講座

電動機の技術　第２回
－電動機の基礎技術－

森本雅之*

1　はじめに

本講座の第２回として，今回は，電動機全般の基礎について説明する。電動機の基本となる４つの力，回転磁界などの電磁気学的なこと，および，トルク，電動機の動力学などの力学的なことについて説明する。

2　電動機を支配する４つの力

電動機は，電磁気現象を利用して電気エネルギを運動エネルギに変換する。まず，電動機の基本となる４つの力について述べる。それは，２つの起電力と２つの電磁力である。

2.1　変圧器起電力

コイル（導体）と磁束が鎖のように互いに交差した状態にあるとき，コイルと磁界が鎖交しているという。コイルと磁束が鎖交しているとき，磁束の大きさが変化すると，電磁誘導によりコイルに誘導起電力が生じる。

電磁誘導によってコイルに生じる起電力を誘導起電力という。誘導起電力の大きさは，磁束の時間的な変化に比例する。これがファラデーの法則である。巻数 N のコイルに鎖交する磁束 ϕ が時間 t により変化したとき，電磁誘導による誘導起電力 e は次のように表される。ここで，Ψ は鎖交磁束数である。

$$e=-\frac{d\Psi}{dt}=-\frac{d(N\phi)}{dt}=-N\frac{d\phi}{dt}\quad [\mathrm{V}] \tag{1}$$

磁束の時間的な変化により生じる誘導起電力は，交流電流により発生する磁界と鎖交するコイルでは必ず発生する。変圧器はこのような交流電流による誘導起電力を利用している。そこで，この時間変化による起電力を変圧器起電力とよぶ。

導体（たとえば銅の板）に交流磁界が鎖交していると，導体に誘導起電力が発生する。導体なので，起電力により導体内部を電流が流れる。電流は**図１**に示すように，導体内の適当な経路を流れて一周する。電流の流れる経路は定まらないが，電流は同心円状に流れる。この形状から，うず電流と呼ぶ。

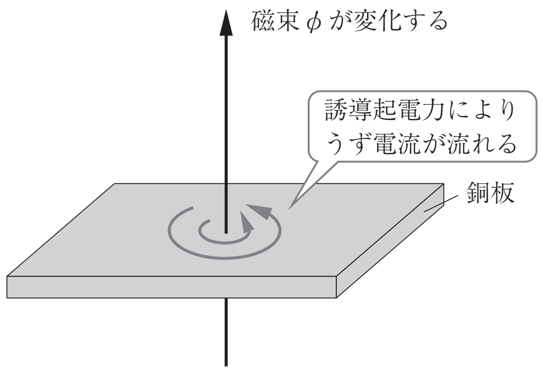


図１　うず電流

2.2　速度起電力

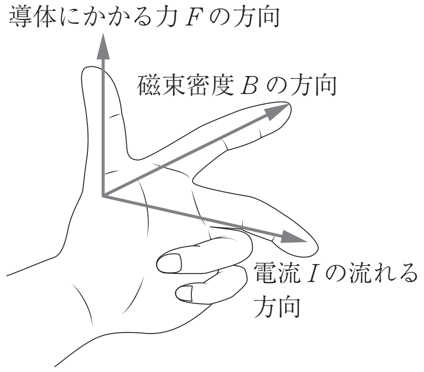
導体が磁界中を運動するとき，導体に起電力が誘導される。磁束密度 B［T］の磁界中を長さ l［m］の導体が磁束と直角の方向に v［m/s］の速度で運動するとき，導体に誘導される起電力 e［V］は次のように表される。

$$e=Blv\quad [\mathrm{V}] \tag{2}$$

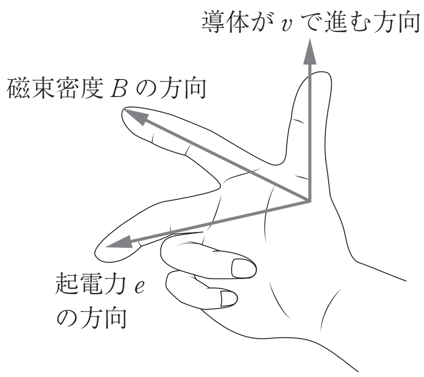
このときの起電力の方向は，**図２**(b)に示すフレミングの右手の法則で示される。右手の親指，人差し指，中指を互いに直角になるように開き，親

