

# ブラシレスDCモータの駆動回路技術

中国ポリテクカレッジ 天野 隆・立壁保郎・橋本清司・石部剛史  
 (中国職業能力開発大学校)

## 1. はじめに

現在、DCモータは、制御性の良さ、低価格などの優れた特徴から、ありとあらゆる装置や機器に用いられている。しかし、ブラシ、コミュテータの接触による部品の摩耗、騒音、転流時のスパークという最大の欠点がある<sup>1)</sup>。

この欠点を解決するためにブラシレスDCモータが開発された。このモータは、ブラシレスという名のとおりに、ブラシ、コミュテータがないため、機械的な接触点が存在しない。したがって、前述のDCモータの欠点は解決された。一方、DCモータのように単純に直流電源を接続しただけでは駆動（回転）せず、DCモータに比べ複雑な駆動回路が必要となる。

ここで、本報告は著者らが平成14年度能力開発セミナーにて、実際に行った内容をまとめ上げたものである。全体的には、ブラシレスDCモータの概要、製作した駆動回路、および波形計測という流れで構成している。詳細については、著者らが駆動回路を製作した際、関連書籍、文献等にあまり記載されていない点がいくつかみられた。したがって、その点を踏まえながら説明する。

## 2. ブラシレスDCモータ概要

### 2.1 内部構成

現在、ブラシレスDCモータは、単相から多相までのさまざまな種類が存在しているが、なかでも3相

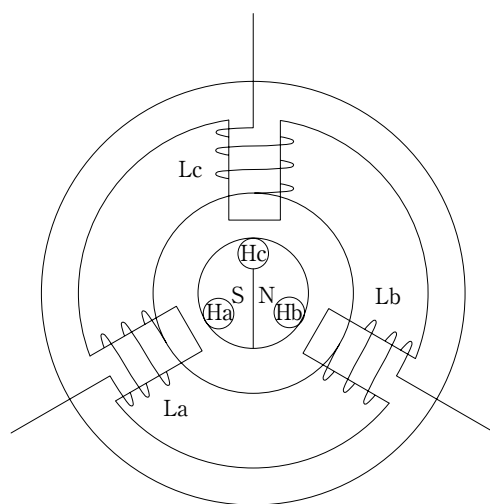


図1 基本的なブラシレスDCモータ内部構造

タイプが、最も多く用いられている。本報告では、この3相タイプを取り上げた。

ここで、3相タイプの例として、説明の便宜上、最も基本的な3スロット2ポールモータ（スター結線）を取り上げた。内部構成を、図1に示す。前項で説明したように、ブラシ、コミュテータがない。外側のLa, Lb, Lcはステータコイルである。内側のHa, Hb, Hcは磁極位置を検出するためのホールICである。また、ロータである永久磁石が配置されている。

### 2.2 動作原理

図2に示すように、初期位置が(0°)のとき、LbからLaに向かって、電流が流れるとすると、右ねじの法則により、Lbは「N」に、Laは「S」に磁化され、磁石であるロータが引力により回転する。さらに、(60°)～(300°)まで、コイルに流れる電流

