

# 8

## アクチュエータ

actuators

### 8・1

#### アクチュエータの種類と性質

types and features of actuators

アクチュエータとは、電気、流体、熱量などから動力を得て、回転運動や直進運動などの機械的出力に変換して負荷を駆動する要素であり、機械システムの運動の源である。

#### 8・1・1

#### 従来のアクチュエータ

conventional actuators

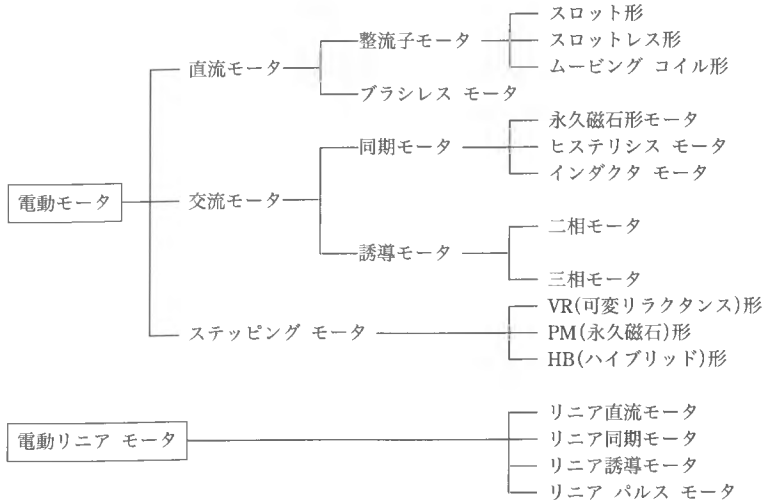
現在、おもに産業に用いられているアクチュエータは、その動力源によって、以下の3種類に分類される。

- ① 電動アクチュエータ (electric actuator)
- ② 油圧アクチュエータ (hydraulic actuator)
- ③ 空気圧アクチュエータ (pneumatic actuator)

##### (1) 電動アクチュエータ

電動アクチュエータは、電磁現象を利用して、電力を直接、機械的出力に変換するものである。長所としては、① 動力源を電源から容易に得られる、② 位置、速度、力の制御が容易、③ コンピュータによる制御が容易であり、現在最も広く利用されている。一方、短所としては、① 高速回転出力を減速させたり、回転出力から直進運動を得るための運動伝達・変換機構が必要、② 油圧アクチュエータに比べて大きなパワーを得るのがむずかしい。

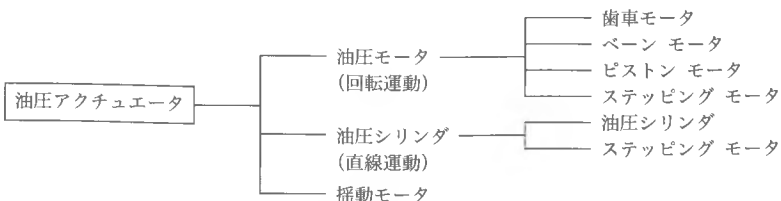
電動アクチュエータの分類を図8・1に示す。まず、運動形態により、回転運動を得る電動モータ (electric motor) と直進運動を得る電動リニアモータ (electric linear motor) に大別される。電動モータはさらに駆動形式により、直流モータ

図8-1 電動アクチュエータの分類<sup>1)</sup>

(DC motor), 交流モータ (AC motor), ステッピングモータ (stepping motor) に分類される。印加する直流電圧に比例した一定回転速度を得られるという制御の容易さから、これまでは直流モータがよく用いられてきたが、サイリスタ (thyristor) やトライアック (triac) などの半導体電力制御素子およびマイクロコンピュータ (microcomputer) の急速な発展を背景にして制御が容易になった交流モータやステッピングモータの使用が急増している。各種電動アクチュエータの原理などの詳細は次節に述べる。

## (2) 油圧アクチュエータ

油圧アクチュエータは作動油の流体パワーを機械的パワーに変換するものであり、① 小型・軽量で大きなパワーが得られる、② 圧力の伝播を用いるので高速応答が可能、③ 高い剛性が得られるという長所をもち、主として高速大出力が必要

図8-2 油圧アクチュエータの分類<sup>1)</sup>

な分野で用いられる。ただし、① 油圧源や配管などの付帯設備が必要、② 作動油による汚染の管理が必要という短所がある。

油圧アクチュエータは、その運動形態により図 8・2 のように分類される。

代表的な油圧シリンダの模式図を図 8・3 に示す。

シリンダ内のピストンの両側の作動油の流量を制御して、ピストンロッドの往復直進運動を得ることができる。

図 8・4 は回転出力を得る外接形歯車モータである。入口側に高圧の作動油を送ると、その圧力が歯車の歯面に作用して、歯車軸にトルクを発生させる。

作動油の流量や圧力は、電磁弁、比例制御弁、サーボ弁などの各種制御弁を用いて電子制御され、いわゆる電子油圧アクチュエータとなっており、自動車のオートマチックトランスミッションや 4 輪駆動・操舵などの実用化に大きく貢献している。

### (3) 空気圧アクチュエータ

空気圧アクチュエータは、油圧アクチュエータの作動流体を、圧縮機 (compressor) などから供給される圧縮空気に置き換えたものである。① 空気の圧縮性から、力制御やコンプライアンス制御が容易、② 空気漏れによる汚染の心配がない、③ 空気配管も含めて、システムが安価に構成できるという長所があるが、① 空気の圧縮性のため、高精度位置決めや速度制御がむずかしい、② 応答性が低く、③ エネルギー効率が低いという短所もある。

空気圧アクチュエータの分類は、図 8・2 の油圧アクチュエータのものと同様である。空気シリンダをはじめ、回転形モータや空気圧ハンドなどがあり、自動組立て、自動検査、包装・搬送などの工場の自動化のために多用されている。

