

ホール効果測定

1、ホール効果

ホール効果とは1879年にHallにより発見された効果で、輸送電流Iを磁場Bと垂直に流したときに、 $I \times B$ の方向に電場が発生する現象のことである。この効果を利用すると高感度の磁気測定センサーなどが実現できるが、重要なことは、この効果が電気伝導体の基本的特性を測定する有力な手段であり、抵抗率の測定と組合せると、導体の電気伝導型、キャリアの数とその振舞いなど多くの情報を得られることである。

電気伝導を担うキャリアが、印加された磁場により $I \times B$ の方向にローレンツ力を受けるために、 $I \times B$ の方向にキャリア濃度が非平衡な状態になることから電場が生じる。この生じた電場がキャリアに作用する力は、ちょうどローレンツ力を打ち消し、定常状態となる。この $I_y = 0$ の定常状態における電場をホール電場という。具体的には図1のような試料に+x方向に電流を流し、磁場を+z方向に印加して、y方向の電圧を測定する。ホール係数 R_H は、ホール電場 E_y 、電流密度 J_x 、磁場Bにより

$$R_H \equiv \frac{E_y}{J_x B} = \frac{V_y t}{I_x B} = \frac{R_{xy} t}{B} \quad (1)$$

と定義される。ここで V_y はホール電圧、 t は試料の厚さ、 R_{xy} は実際に測定するホール抵抗である。この式(1)から、ホール抵抗は磁場に比例することが分かる。一方で、キャリアの質量を m 、電荷を e 、速度を \vec{v} とすれば、キャリアの運動方程式は

$$m \frac{d\vec{v}}{dt} = e\vec{E} + e(\vec{v} \times \vec{B}) - \frac{m\vec{v}}{\tau} \quad (2)$$

である。式(2)右辺第1項は電場による力、第2項は磁場から受けるローレンツ力、第3項はキャリアの運動を妨げる力で τ は緩和時間である。測定は、定常状態で行うので

$$\begin{aligned} \frac{d\vec{v}}{dt} &= 0 \\ v_y &= v_z = 0 \end{aligned} \quad (3)$$

である。これを用いて式(2)を成分に分けると

$$\begin{aligned} \frac{m}{\tau} v_x &= eE_x \\ ev_x B &= eE_y \end{aligned} \quad (4)$$

となる。したがってホール電圧は試料の幅を w とすれば

$$V_y = wE_y = wv_x B = w \frac{J_x}{ne} B \quad (5)$$

と書ける。最後の等号では $J_x = nev_x$ の関係式を用いた。ここで n はキャリア密度である。したがって、式(1.1)と式(1.5)よりホール係数はキャリア密度と

$$R_H = \frac{E_y}{J_x B} = \frac{1}{en} \quad (6)$$

という関係があることが導かれる。この式(6)からホール電圧を測定することによって、その符号からキャリアの種類(正ならばホール、負ならば電子)を決定でき、その絶対値からキャリア密度を知ることができることが分かる。

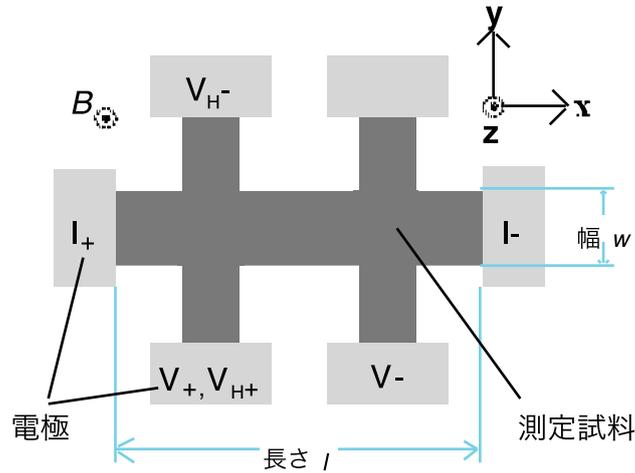


図1 ホール効果の測定を行うための試料形状例

2、測定方法

ホール電圧の測定をする際には、ホール電圧を測定するための対向した電極のx方向のずれが問題となる。測定されるy方向の電圧 V_{meas} には、ホール電圧の成分 V_y の他に、電極のずれによるx方向の成分(測定試料が磁気抵抗を持てば磁場により変化する) V_x 、および、測定に用いる測定機器のオフセットや配線に存在する熱起電力 V_{ext} が含まれる。このうち V_{ext} は電流を反転して測定することにより、 V_x は試料にかける磁場を反転して測定することにより打ち消すことができる。磁場の反転方法は2通りあり、試料は固定して磁場を+zと-z方向にかけて測定する方法と、磁場をかける向きは+z方向に固定して試料をx軸を中心に180度回転させて上下をひっくり返して測定する方法とがある。

まず、磁場を+z方向に印加した状態で電流の極性を反転する。 V_{meas} は

$$\begin{aligned} V_{meas} (+B, +I) &= V_y + V_x + V_{ext} \\ V_{meas} (+B, -I) &= -V_y - V_x + V_{ext} \end{aligned} \quad (7)$$

と得られる。これから

$$V_{meas}^+ \equiv \frac{V_{meas} (+B, +I) - V_{meas} (+B, -I)}{2} = V_y + V_x \quad (8)$$

のようにして V_{ext} の影響を除くことができる。

次に、磁場を-z方向に印加した状態で同様に測定する。 V_{meas} は

$$\begin{aligned}
V_{meas}(-B,+I) &= -V_y + V_x + V_{ext} \\
V_{meas}(-B,-I) &= V_y - V_x + V_{ext}
\end{aligned}
\tag{9}$$

と得られる。これから

$$V_{meas}^- \equiv \frac{V_{meas}(-B,+I) - V_{meas}(-B,-I)}{2} = -V_y + V_x
\tag{10}$$

となる。試料の抵抗が磁場の極性によらないとすれば、 $V_x(+B) = V_x(-B)$ であるので、式(2.8)、(2.10)より

$$V_y = \frac{V_{meas}^+ - V_{meas}^-}{2}
\tag{.1}$$

となり、純粋なホール電圧だけを得ることができる。