

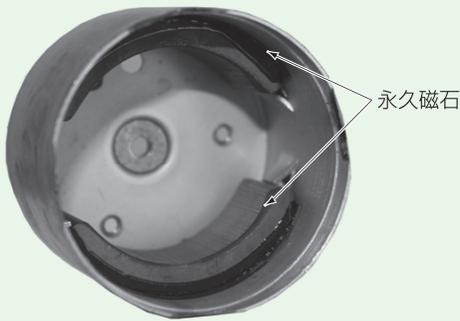
第6章

小形モータと電動機の活用

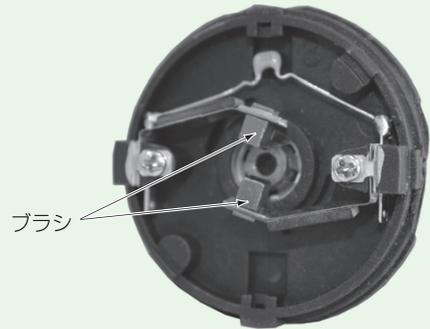
家庭用電化製品や電動工具、デジタルカメラや電動模型など、多くの身近な製品には、小形の電動機（小形モータ）が組み込まれている。

また、制御性にすぐれた小形モータは、マイコンなどの制御装置と組み合わせ、産業用ロボットやコンピュータなどの情報機器に広く利用されている。

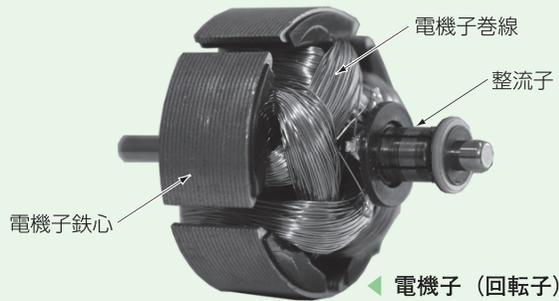
この章では、小形モータの種類やそれぞれの原理・構造などについて学ぼう。また、電動機を活用するときの機種を選定や所要出力の算出などについても学ぼう。



▲ 界磁（固定子）



▲ ブラケット



◀ 電機子（回転子）

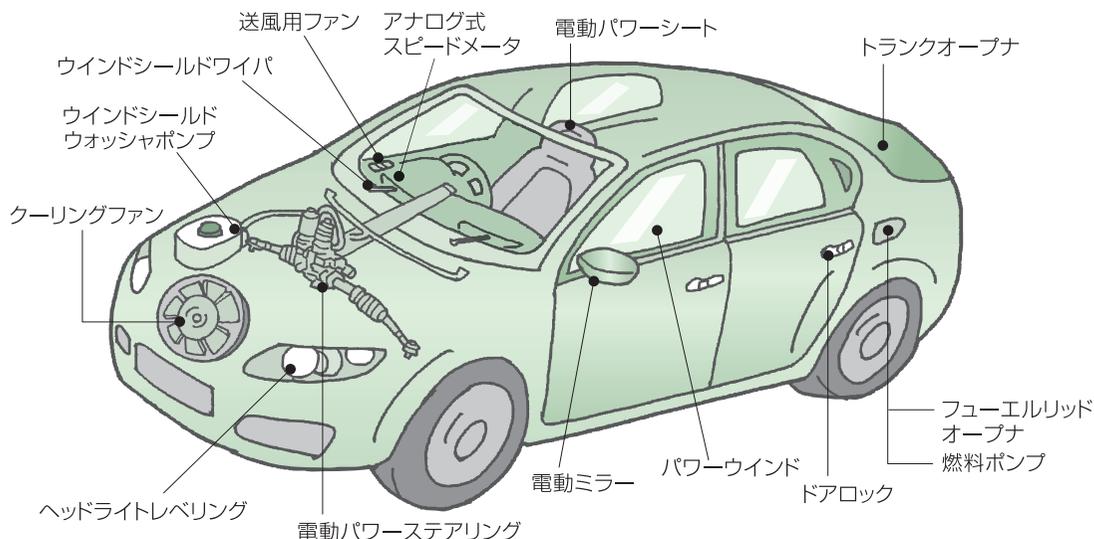
◆ 定格電圧 12 V、定格トルク 9.8 mN・m、定格電流 550 mA、
定格回転速度 4250 min⁻¹

▲ 永久磁石形直流モータの例

小形モータ 1
電動機の活用 2

▶ 自動車で利用されている小形モータ

現在生産されている乗用車には、およそ 50~100 個の小形の永久磁石形直流モータやブラシレス DC モータなどが搭載されている。ここでは、普通自動車を例に、小形モータが使われている装置の一部を紹介する。



▶ 協働ロボット

近年、人が近づくと速度を下げたり、停止したりするなどの安全性を高め、人と作業領域を共有して働くことができる協働ロボット (COBOT: Collaborative robot) が開発・利用されている。

小形の協働ロボットは、各関節を駆動するために小形モータが使われ、さらに、それらの関節には角度センサや力を検出する力覚センサが組み込まれており、複雑な動きができるようになった。

今後、協働ロボットは、工業分野のほかにも、福祉、医療、食品加工、衣料、農業、水産業など、幅広い分野への導入が期待されており、制御が容易で高性能、かつインテリジェントな小形モータの重要性は、ますます高まると予想されている。



6 軸、可搬質量 10 kg,
可動範囲 (1240 mm, 2480 mm)
本体質量 48 kg

▲ 協働ロボット例



モータ、減速機、駆動回路、ブレーキ、エンコーダがパッケージ化されている

▲ 協働ロボット用駆動ユニット例

* 協働ロボットの安全性については、国際標準化機構 (ISO)、日本産業規格 (JIS) で標準化されている。

この節で学ぶこと

わたしたちが日常利用している情報機器や家電製品には、小形モータが組み込まれており、小形で軽量、高トルク、さらに制御のしやすさが求められる。各種モータがあるなかで、ここでは、小形直流モータ・小形交流モータおよび制御用モータについて学ぼう。

1

小形直流モータ

5

小形直流モータ^①は、第1章で学んだ大形の直流電動機と回転のしくみや基本的な構造は同じである。しかし、電子機器に組み込まれる場合が多いので小形であり、しかも機能や性能に応じて多くの種類がある。小形直流モータには、永久磁石形直流モータやコアレス DC モータ、ブラシレス DC モータなどがある。

1

永久磁石形直流モータ

界磁に永久磁石が用いられる直流モータを、永久磁石形直流モータ^②という。

a

電機子鉄心を持つ永久磁石形直流モータ

このモータに用い

られる永久磁石材料には、フェライト磁石^③・アルニコ磁石^④・ネオジウム鉄-ホウ素系磁石^⑤などがある。

◆構造◆ 図1(a)は、永久磁石形直流モータの構造例である。電機子鉄心には、図1(b)に示すように、有溝鉄心形^⑥と無溝鉄心形^⑦がある。図1(c)に永久磁石形直流モータの図記号を示す。

有溝鉄心形の電機子は、巻線がスロットの中に巻き込まれるので、その構造は丈夫である。しかし、電機子鉄心が突極構造^⑧になるため脈動トルクが生じ、回転むらを起こす欠点がある。

①小形の場合、電動機をモータとよぶことが多いので、以降、本章では、電動機のことをモータと表現する。原理については、第1章 p.23, 37 参照。

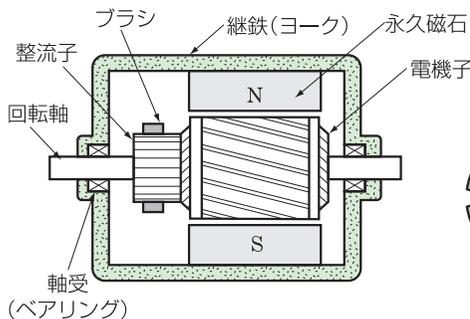
② permanent magnet type DC motor

③第2章 p.63 参照。

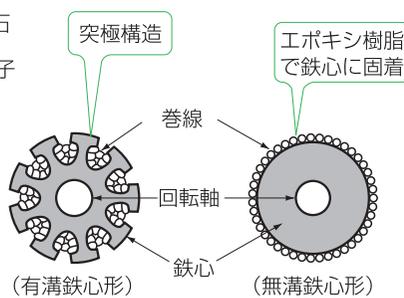
④フェライト磁石に比べ、残留磁気大きい磁石。

⑤フェライト磁石に比べ、保磁力、残留磁気がともに大きい希土類系磁石。高価である。

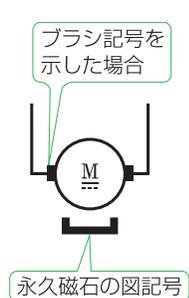
⑥ cogging torque



(a) 構造



(b) 電機子鉄心



(c) 図記号

▲ 図1 永久磁石形直流モータ

無溝鉄心の電機子は、円筒形の積層鉄心の上に巻線を固着させたものである。鉄心には突極がないので、回転むらが生じない。しかし、この構造では、界磁と回転子鉄心との間のエアギャップが大きくなるので、残留磁気および保磁力の強い永久磁石が必要になる。

① 第2章 p.63 参照。

5

問 1 永久磁石形直流モータの電機子鉄心において、有溝鉄心形と無溝鉄心形の特徴を説明せよ。

◆**特性**◆ 永久磁石形直流モータのトルクは、第1章で学んだ直流電動機のトルクの式から誘導できる。すなわち、p.39 式(5)と p.40 式(8)、(9)から、トルク T [N・m] は、次式で表される。

$$T = K_2 \Phi I_a = \frac{K_2 \Phi}{R_a} (V - E) = \frac{K_2 \Phi}{R_a} (V - K_1 \Phi n) \quad (1)$$

