

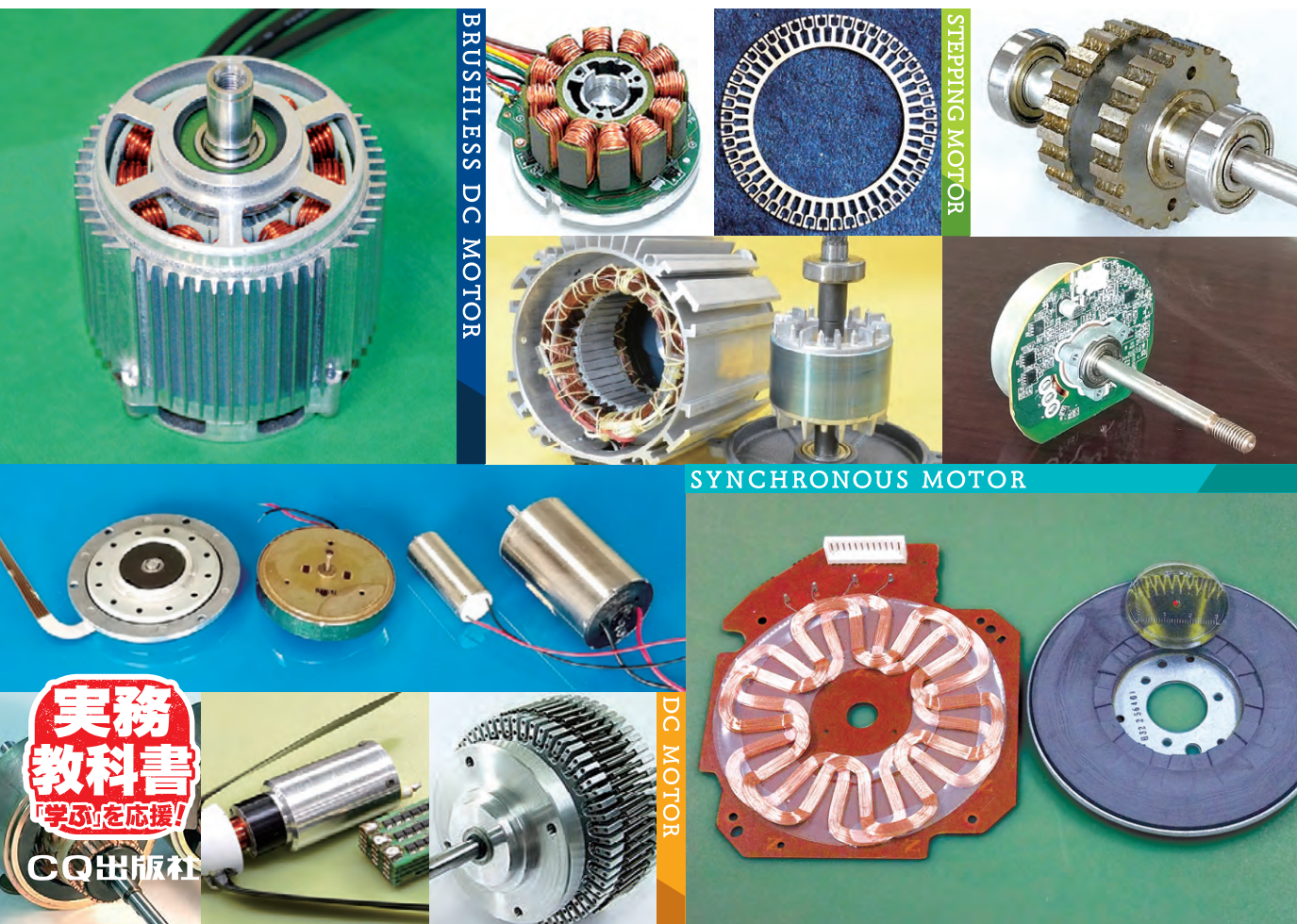
トランジスタ技術 SPECIAL

駆動回路のキホンから進化系モータまで [保存版 ギヤ&歯車付き]

モータ大図鑑

メカニズムの研究

見城 尚志
他著



未来の生活の キー・デバイス「モータ」

宮村 智也 Tomoya Miyamura

そもそも「モータ」とは

● マジメな定義はモータ=電動じゃない

モータという言葉から、何を思い浮かべるでしょうか?多くの読者は、電力から機械的な動力を生み出す電気モータを思い浮かべるのではないのでしょうか。

モータは英単語 Motor の日本語表記といえます。改めて Motor を英和辞典で調べてみると、「(自動車などの)(特に電動の)モータ、発動機、原動機、(英やや古/略式)自動車」とあります。

どうやら Motor というのは、電気モータだけを指す言葉ではなさそうです。Motor を何らかのエネルギー源から機械的な動力を生み出す装置一般を指す言葉と捉えると、Motor は「原動機」と訳すのがよりしっくりくる、というのが筆者の感想です。

本稿では、電気エネルギーから機械的な動力を生むモータのことをあえて教科書風に「電動機」と呼んでみることにします。

● そのそもの意味「原動機」って何?

「原動機」という言葉を国語辞典で調べてみると、「自然界に存在するエネルギーを、機械的エネルギーに変換する機器の総称」とあります。電力が自然界に存在するエネルギーだといえるのかと言われると、さまざま意見があるかもしれませんが、雷(=電気)も自然界に存在するエネルギーと思えば、電動機も原動機の1つだといえるでしょう。