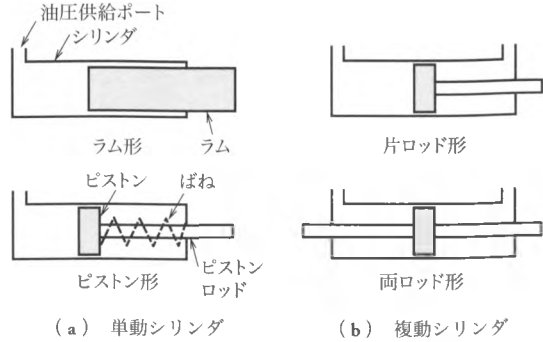


図 8・3 油圧シリンダ<sup>1)</sup>

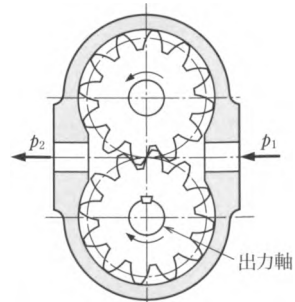


図 8・4 外接形歯車モータ<sup>1)</sup>

#### (4) アクチュエータの特性と評価の指標

機械システムの運動の源としてのアクチュエータに要求される特性は、以下のものがある。

- ① 応答性がよいこと。
- ② 発生トルク（力）が大きいこと。
- ③ 入力に対する出力の線形性がよいこと。
- ④ 小型・軽量であること。

これらの性能を個々にあるいは複合して、定量的に評価するために、おもに以下の指標が用いられている。

① **トルク/慣性比 (torque-inertia ratio)** 回転形アクチュエータのロータ (rotor) の慣性モーメントに対する発生トルクの比であり、応答性の尺度になる [直動アクチュエータでは、力/質量比 (force-mass ratio) を用いる]。

② **限界周波数 (critical frequency)** 正弦波入力に対して、追従が保証される周波数であり、応答性の尺度となる。

③ **パワーレート (power rate)** 回転形アクチュエータの応答性の尺度であり、負荷を加減速するのに許容できる出力を表す。ロータの慣性モーメント (rotor inertia) を  $J$  ( $\text{kgm}^2$ )、発生トルクを  $T$  ( $\text{Nm}$ ) とすると、パワーレート  $P_r$  ( $\text{W/s}$ ) は次式で与えられる。

$$P_r = \frac{T^2}{J} \quad (8.1)$$

④ **パワー密度 (power density)** アクチュエータの単位質量当たりの発生動力を表し、小型・軽量化の尺度になる。

従来の3種類のアクチュエータの性能について、とくに限界周波数と発生パワーの関係を示すと、図8.5となる。図中の限界曲線の下側がアクチュエータの使用可能領域である。油圧アクチュエータが高速、高出力であることがわかる。

表8.1に、3種類のアクチュエータの特性とおもな用途についてまとめる。

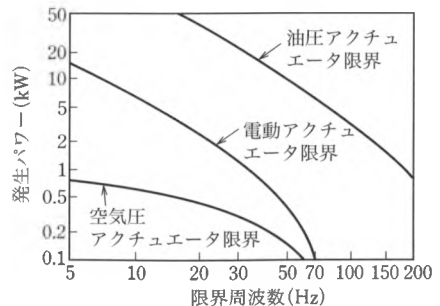


図8.5 各種アクチュエータの発生パワーと限界周波数<sup>1)</sup>

表 8-1 各種アクチュエータの特性のまとめ

比較項目	電 動	油 圧	空 気 圧
パワー密度	小～中	大	小～中
トルク / 慣性比	中 0.01～0.2 kW/kg	大 0.1～1.0 kW/kg	小 0.01～0.06 kW/kg
応答速度	中：～20 Hz	大：～100 Hz	小：～10 Hz
制御性	良	悪	悪
負荷依存性	小	小	大
温度依存性	小	小	大
減速機構	あり	なし	なし
付帯設備	小	大	大
スペース	小	大	大
使用環境	良	悪	良
保守性	良	悪	悪
危険性	あり	なし	なし
価 格	高	高	安
使用状況	広い	中	せまい
一般的用途	一般産業機械 小型低出力・高精度機械	大出力産業機械 航空機・船舶 建設・土木機械	精度を必要としない軽出力機械

宮入庄太 (監修) : アクチュエータ実用事典, フジ・テクノシステム, 1988.

8-1-2

機能材料アクチュエータ

actuators of functional materials

前項にあげた従来の電動アクチュエータ, 油圧アクチュエータ, 空気圧アクチュエータもコンピュータ制御に対応するよう, 高機能化が進んでいる。しかし近年, 超精密運動制御や柔軟運動制御などを目的として, 機能材料 (functional material) を用いた, まったく新しい原理のアクチュエータが開発されつつある。ここでは, 圧電アクチュエータ (piezoelectric actuator) および電わい (歪) アクチュエータ (electrostrictive actuator) について概説する。

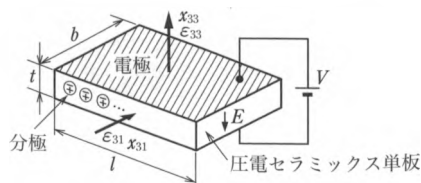
ある種のセラミックスやプラスチック材料に電界を印加すると, ひずみを生じる現象がある。これは逆圧電効果または電わい効果と呼ばれる。これらの現象を利用した固体アクチュエータ (solid actuator) が圧電アクチュエータ, 電わいアクチュエータである。代表的な材料には, チタン・ジルコン酸鉛 (PZT) などの圧電セラミックス (piezoelectric ceramics), ポリフッ化ビニリデン (PVDF) などの圧電プラスチック (piezoelectric plastic), マグネシウム・ニオブ酸鉛 (PMN) などの電わいセラミックス (electrostrictive ceramics) が知られている。

図 8・6 のように、圧電・電わいアクチュエータは、固体材料に電極を付与して電圧を印加すれば直接、直進変位が得られるため、単純な構造で精密制御が可能である。しかし、その発生ひずみは小さく、単位電界当たりのひずみで与えられる圧電定数 (piezoelectric constant) は 600 pm/V 程度である。これは、1 mm 厚の圧電材料に 1 kV の電圧を印加してようやく 0.6 μm の変位が得られることを示す。

圧電セラミックス板を電極を挟みつつ多数積層して得られる積層圧電アクチュエータの印加電圧に対する発生変位を図 8・7 に示す。積層化により、100 V の印加電圧で 15 μm の変位が得られること、ヒステリシスが存在することがわかる。また、圧電・電わいアクチュエータの発生力は大きく、きわめて高速応答という特長があり、精密運動制御だけではなく、振動の能動制御などにも広く応用されている。

また、図 8・8 に示すような圧電アクチュエータにより弾性体ステータに進行波を生じさせ、摩擦駆動によりロータを回転させる超音波モータ (ultrasonic motor) もある。低速回転・高トルクで静粛なモータとして高い評価を受けており、圧電・電わいアクチュエータは最も実用化の進んだ機能材料アクチュエータといえる。

