

## 無磁場でも現れるグラフェンのホール電流

グラフェンのフェルミ準位付近の電子はニュートリノと同じ Weyl 方程式に従って運動する。この系に基板の効果などによりバンドギャップができると、電子がギャップに比例した有効磁場を受け、無磁場にも関わらず、ホール効果が発生する。誘起されるホール電流はブリュアン域の K 点と K' 点の寄与が互いに逆方向を向いているため、通常のホール測定では観測できないが、非局所抵抗などによりその存在が確認される。最近、この谷ホール伝導率が不純物散乱により大きく増大し、散乱強度の弱い極限が散乱のない場合と全く異なることが理論的に明らかになった。

グラフェンは炭素原子が六角形のハチの巣格子上に並んだ単原子層物質である。有効質量近似あるいは  $k \cdot p$  近似によると、グラフェンのフェルミ準位付近の電子の運動は、質量ゼロの相対論的粒子であるニュートリノと同じ Weyl 方程式で記述される。この方程式はディラック方程式の相対論的極限（静止質量が無視できる）に相当するため、ディラック・フェルミオンあるいはディラック電子とも呼ばれる。この粒子はカイラリティを持つために、通常は単一で存在することができず、必ず異なるカイラリティの粒子と対で存在する。グラフェンの場合、この対は六角形のブリュアン域の頂点 K 点と K' 点付近の状態に対応する。シリコンやゲルマニウムなどの多谷構造半導体の場合と同様に、それらは谷とも呼ばれる。

ハチの巣格子の単位格子に含まれる 2 個の炭素原子を A, B とする。通常、A, B は等価であり、その場合、図 1(a) に示すようにフェルミ・エネルギー付近で円錐状の分散 ( $\varepsilon = \pm \gamma k$ ,  $\varepsilon$  はエネルギー,  $k$  は波数,  $\gamma$  は速度に比例するパラメーター) をもつ。一方、適当な基板の上では、それらが等価ではなくなり、A, B の間にポテンシャル差が生じる。それを  $2\Delta$  とすると、図 1(b) に示すように、 $2|\Delta|$  のギャップが生じる。

この場合に、電子の速度演算子に対する運動方程式を計算すると、通常の相対論的ディラック方程式で現れる Zitterbewegung を表す項と、 $\Delta$  に比例する有効磁場によるローレンツ力を表す項が得られる。前者はバンド間光学遷移を引き起こす。一方、後者のために、電子は、磁場がないのに、サイクロトロン円運動を行う。したがって、電界を印加し電流を流すと、電界と垂直方向にホール電流が流れる。ただし、K 点と K' 点では有効磁場の方向が逆になるため、ホール電流の方向も逆になり、通常のホール効果のように、電流垂直方向にホール電圧が発生することはない。無磁場で発生する K 点と K' 点のホール伝導率を谷ホール伝導率、その現象を谷ホール効果と呼ぶ（トポロジカル・ホール効果と呼ばれることもある）。

ギャップの中のホール伝導率が  $\pm e^2/2h$  に量子化されることは、1984 年の石川健三氏の計算などによりすでに知られていた。散乱体などのない理想的な場合、バンド内ではエネルギーに反比例してホール伝導率が減少することが簡単な計算で分かる。最近、この谷ホール伝導率に対する不純物散乱効果の詳細な理論解析が行われ、日本物理学会が発行する英文誌 Journal of the Physical Society of Japan (JPSJ) の 2015 年 11 月号で報告された。それによると、バンド内での谷ホール伝導率は散乱