が順次に切り替わると、それにつれロータも連続的に回転し、(0°)に達したとき1回転したことになる。

### 2.3 駆動方法

コイルに流す電流の切り替えに利用するための半導体デバイスとしては、トランジスタ、FETなどを用いることが多い。モータの相数やコイルに流す電

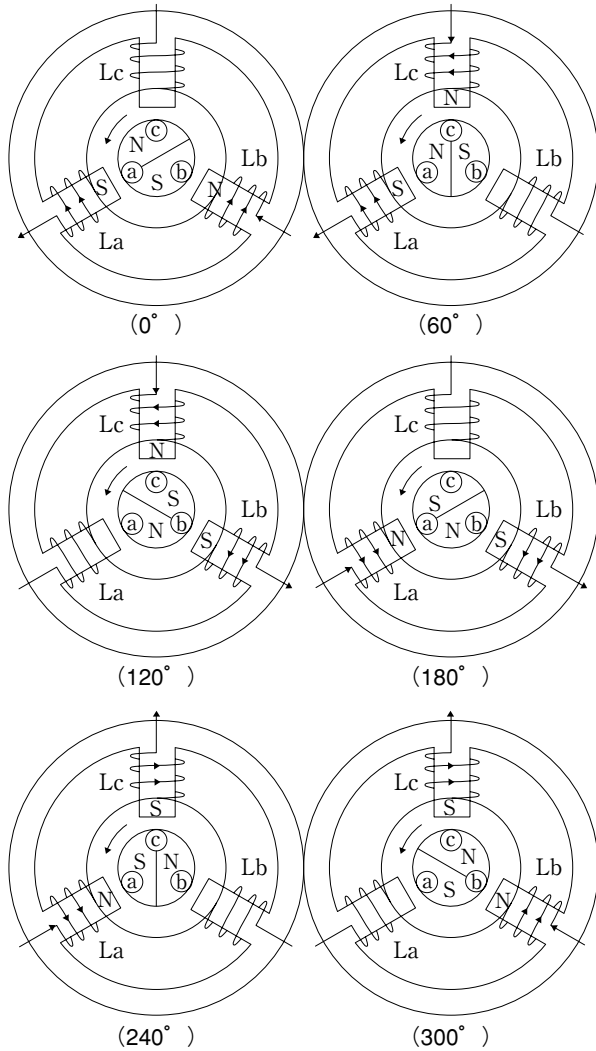


図2 ブラシレスDCモータの回転原理

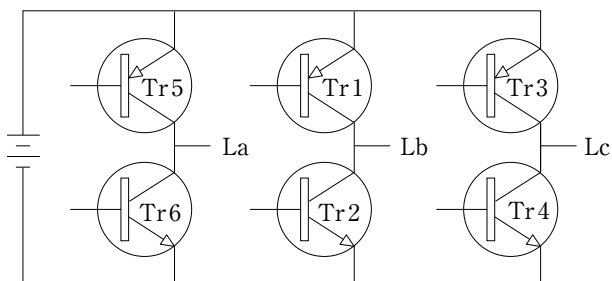


図3 3相バイポーラスタードライブ回路

流を単または双方向にすることによって、トランジスタの数が決まる。本報告においては、図3に示すように3相タイプのモータの駆動回路として一般的な、3相バイポーラスタードライブ方式を用いた<sup>2)3)</sup>。

### 3. ロータ磁極位置検出

ロータの磁極位置検出には、一般にホール素子や、IC化されたホールICが使われている。

#### 3.1 ホール効果とホール素子

図4に示すように、磁界中においた化合物半導体に電流を流すと、電流、磁界の双方と直角方向に電圧が生じる。この電圧をホール電圧と呼び、この現象をホール効果と呼ぶ。また、図5に示すように、グラフよりN極では+、S極では-の微弱電圧が生じる。これを利用したセンサがホール素子である<sup>2)</sup>。

#### 3.2 ホールIC

一般に、ホール素子の出力電圧は微弱であるため、OPアンプ等を用いて出力電圧を増幅して用いる。この増幅およびシュミットトリガも含めたセンサがホールICである。図6にホールICの基本構成を示す。

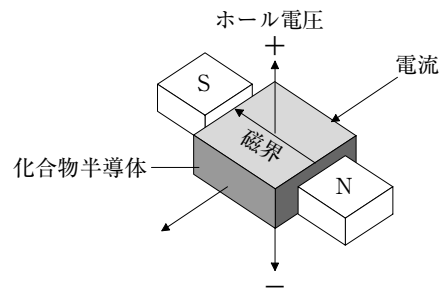


図4 ホール効果によるホール起電力

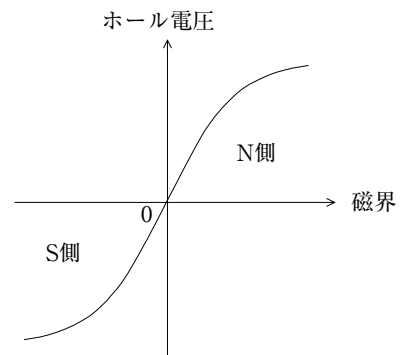


図5 ホール素子の特性曲線

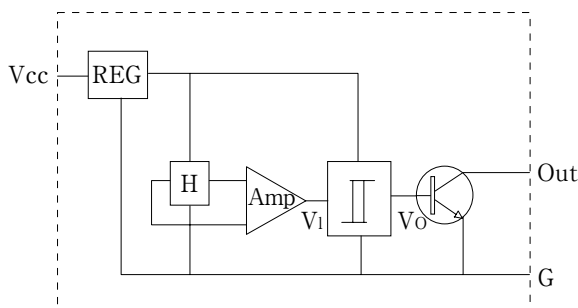


図6 ホールICの基本構成

シュミットトリガにより，出力信号を矩形波にし，デジタル信号としてそのまま用いることができるように設計されていることもまた特徴である。さらに，ホールIC（または，ホール素子）が内蔵されたブラシレスDCモータを，ホールモータと呼ぶこともある。また，現在ブラシレスDCモータの多くは，ホール素子ではなく，ホールICを内蔵したタイプが一般的である。

### 3.3 ホールIC出力パターン

ホールICの位置は，一般には $60^\circ$ ， $120^\circ$  間隔配置が用いられる。図2は $120^\circ$  間隔配置であり，ロータが $60^\circ$  回転するたびに，3個の素子のうちどれかがNからSに変化していることがわかる。このことから，1回転で6個（ $360^\circ / 60^\circ$ ）のホールIC出力パターンが生成される。

