

## 直流モータの回転原理と等価回路

(読んでほしい人：電気系の高専生と大学生)

2013/4/30 舞鶴高専 平地克也

直流モータの回転原理から等価回路の導出まで分かり易く解説しました。電気機器の授業を受けてない学生はこれを読んで直流モータの基本を理解して下さい。フレミングの法則さえ知っておれば理解できます。

### 直流モータの構造とフレミングの左手の法則

図1に直流モータの構造を示します。次の4つの部品から構成されています。

界磁(固定子): 磁界を作る。小型のモータでは永久磁石、大型のモータでは電磁石が使われる。  
電機子(回転子): フレミングの左手の法則で力を受けて回転する。図1では分かり易くするために1ターンだけ記載しているが、実際のモータでは数10~数100ターン巻かれている。

整流子: 電機子に電流を供給する。電機子に流れる電流の方向をタイミング良く切り替えて常に同一回転方向のトルクを得る。(次節で動作原理を詳しく説明する)

ブラシ: 回転する整流子に接触して電流を与える。図1では分かり易くするために板状に記載しているが、整流子との接触面積を増やすためにブラシ状の構造となっている場合が多い。

図2にフレミングの左手の法則で電機子の導体に力が働く様子を示します。電機子巻線の右の導体(導体B)は右の整流子片(整流子片B)に接続されており、ブラシを介して+電源につながっています。電機子巻線の左の導体(導体A)は左の整流子片(整流子片A)に接続されており、ブラシを介して-電源につながっています。よって、電流*i*は導体Bでは奥方向(左上方向)、導体Aでは手前方向(右下方向)に流れます。磁界*H*の方向はN極からS極の方向、即ち右方向です。したがって、フレミングの左手則により導体Bには下向きの力、導体Aには上向きの力が働きます。その結果図2では電機子は時計回り方向に回転します。

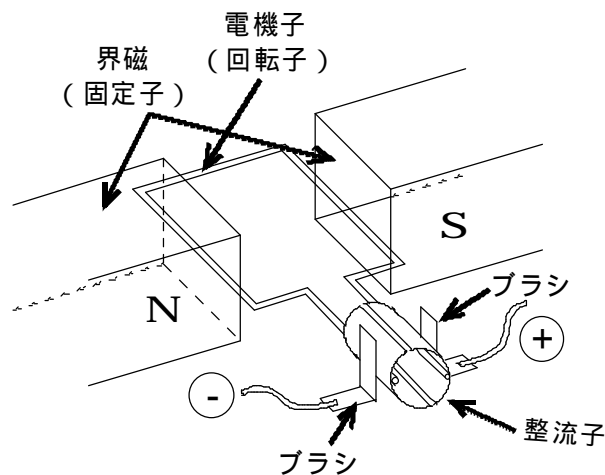


図1 直流モータの構造

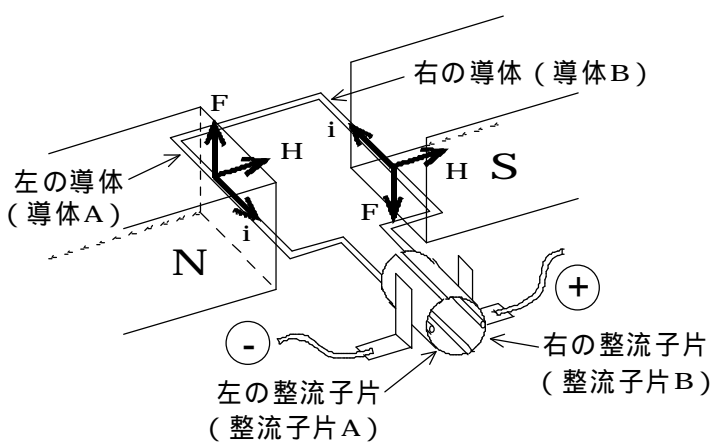


図2 直流モータに作用するフレミング左手則  
(Fは力、iは電流、Hは磁界)

## 直流モータの回転原理

直流モータの回転には整流子が重要な役割を果たします。整流子は電機子に流れる電流の方向をタイミング良く切り替えて常に同一方向に回転するように力の方向を制御します。図3にその様子を図示しています。

は図2の断面図です。電機子と界磁部分の断面図を左に、整流子部分の断面図を右に記載しています。整流子片 A は - のブラシに、整流子片 B は + のブラシに接触しています。よって、電機子の導体 A は手前方向、導体 B は奥方向に電流が流れます。その結果フレミングの左手則により導体 A には上方向、B には下方向の力が働いています。