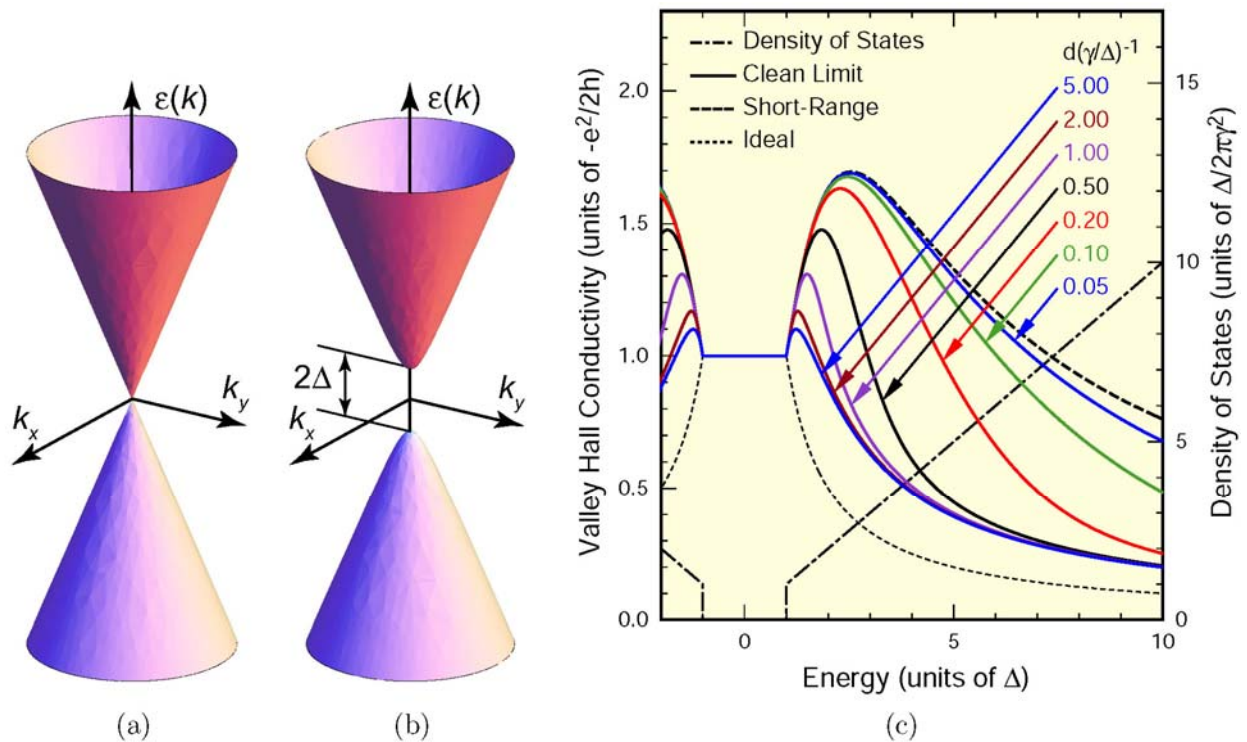


図 1 (a) グラフェンの円錐状の分散関係. (b) 単位格子の A, B 炭素原子の間にポテンシャル差  $2\Delta$ を導入したときの分散関係.  $2|\Delta|$ のギャップが生じる. (c) 到達距離  $d$ のガウス型ポテンシャルを持つ散乱体の場合の弱散乱極限における谷ホール伝導率. ギャップ中では  $e^2/2h$  に量子化される. バンド内では全く散乱体を仮定しない場合 (点線) に比べて大きく増大する.

体の存在により大きく増大し、ギャップ中の  $e^2/2h$  を大幅に上回る最大値をとったのち、緩やかに減少する. さらに、この増大は散乱体の強度あるいは濃度が零の極限でも存在し、散乱体がないと仮定した結果と全く異なっている. もちろん、実際の系には必ず散乱体があるので、散乱体がない場合の結果は正しくない.

図 1(c)は到達距離  $d$ のガウス型ポテンシャルを持つ散乱体の場合に、その散乱強度が小さい極限の谷ホール伝導率である. バンド内ホール伝導率は短距離散乱体の場合に最大で、到達距離の増加に従い減少するが、長距離散乱体の極限でも散乱体がない場合とは大きく異なっている. このように、散乱体が全く存在しない場合と、存在するがその強度をゼロにした場合とで結果が異なるのは、輸送係数ではあり得ることである. たとえば、半導体スピントロニクスで注目されている 2 次元 Rashba 系でのスピン・ホール伝導率はその一例である. スピン・ホール伝導率は散乱体が全くないと仮定するとユニバーサルな非零値となるのに対し、散乱体の存在を仮定すると完全に消失し、それは散乱強度を零にしても変わらない. したがって、Rashba 系ではスピン・ホール伝導率が存在しない.

谷ホール効果は、通常のホール効果の測定方法では観測できない. しかし、スピン・ホール効果が逆スピン・ホール効果により観測できるように、谷ホール効果も非局所抵抗の測定によって観測することができ、その実験結果の例も報告され始めている. 単層グラフェンでは、ほぼ同一の格子定数をもつ BN 基板を用いて小さいギャップを生じさせ、非局所抵抗で谷ホール効果の存在が確認されている. また、2 層グラフェンでは面垂直方向の電界でギャップを発生させ、非局所抵抗が観

測されている。もちろん、何らかの方法で  $K$  点と  $K'$  点の電子密度が異なる谷分極を引き起こすことができれば、谷ホール伝導率をホール測定で直接観測することも可能である。実際、新しい原子層物質である  $\text{MoS}_2$  では、光により谷分極を引き起こすことにより、谷ホール効果が観測されている。

谷ホール効果はグラフェン特有の興味深い物性と密接に関係している。たとえば、後方散乱の消失や Klein トンネル効果を引き起こす非自明なベリー位相、ベリー曲率と有効磁場、デルタ関数特異性を持つ反磁性帯磁率、ギャップの符号の異なる境界の 1 次元伝導チャンネル、ギャップ(質量項)による谷内時間反転対称性の破れ、などがあげられる。上記以外にも、グラフェンにはまだ明らかにされていない新しい現象がありそうである。もちろん、谷ホール伝導率が存在するときの電流分布の問題などもこれから明らかにしていく必要がある。

## 原論文

[Theory of Valley Hall Conductivity in Graphene with Gap](#)

[Tsuneya Ando: J. Phys. Soc. Jpn. \*\*84\*\* \(2015\) 114705.](#)

問合せ先：安藤 恒也（東京工業大学大学院理工学研究科物性物理学専攻）