



平成 28 年 7 月 22 日
国立研究開発法人量子科学技術研究開発機構
国立研究開発法人物質・材料研究機構
国立大学法人筑波大学

量子情報技術を担う新材料「グラフェン」のスピンを操る

— 次世代の高速・省エネルギー情報システムの実現に道筋 —

【発表のポイント】

- 電子のスピンの向きをデジタル情報として扱う量子情報技術において、スピンを伝える「導線」となる新材料「グラフェン」内部の電子スピンの向きを磁性酸化物により制御できることを発見。
- この発見は、最先端の量子ビーム技術であるスピン偏極ヘリウム原子ビーム技術によりグラフェン内部の電子スピンを高感度に検出することで実現。
- 次世代高速・省エネルギー情報システムのための高機能スピントロニクスデバイスの実現に道筋。

国立研究開発法人量子科学技術研究開発機構（理事長平野俊夫）量子ビーム科学研究部門の境誠司上席研究員、国立研究開発法人物質・材料研究機構（理事長橋本和仁）先端材料解析研究拠点の山内泰 NIMS 特別研究員、国立大学法人筑波大学（学長永田恭介）数理物質系の山田洋一講師らは、グラフェン¹⁾内部の電子のスピン²⁾の向きを、磁性酸化物を用いて制御できることを発見しました。これは、電子デバイスの飛躍的な高速・省エネ化を可能にするスピントロニクス³⁾などの量子情報技術⁴⁾にグラフェンを応用する際に鍵となる技術で、今日のエレクトロニクスが抱える性能限界や電力消費の問題の解決に繋がります。

グラフェンは、炭素原子 1 個分の厚さのシート状の物質で、スピンの向きを情報として長距離に伝えることができる「導線」として、スピントロニクスへの応用が注目されています。従来のエレクトロニクスでは、電子のある/なしを情報の処理に用いますが、スピントロニクスでは、さらに電子のスピンの上向き/下向きをデジタル情報として扱うことで、飛躍的に高速で省エネルギーな電子デバイスを実現することができます。グラフェンは、優れたスピンの導線としてスピントロニクスデバイスの高機能化への貢献が期待されています。しかし、同応用の実現に必須な、グラフェン内部の電子のスピンの向きを制御するスピン注入⁵⁾の技術の開発が難航していました。本研究では、同課題の解決策として、磁性酸化物とグラフェンの接合によるスピン注入技術を開発しました。最先端の量子ビーム技術⁶⁾であるスピン偏極ヘリウム原子ビーム技術⁷⁾を用いることでグラフェン内部の電子のスピンを高感度に検出することに成功し、グラフェン内部のスピンの向きが磁性酸化物のスピンの向きと同じ向きに揃うことを発見しました。本発見は、次世代高速・省エネルギー情報システムのための高機能スピントロニクスデバイスの実現に道筋をつけるもので、それにより、今後、充電の必要がない携帯端末や体内に埋めこんで使えるヘルスケアセンサーなど生活を豊かにする情報通信機器の実現が期待できます。

本成果は、米国化学会 ACS Nano 誌のオンライン版に 2016 年 7 月 21 日に掲載されました。

【本件に関する問い合わせ先】

(研究内容について)

国立研究開発法人量子科学技術研究開発機構 量子ビーム科学研究部門高崎量子応用研究所
プロジェクト陽電子ナノ物性研究(東海駐在) 境 誠司 TEL:070-3943-3442、FAX:027-346-9688

(報道対応)

国立研究開発法人量子科学技術研究開発機構

経営企画部 広報課長 広田耕一 TEL:043-206-3062、FAX:043-206-4062

補足説明資料

【成果の背景】

電子の電荷を用いて情報処理を行うエレクトロニクスは、これまでコンピューターの飛躍的な性能向上など情報技術を発展に導いてきました。しかし、同技術は素子の微細化による性能向上が限界を迎えつつあります。加えて、最近では、エレクトロニクスデバイスの発熱による情報通信機器の電力消費の肥大化が社会的な問題となっています。このような状況を背景に、電子デバイスのさらなる高性能化と省エネ化を可能にする次世代技術として、「量子情報技術」への期待が高まっています。量子情報技術とは、電子のスピンや量子もつれなど量子力学の原理を利用して情報の処理を行う技術です。その中でも、電子のスピン向き(上向き/下向き)をデジタル情報の0/1に見立てて情報処理を行う「スピントロニクス」(図1)は、次世代の情報システムの中核を担う技術として世界中で研究開発が盛んに行われています。仮に、現在のエレクトロニクスデバイスを全てスピントロニクスデバイスで置き換えることができれば情報通信機器による電力消費(国内総発電量の10%以上)を1/10程度に削減できるといわれており、技術の高度化が期待されています。

