

モーター制御（掃除機）

概要

掃除機に使用されるモーターおよび基本回路について記述しています。従来の掃除機では AC 電源を使用したユニバーサルモーターが主流でしたが、コードレス化により DC 電源でのブラシレスモーターの採用が増加しています。ブラシレスモーターには 3 相タイプと単相タイプがあり制御方法が異なります。

アプリケーションノートではユニバーサルモーターおよびブラシレスモーターの駆動および制御（位相制御および PWM 制御）について説明するとともにそれに使用されるトライアックカプラーおよび MOSFET について説明しています。

目次

概要	1
目次	2
1. 掃除機用モーター	4
1.1. 掃除機吸引力とモーターの特性	4
1.2. 掃除機用モーターの種類	5
1.2.1. モーターの種類と概要	5
2. 掃除機モーター制御	8
2.1. コード式（AC 入力）掃除機	8
2.1.1. ユニバーサルモーター使用の回路	8
2.1.2. トライアックによる位相制御	8
2.1.3. 掃除機トライアック位相制御回路	8
2.1.4. 掃除機吸引モーター用トライアックの位相制御波形	9
2.1.5. 掃除機床ブラシモーター駆動電圧、電流	10
2.1.6. トライアックカプラー駆動回路	10
2.1.7. トライアックカプラーを使用するにあたって	12
2.2. コードレス式（DC 入力/充電式）掃除機	13
2.2.1. DC ブラシモーター駆動	13
2.2.2. チョッパー回路	13
2.2.3. SR モーター駆動	14
2.2.4. ブラシレスモーター駆動	16
2.2.5. 3相ブラシレスモーター駆動	16
2.2.6. 単相ブラシレスモーター駆動	18
2.3. コードレス式（DC 入力/充電式）インバーター回路の MOSFET について	22
2.3.1. MOSFET の耐圧選択（低耐圧 MOSFET）	22
2.3.2. インバーター PWM 制御（正弦波駆動）と同期整流環流動作	22
2.3.3. インバーター回路におけるデッドタイムの設定	23
2.3.4. インバーター回路における MOSFET 損失	23
2.3.5. コードレス掃除機のバッテリー電圧と MOSFET	23
製品取り扱い上のお願い	24

目次

図 1.1 DC モーター特性.....	4
図 1.2 ユニバーサルモーター.....	5
図 1.3 SR モーター.....	6
図 1.4 DC ブラシモーター（二極）.....	6
図 1.5 三相ブラシレスモーター.....	7
図 2.1 位相制御回路および波形.....	8
図 2.2 ユニバーサルモーター掃除機回路.....	8
図 2.3 トライアック位相制御波形（例）.....	9
図 2.4 床ブラシ用モーター電圧、電流波形.....	10
図 2.5 トライアックカプラーとメイントライアックによるモーター駆動回路例.....	10
図 2.6 ZC タイプ動作.....	11
図 2.7 NZC タイプ動作.....	11
図 2.8 NZC タイプ位相制御波形.....	12
図 2.9 DC ブラシレスモーター制御の基本回路.....	13
図 2.10 SR モーター制御の基本回路図.....	14
図 2.11 SR モーター駆動回路.....	14
図 2.12 SR モーター駆動回路動作.....	15
図 2.13 SR モーター相電流イメージ.....	15
図 2.14 3 相ブラシレスモーター駆動回路.....	16
図 2.15 3 相ブラシレスモーター駆動.....	17
図 2.16 スイッチング回路動作.....	17
図 2.17 単相ブラシレスモーター駆動回路例.....	18
図 2.18 単相ブラシレスモーター駆動回路入力信号.....	19
図 2.19 単相ブラシレスモーター駆動入力信号および回路動作.....	21
図 2.20 PWM 制御と環流時の同期整流.....	22
図 2.21 バッテリー電圧に対する推奨パワーMOSFET の耐圧、 $R_{DS(ON)}$ およびパッケージのイメージ.....	23

表目次

表 1.1 掃除機用モーター.....	5
---------------------	---

1. 掃除機用モーター

近年、掃除機はキャニスタータイプ（商用 AC 電源で入力）から手軽で使いやすいコードレスタイプ（DC バッテリー搭載）、特にスティックタイプに急速に移行しています。この背景には、大容量電池の開発とともにブラシレスモーターの回転数とトルクの相反する特性を改善することで小型かつ高速回転可能なモーターが開発され、スティックタイプ掃除機でもキャニスタータイプレベルへの出力向上が可能になったこともあります。

1.1. 掃除機吸引力とモーターの特性

掃除機の吸引力指標を表す一つの目安として吸込仕事率があります。吸引仕事率とは、掃除機が吸い込む空気のと吸い込む力とを示す指標です。単位は W(ワット)で表示されます。

吸込仕事率は、定められた試験条件により、吸い込み状態を変化させたときの風量 (m^3/min) と真空度 (Pa=パスカル) を測定し、その関係から以下の式から求められる値の最大値を示します。

$$\text{吸込仕事率(W)} = 0.01666 \text{ (定数)} \times \text{風量}(\text{m}^3/\text{min}) \times \text{真空度(Pa)} \text{ -----式(1)}$$

(注) 0.01666 (定数) について

min (分) から s (秒) への変換係数として 1/60 が入ります。

真空度はごみを浮き上がらせる力であり、大きい方が重いものを浮かせることができ、風量は浮き上がらせたごみを運ぶ力であり、両者の積が空気力学的動力でごみの吸い込み能力を表します。この最大値となる値が吸込仕事率です。実際のごみの吸い込み能力は掃除機のヘッド状態によっても変わってきます。

吸込仕事率はモーターの出力パワーに比例します。DC モーターの出力パワーは回転数およびトルクから式(2)で示されます。大きなパワーを出力するには、高回転数時に高いトルクが必要ですが、スティックタイプ掃除機のモーターはトルクを大きくするとモーターサイズも大きくなるため、図 1.1 に示す DC モーターの特性を考慮して小型化したモーターでトルクが小さくても出力パワーが出せるように高速回転モーターを採用する傾向にあります。図 1.1 でモーター①はトルクが大きい回転数が小さいものを示し、②はトルクが小さい回転数が大きいものを示しています。

トルクが小さくても回転数を上げることができれば同等のパワーを出せることを示しています。

$$\text{パワー}P(\text{W}) = \text{回転速度}(\text{rad/s}) \times \text{トルク}T(\text{N}\cdot\text{m})$$

$$\text{回転速度}(\text{rad/s}) = \text{回転数}(\text{r/min}) \times 2\pi/60$$

$$= 0.1047 \times \text{回転数}(\text{r/min})$$

$$\text{パワー}P(\text{W}) = 0.1047 \times \text{トルク}T(\text{N}\cdot\text{m}) \times \text{回転数}(\text{r/min}) \text{ -----式(2)}$$

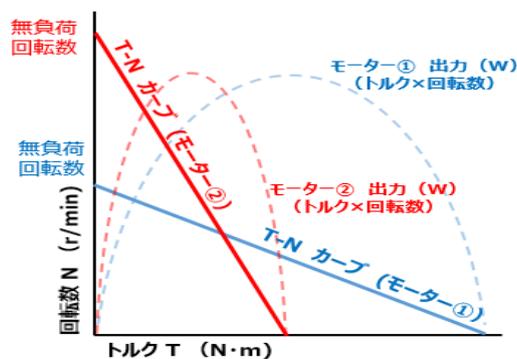


図 1.1 DC モーター特性

1.2. 掃除機用モーターの種類

掃除機に使用されるモーターの主な種類について表 1.1 に示します。家庭用掃除機のコード式（AC 入力タイプ）は、キャニスター型が大半で、AC 入力を DC に整流し SR モーターやブラシレスモーターを採用する場合がありますが、ほとんどが AC 入力を位相制御してユニバーサルモーターを駆動しています。

コードレス式（DC 入力/充電式）は高速回転が可能な SR モーターやブラシレスモーターを駆動しコード式と同等の出力パワーを追求しています。

表 1.1 掃除機用モーター

	モーター
コード式（AC 入力）	ユニバーサルモーター
コードレス式 （DC 入力 / 充電式）	DC ブラシモーター
	SR モーター
	3 相ブラシレスモーター
	単相ブラシレスモーター

1.2.1. モーターの種類と概要

ユニバーサルモーター (Universal motor) :

交流整流子型モーターの一種です。DC モーターと同様にブラシと整流子を持ち、主に単相交流で使われますが、直流でも回転します。回転子（ローター）と固定子（ステーター）の巻線は直列に接続されており（直巻方式）、両方に直列に電流を流す事で、交流により、固定子の電流の方向が逆転しても、同時に、回転子の電流の方向も逆転するので、回転子と固定子の相対的位置関係は変わりません。

