

グラフェンの従兄弟（スタネン）の創製に世界で初めて成功！ ～室温下でのスピントロニクス、トポロジカル超伝導体の実現に向けて～

名古屋大学大学院工学研究科の柚原 淳司准教授らの研究グループは、あいちシンクロトロン光センターの仲武 昌史博士、エクス-マルセイユ大学（仏）の Guy Le Lay 教授、バスク大学（西）の Lede Xian 博士、マックスプランク研究所（独）の Angel Rubio 教授との日仏西独の国際共同研究で、原子スケールでの界面化学反応性^{注1} や物理的な界面歪みを制御することで、広域にわたり結晶性の高い 2 次元ハニカムシート構造^{注2} の創製に世界で初めて成功しました。

最近、注目を浴びているポストグラフェン材料^{注3} には、グラフェンの結晶構造であるハニカム格子は維持したままで構成元素を炭素から、より重い元素（シリコン、ゲルマニウム、スズ）に置き換えたシリセン、ゲルマネン、スタネンなどがあります。今回、研究グループでは、世界で初めてグラフェンのように原子スケールでバックリング（凹凸）していなく、かつ、数百 nm の広域にわたり結晶性の高いスタネンの創製に成功しました。構成元素は質量数が多いほど、スピン軌道相互作用^{注4} が強く、特に、スタネンは、冷やすことなく室温で 2 次元量子スピンホール効果^{注5} やトポロジカルな超伝導^{注6} など様々な応用が見込まれています。今後は、創製したスタネンを半導体基板上への転写し、室温下でのスピントロニクス^{注7} やトポロジカル超伝導体への応用が期待されます。

本研究成果は、平成 30 年 1 月 5 日付（日本時間）英国物理学会科学誌「*2D Materials*」電子版に掲載されました。

【ポイント】

- 原子スケールで界面反応性や界面歪みを制御し、数百ナノメートルの広域にわたり結晶性の高いスタネンの創製に成功
- ポストグラフェン材料として、シリセン、ゲルマネン、スタネンなどがあるが、原子レベルでバックリング（凸凹）していない二次元スタネンの創製に初めて成功
- スタネンは構成元素であるスズが重い元素であることからスピン軌道相互作用が強く、室温での2次元量子スピンホール効果やトポロジカルな超電導体など様々な応用に期待

【研究背景と内容】

炭素の2次元結晶であるグラフェンは、電氣的、熱的、機械的強度の観点から、極めて魅力的な材料です。2004年に単層グラフェンの分離に成功して以来、研究・開発競争が世界各国で起こり、現在では年間27000本を超える学術論文が発表されています。

最近、注目を浴びているポストグラフェン物質には、グラフェンの結晶構造であるハニカム格子は維持したままで、構成元素を炭素から、より重い元素（シリコン、ゲルマニウム、スズ）に置き換えたシリセン、ゲルマネン、スタネンなどがありますが、グラフェンのように原子スケールでバックリング（凸凹）していないハニカム格子は発見されていませんでした。

