

## ツイスト積層グラフェンの電子構造設計へむけて — 原子層の電界遮蔽効果

[1] 要旨: 二枚のグラフェンを積層してできるツイスト積層グラフェンは超伝導や絶縁体化の発現で近年注目されている。こうした系はゲート電圧で電子密度を変えられるが、このゲート電場の各層での遮蔽の様子はあまりよくわかっていなかった。本研究は、2層グラフェンの結晶軸をわずかに(5度程度)ずらして積層したツイストグラフェン素子を用いた低温磁場中輸送現象測定により、電場の遮蔽効果を明らかにした。遮蔽長は、ABスタックグラフェンのものよりもわずかに長い可能性があり、膜面方向の波動関数の広がりの違いを表していると思われる。

[2] 本文: 2010年にA. Geimらが、黒鉛から原子一層分のグラフェンを発見しノーベル賞を受賞してから久しいが、最近、グラフェンを人工積層したツイスト積層グラフェン(以下ツイストグラフェン)が注目を集めている。こうしたツイストグラフェンでは、超伝導があらわれたり、絶縁体になったりと極めて面白い性質が次々に発見されている。この系では、電子構造が化学結合よらず積層によって、自由に従来の物質とはまったく異なる「人工物質」を作ることができる。積層した原子層の電子構造の設計で問題になるのは、電子密度を変えるために印加するゲート電圧の効果である。一般に導体に電界をかけると、電子が導体の中を移動し表面にたまるため内部には電界が現れない。これは、静電遮蔽という現象であり高校の物理で習う。さて、ここで、この導体が原子数層からなるグラフェンだったらどうなるだろうか?数層のグラフェンに電場をかけたとき、一番表面の層だけに電子がたまるのだろうか?あるいは全体に一樣にたまるのだろうか?こうしたことは、グラフェンの母体結晶である黒鉛(グラファイト)の関連物質でも、じつは古くから議論されてきたのであるが、これまで一層ごとに電場が遮蔽される様子を、明確に観測することは困難であった。このような遮蔽の様子を明らかにすることは、原子層デバイスが動作中の電子状態を設計、解析に不可欠である。

最近、広島大学大学院先進理工系科学研究科と物質・材料研究機構のメンバーを中心とする研究グループは、2層グラフェンを人工的に積層して作られる、ツイスト2層—2層グラフェンを用いてこの問題について初めて輸送現象の観点から微視的に明らかにした。この成果は、JPSJの2021年12月号に掲載された。

ツイストグラフェンは以下のように作られる(図1)。粘着テープでグラファイトからへきかいして作った2層グラフェンを、原子層転写技術を用いて二つに分割し、それぞれの2層グラフェンの結晶角を5度ほどずらして人工的に積層し、原子平坦な六方晶窒化ホウ素のうす膜で挟む。この—ツイスト2層—2層グラフェン素子における電気抵抗の磁場に対する依存性が測定された。低温で磁場の変化に対して現れる磁気量子振動を詳しく調べたところ、上の層、下の層のそれぞれの2層グラフェンの電子密度が等しくないことが観測され、これによって原子層程度の厚みにおける電場の遮蔽の様子が明らかになった。さらに、この

結果を同グループが以前に行った、同じ4層であるが天然に存在する結晶構造（AB積層）の場合の結果と比較したところ、ツイスト2層—2層グラフェンの遮蔽長の方が長い可能性があることがわかった。こうした違いは、層方向に伸びる量子力学的波動関数が、ツイスト2層—2層グラフェンでは、それぞれの2層グラフェンにとどまっているが、AB積層グラフェンでは4層にわたって広がっているという違いから生じている可能性がある。

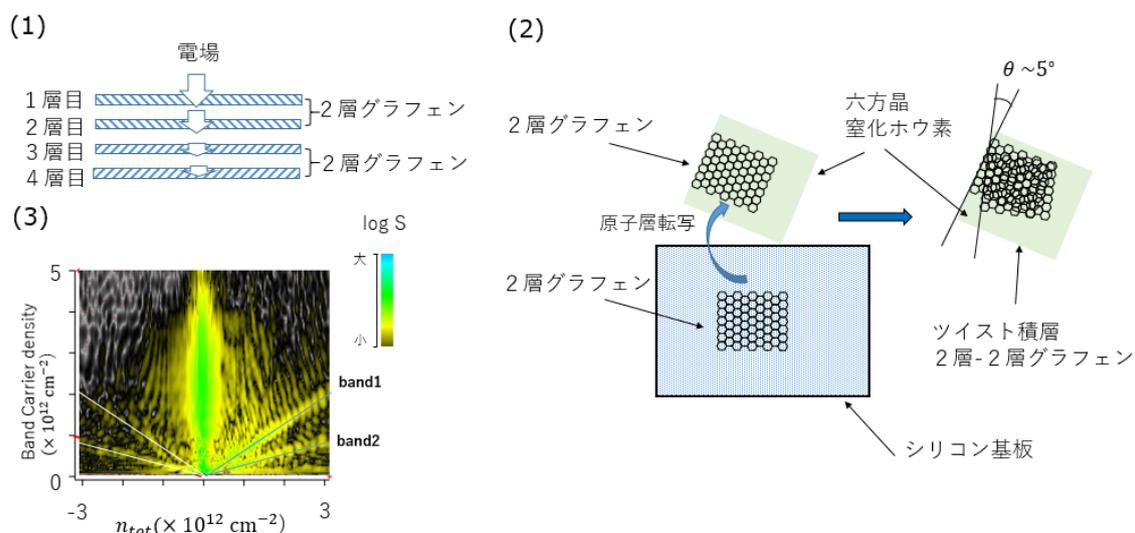


図1 ツイスト積層グラフェン (1) 接地されたツイストグラフェンにおける電場の遮蔽の様子の概念図。(2) ツイストグラフェンの作り方。(3)磁気量子振動の解析結果。全キャリア密度( $n_{tot}$ )に対する、上層と下層の2層グラフェンのキャリア密度依存性を表す。Sは磁気量子振動のフーリエスペクトルの大きさ。

この研究結果は、ツイストグラフェンを用いて電子バンド構造を自由に設計・制御することに役立つため、新しい原理に基づくトランジスタ素子（バレーバルブ）や、太陽電池などの実現につながる可能性がある。炭素でできているダイヤモンドは宝石界のクイーン、カーボンファイバーはスポーツ界のキーアイテムになっている。さて、グラフェンはエレクトロニクス界を変革できるだろうか。今後の発展に期待したい。

原論文(11月2日公開済)

### [On Dielectric Screening in Twisted Double Bilayer Graphene](#)

Fumiya Mukai, Kota Horii, Nazuna Hata, Ryoya Ebisuoka, Kenji Watanabe, Takashi Taniguchi and Ryuta Yagi, J. Phys. Soc. Jpn. **90**, 124702 (2021).

<情報提供 八木隆多（広島大学大学院先進理工系科学研究科）>