

1章 電気機械エネルギー変換とは

この章の目標は、1) 電磁現象の法則について数式を用いた解りやすい説明、2) 回転機械の運動についての説明、3) 電気機械工学の基礎となる電気機械エネルギー変換の説明ができるようになることである。電気機械とは、電気エネルギーの発生、変換、利用する機械、器具、装置を総称するものである。一般的には、電磁現象を動作原理として用いる回転電気機械と静止機器を指す。機械エネルギーを電気エネルギーに変換する機械を発電機、この逆のエネルギー変換を行う機械を電動機という。また、交流電圧の大きさを自由に変換する機械を変圧器という。これらの電気機械と電磁現象の関わりを学ぶことで、それぞれの電気機械を学ぶ基礎を築く。

1.1 エネルギー変換と電気機械

1.1.1 エネルギー変換

エネルギーとは、「物理的な仕事を成し得る諸量（運動エネルギー、位置エネルギーなど）の総称」であり、電気エネルギー、熱エネルギー、運動エネルギー、化学反応エネルギー、光（電磁波）エネルギー、原子力のエネルギーなどがあり、いずれも「仕事」をする能力を持つ。

図 1-1 に、エネルギー変換の例を示す。例えば、水力発電では水の位置エネルギーを利用して電気エネルギーに変換する。電子レンジでは、マイクロ波の振動エネルギーを食品内部の水分に吸収させて熱エネルギーに変換して加熱する。

電気エネルギーは、図 1-2 に示すように、多種のエネルギーへ変換できるので、利用価値が高いエネルギーといえる。本書では、機械エネルギー → 電気エネルギー変換や、電気エネルギー → 電気エネルギー変換を取り扱う。

- ・ 力学的エネルギー ⇒ 電気エネルギー : 水力発電
- ・ 熱エネルギー ⇒ 力学的エネルギー : ブレーキ
- ・ 化学エネルギー ⇒ 光学エネルギー : 花火
- ・ 電磁波のエネルギー ⇒ 熱エネルギー : 電子レンジ
- ・ 光学エネルギー ⇒ 化学エネルギー : 植物
- ・ 電気のエネルギー ⇒ 力学的エネルギー : 扇風機

図 1-1 エネルギー変換の例

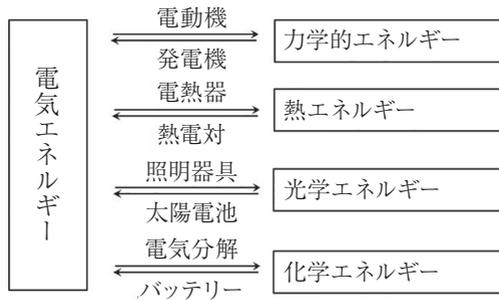


図 1-2 電気エネルギーの変換

1.1.2 電気機械

電気機械の種類を図 1-3 に示す。電気機械は、回転機と回転部を持たない静止器に分けられる。回転機は直流機と交流機に分けられ、交流機は、周波数と回転速度の関係が常に保たれている同期機とそうでない非同期機に分けられる。

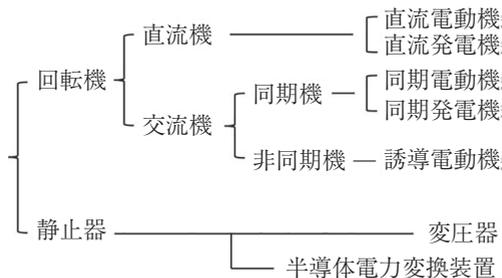


図 1-3 電気機械の種類

また、発電機は機械エネルギーを電気エネルギーに変換し、電動機は電気エネルギーを利用して機械的なエネルギーに変換する。このうち電動機は、国内の電気エネルギーの約7割を利用していると言われている。

静止器のうち変圧器は、交流電圧、電流の大きさを自由に変換する機械である。また半導体電力変換装置は、電気回路のスイッチングを行うことができる半導体デバイスを用い、交流から直流に変換する順変換、及び直流から交流に変換する逆変換を行う。順変換装置をコンバータ、逆変換装置をインバータと呼ぶ。半導体電力変換装置を応用することで、電動機速度制御などが容易に行われる。半導体デバイスの技術進歩に伴い電動力応用の技術革新も著しい。

1.2 電磁力と起電力

1.2.1 電磁力（フレミングの左手の法則）

磁束密度 B [T] の磁界中に電流 i [A] が流れる長さ ℓ [m] の導体がある場合、その導体には下式のような電磁力 F [N] が働く。

$$F = iB\ell \text{ [N]} \quad (1.1)$$

この力の向きはフレミングの左手の法則、すなわち図 1-4 に示すように、左手の人差し指を磁界、中指を電流として、親指の向きが力（電磁力）の向きである。

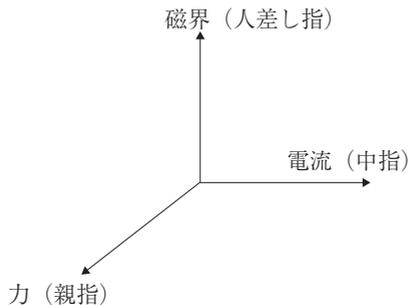


図 1-4 フレミングの左手の法則

例として、図1-5に示すように、2本の導体に電流が流れる場合、片方の電流 i_1 [A] により導体周りに $H = \frac{i_1}{2\pi r}$ [A/m] なる磁界ができるので、この磁界によりもう一方の電流 i_2 [A] が単位長さあたり

$$f = \mu_0 H i_2 = \frac{\mu_0 i_1 i_2}{2\pi r} \text{ [N/m]} \quad (1.2)$$

なる力を受ける。したがって、電流が流れる導体間には f なる相互の力が作用することになる。双方の電流が同じ向きのおきには吸引力、反対向きのおき反発力が働く。ここで、 μ_0 は真空の透磁率であり、導体周辺の物質によっては比透磁率 μ_s を乗ずる必要がある。

ここで、磁界中の電流が受ける電磁力をマクスウェル応力で表現してみる。図1-6に示すように、外部磁界と導体に流れる電流による磁界との合成磁界は、

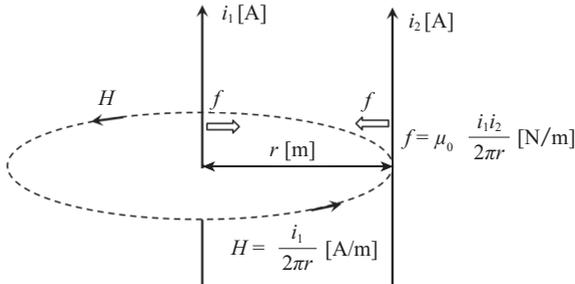
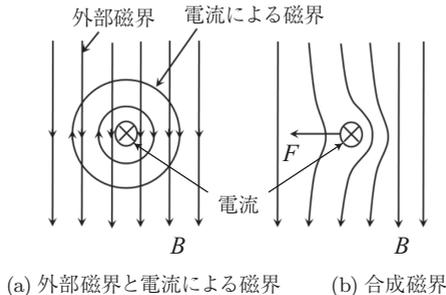


