



大気中で動作するスピントロニクス材料の開発 ～グラフェンで保護されたスズ単原子膜～

1. 発表者

矢治 光一郎（東京大学物性研究所 極限コヒーレント光科学研究センター 軌道放射物性
研究施設 助教）

小森 文夫（東京大学物性研究所 ナノスケール物性研究部門 教授）

ビシコフスキー アントン（九州大学大学院 工学研究院 助教）

田中 悟（九州大学大学院 工学研究院 教授）

2. 発表のポイント

- ◆グラフェンでカバーしたスズ単原子膜が真空中・大気中の両方でスピン偏極した電子の伝導を担うことがわかった。
- ◆本スズ単原子膜には、膜面内方向に寝たスピンをもつ電子と膜面垂直方向に起立したスピンをもつ電子の両方が存在していることを発見した。
- ◆グラフェンを保護膜として用いることで、従来真空中のみに制限されていたスピントロニクス材料が大気中でも使用できる可能性を示した。

3. 発表概要

東京大学物性研究所の矢治光一郎助教、小森文夫教授らは、九州大学大学院工学研究院のビシコフスキーアントン助教、田中悟教授らと共同で、グラフェン（注1）でカバーしたスズ（Sn）単原子膜がスピン偏極（注2）した電子の伝導を担うことを発見しました。さらに本物質は大気中でもその機能を損なうことがなく、実用的なスピントロニクス材料としての可能性を示しました。

近年、スピントロニクス技術への応用を期待して、固体表面のスピン偏極した電子状態について盛んに研究が行われています。スピン偏極した電子状態は大気中では酸素などとの反応によって簡単に壊れ、その機能が失われてしまいます。従って、これまで報告されている表面材料は機能を損なうような反応がおこらない真空中（注3）で取り扱うことを前提としていました。スピントロニクス材料として実用化するためには、性能を保持したまま大気中に取り出し、安定に動作することが必要であり、最大の課題となっていました。

本研究では、グラフェンでカバーされた Sn 単原子膜が大気中でも大きくスピン偏極した電子状態があることを発見しました。また、電子のエネルギーに依存して原子膜面内方向に寝たスピンをもつ電子と面直方向に起立したスピンをもつ電子が共存していることも初めて解明しました。これらを選択的に利用すれば三次元的な電子スピン制御が可能になります。

本成果は、グラフェンを保護膜として利用することで、これまで真空中でしか取り扱えなかったスピン偏極電子材料を大気中でも機能が保持されることを示し、実用的なスピントロニクス材料の開発を大きく前進させる成果といえます。

本成果は、2019年3月25日（米国東部時間）に米国科学誌「Physical Review Letters」でオンライン公開される予定です。

4. 発表内容

【背景】

非磁性体の表面や界面では、強いスピン軌道相互作用（注4）により電子がスピン偏極している場合があります。このようなスピン偏極電子は次世代のスピン트로ニクス技術への応用が期待されることから世界中で研究が行われています。これまで多くのスピン偏極表面電子状態をもつ物質群が提案され、スピン트로ニクス技術への応用が提案されてきました。しかしながら、これらの物質においてスピン偏極電子状態を安定して保持するためには物質表面が原子レベルで清浄であることが要求され、超高真空環境下（注3）での取り扱いを前提としていました。実際、これらの物質をそのまま超高真空環境から大気中に取り出すと、大気に含まれる酸素や水が一瞬にして表面に付着し、スピン偏極電子状態は簡単に壊れてしまいます。材料の実用化のためには、スピン偏極電子を有する表面材料をどのように大気中に取り出すかが大きな課題となっていました。

2018年、九州大学を中心とする研究グループはSn原子をグラフェンとシリコンカーバイド（SiC）基板の界面にインターカレーション（注5）することにより新たなSn単原子層物質を人工的に作製することに成功しました（図1）。Sn原子はスピン軌道相互作用が比較的大きいため、その電子状態はスピン偏極していることが予想されます。また、グラフェンはとても頑丈で安定な物質であり、Sn原子膜の表面がグラフェンで覆われることで、大気との反応に対して非常に強いことも予想されます。しかし、物質界面にある単原子膜の電子のスピンの向きを三次元的に調べるのは技術的に難しく、検証されていませんでした。