図7にロータ回転角におけるホールIC，トランジスタ，ステータコイルの動作タイムチャートを示す。ホールIC出力は， $60^\circ$  ごとに異なったパターンで出力されている。したがって，電流を順次に切り替え，モータをスムーズに回転させるためには，このホールIC出力に基づいた，トランジスタのON-OFFパターンを生成すればよいことになる。なお，各トランジスタが $120^\circ$  分ON状態であることから， $120^\circ$  通電方式と呼んでいる<sup>4)</sup>。

### 3.4 ホールICがロータの磁極境界に位置していた場合のホールIC出力信号

3.1項で述べたように，N極では+，S極では-の電圧が生じる。また，3.2項で述べたように，ブラシレスDCモータの多くは，ホール素子ではなく，ホールICを内蔵したタイプが一般的である。以上を踏まえ，実際には，N極ではデジタル信号である"1"が，S極

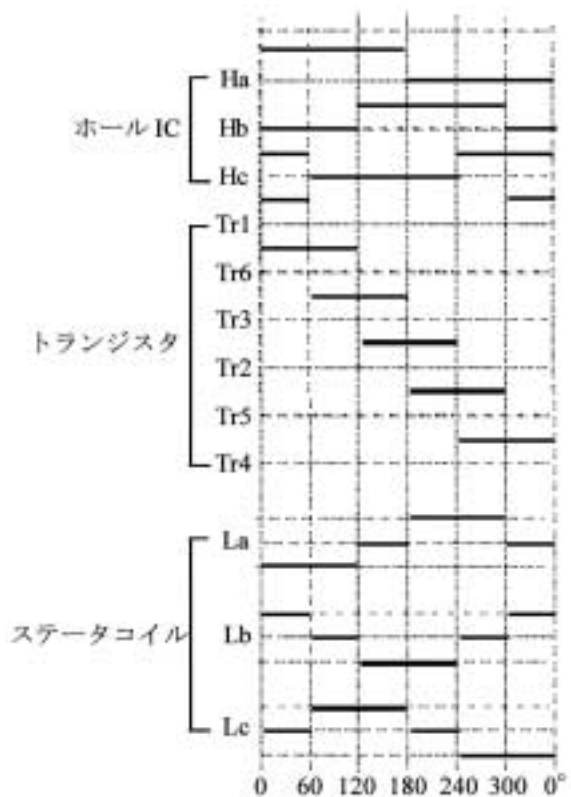


図7 ロータ回転角におけるホールIC，トランジスタ，ステータコイルのタイムチャート

では"0"がホールICから出力される。しかし，これはホールICがロータ磁極の中間に位置していた場合である。

一方，ホールICがロータ磁極の境界に位置していた場合を考える。図8の（ $0^\circ$ ）の場合，ホールICはS極からN極領域に進入しようとしている。このとき，図6のホール素子Hの出力は，Ampを介してシュミットトリガに入力されるので，図9より $V_I$ は"0"から"1"に変化していく。ここで，シュミットトリガにはヒステリシスがあり，磁極境界における $V_I$ がヒステリシス内に存在したとすると，磁極境界を越えても $V_{IH}$ を越えるまでは，"0"に保持される。図6に示すように，シュミットトリガ後段にはトランジスタがあり，最終的な出力（図6のOut）は，図8に示すように"1"となる。（ $180^\circ$ ）の場合についても同様のことがいえる。以上により，ホールICがロータ磁極の境界に位置していた場合においても，ヒステリシスにより確実に"0"か"1"が出力される<sup>5)</sup>。

### 3.5 ワンチップドライブレIBを用いる場合

3.2項で述べたように，ブラシレスDCモータの多

くは、ホール素子ではなく、ホールICを内蔵したタイプが一般的である。

一方、市販のワンチップドライブICは、ホール素子内蔵タイプのモータを対象としていることが少なくない。したがって、これらを接続する場合、次の点を考慮する必要がある。第一に、ドライブIC入力部が、差動アンプ形式（2入力）となっているため、ホールICタイプのモータ（1出力）を用いる場合は、差動アンプの1入力に、バイアス電圧（電源電圧の約半分）をH+またはH-に印可する付加回路等が必要である。第二に、ドライブICがホール素子の微弱な出力信号を受け取る構成となっている。一般に、ホール素子の出力信号は、数十mV～百数十mVであ