図 1-5 電流が流れる 2 本の導体に働く力



(a) 外部磁界と電流による磁界 (b) 合成磁界

図 1-6 マクスウェル応力

導体の右側が密に、左側が疎になる。この曲がった磁力線がまっすぐになろうとする力をマクスウェル応力と呼び、左向きに働く。これは、フレミングの左手の法則による電磁力の向きと同じになる。

例題 1.1

磁束密度が 0.5 T の磁界中に長さが 0.4 m の直線導体を磁界と垂直の方向に置き、 8 A の電流を流したとき、導体に発生する電磁力を求めよ。

例題解答 1.1

導体に発生する電磁力は、式 (1.1) より、

$$F = iBl = 8 \times 0.5 \times 0.4 = 1.6\text{ N}$$

1.2.2 起電力（フレミングの右手の法則）

磁束密度 $B\text{ [T]}$ なる磁界中で長さ $\ell\text{ [m]}$ の導体を速度 $v\text{ [m/s]}$ で移動させると、導体に下式に示すような起電力 $e\text{ [V]}$ が発生する。

$$e = vBl\text{ [V]} \quad (1.3)$$

この起電力の向きはフレミングの右手の法則、すなわち図 1-7 に示すように、右手の人差し指を磁界、親指を移動方向として、中指の方向が起電力の向きになる。

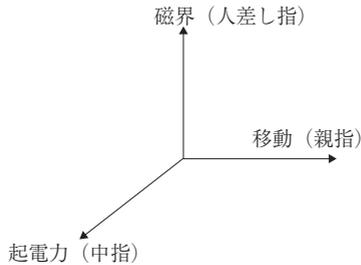


図 1-7 フレミングの右手の法則

ここで、磁界中の導体の移動により発生する起電力を電磁誘導の法則で表現してみる。図 1-8 に示すように、磁界中で長さ l の導体が時間 dt 中に距離 dx 動くとき $v = dx/dt$ となり、また移動した領域 $dx \cdot l$ だけ導体が磁束 $dx \cdot l \times B$ を切ることになり、同量の $dx \cdot l \times B = d\psi$ (巻数は 1) だけ磁束鎖交数が変化したことに相当するので、起電力

$$e = -\frac{d\psi}{dt} = -\frac{dx \cdot l \times B}{dt} = -vBl \text{ [V]} \quad (1.4)$$

が発生する。これは、フレミングの右手の法則による起電力と大きさは同じになる。式 (1.4) のマイナスは、正方向を右ねじの向きとすれば反対向きであることを示す。

以上、上記の起電力の式 $e = vBl$ [V] は電気機械の発電機の基本となる式であり、電磁力の式 $F = iBl$ [N] は電動機の基本となる式であり、ともに電気機械にとって非常に重要である。

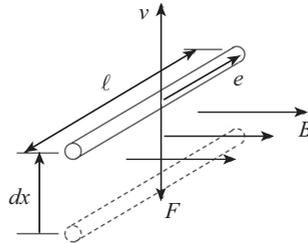


図 1-8 電磁誘導の法則

例題 1.2

磁束密度が 0.5 T の磁界中に長さが 0.4 m の直線導体を磁界と垂直の方向に置き、磁界と導体の双方に対し垂直の方向に 3 m/s の速度で導体を平行移動した場合に誘導される起電力を求めよ。

例題解答 1.2

導体に発生する起電力は、式 (1.3) より

$$e = vB\ell = 3 \times 0.5 \times 0.4 = 0.6 \text{ V}$$

1.3 電動機の原理と発電機の原理

磁界中の導体に電流を流せば導体が移動する電動機作用が生じ、磁界中の導体を動かせば導体に起電力が発生する発電機作用が生じた。同時に、電動機作用で移動する導体には起電力が発生し、発電機作用により起電力が発生する導体は電動機作用を受け移動することになる。

1.3.1 電動機の原理

図 1-9 を用いて電動機の原理を説明する。導体の両端に電源をつなぎ、電流 i [A] を流した場合、式 (1.1) に示す電磁力 $F = iB\ell$ [N] が働き、導体は上方方向に動く。このとき、電動機として外部から電流を流し込むことで外部磁界との相互作用で導体が磁界中を移動することになるが、同時に導体が磁界を切ることになるので、フレミングの右手の法則により導体に起電力 e [V] が誘導される。この起電力 e の向きは、電流 i を流す電源電圧 E の向きとは逆になるので、逆起電力と呼ぶ。電動機として導体を上に移動させ続けるためには、逆起電力

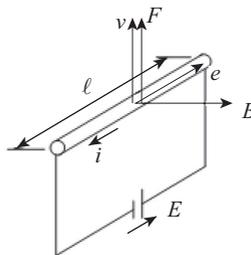


図 1-9 電動機の原理

e に打ち勝って電流 i を流し続ける必要があるので、 e より大きな電源電圧 E を加える必要がある。

図 1-9 の回路において、導体の抵抗を $r [\Omega]$ とすると、

$$i = \frac{E - e}{r} [\text{A}] \quad (1.5)$$

式 (1.5) において、 e の式に変形し、両辺に i を乗ずると、

$$ei = Ei - ri^2 [\text{W}] \quad (1.6)$$

式 (1.6) において、 Ei は電源が供給している電力であり、そのうち ri^2 なる抵抗損が熱となって失われ、残りの ei が次項の式 (1.9) の変換式にしたがって動力に変換される。すなわち、電磁力 $F [\text{N}]$ が外部に対して機械的な仕事をすることになる。以上のように、電力を機械的な動力に変換する装置を電動機と呼んでいる。

1.3.2 発電機の原理

図 1-10 を用いて発電機の原理を説明する。磁界中での導体移動で式 (1.3) の起電力 $e = vB\ell [\text{V}]$ が発生するので、導体の両端に抵抗 $R [\Omega]$ をつなぐと、抵抗 R には次式のような電流 $i [\text{A}]$ が流れる。

$$i = \frac{e}{r + R} [\text{A}] \quad (1.7)$$

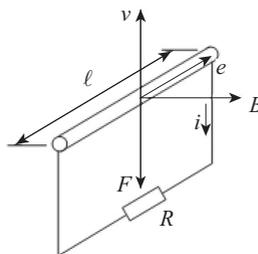


図 1-10 発電機の原理

ただし、 r は導体の抵抗 [Ω] とする。式 (1.7) を e の式に変形し、両辺に i を乗ずると、次式が成立する。

$$ei = ri^2 + Ri^2 \text{ [W]} \quad (1.8)$$

式 (1.8) において、 ei は磁界中で導体が移動することにより発生する電力であり、 ri^2 は導体内部の抵抗によって消費される電力、 Ri^2 は外部抵抗すなわち負荷に供給される電力に相当する。