【研究内容】

本研究では、グラフェンでカバーされたSiC基板上的Sn単原子膜の電子状態をスピン・角度分解光電子分光（注6）を用いて詳細に調べました。実験は、東京大学物性研究所の極限コヒーレント光科学研究センターで開発された世界最高性能の三次元スピン・角度分解光電子分光装置を用いて行われました。試料に真空紫外光を照射し、光電効果によりSn単原子膜から放出された電子のエネルギー・運動量・スピンの向きを精密に測定しました。その結果、エネルギーが異なる二つのSn由来の電子状態が観測されました（図2左）。スピンの向きを三次元的に測定すると、これらのうち一つでは、スピンの向きがSn単原子膜の面内方向に寝ており、もう一つのバンドは、スピンの向きがSn単原子膜の面垂直方向に起立していることがわかりました（図2右）。これまでは、結晶の空間対称性と電子スピンの向きは一対一で対応していると考えられていましたが、同じ結晶対称性であっても異なるスピンの向きをもつ電子状態が共存することを世界で初めて見出しました。詳細な理論計算から、結晶中に電子がどのように分布しているかがスピンの向きを決める上で重要であることを解明しました。

また、この試料を真空中から大気中に取り出し、その後再び同様の測定をしても、全く同じ結果が得られることがわかりました。これはこの物質を大気に晒してもSn単原子膜のスピン偏極電子状態は大気の影響を受けていないことを意味します。最表面のグラフェンがSn単原子膜のスピン偏極電子状態を保護する働きをすることがわかりました。

【社会的意義と今後の展望】

単原子層の炭素原子からなるグラフェンに端を発した単原子膜の研究は、その後シリコンの単原子膜であるシリセンやゲルマニウムの単原子膜であるゲルマネンなど多種多様な単原子層物質の研究へと発展しています。グラフェンを構成している炭素原子はスピン軌道相互作用がとても小さいため、電子状態はスピン偏極していません。一方、本成果で明らかにしたように

Sn 単原子膜は大きくスピン偏極した電子状態をもつことからスピントロニクス材料として使えます。また、スピン偏極電子状態を大気から守るための保護膜としてグラフェンを用いることの有用性も示されました。この方法をこれまで真空中から大気中に取り出すことができなかった様々な物質に適用できる可能性があり、スピントロニクス材料開発の技術革新となることが期待されます。

5. 発表雑誌：

雑誌名：*Physical Review Letters*

論文タイトル：

Coexistence of two types of spin splitting originating from different symmetries

(和題：異なる対称性に由来する二種類のスピン分裂バンドの共存)

著者：Koichiro Yaji*, Anton Visikovskiy, Takushi Iimori, Kenta Kuroda, Shingo Hayashi, Takashi Kajiwara, Satoru Tanaka, Fumio Komori*, Shik Shin (*責任著者)

6. 問い合わせ先

【研究内容について】

東京大学物性研究所 極限コヒーレント光科学研究センター 軌道放射物性研究施設

助教 矢治 光一郎 (やじ こういちろう)

TEL：04-7136-3403/FAX: 04-7136-3283

E-mail：yaji@issp.u-tokyo.ac.jp

東京大学物性研究所 ナノスケール物性研究部門

教授 小森 文夫 (こもり ふみお)

TEL：04-7136-3310

E-mail：komori@issp.u-tokyo.ac.jp

九州大学大学院工学研究院エネルギー量子工学部門

教授 田中 悟 (たなか さとる)

TEL：092-802-3535

E-mail：stanaka@nucl.kyushu-u.ac.jp

【報道に関すること】

東京大学物性研究所 広報室

TEL：04-7136-3207

E-mail：press@issp.u-tokyo.ac.jp

九州大学 広報室

TEL：092-802-2130 FAX：092-802-2139

E-mail：koho@jimukyushu-u.ac.jp

7. 用語解説：

(注1) グラフェン

一原子層の炭素原子がシート上に並んだ物質のこと。グラフェンが多数重なったものがグラファイト（黒鉛）である。

(注2) スピン偏極

電子がもつマイクロな磁石としての性質をスピンと呼びます。スピンには向きがあり、さまざまな向きをとることができます。そしてある電子がもつスピンの向きに偏りがある場合、その電子はスピン偏極しているといえます。

(注3) 真空、超高真空

真空とは大気中に比べて十分に圧力が低い（つまり気体分子の密度が十分少ない）状態をいいます。通常、固体表面のスピン偏極電子状態が安定して存在するためには大気圧の一兆分の一程度の圧力である超高真空と呼ばれる環境を必要とします。これは宇宙空間とほぼ同じ真空度です。実験室では真空ポンプを用いることでこのような真空状態を作り出すことができます。