は 45 度回転した時の図です。

は 80 度回転した時の図です。

は 100 度回転した時の図です。の時と比べて電流の方向が逆転しています。整流子片 A が + のブラシに接触し、整流子片 B が - のブラシに接触しています。その結果導体 A の電流が奥方向、導体 B の電流が手前方向になります。電流の方向が逆転することにより力の方向も逆転しています。その結果の時と同様に時計回り方向に回転を継続します。

は 135 度、は 180 度回転した図です。常に時計回りの方向に力が働いています。

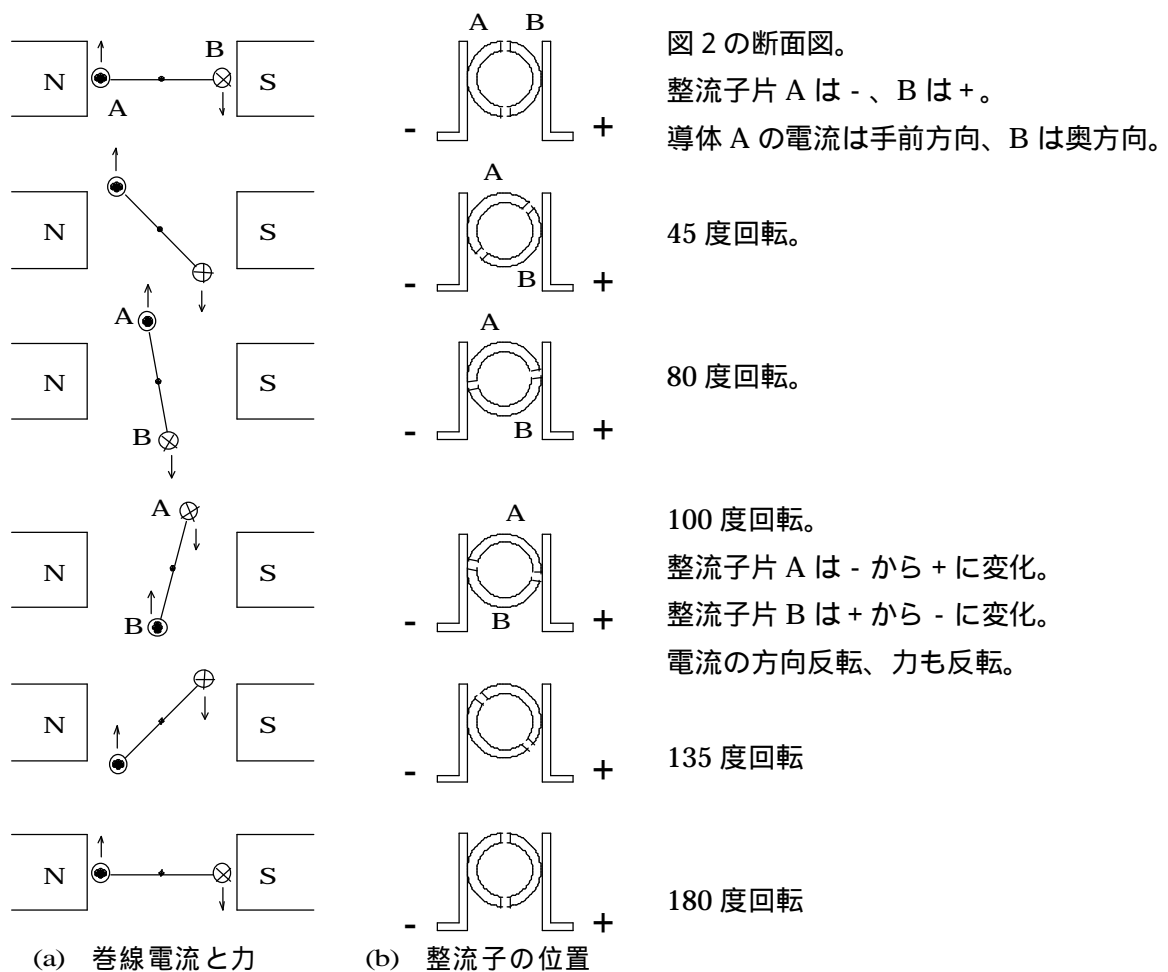


図3 直流モータの回転原理（整流子の役割）

このように、整流子の作用により電機子巻線に流れる力の方向がタイミング良く切り替わることに  
より同じ方向に回転を続けます。もしも整流子が無く、電機子電流の方向が変化しなければ90度回  
転したところで回転は止まってしまうでしょう。