＊ Masayuki Morimoto　モリモトラボ

指を導体の運動の方向に，人差し指を磁界の方向に向けたとき，中指の方向が起電力の方向を示す。このように，運動により誘導される起電力は運動の速度に比例するので，速度起電力とよばれる。



(a)　左手の法則



(b)　右手の法則

図 2　フレミングの法則

2.3　電磁力

磁界中にある長さ l[m] の導体に電流を流すと，導体に電磁力が働く。磁界の磁束密度を B［T］，電流を I［A］とすると，電磁力 F［N］は次のように表される。

$$F = BIl \quad [\mathrm{N}] \tag{3}$$

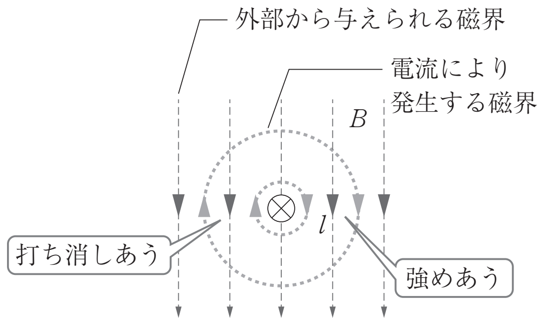
このときの電磁力の方向は，図 2(a)に示すフレミングの左手の法則で示される。左手の親指，人差し指，中指を互いに直角になるように開く。人差し指を磁界の方向に，中指を電流の方向に向けたとき，親指の方向が発生する力の方向を示す。この力は，電流と磁束により発生する力なので電磁力とよぶ。ローレンツ力ともいう。

2.4　マクスウェル応力

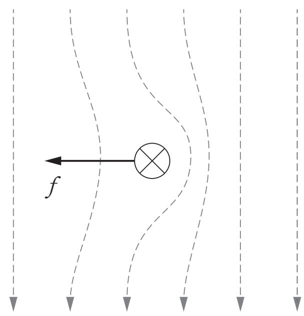
マクスウェル応力は，磁束の分布により発生する力である。**図 3**(a)のように，磁界が一様のとき磁束の分布を表す磁力線は直線で示される。また，電流により発生する磁界の磁力線は同心円状に発生する。この二つの磁界の磁力線は電流の左側では互いに逆向きで打ち消しあい，右側では同じ向きなので強めあう。したがって，合成された磁界の磁力線は図 3(b)のように右側へ膨らんで密になる。

このような状態では，磁力線はゴムのように働く。つまり，曲がっている磁力線は，張力でまっすぐになろうとする力を発生する。その結果，導体には左向きの力が発生する。これをマクスウェル応力と呼ぶ。

電動機では，導体は鉄心の内部に配置されている。このとき，マクスウェル応力により鉄心に力が働く。この力を鉄心トルクとよぶこともある。また，リラクタンストルクはマクスウェル応力を利用して発生する。



(a)　二つの磁界



(b)　合成磁界

図 3　マクスウェル応力

3　トルク

電動機の出力は回転運動である。直線運動では運動は，力 F を使って表すが，回転運動では，直線運動の力 F に相当するトルクを使って表す。

図 4 に示すように電動機の軸にアームを取り付

け，その先にはかりを取り付けて，電動機を回転させようとすると，はかりに力がかかる。このとき，軸とアームがゆるくはめ合わされていて，軸がアームの取り付け部と摩擦しながら回転しているとすると，電動機が発生する力で回転している。この力をはかりで測れば，力の測定はできると考えられる。しかし，はかりの取り付け位置が変わると，すなわちアームの長さが変わると，はかりの読みが異なってくる。てこの原理で，アームの長さとはかりの読みは反比例してしまうからである。そこで，アームの長さ r［m］とはかりの読み F［kgf］の積 Fr を用いることにすれば，取り付け位置に関係なく一定値になる。これをトルクという。はかりの指示値をそのまま用いると重力単位系［kgf］なので，直接掛け算するとトルクは重力単位系のキログラムメートル重［kgf m］により表されることになる。トルク T の単位はSI 単位系ではニュートンメートル［N m］であり，次のように表される。