原動機の種類は実に多く存在します。主な原動機の一覧を表1に示します。

18世紀半ばから始まった産業革命以前からある原動機として代表的なものに、風車と水車があります。

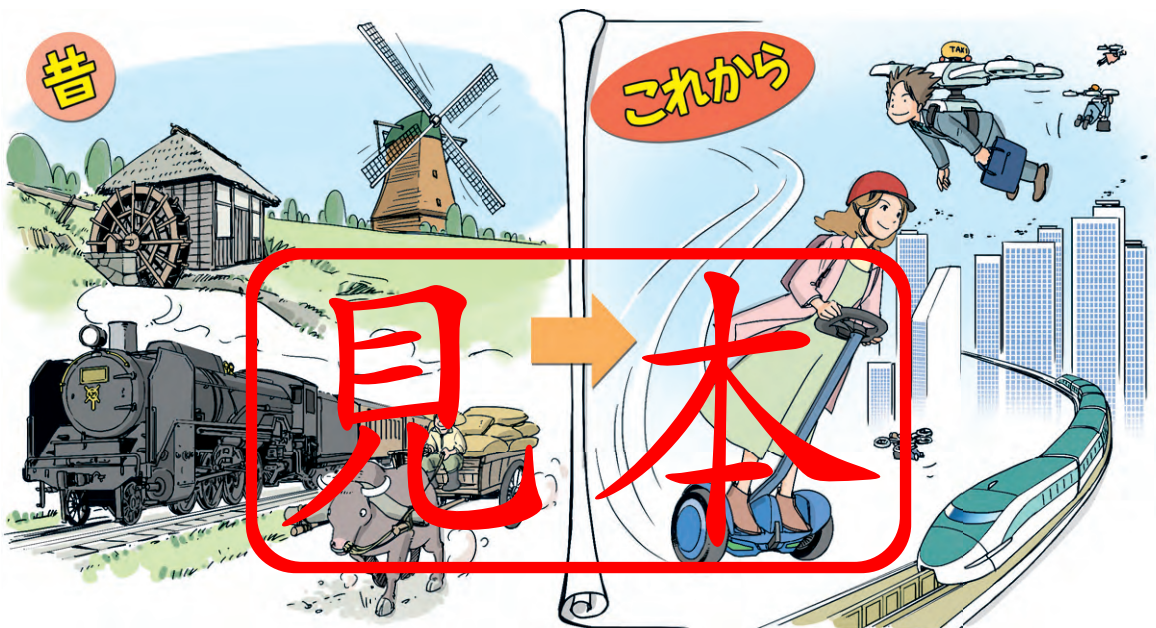


図1 Motor(原動機)のおかげで生活はより便利で豊かになった

表1 モータ本来の意味「原動機」は幅広い
主な原動機を列举してまとめた

大分類	小分類	種類	説明
電動機	直流電動機	他励電動機	直流電源に接続するだけで回転する電動機。回転子に巻かれた巻線に流れる電流の方向を、整流子とブラシで機械的に切り替えることで回転する。トルクの素となる界磁束をどう発生させるかで各種あり、それぞれ特性も異なる。小型の直流機は界磁に永久磁石を用いており、家庭用品で広く採用されている
		分巻電動機	
		直巻電動機	
		複巻電動機	
	交流電動機	誘導電動機	固定子に設けた巻線に交流を加え、回転子に設けた巻線(または導体)に電磁誘導作用でエネルギーを伝えて回転する電動機。電動機としては最も構造を簡単にできるため、一般産業用から家庭用まで、あらゆるところで用いられている
		同期電動機	回転子に電磁石または永久磁石を配置し、これに三相交流で発生させた回転磁界を作用させることで回転する電動機。高性能磁石の実用化とマイコン、パワエレ技術の発展により近年さまざまな分野で採用されるようになってきた。ブラシレスDCモータも構造は同期電動機そのもの
熱機関	内燃機関	レシプロ・エンジン	容積型の内燃機関で、燃焼室に導入した燃料ガスを燃焼させ、燃焼ガスの膨脹圧力でピストンを往復(reciprocating)させる。ピストンの往復運動はクランク機構で回転運動に変換する。自動車、船舶の原動機として広く採用されている
		ロータリ・エンジン (バンケル・エンジン)	容積型の内燃機関で、回転機構による容積変化を利用して燃焼ガス圧力を回転運動に変換する
		ガス・タービン	速度型の内燃機関で、圧縮機で圧縮した空気に燃料を噴射し燃焼させることで高温高压のガスを発生させ、このガスでタービンを回転させて動力を得る。ヘリコプタや発電用の原動機として採用例が多い
	外燃機関	蒸気エンジン	容積型の外燃機関で、ボイラで発生させた高压の水蒸気をシリンダに導き、水蒸気の圧力でピストンを往復させる。代表的な採用例に蒸気機関車がある
		蒸気タービン	速度型の外燃機関で、高温高压の水蒸気をノズルまたは固定羽根を通して噴出・膨脹、あるいは方向変化させて高速の蒸気流をつくり、これを軸に取り付けた羽根に噴き付けて軸を回転させることで動力を得る。各種汽力発電用の原動機として採用されている
		スターリング・エンジン	容積型の外燃機関で、シリンダ内のガスを外部から加熱・冷却し、シリンダ内のガス体積を変化させることで動力を得る
流体機械	風車	風力を利用して羽根車を回し、動力を得る。近年、再生可能エネルギー利用として発電用に盛んに用いられている。一部の地方では揚水、脱穀、製粉などの動力源としても利用されている	
	水車	運動・圧力・位置エネルギーなどの形で水がもっているエネルギーを、羽根車の回転により動力に変換する。人類が開発した最も古い原動機とされる。現代では水力発電用原動機として広く用いられている	
	空圧モータ	圧縮空気の力で回転する原動機。火花が発生する心配がないので、可燃性ガスや粉塵爆発雰囲気のある場所や高温、高湿でも使用することができる。各種の工具、鉱山の坑内機械などの動力源として広く使われている	
	油圧モータ	油圧ポンプなどから得た圧力の高い油を得て回転する原動機。電動機より出力密度の高い原動機を得やすい。工作機械、建設機械、土木機械、特装车、農業機械、漁業機械など、さまざまな場所で使われている	

産業革命は蒸気機関の実用化によって進展したわけですが、蒸気機関やその後登場した各種の内燃機関も原動機の仲間です。

原動機は、人類の社会生活をより便利に、より豊かにする文字どおり「原動力」として機能し、発展してきたことはだれの目にも明らかでしょう(図1)。

なぜモータ=電動機になったのか

● 一番身近でたくさん使われているから
なぜ「モータ=電動機」というイメージが定着したのか。それは、われわれの生活で一番身近で「一番たくさん使われている原動機が電動機である」から、だと筆者は考えます。

ここでは各時代ごとに電動機がどのような電気機器

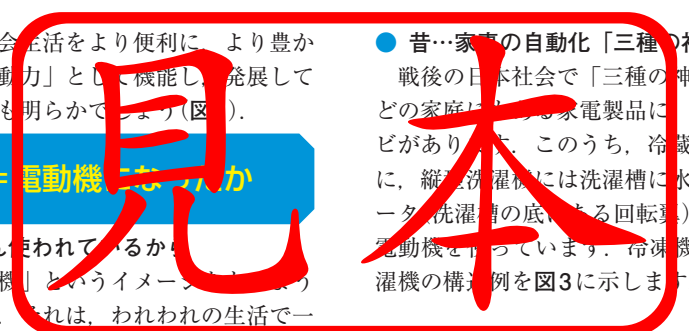
に採用されてきたのかについて、事例をいくつか紹介します。

● 昔…家事の自動化「三種の神器」に電動機

戦後の日本社会で「三種の神器」と呼ばれ、今ではどの家庭にもある家電製品に、冷蔵庫、洗濯機、テレビがありました。このうち、冷蔵庫には冷凍機の駆動用に、縦型洗濯機には洗濯槽に水流を発生させるパルセータ(洗濯槽の底にある回転子)の駆動用に、それぞれ電動機が使われています。冷凍機の模式図を図2に、洗濯機の構造例を図3に示します。

● 近年…白物も黒物も家電は電動機入り

その後、さまざまな種類の家電製品が続々と発売されましたが、家庭生活の省力化や自動化を目的とする



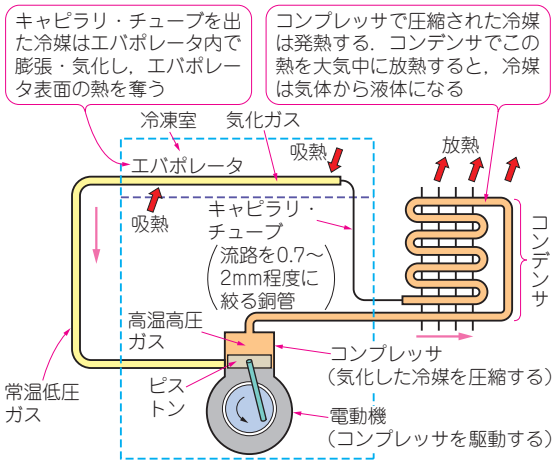


図2 冷蔵庫やエアコンで使用される冷凍機の模式図⁽¹⁾
熱輸送に用いるガス(冷媒という)を圧縮するコンプレッサに電動機を用いるものが家庭用では多く使用されている。ビル空調用などの大型エアコンでは、コンプレッサの駆動に都市ガスを燃料とした内燃機関を用いるものもある

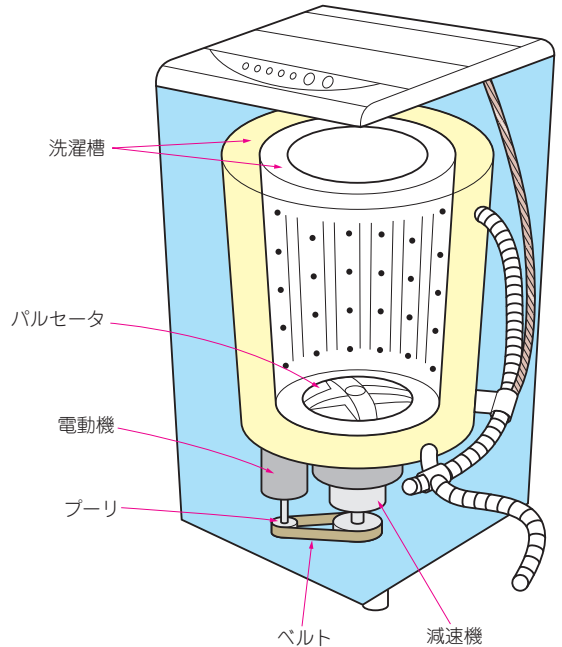


図3 縦型洗濯機の構造例⁽²⁾
洗濯槽内に水流を発生させるバルセータを駆動するための動力源に交流電動機が使われている

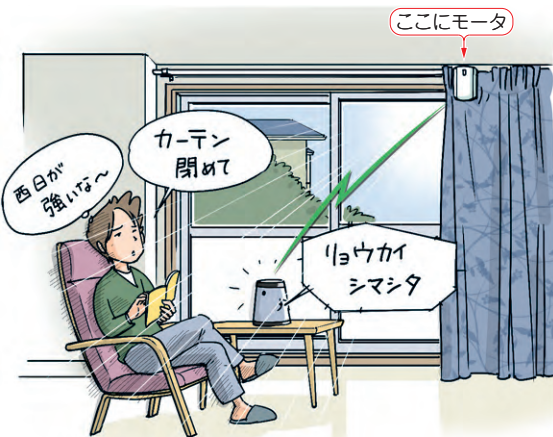


図4 クラウド経由でカーテンを開閉する装置⁽³⁾
スマートフォンやスマート・スピーカーからクラウド経由でカーテンを開閉できる。また、スケジュールを設定することで、決まった時間に自動的にカーテンを開閉することもできる

