Chapter 2

2節 磁気作用の応用

1 電磁力と直流電動機

1 電磁力

図1(a)のように，磁界中に導体を置き，これに電流を流すと，導体は矢印の向きに動く。これは，電流と磁界との間に力Fが生じたためである。このように，電流と磁界との間に働く力を**電磁力**[❶]という。

磁界中にある導体に電流が流れると，磁束は，図(b)のように導体の上側で打ち消し合い，磁束の密度は小さくなり，導体の下側で加わり合って，磁束の密度が大きくなり，図(c)のような合成磁界ができる。磁力線は引っ張られたゴムのような性質があるので，密度の小さいほうへ導体は押され，矢印の向きに力を受けることになる。

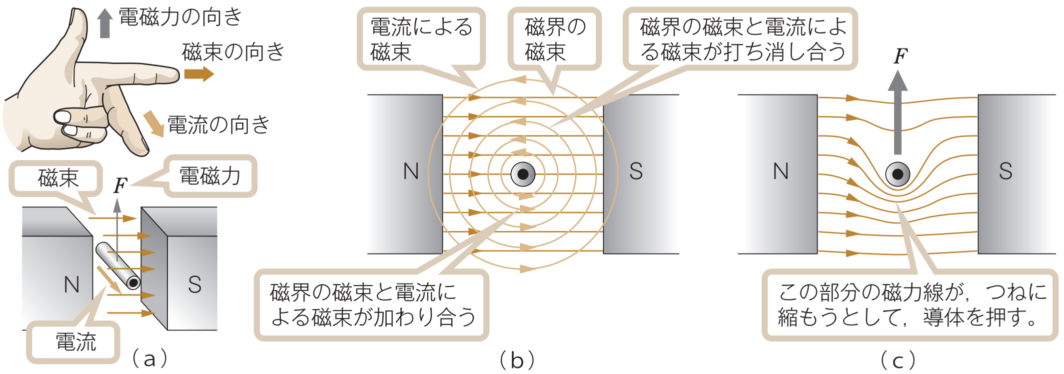


図1　電磁力

2 フレミングの左手の法則

電流の向きと磁束の向きから，電磁力の向きを知るには，次の方法がある。

図1(a)のように，左手の中指，人差し指，親指をたがいに直角に開き，**中指で電流の向き，人差し指で磁束の向きを指すと，親指の向きが電磁力の向きになる**。この関係を**フレミングの左手の法則**[❷]という。

3 電磁力の大きさ

図2のように，磁束密度B[T]の磁界中に，磁界と垂直な向きに長さl[m]の導体を置き，これに電流I[A]を流すと，この導体には，次の式で表される電磁力F[N]が働く。

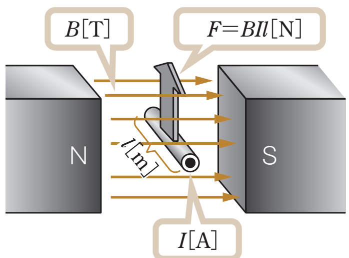


図2

❶ electromagnetic force

❷ Fleming's left-hand rule

●電磁力の大きさ　$F = BIl$ [N]　(1)

例題1　磁束密度0.4Tの磁界中に，長さ50cmの導体を磁界に垂直に置き，これに20Aの電流を流した。この導体に働く電磁力を求めよ。

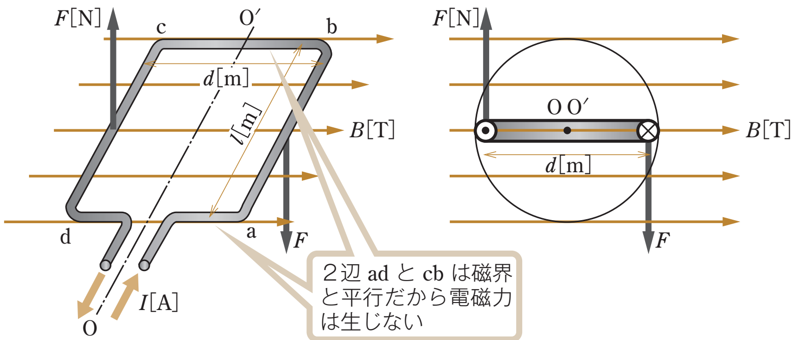
解答…　式(1)に，$B = 0.4$T，$I = 20$A，$l = 0.5$mを代入する。