式(1)の磁束 Φ は、永久磁石を利用しているので一定の値となる。そこで、トルク定数を K_T 、逆起電力定数を K_E とすると、式(1)は次式で表される。

$$T = \frac{K_T}{R_a} (V - K_E n) \quad (2)$$

式(2)より、電機子電圧 V [V] を一定にすると、トルク T と回転速度 n [min^{-1}] の関係は、図2のようになり、トルクが回転速度の増加とともに直線的に減少することを示している。また、その傾きは、電機子電圧にも回転速度にも無関係に一定である。この特性は、速度制御や位置決め制御にとって、つごうがよい。このため、永久磁石形直流モータは、制御性の高いサーボモータに適している。

② p.39 式(5)より

$$T = K_2 \Phi I_a$$

p.40 式(8)、(9)より

$$I_a = \frac{V - E}{R_a}$$

$$E = K_1 \Phi n$$

③ $K_T = K_2 \Phi$

④ $K_E = K_1 \Phi$

10

15

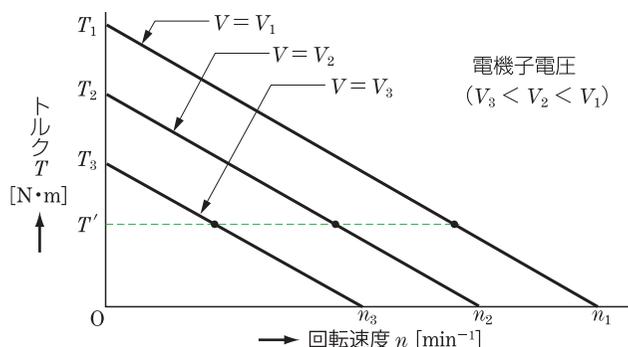
⑤ 図2のトルク-回転速度特性の傾きは、式(2)より

$$\text{傾き} = -\frac{K_T K_E}{R_a}$$

となる。

⑥ 第6章 p.224 参照。

20



▲図2 永久磁石形直流モータのトルク-回転速度特性

問 2 図2の特性より、負荷トルク T' [N・m] が一定のとき、電機子電圧 V [V] と回転速度 n [min^{-1}] の関係を説明せよ。

2 コアレス DC モーター

コアレス DC モーター^①は、電機子に鉄心を使用しない、永久磁石形直流モーターである。

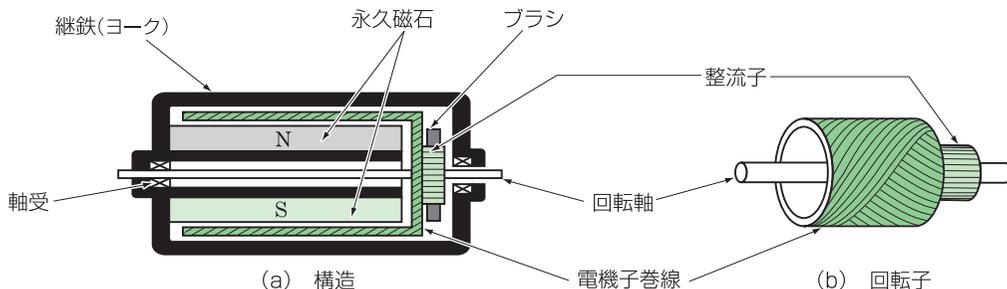
① coreless DC motor

◆構造◆ 図3は、カップ形コアレス DC モーター^②の構造例である。電機子巻線は、カップ状に巻かれ、巻線をエポキシ樹脂とガラス繊維で固めた構造になっている。

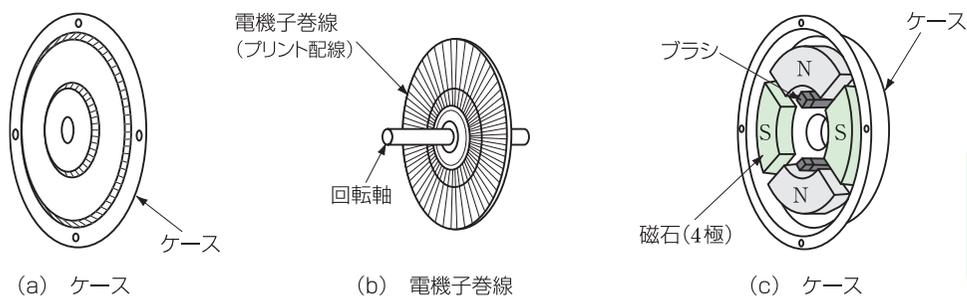
② カップ形コアレス DC モーターの電機子の例。



電機子巻線には、図3に示すカップ形のほかに、円板状のディスク形がある。ディスク形の一例としては、図4に示すプリント配線モーターがある。



▲図3 カップ形コアレス DC モーター



プリント配線モーターは、(a),(b),(c)を組み合わせた構造をもつ。

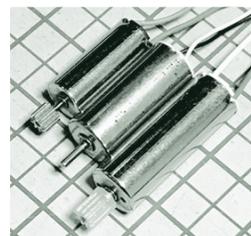
▲図4 プリント配線モーター

◆特徴◆ コアレス DC モーターには、鉄心を用いないため、次のような特徴がある。

- 1) 回転子の慣性モーメントが小さい。
- 2) 回転むらが生じない。
- 3) 電機子巻線の自己インダクタンスが小さく、整流作用がすぐれている。

コアレス DC モーターは、始動・停止の性能が優れており、メカトロ機器やロボット競技会用のロボットの動力などとして利用されている。また、小形化が容易で、スマートフォンの振動モーター、小形ドローンの動力用に、直径が 1 cm 以下のモーター^③もつくられている。

③ 小形コアレス DC モーターの例



3

ブラシレス DC モータ

これまで学んだように永久磁石形直流モータは、制御性にすぐれたモータである

が、ブラシと整流子が機械的に接触するため接触面が摩耗したり、摩擦音や火花による電気雑音^①が発生したりするなどの欠点がある。そこで、この欠点を改善するために、機械的な整流の機構を電子的な機構に置き換えた直流モータが、ブラシレス DC モータ^②である。

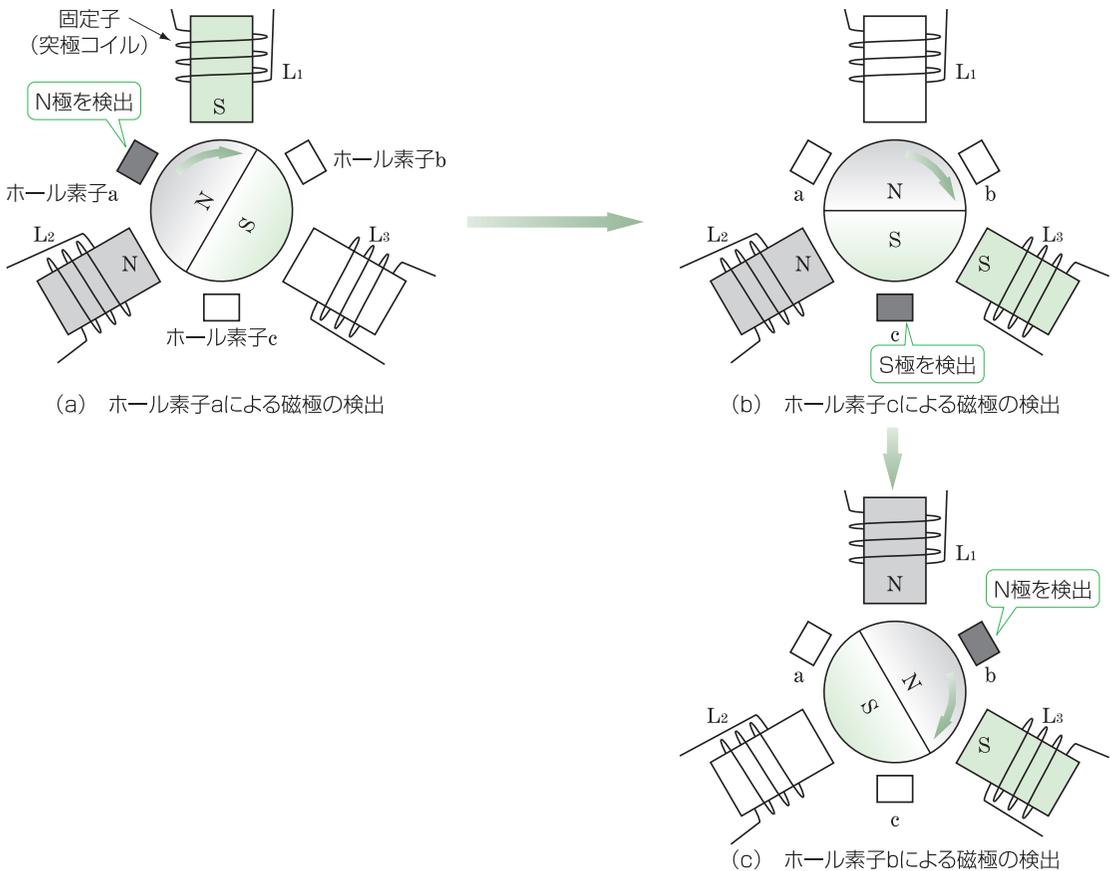
ブラシレス DC モータは、回転子には永久磁石を用いているので、分類上、永久磁石形直流モータに含まれる。

