



メカトロ・シリーズ

モータの回るしくみから  
センサレス駆動, 正弦波駆動, ベクトル制御まで

見本

# ブラシレス DCモータの ベクトル制御技術

江崎 雅康 著

## ● 第1部 基礎編

- 第1章 モータ技術は戦略技術となった!
- 第2章 DCブラシモータの動作原理と特徴, 駆動回路
- 第3章 ブラシレスDCモータの特徴と動作原理
- 第4章 ブラシレスDCモータの駆動方式の進化
- 第5章 ブラシレスDCモータのベクトル制御理論

## ● 第2部 応用編

- 第6章 ブラシレスDCモータのベクトル制御の実際
- 第7章 ブラシレスDCモータのベクトル制御プログラム
- 第8章 ブラシレスDCモータのベクトル制御開発プラットフォーム
- 第9章 位置決めサーボ制御基板の開発と  
ロボットへの組み込み



CQ出版社

## ◆ 第1章

## 環境とエネルギー問題が注目される時代 モータ技術は戦略技術となった！

江崎 雅康

### 1-1 200年近くの歴史をもつモータ技術は 人間の生活と産業を支える重要基盤技術

はじめてモータの原形が発明されたのは19世紀の前半です。マイケル・ファラデイ (Michael Faraday, 英国)は1821年、ファラデイのモータ (Faraday Motors) と呼ばれる最初の電動機 (Electric Motors) を発明しました。

実用的な整流子式直流電動機はイギリスの科学者ウィリアム・スタージャンが1832年に発明、続いてアメリカのトマス・ダヴェンポートは商用利用可能な整流子式直流電動機を開発し、1837年に特許を取得しました。

200年近い歴史をもつモータ技術は、たった40年あまりのマイクロプロセッサ技術や最新のインターネット技術にくらべると、古典的とも言える技術です。コンピュータやネットワーク関連の技術が急速な進歩を遂げて注目を集める中であって、モータ技術はたいへん地味な存在です。

しかしモータ技術は今日なお多くの改良が続けられ、人間の生活と産業界を支える要素技術として重要な地位を占めています。

### 1-2 全電力消費量の57.3%はモータが消費する …節電のカギを握るモータ制御技術

原子力発電の是非をめぐって世論が二分する中、節電が大きな社会問題になっています。図1-1は電力使用機器別の電力消費量の統計です。少々古い統計ですが、現在の状況とあまり変わらないと思われるので、あえて掲載しました。なんと国内総電力消費量9,996億kWhの57.3%をモータが消費しています。

図1-2 (a)～(c)はこの消費電力を分野別に見た統計です。モータの消費電力は、

産業(製造業)分野	2,949億kWh	69.0%
業務分野	1,643億kWh	56.6%
家庭分野	1,140億kWh	40.4%

を占めています。

照明分野では白熱電球や蛍光灯をLED照明に置き換える節電の取り組みが始まっています。しかし、いちばん効果的な節電はモータの節電であることは明白です。

## ◆ 第2章

# もっともポピュラなモータから理解しよう DC ブラシ・モータの 動作原理と特徴， 駆動回路

江崎 雅康

ブラシレス・モータの解説を始める前に，モータのしくみを理解しておきましょう．まず電流の向きを切り替えるための機械的接点がある，DCブラシ付きモータ(ブラシ・モータ)のしくみを説明します．DCブラシ・モータはプラモデルからアイガモ・ロボットまで，ごく一般的に使われているモータです．

## 2-1 現在も多く使われているDC ブラシ・モータ

私たちの身の回りの製品には，さまざまなモータが使われています．その中でいちばん身近なモータは写真2-1に示すDCブラシ(整流子)モータです．歴史も古くモータの原点とも言えるものです．

構造が簡単で価格も安く，強いトルク(回転力)が得られます．ブラシ(整流子)という機械的な接触点があるため寿命が短く，電氣的なノイズや微細なホコリが発生するのが欠点です．

DCブラシ・モータはプラモデルのレーシングカー，ミニ四駆(タミヤ)などの玩具にも多く使われています．電動歯ブラシ，電動シェーバから携帯電話に使われている着信バイブレータなど，現在も多く使われているモータです．



〈写真2-1〉産業用DCブラシ・モータ(20W)