$$F = BIl = 0.4 \times 20 \times 0.5 = 4\,\text{N}$$

問 1　図2で，$l = 0.5$m，$B = 2$Tのとき，5Nの力が働いたとする。このとき流れた電流の大きさはいくらか。

4　コイルに働く力

図3(a)のように，長さl[m]，幅d[m]のコイルを磁束密度B[T]の磁界中に置き，電流I[A]を流す場合，コイルに働く力について考えてみよう。



(a) 磁界内のコイル　(b)

図3　磁界中のコイルに働く電磁力

コイル辺abとcdに生じる電磁力の大きさF[N]は，$F = BIl$ [N]である。この力Fによって図(b)のように，OO′軸を中心に，たがいに大きさは等しいが，逆向きに働く力，すなわち偶力(ぐうりょく)が生じる。偶力が作用したとき生じる回転力を**トルク**[1]という。トルクTは，偶力をなす一方の力の大きさFと，2力間の距離dとの積で表され，単位には**ニュートンメートル**（単位記号**N·m**）が用いられる。すなわち，トルクTは次の式(2)で表される。

●トルク　$T = Fd = BIld$ [N·m]　(2)

また，コイルの巻数がNのときは，トルクもN倍になる。

問 2　図3において，磁束密度を2T，電流を12A，コイルの長さを20cm，幅を5cmとしたときのトルクを求めよ。

[1] torque
この原理を応用したものに直流電動機や電気計器などがある。

5　直流電動機の原理

直流電動機は，フレミングの左手の法則に従って回転する。図4は，直流電動機の原理を示したもので，磁界中に置かれた長方形のコイルに電流を流すと，コイルが回転する。

図(a)の向きに電流を流すと，コイル辺abとcdには，フレミングの左手の法則によって定まる向きに電磁力Fが生じ，これによって図(b)に示す向きにトルクTが働き，コイルは回転する。コイルが図(c)の位置にくると，整流子片S_1，S_2とブラシB_1，B_2の接触の関係が変わり，電流の向きが逆になる。このため，トルクは同じ向きに働き，コイルは回転し続ける。