ところが、外部から導体を移動させることで導体に起電力を発生する発電機であっても、導体に電流 i が流れると外部磁界から電磁力を受け、フレミングの左手の法則により外部から移動させる向きと反対向きに電磁力 F [N] が発生する。そのため、この電磁力 F [N] に打ち勝って外部から機械力を導体に与え、導体を v [m/s] で移動し続ける必要がある。このとき、外部から供給される動力 P_m [W] は、

$$P_m = Fv = (iBl)v = (Blv)i = ei \text{ [W]} \quad (1.9)$$

となるので、外部から供給すべき機械的動力は、磁界中で導体が移動したことにより変換される電力に等しくなる。この変換電力のうち ri^2 なる抵抗損が熱になって失われ、 $(P_m - ri^2)$ が負荷での電氣的出力になる。以上のように、動力を電力に変換する装置を発電機と呼んでいる。

例題 1.3

100 V で動く電動機がある。この電動機の始動瞬時の電流及び、定格回転時の電流を求めよ。ただし、定格回転時の電動機内部誘導起電力は 96 V、電機子抵抗は 2Ω とする。

例題解答 1.3

停止時の電動機内部誘導起電力はゼロであるから、始動瞬時の電流は、

$$I_s = \frac{100 - 0}{2} = 50 \text{ A}$$

また、定格回転時の電流は、

$$I = \frac{100 - 96}{2} = 2 \text{ A}$$

1.4 変圧器起電力と速度起電力

電磁誘導によってコイルに起電力を誘導させるには、コイルと鎖交する磁束が時間的に変化するか、または空間的に変化する必要がある。

w 巻のコイルに磁束 ϕ [Wb] が鎖交しているとき、磁束鎖交数 $\psi = w\phi$ が時間的に変化する場合、発生する誘導起電力は、

$$e = -\frac{d\psi}{dt} = -w\frac{d\phi}{dt} \text{ [V]} \quad (1.10)$$

一方、コイルが x 方向に移動しているとき、磁束 ϕ は時間 t と位置 x の関数になり、誘導起電力は、

$$e = -w\frac{d\phi}{dt} = -w\left(\frac{\partial\phi}{\partial t} + \frac{\partial\phi}{\partial x}\frac{dx}{dt}\right) = -w\left(\frac{\partial\phi}{\partial t} + \frac{\partial\phi}{\partial x} \cdot v\right) \text{ [V]} \quad (1.11)$$

ここで、第1項の $-w\frac{\partial\phi}{\partial t}$ はコイルが静止していて磁束 ϕ が時間的に変化する場合の誘導起電力で変圧器起電力といい、変圧器が動作する原理である。磁束が時間的に変化する、すなわち交流電流により生ずる磁界により発生するような誘導起電力を意味する。第2項の $-w\frac{\partial\phi}{\partial x} \cdot v$ はコイルが速度 v [m/s] で移動している場合の誘導起電力で速度起電力といい、回転電気機械が動作する原理である。大きさが変化しない磁束でも空間的に移動するとか、または、コイルが移動するなど、相対的な移動により誘導起電力が発生することを意味する。

1.4.1 変圧器起電力の大きさ

変圧器起電力は、例えば変圧器の鉄心内の磁束 ϕ が角周波数 ω [rad/s] として

$$\phi = \Phi_m \cos \omega t \text{ [Wb]} \quad (1.12)$$

のように正弦波状に変化するとき、コイルに誘導される起電力 e_t は、

$$e_t = -\frac{d\phi}{dt} = \omega\Phi_m \sin \omega t \text{ [V]} \quad (1.13)$$

となり、この実効値 E_t は、 $\omega = 2\pi f$ (f : 周波数 [Hz]) として、

$$E_t = \frac{\omega\Phi_m}{\sqrt{2}} = \frac{2\pi f}{\sqrt{2}}\Phi_m = 4.44f\Phi_m \text{ [V]} \quad (1.14)$$

となる。コイルの巻数を w とすると、変圧器起電力の大きさ E_{te} [V] は、

$$E_{te} = 4.44fw\Phi_m \text{ [V]} \quad (1.15)$$

となる。

例題 1.4

断面積 500 cm^2 の鉄心の許容最大磁束密度を 1.4 T とした場合、1巻の巻線に誘導される起電力を求めよ。ただし、電源の周波数は 50 Hz とする。

例題解答 1.4

式 (1.15) より誘導起電力の実効値を求めると、断面積が 0.05 m^2 であるから最大磁束 $\Phi_m = 1.4 \times 0.05 = 0.07 \text{ Wb}$ より、 $E = 4.44fw\Phi_m = 4.44 \times 50 \times 1 \times 0.07 = 15.5 \text{ V}$ が得られる。▲

1.4.2 速度起電力

円周方向に対し正弦波状のギャップ磁束を発する磁極が回転する場合、固定側に配置しているコイルと鎖交する磁束は、図 1-11 に示すように、磁極の回転に伴い変化する。鎖交する磁束は斜線部に相当（横軸より上の斜線部が +、下が -）するとして、(a) の磁束を Φ (1 極あたりの磁束に相当) とすると、(b) ~ (e) へと進んで行くにつれて、 $\phi = \Phi \cos \omega t$ [Wb] で変化していく。コイルの巻数が w であるとする、誘導起電力 e_s は、

$$e_s = -w\frac{d\phi}{dt} = -w\frac{d}{dt}(\Phi \cos \omega t) = w\omega\Phi \sin \omega t \text{ [V]} \quad (1.16)$$

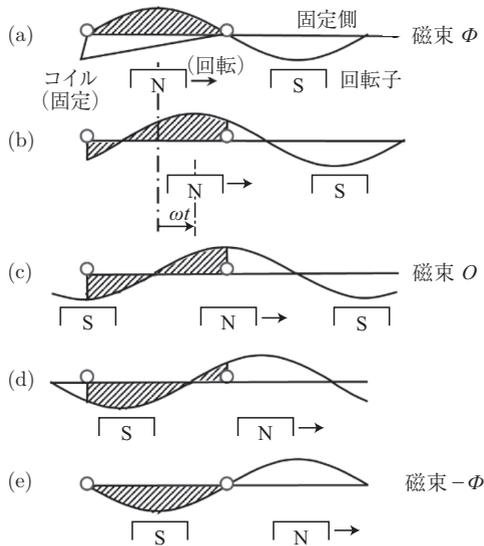


図 1-11 速度起電力発生時の磁束

となり，この速度起電力の実効値 E_{se} は，

$$E_{se} = \frac{w\omega\Phi}{\sqrt{2}} = 4.44f w\Phi \text{ [V]} \quad (1.17)$$

となる。これは，変圧器起電力 E_{te} に相当する。

1.5 磁気回路

電気機械は，機械エネルギーを磁気エネルギーに変換し電気エネルギーに変えたり，電気エネルギーを磁気エネルギーに変換し機械エネルギーに変えたりする。磁気回路は磁束を通す鉄心，ギャップなどから構成される。回転機にとってギャップは必須であるが，磁気回路から見れば磁束を漏れさせる原因になる。

