

## §8.10 電磁誘導, 交流, 送電の原理

- 図 8.28(b) のコイルを貫通する磁束  $\Phi$  が時間的に増加すると, コイルに電流 ( 磁束線に対して左ねじの向き ) が流れるのがレンツの法則 (8.38) である. だが一般には, 磁束の時間変化が, 磁束に絡みつく向きの電場  $\mathbf{E}$  を発生させる現象と言える. 閉じた経路  $C$  に関する  $\mathbf{E}$  の線積分が,  $C$  に関して右ねじが進む向き  $\mathbf{n}$  に  $C$  を貫く磁束の時間変化率  $\times(-1)$  倍になると表現できる. つまり,  
$$\oint_C d\mathbf{r} \cdot \mathbf{E}(\mathbf{r}) = -\frac{\Delta\Phi}{\Delta t} \quad (8.38')$$
 (ファラデーの法則). 左辺は, ある向きに距離  $l$  進むときの電場 ( 平均値 ) と電位差の関係  $El = -V$  を一周の輪に変更した計算で, コイル一周の間に生じる起電力.
- (8.38') 動作確認. (a) の円形電流が作る磁束の向きを  $\Phi > 0$  とする. これが  $\mathbf{n}$  の向きで  $C$  は (a) の電流の向き. 以上が (8.38') 各量の正負の向きの約束. 図 8.28(b,c) の系の入力は磁束  $\Phi$ . (b)((c)) のように  $\Delta\Phi/\Delta t > 0 (< 0)$  が起こると (8.38') の右辺と左辺は負 ( 正 ) なので,  $C$  の向きに沿った電場の平均値  $E$  も負 ( 正 ) になる. 系の出力は電場である. よって (b)((c)) の電気回路には  $C$  の負 ( 正 ) の向きの電流が流れ, (b)((c)) の電流の値は負. 実験室ではこの現象を簡単に実験で確認できる.

## 交流発電機の原理

- 図 8.21 のモーターを図 8.32 のように通電せずに左回りに一定の回転数でぐるぐる手回しする場合に, (8.38') を適用する. コイルの電流を図 8.21 または 8.32 の向きを正とし, 電流 1 周の経路を  $C$ , 回路の面積を  $ab$ , 電流の回転に対して右ねじの向きを  $\mathbf{n}$  とする ( $\mathbf{n}$  はコイルに固定してはいけなくて, 電流に対して図 8.32 の向きに定義). 右辺  $\Delta\Phi$  は  $C$  を貫く  $\mathbf{n}$  方向成分の磁束の変化, 磁場  $\mathbf{B}$  は図 8.21 の向きで一様とする.  $\mathbf{B}, \mathbf{n}$  のなす角を  $\theta = \omega t$  とすれば  $\mathbf{B} \cdot \mathbf{n} = B \cos \theta$  より  $\Delta\Phi / \Delta t = B \{ \cos(\theta + \Delta\theta) - \cos \theta \} ab / \Delta t = -Bab \Delta\theta \sin \theta / \Delta t$ .  $\omega$  (rad/s) は回転の角振動数, 初期角は  $\theta = \omega t$  より 0 である.  $C$  1 周に生じる起電力は  $V$ . (8.38) 左辺は  $V = Bab\omega \sin(\omega t)$  (8.40) と判明した. これは力学的エネルギー → 電気エネルギーの変換の原理としてよく利用され, 変換の効率は 100% に近い.
- 電磁誘導の問題の諸量の向きの決め方. 発電機ならば, 先に入力である磁束の数え方を決める  $\mathbf{n}$  の向きを定める. 次に出力となる回路に生じる電流 (電場) が, どちら回りが正なのかの  $C$  の向きが決定される. つまり電流の向きに右ねじ (水道の栓のねじ) を回して進む向きが  $\mathbf{n}$  になるようにする. モーターに通電して回転を起こす場合は, 入力電場 (電流) で, その正の向き  $C$  をまず決める. 出力は実は力  $\mathbf{F}$  で,  $\mathbf{F}$  はアンペールの力 (8.30) より決まる. 何か一周回転する量があるとき,  $\mathbf{n}$  の向きの物理量がある.