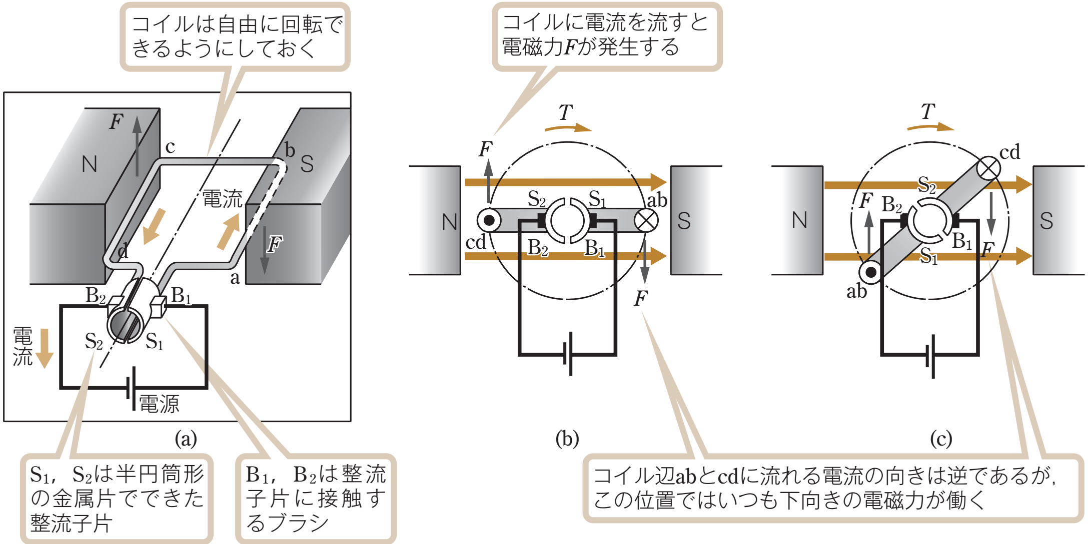


図4　直流電動機の原理

2　電磁誘導と直流発電機

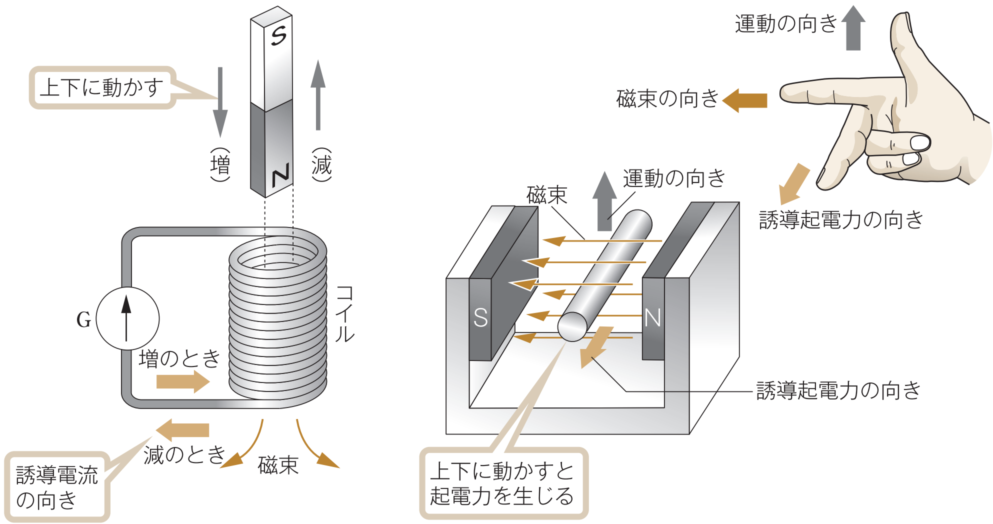
1　電磁誘導

図5(a)のように，コイルの中へ磁石を出し入れすると，その瞬間だけ検流計Gの指針が振れ，電流が流れたことがわかる。また，図(b)のように磁界中の導体を動かしても同じ現象が生じる。これは，コイルと交わる磁束の数が増減したり，導体が磁束を切ると，コイルや導体に起電力が誘導されるからである。この現象を**電磁誘導**❶といい，誘導される起電力を**誘導起電力**❷，流れる電流を**誘導電流**❸という。

2　誘導起電力の大きさ

図5(a)の実験で，磁石の動きを速くしたり，コイルの巻数を多くしたりする

❶ electromagnetic induction
❷ induced electromotive force
❸ induced current



（a）コイルの中で磁石を動かす　（b）磁界の中で導体を動かす

図5　電磁誘導による誘導起電力の発生

と，検流計Gの指針の振れが大きくなる。このことから，電磁誘導によって生じる起電力の大きさは，コイルと交わる磁束が単位時間に変化する割合とコイルの巻数との積に比例することがわかる。これを**電磁誘導に関するファラデーの法則**という。

いま，巻数Nのコイルと交わる磁束がt_1秒からt_2秒のΔt[1]秒間に，Φ_1[Wb]からΦ_2[Wb]の$\Delta\Phi$[Wb]だけ増加したとすれば，コイルに生じる誘導起電力[2]の大きさe[V]は，次の式(3)で表される。