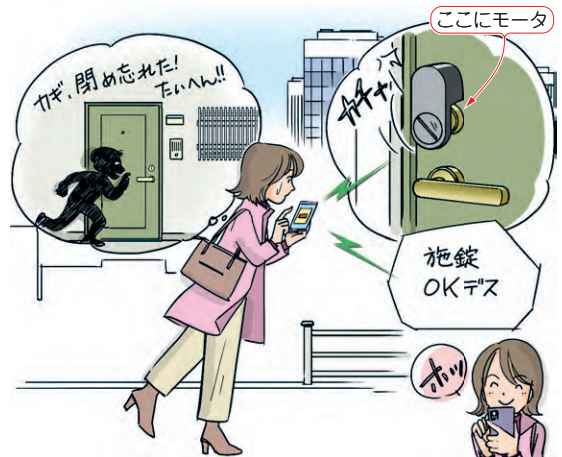


図5 玄関錠の開閉をスマート化するスマート・ロックの例⁽⁴⁾
既存の玄関錠にとりつけて使用する。スマートフォンと連携させて錠に近づくだけで施錠させる。遠隔で開錠・施錠の確認ができる。既存の玄関錠をオート・ロック化するなどの機能がある

家電製品には、ほぼ電動機が内蔵されています。

今でこそ音響機器は音声記録媒体に半導体メモリやクラウド・ストレージを使用するのがあたりまえとなりましたが、磁気テープや各種の円盤(アナログ・レコードやCDなど)が音声記録媒体として主流だった時代には、テープ走行やディスク回転に多くの電動機が使用されていました。

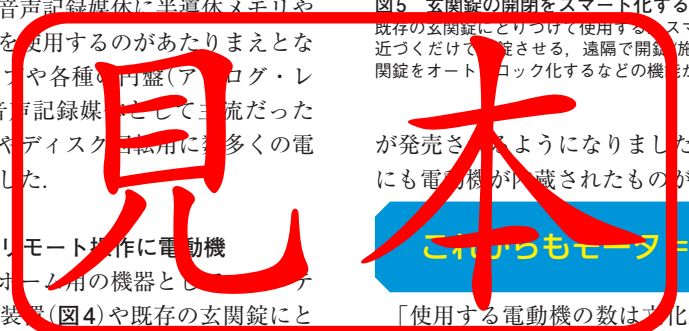
● 現代…IoT機器等のリモート操作に電動機

最近では、スマート・ホーム用の機器としてカーテンを自動的に開閉する装置(図4)や既存の玄関錠にとりつけて施錠を遠隔操作できるようにするスマート・ロック(図5)、人の手で操作する既存の各種スイッチやボタンをクラウド経由で操作するための機器(図6)

が発売されるようになりました。このようなIoT機器にも電動機が内蔵されたものが増えています。

ここからモータ=電動機な理由

「使用する電動機の数とは生活水準のバロメータである」などと何かで読んだことがあります。現状、人手に頼っていることを省力化・自動化しようと思ったら、身の回りを見ただけでも「原動機の第



本書で紹介するモータ

見城 尚志 Takashi Kenjo

一定速度の回転を必要とする場所に使われるモータは、かつては交流電源AC100Vなどの50Hz/60Hzを基準に動くものでしたが、現在では「ブラシレスDCモータ」と呼ばれる直流電源で駆動するモータが主流になっています。図1は産業用ロボットなどで位置決め制御に応用されている例です。

本特集では、ACかDCかといった電源の違いや、速度制御なのか位置制御なのかといった違いのことを考えて、図2のようにモータ进行分类します。制御にそぐわないモータなど、この図に載っていない種類のモータもあります。また、通常のカテゴリでは超音波モータは特別扱いするかもしれません。これは巻き線を使わないモータであり、電磁力ではなく摩擦力を使うモータだからです。

第1部は、図2の分類に従って進めます。加えて第2部では、モータ全般に関することや、視点を変えた論点として、以下の項目についても解説します。

- 動作モード
- モータの等価電気回路
- 体格と形状
- モータを逆回転させる方法

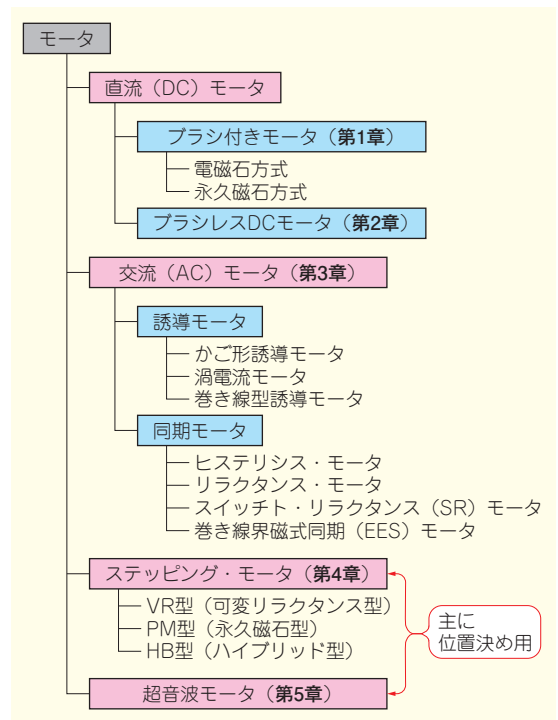


図2 本書で扱うモータの分類

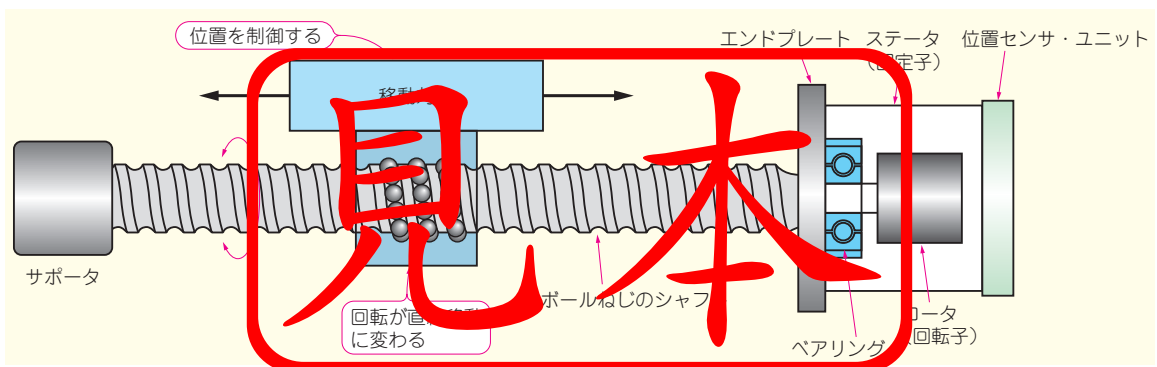


図1 位置決め制御に応用されるモータの例

製造工場の自動化(factory automation, FA)に使われる単軸アクチュエータの一例。移動対象をリード・スクリュー(送りねじ)で駆動して所定の位置に止める。ボールねじを回転させるために、モータの回転部分(回転子, ロータ)とスクリューを直結している。ロータは円筒状の永久磁石で、ロータを包みこむようなステータ(固定子)をエンドプレートにねじ止めする。エンドプレートには軸受け(ベアリング)がある

ブラシ付き DC モーター図鑑

1 DC モーターの動作原理

見城 尚志 Takashi Kenjo

一番身近なモーターは、電池で動く玩具などに使われている写真1のようなモーターでしょう。直流モーターあるいはDCモーターと呼ばれるモーターです。DCはdirect current(直流)の省略語です。ブラシレスDCモーターと区別するためブラシ付きDCモーターとも呼ばれます。このモーターを例に動作原理を説明します。

● 多くのモーターは磁石どうしの間や、磁石と鉄の間に働く力を使っている

図1のように、2枚の永久磁石を左右の手に持って近づけていくと、力の作用を体験できます。互いに引き付ける配置[図1(a)]と反発しあう配置[図1(b)]があります。このように、磁気は力学的な力を発生します。これをうまく使うのがモーターです。

一方が鉄片のときには、図2のように永久磁石の向きにかかわらず引力になります。

● モーターに使われている磁石は力の有無や向きを切り替えられる電磁石

図3のように、銅線などを巻いたもの(巻き線、コイル)に電流を流すと、磁気が発生します。これを電磁石と呼びます。

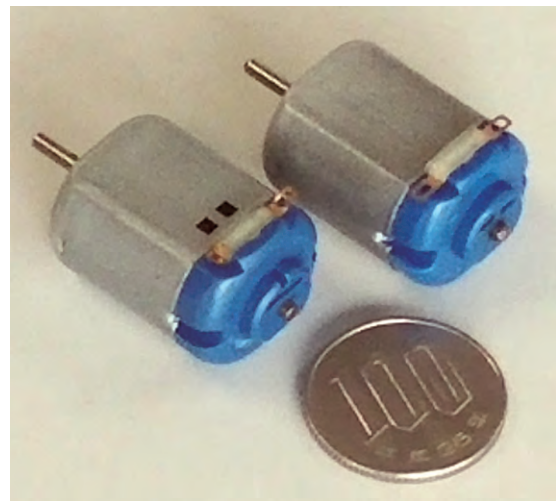
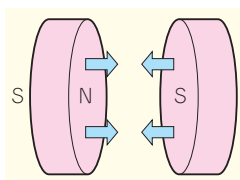
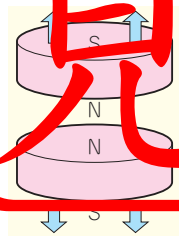