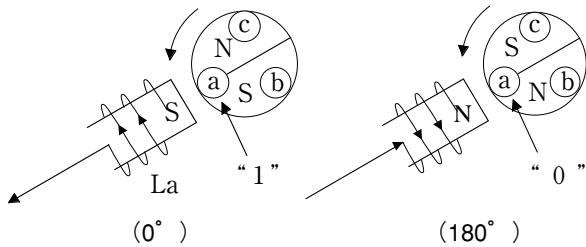


図8 極の境界におけるホールICの出力

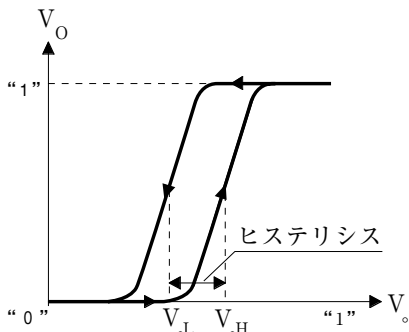


図9 シュミットトリガの入出力電圧特性

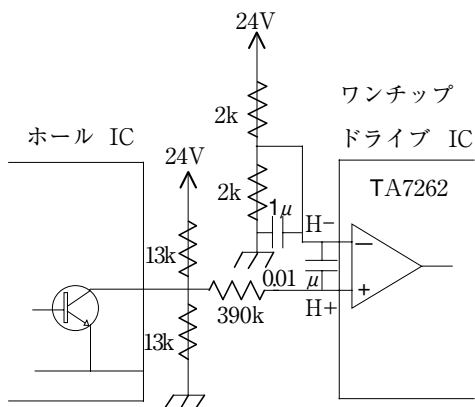


図10 ホール素子信号入力タイプドライブICを用いる際のインターフェース回路例

る。一方、ホールICの出力信号は、5Vや12Vのレベルであり、そのまま入力できない。したがって、故意に微弱電圧にし、信号振幅がホール素子の出力信号レベルになるような付加回路が必要である。以上を踏まえ、付加回路例を図10に示す。また、図11にドライブICへの入力信号イメージを示す<sup>3)</sup>。

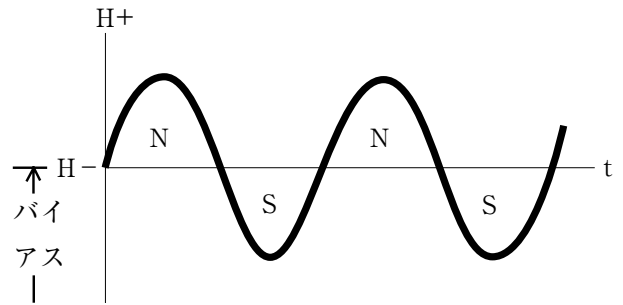


図11 ドライブICへの入力信号イメージ

## 4. 駆動回路の製作

### 4.1 ゲートICおよびディスクリート部品構成による駆動回路

#### (1) 正転回路

図12に製作した回路を示す。本報告では、3.5項で述べた内容を踏まえ、ホールICの出力信号をそのまま利用できるようにするため、ゲートICとディスクリート部品で構成した。なお、図12の回路は、モータを一方方向に回転させることができる。NOT、ANDゲートの組み合わせにより、ホールIC出力に基づいたトランジスタのON-OFFパターンを生成する。これにより、トランジスタのベース電流を流し、トランジスタをスイッチングしている。なお、NPN型トランジスタ2SC1815は、NOTとして用いている。

#### (2) 回転方向制御回路

図12の回路により、モータが回転（CW）するためのドライブ回路の動作フローチャートを図13に示す。回転前は、ロータの磁極が任意の位置に存在する。次に、ロータの磁極位置に応じ3つのホールICが論理回路に出力する。さらに、論理回路ではホールICの出力パターンに応じて、表1に示すようなパターンが現れ、ONするトランジスタが決定される。これにより、ステータコイルの励磁パターンが決定