以上に述べた圧電・電わいアクチュエータおよび各種機能材料アクチュエータとその特徴を表 8・2 にまとめる。



発生ひずみ  
 圧電縦効果:  $\epsilon_{33} = d_{33}E$   
 圧電横効果:  $\epsilon_{31} = d_{31}E$   
 $\epsilon$ : ひずみ,  $d$ : 圧電定数 (m/V)  
 $E$ : 電界 (=  $V/t$ ) (V/m)

図 8・6 圧電セラミックス アクチュエータ

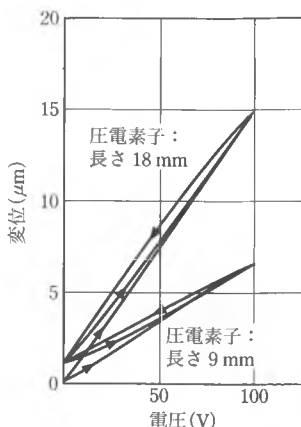


図 8・7 積層圧電アクチュエータの変位特性<sup>7)</sup>

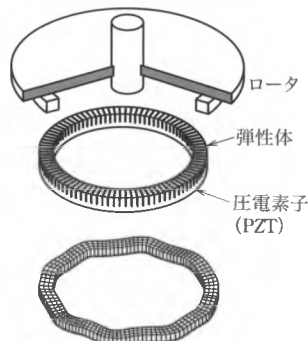


図 8・8 超音波モータ

表 8・2 機能材料アクチュエータとその特徴

種類	変換	現象	材料など	特長	課題
圧電 アクチュエータ	電気 -機械	逆電圧効果	PZT, PLZT, PVDF	高速応答, 大出力, 小型, 実用化済み(超 音波モータ)	変位過小, ヒス テリシス特性, 温度により特性 変化, 脆性
電わい アクチュエータ	電気 -機械	電わい効果	PMN		
超磁わい アクチュエータ	磁力 -機械	磁わい現象	GMA (Ni, Al-Fe, Ni-Cr)	微小変位, 大出力	磁界を得るため に大電力, 脆性
静電 アクチュエータ	静電気 -機械	静電気現象	Si, Cu	半導体製作技術で微 小アクチュエータ	微小機構専用, 絶縁
形状記憶合金 アクチュエータ	熱 -機械	形状記憶効 果	Ti-Ni, Cu 合金	大変位, 力/質量比 大, 柔軟構造	応答速度低, 熱 制御難
メカノケミカル アクチュエータ	化学 -機械	水和イオン 移動	イオン交換樹脂 吸水性高分子ゲル	大変形	応答速度低, 経 時劣化
水素吸蔵合金 アクチュエータ	熱 -機械	水素吸蔵効 果	水素吸蔵合金 (LaNi)	大出力	安全性
光わい アクチュエータ	光 -機械	光起電力効 果	PLZT	ワイヤレス, 小型・ 軽量	低効率, 応答速 度低
磁性流体 アクチュエータ	磁力 -機械	磁性流体	マグネタイト粒子	形状が任意, ワイヤ レス駆動	パワー小

## 8・2

## 電動モータ

electric motor

ここでは、産業界で最もよく利用されている回転形電動アクチュエータ（電動モータ）の原理、特性について説明する。

## 8・2・1

## 直流モータ

DC motor

直流モータの回転原理を図 8・9 に示す。対向する永久磁石のステータ (stator) 中に巻線コイルの電機子 (armature) であるロータ (rotor) が置かれている。回転するコイルへの電流の供給は、機械的摺動部しゅうどうぶであるブラシを介して行う。

永久磁石による磁束密度を  $B$  (Wb/m), コイルに流れる電流を  $i_a$  (A) とすると、コイル中の 1 巻きの導線の有効長さ  $l$  (m) に発生するローレンツ力 (Lorentz force)  $F$  (N) は次式で与えられる。

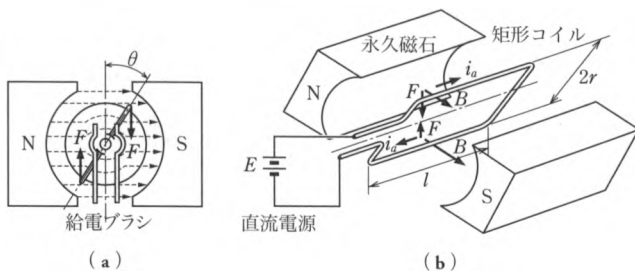


図 8-9 直流モータの回転原理<sup>2)</sup>

$$F = Bli_a \tag{8.2}$$

コイル半径を  $r$  (m)、巻数を  $n$  とすると、コイルに作用するトルク  $T$  (Nm) は次式で表され、電機子電流に比例することがわかる。

$$T = 2nBli_a r = K_T i_a \tag{8.3}$$

その比例定数  $K_T = 2nBlr$  (Nm/A) をトルク定数 (torque constant) という。ここで、図 8-9 の電機子に作用するトルクは電機子の回転角度によって変化するが、実際の電機子コイルは電機子軸に平行なすべての平面上に均等に巻かれており、電機子の回転角度にかかわらず、一定のトルクが作用すると考えることができる。

一方、回転しているコイル導線が磁場を横切るために、誘導起電力を生じる。コイルの角速度  $\omega$  (rad/s) による周速  $V = r\omega$  (m/s) で運動する有効長さ  $l$  (m) の導線に生じる誘導起電力  $e_0$  (V) は、ファラデーの法則 (Farady's low) より次式で与えられる。

$$e_0 = BlV \tag{8.4}$$

巻数と往復の導線を考慮すれば、電機子に生じる誘導起電力  $e$  (V) は次式で与えられ、角速度に比例する逆起電力を生じることがわかる。

$$e = 2nBlr\omega = K_E \omega \tag{8.5}$$

その比例定数  $K_E = 2nBlr$  (Vs/rad) を逆起電力定数または誘起電圧定数 (induced voltage constant) というが、前述のトルク定数  $K_T$  と本質的に同じものである。