◆構造◆ 図5は、ブラシレス DC モータの構造例である。120°の角度で複数の突極に巻線が施された電機子を固定子として配置し、各固定子間にホール素子^③を配置する。ブラシレス DC モータの特徴であるホール素子は、回転子の磁極の位置を検出するためのセンサである。この検出信号により、固定子巻線に流れる電流を制御することで、ブラシレス DC モータは回転トルクを発生させている。

①火花放電によって発生するパルス状の高周波雑音。

② brushless DC motor

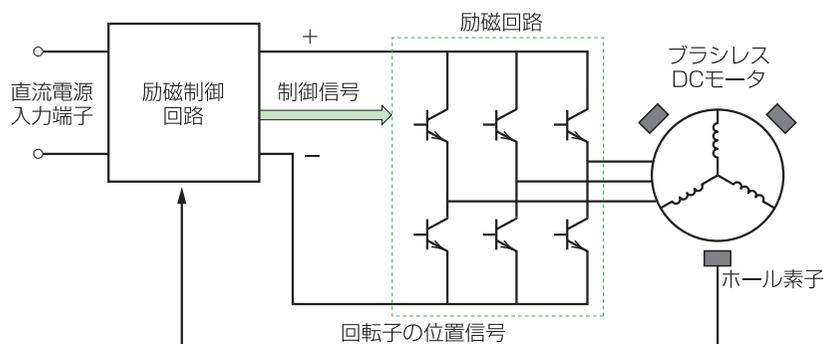
③ホール効果を利用して磁束の向きや磁束密度に応じた電圧を発生させるセンサ。



▲図5 ブラシレス DC モータの構造例と回転原理

◆**回転原理**◆ 図5(a)の位置に回転子がある場合を考える。ホール素子aが回転子のN極を検出して、図5(a)のように固定子巻線 L_1 、 L_2 に通電して突極を励磁する。すると、回転子は右へ回転をはじめめる。図5(b)の位置でホール素子cが回転子のS極を検出したとき、固定子巻線 L_2 、 L_3 に通電し突極を励磁すると、回転子はさらに右に回転する。同様に、図5(c)の位置に達したとき、ホール素子bが回転子のN極を検出し、このとき L_1 、 L_3 を励磁することで回転子は右へ回転し続ける。このように、各ホール素子が、回転子の磁極を検出したときに励磁する巻線を切り替えることで、連続した回転が得られる。

図6にブラシレスDCモータの制御回路の構成例を示す。また、図7はブラシレスDCモータの実例である。図7(a)は電子・情報機器のケースに取りつけられる冷却用ファンである。回転するファンに永久磁石が取り付けられ回転子としてはたらき、内側に固定子コイルが配置されている。図7(b)は模型玩具用の3相ブラシレスDCモータである。



▲図6 ブラシレスDCモータの制御回路例



(a) 冷却用ファン

(b) 模型玩具用モータ

▲図7 ブラシレスDCモータの実利用例

小形交流モータの構造は、すでに学んだ同期機や誘導機と同じである。回転原理も同様であり、固定子に巻いたコイルで回転磁界をつくり、その磁界中に置かれた回転子が同期速度、または非同期速度で回転する。同期モータには、永久磁石形同期モータとリラクタンスマータなどがあり、非同期モータには、誘導モータ、交流整流子モータがある。このほか、直線運動するモータとして、リニアモータがある。

5

1

同期モータ

a 永久磁石形同期モータ 回転子に永久磁石を用いた同期モータを、永久磁石形同期モータという。

10

◆原理◆ 永久磁石形同期モータは、固定子がつくる回転磁界中に永久磁石付きの回転子を入れると、回転磁界に引き付けられた磁石が、磁界と同じ速度(同期速度)で回転する。これが回転の原理である。

◆種類◆ 永久磁石形同期モータは、^①表面磁石形同期モータ(SPMSM)と^②埋込磁石形同期モータ(IPMSM)に分けられる。

図8(a)の表面磁石形同期モータは、ネオジムなどの強磁性体磁石を回転子表面に接着剤で貼り付けた構造で、高速回転するとはがれやすいので、ステンレスカバーを付けている。

図8(b)の埋込磁石形同期モータは、永久磁石を電磁鋼板の回転子の中に埋め込むことでリラクタンストルクが利用でき、小形化、高速化できる。リラクタンストルクとは、回転磁界の磁極と回転子の電磁鋼板との間に働く回転力のことである。これらのモータは、エアコンのコンプレッサモータや電気自動車に用いられている。

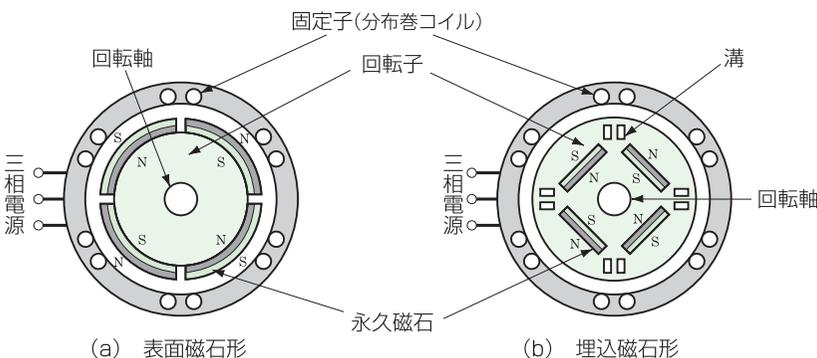
① permanent magnet synchronous motor ; PMSM と略される。

15

② surface permanent magnet synchronous motor

③ interior permanent magnet synchronous motor

20



▲図8 永久磁石形同期モータの回転子

b リラクタンスモータ 回転子に強磁性体の鉄心のみを用いて、

永久磁石を使用しないモータを、**リラクタンスモータ** という。

◆**原理**◆ リラクタンスモータは、固定子がつくる回転磁界の磁極に回転子の電磁鋼板が引き付けられる力により、リラクタンストルクが生じて回転する。

◆**種類**◆ リラクタンスモータには、**同期リラクタンスモータ** (SynRM)^①と、**スイッチトリラクタンスモータ** (SRM)^②がある。

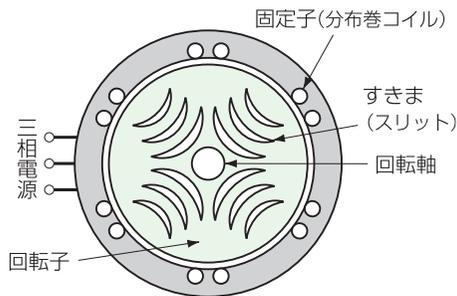
同期リラクタンスモータ SynRMは、図9のように回転子の電磁鋼板にすきま(スリット)を設け、磁束の通りやすさに方向性をもたせている。これにより、磁束の通りやすい極が固定子の回転磁界に吸い寄せられ、回転子が同期回転する。

このモータは、磁石を使わないので安価で、また遠心力に強く、高速回転が可能で、コンプレッサなどの動力に利用されている。

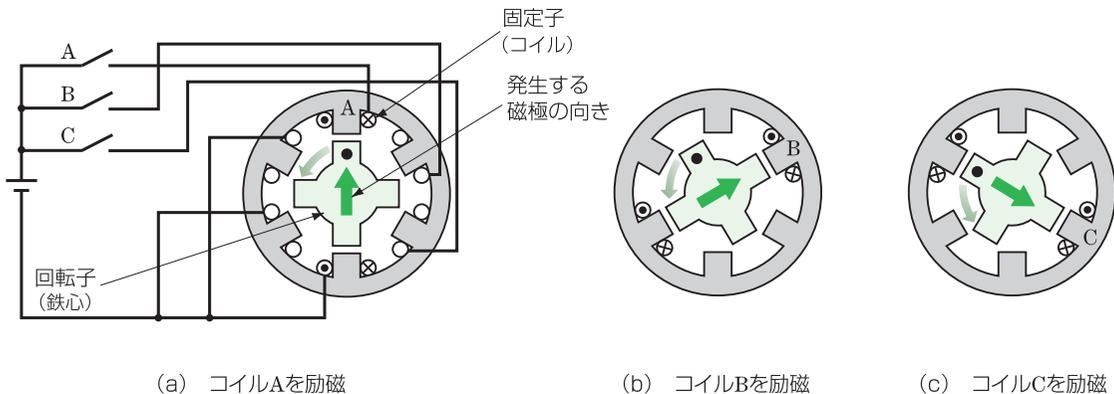
スイッチトリラクタンスモータ SRMは、図10のように固定子と回転子の構造が突極である。固定子巻線に流す電流をスイッチでA、B、Cの順に切り換えると、電磁石になる磁極が移り、突極の回転子は回転磁極に引き付けられて同期回転する。

このモータは、回転子の構造が簡単で強固なため、高速回転に適している。また、高価な希土類磁石を使わないモータの特徴から、近年、電気自動車用モータへの利用が期待されている。

- ① synchronous reluctance motor
- ② switched reluctance motor ; SRモータともよばれる。
- ③空気を圧縮する装置



