

グラフェンをトポロジカル絶縁体に

ナノスケール物性研究部門 春山 純志*1、中村 壮智、勝本 信吾

1 はじめに

21 世紀に入って物性物理学の世界で脚光を浴びたものに、グラフェンを始めとする 2 次元物質群と固体中のトポロジー概念がある。これらは無関係ではなく、前世紀、甲元によって初めて明確に認識された量子ホール効果におけるトポロジー概念[1]を、グラフェンのようなハニカム 2 次元格子にスピン軌道相互作用 (SOI) を仮想的に導入することで、類似のトポロジー数が有限の 2 次元系が出現することを示した Kane-Mele の仕事がトポロジカル絶縁体 (TI) の研究に火をつけたといえることができる[2]。しかし、実際のグラフェンでは構成原子が炭素原子という軽原子であり、格子が完全に 2 次元であることから、SOI は極めて弱く、到底 TI にはなり得なかった。2 次元 TI は最初と考えられたものとはかなり異なる形で実証され[3]、その後 3 次元系で様々な TI が見出された[4]。しかし、当初予想されたような形、グラフェンなどの 2 次元物質に SOI を何らかの形で導入して TI にする、という試みも続けられた。これは、2 次元物質そのものの電気伝導に基礎・応用の両面から興味を持たれ、SOI を空間変調をもって導入できれば、2 次元物質とトポロジカル絶縁体との界面の物理が大きく広がる期待があったことが動機づけの一つになっている。

グラフェンへの SOI 導入の様々な試みの中で、最初に注目されたのがグラフェン表面を一部水素化して 2 次元系に非対称性を導入するものである。特に注目されたのがシンガポール国立大の報告で[5]、0.05% の水素化で 2.5 meV という大きな SOI ギャップを導入できるとされた。しかし、実験手法の信頼度にやや問題があり、我々のところで同様な水素化法を用い、信頼度のより高い実験を行ったところ、確かに SOI は導入されるものの、その大きさはかなり小さいことが判明した[6]。

我々のグループでは、その後色々な SOI 導入法を試みたが、最終的に重い元素からなる微粒子 (Bi_2Te_3) をグラフェン表面に分散する、という方法で大きな SOI ギャッ

プを導入し[7]、トポロジカル絶縁体化することに成功した[8]。これらの研究結果について報告する。

2 実験

グラフェン表面の重元素修飾については、多くの理論が提唱されてきた。特にカリフォルニア大 Wu・カリフォルニア工科大 Alicea らのグループでは、被覆率僅か 1% 程度でランダム修飾した重原子からグラフェンにその均一なディラック状態を介して広がるトンネル電流により 200 meV を超える SOI ギャップが導入され、高温まで安定な TI 状態が形成されるとしている[9]。これに触発され、我々のグループでも様々な方法を試したが、グラフェンについては「医療ナノ針」を使う方法が唯一の成功例である*2。

この方法では、まず Bi_2Te_3 の微粒子をアセトン中に分散する。アセトン溶液を、数 10 μm オーダー内径の医療用の針先から手動で直接グラフェン表面に滴下し、この液滴を針先から吸引する。この滴下・吸引を数十回繰り返したのち、400°C で高真空アニールすると、AFM 観察 (図 1(a)) から、滴下・吸引のサイクル数により表面被覆率を再現性良く制御できることがわかった。一見極めて原始的

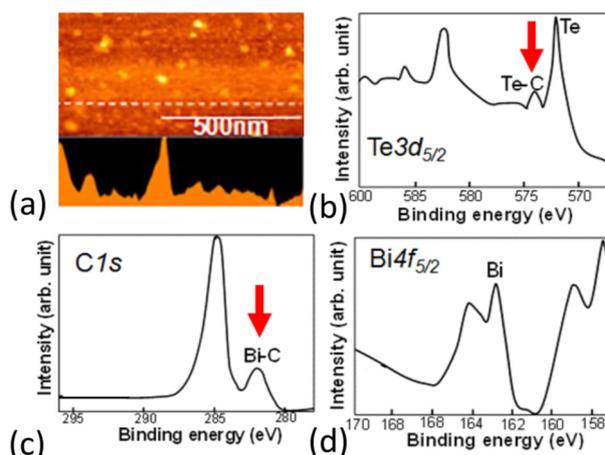


図 1 (a) グラフェン表面に分散した Bi_2Te_3 微粒子の AFM 像。表面被覆率は 3%。(b)~(d) 微粒子修飾したグラフェンの光電子分光スペクトル。

