

第1部 基礎編

第1章

モータの分類から回転のしくみまで ACサーボ・モータの基礎

ACサーボ・モータは、モータ・メーカ製のモータとサーボ・アンプをセットで購入して使用するのが一般的です。筆者は設備メーカに勤務する技術者ですが、ほんの数年前までは、自身でACサーボ・モータの制御回路を設計するなどということは思いもよらぬことでした。

ACサーボ・モータの制御回路の設計業務を始めるきっかけは、最近、特に注目を集めているヒューマノイド・ロボットにあります。ヒューマノイド・ロボットは人間を模したロボットであるため、非常に多くのモータを使用します。モータ・メーカ製のモータとサーボ・アンプは、モータにしてもサーボ・アンプにしてもサイズが大きいので、モータとサーボ・アンプの小型化が必須となっています。そのような背景のもと、サーボ・アンプの自社開発を行う機会に恵まれました。

ACサーボ・モータのサーボ・アンプの自社開発当初、書店やインターネットで、その手の書籍を探したのですが、モータの種類/特徴/構造を解析した書籍は多いものの、ACサーボ・モータの実践的な制御方法や制御回路を記述された書籍は少なく、設計に必要な情報収集に苦労しました。

1 本書での重点課題

モータの歴史は古く、その起源は19世紀初頭にまで遡ります。その当時、モータは、本来その言葉どおり回転することが目的でした。それが時代とともにさまざまな用途に使用されるようになり、モータの材料/構造および制御回路など、あらゆる面で性能向上が図られてきました。回転精度や効率など、モータに要求されるファクタは数多くあります。近年は、地球温暖化問題や地球環境保護の観点から、高効率でクリーンなモータの技術はますます重要になっています。これらのキーとなる技術は制御面から見るとベクトル制御技術であり、高精度サーボ制御技術と言えます。

ACサーボ・モータは数あるモータのなかで最も高価であり、用途はFA (Factory Automation) 分野に限られますが、ACサーボ・モータで培ったベクトル制御技術や高精度サーボ制御技術は、このような時代の要求にマッチしているため、冷蔵庫やエアコンなどの家電製品は言うに及ばず、産業機器、鉄道、自動車などに向けて、低コストでかつ高効率なモータ制御技術の研究開発が盛んに行われています。その結果、一部の家電製品では電流センサや速度センサを使用しないセンサレス・ベクトル制御が実用化されていて、エアコンや冷蔵庫の消費電力が従来機種より1/4程度になっています。

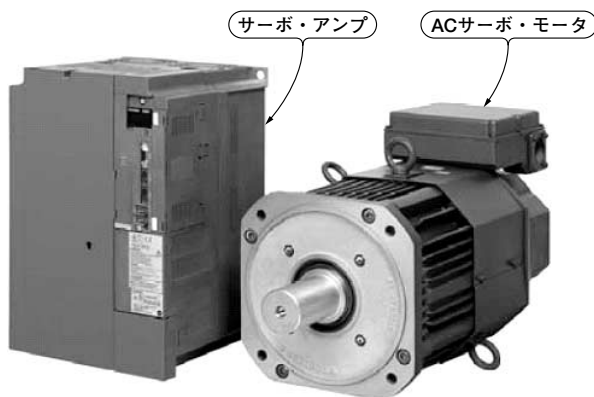
本書での重点課題は、ACサーボ・モータでのベクトル制御やサーボ制御の技術解説です。これらの制御技術の理解を目的としています。