## ◆ 第3章

# 省エネ，長寿命，高信頼性に応える ブラシレスDCモータの特徴と動作原理

江崎 雅康

本書の最終目的はブラシレスDCモータをベクトル制御で動かすことです。この章では、アクチュエータとしてのブラシレスDCモータの特徴と動作原理をまとめて解説します。

### 3-1 長寿命，ノイズレス，ダストレスのブラシレスDCモータ

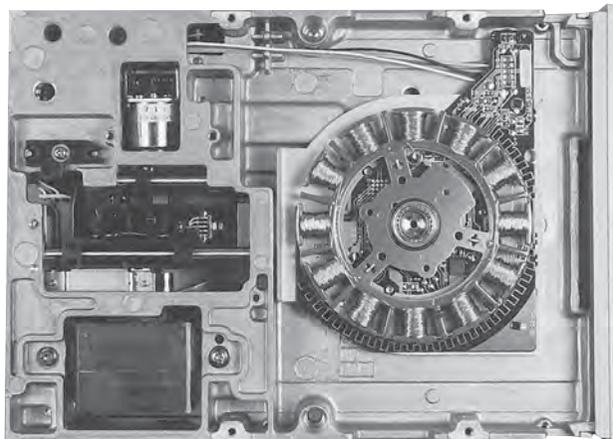
前章で紹介したように、DCブラシ・モータは簡単な構造で強いトルクが得られるモータです。しかし電機子電流の切り替えを機械的な接点(ブラシ)で行うため、寿命が短くダスト(金属片)が発生するのが欠点でした。

ブラシレスDCモータは、DCブラシ・モータのブラシ(整流子)をトランジスタやFETなどの電子スイッチに置き換えることにより、長寿命化、ダストレス化を図ったモータです。

ブラシレスDCモータはこの特徴を生かして、フロッピディスク・ドライブ装置(写真3-1)、ハード・ディスク・ドライブ装置、CD・DVD・Blu-rayドライブなどOA機器の回転軸のシリンダ駆動、空冷用のファン・モータなどに使われてきました。

ブラシレスDCモータは回転子の位置を検出するホール素子、界磁電流を切り替えるための電子スイッチ、タイミング制御回路を必要とします。

当然、従来のDCブラシ・モータと比べるとコストは高くなります。そこでコストが多少高くても、



〈写真3-1〉  
5インチ・フロッピディスク・ドライブに使われたダイレクト駆動ブラシレスDCモータ(90年代にはパソコン用磁気メモリとして大量に使われた)

## ◆ 第4章

# センサレス駆動，正弦波駆動を採用する ブラシレスDCモータの駆動方式の進化

江崎 雅康

ブラシレスDCモータは，冷蔵庫，ドラム型洗濯機，インバータ・エアコンなどの家電製品に使われるようになり，応用分野が広がる中で進化してきました。

その主な流れは，第3章で示したように，

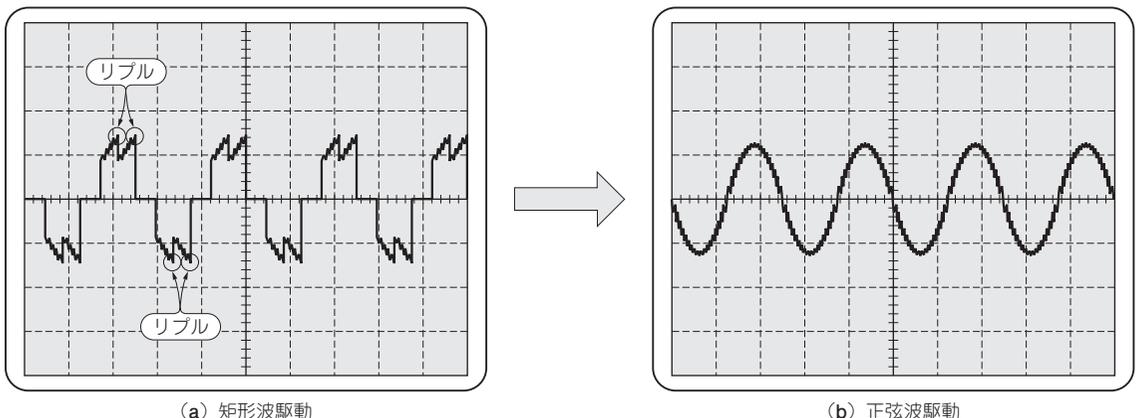
- ① ホール素子センサをなくしてセンサレス駆動方式へ
- ② 矩形波駆動から正弦波駆動方式へ
- ③ センサレス&正弦波駆動方式の採用
- ④ ベクトル制御の導入

