

# 幾何学位相に駆動された光起電力効果 ——シフト電流と準粒子励起

森本高裕 (東京大学大学院工学系研究科 morimoto@ap.t.u-tokyo.ac.jp)

高橋陽太郎 (東京大学大学院工学系研究科 youtarou-takahashi@ap.t.u-tokyo.ac.jp)

岡村嘉大 (東京大学大学院工学系研究科 okamura@ap.t.u-tokyo.ac.jp)

藤原孝輔 (東京大学大学院工学系研究科 fujiwara-kosuke293@g.ecc.u-tokyo.ac.jp)

固体中の電子は結晶の周期ポテンシャル中を運動するため、ブロッホの定理からそのエネルギー構造は結晶運動量の関数としてバンド構造をなす。このブロッホ電子のバンド構造は、金属的・絶縁体的といった重要な物性機能を司り、現代の半導体テクノロジーの根幹をなしている。一方、ブロッホ電子の波動関数も結晶運動量の関数として変化するため、時に非自明な幾何学構造が現れ、特徴的な物性機能をもたらす。このようなブロッホ電子の幾何学は、ベリー接続という結晶運動量を変化させたときに獲得する位相により特徴づけられ、物理的にはユニットセル内でブロッホ電子がどの位置にいるかというセル内座標としての意味をもつ。実際、固体中電子の電気分極はベリー位相(ベリー接続のブリルアンゾーン上での積分)で与えられるというのが**現代的な電気分極理論**である。

このようにブロッホ電子は幾何学的性質をもつため、固体中の電子系には様々な幾何学構造をもった量子相(トポロジカル量子相)が存在する。異なるトポロジカル量子相の間では電子の幾何学的性質の変化からギャップレスの励起が現れ、それに伴って電子やスピンの横応答(ホール効果)などの顕著な応答現象が現れる。これらはいずれも線形の幾何学応答現象であるが、最近非線形応答現象においても幾何学効果に由来する興味深い現象が知られるようになってきた。DC外場駆動の伝導現象では電子が一方方向に流れやすい整流効果である非相反輸送や、AC外場駆動の光学領域では光照射によってDC電流が生じるバルク光起電力効果(太陽電池効果)が知られる。特に、バルク光起電力効果の一種である**シフト電流**は幾何学的な非線形光学効果として

知られている。

シフト電流は、反転対称性の破れた結晶中で、電子波束が光励起に伴って実空間でシフトすることによってDC電流が発生する現象であり、系の電気分極やベリー位相と密接な関わりをもつ。シフト電流機構においては、有限の電気分極をもつ電子正孔対を定常的に光生成することで、系内の電気分極 $P$ の変化が、 $J = dP/dt$ の関係から定常電流 $J$ を生じさせる。従来は、電子のバンド間遷移によるシフト電流が研究されてきたが、近年の研究によりバンドギャップ以下のエネルギー帯で現れる準粒子励起もシフト電流機構により光起電力効果を示すことが明らかになってきた。これは、反転対称性が破れた系においては、準粒子励起も一般に有限の電気分極をもつことに起因する。つまり、準粒子励起により電気分極を定常的に生成することで定常電流が発生するというわけである。

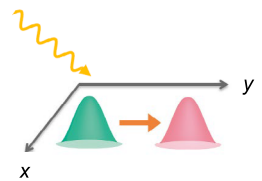
これまでに、光励起された電子正孔対の束縛状態である励起子、格子振動の準粒子であるフォノン、磁気励起の準粒子であるマグノンについて、準粒子励起のシフト電流機構を通じてバンドギャップより低いエネルギー帯において光起電力効果が生じることが実験的に検証されている。特に、**マルチフェロイクス**においては、マグノン励起が電気分極と結合することでシフト電流を発生させる。このように、マグノンシフト電流は、スピンがらせん構造を示すサイクロイダル磁性体においてスピン模型解析により理論的に理解され、さらにペロブスカイト型マンガン酸化物におけるテラヘルツ帯測定によって実験的にも実証されている。

## 用語解説

### 電気分極の現代理論:

ベリー接続は、ブロッホ波動関数の周期的部分 $u(k)$ を用いて $a(k) = i\langle u(k) | \partial_k u(k) \rangle$ と与えられる。ベリー接続はブロッホ波動関数を $k$ 空間で平行移動したときに獲得する幾何学位相を記述し、実空間描像においてはブロッホ波束のユニットセル内の位置に対応する。電気分極の現代理論においては、結晶中の電気分極はベリー接続 $a(k)$ のブリルアンゾーン積分で与えられる。

### シフト電流:



シフト電流の概念図。反転対称性の破れた結晶中では一般に光励起によって電子波束がシフトする。定常的な励起に伴って系の分極変化が持続的に起こることによりDC電流が生成される。

### マルチフェロイクス:

マルチフェロイクスは、反転対称性の破れた系において磁気秩序と電気分極の両方を持ち、それらが互いに結合している物質群である。マルチフェロイクス中では、磁気励起であるマグノンが電気分極の揺らぎを纏うため光学活性になり、エレクトロマグノンと呼ばれる。電気分極をもったエレクトロマグノンを定常的に光学励起することで、シフト電流機構により定常電流が発生する。