2 本書で扱うACサーボ・モータ

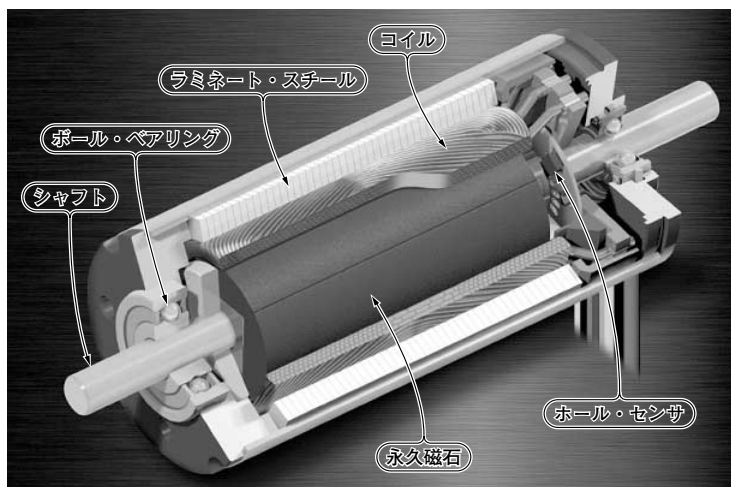
ACサーボ・モータはある意味特殊なモータなので、家庭では目にすることはありません。ACサーボ・モータという言葉は聞いたことがあるけれど、実際には見たことがないという読者もいらっしゃるかと推察します。それでは、ACサーボ・モータとはいったいどんなものなのかを実際に見てみましょう。

2-1 代表的なACサーボ・モータ

写真1-1は筆者の会社でも使用例が多い、典型的なACサーボ・モータ(三菱電機)の外観です。このようにACサーボ・モータはモータとサーボ・アンプとがセットになっていて、システムとして機能す



〈写真1-1〉
典型的なACサーボ・モータ
(三菱電機)



〈写真1-2〉
ACサーボ・モータの内部構造
(maxon motor)

るようになっていきます。ACサーボ・モータには、小さいものでは6W程度から大きなものでは7kW程度まで、大小さまざまなタイプがあります。一般にサーボ・アンプはAC電源を入力するように設計されていて、AC 100VのタイプとAC 200Vのタイプ、そしてAC 400Vのタイプがあります。

2-2 ACサーボ・モータの内部構造

写真1-2に示すのは、maxon motor社のACサーボ・モータ(maxon motor社ではブラシレス・モータと呼んでいる)の内部構造です。ACサーボ・モータの基本構造はロータ(回転子)が永久磁石、ステータ(固定子)がコイルのブラシレス構造になります。一般的には永久磁石ロータは通常2極(4極や8極もある)、ステータ・コイルは巻き線を樹脂のみで固めたカップ状電機子で、コアレス/スロットレスのコイルとなっています。