にまとめることができます。

センサレス方式の採用によりホール素子などの部品を削減し，過酷な条件のもとでブラシレスDCモータを駆動することができるようになりました。また，図4-1に示す正弦波駆動の採用により，エネルギー効率の改善およびモータの騒音や振動を抑制することが可能になりました。

そしてセンサレス&正弦波駆動にベクトル制御技術を導入することにより，静かで強力な，そしてエネルギー利用効率を極限まで高めたブラシレスDCモータが実現しました。

本章では「センサレス駆動方式」および「正弦波駆動方式」についてその仕組みを解説します。



〔図4-1〕 家庭用ブラシレスDCモータ駆動の進化(正弦波駆動により騒音と振動を抑えることに成功)

## ◆ 第5章

# 電流がロータに及ぼす力を最大限回転トルクとして発揮させる ブラシレスDCモータのベクトル制御理論

小柴 晋 / 江崎 雅康

近年の省エネ意識の高まりや商品性の向上により、モータ制御にさらに高度なものが要求されています。たとえば家電分野においては、当初、AC電源で直接駆動できる誘導モータやユニバーサル・モータ<sup>注1</sup>が主流でしたが、1990年代後半より、効率がよく自由に速度を可変できる永久磁石同期式モータ(PMSM: Permanent Magnetic Synchronized Motor)<sup>注2</sup>のインバータ駆動(120°通電)が採用されるようになりました。

センサレス駆動、正弦波駆動、センサレス正弦波駆動と進化してきたブラシレスDCモータの駆動方式は、2000年代に入って32ビット・マイコンの処理能力を最大限に生かしたベクトル制御方式が主流になっています。

32ビット・マイコンの価格が下がったことで、効率の向上や振動を抑えることがセンサレスで実現できるベクトル制御を安価に実現できるようになったという背景があります。本章では、現在、主流となっているこの永久磁石同期式モータ(PMSM、以下本書ではブラシレスDCモータとする)によるベクトル制御について説明します。

## 5-1 ブラシレスDCモータの主流となったベクトル制御技術のメリット

120°通電制御によるブラシレスDCモータのインバータ駆動は、1相あたり、

+通電120° → 無通電60° → -通電120° → 無通電60°

を繰り返します。3相では電気角360°あたり6回、出力を切り替えます。この出力を切り替えるタイミングはホール・センサの出力によって決まります。

センサレス駆動の場合は、無通電区間(60°×2回)において誘起電圧からモータ位置を算出します。このように制御周期が電気角60°単位で行われるため、高性能なコントローラを必要とせず安価に実現できます。

その反面、出力波形は台形状になるので、正弦波駆動と比べて振動が多くなります。また制御周期が長いので、トルク変動に応じた細かなフィードバックは不可能です。

これらのデメリットを払拭したのがベクトル制御です。制御は64μs～250μsのPWM(Pulse Width

注1: ユニバーサル・モータ。ブラシとコミュテータをもつロータを使用するという点でDCブラシ・モータと似ている。ステータには永久磁石の代わりに巻き線を使用するが、基本原理は同じ。ステータ巻き線がロータと直列に接続されており、極性を相互に反転させても、モータは極性にかかわらず同じ方向に回転する。

注2: 永久磁石同期式モータ(PMSM: Permanent Magnetic Synchronized Motor)。ブラシレスDCモータ(BLDC)とほぼ同じ意味で使われる。本書では以下ブラシレスDCモータを使うことにする。

## ◆ 第6章

ベクトル制御の課題とベクトル・エンジン内蔵マイコンTMPM370  
ブラシレスDCモータのベクトル制御の実際

江崎 雅康/小柴 晋

6-1 ベクトル制御技術が家電製品にも使われる時代  
…ソフトウェア制御の課題

## ● 家庭内の電気製品にもブラシレスDCモータのベクトル制御技術が使われるようになった

ブラシレスDCモータのベクトル制御技術は、産業用ロボット、工作機械、FA機器、半導体製造装置などに使われてきた技術です。このベクトル制御技術は、FA機器に使われるモータの速度制御や精密な位置制御を行うと同時に、省エネルギー化を図るために使われてきました。

近年、エアコンや洗濯乾燥機、掃除機、ヒートポンプ式給湯器など民生用機器にもブラシレスDCモータのベクトル制御技術が使われるようになりました。これは機器の省電力化や制御性能を向上させるためです。

地球環境保全の視点から、火を使わず大気中の熱を利用して給湯する自然冷媒ヒートポンプ給湯機(エコキュート)が普及しつつあります。このヒートポンプ給湯器のコンプレッサにも高度なモータ制御技術が使われています。