磁束と鎖交する巻線の磁束鎖交数の時間的変化により起電力を誘導することができる。この磁束鎖交数を元の電流で割った値をインダクタンスと呼ぶ。

1.5.1 インダクタンス

電気機械の巻線に電流が流れると、その起磁力により磁束が発生する。この磁束は、大部分が他の主巻線と鎖交し機械としての本来の機能を發揮する。

巻数 w の巻線に電流 i [A] を流すと磁束 ϕ [Wb] が発生する。磁気回路の抵抗を R_m [A/Wb] とすると、磁束 ϕ は、

$$\phi = \frac{wi}{R_m} \text{ [Wb]} \quad (1.18)$$

で表される。ここで、 $F = wi$ [A] は起磁力である。

巻線と磁束が全て鎖交すると仮定して、磁束鎖交数 ψ は、

$$\psi = w\phi = \frac{w^2 i}{R_m} \quad (1.19)$$

したがって誘導起電力 e [V] は、

$$e = -\frac{d\psi}{dt} = -\frac{w^2}{R_m} \cdot \frac{di}{dt} = -L \frac{di}{dt} \text{ [V]} \quad (1.20)$$

ここで、 $L = \frac{w^2}{R_m}$ をインダクタンスと呼び、巻線に単位電流を流したときの鎖交磁束に相当し、 $L = \frac{w^2}{R_m} = \frac{w^2 i}{i} = \frac{\psi}{i}$ [H] で表される。このインダクタンス L の角周波数 ω の交流に対する作用をリアクタンス $X = \omega L$ といい、交流理論で扱われる $\dot{E}_L = j\omega L \dot{I}$ として実効値 \dot{I} の交流電流により逆起電力 \dot{E}_L (誘導起電力 \dot{E} とは逆向き) を発生させる。

1.5.2 漏れインダクタンス

電気機械の巻線に電流を流すことで発生する磁束のうち、一部は自分自身の巻線としか鎖交しない。この磁束を漏れ磁束と呼ぶ。巻線に電流を流すと漏れ磁束も時間的に変化するので、漏れ磁束と鎖交する自分自身の巻線内に誘導起電力を生ずる。この誘導起電力は式 (1.20) と同様に電流に比例し電流より 90° 位相が遅れる。

巻数 w の巻線に電流 i [A] を流したとき発生する磁束 ϕ [Wb] のうち、一部は

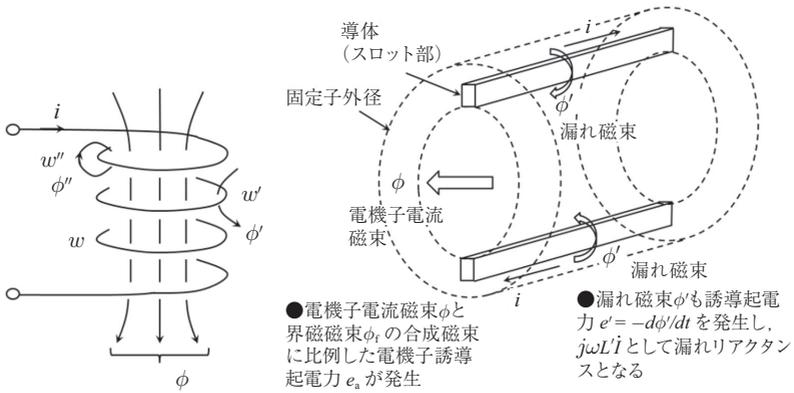


図 1-12 漏れ磁束

自分自身の巻線としか鎖交しないものがある。図 1-12 の ϕ' や ϕ'' で示す磁束である。これらによる磁束鎖交数 ψ' は、

$$\psi' = w' \phi' + w'' \phi'' \text{ [Wb]} \tag{1.21}$$

したがって、漏れインダクタンス L' は、

$$L' = \frac{\psi'}{i} \text{ [H]} \tag{1.22}$$

で表される。この漏れインダクタンス L' の角周波数 ω の交流に対する作用を漏れリアクタンス $X' = \omega L'$ といい、交流理論で扱われる $\dot{E}'_L = j\omega L' \dot{I}$ として実効値 \dot{I} の交流電流により逆起電力 \dot{E}'_L (誘導起電力 \dot{E} とは逆向き) を発生させる。

なお、図 1-12 には、回転機器のスロット内導体についての、機械本来の電磁作用に寄与する電機子電流磁束 ϕ と寄与しない漏れ磁束 ϕ' を示している。

1.5.3 漏れインダクタンスの例

回転機のスロット部の漏れインダクタンスを、磁束鎖交数を元の電流で割って求めた例を、図 1-13 に示す。図では簡単のため、導体 (Z 本で構成) 内部

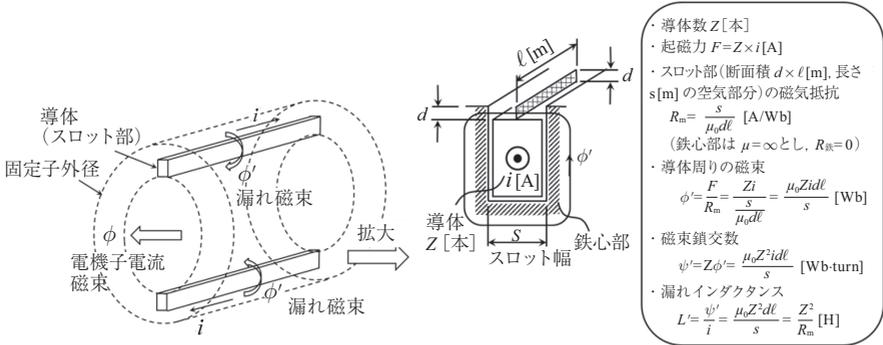


図 1-13 スロット部漏れインダクタンス

は除き，導体外部の漏れインダクタンスのみを求め， $L' = \frac{Z^2}{R_m}$ [H] としている。ただし， R_m はスロット上部の空気部分の磁気抵抗（鉄心部の磁気抵抗は無視）である。