また、インクリメンタル・エンコーダと組み合わせるタイプのモータの場合、ロータ位置検出用のホール・センサが内蔵されています。

2-3 ACサーボ・モータの用途

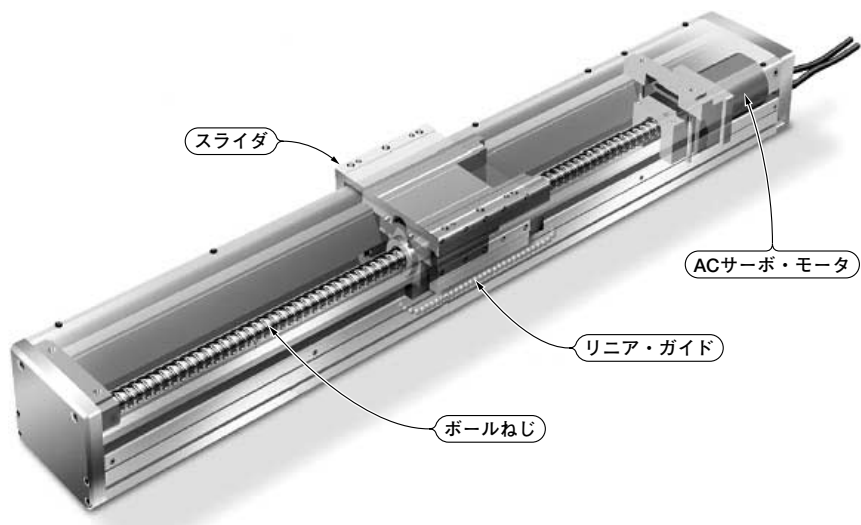
● 精密な位置決めが必要な用途に適する

ACサーボ・モータの専売特許は精密位置決め制御です。したがって、その用途は精密ステージや産業用ロボットとなります。また、ACサーボ・モータの用途として、最近、特に注目されているのはヒューマノイド・ロボットです。ヒューマノイド・ロボットというよくテレビなどで見かけるのはラジコン・サーボを利用したものが多いようですが、企業で開発したロボットはACサーボ・モータやブラシレスDCモータなどが使われています。ただし、これらのロボットは製作費が掛かりすぎて商品化されていないものが多いようです。商品化されているものでも高級車1台ぶんの価格設定になっています。

ACサーボ・モータの応用例をいくつか紹介します。

● 精密ステージ

写真1-3はIAI社の単軸ロボットです。おもな構成要素には、ACサーボ・モータのほか、ボール・

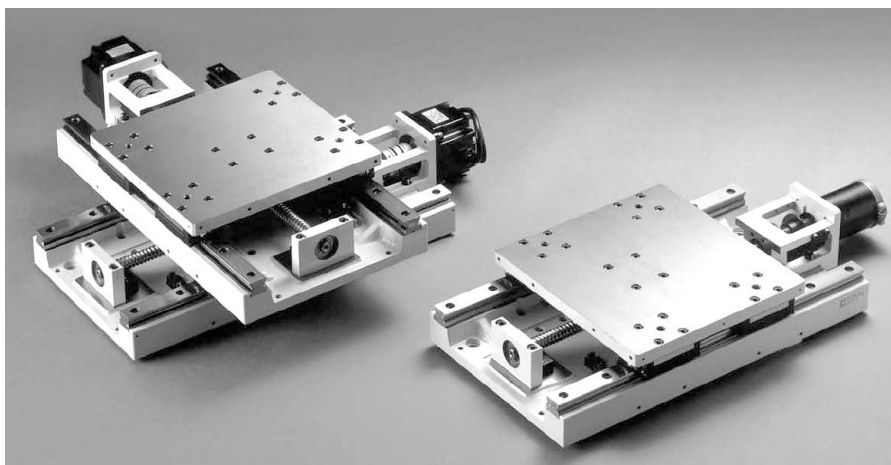


〈写真1-3〉
単軸ロボット
(アイエイアイ)