### 速度起電力の発生原理とその計算

このように直流モータはフレミングの左手則により力を得て回転しますが、回転した結果右手則も  
働くようになります。電機子が回転していると言うことは即ち固定子が作る磁界の中を導体が移動し  
ていることとなります。これは即ちフレミングの右手則の作用条件に他なりません。図4に電機子が  
回転している図を示します。右の導体は下方向に速度  $v$  で移動しています。左の導体は上方向に速度  
 $v$  で移動しています。磁界  $H$  は左から右 (N から S) です。したがって図4に図示したように右手  
則により右の導体には手前 (右下) が +、奥 (左上) が - の電圧が発生します。左の導体には手前が  
-、奥が + の電圧が発生します。この電圧を速度起電力と言います。図4から分かるように、速度起  
電力の方向は電源電圧とは逆 (電流の流れを妨げる方向) であることが分かります。従って速度起電  
力のことを逆起電力とも言います。

次に速度起電力の大きさを計算します。図5に示すように、電機子の回転半径を  $R[m]$ 、電機子導  
体のうち磁界と鎖交している部分の長さを  $L[m]$  とします。導体の移動速度  $v[m/sec]$  は次の式で表さ  
れます。

$$v = 2 R f = (2 f) R = \omega R \dots (1)$$

ただし、 $f$  は 1 秒間の回転数。  $\omega$  は回転角速度で単位は  $[rad/sec]$ 。

界磁 (固定子) の作る磁束を  $\Phi$ 、図5に示すように界磁極の断面積を  $S$  とすると磁束密度  $B$  は、

$$B = \Phi / S$$

よって、フレミングの右手則により、導体に発生する電圧 (速度起電力)  $e$  は、

$$e = vBL \times 2 = \omega R (\Phi / S) L \times 2 \dots (2)$$

導体は左右 2 本あるので  $\times 2$  となります。整理して、

$$e = K_E \omega [V] \dots (3)$$

$$K_E = 2LR \Phi / S \dots (4)$$

よって、速度起電力  $e$  は回転角速度  $\omega$  に比例し、比例係数が  $K_E$  です。 $K_E$  は「速度起電力定数」  
と言い、式から分かるようにモータの形状と磁束の大きさによって決まる値です。 $K_E$  は「逆起電力  
定数」とも言います。

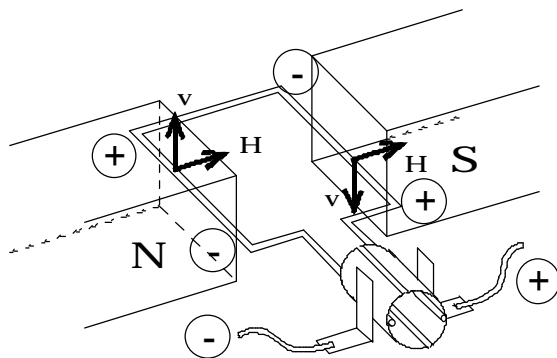


図4 速度起電力の発生

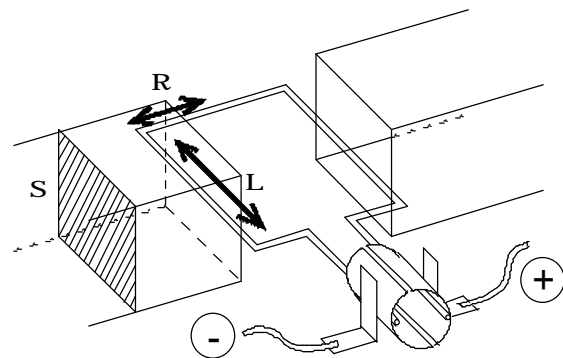


図5 電機子の寸法と界磁極の断面積

### トルクの計算式

次にモータのトルクを計算します。フレミングの左手則より、電機子導体に働く力  $F$  は、

$$F = iBL = i \left( \frac{L}{S} \right) L \cdots (5)$$

$i$  は導体に流れている電流です。

トルク は力  $\times$  半径なので、

$$= F \times R \times 2 = i \left( \frac{L}{S} \right) L \times R \times 2 \cdots (6)$$

導体は左右 2 本あるので  $\times 2$  となります。整理して、

$$= K_T i [\text{Nm}] \cdots (7)$$

$$K_T = 2LR \frac{L}{S} \cdots (8)$$

よって、トルク 電機子巻線電流  $i$  に比例し、比例係数が  $K_T$  です。 $K_T$  は「トルク定数」と言います。(4)式と比較すれば  $K_T$  は実は  $K_E$  と同じ値であることが分かります。

