先端研究

炭素膜グラフェンと金はどのように電子の手をつなぐか？

―金原子の配置でグラフェンとの化学結合を操作して省エネ集積回路の実現へ―

課題
「グラフェン」と「金」の化学結合の境目：スピントロニクス素子などへの応用が期待される
「グラフェン」と「金」：限られた条件でしか化学結合をしない ← メカニズムは不明だった

成果
「グラフェン」と「金」の化学結合に重要な事項を解明
・「金」表面の凹凸構造の周期長
・「グラフェン」と「金」の結晶の向き

今回の研究の背景

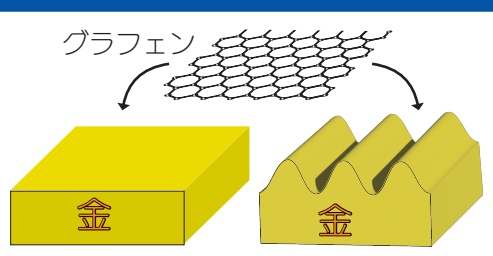
化学的に安定 グラフェン ＋ 金 化学的に安定

２つの物質の組み合わせで、
今よりもっとすごい「情報の伝達」ができる可能性
それが「スピントロニクス」

そのためには
「グラフェン」と「金」が「化学結合」をする必要性

安定な物質同士だが、特定の条件下で「化学結合」する
しかし… 化学結合のメカニズムは不明 結合条件？ 結合様式？

今回の研究で分かったこと



「金」：様々な表面構造がある
平坦な表面 / 凹凸の表面 ）今回の実験では この２種類を選択

それぞれの金の表面で
グラフェンを作製

「グラフェン」と「金」の「化学結合」の条件を調査
測定には紫外線を使用

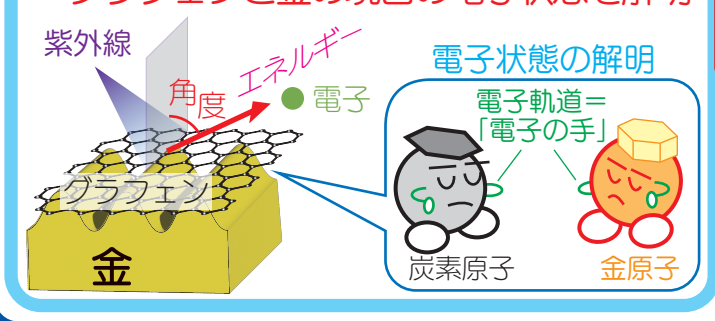
新発見
化学結合の
メカニズム解明

金の凹凸構造の周期や
グラフェンと金の結晶の向きが
グラフェンと金の化学結合に重要

さらに詳しく

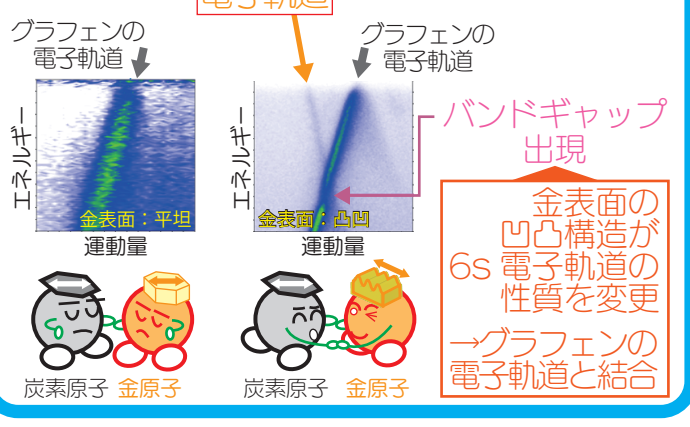
角度分解光電子分光法

紫外線で電子の状態を調べる手法
紫外線照射 （略称：ARPES）
→飛び出す電子のエネルギーと角度を解析
→結合に関わる電子の軌道を決定
→グラフェンと金の境目の電子状態を解明