電機子への印加電圧  $E$  (V) は、逆起電力と電機子抵抗  $R$  ( $\Omega$ ) による銅損の和に等しいから、次式が成り立つ。

$$E = e + Ri_a \tag{8.6}$$

さらに、モータの発生トルク  $T$  は、負荷トルク  $T_L$  (Nm) とロータの慣性によるトルクに等しい。

$$T = T_L + J_M \dot{\omega} \tag{8.7}$$

ここで、 $J_M$  (kgm<sup>2</sup>) はロータの慣性モーメント (ロータ イナーシャ: rotor inertia) である。

式(8.3)、式(8.5)~(8.7)より、次式のモータの運動方程式が得られる。

$$J_M \dot{\omega} + \frac{K_T K_E}{R} \omega + T_L = \frac{K_T}{R} E \tag{8.8}$$

式(8.7)を角速度  $\omega$  の微分方程式として解けば、電機子印加電圧を与えて、負荷トルクに抗しつつ回転するモータの運動が決定される。

電機子電圧  $E$  (V) を一定として、一定の負荷トルク  $T_L = T$  (Nm) に対して等速回転 ( $\dot{\omega} = 0$ ) する場合を考えると、式(8.8)から次式が得られる。

$$T = \frac{K_T(E - K_E \omega)}{R} \tag{8.9}$$

この関係を図示すれば、図 8.10 の実線となり、つまり、直流モータのトルク  $T$  (Nm) は回転角速度  $\omega$  (rad/s) に逆比例することがわかる。また、角速度  $\omega = 0$  (rad/s) のとき、

$$\text{最大トルク } T_{\max} = \frac{K_T E}{R} \tag{8.10}$$

をとり、無負荷  $T = 0$  Nm のとき、

$$\text{最大角速度 } \omega_{\max} = \frac{E}{K_E} \tag{8.11}$$

が得られる。最大トルクと最大角速度はともに電機子印加電圧に比例するから、電機子印加電圧を高くすると、トルク-角速度曲線はその傾きを保ちつつ、図 8.10 の右上に移動する。

このように、電機子印加電圧を調整することで、速度やトルクを容易に制御できることが直流モータの最大の特徴である。

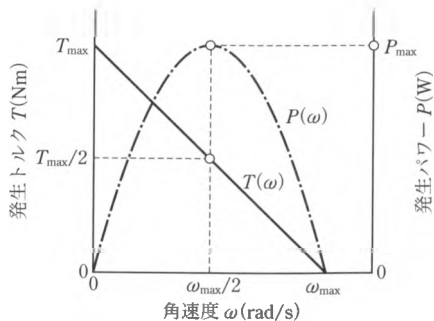


図 8.10 直流モータのトルク、パワー-角速度線図

モータの発生するパワー  $P$  (W) は次式で与えられ、

$$P = T\omega = \frac{K_T(E - K_E\omega)\omega}{R} \quad (8 \cdot 12)$$

図 8・10 の一点鎖線となる、 $\omega = \omega_{\max}/2$ 、 $T = T_{\max}/2$  のとき、

$$\text{最大パワー } P = \frac{K_T E^2}{4K_E R} \quad (8 \cdot 13)$$

を発生する。

表 8・3 は、メーカーのカatalogに記載されている直流モータの定格表の例である。このような表の諸元から、図 8・10 のトルク-角速度線図、パワー-角速度線図を得ることができる。たとえば、表 8・3 の D 型機のトルク-角速度線図を示せば図 8・11 となる。図中の連続使用領域、反復使用領域、加減速使用領域は、それぞれメーカーの推奨する、連続運転可能な領域、起動・停止を含む反復運転可能な領域、加減速時に使用可能な領域である。設計者はこれらを考慮してモータを選定する。

直流モータの長所は以下のとおりである。

表 8・3 直流モータの定格表の例

項目	モータ型番							
	A	B	C	D	E	F	G	H
定格パワー $P_R$ (W)	23	40	60	110	200	300	400	500
定格電機子電圧 $E_R$ (V)	20	72	70	75	80	75	85	80
定格トルク $T_R$ (Nm)	0.074	0.13	0.19	0.34	0.64	1.18	1.57	1.96
定格電機子電流 $i_R$ (A)	1.9	1.0	1.4	2.0	3.4	5.2	5.8	7.6
定格回転数 $N_R$ (rpm)	3000	3000	3000	3000	3000	2500	2500	2500
瞬時最大トルク $T_{\max}$ (Nm)	0.42	0.76	1.2	3.4	5.4	9.8	12.0	16.7
瞬時最大電機子電流 $i_{\max}$ (A)	10.0	4.7	7.6	18.0	25.0	40.0	40.0	62.0
最高回転数 $N_{\max}$ (rpm)	5000	5000	5000	5000	5000	4000	4000	3000
トルク定数 $K_T$ (Nm/A)	0.047	0.174	0.177	0.210	0.230	0.273	0.314	0.287
誘起電圧定数 $K_E$ (mV/rpm)	4.9	18.2	18.5	21.8	23.1	27.2	32.9	29.1
ロータイナーシャ $J_M$ ( $\times 10^{-4}$ kgm <sup>2</sup> )	0.047	0.078	0.108	0.372	1.47	2.55	4.80	5.88
電機子抵抗 $R$ ( $\Omega$ )	3.2	18.6	11.8	5.1	2.8	1.1	0.95	0.56
電機子インダクタンス $L$ (mH)	1.1	6.6	4.4	3.2	3.4	1.8	1.9	1.1
質量 $m$ (kg)	0.30	0.40	0.50	0.95	1.80	2.50	3.40	4.00

山洋電気 (株) カタログより。

- ① 電機子印加電圧により、回転速度、発生トルクを容易に制御できる。
- ② 制御系を容易に構成できる。
- ③ 効率が高い。
- ④ トルク/慣性比が大きく、小型・軽量で大出力が得られる。
- ⑤ 起動トルクが大きい。