(注4) スピン軌道相互作用

電子の軌道角運動量とスピン角運動量との相互作用のこと。このスピン軌道相互作用によりバラバラだったスピンの向きを、運動方向に依存した特定の方向に揃えることができます。また、重い元素（原子番号が大きい）ほど、スピン軌道相互作用の大きさが強くなることが知られています。

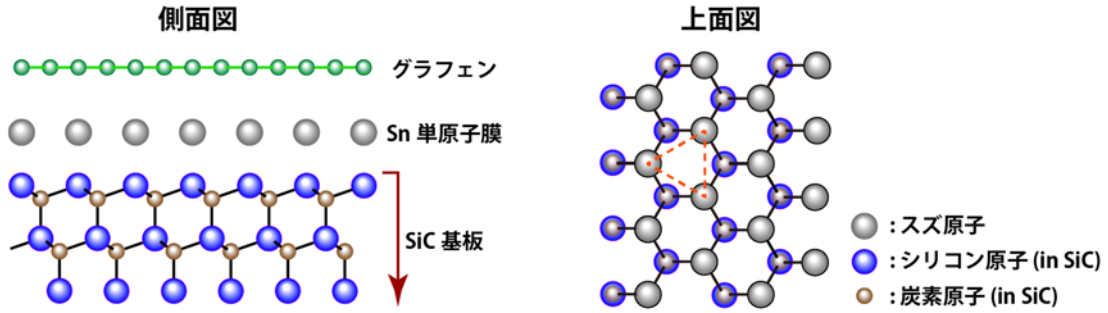
(注5) インターカレーション

ある原子面と原子面の間に他の原子層が入り込むこと。

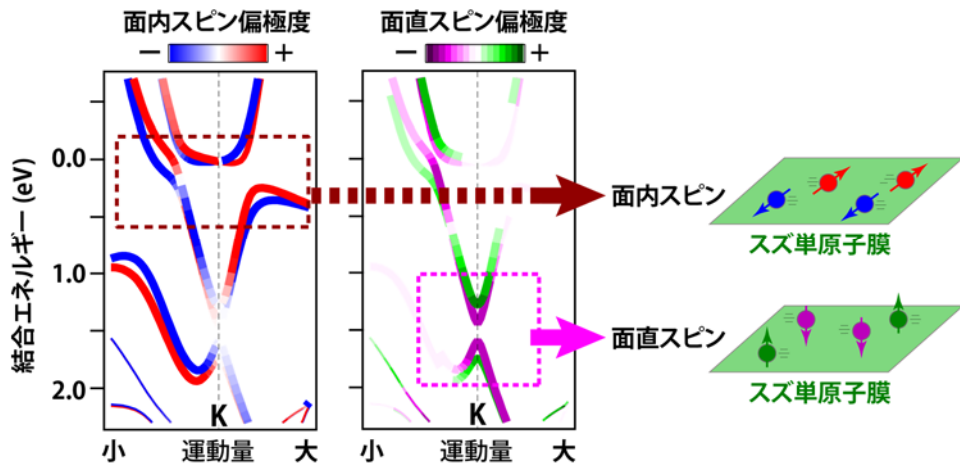
(注6) 三次元スピン・角度分解光電子分光

物質に光を照射すると、光電効果により物質中の電子は物質外に放出されます。放出された電子を分析すれば、その電子が物質中でどのようにふるまうかを知ることができます。通常の角度分解光電子分光法では、電子のエネルギーと運動量だけを分析しますが、スピン分解光電子分光法では、さらに電子のスピンも分析します。三次元スピン分解光電子分光法では、スピンの向きを三次元的に観測することができ、スピンが空間的にどちらを向いているかを精密に決めることができます。東京大学物性研究所で開発された世界最高性能の三次元スピン・角度分解光電子分光装置は国内外の研究グループに広く開放されており、世界最先端の電子スピン物性研究を展開しています。

8. 添付資料



(図1) グラフェンでカバーされたシリコンカーバイド (SiC) 基板上的スズ (Sn) 単原子膜の側面図 (左) と上面図 (右)。上面図ではグラフェン層を省略している。Sn 原子は SiC 基板上で三角格子 (上面図中の点線) を形成している。



(図2) Sn 単原子膜の電子のエネルギーバンド構造。結合エネルギー1.5eV 付近には面に垂直なスピンをもつ電子、茶色 (左上) の点線内の結合エネルギー0~0.5eV 付近には面内を向いたスピンをもつ電子がいる。