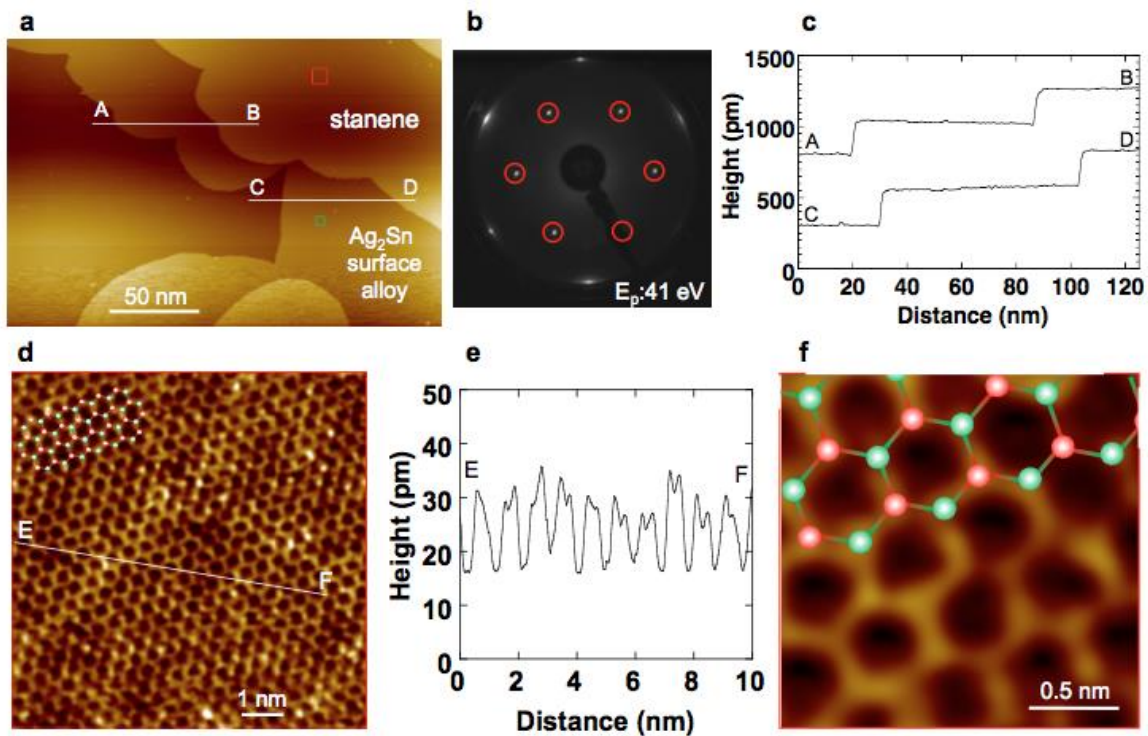


図1 (a) Ag₂Sn 表面合金上に創製したスタネンの広域にわたるトンネル顕微鏡 (STM) 像。広い範囲にわたり二次元スタネンが成長していることがわかる。(b) スタネンの低エネルギー電子回折パターン。スポット強度が高く、スタネンの結晶性が高いことを示す。(c) (a)の STM 像の断面図。ステップ高さが 250pm 程度であることから、スタネンが原子 1 層の厚みであることがわかる。(1pm = 10⁻¹² m) (d)スタネンの STM 像。スズ原子からなるハニカム格子が規則正しく並んでいることが詳細に観察できる。(e) (d)の STM 像の断面図。スズ原子の高さ分布が測定限界以下の 5pm 以下であることがわかる。(f) スタネンの高分解能 STM 像と原子配置モデル。

3年前にフランスで開催された2015年表面科学国際シンポジウムにて、シリセン及びゲルマネンを創製した開発グループリーダーであるエクス-マルセイユ大学のGuy Le Lay 名誉教授から、本学の柚原 淳司准教授にスタネン創製のための国際共同研究の打診があり、本研究はスタートしました。実験は、名古屋大学とあいちシンクロトン光センターにて行われ、計算機シミュレーションは、バスク大学のLede Xian 博士と Angel Rubio 教授により行われました。開発にあたり、Guy Le Lay 名誉教授には、名古屋大学に何度も来日していただきました。2年半にわたり悪戦苦闘した結果、最終的に、スタネン作製において下地基板との原子スケールでの界面化学反応性及び物理的な界面歪みを制御することで、世界で初めて原子スケールでバックリングしていない二次元スタネンの創製に成功しました（図1）。

理論的研究により、グラフェンの炭素をスズで置き換えたスタネンは、比較的大きなスピン軌道相互作用を持つため、物質内部で金属ではなく半導体的な性質となりやすく、一方で、表面や端面等のエッジ部分のみ電子が流れやすい状態が実現できると期待されています。このような物質をトポロジカル絶縁体^{注8}と呼び、現在、ナノテクノロジーの分野で大変注目されています。実際に、このような物質が作製されたかどうかは、試料端面にて量子スピンホール効果を測定することが必要とされています。

【成果の意義】

今回、世界で初めて原子スケールでバックリングしていない二次元スタネンの創製に成功しました。構成元素は質量数が大きいほどスピン軌道相互作用が強く、特に、スタネンは冷やすことなく室温で2次元量子スピンホール効果やトポロジカルな超伝導など、様々な応用が見込まれています。今後は、創製したスタネンを半導体基板上へ転写し、室温下でのスピントロニクスやトポロジカル超伝導体への応用が期待されます。スピントロニクスとは、電子が持つ電荷とスピンの両方の性質を利用した新しい概念のエレクトロニクスのことで、現在、大変注目されています。トポロジカル超伝導体は、上述のトポロジカル絶縁体との類似で、物質内部で超伝導ギャップを持ちながら、表面や端面等のエッジ部分でマヨナラ粒子^{注9}と呼ばれる変わり種の粒子が現れることが予言されている物質です。