写真1 玩具用ブラシ付きDCモーター

- (1) 電磁石は永久磁石のかわりに使える
- (2) 図1において、2個の永久磁石のうちの1個を電磁石に置き換えると、電流の向きによって引力になる場合と斥力になる場合を切り替えられる
- (3) 図2の永久磁石を電磁石に置き換えると、巻き線と鉄片を組み合わせて引力を発生できる



(a) 引力



(b) 斥力

図1 2つの永久磁石の間に働く力

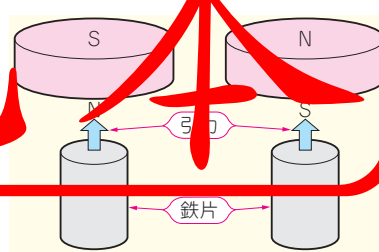


図2 永久磁石と鉄片の間に働く力

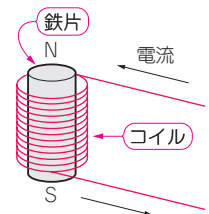
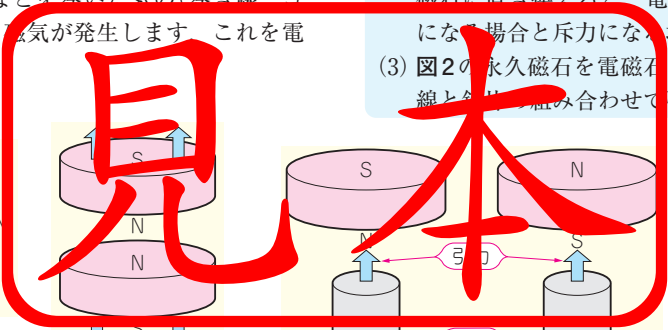


図3 電磁石



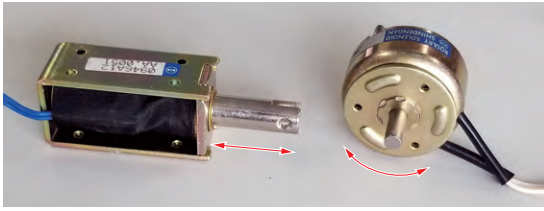


写真2 電磁石と鉄片を組み合わせて往復の動きを作る部品…ソレノイド

▶電磁石のON/OFFを使う例…ソレノイド

写真2のソレノイドは、巻き線と鉄片の組み合わせで、図4に示すような仕掛けになっています。電流のON/OFFにより往復運動が可能です。しかし、このメカニズムでは、持続的な回転運動はできません。

●回転が連続するように電磁石を切り替える仕組みをもたせることでモータになる

モータの原理で大事なことは、連続運転(回転が続くこと)が可能なメカニズムの創出です。

写真1に示した玩具用DCモータに使われている回転運動を実現するしくみを図5に示します。

▶回転のしくみ

モータの中には図5(a)のような回転子(ロータ)があります。この回転子には、図5(b)のような巻き線が3つあります。モータに取めたときの断面図が図5(c)で、このときは図5(d)のような接続になっています。電源 V_s はブラシに接続され、ブラシと接触している整流子を経由して、C点に+、B点に-が供給され、巻き線に電流が流れます。

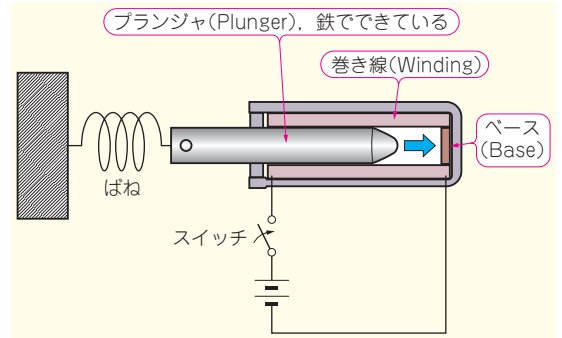
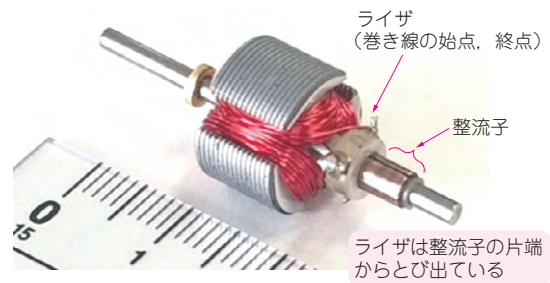


図4 巻き線に電流を流すと鉄片が引き込まれるのがソレノイドの動作原理

▶連続動作のメカニズム

図6に、連続運転のようすを示します。永久磁石と電磁石の組み合わせを使って力を発生させ、電流を切り替えて回転を連続させます。永久磁石と電磁石をうまく組み合わせて使うと、引力と斥力を制御してモータになるわけです。

ブラシ付きDCモータは、電源電圧の極性を逆にする事で回転方向を切り替えられます。



(a) 回転する部分(ロータ)

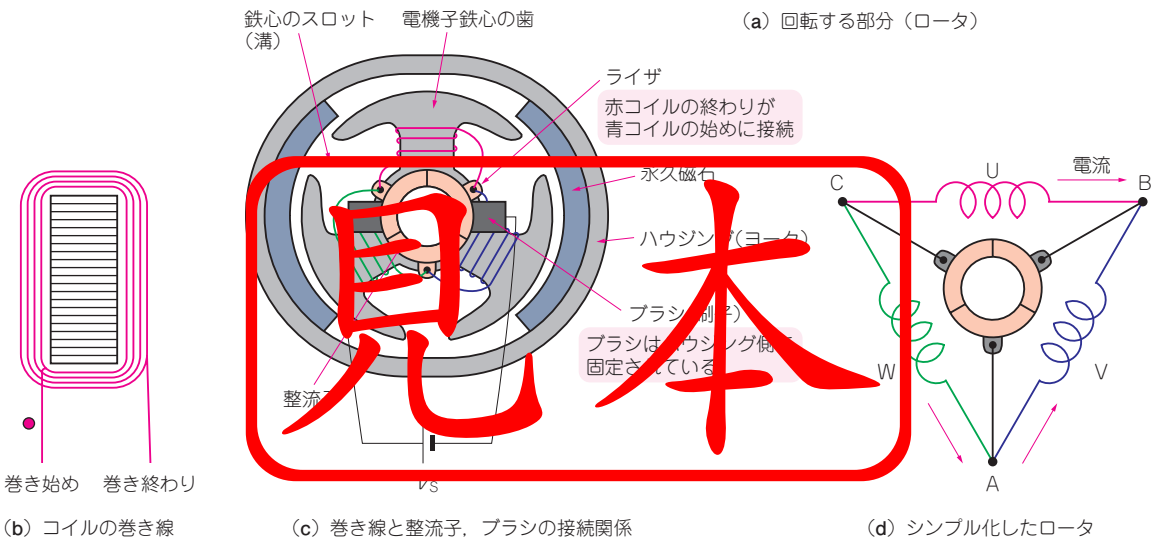


図5 玩具用ブラシ付きDCモータの構造

見本

制御の理解に必須! モータの動作モード

見城 尚志 Takashi Kenjo

モータは電動機として作動したり、発電機として作動したりします。これらを動作モードと呼びます(電動機モード、発電機モード)。

プロフェッショナルなレベルでモータを使いこなすためには、電磁モータの4つの動作モードを理解する必要があります。モータを駆動し制御する電気回路と電子回路の設計に携わるときにも、大事な知識です。

動作モード実験装置を作ってみた

● 3つのモータを接続するだけ

写真1は、動作モード確認用の実験装置です。ミニ四駆によく使われる模型用の3個のDCモータ(A、B、C)を、機械的および電氣的に接続しています。

DC電源からは2本のリード線が出ています。絶縁被覆を取り除いた先端を端子と呼ぶことにします。Aの端子に乾電池で電圧を印加すると、モータとして回ります。AとBは機械的にシャフトで結合しています。つまり、BはAによって回されて発電機として動作します。BとCは電氣的に結合されています。つまり、Bによって発電された電力でCはモータとして回転します。

