

# 研究紹介: グラフェン上の2次元電子が示す不思議な性質の解明

安藤恒也

## [1] グラフェンと関連物質

層状物質であるグラファイトの1原子層からなるグラフェンでは、フェルミエネルギー付近のK点とK'点付近の電子状態は波数の1次に比例する分散をもつ。ここでは電子の速度が運動量に依らず一定な円錐状の分散を持ち、グラフェンの電子は決して止まらずに、光のように常に同じ速さで動く。このグラフェンを作製したGeimとNovoselovに2010年ノーベル物理学賞が与えられた。筆者は、カーボンナノチューブの出発点としてのグラフェンの電子物性の特異性に着目し、以前からその理論的研究を進めていた。

電子の運動方程式はディラック点にトポロジカル特異点をもつ。実際、波数を原点のまわりで回転すると、ベリーの位相により波動関数の符号が反転する。一方、原点を含まないように回転すると、波動関数の符号は変化せずもとのままである。この特異性は金属ナノチューブで不純物散乱による後方散乱が禁止される完全導体性を引き起こす。また、グラフェンの反磁性帯磁率がデルタ関数となる特異性とも関係している。筆者は、特異反磁性の起源を解明し[1]、それに付随したさまざまな現象を予言した。

2012年4月から2014年3月まで、筆者は日本物理学会のJPSJの編集委員長となり、ほとんど研究を進めることができなかつた。終了後、ディラック電子のカイラル特異性に関連した新しい現象の予言とバレートロニクスについての研究を開始した。グラフェンでは二つの谷K点とK'点の電子は異なるカイラリティを持つ。そのため、一般に電子の運動はK点とK'点で異なる。それを利用することで谷分極を引き起こすことができる。例えば、1層と2層の境界の透過率はK点とK'点でその入射方向依存性が大きく異なることがすでに理論的に示されている[2]。

また、電場で加速したときには、電子は電場と垂直方向にも運動し、ホール電流が発生する。ホール電流の方向はK点とK'点で逆であるために、谷ホール効果と呼ばれる。谷分極が無ければ、通常のホール測定では観測されないが、非局所抵抗の測定等で観測される。この谷ホール伝導率は、散乱体がないとして計算した値に比べて、散乱体があるとしてその強度をゼロとした極限の値が数倍以上に増大することを、最近の理論で示した[3, 4]。ディラック電子系と他のバンドが共存する系として、強いラシュバ型のスピン-軌道相互作用を持つ2次元系がある。その系では、バンド間相互作用があっても反磁性の異常は残るが、ホール効果などの電気伝導現象はバンド間相互作用で結果が大きな影響を受けることを理論的に示した[5, 6]。

このようなグラフェンにおける谷依存物理現象を更に追求し、新しい2次元物質として発展しつつある原子層物質、あるいはトポロジカル絶縁体へと展開することを目標とする。これにより、スピントロニクスに対応したバレートロニクスの研究発展と、量子ホール効果とトポロジカル不変量の研究から始まった、固体物理学におけるトポロジーの役割に関する研究の発展へ、貢献することを目指す。

## [2] つぶれたカーボンナノチューブ

太いカーボンナノチューブは、円筒状に比べ、つぶれた状態が安定となる。つぶれた部分は2層グラフェンであるため、グラフェン研究と密接に関係している。これまで、その電子状態[7, 8]や反磁性帯磁率[9]について理論的な研究を行ってきた。更なる理解に向けて、さまざまな物理量を計算し、実験の理解に寄与したい。

## 引用文献

- [1] Anomalous orbital magnetism in Dirac-electron systems: Role of pseudo-spin paramagnetism, M. Koshino and T. Ando, *Phys. Rev. B* **81**, 195431 (2010).
- [2] Transmission through a boundary between monolayer and bilayer graphene, T. Nakanishi, M. Koshino, and T. Ando, *Phys. Rev. B* **82**, 125428 (2010).
- [3] Theory of valley Hall conductivity in graphene with gap, T. Ando, *J. Phys. Soc. Jpn.* **84**, 114705 (2015).
- [4] Theory of valley Hall conductivity in bilayer graphene, T. Ando, *J. Phys. Soc. Jpn.* **84**, 114704 (2015).
- [5] Theory of Hall effect in two-dimensional giant Rashba systems, H. Suzuura and T. Ando, *Phys. Rev. B* **94**, 035302 (2016).
- [6] Theory of magnetic response in two-dimensional giant Rashba systems, H. Suzuura and T. Ando, *Phys. Rev. B* **94**, 085303 (2016).
- [7] Effective-mass theory of collapsed carbon nanotubes, T. Nakanishi and T. Ando, *Phys. Rev. B* **91**, 155420 (2015).
- [8] Boundary conditions at closed edge of bilayer graphene and energy bands of collapsed nanotubes, T. Nakanishi and T. Ando, *Phys. Rev. B* **94**, 155401 (2016).
- [9] Magnetic susceptibility of collapsed carbon nanotubes, T. Ando, *J. Phys. Soc. Jpn.* **86**, 024704 (2017).