▲図9 同期リラクタンスモータ



▲図10 スwitchトリラクタンスモータの動作原理

2

非同期モータ

非同期モータとして身近に用いられるモータに、誘導モータ^①や交流整流子モータがある。

①第4章 p.131 参照。

誘導モータは第4章で学んでいるので、ここでは交流整流子モータを取り上げる。

a 交流整流子モータ

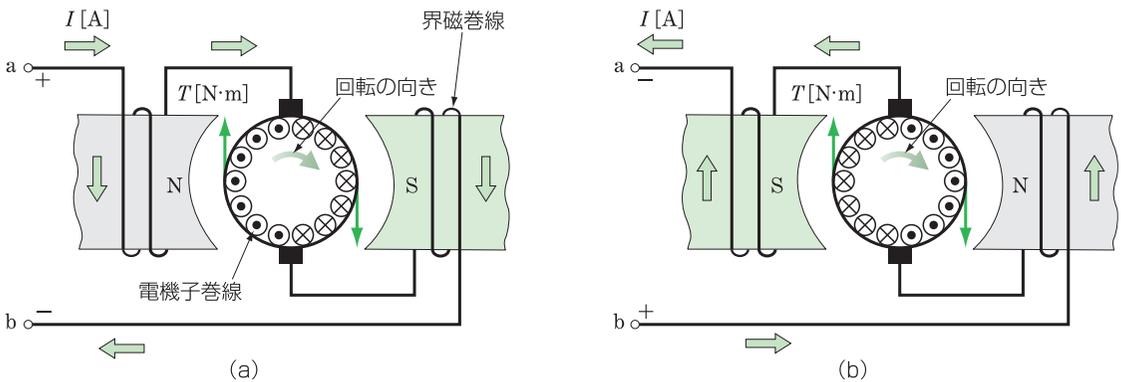
◆原理◆ 交流整流子モータは、直流直

5

巻電動機^②と同様に、界磁巻線が整流子付き電機子の巻線と直列に接続された電動機である。図11(a)の状態から電源の極性を逆にと、図11(b)のように磁極のNとSが逆転する。このとき、電機子電流の向きも変わるので、トルクの向きはそのまま変わらず、モータは継続して回転する。

②交流整流子モータとの区別を明確にするために、ここでは、直巻電動機を直流直巻電動機と称する。第1章 p.43 参照。

10



▲図11 交流整流子モータの原理

◆特徴◆ 交流整流子モータには、次のような特徴がある。

- 1) 磁気回路の磁束が交番するので、界磁鉄心、および継鉄に積層鉄心を使用して鉄損を減らしている。
- 2) 界磁巻線のリアクタンスによりモータの力率が低下するので、界磁巻線の巻数を少なくしている。
- 3) 界磁巻線の巻数を少なくすると、トルクが減少するので、電機子巻線の巻数を多くしている。
- 4) 電機子反作用を打ち消すために、きわめて小出力のもののは、直流機で学んだ補償巻線^③を設けている。

③第1章 p.31, 41 参照。

15

◆用途◆ 交流整流子モータは、始動トルクが大きく、回転速度が高速なので、電気ドリル・電気かんな、電気掃除機、小形ミキサなどの動力として用いられる。なお、補償巻線を設けない小容量のものは、交流と直流の両方に使用できるので、交直両用モータまたはユニバーサルモータ^④とよばれる。

20

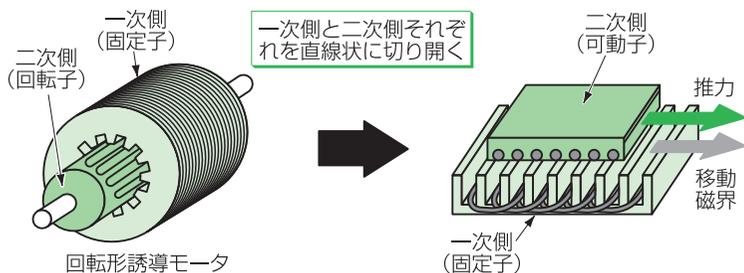
④ universal motor

3 リニアモーター

電磁力を利用して直線的な運動をさせる力を与える駆動装置を **リニアモーター** といひ、

回転形モーターを直線状に展開した構造をしている。

◆**原理**◆ 図12は、リニア誘導モーターの原理図で、一次側に三相交流電流を流すと二次側に直線的な推力が発生する。



▲図12 リニア誘導モーターの原理図

◆**種類**◆ リニアモーターには、**リニア誘導モーター**^① (LIM)、**リニア同期モーター**^② (LSM)、**リニア直流モーター**^③ (LDM)、**リニアパルスモーター**^④ (LPM)、などがある。

◆**用途**◆ リニア誘導モーターは、高出力を生かして地下鉄などで利用され、車両の小形化に貢献している。

リニア同期モーターは、強力な磁石を二次側(可動子)に利用することで、高推力・高速移動が可能である。さらに、パワーエレクトロニクス技術の進展により高精度な位置決めが実現され、制御用のモーターとしてNC工作機械や搬送機器、位置決め装置などに利用されている。

表1に、リニアモーターの種類と特徴を示す。

▼表1 リニアモーターの種類と特徴

名称	展開する回転形モーター	特徴・用途
リニア誘導モーター (LIM)	誘導モーター	高出力。 搬送装置, 工作機械, 地下鉄
リニア同期モーター (LSM)	同期モーター	高効率。 NC 工作機械, ロボット, リニアモーターカー
リニア直流モーター (LDM)	永久磁石形直流モーター DC ブラシレスモーター	高分解能。 磁気ディスク, 光学機器, 搬送装置, カーテン, 自動ドア
リニアパルスモーター (LPM)	ステッピングモーター	センサを使わずに位置決め制御が可能。 プリンタ, X-Y テーブル

① linear induction motor

② linear synchronous motor

③ linear direct-current motor

④ linear pulse motor

3

制御用モータ

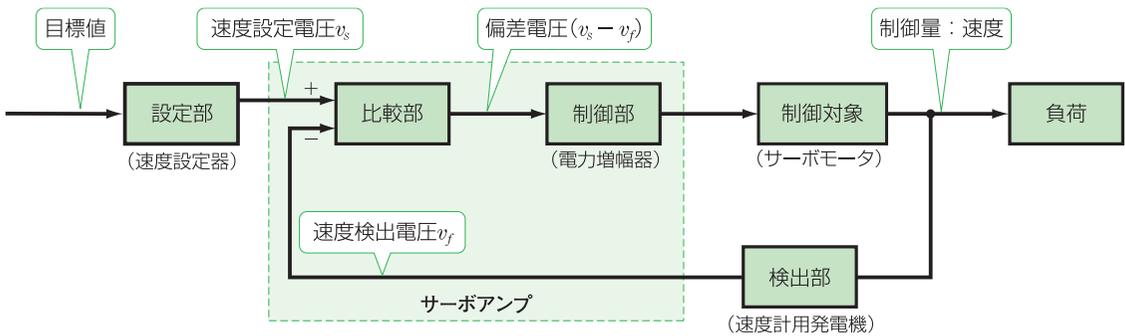
1

サーボモータ

いう。

a サーボ機構 図13は、モータの速度を制御量としたサーボ機構のブロック図の例である。検出部の速度計用発電機はモータの軸に直結されており、モータの回転速度に比例した電圧（速度検出電圧）を発生する。

図13において、サーボアンプは、目標値の変化に追従するようにサーボモータを駆動する装置である。サーボアンプでは、目標値に対応した速度設定電圧 v_s と、速度検出電圧 v_f を比較し、その差である偏差電圧 $v_s - v_f$ が制御部へ出力される。制御部は偏差電圧が0になるように制御対象を駆動する。



▲図13 サーボ機構のブロック図の例

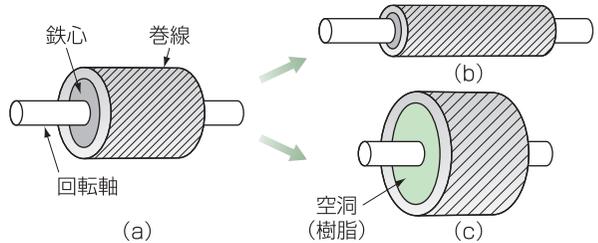
b

サーボモータ

◆特徴◆ サーボ

モータには、次のような特徴がある。

- 1) 応答性がよい。
- 2) 広い速度範囲で安定した動作をする。
- 3) トルクむらがない。
- 4) 過負荷に強い。



▲図14 サーボモータの回転子

回転子の慣性モーメントを小さくするため、図14(b)のように直径を小さくして軸方向に長くしたり、図14(c)のように回転子に鉄心を用いないコアレス化にしたりするなど、くふうがされている。さらに、界磁に強力な希土類系磁石を用いるなどして、出力トルクを大きくして追従性を高めている。

① servomechanism
対象の位置、速度、姿勢などを制御量として、それらの目標値の変化に追従させる制御をする機構。

② servomotor

③次ページ表2参照。

5

10

15

20

◆**種類**◆ サーボモータは、直流電圧で動作する **直流 (DC) サーボモータ** と、三相交流電圧で動作する **交流 (AC) サーボモータ** に分けられる。

◆**用途**◆ 直流サーボモータでは、コアレス DC モータやブラシレス DC モータが、小形・小容量の用途で利用されている。

5 交流サーボモータでは、三相永久磁石同期モータが小・中容量のモータに、また、三相かご形誘導モータが高速度、高出力用のモータに利用されている。産業界では、半導体デバイスの進歩によって交流モータの制御技術が向上し、長寿命で信頼性の高い交流サーボモータが多く利用されている。

10 **C** **サーボモータの回転センサ** ■ サーボ機構では、目標値と制御量を比較するので、制御量を知るために、種々のセンサが利用される。そのためサーボモータには、あらかじめ回転センサが組み込まれているものも多い。表2にサーボモータで利用される回転センサを示す。