$$T = Fr \qquad (4)$$

1Nm のトルクとは図4において，$r = 1$m のとき，1N の力がかかる（または $r = 0.5$m で2N の力）ことである。また，1kgfm のトルクとは，$r = 1$m で1kgf の力がかかることである。なお，重力単位系で表したトルクとSI 単位系で表したトルクには次の関係がある。

$$1\text{kgfm} = 9.8\text{Nm} \qquad (5)$$

電動機の出力とは，力学的には仕事率（1秒間あたりの仕事量［J/s]）である。仕事は，（力）×（距離）で表される。回転運動なので，円周が距離となるので，出力 P［W］は次のようになる。ここでは，毎分回転数 N［min^{-1}］を用いている[1]。

$$P = \frac{2\pi}{60} T\,N\ [\text{J/s}] = 0.1047\,T\,N\ [\text{W}] \qquad (6)$$

実用的には毎分回転数［min^{-1}］が多く使われているが，角回転数 ω［rad/s］を用いると動力 P［W］は T［N］と ω の積で表される。

$$P = T\omega \quad [\text{W}] \qquad (7)$$

なお，電気機器では回転数を回転速度または単に速度と呼ぶことがあるので，注意を要する。

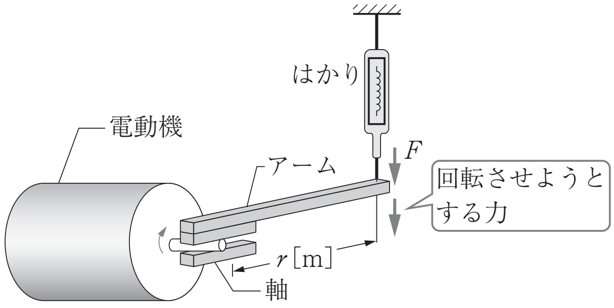
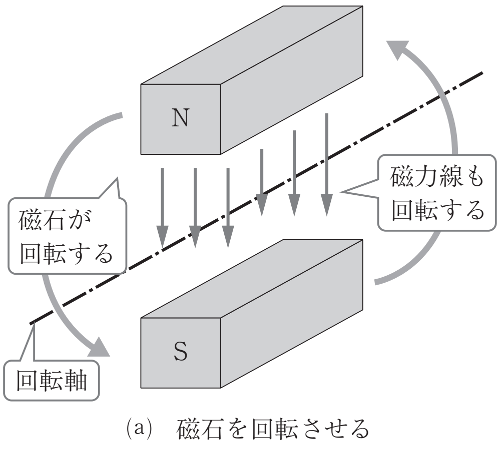


図4　トルクとは

4　回転磁界

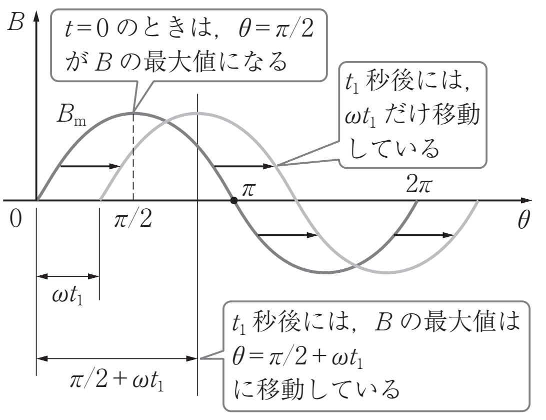
交流電動機の基本は回転磁界である。回転磁界とは，**図5** に示すように永久磁石のN，S極の中間を回転軸として回転させたときの内部の磁界である。いま角速度 ω［rad］で磁石を回転させたとする。このとき，磁石の回転にともなって分布している磁界も回転する。回転を図(b)に示すように θ 方向に直線的に移動することと考えると，時刻の経過とともに磁界の分布も θ 方向に移動することになる。