## ● 32ビットRISCプロセッサの能力をフルに使うブラシレスDCモータのベクトル制御

ブラシレスDCモータのベクトル制御は、モータの効率向上や振動抑制をセンサレスで実現する高度な制御方法です。しかし、その制御には三角関数や乗除算を含んだ複雑な演算が必要です。また制御周期(PWMの繰り返し周波数)が64~250 $\mu$ sとたいへん高速なため、制御用のマイコンも高性能なものが必要になります。

図6-1はベクトル制御の基本フローです。従来のマイコンでは

- ▶ 3相のPWM出力
- ▶ 電流検出用のA-D変換

をハードウェアで自動的に行います。プログラムで初期設定を行うだけで、あとはハードウェアが自動的に行います。

しかし、それ以外の演算やトリガ設定などはすべてソフトウェアで処理する必要がありました。その処理時間は、40MHzで動作している32ビット・マイコンで約40 $\mu$ s必要です。この処理は、PWM周期ごとに必要です。

図6-2に示すように、PWMの任意の場所でA-D変換を開始し、そのA-D変換終了時からソフトウェ

## ◆ 第7章

# ベクトル・エンジン内蔵マイコンTMPM370を使いこなす ブラシレスDCモータの ベクトル制御プログラム

石郷岡 伸行 / 江崎 雅康

## 7-1 ベクトル制御のソフトウェア開発環境と ブラシレスDCモータの制御フロー

### ● TMPM370ユーザ向けに用意されたブラシレスDCモータのベクトル制御プログラム

ブラシレスDCモータのベクトル制御には高度なソフトウェア技術が求められます。演算処理を固定小数点で構成する必要があるなど、演算上の困難さに加えて、ブラシレスDCモータの動作原理に精通し、ベクトル制御技術を対象とするモータに合わせてパラメータを決定する必要があります。

ベクトル・エンジンを搭載したマイコンTMPM370を導入することにより、この負担は軽減されます。しかしモータ制御の経験がないデジタル専門のプログラマが1、2週間で書けるプログラムではありません。ソフトウェアによるベクトル制御のノウハウをもつユーザは独力でTMPM370のベクトル制御のプログラム開発を行っています。しかし、新たにベクトル制御を始めるユーザにとって、開発負荷はきわめて大きいといわざるをえません。

そこでメーカーではTMPM370のユーザ開発者向けにサンプル・プログラムを用意し、希望ユーザに配布しています。本章ではこのサンプル・プログラムの概要を紹介します(サンプル・プログラムは本書のWebで公開する予定)。

### ● サンプル・プログラムの開発環境

このプログラムはある特定のモータと特定の回路上で動かすことを前提にしています。図7-1はこのサンプル・ソフト(ベクトル制御プログラム)のソフト開発環境(概念図)、写真7-1は実際の開発環境です。

中心部の大きな基板はTMPM370レファレンス・ボード(PMD2-INV)で、左側がTMPM370評価基板です。このリファレンス・ボードは12V～24Vのモータを駆動できるベクトル制御駆動基板です。モータは10W程度の小型ブラシレスDCモータです。

写真に写っているJTAGデバッガはIARシステムズ社のJ-Linkです。サンプル・プログラムはIAR社の統合開発環境EWARMのプロジェクトの形で提供されています。

メーカーは最初のマイコン試作チップができた段階で、このような開発環境を準備します。実際にモー

 **第8章**

# ベクトル・エンジン内蔵マイコンTMPM370を使用した ブラシレスDCモータの ベクトル制御開発プラットフォーム

江崎 雅康

## 8-1 マイコン・チップだけではモータは回らない… ブラシレスDCモータのベクトル制御開発プラットフォーム基板

### ● ブラシレスDCモータをベクトル制御するためのプラットフォーム基板の開発

ベクトル・エンジンを搭載したARM Cortex-M3マイコンTMPM370を使うことにより、ブラシレスDCモータのベクトル制御が比較的容易にできるようになりました。しかし、マイコン・チップとベクトル制御ソフトウェアを手に入れば、すぐにモータが回るわけではありません。

マイコンの周辺に、FETドライバ回路、FET駆動回路、電流検出抵抗回路などを追加する必要があります。さらに、ブラシレスDCモータを用意し、モータに合わせてベクトル制御ソフトウェアのパラメータを変更する必要があります。その開発にはマイコン回路技術だけでなく、アナログ回路技術、パワー・スイッチング回路技術、それにモータについての知識も必要です。