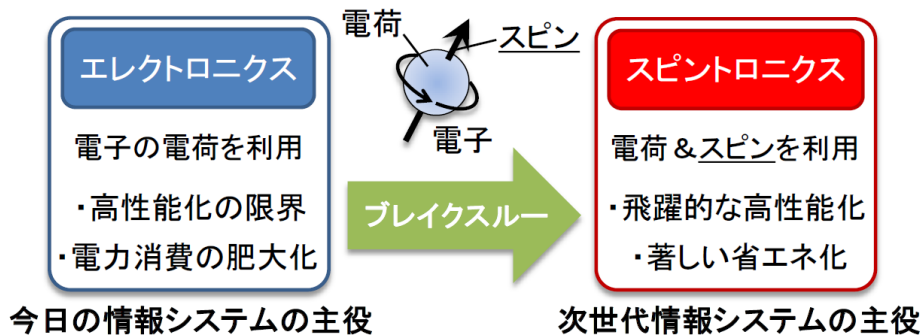


図1 エレクトロニクスとスピントロニクス

従来のエレクトロニクスでは、電子の電荷(ある/なし)を情報処理に用いてきましたが、スピントロニクスでは、さらに電子のスピン向き(上向き/下向き)を情報として扱うことで電子デバイスの高性能化や省エネ化を実現します。

電子が持つ電荷という性質に加えてスピンという性質を利用した応用例としては、既に実用化されているハードディスクの磁気ヘッドや実用化が近い磁気ランダムアクセスメモリ(MRAM)といった記憶素子が挙げられます。しかし、電子デバイスの情報処理は、演算素子と記憶素子を組み合わせで行いますので、今後、スピントロニクスが次世代情報システムの中核を担うためには、前述のような記憶素子に加えて、電子スピンの向きそのものをデジタル情報として扱う演算素子(図2)の開発が重要になります。スピンを用いた演算

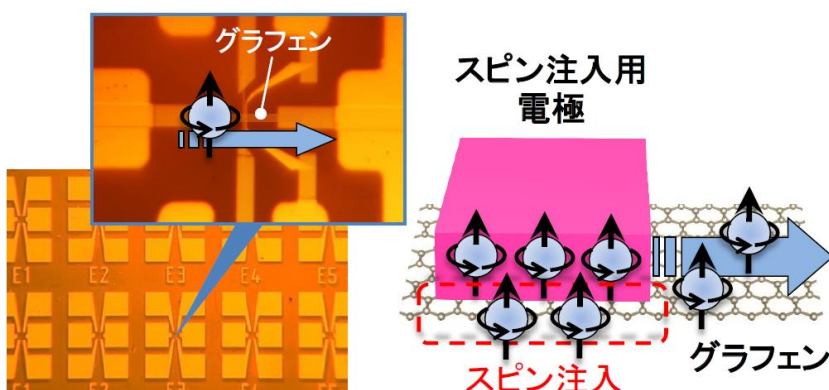


図2 スピンを用いた演算素子のイメージ

グラフェンをスピン輸送材料に用いた素子の例です。同素子では、右図のようにスピン注入用の電極とグラフェンの接合を用いてグラフェン内部を流れる電子のスピン向きを制御します。

素子では、スピンの向きを情報として伝える「導線」の役割をする材料、すなわち、スピン輸送材料の開発が必須です。スピン輸送材料としては、これまで半導体（シリコン等）や金属（銅等）を対象に研究が行われてきました。しかし、近年、これらの材料に比べて、電子をより高速に輸送することができ、輸送中にスピンの向きが乱されにくいという、スピン輸送材料として理想的な性質を持つ「グラフェン」（図3）が、新しい候補材料として注目を集めています。