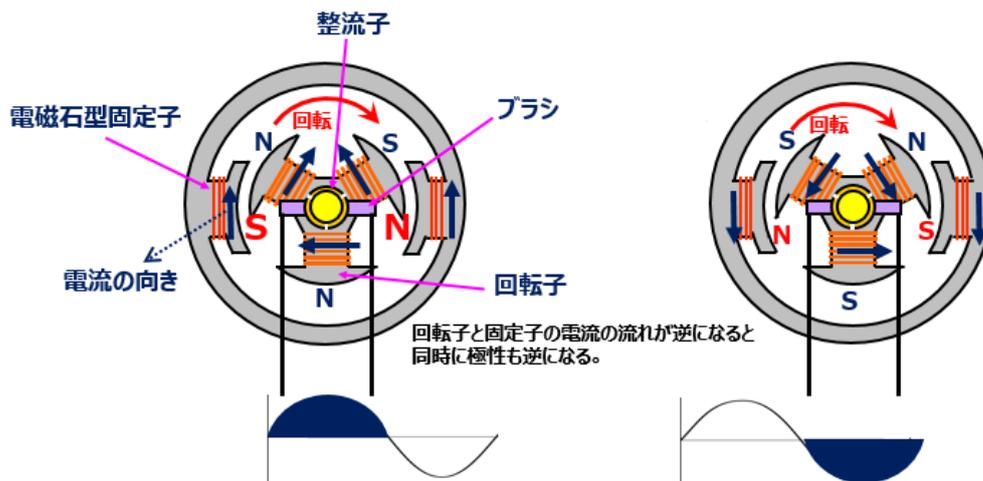


図 1.2 ユニバーサルモーター

SR モーター (Switched Reluctance Motor) :

SR モーターはリラクタンスモーターで固定子側に、突起を持たせて、リラクタンス（磁気抵抗）の濃密を作り複数の磁極としたものです。他に固定子側には突起性を持たせず、正弦波のドライブを可能とした、同期リラクタンスモーター（SynRM）があります。構造はステッピングモーターに似ており、回転子は強磁性の鉄芯のみで構成され、鉄心に切り込みを入れることで、部分的に高磁気抵抗部分を作り、回転位置により、吸引力に差を付けています。これによって、回転子に永久磁石や電磁石を使わずに、軟鉄の吸引力のみを使い、ステップ的に回すように工夫したモーターです。

図 1.3 に回転動作について示します。図に示す赤線配線のみで電流を流し、これを順次切り替えて回転磁界を作ります。回転子は回転磁界と逆方向に回転します。

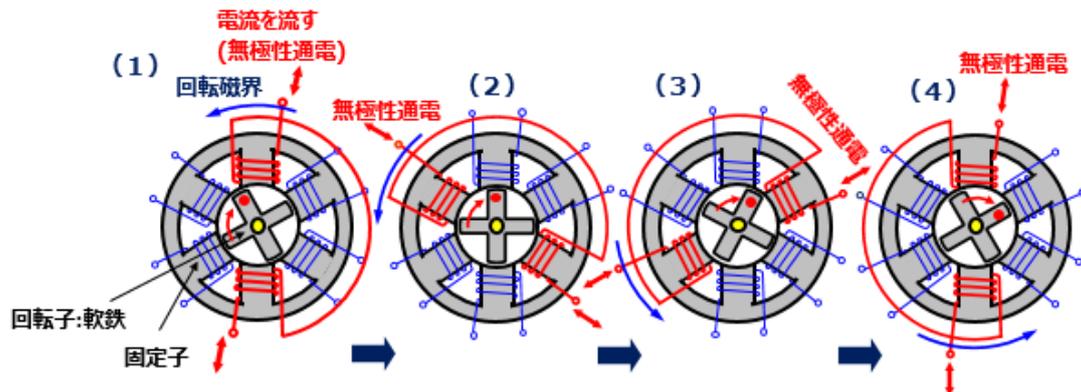


図 1.3 SR モーター

DC ブラシモーター :

DC モーターが回転するには、回転磁界が必要であり、直流そのままではこのような磁界は得られないので、回転磁界を作るために、直流から交流電流に変換する機械的装置（整流子とブラシ）が必要となります。DC ブラシモーターは、自身の回転により、整流子をブラシに擦りながら回転し、回転子に流れる電流を機械的に直流から交流電流に変換しています。これにより回転子の極が変わります。二極モーターでのイメージを図 1.4 に示します。

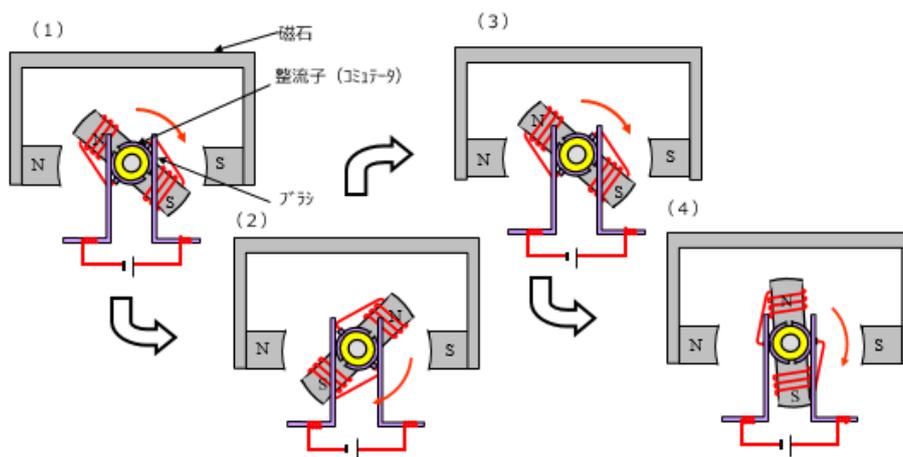
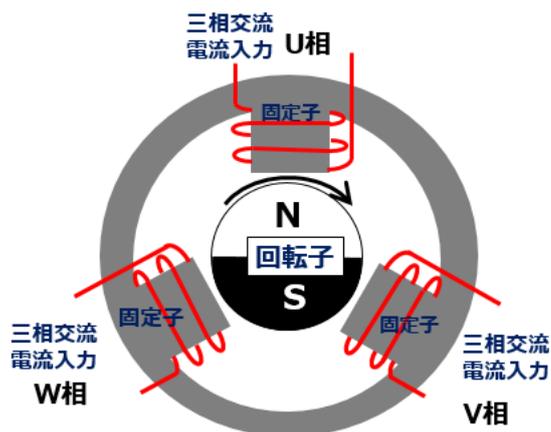


図 1.4 DC ブラシモーター（二極）

ブラシレスモーター：

永久磁石同期モーター（Permanent Magnet Synchronous Motor）です。ブラシレス DC モーター（BLDC）とも呼ばれます。ブラシレスモーターは、コイルに流す電流の向きを整流子とブラシで機械的に切り替える DC ブラシモーターとは方式が異なり、電気素子によってコイルに流す電流の向きを切り替えています。コイルに流れる電流の向きを切り替えることで、コイルから発生する磁界の方向を変え回転子（ローター）を回します。切り替えるタイミングは回転子の回転位置により外部回路で作成します。これらのコイルに流す電流の向きと大きさを制御することで、回転子の回転を制御しています。

**図 1.5 三相ブラシレスモーター**

2. 掃除機モーター制御

コード式（AC 入力）掃除機に使用されているユニバーサルモーター、コードレス式（DC 入力 / 充電式）掃除機に使用されている DC ブラシモーター、SR モーターおよびブラシレスモーターの駆動回路、動作および制御方法について説明します。

2.1. コード式（AC 入力）掃除機

2.1.1. ユニバーサルモーター使用の回路

ユニバーサルモーターへ AC 電圧を印加し、トライアックの位相制御によりモーターへの供給電力を制御し掃除機の吸引力を変えています。モーター起動時は、ターンオンする位相を遅くして（導通時間を短くする）流れる突入電流を抑えています。

2.1.2. トライアックによる位相制御

AC 電圧を直接オン・オフできるスイッチング素子（トライアック）を使用し、印加電圧の半サイクルごとのオン・オフ時間のタイミング（位相）を調整し、電圧を変化させる方法です。トライアックは、一定の電流以下になるとオフする性質があり、交流電圧のゼロクロスポイントでターンオフします。ゲートにトリガー信号が与えられるとオンになり、電流を流し、ゼロクロスポイントでオフします。図 2.1 に基本回路およびモーターに入力されるトライアックによる制御波形を示します。