短所は、おもに機械的摺動部となる給電ブラシに起因し、以下のような。

- ① 摩耗のために、ブラシの交換、定期的保守が必要である。
- ② 騒音および電氣的雑音を生じやすい。
- ③ 交流モータなどと比べて大きな出力は得られない。

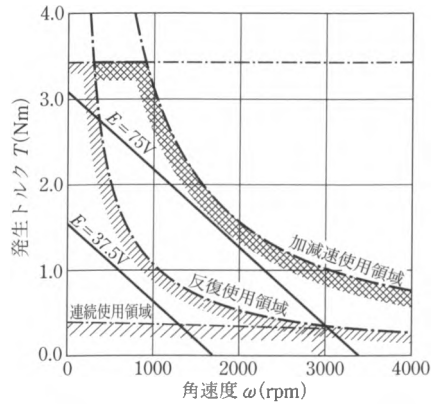


図 8-11 直流通モータ D 型のトルク-角速度線図

### 8-2-2 交流モータ

AC motor

交流モータは、その構造からおもに、同期モータ (synchronous motor) と誘導モータ (induction motor) の二つに分類できる。

図 8-12 に同期モータの基本構造を示す。同図 (a) のように、互いに向かい合う電磁石が  $120^\circ$  ずらして配置されたステータ (stator) の中に永久磁石 (permanent magnet) のロータ (rotor) が配置されている。それぞれの電磁石は三相交流電源

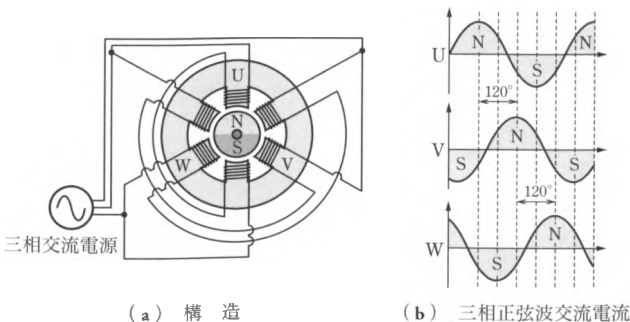


図 8-12 交流同期モータの回転原理<sup>3)</sup>

に接続されており、同図(b)のように、 $120^\circ$  位相のずれた正弦波電流が流れている。

それぞれの電磁石に流れる電流がピークをとるとき、電磁石がつくる磁界の強さは最大となり、それが時間とともに移り変わる。したがって、あたかも一定電流の流れる電磁石または永久磁石がロータのまわりを回転しているのと同等の効果がある。このように三相交流電流のつくる磁界を回転磁界 (rotational magnetic field) と呼ぶ。永久磁石のロータは、回転磁界に吸引されて回転する。

ロータの回転角速度  $\omega$  (rad/s) は三相交流電源の周波数  $f_{in}$  (Hz) とステータの磁極数  $2p$  [回転磁界の極数であり、三相コイルが何組 (偶数組) あるかを表す。図8・12では2極となる] で決定され、次式で与えられる。

$$\omega = \omega_S = \frac{2\pi f_{in}}{p} \tag{8.14}$$

したがって、直流-交流電圧変換器であるインバータ (inverter) などを用い、交流電源の周波数と電圧を変化させて、回転角速度と発生トルクを制御できる。

同期モータの永久磁石ロータを図8・13のようなかご形巻線ロータに置き換えたものが誘導モータである。ステータのつくる回転磁界により、磁束がかご形巻線を切ることになり、電磁誘導の法則により誘導電流が流れる。その誘導電流が流れる巻線に対して回転磁界によるローレンツ力が作用し、ロータにトルクが発生し、回転磁界と同じ向きにロータが回転する。

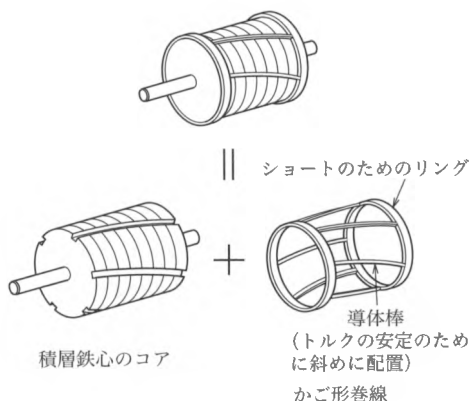


図8・13 交流誘導モータのロータの構造<sup>3)</sup>

このとき、ロータ角速度  $\omega$  (rad/s) は、回転磁界の角速度である同期速度 (synchronous speed),

$$\omega_S = \frac{2\pi f_{in}}{p} \tag{8.15}$$

より小さく、 $\omega < \omega_S$  となる。これは、 $\omega = \omega_S$  では巻線を切る磁束がなく、電磁誘導が成立せず、したがって、ローレンツ力も生じないからである。ロータ角速度  $\omega$  と同期速度  $\omega_S$  の差を無次元化した次式のすべり (slip)  $S$  を用いれば、

$$S = \frac{\omega_S - \omega}{\omega_S} \tag{8・16}$$

ロータの角速度  $\omega$  は次式で与えられる.

$$\omega = \omega_S(1-S) = \frac{2\pi f_{in}(1-S)}{p} \tag{8・17}$$

すなわち、すべり  $S$  または交流電源周波数  $f_{in}$  を変化させれば、ロータ角速度  $\omega$  を制御できる.

発生トルク  $T$  (Nm) は図 8・14 の等価回路にもとづき、次式で与えられる.

$$T = \frac{p}{2\pi f_{in}} \frac{k^2 S V_{in}^2 R_2}{R_2^2 + S^2 X_2^2} \tag{8・18}$$

ここに  $V_{in}$  (V) は入力電圧、 $R_2$ 、 $X_2$  は二次巻線の抵抗およびリアクタンスである. すなわち、発生トルクは入力の正弦波交流の電圧  $V_{in}$  と周波数  $f_{in}$  およびすべり  $S$  で決定される.

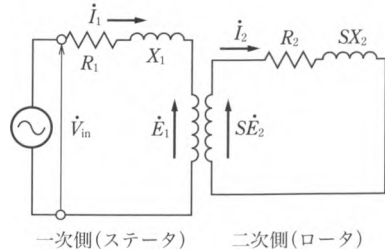


図 8・14 三相交流誘導モータの等価回路<sup>4)</sup>

式(8・17)と式(8・18)にもとづいて、発生トルク  $T$  と角速度  $\omega$  の関係をプロットすると、図 8・15 に示す実線となる. 角速度  $\omega = 0$  (すべり  $S = 1$ ) のときのトルクを始動トルク (start torque)  $T_s$  という. 角速度の増加にともないトルクは増加し、すべり  $S_m$  のとき最大トルク  $T_{max}$  をとり、以後トルクは減少して、すべり  $S = 0$  の同期速度 (synchronous speed) ではトルク  $T = 0$  となる. たとえば、図の一点鎖線のような負荷トルク-角速度特性がある場合、この鎖線と実線の交点  $P$  が誘導モータの動作点となる.