● 無負荷運転とはどんなことか

AとBの機械的結合を解除した状態が、Aにとっては無負荷状態です。つまり空回りです。

BとCの電氣的な結合を解除した状態が、Bにとっての無負荷状態です。無負荷運転から最も重要なパラ

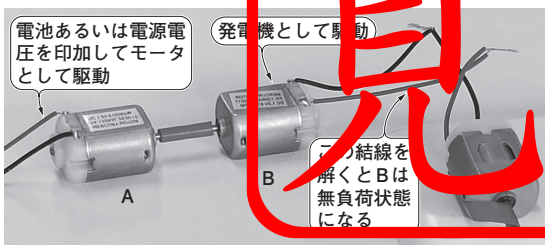


写真1 同じモータが回転したりブレーキになったり発電機になったり…「動作モード」を簡単な実験で確かめられる3個のマシン(電動機)をモータ、発電機、モータとして接続

メータである K_E (逆起電力係数)が計測できます。

モータの4つの動作モード

写真1の結合で、Aの端子に電圧がかかって回っているとき、

- AとCは電動機として作動し(=運転)されている
- Bは発電機として作動し(=運転)されている

と言えます。「①電動機モード」と「②発電機モード」です。

実は、これ以外に2つの運転モードがあるので、「③制動機モード」と「④回生発電モード(回生制動モード)」です。発電機モードを除く3つのモードは、模型でも本物でもモータが自動車を動かしている状態で語るのが適切です(図1)。

● 特に重要! 仕事をしているときの3つのモード

DCモータの2個の端子に電池を接続するとロータが回ります。この状態は無負荷運転(空回り)です。モ

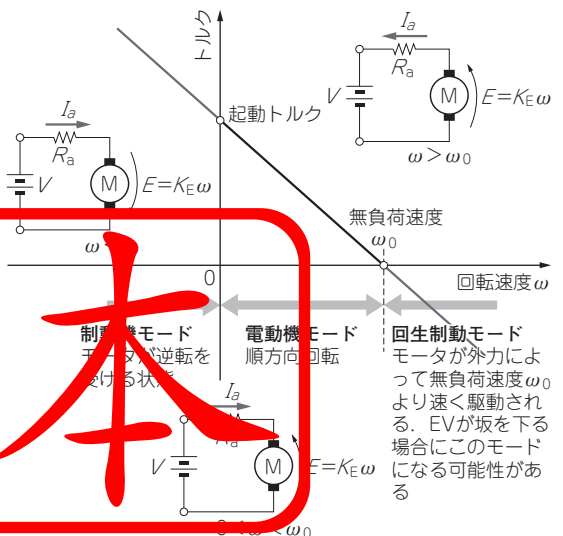
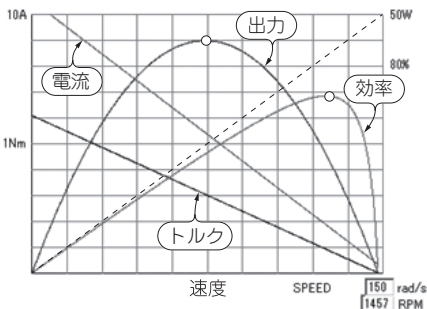
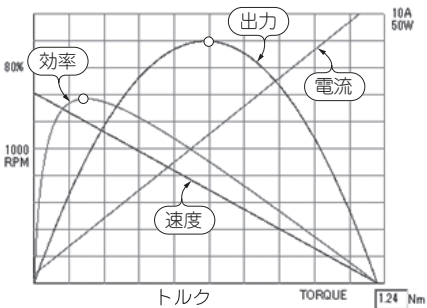


図1 モータは負荷によって回り方(回転速度)が異なり3つの動作モードに分けられる(一定電圧での3つの動作モード)。これに発電機としての動作を合わせて4モード



(a) 横軸を速度にとって電流、トルク、出力(動力)および効率を計算した特性グラフ



(b) 横軸をトルクにとって速度、電流、出力(動力)および効率を計算した特性グラフ

図2 DCモータのT-N特性(a)とN-T特性(b)

ータとしての仕事をしていません。

次に、モータのシャフトを指で回すと2つの端子間に電圧が発生します。その電圧を別のモータを使って計測して、回転速度との関係を調べることがあります。これは発電機としての無負荷運転です。

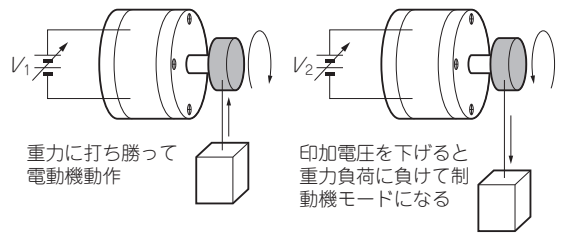
そして、モータとして運転してシャフトの回転で仕事をする場合を考えます。モータのシャフトに取り付けたものを負荷(load)と呼びます。負荷の状況によって回り方が異なり、次の3つのモードに分けられます。

- ▶①電動機モード(motoring mode)
速度が0から無負荷速度までの範囲
- ▶③制動機モード(brake mode)

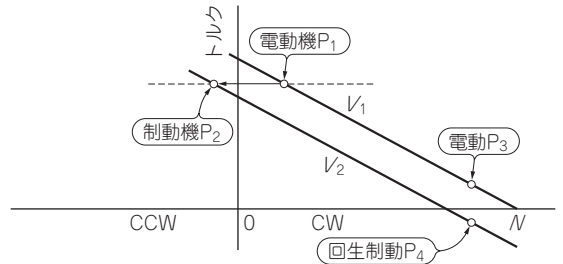
負荷がモータとは反対方向に回ろうとする作用が強く、モータが負けている状態。モータは外力に対するブレーキとして作用しているとも解釈できます。

- ▶④回生発電モード(regenerative brake mode)
負荷がモータよりも速く回転しようとして、無負荷速度以上で回っている状態。このように、速度が正でトルクが負の領域は発電機として機能します。このとき、電流は逆流します。

図1は、この3モードのT-N特性として説明するものです。T-N特性とは、縦軸をトルク(T)、横軸を速度(N)として描くグラフです。T-N特性が右肩下りの直線であることが永久磁石を使うDCモータ



(a) 2つのモード



(b) 動作点の移動

図3 電圧を下げることによって電動機モードから制動機モードに入る場合と回生制動モードに入る場合

の重要な特徴です。この3モードと、先に述べた②発電機モードを入れて4モードとします。

駆動電圧と逆に電流が流れる 回生発電モードに注意

● DCモータの場合

どのモードであれ、永久磁石を使うDCモータが回っていれば必ず発電作用をしています。これがDCモータの大きな利点です。この発電は回生発電と呼ばれ、発電機の動作とは少し異なります。発電作用をすることと発電機であることは同じではありません。

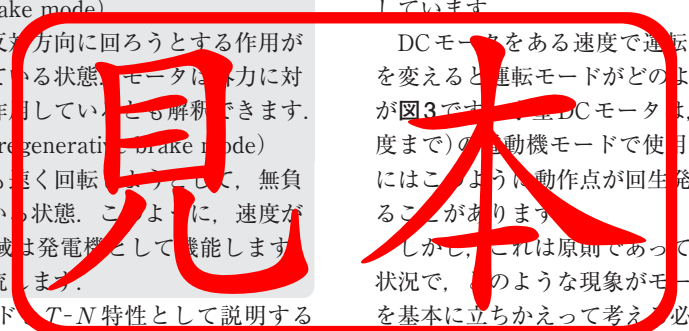
モータが電動機(motoring machine)として使われるのは、回転速度とトルクがどちらも正の領域です。この速度領域で、トルクのほかに電流、入力、出力、そして効率を表す特性が図2(a)です。業界によっては横軸をトルクにして、そのほかの量を縦軸として表します図2(b)。これらの特性図は印加電圧を一定にしています。

DCモータをある速度で運転しているときに、電圧を変えると運転モードがどのようになるのかを示すのが図3です。通常(0から無負荷速度まで)の電動機モードで使用されるのですが、ときにはこのような動作点が回生発電モードに入ろうとすることがあります。

しかし、これは原則であって、実際にはさまざまな状況で、このような現象がモータの運転中に起きるかを基本に立ちかえて考える必要があります。

● 誘導モータと同期モータの場合

図4はかご形誘導モータに、この3モードの考え方



モータ駆動の基礎知識

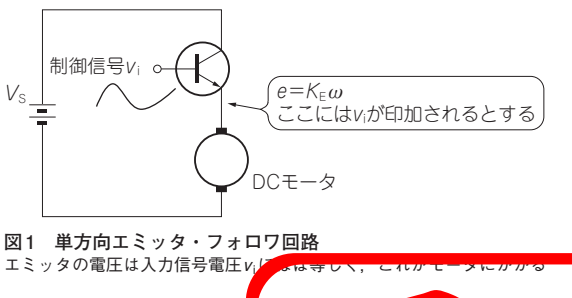
見城 尚志 Takashi Kenjo

モータの駆動(運転)や制御を論じる手始めとして、DCモータのON/OFF、反転(逆転ともいう)から説明を始めます。

DCモータの駆動回路にはアナログ方式とデジタル方式があります。ここでいうデジタルとは、'1'(ON)と'0'(OFF)の繰り返しによる時間の制御・調整を指します。今日の主流はデジタル方式です。