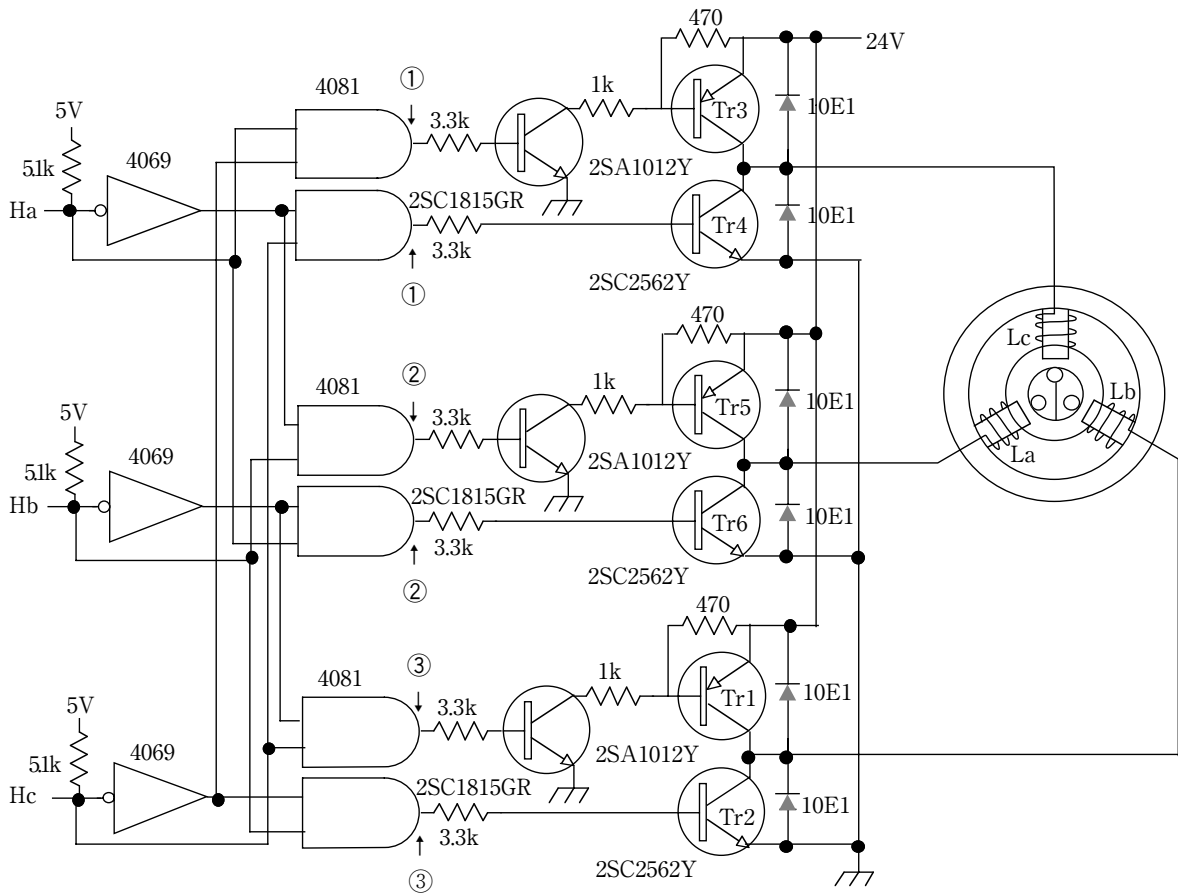


図12 3相バイポーラスタードライブ回路例

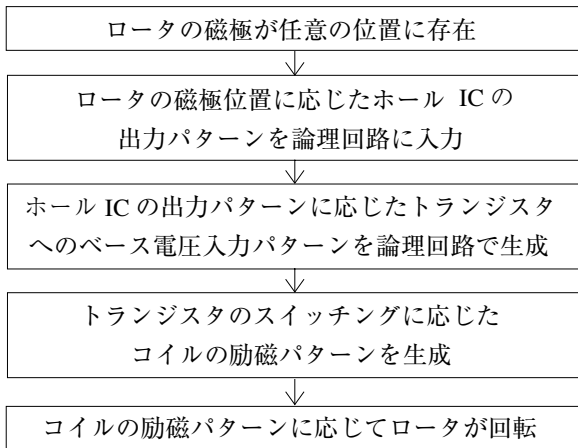


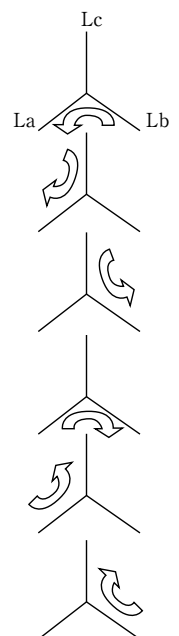
図13 ドライブ回路の動作フローチャート

され、ロータが回転する (図7参照)。

一方、回転方向を切り替えるためには、各ロータ回転角において電流の流れる方向が逆になれば可能となる。例えば、図2 (0°) の場合、LbからLaに向かって電流が流れているが、LaからLbに流れるようにする。この回転方向を制御するための論理回路

表1 ホールIC出力、トランジスタベース入力信号パターン (CW時) とコイルに流れる電流イメージ

角度	Ha	Hb	Hc	Tr3	Tr4	Tr5	Tr6	Tr1	Tr2
0	1	0	1	0	0	0	1	1	0
60	1	0	0	1	0	0	1	0	0
120	1	1	0	1	0	0	0	0	1
180	0	1	0	0	0	1	0	0	1
240	0	1	1	0	1	1	0	0	0
300	0	0	1	0	1	0	0	1	0



を図14に示す。なお、図14に示す回路は、図12に示す回路の①部分に付加する（②、③部分についても図14と同様の回路を付加）。また、CCW時のパターンを表2に示す<sup>4)</sup>。

(3) 回転数制御回路

回転数の制御は、PWM方式を用いた。図15にデジタルICで構成した回路を示す。7485、74193はそれぞれ、4ビットのコンパレータ、カウンタである。コンパレータが、カウンタ出力信号とデューティ比設定用入力ビット信号を比較し、その大小に応じて出力する信号（図15④）を、PWM波形として利用している。最終的には、図3に示すTr2, 4, 6（またはTr1, 3, 5）のベース信号にPWM波形を重ね合わせる。具体的には、図15の⑤に元のベース信号を入力し、ANDゲート⑥を介して重ね合わせたPWM波形