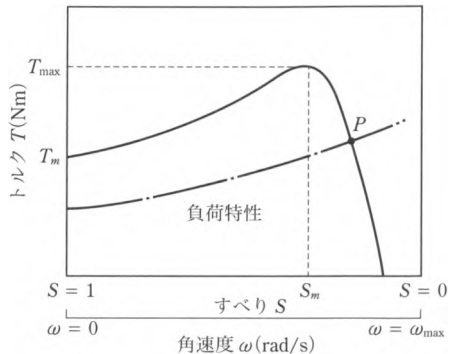


図 8・15 交流誘導モータの角速度 - トルク線図

図 8・10 に示した直流モータのトルク-角速度線図に比較すれば、複雑な特性をもっていることがわかる.

交流誘導モータの角速度またはトルクを制御するには、正弦波交流の電圧  $V_{in}$  と周波数  $f_{in}$  を制御すればよい。それぞれの増加により、モータのトルク-角速度の関係は図 8・16 の破線のように変化し、負荷の駆動点を変化させることができる。

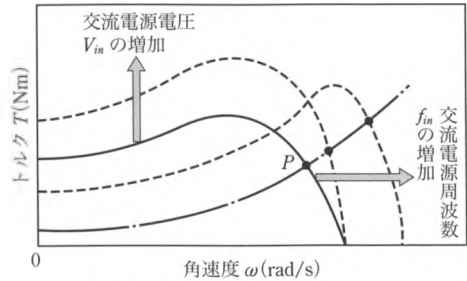


図 8・16 交流誘導モータの制御<sup>5)</sup>

近年のコンピュータ技術、デジタル電子回路技術によって、交流電源の電圧振幅、位相や周波数を制御するのは容易になっている。交流誘導モータに付属して市販されている制御回路であるサーボドライバ (servo driver) によって、使用者は、むずかしさを意識することなく容易に制御することができる。

表 8・4 は、市販されている交流誘導モータの定格表の例である。また、表 8・4 中のモータ D 型機のトルク-角速度線図を示せば、図 8・17 となる。図中の連続使用領域、反復使用領域は、それぞれメーカーの推奨する、連続運転可能な領域および起動・停止を含む反復運転可能な領域である。設計者はこれらを考慮してモータを選定する。

交流モータの長所は以下のとおりである。

表 8・4 交流誘導モータの定格表の例

項目	モータ型番					
	A	B	C	D	E	F
定格パワー $P_R$ (W)	30	50	100	200	400	750
定格トルク $T_R$ (Nm)	0.095	0.159	0.318	0.637	1.270	2.390
定格回転数 $N_R$ (rpm)	3000	3000	3000	3000	3000	3000
瞬時最大トルク $T_{max}$ (Nm)	0.290	0.480	0.960	1.910	3.820	7.700
最高回転数 $N_{max}$ (rpm)	4500	4500	4500	4500	4500	4500
連続出力電流 $i_C$ (A)	0.42	0.60	0.87	2.00	2.60	4.40
最大出力電流 $i_{max}$ (A)	1.30	1.90	2.80	6.00	8.00	13.90
ロータイナーシャ $J_M$ ( $\times 10^{-4}$ kgm <sup>2</sup> )	0.030	0.035	0.049	0.181	0.249	0.811
質量 $m$ (kg)	0.60	0.70	0.80	1.60	2.20	4.20

(株) 安川電機カタログより。

- ① 機械的摺動部である給電ブラシがないため、メンテナンスフリーである。
- ② 堅牢な構造で耐久性にすぐれる。
- ③ とくに誘導モータはロータが軽量であり、高速応答可能である。
- ④ 直流モータに比べて大出力が得られる。

短所は、以下のとおりである。

- ① 直流モータに比べて、交流正弦波電源の周波数、位相、電圧振幅を調整しなければならず、制御がむずかしい。
- ② 制御装置が高価になる。

しかしながら、前述のように、コンピュータ技術、デジタル電子回路技術の進歩により、制御のむずかしさの問題は解決され、これまでの直流モータが交流モータに置き換えられつつあるのが現状である。

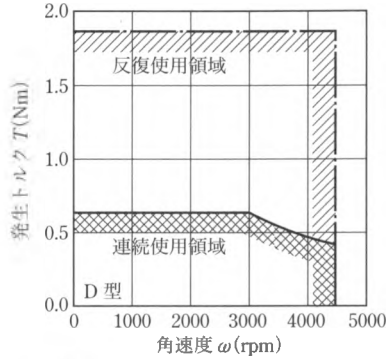


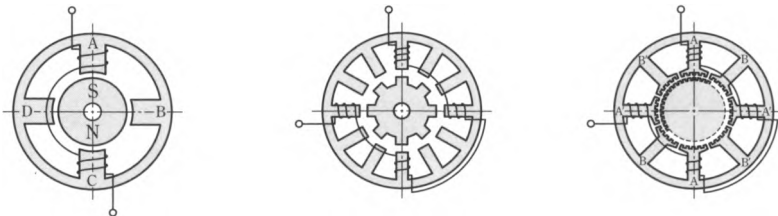
図 8・17 交流誘導モータのトルク-角速度線図の例

### 8・2・3 ステッピングモータ

stepping motor

ステッピングモータはパルスモータ (pulse motor) とも呼ばれ、入力電圧の一つの入力パルスに対して一定のステップ角 (step angle) だけ回転する電動モータである。その構造により、おもに図 8・18 に示す永久磁石 (PM) 形、可変リラクタンス (VR) 形、複合 (HB) 形の 3 種類に分類される。

PM 形ステッピングモータは、励磁コイルの巻かれたステータと永久磁石のロータからなり、電磁石となるステータの突極と永久磁石との吸引力により、ロータが



(a) 永久磁石 (PM) 形 (b) 可変リラクタンス (VR) 形 (c) 複合 (HB) 形

図 8・18 ステッピングモータの種類

回転する。図 8・18(a) はステップ角  $90^\circ$  の四相 (A ~ D 相) モータであり、まず A 相にパルス通電して励磁し、A 相の N 極とロータの S 極を吸引させ、つぎに B 相を励磁してロータの S 極を吸引させる。さらに順に各相を励磁していけば、安定した回転が得られる。