●**コイルに生じる誘導起電力の大きさ**

$$e = N\frac{\Phi_2 - \Phi_1}{t_2 - t_1} = N\frac{\Delta\Phi}{\Delta t}\ [\mathrm{V}] \qquad (3)^{[3]}$$

問 3　巻数50のコイルと交わる磁束が，0.1秒間に0.02Wbだけ変化するとき，このコイルに生じる誘導起電力の大きさは何ボルトになるか。

3　フレミングの右手の法則

磁束の向きと導体の運動の向きから誘導起電力の向きを簡単に知るには，次の方法がある。

誘導起電力の向きは，図5(b)に示すように，右手の親指，人差し指，中指をたがいに直角に開き，**人差し指で磁束の向き，親指で導体の運動の向きを指すと，中指の向きが誘導起電力の向きになる**。この関係を**フレミングの右手の法則**[4]という。

問 4　図6のように，N極とS極の磁界中に導体を置いた。この導体を矢印の向きに動かしたとき，導体に生じる誘導起電力の向きは，①，②のどちらか。

❶　Δはデルタと読み，微小な変化分を表す。

❷　誘導起電力は，磁石による磁束の増減の変化をさまたげる方向に発生する。

❸　式(3)は，誘導起電力の大きさを表すもので，向きは考えていない。

❹　Fleming's right-hand rule

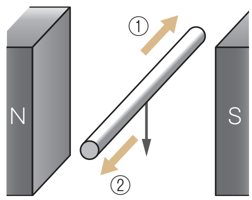


図6

4　直流発電機の原理

直流発電機は，フレミングの右手の法則に従って発電する。直流発電機と直流電動機は，同じ構造であり，電動機でコイルを回転させると発電機となり，外部からコイルに直流を流すと電動機となる。

図7に直流発電機の原理を示す。整流子片S_1，S_2と接続したコイルabcdを，外力によって回転させると，電磁誘導によって，コイルには図(a)の向きに起電力eが生じる。コイルが半回転すると，辺ab，辺cdの起電力の向きは，図(b)のように逆になるが，S_1，S_2とブラシB_1，B_2とは半回転ごとに交互に接触するので，B_1，B_2間には図(c)のように，つねに同じ向きの起電力が得られる。

しかし，このままでは起電力の大きさが時間とともに変動するので，実際の発電機では，コイルの数を増やして，変動の少ない起電力が得られるようにくふうされている。

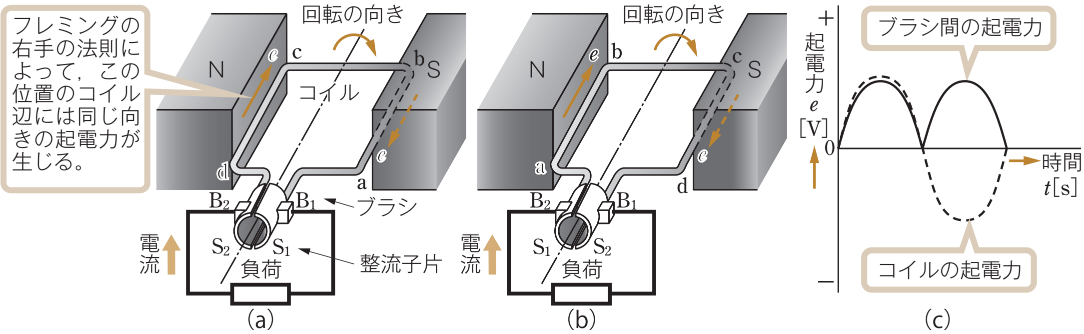


図7　直流発電機の原理

5　自己インダクタンス

図8のように，コイルに流れる電流を増減すると，コイルと交わっている磁束も増減し，コイルに起電力が生じる。この現象を**自己誘導**[1]といい，生じる起電力を**自己誘導起電力**という。