### 直流モータの等価回路

直流モータを使うためにはいろんな計算が必要ですが、等価回路を使うと必要な全ての計算を通常の電気回路の計算で簡単に行うことができます。電機子巻線のインダクタンス成分を  $L_a$ 、抵抗成分を  $R_a$  とすると電機子巻線は  $L_a$  と  $R_a$  と速度起電力  $e$  の直列回路と考えられます。よって、直流モータの等価回路は図 6 (a) となります。 $v_a$  は電源電圧、 $i_a$  は入力電流（電機子電流）です。3 頁に説明したように  $e$  の極性は  $v_a$  と逆方向（ $i_a$  を抑制する方向）となります。

速度起電力  $e$  は直流電圧なので図 6 (a) のように直流電圧源の記号で表せばいいのですが、モータの世界には面白い習慣があり、(b) のように  $e$  に出っ張りのついた面白い記号で表します。出っ張りは整流子をイメージしているのかもしれませんが。

直流モータは定常状態では電流  $i_a$  は一定の値なので  $L_a$  には電圧は発生しません。よって、定常状態では  $L_a$  は無視して(c)の回路で表します。また、定常状態では  $v_a$ 、 $i_a$ 、 $e$  は一定の値なので大文字で  $V_a$ 、 $I_a$ 、 $E$  と表します。

直流モータで駆動している電気自動車を考えます。電気自動車は通常はモータで車輪を回すのですが、電気自動車が坂道を下る時は車輪がモータを回すこととなります。その場合はモータの回転角速

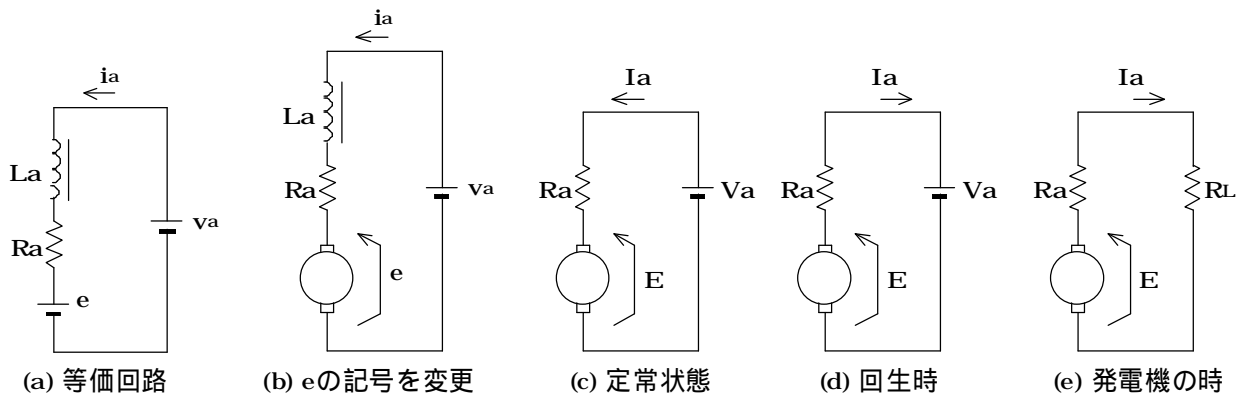


図 6 直流モータの等価回路

度  $m$  が大きくなり、(3)式から分かるように速度起電力  $E$  が大きくなり、 $E > V_a$  となります。その場合は(d)に示すように  $I_a$  の方向が逆になります。これはモータが発電機として動作して電気自動車の電池を充電していることを意味します。このような動作をモータの回生動作と言います。まとめると次のようになります。なお、回生動作に対して通常の動作を「力行動作」と言います。

回生動作時： $E > V_a$  よって、 $I_a$  は左から右

力行動作時： $E < V_a$  よって、 $I_a$  は右から左

通常の直流発電機の等価回路は(e)となります。 $R_L$  は負荷です。発電機とモータは同じものであり、等価回路は同じであり、電流の方向が変わるだけです。

### 直流モータに成立する式

図 6 (b)と(c)から次の式が成立します。

$$V_a = R_a I_a + L_a \frac{di_a}{dt} + e \quad (\text{過渡時}) \quad \dots (9)$$

$$V_a = R_a I_a + E \quad (\text{定常時}) \quad \dots (10)$$

この式に加えて (3)式 (速度起電力の式) と(7)式 (トルクの式) が直流モータの基本式となります。(3)式と(7)式は定常状態では変数を大文字にして次のように記載します。

$$(3)式より \quad \text{速度起電力 } E = K_E \quad m[V] \quad \dots (11)$$

$$(7)式より \quad \text{トルク } T = K_T I_a [Nm] \quad \dots (12)$$

以上