ステッピングモータの角速度  $\omega$  (rad/s) はステップ角度を  $\theta$  (rad)、入力パルス周波数を  $f_{in}$  (Hz) とすると、次式で表せる。

$$\omega = \theta f_{in} \quad (8 \cdot 19)$$

角速度を制御するには、入力パルスの周波数を変化させる。

ステッピングモータの長所は以下のとおりである。

① 入力パルス数に比例した回転角、パルス周波数に比例した回転角速度が得られ、制御が容易である。

② 回転角センサが不要で、オープンループの制御が可能である。

③ パルス電圧で駆動するため、デジタル制御に適している。

④ 機械的摺動部である給電ブラシがないため、メンテナンスフリーである。また、短所は以下のとおりである。

① 共振を起こし、急激なトルク低下や脱調を生じる場合がある。

② 直流モータや交流モータに比べて発生トルクは小さい。

③ 効率は低い。

とくに長所 ① ~ ③ を生かして、コンピュータ周辺機器や O A 機器の駆動アクチュエータに多用されている。

### 8・3

### 電動モータと減速機の選定

selection of electric motor and reducer

一般に電動モータは高速回転であり、とくに小型モータほどその傾向は強い。したがって、所望の低速回転の出力運動を得るためには、歯車機構を代表とする減速機 (reducer) を用いるのがふつうである。ここでは、負荷が与えられた場合のモータと減速機を選定する方法について説明する。

図 8・19 のように、減速機を介して電動モータにより負荷を駆動することを考える。慣性モーメント  $J_L$  ( $\text{kgm}^2$ ) の負荷に与えるべき角速度を  $\omega_L$  (rad/s)、負荷トルクを  $T_L$  (Nm) とし、ロータイナーシャ  $J_M$  ( $\text{kgm}^2$ ) のモータの角速度を  $\omega_M$  (rad/s)、発生トルクを  $T_M$  (Nm) とする。また、減速機の減速比を  $n$ 、減速効率

を  $\eta$  とする。ただし、減速機の回転軸回りの慣性モーメントは無視する。

負荷とモータの角速度の関係は次式となる。

$$\omega_M = n\omega_L \quad (8\cdot20)$$

モータのロータ軸に作用する負荷トルクを  $T_{L,M}$  (Nm), 負荷の軸回りに作用するモータからのトルクを  $T_{M,L}$  (Nm) とすると、モータのロータ、負荷のそれぞれの運動方程式は次式となる。

$$J_M \dot{\omega}_M = T_M - T_{L,M} \quad (8\cdot21)$$

$$J_L \dot{\omega}_L = T_{M,L} - T_L \quad (8\cdot22)$$

エネルギーの保存則から、減速機によるトルク伝達は次式で表される。

$$T_{M,L} = \eta n T_{L,M} \quad (8\cdot23)$$

式(8・20)～(8・23)から、モータの発生トルクは次式で与えられる。

$$T_M = \frac{T_L + (J_L + \eta n^2 J_M) \dot{\omega}_L}{\eta n} \quad (8\cdot24)$$

モータが発生すべきパワー  $P_M$  (W) は次式となる。

$$P_M = T_M \omega_M = \frac{T_L + (J_L + \eta n^2 J_M) \dot{\omega}_L}{\eta} \omega_L \quad (8\cdot25)$$

まず、モータの発生しうる最大パワー  $P_{\max}$  (W) が式(8・25)のパワー  $P_M$  の最大値  $\max(P_M)$  以上でなければ、いかなる減速機を選んでも、負荷の所望の運動は実現できない。一般に、発生すべきパワーの最大値  $\max(P_M)$  以上の定格パワー (rated power)  $P_R$  (W) をもつモータを選定すればよい。この段階では、式(8・25)において、減速機の減速効率  $\eta$  は適当な値をかりに設定しておき、モータのロータイナーシャ  $J_M$  は無視するか、あるいは減速機の減速比  $n$  とともに適当な値を設定しておけばよい。

つぎに、減速機の減速比  $n$  を決定する。式(8・20)より、減速機によって負荷の角速度  $\omega_L$  (rad/s) は  $n$  倍に増速され、モータの角速度  $\omega_M$  (rad/s) となる。ここでも、モータのロータイナーシャ  $J_M$  を無視すれば、式(8・25)において、負荷トルク  $T_L$  (Nm) と負荷の慣性によるトルク  $J_L \dot{\omega}_L$  の和の  $1/(n\eta)$  倍に小さくなるモータトルク  $T_M$  (Nm) となる。具体的には、負荷の最大角速度を  $\omega_{L,\max} = \max(\omega_L)$  (rad/s), 負荷を駆動するための最大トルクを  $T_{L,\max} = \max(T_L + J_L \dot{\omega}_L)$  (Nm) と

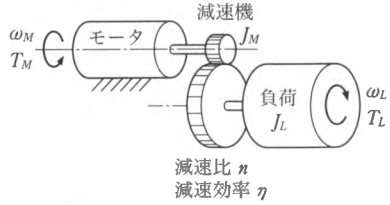


図 8・19 減速機を介した電動モータによる負荷の駆動

すれば、モータがその最大発生トルク  $T_{\max}$  (Nm) 以下および最大角速度  $\omega_{\max}$  (rad/s) 以下で駆動するための条件は、それぞれ次式となる。

$$\frac{T_{L,\max}}{\eta n} < T_{\max} \quad (8\cdot26)$$

$$n\omega_{L,\max} < \omega_{\max} \quad (8\cdot27)$$

これらをまとめると、減速比  $n$  について次式が得られる。

$$\frac{T_{L,\max}}{\eta T_{\max}} < n < \frac{\omega_{\max}}{\omega_{L,\max}} \quad (8\cdot28)$$

この範囲内で減速比  $n$  を仮決定する。

さらに、仮決定した減速比  $n$  に等しいか近い減速比をもち、伝達トルクや角速度が許容値以内である減速機を選定し、減速比  $n$  および減速効率  $\eta$  を最終決定する。さらに、選定されたモータのロータイナーシャ  $J_M$  も含めて式(8・20)、(8・25)のモータ角速度  $\omega_M$  (rad/s) とトルク  $T_M$  (Nm) を再計算して選定したモータの使用可能領域に収まっていることを確認する。もし、使用可能領域から外れている場合、減速機を選定をやり直して、モータの使用領域内に収まるようにする。このようにして、電動モータおよび減速機を選定し、駆動系の設計が完了する。