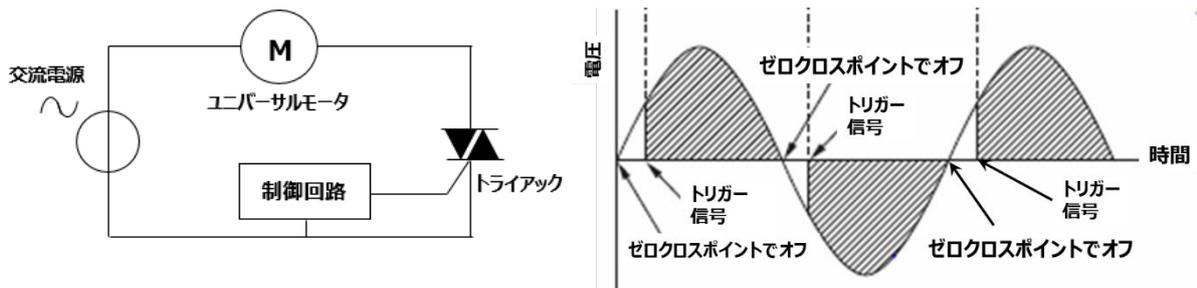


図 2.1 位相制御回路および波形

2.1.3. 掃除機トライアック位相制御回路

ユニバーサルモーター使用掃除機の実際の回路例を図 2.2 に示します。吸引用モーター以外に床ブラシにもモーターを使用するものが一般的になっています。

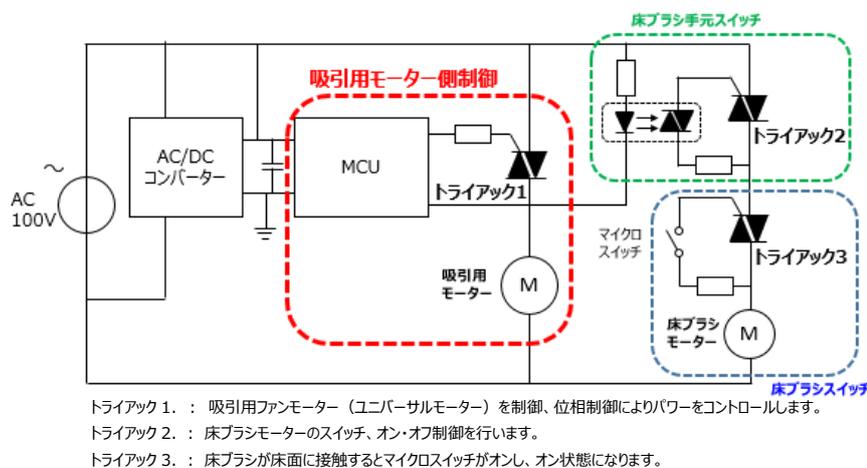


図 2.2 ユニバーサルモーター掃除機回路

2.1.4. 掃除機吸引モーター用トライアックの位相制御波形

図 2.3 に図 2.2 の回路におけるトライアック 1 の両端電圧と電流波形を示します。

1) 起動時

起動時は通常電流の 5~6 倍程度の突入電流が流れます。突入電流を抑えるために起動時は図 2.3 a) に示すように位相を絞りトライアックオン期間（導通期間）を短くすることで電流を抑えています。

2) 動作時

図 2.3 b) に動作“弱”時、c) に動作“強”時のトライアックのターンオンタイミングおよび位相角、導通期間の違いによる波形を示します。動作弱に対して動作強は導通期間を広げ多くの電力をモーターに供給しています。

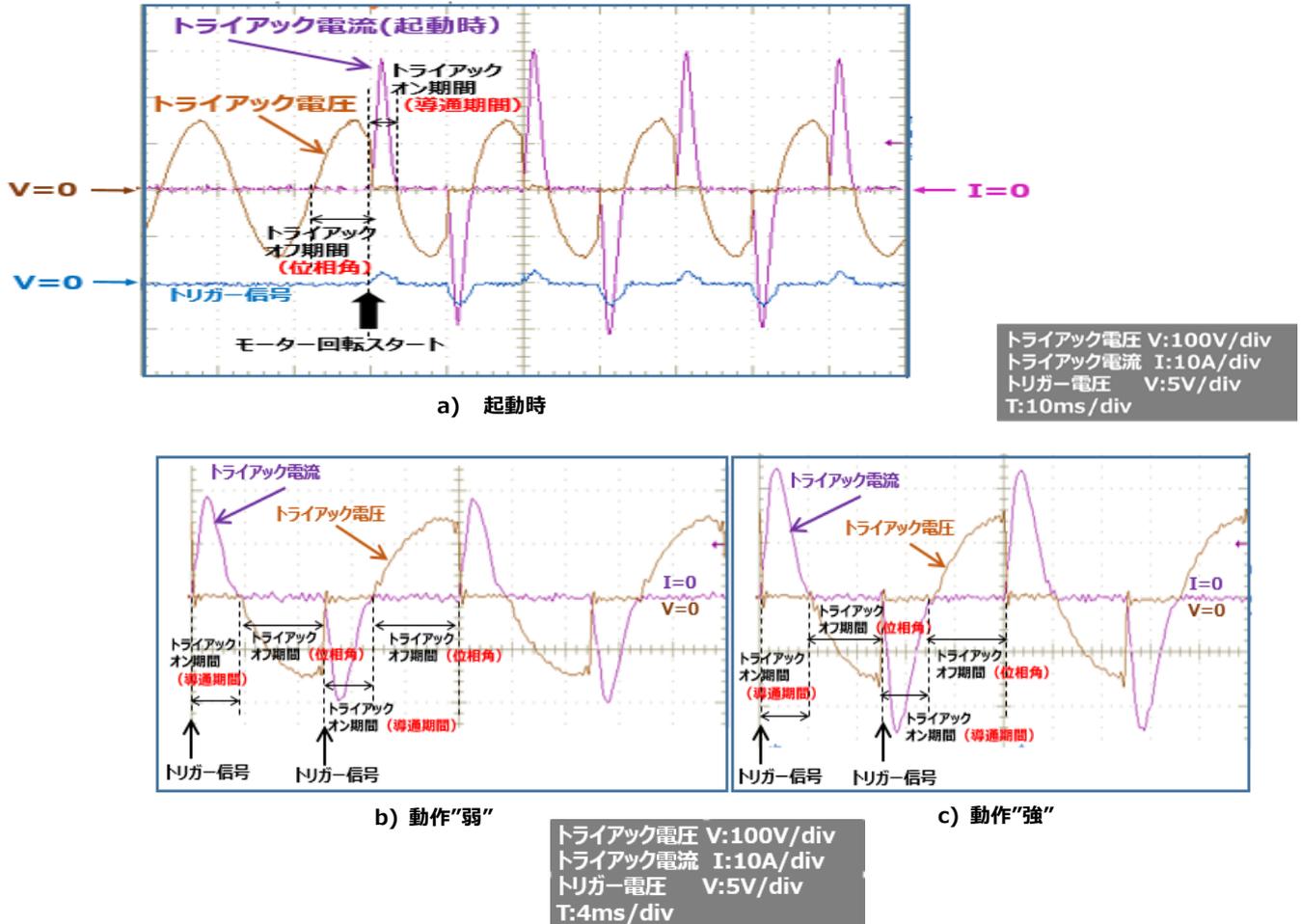


図 2.3 トライアック位相制御波形（例）

2.1.5. 掃除機用ブラシモーター駆動電圧、電流

図 2.2 に示すように床ブラシモーターは、手元スイッチのトライアック 2 と床面接触検出スイッチのトライアック 3 が直列に接続され二重のスイッチでオン・オフ制御されています。図 2.4 に床ブラシ用モーター作動時の電圧、電流波形を示します。床ブラシモーターは位相制御されておらず、そのため起動時は 5～6 倍の電流が流れています。

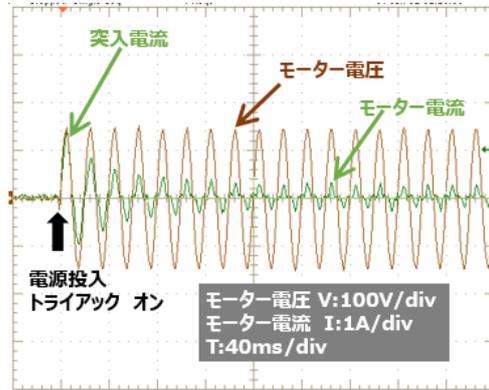


図 2.4 床ブラシ用モーター電圧、電流波形

2.1.6. トライアックカプラー駆動回路

モーター駆動用トライアックのトリガー信号は MCU から直接入力される場合以外にはトライアックカプラーが使用される場合があります。図 2.5 にトライアックカプラー使用の基本的回路例を示します。図 2.5 で R_s と C_s はトライアックのサージ電圧を吸収するためのスナバー回路でバリスターは電源ラインのサージ電圧を吸収するためのものです。

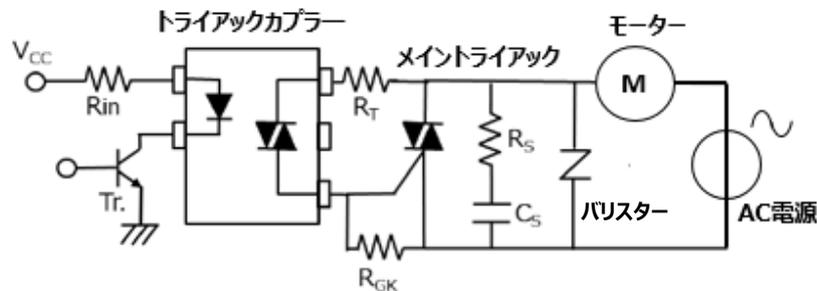


図 2.5 トライアックカプラーとメイントライアックによるモーター駆動回路例

トライアックカプラーには ZC（ゼロクロス）タイプと NZC（非ゼロクロス）タイプがあります。ZC タイプは AC 電源の電圧が高い期間ではオンしない機能を持っておりノイズを防止できますが、トライアックの位相制御をすることはできません。位相制御を行う場合は NZC タイプを、オン・オフ制御を行う場合は ZC タイプを使用（NZC タイプでも使用可）します。

以下に ZC タイプと NZC タイプの基本的動作について説明します。トライアックカプラーはメイントライアックと組み合わせて使用する場合が大半ですが、内容を分かりやすくするためにトライアックカプラー単体の回路で説明します。