▼表2 サーボモータに利用される回転センサ

センサ名	働き・特徴	信号形式
光学式インクリメンタルエンコーダ	<ul style="list-style-type: none"> 決まった角度ごとにパルス信号が出力される。 構造が簡単。 雑音に強い。 	2相パルス信号
光学式アブソリュートエンコーダ	<ul style="list-style-type: none"> 角度に対応した数値が出力される。 雑音に強い。 構造が複雑となり小形化が難しい。 	デジタル信号
磁気式エンコーダ	<ul style="list-style-type: none"> 磁気センサを利用しており分解能が高い。 外部磁気の影響を受ける。 	2相パルス信号
リゾルバ	<ul style="list-style-type: none"> 丈夫な構造をもつ。 振動や雑音に強い。 	2相アナログ電圧
速度計用発電機	<ul style="list-style-type: none"> 回転速度に比例した電圧を出力する。 電源が不要。 	アナログ電圧
ポテンショメータ	<ul style="list-style-type: none"> 角度に比例して抵抗値が変化する。 	アナログ電圧

問 3 サーボモータには、どのような性能が求められるか。

2

ステッピングモータ

パルス電圧で一定角度ごとに回転子を駆動するモータをステッピング

モータ^①、またはパルスモータという。ステッピングモータを回転させるためには、駆動回路が必要となる。

◆**構造**◆ ステッピングモータの駆動には、パルス発生回路、励磁相制御回路、コイル励磁回路が必要である。図15は動作原理図である。固定子には、90°ごとに配置された4個の突極があり、それぞれに巻線が設けてある。回転子は、円筒形をした2極の永久磁石である。コイル励磁回路の各トランジスタ $Tr_1 \sim Tr_4$ は、コイルに流れる電流のオン・オフを繰り返すスイッチング動作をする。励磁相制御回路は、入力パルスに同期して、励磁するコイルを順次切り換える信号を出力する回路である。

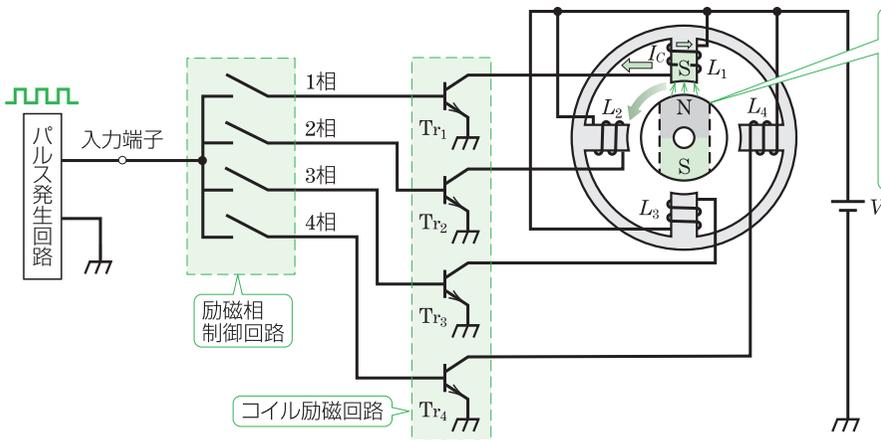
◆**原理**◆ 入力端子にパルスが入力されると、励磁相制御回路は Tr_1 をオンにする。すると、コイル L_1 には励磁電流が流れて突極にS極が生じ、回転子のN極が引きつけられる。ふたたびパルスが入力されると、次は Tr_2 がオンになり、 L_2 の突極にS極が生じ、回転子が反時計まわりに90°回転する。同様に、パルスが入力されるたびに、トランジスタの Tr_3 、 Tr_4 が順にオンに切り換えられて、回転子が90°ずつ回転する。

① stepping motor

下の写真はステッピングモータと駆動回路(モータドライバ)の製品例である。



励磁相制御回路の電子スイッチを1相、2相、3相、4相の順に切り換えると、回転子は90°ずつ反時計まわりに回転する。



▲図15 ステッピングモータの動作原理図

◆**ステップ角と回転速度**◆ ステッピングモータは、パルス電圧が送られるたびに、定められた角度 θ [°] を1ステップとして回転する。この θ をステップ角^②という。ステッピングモータが、1回転するために必要なステップ数を S とすれば、 S と θ には次の関係がある。

② step angle

$$S = \frac{360}{\theta} \quad (3)$$

したがって、ステップ角 $\theta [^\circ]$ のステッピングモータに、パルス周波数 f [pps] のパルス電圧を加えて駆動すれば、1分あたりの回転速度 $n [\text{min}^{-1}]$ は、次式で示される。

$$n = \frac{60 \times f}{S} \quad (4)$$

①パルスレートともよばれる。単位は pulse per second (パルス/秒) の略である。

例題 1

ステップ角 θ が 1.8° のステッピングモータがある。このモータを 1500 pps のパルス電圧で駆動したとき、モータの回転速度 $n [\text{min}^{-1}]$ を求めよ。

解答 回転速度 n は式(3)、(4)より、

$$S = \frac{360}{\theta} = \frac{360}{1.8} = 200$$

$$n = \frac{60 \times f}{S} = \frac{60 \times 1500}{200} = 450 \text{ min}^{-1}$$

問 4 ステップ角 7.5° のステッピングモータを 1 回転させるためのステップ数はいくらか。また、毎分 500 回転の速度で回したい。このとき、パルス周波数 f [pps] はいくらにすればよいか。

◆種類◆ ステッピングモータには、回転子の構造によって永久磁石形 (PM 形)^②、可変リラクタンス形 (VR 形)^③、ハイブリッド形 (HB 形)^④ の 3 種類がある。各ステッピングモータの回転子の構造、および特徴を表 3 に示す。

◆特徴◆ ステッピングモータの一般的な特徴は次のとおりである。

- 1) ステッピングモータの回転角^⑤は、入力パルス数に比例し、回転速度はパルス周波数に比例する。このため、入力パルス数やパルス周波数を制御することで位置決めや速度制御が正確にできる。
- 2) 始動時のトルクが最も大きく、回転速度の上昇にともないトルクは低下する。
- 3) 通電中、入力パルスが加わらない状態では、回転子を固定する力 (ブレーキ) が働く。
- 4) 低速度の回転で、振動が生じる。また、パルス周波数を急激に変化させると入力パルスに追従できなくなること (脱調) がある。

② PM; permanent magnet

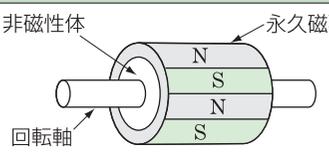
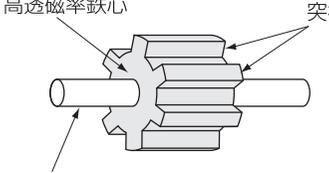
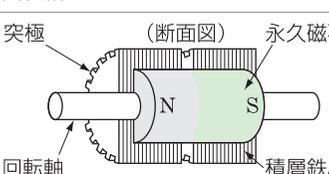
③ VR; variable reluctance

④ HB; hybrid

⑤ ステップ角 $\theta [^\circ]$ のモータに N 個の入力パルスが加わったときの回転角 $\alpha [^\circ]$ は、次式で求められる。

$$\alpha = N \times \theta$$

▼表3 ステッピングモータの種類・特徴

種類	回転子の構造	特徴
永久磁石形 (PM形)		<p>回転子の磁極は固定子の励磁極に吸引され、回転する。無励磁でも保持力が働き、回転軸を拘束する力がある。また、安価である。多極着磁により、ステップ角が7.5°や15°のものが多い。</p>
可変リアクタンス形 (VR形)		<p>回転子の突極は固定子の励磁極に吸引され、回転する。励磁電流によって生じる駆動トルクは大きいですが、無励磁では保持力が働かない。現在、ステッピングモータとしては製造されていない。同じ原理で動力用のスイッチトリアクタンスモータがつけられている。</p>
ハイブリッド形 (HB形)		<p>PM型とVR型を一体構造化したもので、駆動トルクが大きく、始動特性・停止特性がすぐれている。無励磁での保持力があり、微小ステップ角(1°以下)のものをつくらせることができるので、高精度位置決め用として使われる。</p>

3 制御用モータの分類

現在、半導体デバイスやコンピュータ制御の進歩によって、種々のモータが制御用と

して利用されている。おもな制御用モータの特徴と用途を表4に示す。

▼表4 制御用モータの特徴と用途

種類	特徴	おもな用途	
直流モータ	永久磁石形直流モータ	<ul style="list-style-type: none"> ・応答性がよい。 ・小形・軽量で大出力が得られる。 ・整流子まわりの保守が必要。 	事務機、コンピュータ周辺機器、音響・映像機器、ロボット、サーボモータ、自動車用電動機器
	ブラシレスDCモータ	<ul style="list-style-type: none"> ・整流子とブラシを電子化した速度制御用モータ。 ・回転子の磁極位置の検出器が必要。 	コンピュータ周辺機器、音響・映像機器、冷却ファン、電動工具、サーボモータ、自動車用電動機器
同期モータ	永久磁石形同期モータ	<ul style="list-style-type: none"> ・小形で高出力、高効率。 ・交流サーボモータとして利用される。 	サーボモータ、NC工作機械、産業用ロボット、エアコン、洗濯機、電気自動車
	同期リアクタンスモータ	<ul style="list-style-type: none"> ・回転子にすきま(スリット)を設ける。 	工作機械
	スイッチトリアクタンスモータ	<ul style="list-style-type: none"> ・高速回転、高出力。 	掃除機、油圧ポンプ
ステッピングモータ	<ul style="list-style-type: none"> ・回転速度がパルス周波数に同期する。 ・おもに位置制御に利用される。 	コンピュータ周辺装置、事務機、光学機器	
非同期モータ	三相かご形誘導モータ	<ul style="list-style-type: none"> ・構造が簡単。 ・三相電源が必要。 	サーボモータ、送風機、ポンプ、コンベア
	交流整流子モータ(ユニバーサルモータ)	<ul style="list-style-type: none"> ・始動トルクが大きく、高速な回転速度が得られる。 ・整流子まわりの保守が必要。 ・交流・直流両用機が実現できる。 	電動工具、フードプロセッサ、掃除機
リニアモータ	<ul style="list-style-type: none"> ・電気エネルギーを直線運動に変換。 	NC工作機械、事務機、搬送・組立機械、カーテン、自動ドア、地下鉄	