をTr2, 4, 6のベース信号に付加した。図16に、一例としてTr4, 6のベース信号に、PWM波形を重ね合わせた波形を示す。図17は部分的に拡大している。

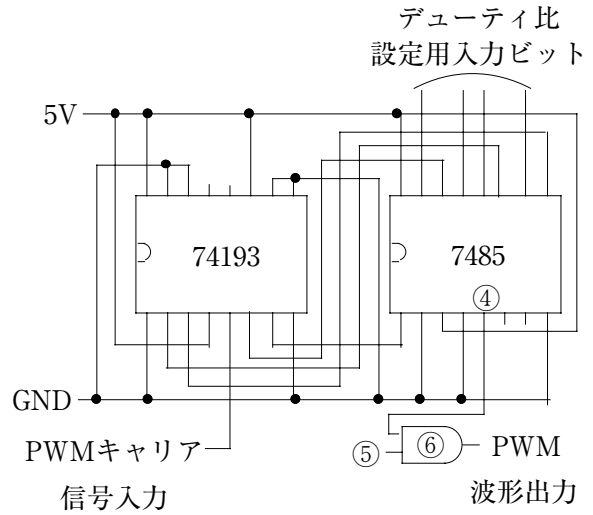


図15 PWM回路

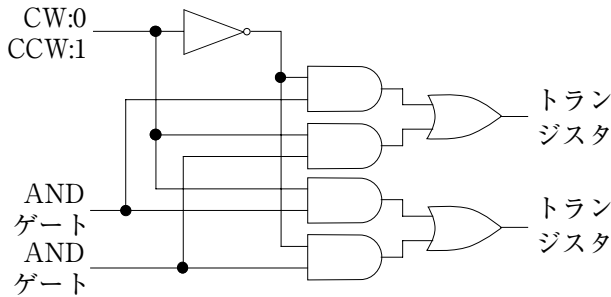


図14 回転方向を制御するための論理回路

表2 ホールIC出力, トランジスタベース入力信号パターン (CCW時) とコイルに流れる電流イメージ

角度	Ha	Hb	Hc	Tr3	Tr4	Tr5	Tr6	Tr1	Tr2
0	1	0	1	0	0	1	0	0	1
60	1	0	0	0	1	1	0	0	0
120	1	1	0	0	1	0	0	1	0
180	0	1	0	0	0	0	1	1	0
240	0	1	1	1	0	0	1	0	0
300	0	0	1	1	0	0	0	0	1

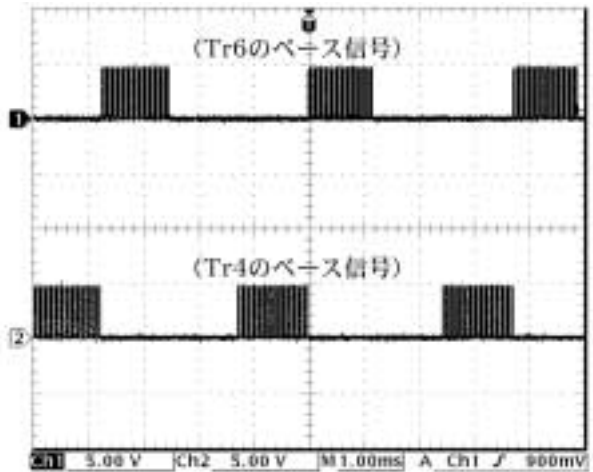


図16 PWM波形を重ね合わせた波形

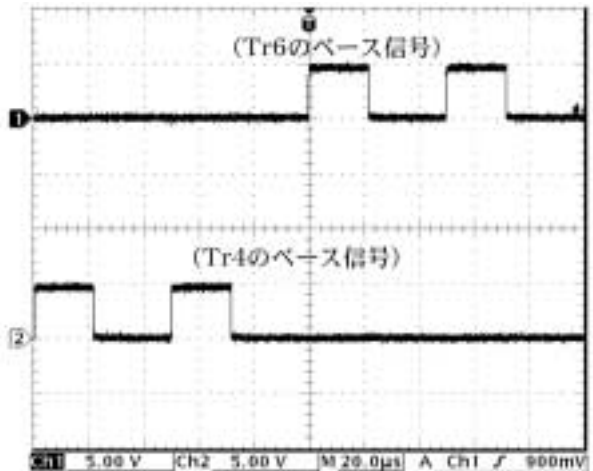


図17 図16の拡大図

なお、図16, 17におけるPWM波のキャリア周波数は20kHz, デューティ比は42.6%である<sup>6)</sup>。

(4) 製作した駆動回路

図18に製作したドライブ回路を示す。モータは、日本サーボ製24V, 3W, 3相12ポール9スロットタイプを使用した。本回路により、外部入力指令に応じた回転方向, 回転数の制御が可能となった。