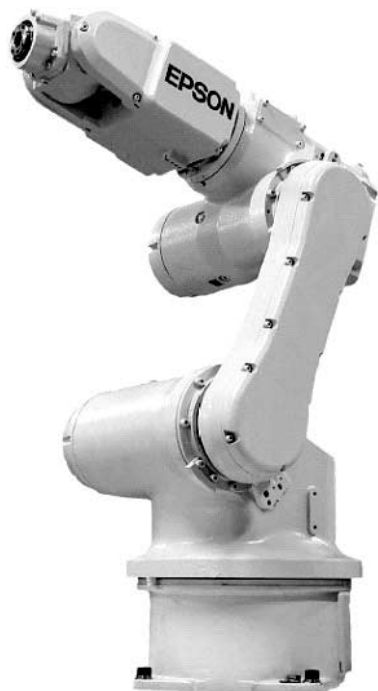
14 第1章 ACサーボ・モータの基礎

ネジ，リニア・ガイドおよびスライダがあります。このような単軸ロボットを組み合わせて精密な位置決めステージを作製します。

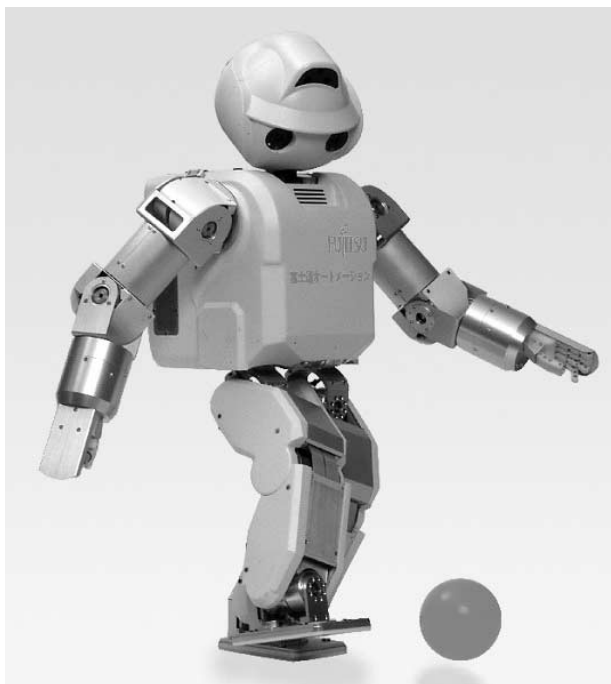
写真1-4はTHK社の精密XYステージです。このXYステージにはACサーボ・モータのほか，ステッピング・モータを取り付けることも可能です。位置決め性能は，最も高精度のもので $6\mu\text{m}$ となっています。



〈写真1-4〉
精密XYステージ(THK)



〈写真1-5〉 ロボット・アーム(エプソン)



〈写真1-6〉 ヒューマノイド・ロボット(富士通)

● 産業ロボット

写真1-5はエプソン社の6軸アーム・ロボットです。内部にACサーボ・モータが6個組み込まれていて、アームの先端にねじ締め用ドライバや物を掴むハンドを取り付けて、産業用ロボットを製作します。

● ヒューマノイド・ロボット

写真1-6は富士通製のヒューマノイド・ロボットです。このロボットの関節は26軸あり、ACサーボ・モータのほか、一部にラジコン・サーボも使われています。2足歩行の研究用として販売されました。現在(2009年)は製造中止となっていますが、価格はおよそ高級車1台ぶんです。

3 モーターのおさらい

そもそもモータとはなんでしょう？ ACサーボ・モータの詳しい説明のまえに、基本的なブラシ付きDCモータとブラシレス・モータの構造や回転原理のおさらいをします。なお、DCモータはブラシ付きDCモータを指すことが一般的ですので、本書でもDCモータの呼称を使用します。

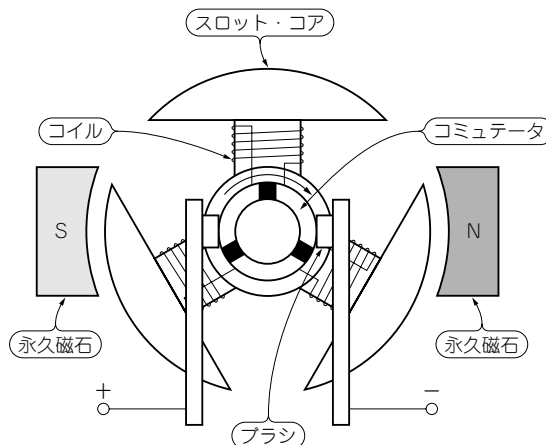
モータは電気エネルギーを運動エネルギーに変換する装置です。数多くの種類があるなかで、最も身近なモータといえるDCモータは電磁石と永久磁石との組み合わせで、連続的な運動を生み出しています。

磁石にはS極とN極があり、S極とN極とでは引き合う力が働き、同じ極どうしでは反発する力が働きます。電磁石はコイルに電流を流して磁石を作るもので、その電流の向きで磁石の極を変えることもできますし、また、電流の大きさにより磁石の磁力も変えることができます。DCモータは電磁石のコイルに流す電流の向きや大きさを制御することによって、磁石と電磁石との引力と反発力を引き出し、連続的な運動を生み出します。

ACサーボ・モータに代表されるブラシレス・モータも基本原理はDCモータと同じです。DCモータとの違いは、電磁石のコイルに流す電流の向きや大きさを制御する手段です。