ZCタイプ

図 2.6 に、ZCタイプのトライアックカプラーによる抵抗負荷の駆動回路とその動作波形を示します。
（誘導性負荷の場合、電流の位相が電圧に対して遅れます。）

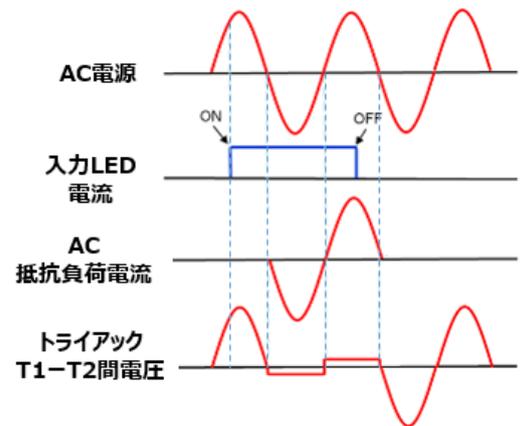
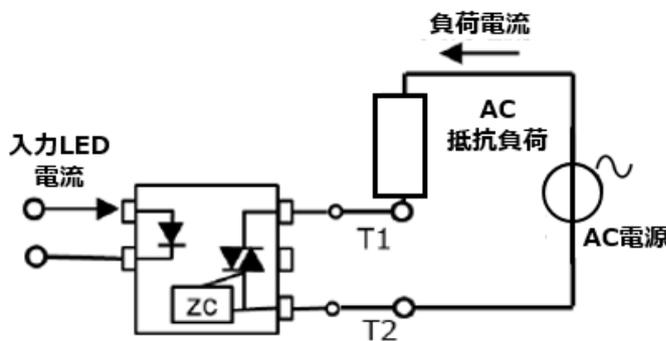


図 2.6 ZCタイプ動作

【オン動作】

入力 LED に電流が流れても AC 電源電圧がゼロクロス電圧（これをインビット電圧と呼んでいます）を超えている場合、トライアックカプラーはオンせず、AC 電源電圧がゼロクロス付近（ゼロ電圧付近）まで下がったタイミングでオンします。

【オフ動作】

入力 LED 電流が流れなくなった後、電源電圧がゼロ電圧付近まで下がると負荷電流も非常に小さく、負荷電流が保持電流以下になるとトライアックのオン状態を持続できなくなって、このタイミングでオフします。

保持電流：トライアックがオン状態を持続できる最小の電流

NZCタイプ

図 2.7 に、NZCタイプのトライアックカプラーによる抵抗負荷の駆動回路とその動作波形を示します。
（誘導性負荷の場合、電流の位相が電圧に対して遅れます。）

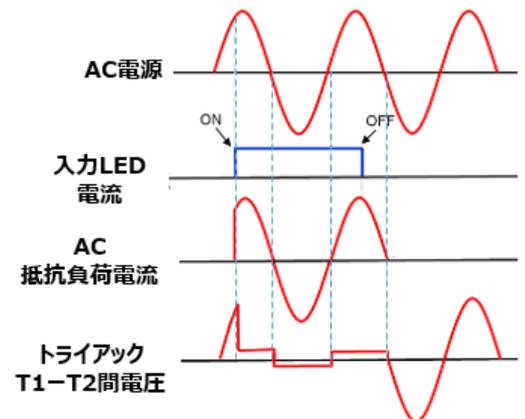
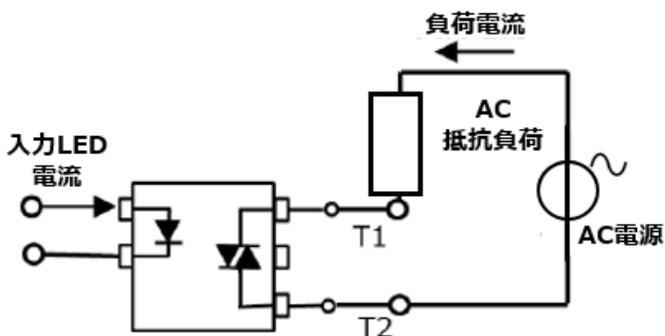


図 2.7 NZCタイプ動作

【オン動作】

入力 LED に電流が流れると同時にトライアックカプラーはオンします。

【オフ動作】

入力 LED 電流が流れなくなった後、電源電圧がゼロ電圧付近まで下がると負荷電流も非常に小さく、負荷電流が保持電流以下になるとトライアックのオン状態を持続できなくなって、このタイミングでオフします。

NZC タイプによる位相制御

図 2.8 に NZC タイプによる抵抗負荷時の位相制御波形を示します。
(誘導性負荷の場合、電流の位相が電圧に対して遅れます。)

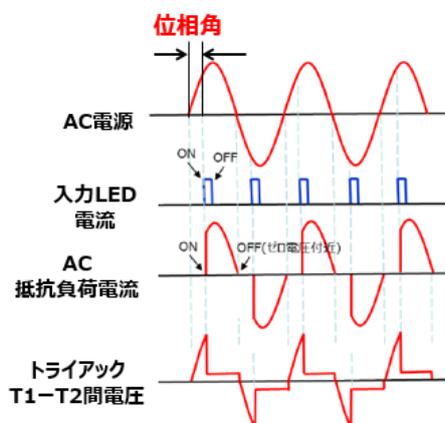


図 2.8 NZC タイプ位相制御波形

【オン/オフ動作】

入力 LED 信号に設定された位相角でオンし、電流が流れると同時にトライアックカプラーはオンします。入力 LED 信号がオフとなった場合、電源電圧がゼロ電圧付近まで下がり、通電電流が保持電流以下になるまでトライアックカプラーはオン状態を継続し、そのタイミングでオフします。AC 電源の各正弦半波の設定された位相角でトライアックカプラーの LED に信号を入力することで出力電力量が制御されます。

2.1.7. トライアックカプラーを使用するにあたって

トライアックカプラー使用にあたっては使用方法や注意事項を確認の上データシートの数値やグラフに基づき設計する必要があります。データシートに記載のある入力電流 I_F 、阻止電圧 V_{DRM} 、実効オン電流 $I_{T(RMS)}$ 、ピーク 1 サイクルサージ電流 I_{TSM} および絶縁耐圧 BV_S などの絶対最大定格範囲内で使用し、また以下のようなことにも注意してください。

- ・ZC タイプはゼロクロス電圧（インヒビット電圧） V_{IH} によってオンできる範囲が限られるため確実にオンさせるためには、LED に流す電流の大きさと時間を十分に考慮する必要があります。
- ・ZC タイプは V_{IH} を超えた電圧では LED に電流を流しても出力はオンしませんが、この期間、漏れ電流（インヒビット電流） I_{IH} が発生します。特にメイントライアック駆動用にトライアックカプラーを使用する場合、 I_{IH} 期間はトライアックカプラーの損失が増加します。またメイントライアック回路のゲート回路にこの電流をバイパスする抵抗を入れ、メイントライアックが誤動作しないようにする必要があります。
- ・入力側 LED に電流を流さない状態でトライアック出力の両端に最大定格電圧 V_{DRM} が印加された場合、トライアックカプラーの T1-T2 間に漏れ電流 I_{DRM} が流れます。 I_{DRM} は温度の上昇とともに指数関数的に上昇します。漏れ電流 I_{DRM} が増加する場合は、この電流により負荷やメイントライアックが動作する危険性があるため、この電流をバイパスするなどの対策が必要となります。
- ・NZC タイプを位相制御で使用する場合入力 LED 矩形波信号幅がトライアック素子のターンオンスイッチング時間 t_{ON} より短いとオンできなくなる可能性があるため注意が必要です。
- ・トライアックカプラーがオフ状態の時、何らかの要因で外部から急峻な立ち上がりを持つ電圧が印加されると誤動作することがあります。この耐量の限界値をオフ電圧上昇率 dv/dt として記載されており、実応用ではこの値よりも必ず低くなるように必要に応じ電圧立ち上りを抑制するスナバー回路他を挿入する必要があります。

・トライアックカブラーがオン状態で次の逆方向の AC 半サイクルでオフに転じようとするとき、印加される電圧の立ち上がり率を、転流時の dv/dt ということでも $dv/dt(c)$ といいます。この $dv/dt(c)$ を超える電圧が印加されるとトライアックカブラーは、オフからオンの誤動作をしますのでスナバー回路により立ち上がり率を抑制します。特にリアクタンス性の負荷のときは、注意が必要です。

2.2. コードレス式（DC 入力/充電式）掃除機

2.2.1. DC ブラシモーター駆動

DC ブラシモーターは、ブラシを使用してモーターの整流子に供給する電流の方向を切り替えることでモーターのローター軸に回転力を与え回転させるモーターです。制御性や効率がよく、小型化が容易なため、最も多く使われているモーターのひとつです。パワーが比較的小さいハンディータイプのセカンド、サード掃除機用として使用されています。回路としては簡単なチョッパー回路を採用しています。

2.2.2. チョッパー回路

モーターと直列にスイッチ（MOSFET）を挿入し PWM 制御でモーター入力電圧を変えてモーターの回転数やトルクをコントロールしています。図 2.9 に代表的な回路例を示します。なお、DC ブラシモーターに並列に接続されたダイオードは MOSFET がオンからオフへ移行した際のモーターの逆起電力を環流する役目を担っています。ダイオードがない場合、MOSFET オフ直後のモーターの逆起電力がバッテリー電圧に重畳され MOSFET のドレイン・ソース間に過大な電圧が印加されます。このダイオードによる環流動作は、モーターの両端をダイオードの順電圧降下 V_F で短絡することになりますので、モーターはショートブレーキ動作となります。