1.6 回転運動の動力の基本式

回転機の機械的出力 P_m [W] は，回転子の回転角速度 ω [rad/s] およびトルク T [N·m] に比例する。すなわち，

$$P_m = \omega T = 2\pi n T \quad (1.23)$$

で表される。ここで n [s⁻¹ もしくは rps] は回転子の回転速度である。この関係式は回転運動の動力の基本式であり，図 1-14 に導出過程を示す。

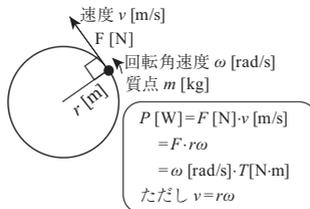


図 1-14 回転体

例題 1.5

回転速度 25 s^{-1} で $10 \text{ N}\cdot\text{m}$ のトルクを発生している電動機の出力を求めよ。

例題解答 1.5

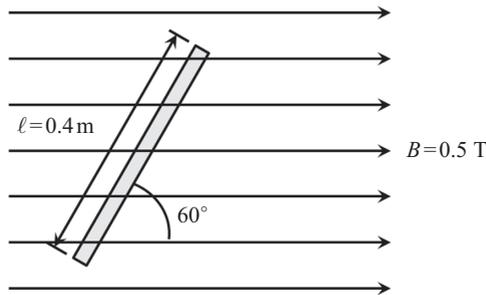
出力は、

$$P = 2\pi \times 25 \times 10 = 1571 = 1.57 \times 10^3 \text{ W}$$

となり、回転速度に比例することになる。 ▲

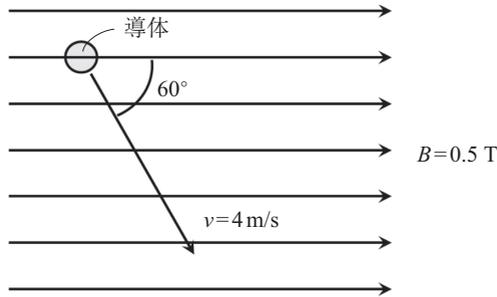
演習問題

- (1) 問題図 1-1 に示すように、磁束密度 0.5 T の一様な磁界中に、長さ 0.4 m の導体を磁界の方向に対し 60° に置き、 800 A の電流を流したとき、この導体に働く電磁力を求めよ。



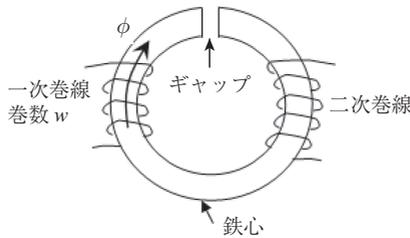
問題図 1-1

- (2) 問題図 1-2 に示すように、磁束密度 0.5 T の一様な磁界中に、磁界に垂直な方向に長さ 0.6 m の導体を置き、磁界に対し 60° の方向に速度 4 m/s で移動したとき、この導体に発生する起電力を求めよ。



問題図 1-2

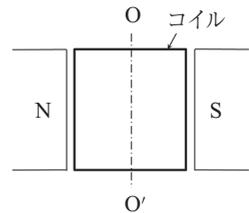
- (3) 発電機の原理を示す図 1-10 において、磁束密度 0.6 T、導体の長さ 0.5 m、速度 10 m/s とするとき、次に答えよ。ただし、導体の抵抗は 0.01Ω 、外部抵抗は 0.09Ω とする。
- 導体に発生する起電力
 - 導体に発生する電磁力
 - 発電電力
 - 導体の駆動動力
- (4) 巻線に流れる電流が 0.01 秒間に 5 A の割合で一様に変化している。このコイルに 25 V の起電力が誘導されるとすると、このコイルの自己インダクタンスはいくらか。
- (5) 巻数 20 のコイルに 0.1 A の電流を流したとき、 3×10^{-4} Wb の磁束が発生したとする。そのコイルの自己インダクタンスを求めよ。
- (6) 問題図 1-3 に示すような断面積 20 cm^2 、平均磁路長 60 cm の鉄心に巻数 100 回の巻線を巻き、巻線に 3 A の電流を流したとき、長さ 1 mm のギャップに発生する磁束密度を求めよ。ただし、鉄心の比透磁率を 3,000 とし、ギャップ部の磁束は鉄心と同じ断面積を通り漏れ磁束はないものとする。
- (7) 問題図 1-3 に示すような断面積 20 cm^2 、平均磁路長 60 cm の鉄心に巻数 100 回の巻線を巻いた場合、長さ 1 mm のギャップに発生する磁束密度は



問題図 1-3

1.4 Tであった。巻線に流した電流を求めよ。また、ギャップがない場合に
必要な電流を求めよ。ただし、鉄心の比透磁率を3,000とし、ギャップ部
の磁束は鉄心と同じ断面積を通り漏れ磁束はないものとする。

- (8) 問題図 1-4 に示すように、磁束密度 0.8 T の磁界
中に、縦 0.2 m、横 0.2 m、巻数 30 のコイルが O-O'
軸に対して回転するように配置している。コイル
に 25 A の電流を流すとき、コイルに発生する最大
トルクを求めよ。



問題図 1-4

実習 ; *Let's active learning!*

手回し発電機を回してみよう。発電機に電球などの負荷をつないだときは回すと重く感じる。負荷をつながないときは軽く回すことができる。重く感じるのは、電球に流れる電流により、手で回すトルクと反対向きのトルクが発電機内部で発生しているからである (1.3.2 参照)。

演習解答

- (1) 導体に働く電磁力は、導体の磁界に垂直な成分が $\ell \sin \theta$ となることから、

$$F = iB\ell \sin \theta = 800 \times 0.5 \times 0.4 \times \sin 60^\circ = 139 \text{ N}$$

- (2) 導体に発生する起電力は、導体の移動速度 (磁界に垂直な成分) が $v \sin \theta$

となることから,

$$e = v \sin \theta \times B\ell = 4 \sin 60^\circ \times 0.5 \times 0.6 = 1.04 \text{ V}$$

(3) (a) 導体に発生する起電力

$$e = vB\ell = 10 \times 0.6 \times 0.5 = 3 \text{ V}$$

(b) 導体に発生する電磁力

導体に流れる電流は,

$$i = \frac{e}{r + R} = \frac{3}{0.01 + 0.09} = 30 \text{ A}$$

$$\therefore F = iB\ell = 30 \times 0.6 \times 0.5 = 9 \text{ N}$$

(c) 発電電力

$$P = ei = 3 \times 30 = 90 \text{ W}$$

ただし, 導体での抵抗損失 $P_r = ri^2 = 0.01 \times 30^2 = 9 \text{ W}$

外部抵抗での消費電力 $P_R = Ri^2 = 0.09 \times 30^2 = 81 \text{ W}$

発電電力は, 導体での抵抗損失と外部抵抗での消費電力に分かれる。

(d) 導体の駆動動力

$$P_m = Fv = 9 \times 10 = 90 \text{ W}$$

導体の駆動動力は, 発電電力に等しい。

(4) 巻線のインダクタンス L は下式により求められる (式 (1.20) 参照)。

$$e = -L \frac{di}{dt} \quad (\text{電流 } i \text{ が } dt \text{ 秒間に } di \text{ の割合で変化})$$

$$25 = -L \frac{5}{0.01}$$

$$\therefore L = \left| -\frac{25}{500} \right| = 0.05 \text{ H}$$

(5) インダクタンスは、磁束鎖交数を元の電流で除した値である。

$$L = \frac{w\phi}{i} = \frac{20 \times 3 \times 10^{-4}}{0.1} = 0.06 \text{ H}$$