3-1 DCモータの基本構造

図1-1は2極の永久磁石、3スロット・コアのDCモータの基本構造図です。ここでスロット・コアについて補足します。コアとはコイルを巻く鉄心などの呼称で、モータの内部にコアに巻き付けたコイル



〈図1-1〉
DCモータの基本構造
(2極, 3スロット)

16 第1章 ACサーボ・モータの基礎

が三つあれば3スロットと呼びます。DCモータはその用途に応じて、さまざまな極数とスロット数のモータがあります。多極/多スロットのモータは構造が複雑なため価格が高くなるものの、コギング・トルク(無通電でモータ軸を外から回したときにゴリゴリ感じるトルク)やトルク・リップル(トルクの脈動)が少ないという特徴があります。

また、写真1-2のACサーボ・モータ構造に見られるような、巻き線を樹脂のみで固めたカップ状電機子を採用したコアレス/スロットレスのDCモータもあります。一般的にはコアレスDCモータと呼ばれ、DCサーボ・モータに多く採用されています。コアレスDCモータの特徴を補足します。モータとしては、コアは磁束が通ればよく、コイルと一緒に回転する必要がないので、コア(写真1-2ではラミネート・スチール)を固定としてコイルだけを回転するようにしたものです。その結果、ロータ慣性モーメントを抑えることができるため、DCサーボ・モータに適しているというわけです。

再び、図1-1を見てください。DCモータの構成は、ステータ(固定子)としての永久磁石とブラシがあり、ロータ(回転子)としてスロット・コア、コイル、コミュテータがあります。DCモータはその言葉どおりモータ端子に加える電圧は直流ですが、モータが回転するとコミュテータとブラシがスイッチの役割を行い、電流の流れるコイルが順次切り替わる仕組みになっています。

3-2 DCモータの回転原理

図1-2はDCモータの回転原理を表したものです。モータが回転したときコミュテータとブラシがスイッチの役割を行い、電流の流れるコイルが順次切り替わる様子を 60° ごとに示しています。

図1-2(a)を見てください。ここでまず注目していただきたいのは、DCモータの場合、コイルの結線方法は Δ (デルタ)結線になるということです。DCモータではコイルの結線方法を議論することは少ないのですが、本図に示すとおり Δ 結線になります。このロータ位置でのブラシとコミュテータの接触状態からコイルA、B、Cには図中の太線で示す電流が流れ、コイルAにはS極が励磁され、コイルBおよびコイルCにはN極が励磁されます。そうすると各コイルとステータの永久磁石との間に引力および反発力が発生し、結果的にロータはCW(時計方向)方向に回転します。