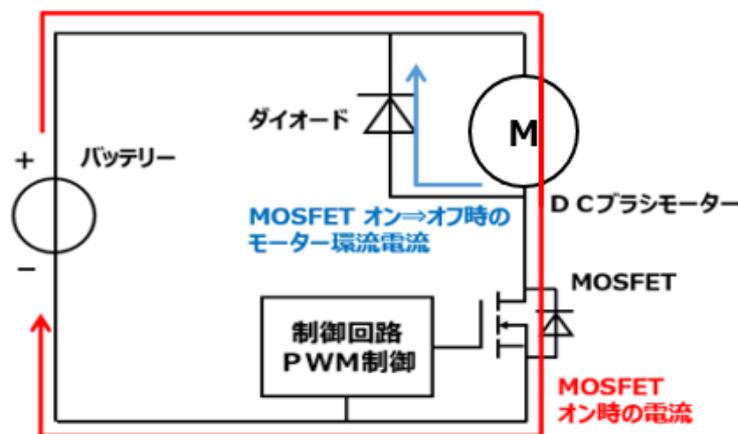


図 2.9 DC ブラシレスモーター制御の基本回路

2.2.3. SR モーター駆動

基本的な SR モーターの回路を図 2.10 に示します。動作としては、フェーズごとに 2 つのスイッチをオンにすると相巻き線に電流（図の赤色の線）が流れます。電流が高くなり過ぎるとスイッチをオフします。モーターの相巻き線に蓄積されたエネルギーがなくなるまでダイオードを通して相巻き線には同じ方向に電流（図の青色の線）は流れます。このパターンで各相を順次動作させることでモーターを駆動させます。各相は独立して制御されます。SR モーターの回転子は強磁性の鉄芯のみで構成され鉄芯は、磁石と異なり、磁界の極性に関係なく引き付けられますから、外部に、回転磁界を作る巻線の電流極性（±）には、無関係に動作します。

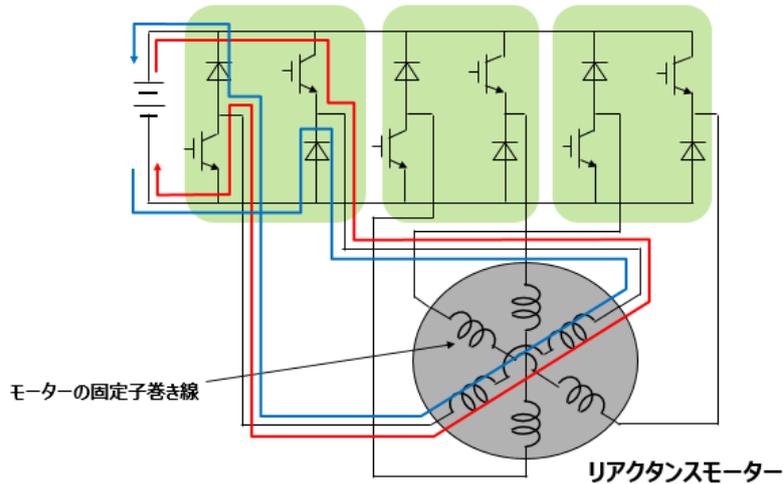


図 2.10 SR モーター制御の基本回路図

実際のコードレス掃除機に使用されていた回路と同等の回路（図 2.11）で、その動作および波形について説明します。

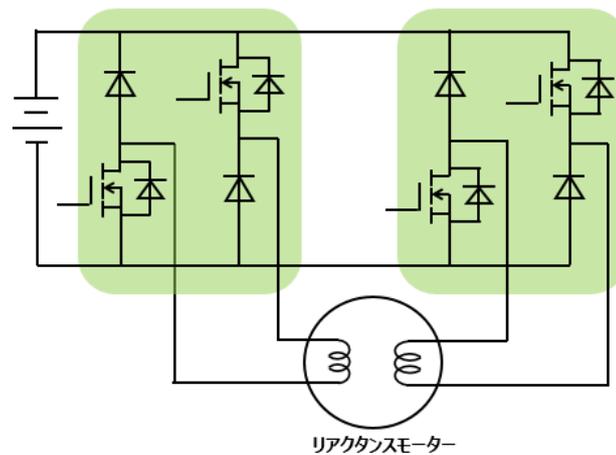


図 2.11 SR モーター駆動回路

図 2.12 および 2.13 に各相の動作および巻き線電流波形を示しています。

A 相に関して

期間(a) : スwitching素子 SW_1 と SW_2 の両方を ON することでモーター A 相巻き線に電流が流れます。

期間(b) : スwitching素子 SW_1 および SW_2 を OFF することで巻線に蓄積されていたエネルギーが D_1 、 D_2 を通して電源に回生され、電流は 0 になります。

期間(c)(d)を含む他の期間は SW_1 および SW_2 は OFF で巻線に蓄積エネルギーもない状態のため相巻き線に電流は流れません。

B 相に関して

期間(c) : スwitching素子 SW₃とSW₄の両方を ON することでモーターA 相巻線に電流が流れます。

期間(d) : スwitching素子 SW₃およびSW₄を OFF することで巻線に蓄積されていたエネルギーが D₃、D₄を通して電源に回生され、電流は 0 になります。

期間(a)(b)を含む他の期間は SW₃およびSW₄は OFF で巻線に蓄積エネルギーもない状態のため相巻線に電流は流れません。

このような電圧印加パターンによって、各相の電流を順次独立に制御しています。

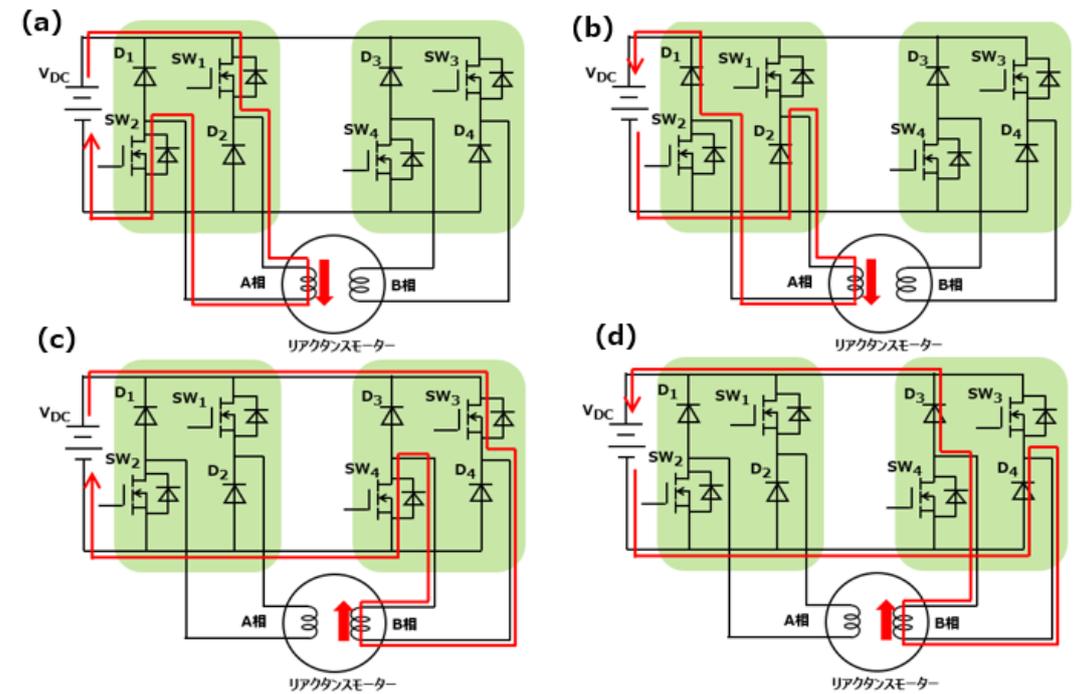


図 2.12 SR モーター駆動回路動作

図 2.12 の回路動作でのモーター相電流を図 2.13 に示します。

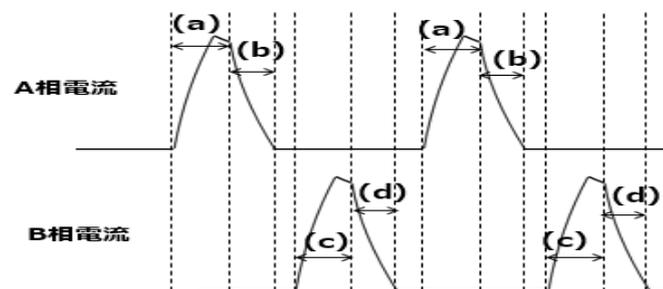


図 2.13 SR モーター相電流イメージ

2.2.4. ブラシレスモーター駆動

ブラシレスモーターは、ユニバーサルモーターにあるブラシと整流子（コミュテーター）の機械的接点による電流の切り替えを行うのではなく、パワー素子で構成されたインバーター回路で行っています。ブラシレスモーターは機械的接点をなくすことでブラシの摩耗や電気ノイズがなく、DC ブラシモーターの利点（小型、速度や位置決め制御が容易）を備えたモーターです。