(6) 鉄心とギャップ部の磁気抵抗は直列接続されているので、

$$\begin{aligned} wi &= R_m \phi = \left(\frac{\ell}{\mu_0 \mu_s S} + \frac{g}{\mu_0 S} \right) \times BS \\ \therefore B &= \frac{wi}{\frac{1}{\mu_0} \left(\frac{\ell}{\mu_s} + g \right)} = \frac{100 \times 3}{4\pi \times 10^{-7} \left(\frac{0.6}{3,000} + 0.001 \right)} \\ &= \frac{0.377 \times 10^{-3}}{0.0002 + 0.001} = 0.314 \text{ T} \end{aligned}$$

(7) 磁気回路のオームの法則より、

$$\begin{aligned} wi &= R_m \phi = \left(\frac{\ell}{\mu_0 \mu_s S} + \frac{g}{\mu_0 S} \right) \times BS \\ \therefore i &= \frac{B}{\mu_0 w} \left(\frac{\ell}{\mu_s} + g \right) = \frac{1.4}{4\pi \times 10^{-7} \times 100} \left(\frac{0.6}{3,000} + 0.001 \right) \\ &= 11,141 \times 0.0012 = 13.4 \text{ A} \end{aligned}$$

ギャップのない場合には、

$$\begin{aligned} wi' &= \frac{\ell}{\mu_0 \mu_s S} \times \phi = \frac{\ell}{\mu_0 \mu_s S} \times BS = \frac{B\ell}{\mu_0 \mu_s} \\ \therefore i' &= \frac{B\ell}{\mu_0 \mu_s w} = \frac{1.4 \times 0.6}{4\pi \times 10^{-7} \times 3,000 \times 100} = 2.23 \text{ A} \end{aligned}$$

したがって、ギャップがあるときは非常に大きな電流が必要になる。

(8) コイルの片側に発生する最大電磁力は、

$$F = w \times iBl = 30 \times 25 \times 0.8 \times 0.2 = 120 \text{ N}$$

したがって、最大トルクは、

$$T = 2 \times F \times r = 2 \times 120 \times 0.1 = 24 \text{ N} \cdot \text{m}$$

引用・参考文献

- 1) 広瀬敬一原著，炭谷英夫：電機設計概論 [4 版改訂]，電気学会，2007.
- 2) 天野寛徳，常広 譲：電気機械工学 改訂版，電気学会，1985.
- 3) 前田 勉，新谷邦弘：電気機器工学，コロナ社，2001.
- 4) 森本雅之：よくわかる電気機器，森北出版，2012.
- 5) 野中作太郎：電気機器 (I)，森北出版，1973.

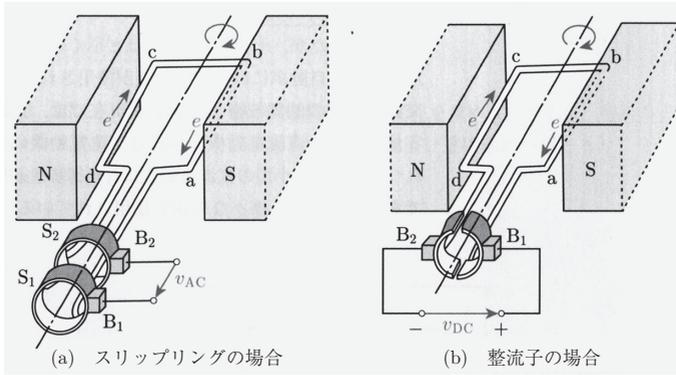
2章 直流機の構造と基本動作

直流機 (direct current machine : DC machine) は、回転などの機械エネルギーを直流の電気エネルギーに変換、また逆に直流の電気エネルギーを機械エネルギーに変換する回転電気機械 (電気機器) である。前者を直流発電機 (DC generator) , 後者を直流電動機 (DC motor) という。原理的には同じで、どちらにも使用できる。電力会社からの電力は、ほとんどが交流電力であるが、アルミニウムや銅の電界精錬、電車の駆動など、直流電力に変換して使用する場合も多い。特に直流電動機は、広い速度範囲で、無段階に精密に速度制御が可能であるため、容量の小さな家電や OA 機器、自動車の分野では幅広く用いられている。近年、パワーエレクトロニクスの進歩により交流電動機の制御が進歩し、容量の大きな電動機は直流電動機から交流電動機へ置き換えられつつある。しかし、速度制御の考え方の基本は直流機であるので、直流機の理解は、電気・機械エネルギー変換を学ぶ上で大切になる。本章では、直流機の基本原理と構造、基本特性について学ぶ。

2.1 直流機の原理と構造

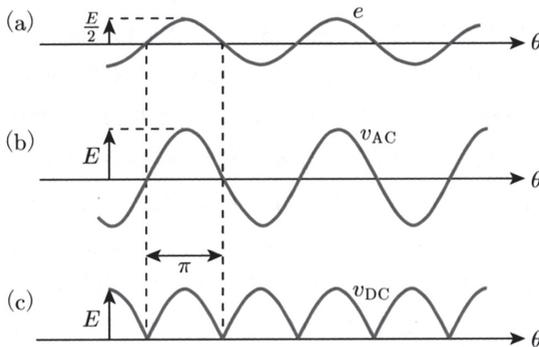
2.1.1 直流発電機の原理

1章で学習したように、直流磁界内でその磁界を横切るように導体を移動させると、導体内にはフレミングの右手の法則にしたがって起電力が発生する。図 2-1 のように、電磁石などを用いて磁場を作り、中央に長方形のコイルを置くことを考える。直流磁界は図の N から S に向かって平行に作られている場合、導体 cd の起電力 e は、

図 2-1 直流発電機の基本原理¹⁾

$$e = r\omega Bl \times \cos(\omega t) \text{ [V]} \quad (2.1)$$

となる。ただし、 r は回転軸から導体までの距離 [m]、 ω は回転するコイルの角周波数 [rad/s]、 l はコイルを構成する導体 cd および ab の長さ [m]、 B は磁界の強さ [T]、 t は時間 [s] を示す。横軸を $\theta (= \omega t)$ としたときの導体の起電力 e を図 2-2 (a) に示す。図 2-1 (a) に示すように、2つの導体 cd および ab で構成されるコイルの両端をスリップリングにつなぎ、ブラシ B_1 と B_2 間で電圧を取り出す場合を考える。 B_1 - B_2 間の電圧 v_{AC} は導体 2つの起電力 e の直列接続

図 2-2 導体の起電力および整流¹⁾

なので、図 2-2 (b) のように 2 倍 ($v_{AC} = 2e$) となる。これは単相交流 (AC) の発生原理である。次に交流を整流して取り出すために、図 2-1 (b) に示すように整流子を設け、コイルの両端を接続してブラシ B_1 と B_2 間で電圧を取り出す場合を考える。整流子はコイルとともに回転するため、コイルが 180° 回転するごとに切り替わり、図 2-2 (c) のように、整流された電圧が取り出される。