時刻に応じて磁界の分布が移動することとは，つまり，$t = 0$ のとき正弦波の最大値 Bm は $\theta = \pi/2$［rad］= 90度の位置にある。しかし，t_1秒後には，正弦波の最大値 Bm は $\theta = \pi/2 + \omega t_1$［rad］の位置に移動することである。時刻 t に応じて最大値 Bm の位置 θ も変化する。つまり，回転するのである。これを回転磁界とよぶ。



(a)　磁石を回転させる

[1] 常用単位として［rpm］(Revolution Per Minute) = [min^{-1}］も使われる。



(b)　回転磁界をまっすぐにみてみる

図5　回転する磁石

三相コイルに三相交流電流を流すと回転磁界が生成される。いま，**図6**のような三相コイルを考える。a，b，c 相のコイルはそれぞれ空間的に2π/3［rad］＝120度ずつ離れて巻線されている。各相のコイルには三相交流電流が流れているとする。なお，コイルの巻線方向は図のように⊗は紙面に向かっており，⊙は紙面から出てゆくように巻いてある。

このとき，各相のコイルによって図6の θ の位置に生じる磁束密度 B は，各相のコイルにより発生する磁束密度の和になる。

$$B=B_a+B_b+B_c$$
$$=B_0 sin\theta+B_0\sin\left(\theta-\frac{2}{3}\pi\right)+B_0 sin\left(\theta-\frac{4}{3}\pi\right) \quad (8)$$

ここで，B_0は各相のコイルで生じる磁束密度である。

(8)式は，θ の位置の磁束密度は，それぞれのコイルと θ の位置の関係から決まることを示している。一方，各コイルの磁束密度は，コイルを流れる交流電流により発生する。各相に流れる三相交流電流を次のように表す。

$$i_a=I_m cos\omega t$$
$$i_b=I_m\cos\left(\omega t-\frac{2}{3}\pi\right)$$
$$i_c=I_m\cos\left(\omega t-\frac{4}{3}\pi\right) \quad (9)$$

コイルの位置が，式(8) のように空間的に分布しているので，式(9)の電流により，θ の位置に生じる磁束密度は次のように表される。ここで，Bm は各相の磁束密度の最大値である。

$$B_a=B_m cos\omega t\ sin\,\theta$$
$$B_b=B_m\cos\left(\omega t-\frac{2\pi}{3}\right)\sin\left(\theta-\frac{2\pi}{3}\right)$$
$$B_c=B_m\cos\left(\omega t-\frac{4\pi}{3}\right)\sin\left(\theta-\frac{4\pi}{3}\right) \quad (10)$$

各相のコイルが発生する磁束密度は空間的位置 θ と時間 t によって変化する。θ の位置に生じる磁束密度 B は各相が発生する磁束密度の和であり，次のように表される。

$$B=B_a+B_b+B_c=\frac{3}{2}B_m\sin(\theta-\omega t) \quad (11)$$

(11)式は，2π/3［rad］間隔で配置された三相コイルの発生する磁束密度は大きさが各相の磁束密度の3/2倍であり，空間的に角速度 ω で回転する正弦波であることを示している。すなわち回転磁界が生じる。磁界の回転の様子を図式的に**図7**に示す。