掃除機に採用されているブラシレスモーターは大きく分けて 3 相タイプと単相タイプがあり、より高速回転のモデルは一般に単相ブラシレスモーターを採用しています。

2.2.5. 3 相ブラシレスモーター駆動

図 2.14 にブラシレスモーター駆動の基本回路図を示します。モーターを回転させるための電流信号はモーター内部のホール IC（磁気センサー）によって検出したローター位置をもとにインバーター回路で作成されます。

ブラシレスモーター制御は 2 相および 3 相変調の正弦波駆動（180°通電）や矩形波駆動（120°通電）などがあります。ここでは正弦波駆動の 3 相変調方式を例として紹介します。

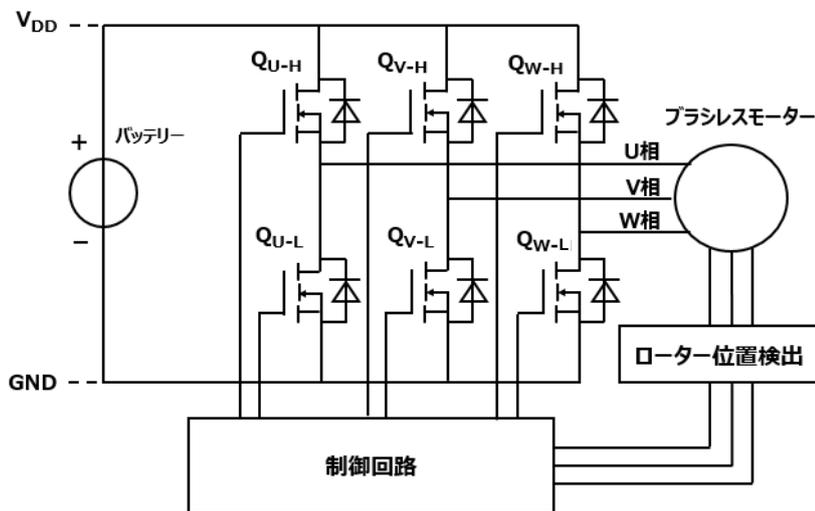


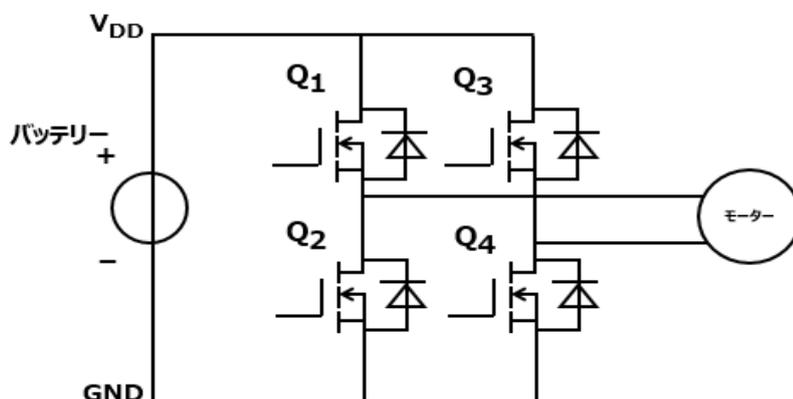
図 2.14 3 相ブラシレスモーター駆動回路

この制御法は、3 相ブリッジ回路（インバーター回路）の 6 個のスイッチング素子をオン/オフさせることでモーターに 3 相交流波形を供給しています。図 2.15 に正弦波駆動のインバーター回路における 6 個のスイッチング素子の通電タイミング（通電期間中の素子は、オン・オフを繰り返す PWM 制御を行っています。）と各相の平均電圧波形を示しています。このスイッチング方式では、常に 3 個の素子が同時に通電（同一相の上下素子が同時にオンすることはない。）しています。

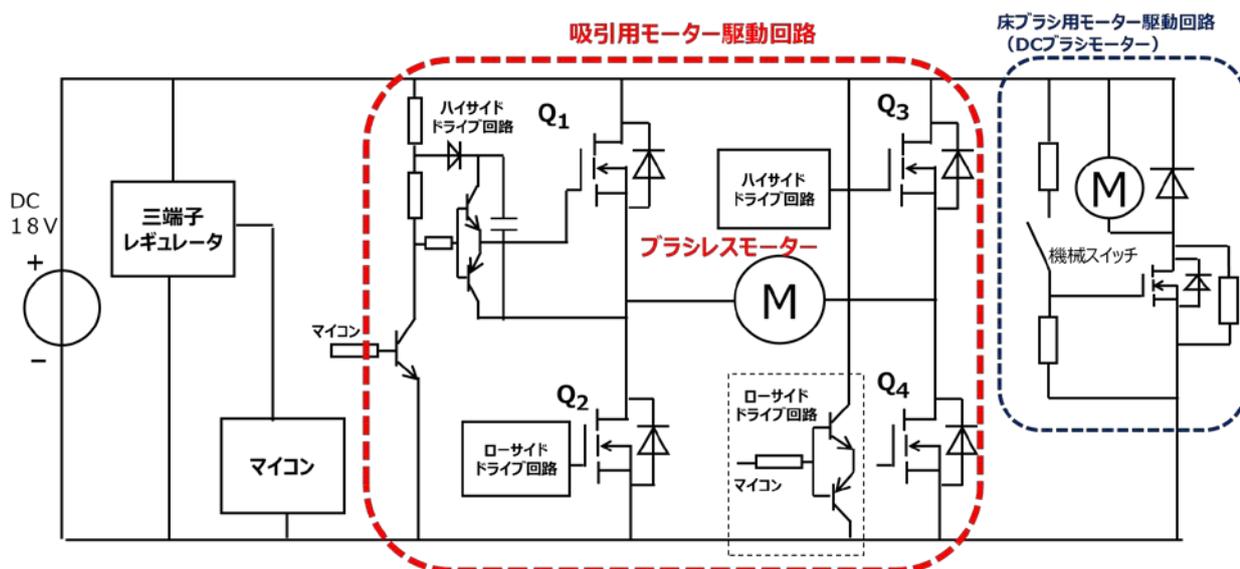
図 2.16 に正弦波駆動のインバーター回路における 6 個のスイッチング素子の動作とモーター電流経路を示します。

2.2.6. 単相ブラシレスモーター駆動

図 2.17(a)に単相ブラシレスモーターの基本駆動回路、(b)に実際の掃除機の回路を示します。単相ブラシレスモーターの採用はモーターの高速回転を目的としています。掃除機ブラシ部には DC ブラシモーターが採用されています。DC ブラシモーター詳細説明は省略します。



(a)基本駆動回路



(b) 単相ブラシレスモーター採用掃除機回路

図 2.17 単相ブラシレスモーター駆動回路例

単相ブラシレスモーターの制御例を説明します。3相ブラシレスモーター制御ではインバーター回路からモーターへの交流入力
は PWM 制御による正弦波となりますが、掃除機の単相ブラシレスモーターでは矩形波で交流入力を作り、矩形波のデューテ
ィーを変えることで出力を制御しています。図 2.18 に図 2.17 の回路における各 MOSFET のゲート入力信号を示します。H
ブリッジの上素子（ Q_1 、 Q_3 ）の入力信号のパルス幅でモーターへの供給電力を制御しています。下素子（ Q_2 、 Q_4 ）の信号
は上素子の反転信号が入力されています。