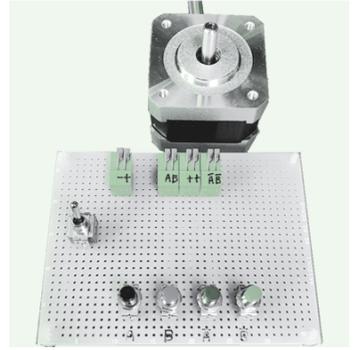
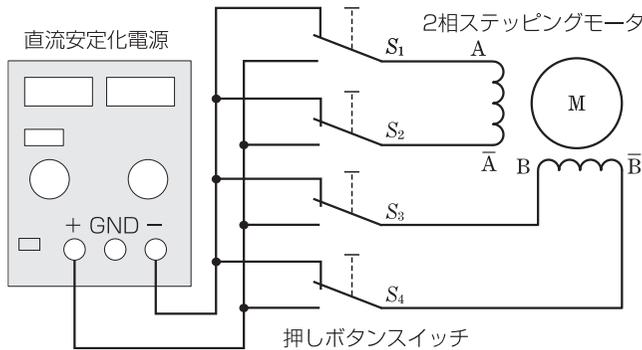
手動でステッピングモータを回してみよう

ステッピングモータは、各相のコイルを正しい順序で励磁すれば、手動でも回すことができる。回転するか確認しよう。

<準備^①> 直流安定化電源装置、配線用電線、2相バイポーラステッピングモータ（リード線が4本）、押しボタンスイッチ4個

<配線> 下図のように、配線する。このとき、スイッチは固定し、はんだ付けをするなど確実に結線する。

①モータやスイッチは定格のわかるものを用意すること。スイッチの定格電流は1A以上が望ましい。



▲図 ステッピングモータの配線図

- <手順>
- ① 電源は、モータ、スイッチの定格電流^②以下に制限する。
 - ② A相のスイッチ S_1 をオンにし、電源の電圧を0Vから徐々に上げる。モータの軸に制動トルク^③が生じたら、電圧を固定し、スイッチ S_1 をオフにする。
 - ③ コイルが $A \rightarrow B \rightarrow \bar{A} \rightarrow \bar{B} \rightarrow A \rightarrow \dots$ の順に励磁されるように、スイッチ S_1, S_2, S_3, S_4 を順に押す。
 - ④ ③と逆の順番でスイッチを押して、コイルを励磁させる。
 $\bar{B} \rightarrow \bar{A} \rightarrow B \rightarrow A \rightarrow \bar{B} \rightarrow \dots$
 - ⑤ 1回転させるには何回スイッチを押せばよいか、予想してから、試す。

<まとめ> 次のことを確認しよう。

- ①実験結果の説明を図や文章でまとめよう。
- ②ステッピングモータを実際に回してみて、理解が深まったか、確認しよう。
- ③このモータを使って、どのようなものがつくれそうか考えよう。

- ②無負荷での実験なので、定格以下の励磁電流でもモータは回転するため、モータまたはスイッチのうち、小さい定格電流以下の電流にする。
- ③軸を指で回しにくい状態にする。制動トルクが生じない場合は、配線、電源スイッチ、モータの断線などを確認する。

■ 節末問題 ■

1 次の各文は、小形モータについて説明したものである。①～⑭に当てはまるものを下の語群から選べ。

(1) ある小形直流モータは、N極用とS極用の2個の永久磁石、回転子に収められた3個のコイル、3個の整流子片で構成されていた。一般に□①にスロットがあると、脈動トルクが生じる。そこで、希土類系永久磁石の大きな□②を生かし、溝をなくしてエアギャップにコイルを設け、トルクの脈動の低減をめざしたモータがつくられている。

5

(2) ブラシレスDCモータは、□③が回転子側に、□④が固定子側に取りつけられた構造になっており、一般的な直流モータにあるブラシと整流子がない。このため、□④の電流を切り換えるために磁極の位置を検出する□⑤とトランジスタで構成された駆動回路などが用いられる。ブラシレスDCモータは半導体素子の発達とともに発展してきたモータである。

10

(3) 小形の□⑥モータには、永久磁石を回転子の表面に設けた□⑦、永久磁石を回転子に埋め込んだ□⑧、回転子に強磁性体の鉄心のみを用い、永久磁石を使用しない同期リラクタンスモータという種類がある。小形直流モータは、電池だけで運転されるものが多いが、□⑥モータは、円滑な□⑨が困難なために制御回路が必要になる。

15

(4) ステッピングモータは□⑩モータともよばれ、駆動回路に与えられた□⑪に比例する□⑫だけ回転する。したがって、このモータはパルスを周期的に与えると、そのパルスの□⑬に比例する回転速度で回転する。ステッピングモータには、回転子の特徴によって可変リラクタンス形、永久磁石形、□⑭形がある。

20

語群	ア. 永久磁石	イ. 始動	ウ. 同期	エ. 回転角度
	オ. 電機子鉄心	カ. 残留磁気	キ. 周波数	ク. パルス
	ケ. 電機子巻線	コ. ホール素子	サ. ハイブリッド	
	シ. パルス数	ス. IPMSM	セ. SPMSM	

2 永久磁石形直流モータがある。電源電圧が12V、回転を始める前の静止状態での始動電流は3A、定格回転速度における定格電流は1.2Aであった。定格運転時の効率 η は何パーセントか。ただし、静止状態の直流モータの電圧降下は、電機子巻線抵抗によるものとし、効率 η は $\eta = \frac{\text{入力電力} - \text{電機子抵抗による消費電力}}{\text{入力電力}} \times 100$ で求めること。

25

3 ステッピングモータに加わるパルス周波数が480ppsのとき、回転速度が 1200 min^{-1} だった。このモータのステップ角 θ [°]を求めよ。

30

この節で学ぶこと

いままで学んだように、電動機には同期電動機や誘導電動機、直流電動機などがあり、それぞれの特徴を生かし、多くの場面で利用されている。ここでは、利用するさいの、電動機の選定方法や使用条件、また、正常に使用するための基本的な保守方法を学ぼう。

5

1 電動機の利用

1 電動機の選定

電動機を動力として使用する場合、一般的に、次の点を考慮して、使用する電動機の種類を決める。

- 1) 負荷に最も適したトルク-速度特性をもっていること。
- 2) 使用場所の気温や通風に適した冷却方式のものであること。
- 3) 使用場所に応じた構造、保護形式のものであること。
- 4) 負荷に応じた連結方式・制御方式のものであること。

このほか、設備費や保守の費用など経済的な条件を考慮することや、信頼性が高く、互換性や省エネルギーに配慮した電動機を選ぶようにすることなど、細部にわたっても検討する必要がある。表1に、負荷の種類とそれに適合する電動機の例を示す。

▼表1 負荷の種類と電動機の特性

負荷の種類	負荷の特徴	利用される電動機の種類
低速エレベータ (12階建て以下)	速度 30~105 m/min, 可変速運転	永久磁石形同期電動機, 三相誘導電動機 3.7~37 kW
高速エレベータ (13階建て以上)	速度 120~1010 m/min, 可変速運転	永久磁石形同期電動機, 三相誘導電動機 22~210 kW
エスカレータ	勾配 8~30° (45 m/min), 勾配 30~35° (30 m/min)	三相かご形誘導電動機, 永久磁石形同期電動機
ポンプ	始動トルク小, 定速運転	三相かご形誘導電動機
送風機, 圧縮機	始動トルク小, 可変速運転	三相誘導電動機, 単相誘導電動機, 同期電動機
電気鉄道	始動トルク大, 可変速運転	直流直巻電動機, 三相誘導電動機, 永久磁石形同期電動機, リニア誘導モータ
工作機械	高速・高精度, 保守の容易さ, 小形・高出力	主軸 三相かご形誘導電動機 送り軸 交流サーボモータ, リニアモータ

問 1 家庭で使われる交流電動機の種類をあげ、その特徴をまとめよ。

各種機器などの負荷を始動させ稼働するために、次の点を考慮して、

電動機の始動トルクや出力を決める。

- 1) 負荷を始動させるために必要なトルク。
- 2) 継続的に運転するための回転速度および出力。
- 3) 電動機と負荷をつなぐ減速機やベルトなどの伝達効率、および負荷変動などを考慮した余裕率。