しかし、グラフェンをスピン輸送材料として利用するためには”2つの大きな問題”がありました。1つめの問題は、グラフェン内部の電子スピンの向きを電極により制御するスピン注入技術が確立されていないこと、2つめの問題は、グラフェン内部の電子スピンの向きを高感度に検出できる観測手段がないということです。1つめの問題については、これまで、スピン注入用の電極の材料として磁性金属の利用が試みられてきました。それは、スピンの向きに偏りを持つ磁性金属を電極に用いれば、電極と接するグラフェンの電子にも自ずとスピンの向きの偏りが生じるであろうと考えられたからです。しかし、これまでの研究の結果、磁性金属とグラフェンとの接合部では双方の電子が互いに影響を及ぼし合うことで結果的にスピンの向きが乱れてしまい、スピン注入を効果的に行えないことが分かってきました。一方、2つめの問題については、グラフェンの厚さが炭素原子1個分と非常に薄いため、X線や紫外線を使うこれまでのスピンの観測方法ではこれらのビームがグラフェンを突き抜けてしまい電極材料内部の電子のスピンを主に観測してしまうことから、グラフェン内部のスピンを高感度に検出することが困難でした。

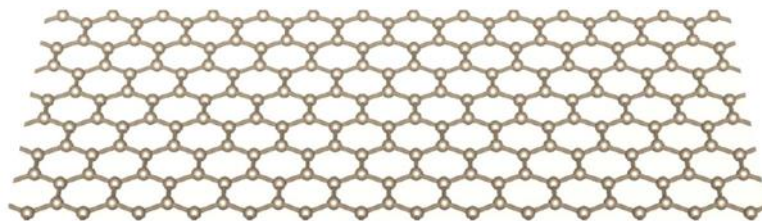


図3 グラフェンのモデル図

炭素原子が蜂の巣状に繋がってできた厚さが1原子のシート状の物質です。

【成果の詳細】

研究チームは、1つめの問題の解決策として、グラフェンにスピン注入を行う電極の材料として、これまでの磁性金属の代わりに、磁性酸化物である $\text{La}_{0.7}\text{Sr}_{0.3}\text{MnO}_3$ (LSMO)⁸⁾ を用いました(図4)。それは、磁性酸化物を電極に用いることで、スピンの向きの乱れの原因となるグラフェンと電極の接合部における電子の混ざり合いを弱めることができると考えたからです。加えて、LSMOが持つハーフメタル⁹⁾という性質がスピン注入に有利に働くことも期待できました。さらに、2つめの問題を解決する手段として、最先端の量子ビーム技術であるスピン偏極ヘリウム原子ビーム技術を用いました。それは、スピン偏極ヘリ

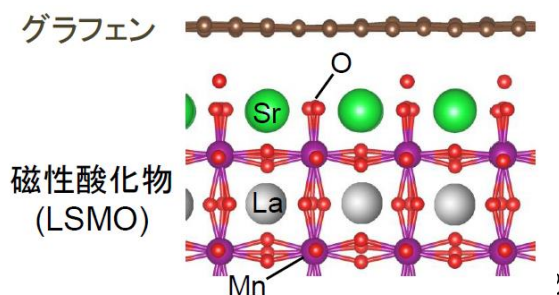


図4 グラフェン/LSMO 接合のモデル図
本研究では、図のようにグラフェンとLSMOが原子レベルで接した接合を作製して実験に用いました。

ウム原子は、物質の内部まで透過してしまう X 線や紫外線とは異なり、物質の表面で散乱されてしまうため、接合の表面にあるグラフェンのスピンのみを検出できると考えたからです。

図 5 に、グラフェン/LSMO 接合についてスピン偏極ヘリウム原子ビーム技術を用いて観測したグラフェン内部の電子スピンの向きの偏りの大きさを示すスピン信号を示します。同技術に期待した通り、グラフェン内部のスピンを高感度に検出することに成功しました。そして、観測されたスピン信号を解析した結果、グラフェン内部の電子の多くが、LSMO 中の電子のスピンの同じ向きを向いていることを発見しました。