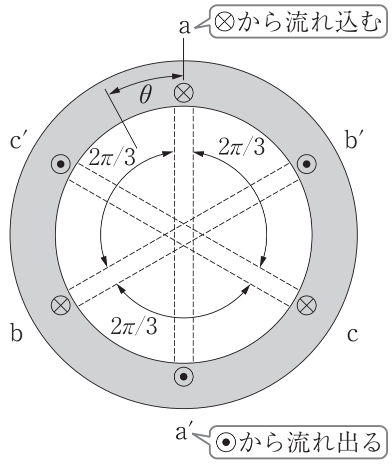


図6　三相コイル

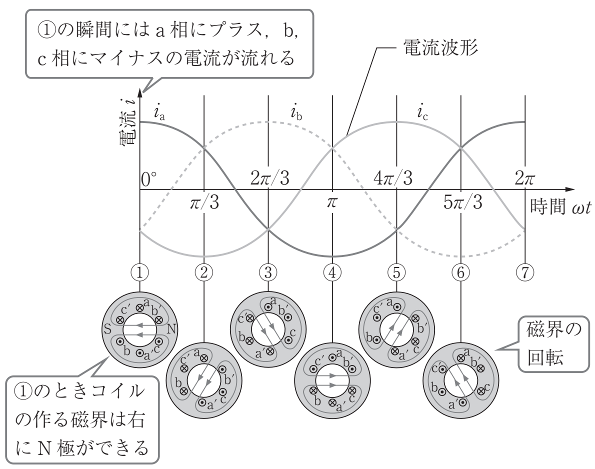


図7　回転磁界

5　電動機の効率と損失

5.1　効率

電動機は電気エネルギを運動エネルギに変換するエネルギ変換器である。入力した電気エネルギが，どの程度，運動エネルギに変換して出力できるかの割合を示すために効率が使われる。効率 η は入力 P_{in}（W）に対する出力 P_{out}（W）の比率である。入力は出力 P_{out} と損失 P_{loss} の合計である。

$$\eta=\frac{P_{out}}{P_{in}}=\frac{P_{out}}{P_{out}+P_{loss}} \tag{12}$$

入力と出力を実際に測定して求めた効率を実測効率という。大型機など実測が難しい場合は，損失を計算により求めて効率を算定する。これを規約効率という。

効率と損失の関係を**図8**に示す。電動機の主な損失には銅損，鉄損および機械損がある。銅損は電気的な損失，鉄損は磁気的な損失である。また，機械損は軸受けの摩擦，回転運動の空気抵抗（風損）などである。このほか，電動機の種類によっては励磁回路の入力電力なども損失に算定することがある。

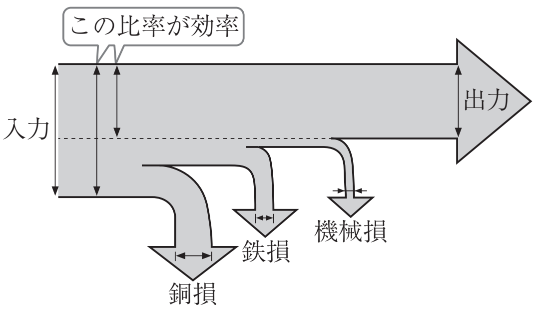


図8　損失と効率

5.2　損失

電動機の損失の大半は銅損と鉄損である。まず銅損について説明する。電動機は巻線に電流を流すことが基本である。巻線には抵抗率の小さい銅，アルミなどを用いる。抵抗のある巻線に電流を流すとジュール熱が発生する。ジュール熱 W_c は次のように表される。

$$W_c=I^2r\quad[\mathrm{W}] \tag{13}$$

ここで，I は巻線電流，r は巻線抵抗である。主に銅が使われる巻線で生じる損失なので銅損と呼ばれる。

銅の抵抗率は温度により変化する。銅損を比較評価するためには，導体の温度を決める必要がある。そこで，次に示すように抵抗値の温度換算を行う。t［℃］で測定した抵抗値（実測値）r_t を基準温度の T［℃］の基準抵抗値 r_T に換算する。

$$r_T=r_t\,\frac{235+T}{235+t} \tag{14}$$

なお，式中の235は銅線の場合の係数であり，アルミ線の場合，225を用いる。

鉄損は，電動機の鉄心の磁束変化により生じる電力の損失である。磁気特性を示すヒステリシスループにより囲まれる面積が鉄損に相当する。ヒステリシスループを描くときには，磁界の方向がプラスマイナスに変化する。これにより生じる損失をヒステリシス損失という。

また，鉄心内部の磁束の変化により電磁誘導による起電力が生じるが，鉄心には導電性があるので鉄心内部にうず電流が流れる。うず電流が流れると，鉄心自体の抵抗によりジュール熱を発生する。これをうず電流損失という。