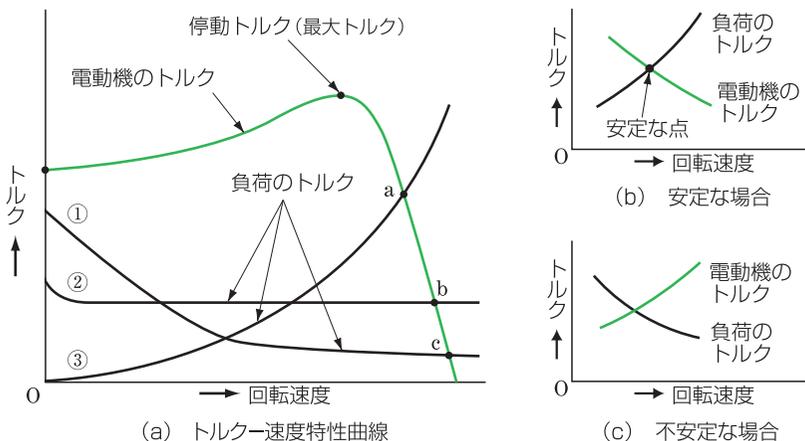
負荷の特性は、一般に回転速度に対するトルクの変化で表される。安定した運転をするためには、この特性に適した電動機を選択する必要がある。

図1(a)は、誘導電動機、および負荷のトルク特性を表している。①は巻取機などの負荷、②はエレベータやクレーンなどの負荷、③はポンプや送風機などの負荷の特徴を示した特性曲線の例である。

誘導電動機は、停動トルク時より回転速度が速い領域では、図1(b)のように、回転速度が上昇するとトルクが減少する特性をもつため、図1(a)の点a、b、cで各負荷の速度は安定となる。

次に、停動トルク時よりも回転速度が遅い領域では、図1(c)のように、負荷トルクが変動すると電動機が急停止したり回転速度が急上昇したりするため、不安定となる。このため、電動機を安定に運転し続けるためには、図1(b)の特性をもつ速度領域で利用する必要がある。

- ①トルクが速度に反比例（出力は一定）する特性で、これを**定出力負荷**という。
- ②トルクが速度によらず一定（出力は速度に比例）する特性で、これを**定トルク負荷**という。
- ③トルクが速度の2乗に比例（出力は速度の3乗に比例）する特性で、**二乗トルク負荷**という。
- ④第4章 p.146 参照。



▲図1 負荷と電動機のトルク-速度特性

2 電動機の所要出力

電動機は、クレーン・巻上機・エレベータなどの荷物を運搬する機器や、工作機械・粉碎機・ポンプ・圧縮機・送風機などの生産機械に使用されるが、電動機の出力(所要出力)の計算方法は異なる。ここでは、例として、クレーン・エレベータ・ポンプ・送風機に使用される電動機の出力を求める計算式を示す。

1 クレーン

図2のような天井クレーン^①がある。巻上用(フック)電動機の出力 P_1 [W]、横行用(トロリ)^{おうこう}電動機の出力 P_2 [W]、走行用(けた)電動機の出力 P_3 [W]は、それぞれ次式で計算される。

$$\text{巻上用電動機} \quad P_1 = \frac{9.8m_1v_1}{60} \cdot \frac{100}{\eta_1} \quad (1)$$

m_1 ; 巻上質量 [kg], v_1 ; 巻上速度 [m/min]

η_1 ; 巻上装置の全効率 [%](通常 70~85 %)

$$\text{横行用電動機} \quad P_2 = \frac{9.8(m_1 + m_2)v_2r_2}{60} \cdot \frac{100}{\eta_2} \quad (2)$$

m_2 ; トロリの質量 [kg], v_2 ; 横行速度 [m/min]

r_2 ; 横行の走行抵抗^③

η_2 ; 横行装置の機械効率 [%](通常 75~80 %)

$$\text{走行用電動機} \quad P_3 = \frac{9.8(m_1 + m_2 + m_3)v_3r_3}{60} \cdot \frac{100}{\eta_3} \quad (3)$$

m_3 ; けたの質量^④ [kg], v_3 ; 走行速度 [m/min]

r_3 ; 走行の走行抵抗

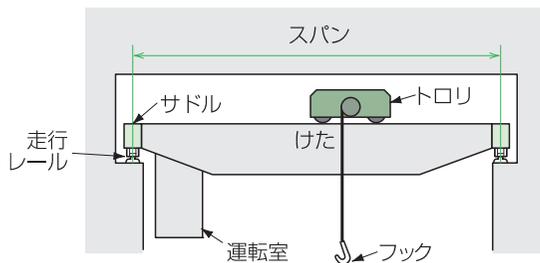
η_3 ; 走行装置の機械効率 [%] (通常 67~75 %)

①クレーンには、天井クレーン・ジブクレーン・橋形クレーンなどがある。

②係数 9.8 は重力加速度 g [m/s²] で、 $F = mg$ より 9.8 m は荷重 [N] を表す。

③走行の抵抗となる車輪や車軸の摩擦などによるもの。

④けたの質量には、運転室の質量を含む。



- フックを上下に動かす → 巻上
- トロリを左右に動かす → 横行
- けたを前後に動かす → 走行

▲図2 天井クレーンの例

例題

1

巻上質量 5000 kg(5 t)^①の物体を毎分 12 m の速度で巻き上げる場合の巻上用電動機の出力 P_1 [kW] を求めよ。ただし、巻上装置全体の効率 η_1 を 80 % とする。

解答
$$P_1 = \frac{9.8 \times m_1 v_1}{60} \cdot \frac{100}{\eta_1} = \frac{9.8 \times 5000 \times 12}{60} \cdot \frac{100}{80} = 12250 \text{ W}$$

$$P_1 = 12.3 \text{ kW}$$

①実際の天井クレーン設備は規模が大きいため、質量は[t]、速度は[m/min]、出力は[kW]の単位が用いられることが多い。ただし、1t=1000kgである。

5

問 2

$m_1 = 10 \text{ t}$, $v_1 = 8 \text{ m/min}$ として、巻上用電動機の出力 P_1 [kW] を求めよ。ただし、巻上装置の全効率 η_1 は 70 % とする。

2

エレベータ

図3のようなエレベータがある。かごに定格積載質量の 40~50 % を載せたときの重力が、

②エレベータの駆動方式には、ロープ式と油圧式とがある。

釣りあい釣合おもりにかかる重力と等しくなるように構成されている。エレベータの電動機の出力 P [W] は、次式で計算されている。

10

$$P = \frac{9.8(m_1 - m_2)v}{60} \cdot \frac{100}{\eta_w} \quad (4)$$

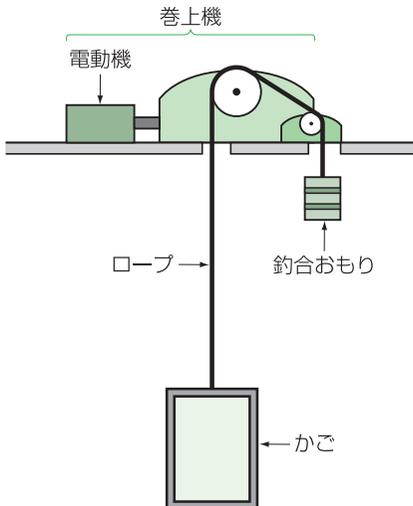
v ; エレベータの速度 [m/min]

m_1 ; かごの質量 + 定格積載質量 [kg]

m_2 ; 釣合おもりの質量 [kg]

η_w ; 巻上機の効率 [%]

15



▲図3 エレベータの例

問 3

積載質量を含めたかご全体の質量が 1000 kg、釣合おもりの質量が 800 kg のエレベータを毎分 30 m の速度で運転したときの電動機の出力 P [kW] を求めよ。ただし、巻上機の効率を 70 % とする。

3 ポンプ

図4のようなポンプに用いられる電動機の出力 P [kW] は、次式で計算される。

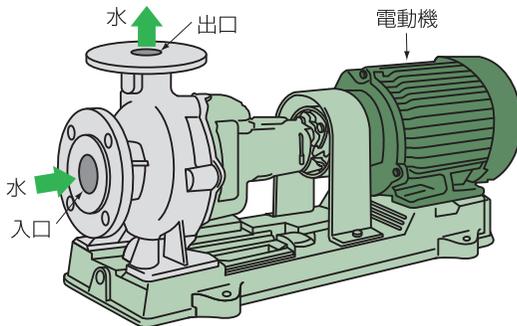
$$P = \frac{9.8\alpha_P Q H}{60} \cdot \frac{100}{\eta_P} \quad (5)$$

Q ; 揚水量 [m^3/min], H ; 全揚程 [m]

η_P ; ポンプの効率 [%]

α_P ; ポンプの設計・工作上の誤差を見込んで余裕をもたせる係数 (通常 1.1~1.2)

① 揚水量が $1\sim 100\text{m}^3/\text{min}$ のポンプでは、効率が 65~80%程度である。



▲ 図4 ポンプの例

問 4 $Q = 4\text{m}^3/\text{min}$, $H = 10\text{m}$, $\alpha_P = 1.1$ の場合、ポンプの電動機出力 P [kW] を求めよ。ただし、ポンプの効率 η_P は 75% とする。

