt)、金(Au)ではこの相互作用が大きく銅(Cu)や銀(Ag)は小さいことが知られています。炭素(C)は非常に軽いため、スピン軌道相互作用は小さいですが、ゼロではないために今回のような現象が観測できます。

*6 逆スピンホール効果

物質中の純スピン流を電流に変換する効果を指し、物質のスピン軌道相互作用(後述)がこの効果を生み出します。逆スピンホール効果による変換電流は、一般に物質の抵抗を介して電圧として検出されます。尚、「逆」とは、スピンホール効果(電流をスピン流に変換する効果)の逆過程を意味します。

論文タイトル：

Gate-tunable spin-charge conversion and the role of spin-orbit interaction in graphene

グラフェンにおけるゲート変調可能なスピン・電荷変換とスピン軌道相互作用の役割

Phys. Rev. Lett. 116, 166102 (2016).

書誌情報 <http://dx.doi.org/10.1103/PhysRevLett.116.166102>

著者：

S. Dushenko [1,2], H. Ago [3], K. Kawahara [3], T. Tsuda [4], S. Kuwabata [4], T. Takenobu [5],

T. Shinjo [2], Y. Ando, [2], M. Shiraishi [2]

セルゲイ・ドゥシェンコ [1,2]、吾郷浩樹 [3]、河原憲司 [3]、津田哲哉 [4]、桑畑進 [4]、

竹延大志 [5]、新庄輝也 [2]、安藤裕一郎 [2]、白石誠司 [2]

[1] 阪大院基礎工 [2] 京大院工 [3] 九大先導研

[4] 阪大院工 [5] 早稲田大先進理工