DCモータの駆動

- 最も簡単なアナログ方式…エミッタ・フォロワ回路
アナログ方式のDCモータ駆動で最も簡単なのが、図1に示す、エミッタ・フォロワとして知られる回路です。これはモータを1方向にだけ回す場合の原理的な基本回路です。接合型トランジスタ(別名バイポーラ型)を使います。



ラ型)を使います。

- デジタル方式の主流…PWM制御

図2に示すのが、今日のデジタル方式の主流であるパルス幅変調(Pulse Width Modulation, PWM)制御の原理です。図2(a)に示すようにIGBT(Insulated Gate Bipolar Transistor)、あるいはMOSFET(Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor)にスイッチング信号(デジタル信号)を入力することでDCモータを制御します。

スイッチング信号がONのときは、モータのコイルに電流が流れてDCモータが回ります [図2(b)]. 一方、OFFのときはモータの端子間に接続したダイオードに電流が流れます [図2(c)]. この電流はモータの巻き線のインダクタンスにより発生した循環電流になります。スイッチSがIGBTやMOSFETのような半導

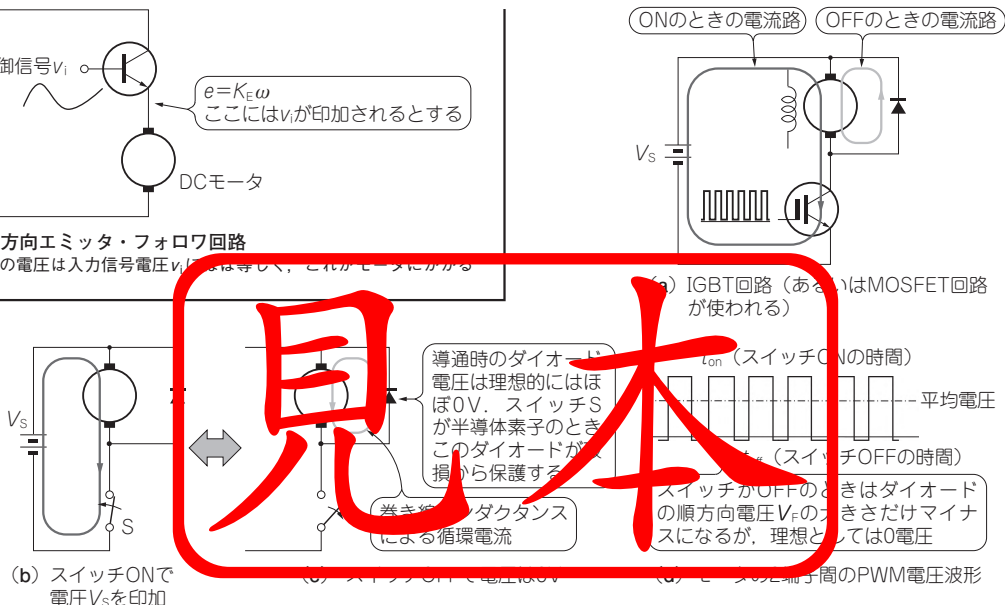


図2 PWMによるDCモータの駆動
 V_s と0電圧が繰り返される

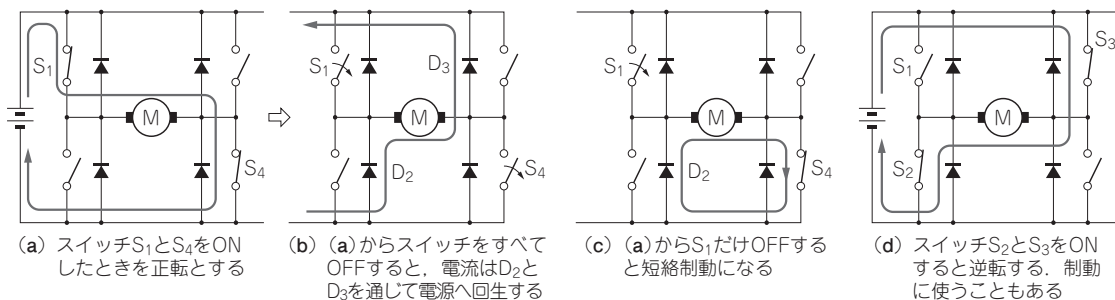


図4 ブリッジ回路の使い方(Appendix 5から再掲)

体素子のとき、ダイオードが素子を破損から保護します。

図2(d)にモータの2端子間のPWM電圧波形を示します。スイッチがOFFのとき、導通時のダイオードの電圧は理想的にはほぼ0Vですが、順方向電圧 V_F の大きさだけマイナスになります。

なお、この制御回路でもモータの反転はできません。

● モータの反転駆動ができるHブリッジ回路

モータの反転をできるようにしたのが図3に示すHブリッジ回路です。ブリッジ回路の使い方を図4に示します。Hブリッジ回路は交流モータやステッピングモータも駆動できます。

Hブリッジ回路は、図5の3相インバータ回路のうち2相分を使って作ることができます。

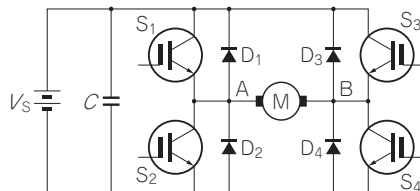


図3 DCモータの正転/逆転に使うH型ブリッジ回路(Appendix 5から再掲)
4個のスイッチング素子の使い方によって1個のDCモータの回転をさまざまに制御できる。2組備えると2相ステッピング・モータにも使える

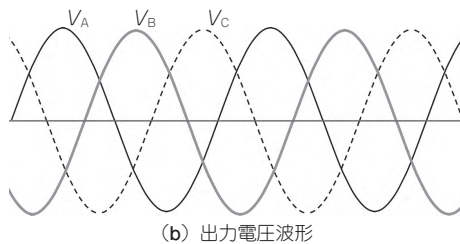
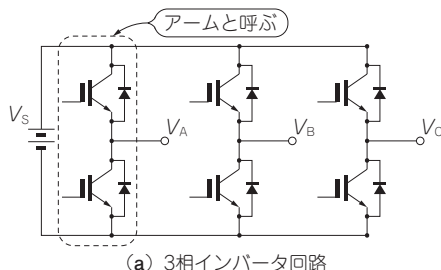


図5 理想的な3相インバータ
周波数・幅を自由自在に発生させる電子回路。バイポーラ型トランジスタであれば連続的な正弦波ができるが素子内での発熱が大きい。MOSFETやIGBTを用いたPWM駆動が理想に近づけたのが現在の技術である。ただし、高い周波数によって電流は滑らかになるが、回路巻き線やリークからの電磁ノイズと漏れ電流が発生しやすくなるので、対策が同時に必要になる

3相インバータによる制御

● インバータで3相正弦波を発生させる

図5に示すような上下段(カスケード)を3アーム備える回路は、3相ブリッジあるいはインバータ(inverter)と呼ばれます。正式には3相インバータです。

筆者は、インバータとはinverse converter(逆変換器)の短縮語であると解釈しています。交流を直流にするのが順変換であり、整流とも呼ばれます(DCモータの分野では、整流はcommutationであり、整流子とブラシの機能のことを指す)。そして、直流を交流にするのが逆変換、という理解です。

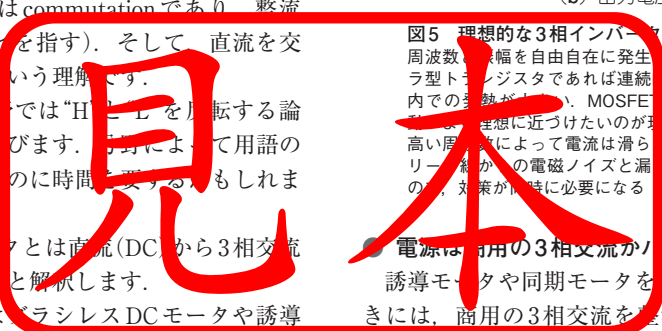
デジタル回路の分野では「H」として回転する論理回路をインバータと呼びます。分野によって用語の意味が違うので、慣れるのに時間が必要かもしれません。