4.2 ワンチップマイコンおよびディスクリート部品構成による駆動回路

(1) 正逆転回路

図19に製作したドライブ回路を示す。図12, 14において、ゲートICを使用しているところをすべてワンチップマイコンに変更した。ワンチップマイコンは、Microchip社製のPIC16F84を用いた。基本的には、3つのホールIC信号を入力し、マイコンで各トランジスタへの出力パターンを生成し、6つのトランジスタに出力している。

(2) フローチャート

図20にマイコンプログラムのフローチャートを示す。なお、図中の(0°)や(60°)等の角度表示は、「表示されたロータ回転角におけるコイルの励磁パターンを出力」ということを意味する。

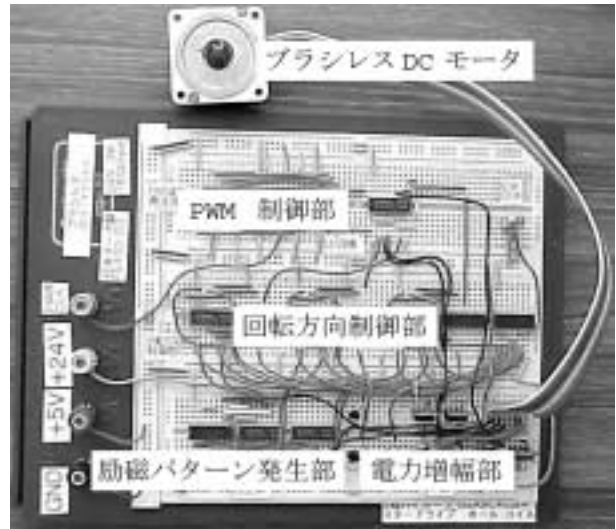


図18 製作したドライブ回路

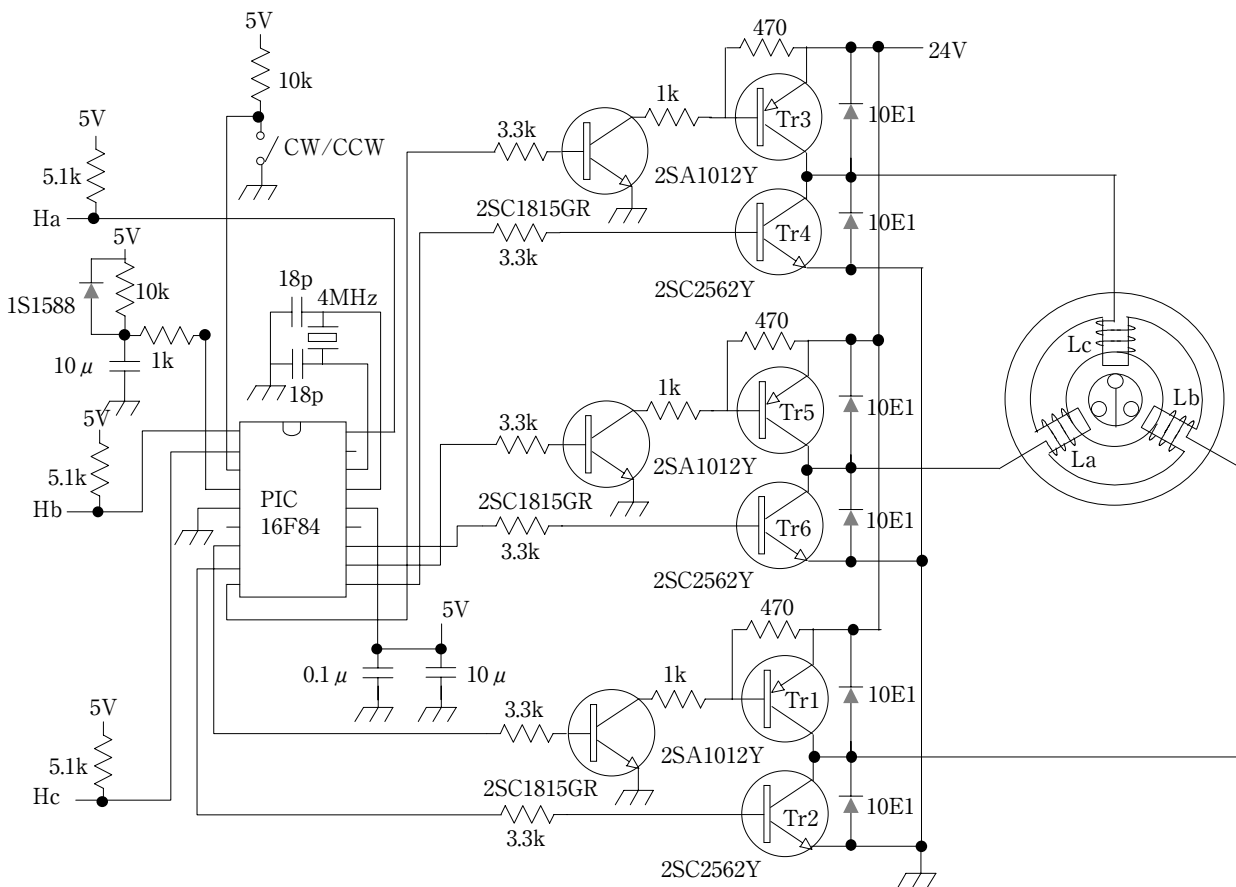


図19 3相バイポーラスタードライブ回路 (ワンチップマイコンPIC16F84を用いた場合)

### (3) 製作した駆動回路

図21に製作したドライブ回路を示す。モータは、4.1の(4)項で使用したものと同様である。本回路により、外部入力指令に応じた回転方向の制御が可能となった。なお、本回路では回転数制御の部分は省略した。

## 5. 波形計測

図22に1相分の線間電圧，線電流のグラフを示す。

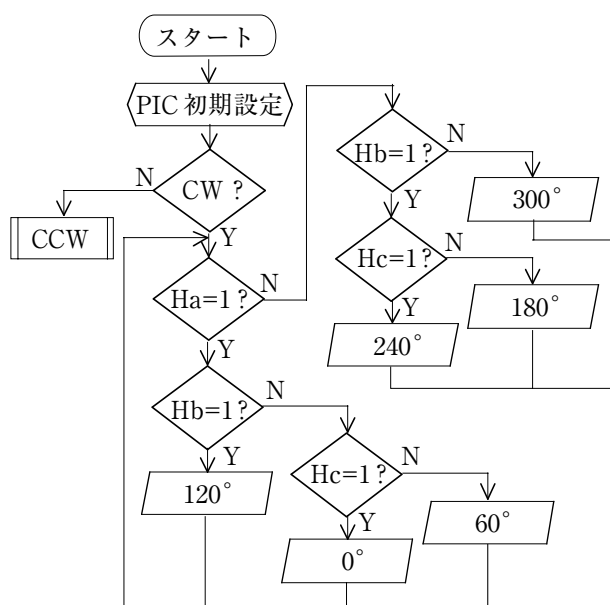


図20 フローチャート



