■12 群（電子情報通信基礎）－ 4 編（力学・電磁気学）

7 章 定常電流

（執筆者：來住直人）［2013 年 5 月 受領］

■概要■

本章においては，6-6 節において取り上げた導体について，その電気伝導度が有限な場合について考え，そのような導体内部に存在する時間変化のない定常電流について扱う．

【本章の構成】

7-1 節においては，電荷の移動量を表す電流について定義し，オームの法則から，電流と静電界の関係を明らかにする．7-2 節では，電流の定義に基づき電荷量の変化と電流の関係を明らかにする．7-3 節では，電気伝導度を持つ誘電体媒質を用いたキャパシタにおける電気抵抗と静電容量の関係を明らかにする．

7-1 電流と静電界の関係
7-2 電荷の保存則
7-3 二導体間の電気抵抗と静電容量の関係

■12 群 - 4 編 - 7 章

7-1 電流と静電界の関係

（執筆者：來住直人）［2013 年 5 月 受領］

電流は電荷の移動量を表す物理量であり，単位時間当たりの電荷の移動量で定義する．例えば 6-6 節で考えた電流 I は，単位時間当たりに材料中を移動する電荷量と等価であり，その単位は〔C/s〕もしくは〔A〕（アンペア）である．電流は電荷の流れる方向も含んだ概念なので，ベクトルにより表記する．更に，電界などと同様な場の扱いをするために，単位断面積内を単位時間に移動する電荷量とその方向を表す電流密度 $\boldsymbol{J}_e$ を以下のように定義する．

$$\boldsymbol{J}_e = nq\boldsymbol{v} \tag{7.1}$$

ここで，n は電荷密度，q は電荷の素量，$\boldsymbol{v}$ は電荷の移動速度である．

電荷の移動は静電界によるものなので，電流と電界は比例関係にあると考えられる．更に電界が一定ならば電界と電位差も比例関係にあるので，電流と電位差も比例関係にある．**図 7.1** のように，6-6 節で示した図**??**と同様に，均一な材料に一定の電位差を外部から与えることを考える．これは，電圧が V の電池などの直流電源を用いることで実現できるが，この電源のように一定の電位差を加えることのができる能力を起電力と呼び，起電力の値をその電位差と定義する．よって，図 7.1 の電流 I は起電力 V（電位差 V）に比例し，オームの法則

$$I = \frac{V}{R} \tag{7.2}$$

が成立する．ここで，R は材料の電気抵抗である．このように，オームの法則に従って導体などの電気伝導度を持つ材料中を流れる電流を伝導電流と呼ぶ．

電位差 V と電界 E の関係を考慮すると，オームの法則と式 (**??**) から図 7.1 においては電流密度の大きさ J と E の間に，

$$I = JS = \frac{V}{R} = \kappa\frac{S}{L}V = \kappa ES$$

が成立する．これらより，電流密度と電界は電気伝導度 κ を用いて，

$$\boldsymbol{J}_e = \kappa\boldsymbol{E} \tag{7.3}$$

と関係付けられる．

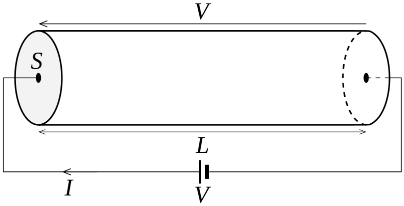

図 7.1　均一な材料を流れる電流と電位差の関係

■12 群 - 4 編 - 7 章

7-2 電荷の保存則

（執筆者：來住直人）［2013 年 5 月 受領］

次に，電荷量の変化と電流の関係を考える．**図 7.2** に示すように，電気伝導度が κ の一様な媒質内の閉曲面 S で囲まれた体積 V 内に総量 Q の電荷が分布している．電気伝導度 κ と電荷間の斥力により電流 $\boldsymbol{J}_e$ が発生し，V 内の電荷量が変化しているとき，閉曲面 S を通って V の外側に流れる電流の総量 I は，Q もしくは V 内の電荷密度 ρ により，

$$I = -\frac{dQ}{dt} = -\frac{d}{dt}\int_V \rho dV = -\int_V \frac{\partial\rho}{\partial t} dV$$

と表現できる．一方，I と電流密度 $\boldsymbol{J}_e$ の関係と 6-5 節で示したガウスの発散定理 **(??)** により，

$$I = \int_S \boldsymbol{J}_e \cdot \boldsymbol{n} dS = \int_V \nabla \cdot \boldsymbol{J}_e dV$$

が成立するので，これらより，

$$\int_V \left(\nabla \cdot \boldsymbol{J}_e + \frac{\partial\rho}{\partial t} \right) dV = 0$$

を得る．これより，

$$\nabla \cdot \boldsymbol{J}_e + \frac{\partial\rho}{\partial t} = 0 \tag{7.4}$$

もしくは，

$$\int_S \boldsymbol{J}_e \cdot \boldsymbol{n} dS + \frac{d}{dt}\int_V \rho dV = 0 \tag{7.5}$$

を得る．これらを電荷の保存則もしくは連続の式と呼ぶ．

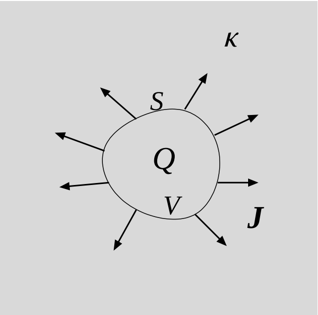

図 7.2　電気伝導度を持つ媒質中の電荷により生じる電流

■12 群 - 4 編 - 7 章

7-3 二導体間の電気抵抗と静電容量の関係

（執筆者：來住直人）［2013 年 5 月 受領］

図 7.3 に示すように，一定の電位差 V を持つ 2 つの導体間の空間が電気伝導度を持つ媒質で満たされているとき，媒質間には静電界$\boldsymbol{E}$と定常電流 $\boldsymbol{J}_e$ が生じる．これらの二導体をキャパシタとみなした場合，二導体に生じる電荷量を Q，$-Q$ とし，媒質の誘電率と電気伝導度をそれぞれ ε，κ とする．導体間に流れる全電流 I は，式 (7.3) と 6-9 節の式 (**??**)，(**??**) より，左側の導体を囲む閉曲面を S として，

$$I = \int_S \boldsymbol{J}_e \cdot \boldsymbol{n} dS = \kappa = \int_S \boldsymbol{E} \cdot \boldsymbol{n} dS = \frac{\kappa}{\varepsilon} \int_S \boldsymbol{D} \cdot \boldsymbol{n} dS = \frac{\kappa}{\varepsilon} Q$$

を得る．これと，6-7 節の静電容量 C の定義 (**??**) とオームの法則 (7.2) により，

$$R = \frac{\varepsilon}{\kappa C} \tag{7.6}$$

を得る．

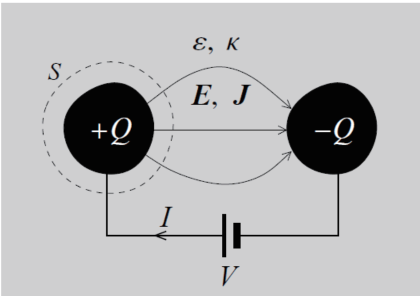

図 7.3　二導体間の電位差 V により生じる静電界Eと定常電流 J_e