❶ self induction

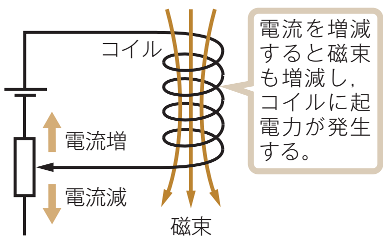


図8　自己誘導起電力

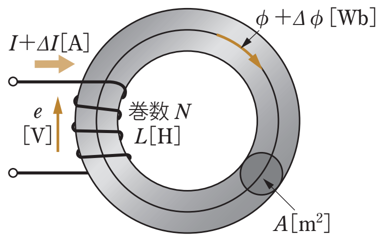


図9　自己インダクタンス

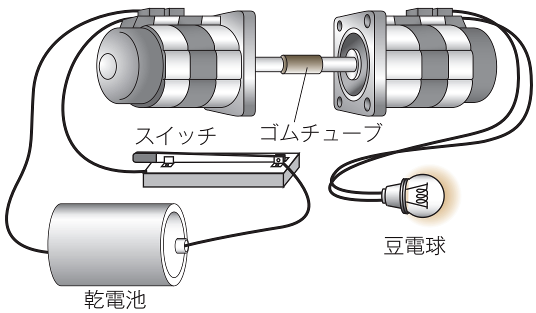
試してみよう　直流電動機は直流発電機になることを確認してみよう。

図10のように，乾電池，スイッチ，直流電動機(A)，直流電動機(B)，豆電球を導線で接続し，直流電動機(A)と直流電動機(B)をゴムチューブで接続する。

1 スイッチを閉じたとき，直流電動機(A)が回転する。その回転はゴムチューブで接続した直流電動機(B)に伝わり，豆電球が点灯することを確認する。

2 乾電池の向きを逆にすると，直流電動機(A)が逆転することを確認し，**1** と同様に豆電球が点灯することを確認する。

3 乾電池を２個直列に接続して回転数を増やし，豆電球の明るさが増すことを確認する。



スイッチを入れると直流電動機Ａが回転し，同時に直流電動機Ｂが回転して豆電球が点灯する。

図10

図９において，巻数Nのコイルに流れる電流がΔt[s]間にΔI[A]変化し，磁束が$\Delta \Phi$[Wb]変化したとすれば，自己誘導によって生じる自己誘導起電力e[V]は，次の式(4)で表される。

●**自己誘導起電力**
$$e = -N\frac{\Delta \Phi}{\Delta t} = -L\frac{\Delta I}{\Delta t}\ \text{[V]} \qquad (4)$$[1]

この式で，比例定数Lを**自己インダクタンス**[2]といい，単位には**ヘンリー**（単位記号H）が用いられる。式(4)から，１Hは１秒間に１Aの割合で電流が変化したとき，１Vの誘導起電力を発生する自己インダクタンスである。また，式(4)から，Lは次の式(5)で表される。

●**自己インダクタンス**
$$L = \frac{N\Delta \Phi}{\Delta I}\ \text{[H]} \qquad (5)$$

❶ 誘導起電力は，これによって生じる電流が，コイル内の磁束の変化をさまたげるような向きに発生する。これをレンツの法則という。したがって，誘導起電力eは，その向きを考慮すれば，

$$e = -N\frac{\Delta \Phi}{\Delta t}\ \text{[V]}$$

となり，負の符号をつけることになる。

❷ self inductance
自己インダクタンスは，コイルの形・巻数・材質などによって決まるコイル固有の値である。

インダクタンスの単位

H
［ヘンリー］

ヘンリー［Joseph Henry，1797～1878］

アメリカ合衆国の物理学者。ファラデーよりも１年早く誘導電流を発見したが，その発表が遅れたために，当時は，その業績が認められなかった。インダクタンスの単位ヘンリー[H]は，彼の名によっている。