ここでは、「インバータとは直流(DC)から3相交流を得る電子回路である」と解釈します。

3相インバータ回路はブラシレスDCモータや誘導モータ(交流モータ)の制御に使われます。

● 電源は市用の3相交流かバッテリーを使う

誘導モータや同期モータをインバータで運転するときには、商用の3相交流を整流して直流電源を作り、それを図5のような3相ブリッジ回路で、再度3相交流に直します。インバータの3端子から出力されるのは周波数と電圧を自在に調整した3相電圧 V_A 、 V_B 、



注目モータの研究…永久磁石が不要な同期リラクタンス・モータ

鈴木 憲吏 Kenji Suzuki

同期リラクタンス・モータ(以降 SynRM, Synchronous Reluctance Motor)とは、永久磁石や巻き線界磁の電磁石を使用せず、強磁性体の鉄心に突極を設けた回転子と、3相巻き線を分布巻きに施した固定子で構成された3相交流モータです。

同期リラクタンス・モータの 使いどころ&注目の背景

● 永久磁石を使わないので省資源! 効率は最高97.1%
近年、モータを取りまく環境は、効率に関する法規制: 国際規格 IEC 60034-30 に基づき IE3 や IE4, IE5 といった効率値で規制されています。同期リラクタンス・モータ(以下 SynRM)は、既設モータなどの置き換えとして注目されています。

東芝三菱電機産業システム⁽¹⁾では、一番効率が良い IE5 に準拠した SynRM が製品化されています。高効率・高トルクかつ永久磁石レスによる高い省資源性の特性を備え、レア・アースの供給課題もクリアされています。

東芝三菱電機産業システムから公開されている損失比較のグラフを図1に示します。誘導モータ(IM)より約40%損失が低減しています。また、SynRMは、従来誘導モータが採用されていたアプリケーションへの置き換えが可能な場合に、効率が97.1%に改善され省エネ化に大きく貢献します⁽¹⁾

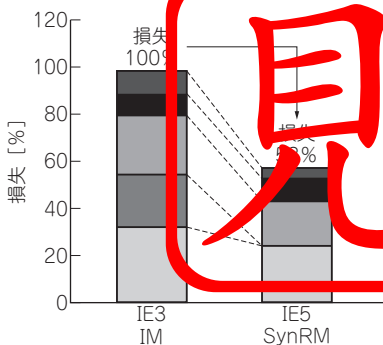


図1 効率比較

● 鉄道用主電動機や電気自動車の駆動用モータへの採用に向けた実証実験も行われている

この特性を生かして、東京メトロと三菱電機は共同で鉄道用主電動機に SynRM を搭載した車両の実証試験が行われ、従来のモータに比べ2%以上効率が改善されたことが報告されています⁽²⁾。その他にも電気自動車の駆動用モータへの採用も実証実験や研究がされています。

永久磁石を使わない同期リラクタンス・モータの構造と原理

● 回転子と固定子の構造

写真1は、SynRMの全体と固定子や回転子の外観です。写真1(b)、写真1(c)のように回転子は、磁石を用いずに突極となるような特殊な形状をしており、同じ形状の溝が4つの塊になっています。この溝(空隙)があることで磁束が流れにくくなり突極を形成し、4極モータとなります。

また、回転子の突極鉄心を回転磁界の磁力線が通るため、渦電流により鉄損が生じることから、一般には鉄損を軽減するために回転子鉄心を積層にしています。写真1(d)は、固定子と巻き線の外観で、3相巻き線を分布巻きで施しています。この固定子も回転子と同じ極数で構成します。

● 駆動原理

動作原理は、回転磁界の作る磁力線が突極の鉄心を通る際に生じる磁気抵抗(リラクタンス)の変化に起因するトルクで回転します。ここで、磁気抵抗とは磁力線の通りにくさを意味します。

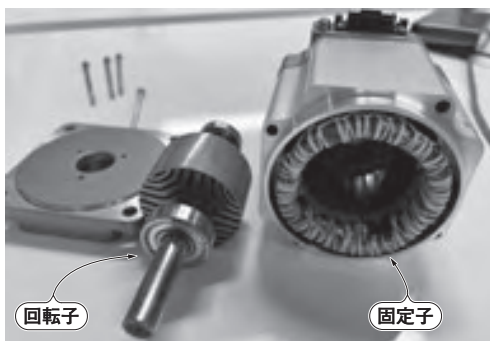
▶ 回転磁界とは

初めに、動作に関わる回転磁界から説明します。

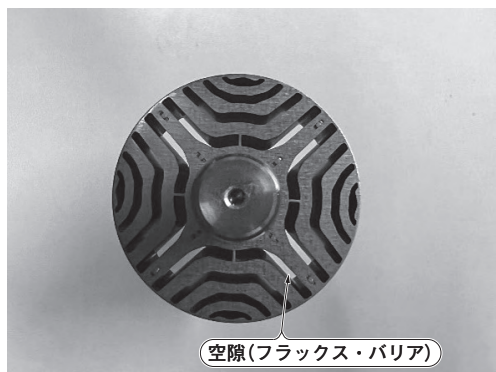
図2に3相交流と回転磁界を示します。3相巻き線に120°ずつ位相のずれた3相交流電圧を印加すると、巻き線には3相交流の電流が流れます。3相電流のうち高いほうのコイルにN極、低いほうにS極が発生します。正弦波状に印加されることで各コイルから発生



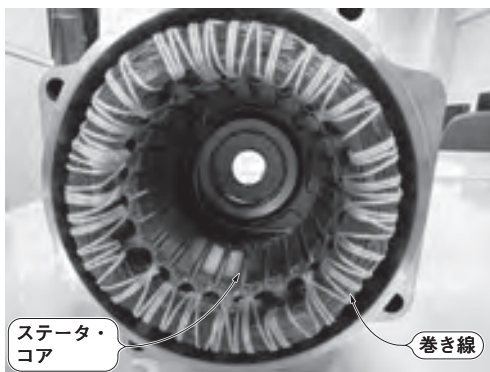
(a) SynRMの外観



(b) SynRMの分解写真
回転子 固定子



(c) SynRMの回転子(上から)
空隙(フラックス・バリア)



(d) SynRMの固定子
ステータ・コア 巻き線

写真1 永久磁石が不要と注目の同期リラクタン্স・モータSynRM

構造は、磁石のない強磁性体で構成した回転子と3相巻き線を分布巻きに施した固定子となる。(c)から同じ形状の溝の塊が4つあるので、この回転子は4極となり、この溝が空隙(空気の間隙、フラックス・バリア)となる。また、(d)の固定子は分布巻きで構成された4極となる

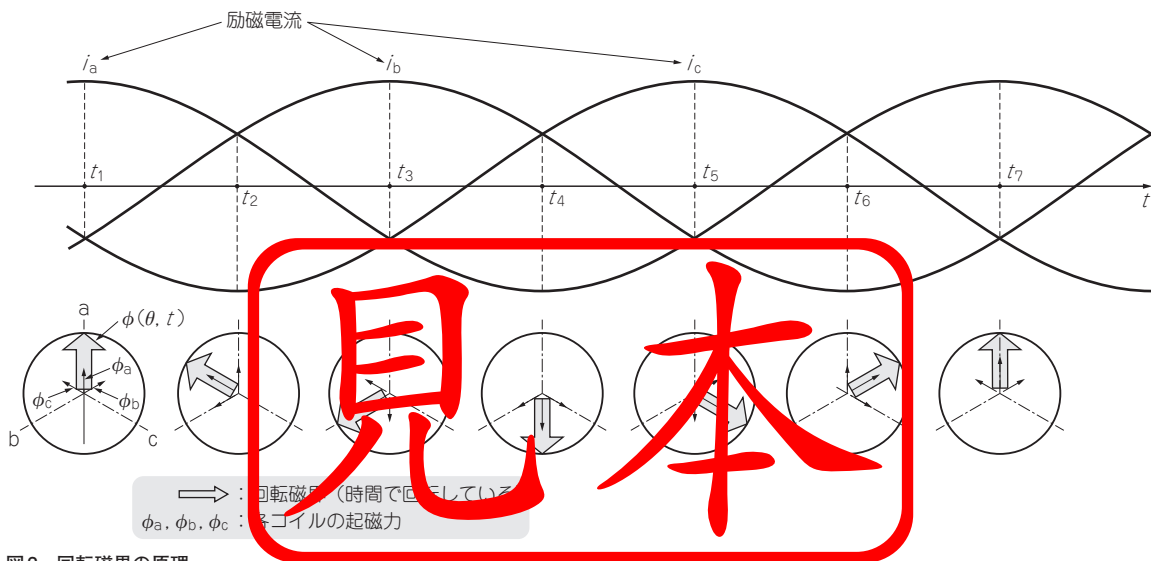


図2 回転磁界の原理

3相交流電流を巻き線に励磁することで、励磁の大きさに応じた磁界が形成される。正弦波交流のため、時間で励磁電流は変化し、磁界はその変化に応じ回転する。これが回転磁界