図21 製作したドライブ回路  
(ワンチップマイコンを用いた場合)

120° 通電方式を採用したため、図3に示すTr1とTr2, Tr3とTr4, Tr5とTr6の各ペアが同時にON-OFFすることはない(図7参照)。したがって、線間電圧は図22に示すような台形波となる。このことから、線間電圧が矩形波になる方式に比べ、脈動の少ない方式といえる。また、線間電圧のグラフにおいて、インパルス状の波形がいくつかみられる。この波形がみられる間は、トランジスタに並列接続されているフライバックダイオードに電流が流れている。

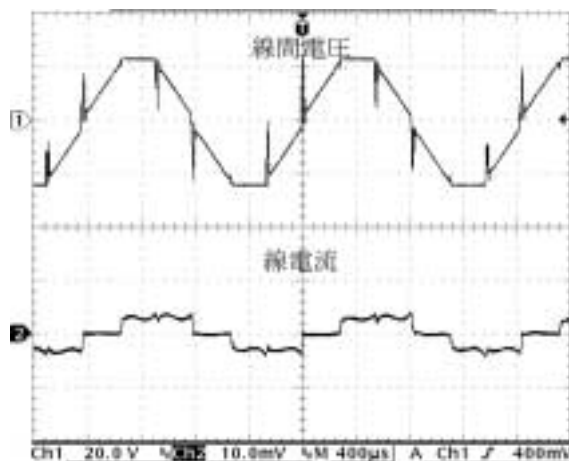


図22 線間電圧と線電流

## 6. おわりに

昨今、ブラシレスDCモータは、低ノイズ、メンテナンス性の良さなどの特徴から需要が増えている。本報告が、ブラシレスDCモータに関するセミナー、アビリティコースなどを構築するうえでの一助になれば幸いである。

### <参考文献>

- 1) 加藤：『図解わかる電子回路』，講談社。
- 2) 「モータ制御&メカトロ技術入門」，『トランジスタ技術special』，No.61，CQ出版。
- 3) 「ブラシレスモータのサーボ回路技術」，『トランジスタ技術special』，No.73，CQ出版。
- 4) 見城・永守：『新・ブラシレスモーターシステム設計の実際―』，総合電子出版社。
- 5) 白土：『デジタルICの基礎』，東京電機大学出版。
- 6) 在田：『電力制御回路設計ノウハウ』，CQ出版。