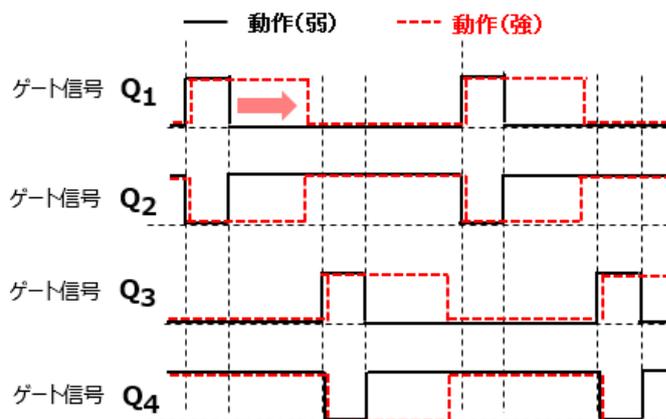
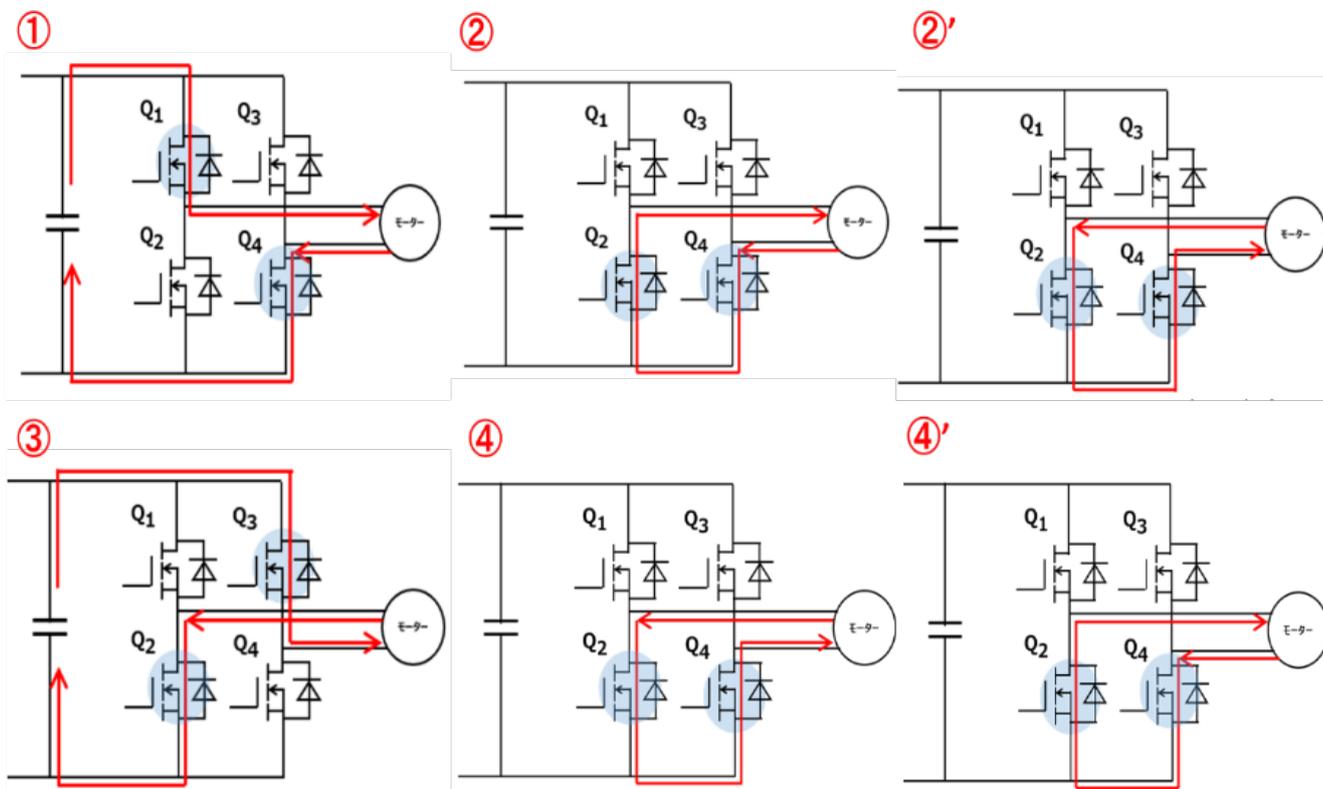
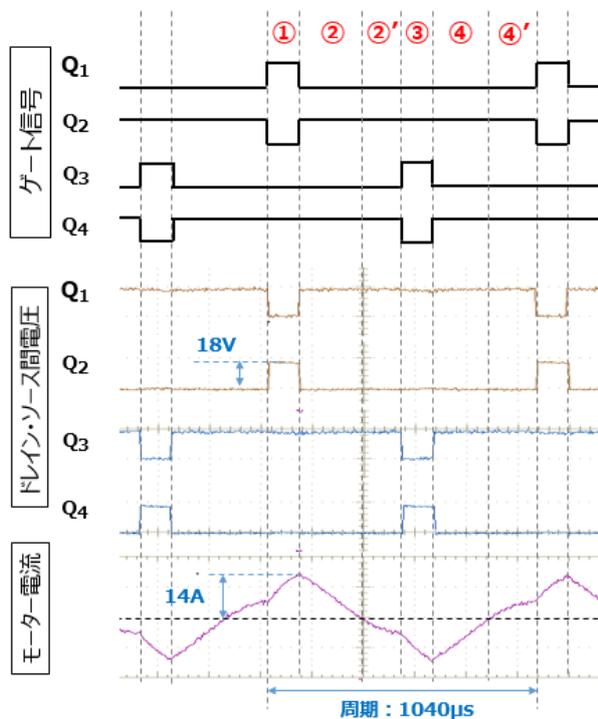
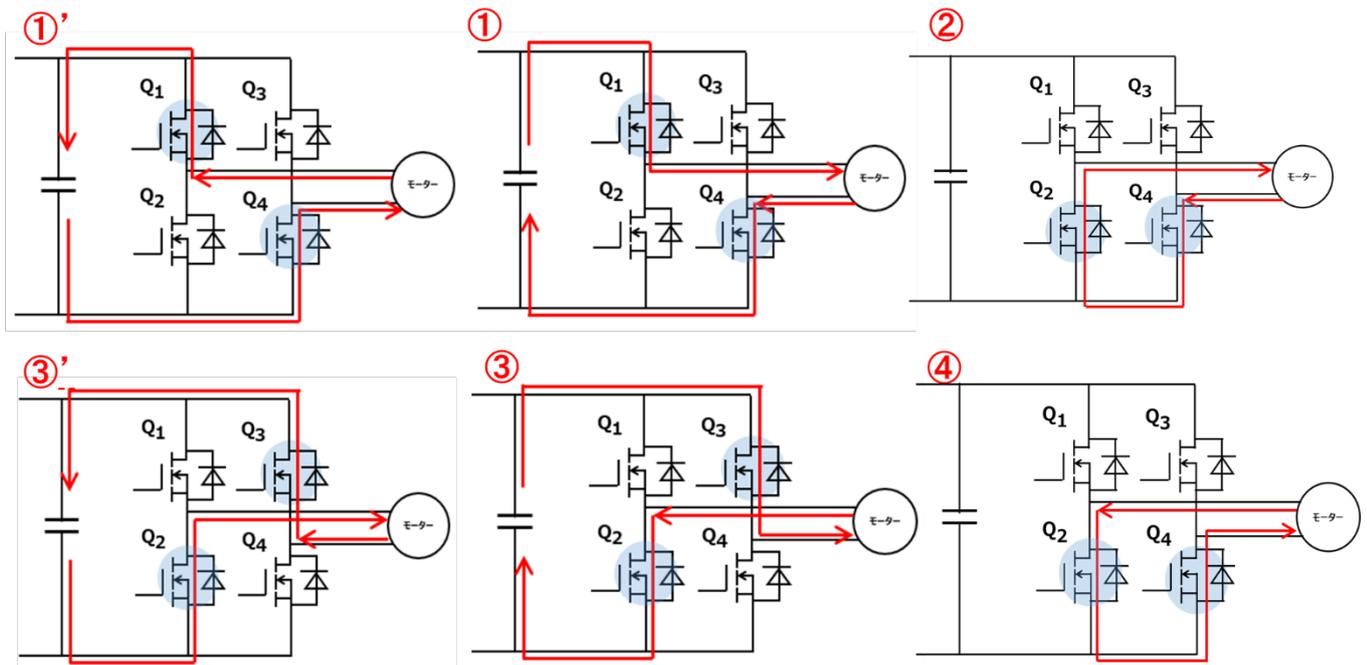
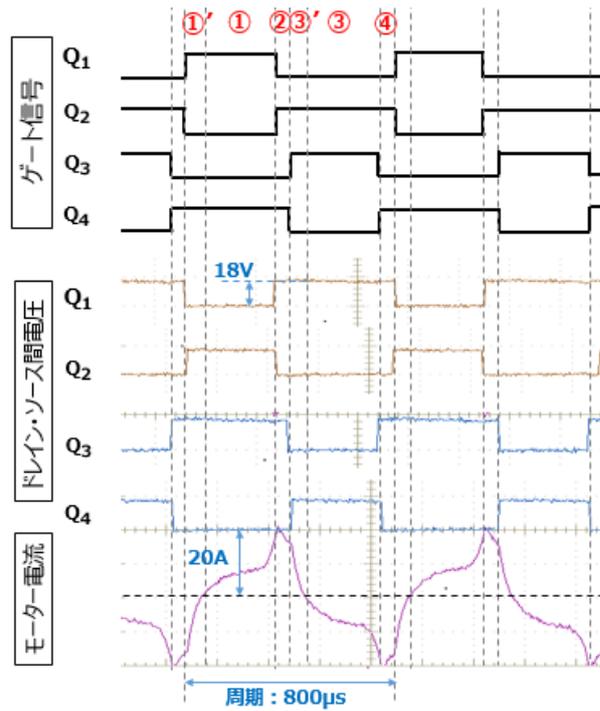


図 2.18 単相ブラシレスモーター駆動回路入力信号

図 2.19(a)に動作“弱”時、図 2.19(b)に動作“強”時の MOSFET スwitching 信号、MOSFET のドレイン・ソース間電圧およびモーターへの電流波形を示します。また各 MOSFET へのゲート信号電圧タイミングでの回路動作および電流の経路を示します。



(a) 動作“弱”時の基本回路動作と波形



(b) 動作“強”時の基本回路動作と波形

図 2.19 単相ブラシレスモーター駆動入力信号および回路動作

参考にした掃除機の単相ブラシレスモーターは2極モーターです。電流波形の一周期にモーターは1回転します。1周期の時間から素子のスイッチングの周波数を計算すると0.96~1.3kHzになっていました。計算するとモーターの回転数は5.7~7.5万回転になります。要求されるMOSFETは3相ブラシレスモーターのPWM制御(20kHz程度)に対して今回の単相ブラシレスモーターにおいて矩形波制御のスイッチング周波数は1/20程度となり、スイッチング損失よりも導通損失の占める割合が大きくなることとなります。このことから導通損失の優れた素子が回路には要求されます。また図2.19に示した動作から分かるように上下素子が同等の動作をしているわけではなく、上下素子で損失の違いが生じています。