モータ制御回路の経験がない技術者がデータ・シート片手に独力で開発を進めると、6か月や1年はすぐに経ってしまいます。市販のユニバーサル基板の上に、手配線で回路を組み立てるのは容易ではありません。しかし試作基板を起こすと10万や20万円のお金はすぐに消えていきます。

この開発の最初の一步を手助けするために、開発プラットフォーム基板を作りました。これが用意されていると開発業務は大いにはかどります。試作基板を開発し、ゼロからソフトウェア開発を行うために費やされる時間とお金を節約できます。

チップ・メーカーとツール・ベンダにこの開発プラットフォーム基板の提案をして生まれたのが、写真8-1の「ブラシレスDCモータ用ベクトル制御開発プラットフォーム」です。

### ● ベクトル制御開発プラットフォームの搭載機能とブロック構成

図8-1はブラシレスDCモータのベクトル制御開発プラットフォームのブロック構成です。この開発プラットフォームは、

- ▶ベクトル制御プログラムの開発を行う
- ▶JTAGデバッガを使って制御プログラムのC言語ソースコード・デバッグを行う

## ◆ 第9章

# TMPM370を使ってロボット・アームを動かそう 位置決めサーボ制御基板の開発と ロボットへの組み込み

江崎 雅康 / 坂本 元

## 9-1 軽量化，小型化，強力パワーを実現した位置決めサーボ基板

### ● TMPM370はいろいろな使い方に対応可能

TMPM370の応用例として，第8章までセンサレス駆動の例を中心に紹介してきました。メーカーの応用例もエアコン，冷蔵庫，ドラム型洗濯機など，センサレス駆動とベクトル制御による省エネ効果を生かす用途が前面に出ています。しかし，このチップ自体は周辺回路と設定を変えることにより位置決め制御や定トルク制御などにも対応可能です。

第8章で紹介した開発プラットフォームによる評価実験の結果を生かして，二足歩行ロボットを開発しているはじめ研究所が位置決めサーボ基板を開発しました。現在，**写真9-1**に示す二足歩行ロボット駆動用のサーボモータとして組み込まれ，動作しています。モータはマクソン社のエンコーダ付きブラシレスDCモータを使っています。

産業用ロボットは床に固定されているため，サーボ制御基板の大きさや重量はそれほど問題になりません。しかし，二足歩行ロボットなどの自立型のものは，サーボ制御基板もモータも自重に組み込んで移動する必要があります。このため小さくて軽く，しかも強力なトルクが出せるモータを必要としています。市販のサーボモータやサーボアンプが使えないので，独自に開発を行ったのが**写真9-2**のサーボ制御基板です。

この基板は，

- ▶ センサレス駆動を行わない
- ▶ モータ起動時は，ホール素子によってロータの初期位置を検出する
- ▶ エンコーダによってロータの正確な位置を検出する

という特徴を備えています。

本章では，TMPM370の用途としては少し異色な，位置決め制御用サーボ基板を紹介します。

### ● TMPM370を使った位置決めサーボ制御基板の仕様

開発した位置決めサーボ制御基板は，**写真9-2**に示すように45mm × 90mmの小さな基板ですが，

**CQ出版社**

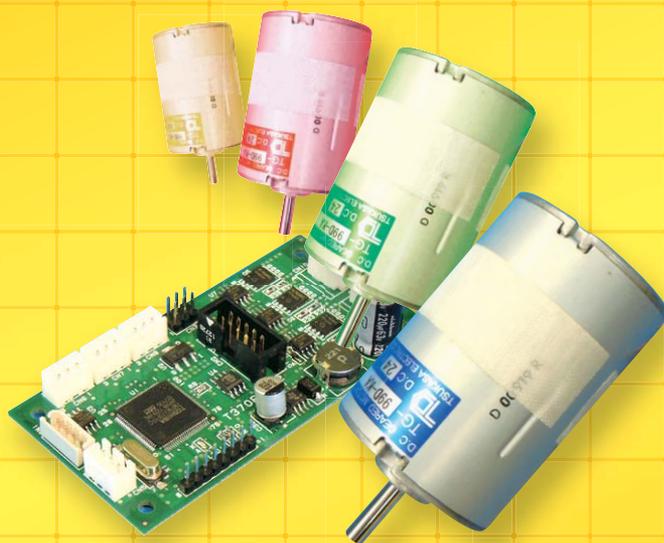
# 見本

このPDFは、CQ出版社発売の「ブラシレスDCモータのベクトル制御技術」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/41/41471.htm>

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



## ブラシレスDCモータの ベクトル制御技術