4 送風機

図5のような送風機に用いられる電動機の出力 P [kW] は、次式で計算される。

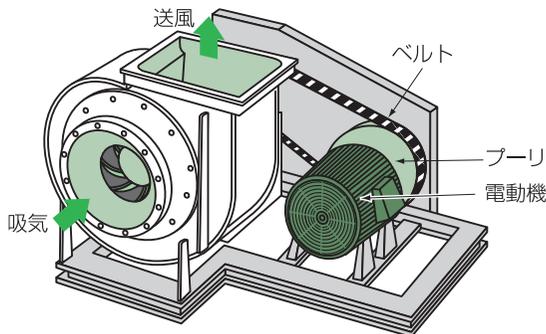
$$P = \frac{\alpha_B Q p_B}{60} \cdot \frac{100}{\eta_B} \quad (6)$$

Q ; 風量 [m^3/min], p_B ; 風圧 [kPa]

η_B ; 送風機の効率 [%]

α_B ; 余裕をもたせる係数 (通常 1.05~1.2)

② blower



▲ 図5 送風機の例

3

電動機の保守

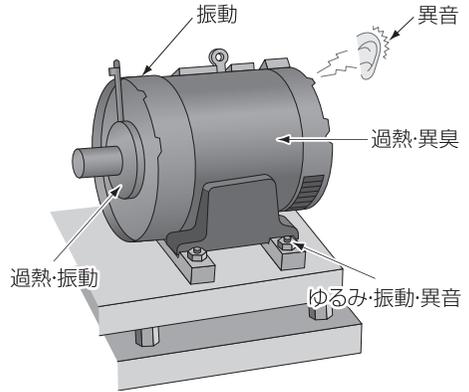
電動機を正常な状態で運転し、故障を未然に防ぐには、日常の点検や定期点検を正しく行う必要がある。

1

日常の点検

毎日行う点検には、次のような事項がある。

- 1) スイッチ投入前に軸を手で回してひっかかりの有無を確かめ、すえ付けボルト・カップリングの緩み、配線の緩みなどを手で触れたり、目視したりして点検する。
- 2) 始動時または運転中に、異常な振動や音が発生していないか注意する（振動は、ケースを手で触れて確かめるとよい）。
- 3) 運転中に異臭はないか確認する。
- 4) 運転中に電動機のケースを手で触れて、温度上昇の程度を確認する。



▲図6 電動機の点検基準

5

10

15

2

定期点検

ある期間を決めて定期的に行う点検は、次に示すように、日常の点検よりもさらに詳しく行う

必要がある。

- 1) 動力機器では、絶縁抵抗の測定（メガータスト）を行う。
- 2) ブラシの摩耗を点検し、必要ならば交換する。
- 3) 軸受（ベアリングなど）を点検し、必要ならばグリースを補給する。
- 4) 通風孔などのほこりや油よごれを清掃する。

このほか、電動機を更新や新規導入したときには、ボルトや配線のゆるみなどによる不具合を生じやすいことにも留意し、点検を行う。

20

25

■ 節末問題 ■

1 次の各用途に用いられる電動機の種類を調べよ。

- (1) エレベータに用いられる電動機
- (2) 工作機械に用いられる電動機
- (3) ポンプに用いられる電動機

2 電動機の出力 5 kW、全揚程 10 m のポンプを 1 分間運転したときの揚水量 Q [m^3/min] を求めよ。ただし、ポンプの効率は 72 % で、余裕をもたせる係数 α_P は 1.1 とする。

30

この章のまとめ

1 節

- ① 永久磁石形直流モータは、界磁に強力な永久磁石が用いられており、小形で高トルク、しかも制御性のよいモータである。▶ p.215~216
- ② ブラシレス DC モータは、ブラシと整流子を電子的整流機構に置き換えたモータである。回転子の磁極の位置検出にホール素子が用いられている。▶ p.218~219
- ③ 小形同期モータには、永久磁石形同期モータ、リラクタンスモータがある。▶ p.220~221
- ④ 小形非同期モータには、誘導モータ・交流整流子モータがある。▶ p.222
- ⑤ リニアモータは、回転形モータを直線状に展開した構造をしており、リニア誘導モータ、リニア同期モータ、リニア直流モータ、リニアパルスモータなどの種類がある。▶ p.223
- ⑥ サーボ機構に用いられるモータは、サーボモータとよばれる。サーボモータには、直流 (DC) サーボモータと交流 (AC) サーボモータがある。▶ p.224~225
- ⑦ ステッピングモータは、パルス電圧で回転子が駆動され、入力パルス数に比例する回転角が得られるモータである。▶ p.226

2 節

- ⑧ 電動機の選定では、負荷の回転速度・トルク特性、伝達機構の効率、負荷変動やその他の損失などのための余裕率を調べ、考慮する必要がある。▶ p.231~232
- ⑨ 電動機を安定運転させるには、回転速度が増加、トルクが減少する領域で運転する。▶ p.232
- ⑩ クレーンに使用される電動機の出力はそれぞれ次式で表される。▶ p.233

$$(1) \text{ 巻上用電動機 } P_1 = \frac{9.8m_1v_1}{60} \cdot \frac{100}{\eta_1} [\text{W}]$$

$$(2) \text{ 横行用電動機 } P_2 = \frac{9.8(m_1+m_2)v_2r_2}{60} \cdot \frac{100}{\eta_2} [\text{W}]$$

$$(3) \text{ 走行用電動機 } P_3 = \frac{9.8(m_1+m_2+m_3)v_3r_3}{60} \cdot \frac{100}{\eta_3} [\text{W}]$$

- ⑪ エレベータに使用される電動機の出力は、 $P = \frac{9.8(m_1-m_2)v}{60} \cdot \frac{100}{\eta_w} [\text{W}]$ で表される。▶ p.234
- ⑫ ポンプに使用される電動機の出力は、 $P = \frac{9.8\alpha_P QH}{60} \cdot \frac{100}{\eta_P} [\text{kW}]$ で表される。▶ p.235
- ⑬ 送風機に使用される電動機の出力は、 $P = \frac{\alpha_B Q p_B}{60} \cdot \frac{100}{\eta_B} [\text{kW}]$ で表される。▶ p.235
- ⑭ 電動機の保守点検は、安全と確実な運転を確保するために不可欠であり、日常の点検・定期点検を正しく行う必要がある。▶ p.236

章末問題

- 1 ブラシレス DC モータにおいて、回転子の位置を検出するために、何が使われているか。また、その理由を述べよ。
- 2 ステッピングモータは制御用モータであるが、サーボモータではない。その理由を述べよ。

3 次の(1)~(5)のモータに最も関係の深いものを語群から選べ。

- (1) 交流整流子モータ (2) コアレスモータ (3) ステッピングモータ
 (4) 永久磁石形直流モータ (5) ブラシレス DC モータ

語群 ア. アルニコ磁石 イ. プリント配線モータ ウ. 単相交流電源
 エ. ホール素子 オ. ハイブリッド形回転子

5

4 リニアモータには、どのような種類があるか。

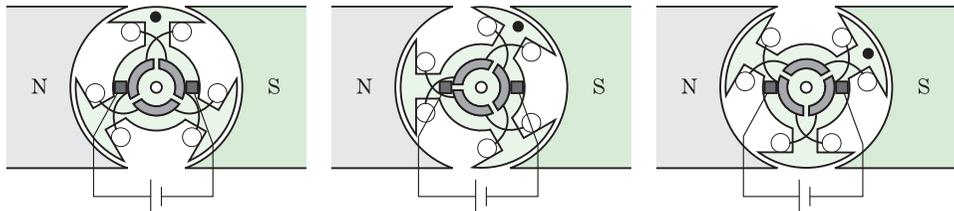
5 次の負荷の特性(1)~(3)に最も関係の深いものを語群から選べ。

- (1) 定トルク負荷 (2) 二乗トルク負荷 (3) 定出力負荷

語群 ア. 巻取機 イ. 送風機 ウ. 巻上機 エ. ポンプ オ. エレベータ

6 図1は3スロットの永久磁石形直流モータである。このモータに、図1のように電圧を加えると時計方向に回転する。コイルにはどのような方向の電流が流れるか。○の中にドットとクロスを用いて記入せよ。また、三つの突極の極性を調べよ。

10



▲図1

1 p.233 図2のような、巻上質量が 1500 kg、トロリの質量が 300 kg、けたの質量が 400 kg の天井クレーンがある。また、巻き上げ速度 6 m/min、横行および走行速度 15 m/min、横行および走行の走行抵抗 0.03、巻上機械、横行および走行機械の効率は 75 % である。このクレーンの巻上電動機、横行電動機、走行電動機のそれぞれの出力 P_1 [kW], P_2 [kW], P_3 [kW] を求めよ。

15

2 かごの質量が 180 kg、定格積載質量が 850 kg のロープ式エレベータにおいて、釣合おもりの質量を、かごの質量に定格積載質量の 40 % を加えた値とする。このエレベータで定格積載質量を搭載したかごを一定速度 90 m/min で上昇させるときの電動機の出力を求めよ。ただし、エレベータの機械効率を 70 % とする。

20

3 毎分 1.5 m^3 の水を揚水したい。全揚程を 5 m、ポンプ効率を 70 %、余裕を持たせる係数を 1.2 とするときの電動機の出力 P [kW] を求めよ。

4 揚水量が毎分 2.0 m^3 、全揚程が 11.2 m、効率が 78 % の給水ポンプがある。ポンプに余裕を持たせる係数を 1.1 としたとき、電動機の出力 P [kW] を求めよ。

5 送風機を、風量 $15 \text{ m}^3/\text{min}$ 、風圧 1.58 kPa で運転するとき、必要な電動機の出力 P [kW] を求めよ。ただし、送風機の効率を 63 %、余裕を持たせる係数 α_B を 1.1 とする。

25

B