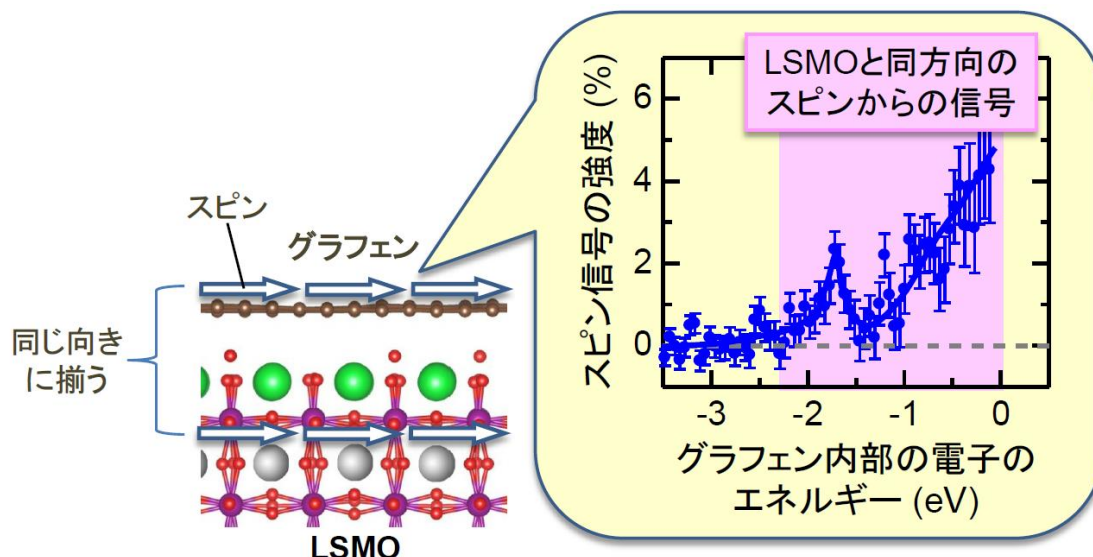


図 5 グラフェン/LSMO 接合について検出されたグラフェンからのスピン信号
スピン信号はグラフェン内部の電子のスピンの向きの偏りの大きさを反映します。スピン信号の強度は、鉄などの磁性金属に匹敵する大きさです。LSMO と同方向のスピンの信号が検出されたことで、グラフェンと LSMO のスピンの同じ向きに揃っていることが分かりました。

磁性体である LSMO 内部の電子のスピンの向きは外部から磁場をかけることなどにより容易に制御できます。そのため、グラフェン/LSMO 接合では LSMO 内部の電子のスピンの向きに応じてグラフェン内部の電子のスピンの向きを制御することができます。本研究の結果、これまでの磁性金属に代えて磁性酸化物を用いることで、グラフェンのスピントロニクスへの応用の鍵を握るグラフェン内部の電子スピンの向きの制御、すなわち、グラフェンへのスピン注入を実現できることが初めて明らかになりました(図 6)。