保存版

ギヤと歯車の基礎知識

土方 規実雄 Kimio Hijikata

歯車による動力の伝達

歯車^{注1}は、回転や動力の伝達を目的に用いられる機械要素の1つです。信頼性の高さから、さまざまな機械に用いられています。歯車を用いることで自動車の変速機のように回転速度やトルクを変換して動力を伝達したり、機械式の時計やプリンタのように精度の高い回転角度を伝達したりできます。本稿では、おもに動力の伝達に用いられる歯車について説明します。

歯車が必要な理由

● 回転速度とトルクへの要求

自動車の始動時など、大きなトルクを低い回転速度で発生する必要がある場合が数多くあります。

駆動に用いられるエンジンやモータなどのトルクは、体格(体積)におおよそ比例します。歯車を用いずに低

速・大トルクの用途に用いたい場合、大きな体積が必要になります。大きな体積は、設計の自由度の低下や重量の増加、効率の低下を招きます。一方で、自動車が一定の巡航速度で走行する場合は大きなトルクは必要とされませんが、高い回転速度が要求されます。

エンジンやモータは適切な回転速度で運転した際に最も効率が高くなり、回転速度が低すぎても高すぎても効率が低下する特性があります。

● 機械を小型・高効率化できる

エンジンやモータと歯車を組み合わせることで、効率の高い回転速度でエンジンやモータを動かしつつ、負荷に合わせた回転速度やトルクに変換可能になります。体格の小さなモータでも大きなトルクを発生できるようになれば、省スペースによって設計の自由度が増し、軽量化できます。

歯車の働き

図1のように、2つの歯車がかみ合っている場合を考えます。このような歯車の組を歯車対と呼びます。それぞれの歯車の歯数と直径は以下の通りとします。

- 歯車1の歯数: $Z_1=10$
- 歯車2の歯数: $Z_2=20$
- 歯車1のピッチ円直径: $d_1=30\text{ mm}$
- 歯車2のピッチ円直径: $d_2=60\text{ mm}$

^{注1} JIS(日本産業規格)では歯車を「歯を順次かみ合わせることで、運動をほかに伝える、または運動をほかから受け取るように設計された歯を設けた部品」と定義している⁽³⁾。歯車の英語表記は gear で、JISではカタカナ表記時に「ギヤ」を使用している。日本語では「ギヤ」以外に「ギア」、「ギヤー」と表記されることがある。歯車に関連する規格には、JISのほか、ISO(国際標準化機構)規格やJGMA(日本歯車工業会)規格などがある。

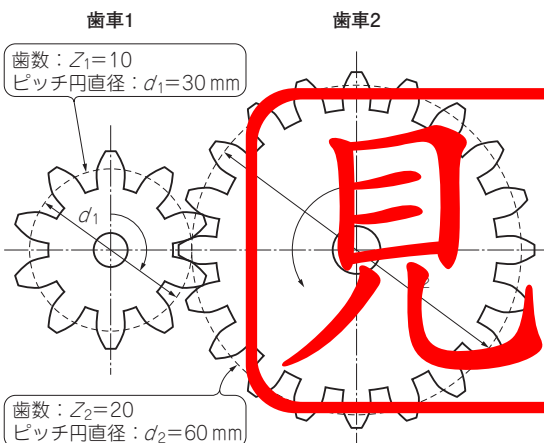


図1 歯車をかみ合わせれば回転速度やトルクを変換できる
かみ合っている2つの歯車の組を歯車対という

ここで、ピッチ円直径は、歯車の回転軸を中心として2つの歯車の回転軸を結ぶ直線上で歯と歯が接触する点を通る円の直径で、歯数と比例関係にあります。

● 回転速度の変換

小さい歯車1を駆動側、大きい歯車2を被駆動側とします。歯車1を時計回りに1回転すると、歯車はお互いに10歯分回転するため、歯車2は反時計回りに1/2回転します。回転方向が駆動側と被駆動側で逆になっている点に注意してください。

このとき、それぞれの歯車の回転角度は歯数の比、 $Z_2/Z_1 = 20/10 = 2 \dots\dots\dots (1)$

によって決まります。単位時間あたりの回転角度である角速度についても同様の関係が成り立ちます。小さい歯車を角速度 ω_1 で回転させたとき、大きい歯車の角速度 ω_2 は以下のように表されます。

$$\omega_2 = \frac{Z_2}{Z_1} \omega_1 = i\omega_1 \dots\dots\dots (2)$$

歯数の比 $i = Z_2/Z_1$ は速度伝達比と呼ばれています。駆動側の歯数 Z_1 と被駆動側の歯数 Z_2 の組み合わせによって、任意の速度伝達比を得ることができます。

● トルクの変換

歯車でエネルギーの損失が生じない理想的な場合を考えると、駆動側から入力される動力 P_1 と被駆動側から出力される動力 P_2 は等しくなります。駆動側のトルクを T_1 、被駆動側のトルクを T_2 とすると、

$$T_1 \omega_1 = T_2 \omega_2 \dots\dots\dots (3)$$

となります。したがって、

$$T_2 = \frac{Z_1}{Z_2} T_1 = \frac{1}{i} T_1 \dots\dots\dots (4)$$

となり、被駆動側のトルク T_2 は速度伝達比 i に反比例します。図1の歯数の組み合わせの場合、駆動側に対して被駆動側のトルクは2倍になります。

歯車による動力伝達については文献(1)の第6章に詳細な解説があります。

歯車対の効率

実際には歯車のかみ合わせの部分の摩擦や潤滑油の粘性摩擦によるエネルギーの損失が生じます。このため、被駆動側の歯車から取り出せるトルク T_2' は式(4)で示した T_2 より小さくなります。

失った分のエネルギーはおもに熱に変化します。また、歯車を摩擦させる仕事としても消費されます。

歯車の効率 η は入力された動力に対する出力された動力の比を百分率で表し、次のようになります。

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} \times 100 = \frac{T_2}{T_1} i \times 100 \% \dots\dots\dots (5)$$

十分に潤滑されて摩擦係数 $\mu = 0.05$ 程度^{注2}の場合、効率は98%以上といわれています。しかし、歯車対の効率は材質や潤滑の方法、精度などによって大きく変わるので注意が必要です。

注2 摩擦係数 $\mu = 0.05$ はスキーと氷雪間の摩擦係数よりちょっと小さい値。

歯車で動力や回転を伝えるしくみ

一般的に用いられる歯車の大部分には、その優れた特徴からインボリュート歯車が用いられています。

● 大部分の歯車が採用する歯形…インボリュート曲線

動力や回転を正確に伝えるために、多くの歯車の歯形にはインボリュート曲線が採用されています。インボリュート曲線とは、図3のように円筒(基礎円)に巻きつけた糸を緩まないように引き張ったまま展開していったときに糸の先端が描く軌跡です。ピンと張った糸は基礎円の接線になっています。このとき、糸の先端が描く軌跡は常に糸に対して垂直になります。したがって、インボリュート曲線上の点における法線は、同時に基礎円の接線になっています。

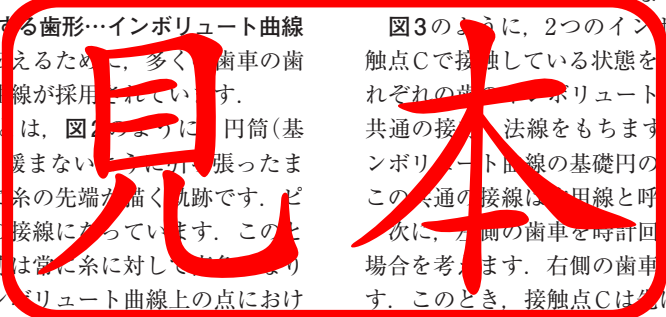
● インボリュート歯車の動作

インボリュート曲線の一部を歯形に利用した歯車をインボリュート歯車といいます。

図3のように、2つのインボリュート歯車の歯が接触点Cで接触している状態を考えます。このとき、それぞれの歯のインボリュート曲線は接触点Cにおいて共通の接線法線をもちます。この法線は、2つのインボリュート曲線の基礎円の共通の接線でもあります。この共通の接線は、**法線**と呼ばれます。

次に、左側の歯車を時計回りに少し回し回転させた場合を考えます。右側の歯車は反時計回りに回転します。このとき、接触点Cは歯ほどと同じ作用線上を移動します。さらに歯車が回転しても、この関係は保たれます。

このことは、2つのインボリュート歯車の歯のかみ



このPDFは、CQ出版社発売の「トランジスタ技術SPECIAL No.165」の一部見本です。
内容・購入方法などにつきましては以下のホームページをご覧ください。

内容 <http://shop.cqpub.co.jp/hanbai/books/MSP/MSP202401.html>

購入方法 <https://www.cqpub.co.jp/order.htm>