図 2-1 は、導体数が 2、コイル数が 1 の基本的な構成であるが、図 2-2 (c) のように正弦波を全波整流しただけで脈動が大きく、直流とはほど遠い。この脈動を小さくして出力波形を直流に近づけるため、直流発電機ではいくつかの工夫がなされる。まず磁界がコイルの進行方向に対して常に垂直となるように、磁石 (界磁極: **field pole**) の形状や配置を工夫する。この場合、式 (2.1) の $\cos(\omega t)$ は 1 なので導体の起電力は、

$$e = r\omega B l [V] \quad (2.2)$$

となる。これでも磁石の極が変わるところで起電力は 0 となり、リップルの大きさは変わらない。そこでさらに、通常、導体数およびコイル数を増やして用いる。図 2-3 (a) は電機子と呼ばれるコイルを納めている回転部 (回転子) に、コイルを納める 4 つの溝 (スロット: **slot**) を設け、導体を二層に巻いたものである。コイル数は 4、導体数は 8 である。導体 a_1 と $-a_1$ の起電力を e_1 、 a_2

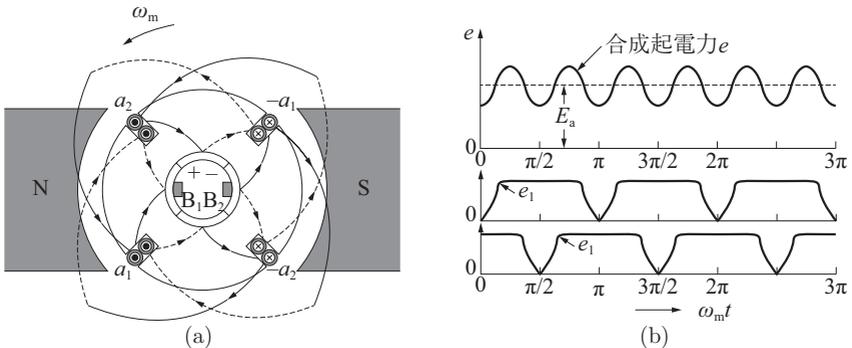
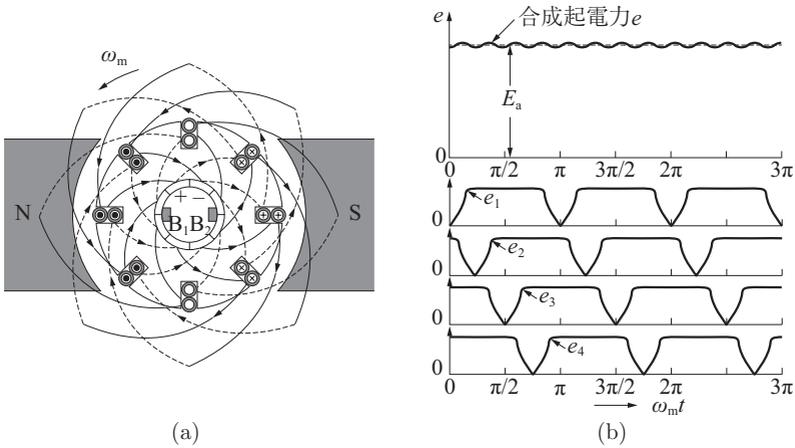


図 2-3 コイル数を 4 に増やした場合のブラシ間電圧²⁾

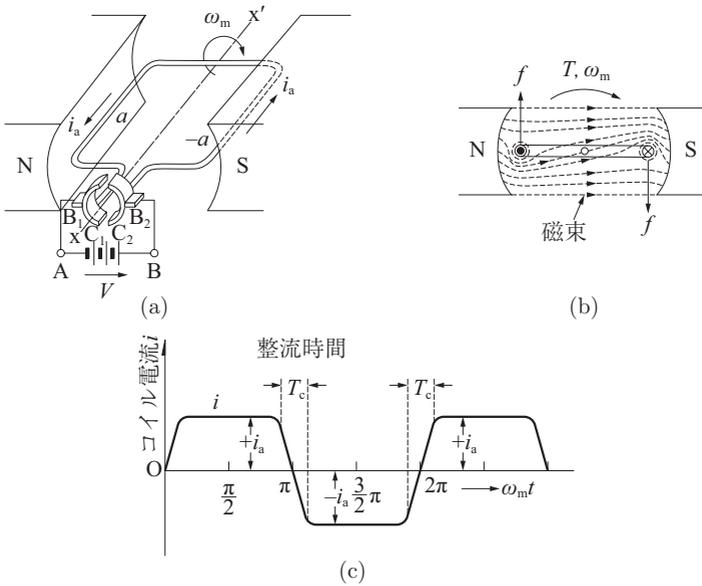
図 2-4 コイル数 8 の場合のブラシ間電圧²⁾

と $-a_2$ の起電力を e_2 とすると、コイルの位置が 90° ずれているため、図 2-3 (b) のように e_1 と e_2 の位相差も 90° となる。ブラシ B_1 – B_2 間の電圧 e は、 $-a_1 \rightarrow a_1 \rightarrow -a_2 \rightarrow a_2$ 、もしくは $-a_2 \rightarrow a_2 \rightarrow -a_1 \rightarrow a_1$ の総起電力となり、いずれも $2e_1 + 2e_2$ となり、図 2-3 (b) の上のグラフのように、出力電圧に対してリップルは小さくなる。図 2-4 は、コイル数 8、導体数は 16 とした場合である。各コイルの起電力の位相差のずれは 45° となり、リップルはさらに小さくなる。

2.1.2 直流電動機の原理

直流電動機の構造は直流発電機と同じである。発電機ではブラシの端子に電圧が発生するのでこれに負荷をつないで用いるが、電動機では直流電源が接続される。図 2-5 (a) はブラシに直流電源をつないだ例で、電源から流入する電流はブラシと整流子を介して、図の矢印の向きに導体に電流 i_a を流す。この結果、導体にはフレミングの左手の法則にしたがって、図 2-5 (b) のように、

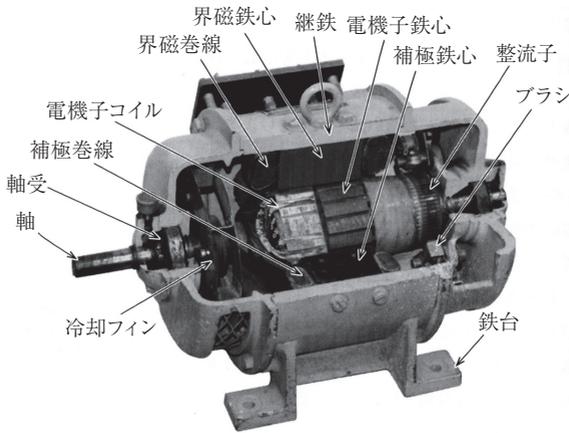
$$f = i_a B l [N] \quad (2.3)$$

図 2-5 直流電動機のトルク発生原理²⁾

の力が作用して、トルク T が生じ、回転する。導体に流れる電流の向きは整流子とブラシの作用で、図 2-5 (c) のように、コイルがブラシで短絡される時間（整流時間：commutating period）で $+i_a$ から $-i_a$ へ、もしくは $-i_a$ から $+i_a$ へ反転する。このため図 2-5 (b) のように、コイルの回転に関わらず N 極の下では導体の電流の方向はこちら向き、S 極の下では向こう向きとなり、トルクの働く方向は変わらない。トルクの脈動を小さくするためにコイルを増やすなどを行う点は、発電機同様である。