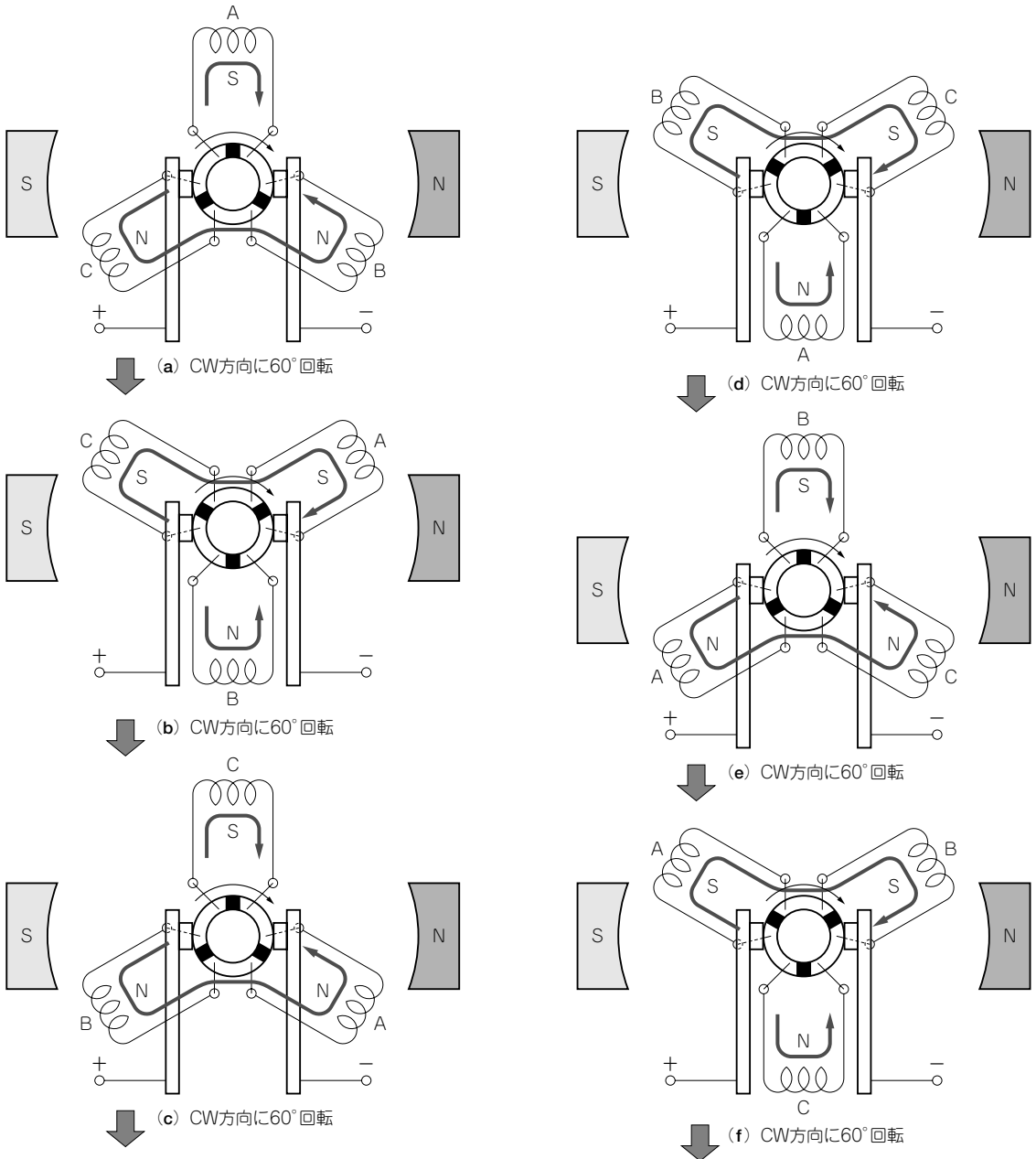
図1-2(b)は、図1-2(a)からロータが 60° CW方向に回転した位置です。このロータ位置でのブラシとコミュテータの接触状態からコイルA、B、Cには図中の太線で示す電流が流れ、コイルAおよびコイルCにはS極が励磁され、コイルBにはN極が励磁されます。そうすると図1-2(a)と同様に、各コイルとステータの永久磁石との間に引力および反発力が発生し、結果的にロータはCW方向に回転します。

図1-2(c)は、図1-2(b)からロータが 60° CW方向に回転した位置です。このロータ位置でのブラシとコミュテータの接触状態からコイルA、B、Cには図中の太線で示す電流が流れ、コイルAおよびコイルBにはN極が励磁され、コイルCにはS極が励磁されます。そうすると図1-2(b)と同様に、各コイルとステータの永久磁石との間に引力および反発力が発生し、結果的にロータはCW方向に回転します。