ARPES 測定結果

直接観測：本研究が初
金の凹凸構造による
電子軌道



金表面の
凹凸構造が
6s 電子軌道の
性質を変更
→グラフェンの
電子軌道と結合

今回の新発見

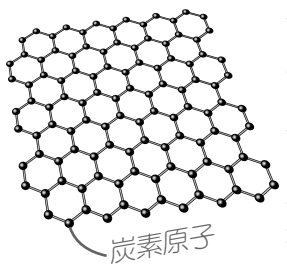
金の凹凸構造の周期や
グラフェンと金の結晶の向きで
化学結合を操作できる

想定される活用例 次世代省エネルギー集積回路等への応用展開において重要な知見に

補　足　説　明

グラフェンとは？

炭素原子が六角形に結びついた
原子１個分の厚さのシート

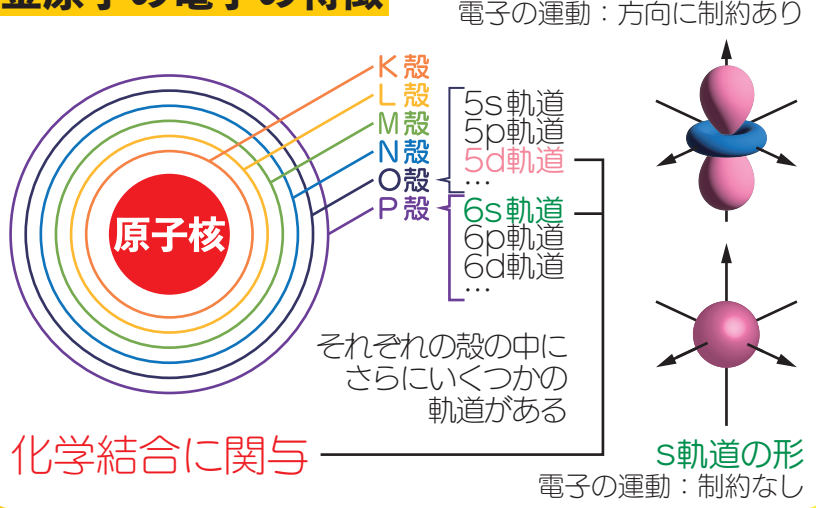


構成元素：炭素のみ！
厚さ：原子１個分！（単原子膜）
構造：六角形の結合が
シート状に並ぶ

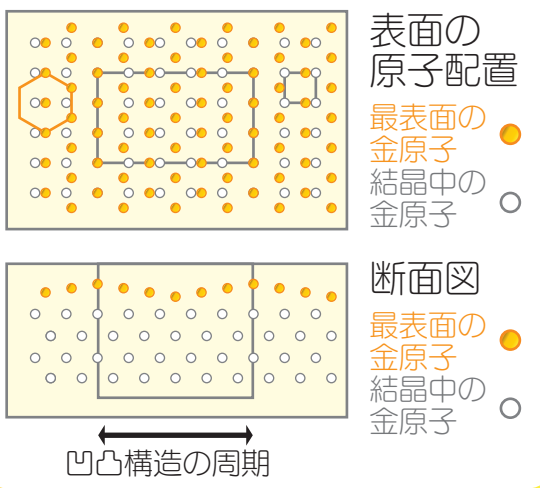
化学的に安定
薄い、軽い、強い！
高い電気伝導性！
高耐熱性！　高耐久性！

エレクトロニクス材料として期待！

金原子の電子の特徴



金の結晶表面の凹凸構造



スピントロニクス材料としてのグラフェン

スピントロニクス材料にはスピンの偏りが必要（スピン偏極）

グラフェンには
スピンの偏りがない

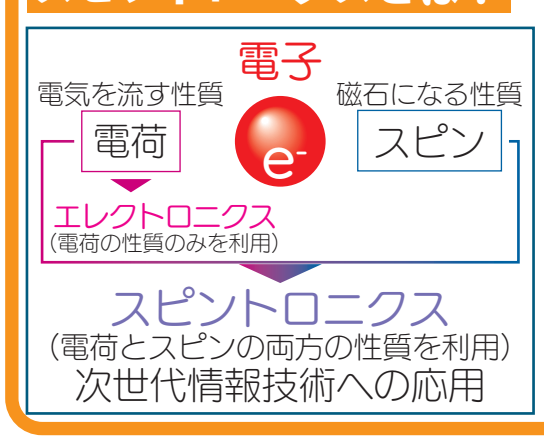
金の表面には
スピンの偏りがある

外からスピンの偏りを導入する必要性

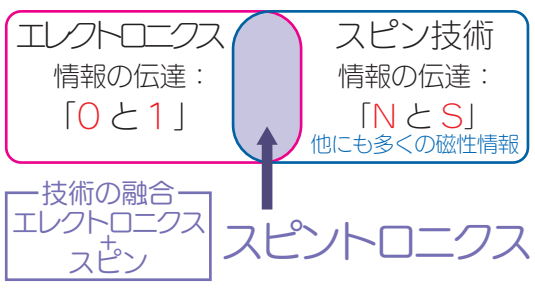
「化学結合」で、金からグラフェンにスピンの偏りを導入できる可能性

「グラフェンと金の境目」が新たなスピントロニクス素子に！

スピントロニクスとは？