2.1.3 直流機の基本構造

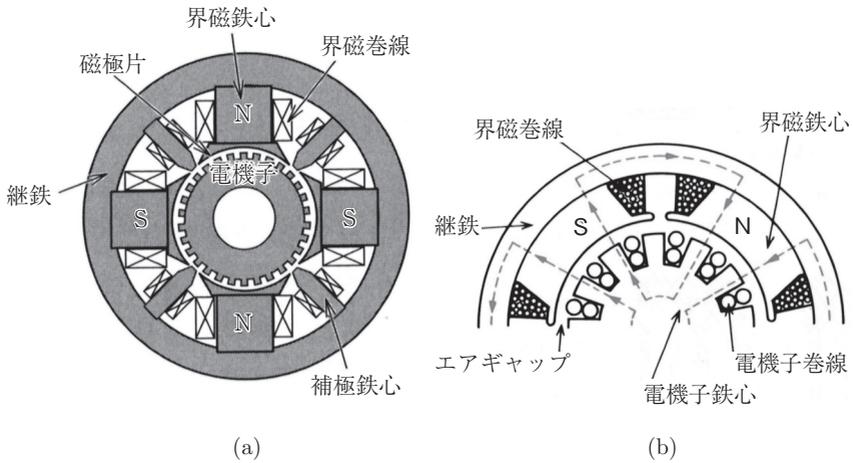
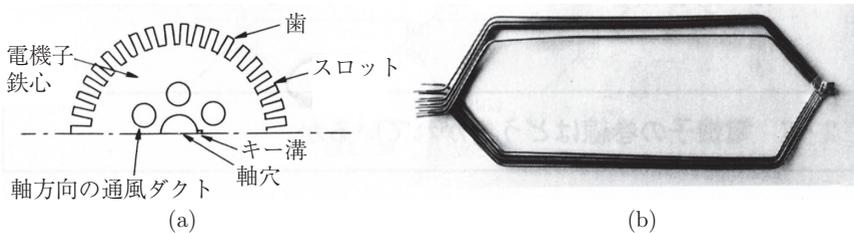
図 2-6 に直流機の構造を示す。直流機は、回転部（回転子：rotor）と静止部（固定子：stator）に分けられる。静止部は、界磁（field magnet）を構成する界磁巻線（field winding）、界磁鉄心（field core）、磁極片（pole piece）からなる磁極（field pole）と継鉄（yoke）が主要要素で、これ以外に軸受け、

図 2-6 直流機の構造³⁾

ブラシ (brush) , ブラシ保持器などからなる。回転部は電機子 (armature) と呼ばれ、電機子鉄心 (armature core) , 電機子巻線 (armature coil) , 整流子 (commutator) , 軸で構成される。

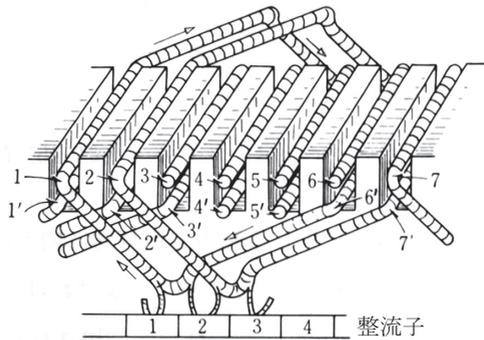
図 2-7 に磁極と磁器回路を示す。界磁巻線に界磁電流 (field current) を流すことで界磁鉄心に磁界が生じる (N 極)。この磁界は、磁極片でコイルを構成する導体と垂直に交わるように調整されたのち、エアギャップ (air-gap) を介して電機子へ入る。そして、再びエアギャップを介して S 極側の界磁へ入り、さらに継鉄を経て N 極の界磁へと戻る。界磁では、磁極片での鉄損を減らすため磁極鉄心と磁極片は厚さ 0.6 mm~0.8 mm 程度の銅板で成層構造となっている。補極 (inter pole) は界磁の間に設け、整流が良好となるように、磁場分布を調整する。

図 2-8 に電機子鉄心と電機子巻線を示す。電機子鉄心も、界磁鉄心同様に、厚さ 0.35 mm~0.5 mm のケイ素銅板を成層して用いる。また、電機子巻線を納めるためのスロットが多数設けられており、ここに 2 つの導体で構成されるコイルを複数重ねて納める。電機子巻線に発生する電圧や流れる電流は、整流子とブラシで整流される。

図 2-7 磁極と磁気回路^{4,5)}図 2-8 電機子鉄心と電機子巻線⁶⁾

2.2 直流機の電機子巻線法

ブラシ間に脈動の少ない直流を得るためには、電機子鉄心のスロットに多数のコイルをはめ込み、多数の整流子片に規則正しく接続する必要がある。また、ブラシ間に一定の電圧を保つためには、コイル片（ひとつのコイルに含まれる2つの導体）の間隔（ピッチ）を等間隔に、しかも極間隔（磁極のピッチ）に等しくして、コイルの起電力が互いに加わるように配置する必要がある。電機子巻

図 2-9 二層巻⁷⁾

線をスロットに納める方法として単相巻と二層巻 (**double-layer winding**) がある。二層巻は巻線の作成が容易なため、特に小さなものを除き、二層巻が用いられる。この構造を図 2-9 に示す。1~7 は上層、1'~7' は下層に配置されている。1-6' がひとつのコイルで、コイル片 1 は整流子 1 へ、コイル片 6' は整流子 2 へ接続されている。整流子 2 から、さらにコイル 2-7' を経て整流子 3 へとつながれている。また、図 2-4 などに示す接続は、巻線をたどっていくと、再び元の場所へ戻る。このような巻線を閉路巻という。直流機の巻線はすべて閉路巻である。

電機子巻線法には重ね巻 (**lap winding**) と波巻 (**wave winding**) がある。前者は並列巻で大電流・低電圧の取扱いに適しており、中型・大型の直流機に用いられる。後者は直列巻で、低電流・高電圧の取扱いに適しており、主に小形の直流機に用いられる。重ね巻は、図 2-9 のように、コイル 1-6' の巻き終わり (整流子片 2 へ戻ってくるコイル片 6') と、次のコイル 2-7' の巻き始め (整流子片 2 から出ていくコイル片 2) を同じ整流子片に接続する。このようにコイルを次々に整流子片に接続していくと、図 2-10 (a) のように、コイルが重なり合うようになる。波巻は、図 2-10 (b) のように、コイルが極から極へと一方向に進んで接続されていく巻線法で、その形が波に見えることから波巻と呼ばれる。