図1-2(d)、図1-2(e)、図1-2(f)の説明は省略しますが、各ロータ位置においても同様な原理により、モータが回転することを容易に理解できます。

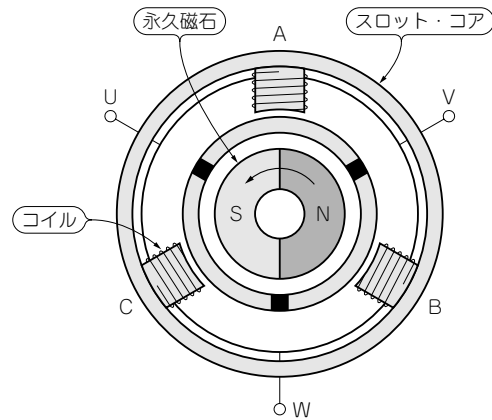
3-3 ブラシレス・モータの基本構造

ACサーボ・モータはブラシレス構造をもつモータの一つです。図1-3は2極の永久磁石、3スロット・コアのブラシレス・モータの基本構造図です。ブラシレス・モータの構成は、ステータ(固定子)としてのスロット・コアおよびコイルがあり、ロータ(回転子)として永久磁石があります。図1-1のDC



〈図1-2〉 DCモーターの回転原理 (2極, 3スロット)

モーターの基本構造図と対比してみればわかるとおり、本図のブラシレス・モーターはロータとステータの関係が逆になりますが、モーターの構成 (2極磁石, 3スロット・コア) は図1-1のDCモーターの基本構造図と同じものとしました。



〈図1-3〉
 ブラシレス・モータの基本構造
 (2極, 3スロット)

3-4 ブラシレス・モータの回転原理

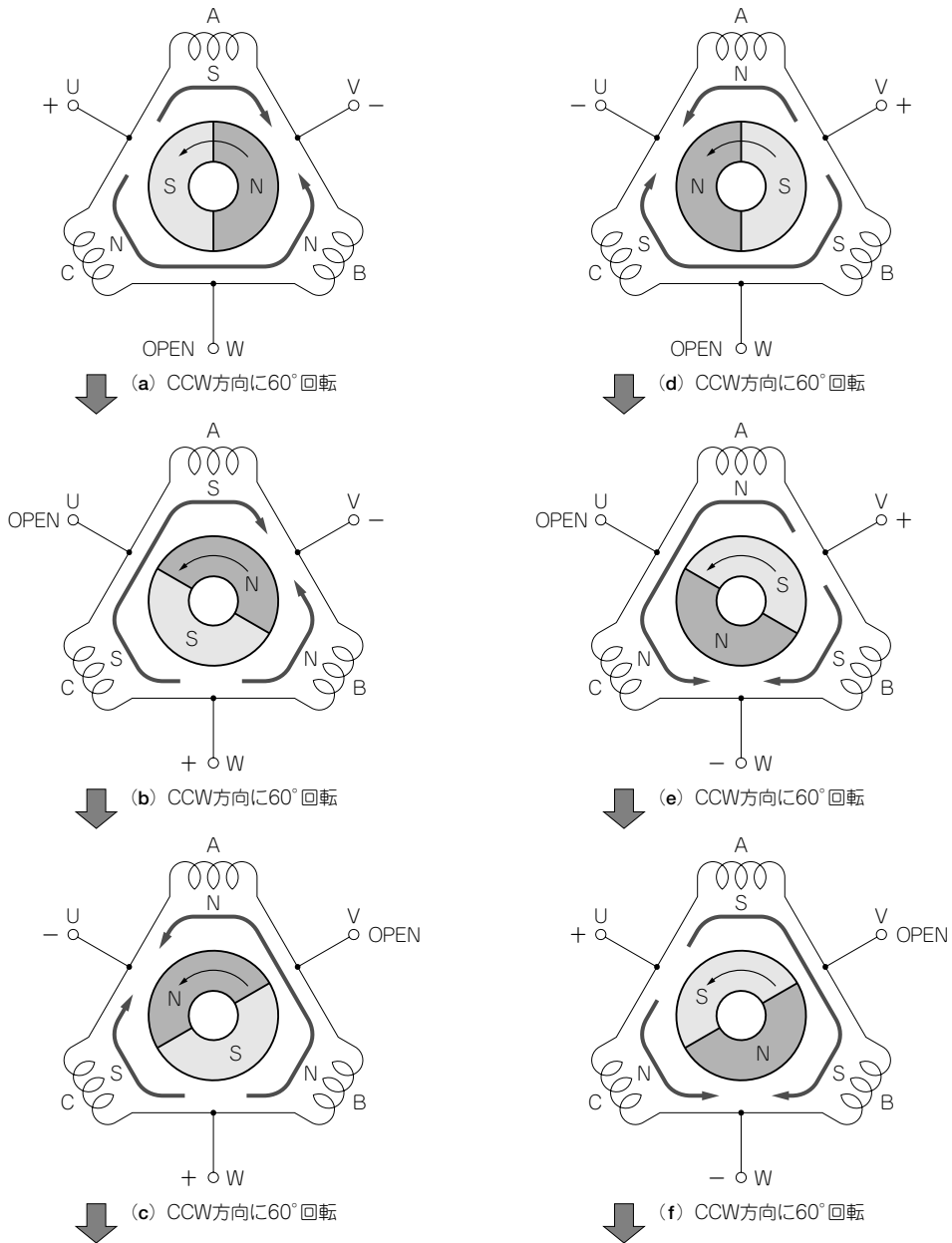
図1-4はブラシレス・モータの回転原理を表したものです。モータが回転したとき、モータ端子(U, V, W)の電圧を変えることによって、電流の流れるコイルが順次切り替わる様子を 60° ごとに示しています。