〔例題 8・1〕 図 8・19 に示した機構において、負荷に一定トルク  $T_L = 40$  (Nm) が作用するとき、以下の駆動関数に従って負荷を停止状態から加速、減速して再び停止させる場合の駆動系を設計する。

$$\theta_L(t) = \frac{1}{2} \theta_0 \left[ 1 - \cos\left(\frac{\pi t}{t_w}\right) \right] \quad (8\cdot29)$$

ここに、 $t$  (s) は時刻である。また、 $\theta_0$  (rad) は回転角、 $t_w$  (s) は作業時間であり、それぞれ  $\theta_0 = 2\pi$  (rad)、 $t_w = 4$  s とする。さらに、負荷の慣性モーメントを  $J_L = 20$  kgm<sup>2</sup> とする。また、モータは交流誘導モータを選定する。

〔解〕 式(8・29)を微分して、負荷の角速度  $\omega_L(t)$ 、角加速度  $\dot{\omega}_L(t)$  がそれぞれ次式のように得られる。

$$\omega_L(t) = \dot{\theta}_L(t) = \frac{\pi}{2t_w} \theta_0 \sin\left(\frac{\pi t}{t_w}\right) \quad (8\cdot30)$$

$$\dot{\omega}_L(t) = \ddot{\theta}_L(t) = -\frac{\pi^2}{2t_w^2} \theta_0 \cos\left(\frac{\pi t}{t_w}\right) \quad (8\cdot31)$$

これらを計算するとともに、モータのロータイナーシャ  $J_M$  を無視し、減速機

の減速効率を  $\eta=0.8$ ，減速比を  $n=1$  と仮定して，式(8・24)より負荷を駆動するのに必要なトルク ( $T_L+J_L\dot{\omega}_L$ )，および式(8・25)よりモータの発生すべきパワー  $P_M(t)$  を求めると，図 8・20 のようになり，負荷の最大角速度  $\omega_{L, \max}=141.3^\circ/\text{s}$ ，負荷を駆動する最大トルク  $T_{L, \max}=(T_L+J_L\dot{\omega}_L)=79.5 \text{ Nm}$ ，必要な最大パワーは  $P_{\max}=158.6 \text{ W}$  となる。

そこでまず，表 8・4 の交流誘導モータの定格表から，この最大パワーより大きな定格パワー  $P_R$  をもつものを選ぶと，D 型機となる。そのロータイナーシャ  $J_M=0.181 \times 10^{-4} \text{ kgm}^2$  であり，対応する図 8・17 に示したトルク-角速度線図から，モータの最大角速度  $\omega_{\max}=4480 \text{ rpm}=26880^\circ/\text{s}$ ，最大発生トルク  $T_{\max}=1.85 \text{ Nm}$  と読み取れる。これらの値から式(8・28)を計算すると，

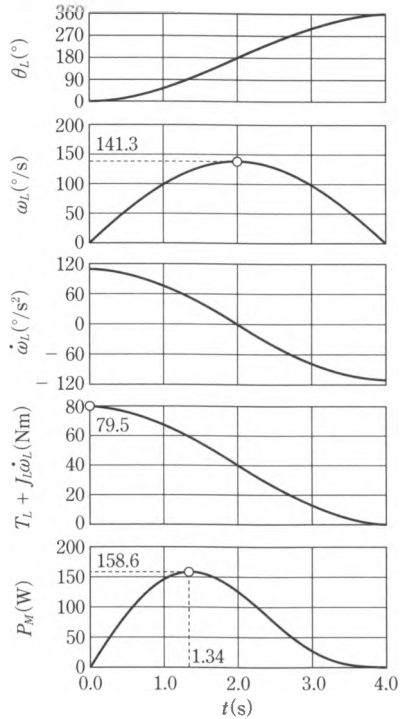
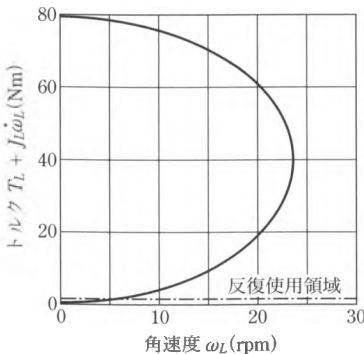
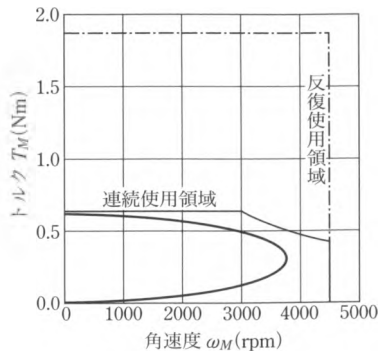


図 8・20 負荷の運動仕様とモータの発生すべきパワー



(a) 負荷のトルク-角速度



(b) モータのトルク-角速度

図 8・21 負荷とモータのトルク-角速度線図

次式となる。

$$53.72 < n < 190.23 \quad (8.32)$$

そこで、6章の表6.11に示した調和減速機の定格表から、型番32、減速比  $n = 160$  を選択すれば、減速機の定格トルクは137 Nmと十分である。選択した減速機を用いて、モータのロータイナーシャも考慮して式(8.20)、(8.24)よりモータのトルク-角速度線図を計算すると、図8.21(b)が得られる。同図(a)は、負荷のトルク-角速度線図であり、減速比  $n = 1$  の場合と考えればよい。図(a)のように、モータの使用可能領域(反復使用領域)を超えて過大なトルクを必要としていたものが、同図(b)のように、モータの使用可能領域に収まっており、減速機によって負荷を駆動可能であることがわかる。

## 8章 | 練習問題

**問題8.1** 表8.3の直流モータにおいて、定格電機子電圧を印加した場合の、最大発生トルク、最大回転数および最大パワーを求め、それぞれ表中の最高回転数、瞬時最大トルク、定格パワーと比較せよ。

**問題8.2** 周波数50 Hzの三相交流電源で8極の交流同期モータを駆動する場合の回転数  $N$  rpm を求めよ。

**問題8.3** 図8.19の駆動機構において、一定負荷トルク  $T_L = 20$  Nmのもとで、慣性モーメント  $J_L = 10 \text{ kgm}^2$  の負荷を式(8.28)の駆動関数に従って駆動する場合〔 $\theta_0 = \pi$  (rad),  $t_w = 2$  sとする〕について、適する直流モータおよび調和減速機を表8.3および6章の表6.11から選定せよ。