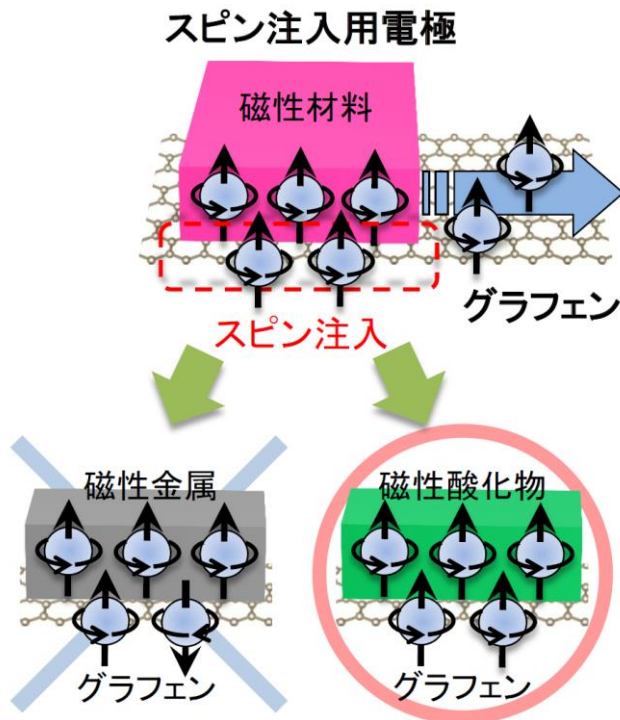


図6 これまでのグラフェン/磁性金属接合と本研究のグラフェン/磁性酸化物接合の違い

グラフェンと磁性金属の接合(左下)では、スピン注入に必要なグラフェン内部の電子のスピン向きを制御が行えませんでした。本研究のグラフェンと磁性酸化物(LSMO)の接合(右下)では、グラフェン内部のスピン向きが磁性酸化物内部のスピンと同じ方向に揃うため、磁性酸化物内部のスピン向きを磁場などにより外部から制御することで、グラフェン内部のスピン向きを制御することができます。

【今後の展望】

本発見は、グラフェンのスピントロニクスへの応用に道筋をつけました。今後、グラフェンの優れたスピン輸送特性を活かしたスピントロニクスデバイスの研究開発が進み、次世代の高速・省エネルギー情報システムのための高機能スピントロニクスデバイスの実現に繋がることが期待されます。

本成果は、JSPS 科研費 JP 16H03875 「グラフェン/酸化物磁性体接合の磁気近接効果とスピン流制御の研究」(研究代表者：境 誠司)、ロシア国立科学技術大学 国際共同研究支援プロジェクト「ナノ構造体の理論材料科学」などの援助により得られました。

【用語解説】

1) グラフェン

炭素原子から成る単層のシート状の物質です(図 3)。炭素原子が蜂の巣状のネットワーク構造を持つことに起因して、高速に電子を輸送でき、輸送中に電子のスピンに乱れが生じにくいことなどスピン情報の輸送に適した性質を持つことから、スピントロニクスデバイスのスピン輸送材料として注目されています。グラフェンは上記のような優れた電子的性質を持つことに加えて、厚さが 1 原子の状態でも安定に存在できることや機械的な強度が極めて高いこと、化学処理等により性質を制御できることなどの特徴から、スピントロニクスデバイスに限らず、太陽電池、バイオセンサーや飛行機用部材など様々な応用が期待され、多くの分野で実用化を目指した研究開発が行われています。

2) スピン

電子の自転に由来して電子が示す磁石の性質をスピンといいます(図 7)。スピンには上向きと下向きの二つの状態があります。

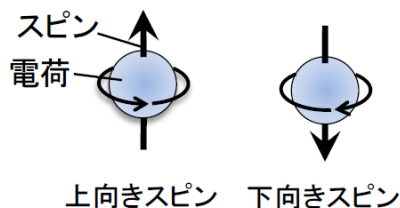


図 7 電子のスピンの模式図

電子のスピンの向き(上向き/下向き)をデジタル情報の 0 と 1 のように扱い、これを制御したり識別したりすることで情報の処理を行う技術です。電子の電荷に加えてスピンを情報処理に用いることで、今日の情報技術が直面する電力消費の肥大化などの問題を克服することができる技術として注目されています。

3) スピントロニクス

電子のスピンの向き(上向き/下向き)をデジタル情報の 0 と 1 のように扱い、これを制御したり識別したりすることで情報の処理を行う技術です。電子の電荷に加えてスピンを情報処理に用いることで、今日の情報技術が直面する電力消費の肥大化などの問題を克服することができる技術として注目されています。

4) 量子情報技術

電子や核のスピンや量子もつれなど量子力学の基本原理を利用して情報処理を行う技術を指します。従来の電子デバイスと比較して、処理速度が高く、低い消費電力で動作する電子デバイスを実現することができます。