## 変圧器の原理

- 図 8.33 の 1 次コイルに交流電圧  $V_1$  をかけるとコイルに交流電流が流れて鉄心内に交流磁場 ( 磁束 ) を生じる。磁束  $\Phi$  は殆ど損失無しに鉄心を伝わる。  $\Phi$  が 2 次コイル内を通れば, (8.38) より回路 2 で  $V_2 = -N_2 \Delta\Phi / \Delta t$  の起電力を得る ( 以上を相互誘導という。また, 図のような  $N$  巻きのコイルでは誘導起電力が  $N$  倍になる )。1 次コイルには (8.38) より  $-N_1 \Delta\Phi / \Delta t$  の起電力が生じる。これは自己誘導という。自己誘導は  $V_1$  より発した磁束が及ぼす逆起電力である。回路 1 の抵抗を 0 とした場合,  $V_1 = N_1 \Delta\Phi / \Delta t$  なので ( 回路 1 は  $\uparrow$  と  $\uparrow$  の 2 つの電池の  $+$  と  $+$  をつなげて直列させた状態。回路 2 は  $\uparrow$  と器具が直列している ),  $|V_1| : |V_2| = N_1 : N_2$ 。この原理より, 交流には自由に損失なしに電圧を変換できる利点がある。

- 以上交流発電機, 変圧器, §8.6 例題 7 を組み合わせて送電が実現している. 現在の主流は, 熱エネルギーを電気エネルギーに変換した後に送電する方法で, 下線の変換効率は 50% 程度までで高くはない. 水力発電なら効率は 100% に近い. 次に, 例題 7 に記してある問題が理由で, 数十万 V の電圧に昇圧してから送電を開始する. 電気を使用する手前で変圧器で降圧されて, 安全に使用できるようになる.

**演習入門: 発電機** 現在の主力の発電方法では、発熱量で水を沸かして蒸気を作り、それに力学的な仕事をさせて発電機を回す。送電時のエネルギー損失が見逃せないで、それを避けるために電圧を高く昇圧して送り、最後に電柱で降圧して家庭に供給する。

発電電圧  $V$  は、p144 図 8.32 の B から測った A の電位  $V_{AB}$  を答えればよい。

$V_{AB} > 0$  のとき  $A \rightarrow B$  に電流が流れ、電流の回転に対して右ねじが進む向きを回路の面の向き  $\mathbf{n}$  に選んだことを確認する。面積ベクトル  $\mathbf{S} = S\mathbf{n}$  を約束する。あとは  $\Phi = \mathbf{B} \cdot \mathbf{S}$  (8.37') と  $V = -d\Phi/dt$  (8.38) より自動的に  $V_{AB}$  が計算される。

- 時刻  $t=0$  で  $\mathbf{S}$  と  $\mathbf{B}$  のなす角が  $90^\circ$ 、回転数  $f(1/s)$  のとき、 $V_{AB}$  の導出を簡単に記述せよ。 ...  $V_{AB} = -d\{abB\cos(2\pi ft \pm \pi/2)\}/dt = \pm 2\pi fabB\cos(2\pi ft)$  .
- 送電システムの送電側の回路を単純化したのが図 8.12 である。R は送電線の抵抗、R' は使用機器の抵抗である。電源がする仕事率  $P$  はいくらか。 ...  $P = VI$
- 送電線のための電力損失  $Q$  は  $V^2$  に反比例することを導出せよ。  
... オームの法則より  $V = (R + R')I$ ,
- ある X 線発生装置は交流  $500 \times 10^2 \text{V}$  で動作する。この電圧を 120V の交流電源から得るとすれば、変圧器の 1 次コイルと 2 次コイルの巻数比はいくらか。接続方法も簡単に説明せよ。

... 1 次コイルの両端に交流電源 120V を入力し、2 次コイルの両端に X 線発生装置をつなぎ、

## 生命の物理 電気磁気のガウスの法則まとめ

- 電荷より電束  $\Phi$  , 磁荷より磁束  $\Phi_m$  が発生する. 電気のガウスの法則は正しくは  $\int_{\text{任意の閉曲面}S\text{上}} d\mathbf{S} \cdot \mathbf{D}(\mathbf{r}) = q \dots (1)$  であるとする.  $\mathbf{D}$  は電束密度で  $q$  は  $S$  内部の電気量である.
- 磁気では単極が存在せず, (1) 右辺に相当する  $q_m$  が 0 であるので, 磁気のガウスの法則は  $\int_{\text{任意の閉曲面}S\text{上}} d\mathbf{S} \cdot \mathbf{B}(\mathbf{r}) = 0 \dots (2)$ .  $\mathbf{B}$  は連続 (真空中で消えない生じない) になり, 磁束線が終点の無いループになる.
- 物質のない真空中では  $\mathbf{D} = \epsilon_0 \mathbf{E}$ ,  $\mathbf{B} = \mu_0 \mathbf{H}$  である.