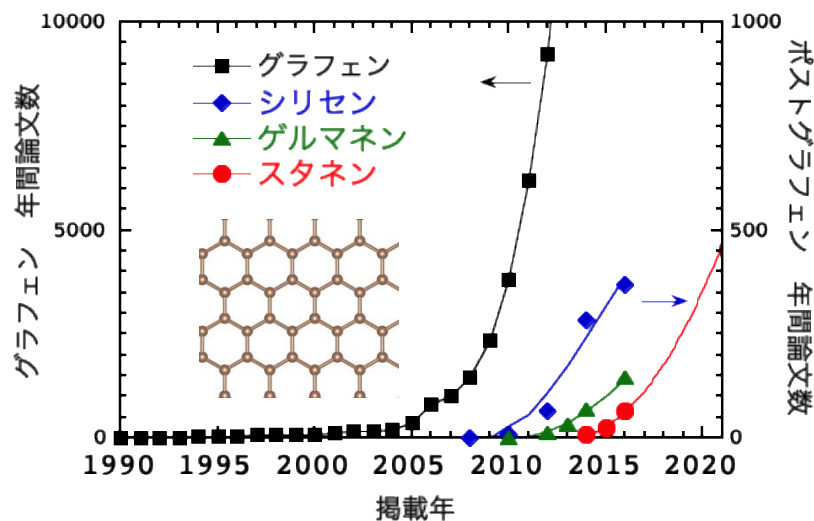


図2 グラフェンおよびポストグラフェンの論文数（引用元 Web of Science）

2017. 12. 24 現在

図2に示すように、グラフェンの論文数は2010年のノーベル物理学賞受賞後、劇的に増加しています。ポストグラフェンの研究は、2012年にシリセンの合成に関する実験的論文が発表されて以来、世界各国で精力的に研究が行われています。スタネンの研究に関しては理論研究がほとんどであり、実験研究はわずか2件にすぎません。グラフェンと同じ二次元ハニカム構造を形成するポストグラフェン材料の合成に関しては、シリセン、ゲルマネン、スタネンを含めて本研究が世界で初めての研究成果です。

英国物理学会科学誌「*2D Materials*」の編集委員会での協議の結果、非常に注目に値する研究発表とのことでゴールドオープンアクセスの掲載料（£1700/\$2700/€1950）は全額免除に認定されることとなりました。

また、英国物理学会出版局の Institute of Physics (IOP) Publications が運営するナノテクノロジー専門ポータルサイト「Nanotechweb」の「Latest Technology Update」に2018年1月5日付（日本時間）で表記の記事が掲載されました。

【用語説明】

注1) 界面化学反応性：材料基板と薄膜の界面での異種元素間の化学反応性

注2) 2次元ハニカムシート構造：下図に示すように、原子が蜂の巣（ハニカム）格子状に配列し、その大きさは数十ナノメートル以上にわたり、かつ、その厚みが1原子層の厚みをもつ構造のこと。

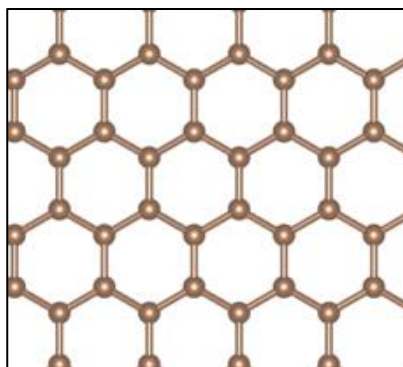


図3 次元ハニカムシート構造模式図：それぞれの丸点に原子が1つずつ存在する

注3) ポストグラフェン材料：グラフェンは電気伝導率が非常に高く、機械的強度、化学的安定性に大変すぐれた物質であるが、バンドギャップの形成が困難であるため、エレクトロニクスへの応用が困難とされている。ここでいうバンドギャップとは、電子が自由に動ける伝導帯と電子が動けない価電子帯のエネルギーギャップのことである。そこで、グラフェンを構成している炭素をシリコン (Si)、ゲルマニウム (Ge)、スズ (Sn) で置き換えたシリセン、ゲルマネン、スタネンなどと呼ばれるポストグラフェン材料が、最近、注目を集めている。

注4) スピン軌道相互作用：電子が原子核のまわりに束縛されているとき、電子が原子核との相互作用により電子エネルギー準位が分裂すること。原子番号が大きい原子ほど原子核の陽子数が大きくなるため、エネルギー準位が大きく分裂する。

- 注5) 量子スピンホール効果：電流を流すと電流と垂直な方向に電子スピンの偏りが生じ、スピンの偏極した端面でスピンホール流の伝導度が量子化されること。
- 注6) トポロジカルな超伝導体：後述のトポロジカル絶縁体との類似で、物質内部で超伝導ギャップを持ちながら、表面や端面等のエッジ部分で（マヨナラ粒子^{注9)}）が現れることが予言されている物質
- 注7) スピントロニクス：電子が持つ電荷とスピンの両方の性質を利用した新しい概念のエレクトロニクス
- 注8) トポロジカル絶縁体：物質の内部は絶縁体でありながら、物質の表面や界面に金属状態が生じている物質のことである。
- 注9) マヨナラ粒子：例えば、電子の反粒子として陽電子が存在し、電子と陽電子は異なる粒子である。マヨナラ粒子とは、粒子と反粒子の区別がつかない粒子であり、今から 80 年前に科学者マヨナラが予言した粒子である。マヨナラ粒子を利用した新しい概念の量子コンピュータが提案されており、専門家の中で大変注目を集めている。

【特記事項】

雑誌名：2D Materials

題目：Large Area Planar Stanene Epitaxially Grown on Ag(111)

著者名：Junji Yuhara, Yuya Fujii, Kazuki Nishino, Naoki Isobe, Masashi Nakatake, Lede Xian, Angel Rubio, Guy Le Lay

DOI：<https://doi.org/10.1088/2053-1583/aa9ea0>

なお、本研究は、JSPS 科研費 15H03677、22560022、名古屋大学シンクロトロン光研究センター利用支援制度の一環として行われ、名古屋大学工学研究科曾田 一雄教授、あいちシンクロトロン光センターの渡辺 義夫氏、野崎 彰子氏の協力を得て行われました。