5) スピン注入

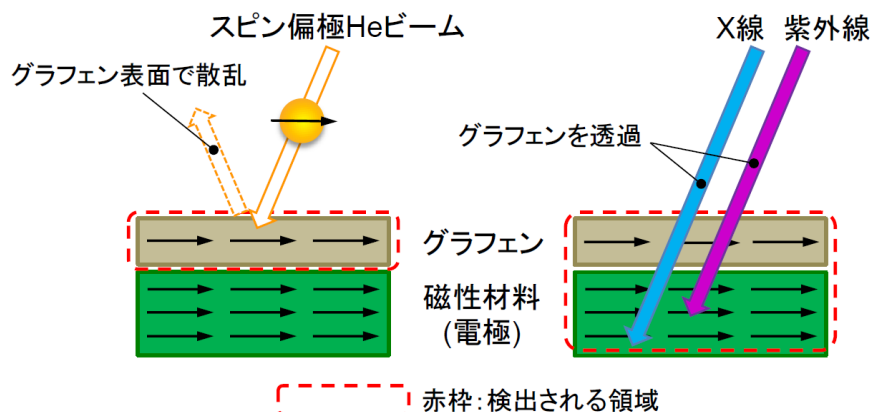
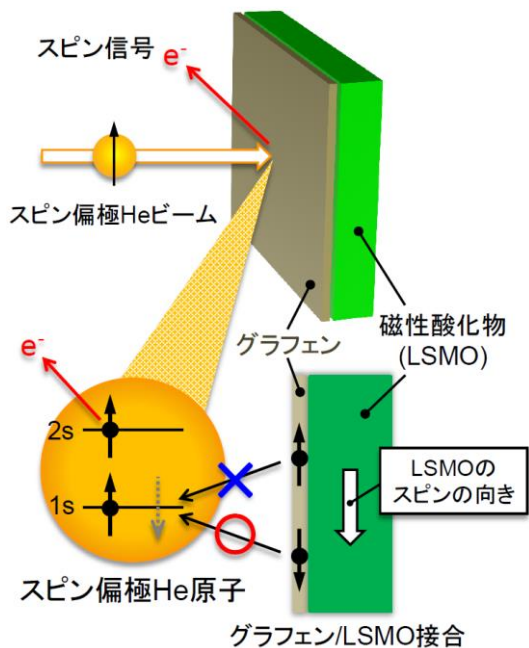
スピンの向きに偏りを持つ磁性材料(本研究では LSMO)を電極に用いて、電極と接する他の材料(本研究ではグラフェン)の内部の電子にスピンの向きの偏りを生じさせることをスピン注入といいます。

6) 量子ビーム技術

光や電子、原子などマイクロの波や粒子を細いビームの形状に整えたものを量子ビームと呼びます。量子ビームを用いた様々な技術が、新しい材料や最先端のデバイスのマイクロな性質を調べたり、微細な構造を加工するために利用されています。

7) スピン偏極ヘリウム原子ビーム技術

正確にはスピン偏極準安定ヘリウム原子脱励起分光法といいます。本研究では、スピンを持つヘリウム原子(スピン偏極ヘリウム原子)のビームを用いてグラフェンの電子のスピンの検出を試みました(図 8)。この技術では、スピン偏極ヘリウム原子を試料の表面に照射することで表面の電子のスピンを検出します。表面のスピンの観測には一般に X 線や紫外線を使う方法が用いられますが、これらの方法では実際には表面からの深さが数原子以上の領域にある電子のスピンのみまで検出してしまいます(図 9)。これに対して、スピン偏極ヘリウムビームには、試料の表面にある電子のスピンのみを検出するという他の手法にない特徴があります。グラフェンは炭素原子 1 個分の厚さしかないため、グラフェンと磁性材料の接合を一般的な方法で観測しようとしても、グラフェンと接する磁性材料(今の場合、LSMO)を主に検出してしまい、グラフェンのスピンの向きを正確に把握することができません。この難題に対して、本研究では、上記のようなスピン偏極ヘリウム原子ビームの特徴を活かすことで、グラフェン/LSMO 接合の表面にあるグラフェンのスピンを選択的に検出することに成功しました。



8) LSMO

$\text{La}_{0.7}\text{Sr}_{0.3}\text{MnO}_3$ の略称です。LSMO は、ペロブスカイト構造という結晶構造を持つ遷移金属磁性酸化物でハーフメタルの性質を示します。

9) ハーフメタル

強磁性材料 (金属) の内、電子のスピン向きが一方向に完全に揃っているものを指します。ハーフメタルはスピン注入に適した材料として、金属や半導体と組み合わせたスピントロニクスデバイスの研究が盛んに行われています。本研究で着目した LSMO はハーフメタルの一種です。