図1-4(a)を参照してください。コイルの結線方法をDCモータと同様に Δ 結線としました。ブラシレス・モータのコイルの結線方法は Δ 結線とY(スター)結線とがありますが、Y結線のほうが多く採用されています。特に小型モータではそのほとんどがY結線となっています。本図ではDCモータと対比する意味で Δ 結線としました。このロータ位置でのモータ端子Uにプラス電圧、モータ端子Vにマイナス電圧を加え、モータ端子Wをオープンとします。そうするとコイルA, B, Cには図中の太線で示す電流が流れ、コイルAにはS極が励磁され、コイルBおよびコイルCにはN極が励磁されます。それによって各コイルとロータの永久磁石との間に引力および反発力が発生します。この状態は図1-2(a)のDCモータとまったく同じなのですが、ブラシレス・モータではDCモータとロータとステータの関係が逆になっているため、今度はCCW(反時計方向)方向に回転します。

図1-4(b)は、図1-4(a)からロータが 60° CCW方向に回転した位置です。このロータ位置でのモータ端子Wにプラス電圧、モータ端子Vにマイナス電圧を加え、モータ端子Uをオープンとします。コイルA, B, Cには図中の太線で示す電流が流れ、コイルAおよびコイルCにはS極が励磁され、コイルBにはN極が励磁されます。そうすると図1-4(a)と同様に各コイルとロータの永久磁石との間に引力および反発力が発生し、結果的にロータはCCW方向に回転します。

図1-4(c)は、図1-4(b)からロータが 60° CCW方向に回転した位置です。このロータ位置でのモータ端子Wにプラス電圧、モータ端子Uにマイナス電圧を加え、モータ端子Vをオープンとします。コイルA, B, Cには図中の太線で示す電流が流れ、コイルAおよびコイルBにはN極が励磁され、コイルCにはS極が励磁されます。そうすると図1-4(b)と同様に各コイルとロータの永久磁石との間に引力および反発力が発生し、結果的にロータはCCW方向に回転します。

図1-4(d), 図1-4(e), 図1-4(f)の説明は省略しますが、各ロータ位置においても同様な原理により、モータが回転することを容易に理解できます。



〈図1-4〉 ブラシレス・モータの回転原理 (2極, 3スロット)

DCモータではロータが回転するとコミュテータとブラシが自動的に整流作用を行います。ブラシレス・モータの場合は駆動アンプ側で整流作用を能動的に行う必要があるため、ホール・センサなどでロータ位置を検出する必要があります。