鉄損 W_i は，ヒステリシス損失 W_h とうず電流損失 W_e からなり，次のように表される。

$$W_i=W_h+W_e=K_hfB_m^{\,2}+K_ef^2B_m^{\,2} \tag{15}$$

ここで，K_h はヒステリシス損失係数，K_e はうず電流損失係数である。

ヒステリシス損失は使用する電磁鋼板[2]のグレードにより，ほぼ決まってしまう。一方，うず電流損失は電動機の設計や構成により小さくすることができる。うず電流損失を小さくするため，鉄心には積層構造を用いる。**図9**に示すように，互いに絶縁された薄い鉄板を磁束の向きと平行になるように積層した積層鉄心を用いる。これにより磁束と直角方向のうず電流の経路が短くなるので，うず電流損失が低下する。なお，直流機の界磁などの直流磁界の場合，積層でなく，塊状鉄心を用いることもある。

[2] 電気機器用に磁気特性を高めた鋼板。ケイ素鋼板。

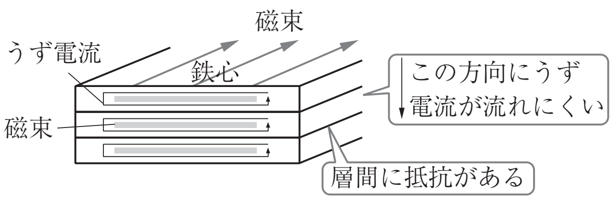


図 9　積層鉄心

6　電動機運転の動力学

電動機が一定速度で運転しているということは，電動機の発生トルクと負荷のトルクが等しいことを示している。**図10**に示すように，電動機のトルク T_M と負荷トルク T_L は次のような関係になる。

$T_M > T_L$ のとき，加速する。

$T_M = T_L$ のとき，その回転数で運転を継続する。

$T_M < T_L$ のとき，減速する。

このように電動機の回転数は負荷のトルクと電動機のトルクの成り行きで決まるといっても過言ではない。電動機のトルクや回転数を積極的に制御しない場合，負荷の特性を熟知することが重要である。しかし，電動機を制御すれば負荷にかかわらず，運転点（トルクまたは回転数）を望みの値に調節することができるようになる。

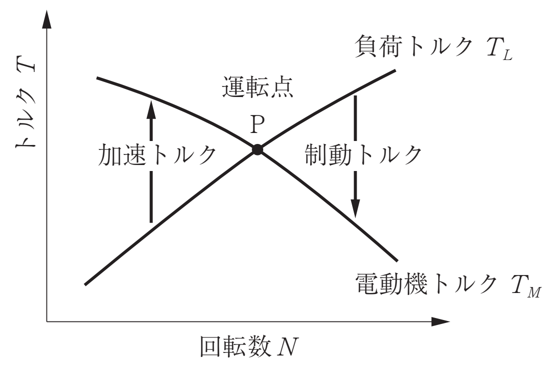


図 10　電動機の運転点

電動機が駆動する負荷には，それぞれ特有のトルク特性がある。トルク特性とは負荷をその回転数で回転させるために必要なトルクを示したものである。N-T 曲線とも呼ばれる。**図11**に各種のトルク特性を示す。

定トルク特性の負荷は回転数が変化しても負荷トルクは一定である。電動機の出力は（トルク）×（回転数）なので，電動機出力は回転数に比例する。巻き上げは重力負荷なので，この定トルク特性である。ただし，積荷の重さによりトルク曲線は上下に変化する。

粘性負荷特性は回転数に比例して負荷トルクが変化する。そのため，電動機出力は回転数の２乗に比例する。代表的な例は，摩擦により生じる抵抗である。摩擦による抵抗は水や空気などの流体の粘性力によるものが多いので，粘性抵抗負荷と呼ぶ。

２乗トルク特性は回転数の２乗に比例して負荷トルクが変化する。このトルク特性はファン，ポンプなどの流体機械に多く見られる。２乗トルク特性の負荷は電動機出力が回転数の３乗に比例する。そのため回転数を低下させることによる省電力の効果が大きい。

定出力特性はトルクが回転数に反比例する特性である。高速になればなるほどトルクが小さくなる。電動機出力は回転数にかかわらず一定である。自動車，電車などの走行体の走行トルクである。また，巻き取りで同じ張力で巻き取る場合，巻き始めはリールの径が小さいのでトルクは小さいが，巻き取りが進むとリールの径が大きくなるので，(力)×(半径) であるトルクが大きくなってしまう。このような場合，同じ張力で巻き取るためには，回転数を下げることになり，電動機の出力を一定に制御することになる。なお，定出力特性は，計算上は回転数がゼロではトルクが無限大になり，トルクがゼロでは回転数が無限大になってしまう。通常はトルク制限および回転数制限を設ける。