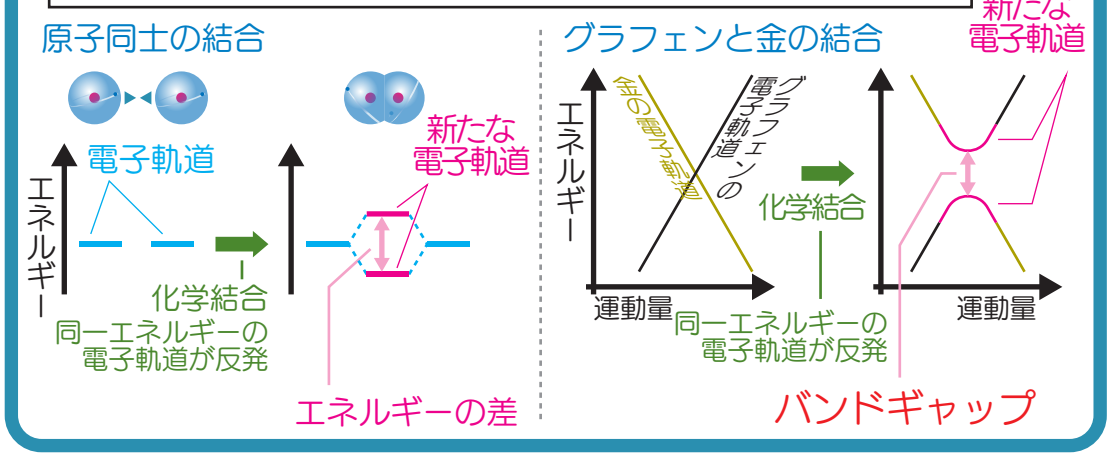
例：半導体技術



電子１個当たりの情報量が倍以上に！
情報の高密度化・計算の高速化
情報の不揮発化等による省電力化 etc...

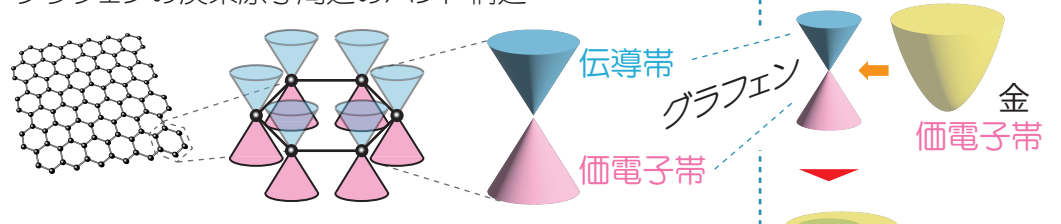
バンドギャップとは？

バンドギャップ
電子が存在することのできないエネルギー領域
化学結合で新たな電子軌道ができる際にも形成される



グラフェンの電子のバンド構造

グラフェンの炭素原子周辺のバンド構造



結合	模式図	バンド構造
結合なし	グラフェン / 金	← バンドギャップなし
結合あり	グラフェン / 金	グラフェンと金が結合 → 価電子帯の中に バンドギャップ形成

グラフェンとの結合と各軌道の特徴

6s 軌道との結合
スピンが偏る（スピン偏極）
グラフェンがスピンを保持しやすい
スピントロニクス材料として機能する可能性

5d 軌道との結合
グラフェンがスピンを保持しにくい
スピントロニクス材料にはなりにくい

なので、「グラフェンと金」の化学結合は
6s 軌道との結合が望ましい

グラフェンとの結合における各軌道の詳細

6s軌道

電子軌道が自由電子に近い
グラフェンの直線的な電子軌道は
バンドギャップ付近まで保たれる
グラフェンの持つ
「スピンを保持しやすい性質」と
スピン偏極とを両立
エネルギー消費がほぼないスピン流を
情報の伝達に使用可能
省エネルギー集積回路の実現へ

5d軌道

電子軌道は局在性が強い
グラフェンの直線的な電子軌道は
バンドギャップ付近で保たれない
グラフェンの持つ
「スピンを保持しやすい性質」は
損なわれる