*1 2018 年度客員所員。青山学院大学理工学部。

*2 MoS_2 については、別の方法で類似の結果を得ることができた (論文準備中)。

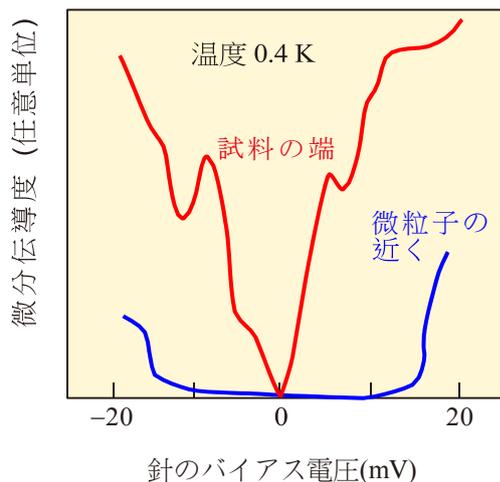


図3 低温 STM を用いて、探針を微粒子の近傍、および試料の端付近に固定し、バイアス電圧に対する微分伝導度(dI/dV) を測定した結果。

図3中の青線に示したように、探針を微粒子の近傍のグラフェン上に停止させて dI/dV を測定すると、[7]で報告した値に近い、20 meV 程度のエネルギーギャップを検出した。これは微粒子から離れると小さくなる傾向を見せている。そして、試料の端付近では、赤線で示したようにはっきりギャップが閉じていることがわかる。これらはすべて、グラフェンに SOI によるエネルギーギャップが導入されて QSH が発現し、ヘリカル端状態が生じているとして説明されるものである。

4 今後の課題

以上、散々様々な方法を試した結果、意外なことに大変原始的な方法でようやくグラフェンを TI 状態にすることができた。当然ながら、非常に乱雑性が大きく、量子ホール効果状態で局在ポテンシャルの周りに沢山の端状態が生じているのと同様、試料の端だけではなく、微粒子の周りなどに沢山のヘリカル端状態が生じていると考えられる。何とか、より洗練された、一様性の良い手法を開発したいと考えている。

また、冒頭に述べたように、試料を部分的に TI 状態にして界面効果を見る、超伝導近接効果を加えてトポロジカル超伝導状態を探す、更に、我々の得意とするところであるナノメッシュによる強磁性体化[11]を施し、異常 QSH 効果を調べる、など、非常に多くの課題が考えられ、胸躍る日々を送らせていただいている。

本研究は、新学術領域研究ナノスピン変換科学—電氣的スピン変換の援助を受けて行われた。

参考文献

[1] M. Kohmoto, *Ann. Phys.* **160**, 343 (1985).
 [2] C. L. Kane and E. J. Mele, *Phys. Rev. Lett.* **95**, 226801 (2005).
 [3] M. König *et al.*, *Science* **318**, 766 (2007).
 [4] Y. Ando, *J. Phys. Soc. Jpn.* **82**, 102001 (2013).
 [5] J. Balakrishnan *et al.*, *Nat. Phys.* **9**, 284 (2013).
 [6] T. Nakamura, J. Haruyama, and S. Katsumoto, *J. Phys. Soc. Jpn.* **85**, 105002 (2016).
 [7] T. Namba *et al.*, *Appl. Phys. Lett.* **113**, 053106(2018).
 [8] E. Hatsuda *et al.*, *Sci. Adv.* **4**, eaau6915 (2018).
 [9] J. Hu, J. Alicea, R. Wu, and M. Franz, *Phys. Rev. Lett.* **109**, 266801 (2012).
 [10] M. Büttiker, *Phys. Rev. Lett.* **57**, 1761 (1986).
 [11] T. Shimizu *et al.*, *Nat. Nanotech.* **6**, 45 (2011).