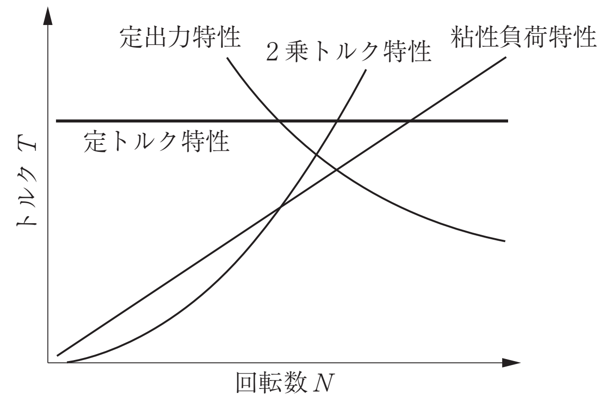


図 11　各種負荷のトルク特性

電動機の運転を運動方程式で表すと次のようになる。

$$T_M - T_L = J\frac{d\omega}{dt} \qquad (16)$$

ここで，J は慣性モーメント，ω は角速度である。

この式の右辺の$\frac{d\omega}{dt}$は角速度の時間微分である。つまり，回転数の変化する速度（角加速度）を表している。

慣性モーメントは直線運動の質量に相当する量である。慣性モーメント J は回転体の半径 r と質量 m から次のように定義される。

$$J = mr^2 \quad [kgm^2] \qquad (17)$$

巻き取りのように直線運動と回転運動の変換を行う場合，全体の慣性モーメントを次のように考える。いま，**図12**に示すようにドラムによりロープにつるされた質量 m の物体を巻き上げることを考える。物体は上下方向に直線運動をしている。このとき，システム全体の運動エネルギ Uk はドラムの回転運動と質量 m の物体の直線運動の合計なので次のようになる。

$$U_k = \frac{1}{2}J_D\omega^2 + \frac{1}{2}mv^2 \qquad (18)$$

ここで，J_D はドラムの慣性モーメントである。なお，電動機の慣性モーメントはドラムに比べははるかに小さいと考え，無視する。質量 m の移動速度 v はドラムの半径を r とするとドラムの周速となるので $v = r\omega$ と表すことができる。これを用いると運動エネルギは次のようになる。

$$U_k = \frac{1}{2}\omega^2(J_D + r^2m) \qquad (19)$$

したがって，全体の慣性モーメント J は次のように表すことができる。

$$J = J_D + r^2m \qquad (20)$$

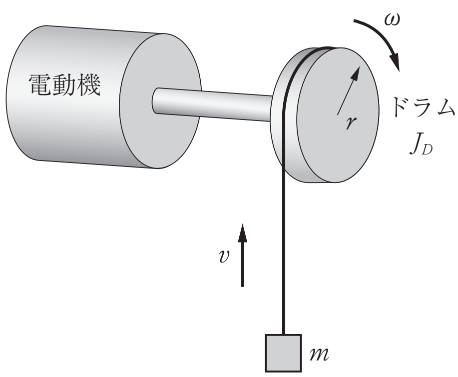


図 12　ドラムで巻き上げる場合

7　おわりに

本稿では電動機を理解するための基礎となる事項を解説した。さらに理解を深めたい場合，電気機器，および電動力応用の専門書を参照していただきたい。なお，拙著，「よくわかる電気機器」，「入門モータ制御」（いずれも森北出版）も参考になると思われる。

本講座の掲載予定を以下に示す。

1　電動機を理解するための電磁気と電気回路（2022年４月号掲載）
2　電動機の基礎技術（本号）
3　直流電動機（2022年８月号掲載予定）
4　直流電動機の制御
5　誘導電動機
6　かご型誘導電動機の駆動と制御
7　巻線型誘導電動機
8　同期電動機
9　電動機の絶縁
10　電動機技術の動向