2.3. コードレス式（DC 入力/充電式）インバーター回路の MOSFET について

2.3.1. MOSFET の耐圧選択（低耐圧 MOSFET）

MOSFET の選択で最も重要な項目のひとつにドレイン・ソース間耐圧 V_{DS} があります。MOSFET は定格以上の電圧が加わるとブレイクダウン領域に入り、素子内部を流れるリーク電流が増大し MOSFET が故障する危険性があります。インバーター応用の場合、MOSFET のスイッチング損失を少なくするために高速スイッチングを行います。その際、MOSFET のターンオフ時に印加バス電圧以上のサージ的な電圧が発生しますので、スイッチング損失とこのサージ電圧とのバランスをうまく取ることが重要です。MOSFET のターンオフ時にはサージ電圧が発生するのでバッテリー電圧に対して余裕を持つだけでなく、サージ電圧を考慮して V_{DS} を選択する必要があります。一方、耐圧の高い素子を選択しますと、その分オン抵抗が大きくなってしまいます。低耐圧素子を選択するために、サージ電圧を MOSFET のアバランシェ動作で吸収させる場合が見受けられますが、アバランシェ動作は MOSFET に過大な負担をかけますので、アバランシェ電流やアバランシェエネルギーに対する耐量を考慮することが必要です。また、オフ時のサージ電圧抑制機能（ドレイン・ソース間スナバー機能）を持つ U-MOSVIII、U-MOSIX、U-MOSX の選択も効果的です。

2.3.2. インバーターPWM 制御（正弦波駆動）と同期整流環流動作

PWM(Pulse Width Modulation)は、パワー素子のオンとオフの繰り返しスイッチングを行い、出力される電力を制御する方法です。一定電圧の入力から、パルス列のオンとオフの一定周期を作り、オンの時間幅を変化させ電力制御をしています。オンのパルス幅に比例した任意の電圧が得られます。

具体例として図 2.14 の回路における U 相の上下素子の入力信号（同期整流）および出力電圧を図 2.20 に示します。PWM の制御信号は基準となる正弦波と三角波の交点を素子のターンオン/オフのポイントとして作成されます。（三角波と基準正弦波の大小関係でオン/オフ信号を作成しています。）

図 2.20 で U 相の上素子 (Q_{U-H}) が PWM 動作でスイッチングしているとき、オフ期間に負荷電流は環流モードとなり、通常は下素子 (Q_{U-L}) のボディダイオードを通して流れます。この Q_{U-L} の環流動作タイミングで上素子 (Q_{U-H}) の PWM 動作信号の反転信号により下素子 (Q_{U-L}) をオンさせる場合があります。この場合、環流電流は、ボディダイオードではなく低いオン電圧の MOSFET に流れ、MOSFET の導通損失低減に有効な手段となっています。下素子 (Q_{U-L}) が PWM スwitching している場合は、上素子 (Q_{U-H}) を同様な動作を行います。

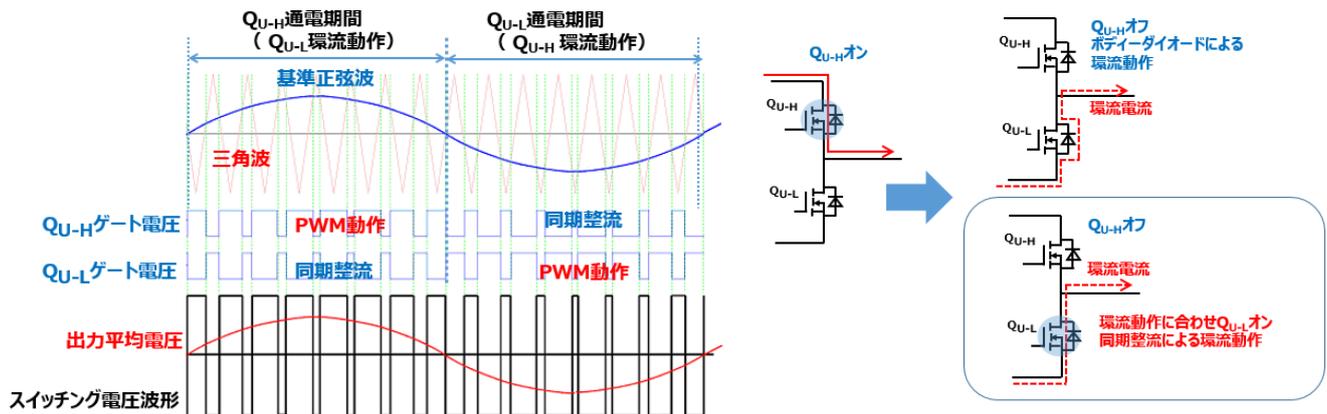


図 2.20 PWM 制御と環流時の同期整流

2.3.3. インバーター回路におけるデッドタイムの設定

インバーター回路で上下素子のオン/オフの切り替えタイミングにデッドタイムを設定する必要があります。デッドタイムがないと上下素子のスイッチング切り替えのタイミングで上下素子に同時オンの状態が発生し電源に対して上下素子が短絡状態になり非常に大きな電流が流れます。デッドタイムは素子のターンオン時間とターンオフ時間の差を基準に上下素子が同時にオンしないような時間を設定する必要があります。またターンオン、オフ時間はドライブ条件を考慮する必要があります。

2.3.4. インバーター回路における MOSFET 損失

MOSFET はオン時には抵抗と見なすことができます。よって MOSFET の導通損失は $I_D^2 \times R_{DS(ON)}$ によって求められます。インバーター回路で PWM 制御をしている場合の MOSFET の損失の概算は MOSFET の導通期間の損失と環流期間のボディダイオード損失（同期整流時は MOSFET の導通損失）に MOSFET のスイッチング損失（ターンオン損失 + ターンオフ損失）×スイッチング周波数）を合わせたものになります。正確にはダイオードの逆回復時の損失も考慮する必要があります。MOSFET の実使用条件での損失が許容損失より小さくなるような製品を選択する必要があります。

2.3.5. コードレス掃除機のバッテリー電圧と MOSFET

コードレス式掃除機のバッテリー電圧は 7.2V からありますが、ブラシレスモーター使用のコードレス式掃除機のバッテリー電圧は 18.0V～28.8V を中心に使用されています。ブラシレスモーターには単相タイプと三相タイプがあり単相タイプはより高速回転用に使用されています。ブラシレスモーターの回転数はブラシレスモーターに入力される各相の電圧、電流の周波数とモーターの極数で決まります。2 極のモーターであればモーターの回転数は入力周波数×60（rpm）となります。

単相ブラシレスモーターは、矩形波を入力しそのデューティーを変えることで出力を制御しスイッチング周波数はおおむね 1kHz 前後となっています。3 相ブラシレスモーターは、20～30kHz の PWM により正弦波駆動する制御が一般的です。

したがって、前者で使用される MOSFET の損失は、導通損失が大部分を占め低オン抵抗製品が必要とされますが、後者は同時にスイッチング性能も加味して製品選択を行う必要があります。同出力の単相と 3 相モーターで考えると 1 素子あたりの負担は単相の方が大きくなります。

使用スイッチング素子は掃除機の出カパワーによりますが、実際のコードレス式掃除機で使用されているバッテリー電圧に対する推奨できる素子の耐圧、オン抵抗および製品パッケージのイメージを図 2.21 に示します。

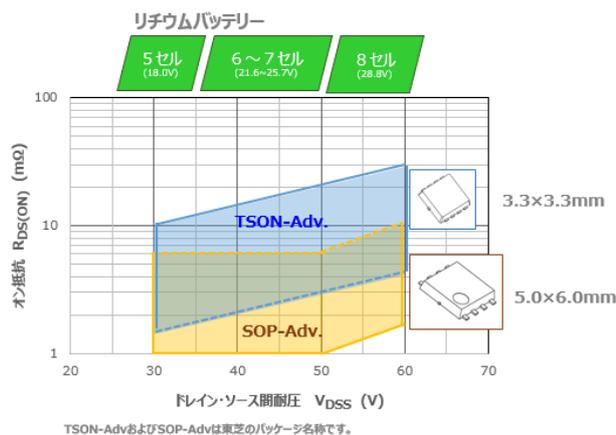


図 2.21 バッテリー電圧に対する推奨パワー MOSFET の耐圧、 $R_{DS(ON)}$ およびパッケージのイメージ

(注) 上図 2.21 は 2020 年 6 月の東芝パワー MOSFET のラインアップをもとに作られているため、それ以降の状況と異なっていることがあります。具体的な製品名および詳細な特性は東芝半導体ホームページで検索していただくか営業担当・ビジネスパートナーまでお問い合わせください。

製品取り扱い上のお願い

株式会社東芝およびその子会社ならびに関係会社を以下「当社」といいます。

本資料に掲載されているハードウェア、ソフトウェアおよびシステムを以下「本製品」といいます。

- 本製品に関する情報等、本資料の掲載内容は、技術の進歩などにより予告なしに変更されることがあります。
- 文書による当社の事前の承諾なしに本資料の転載複製を禁じます。また、文書による当社の事前の承諾を得て本資料を転載複製する場合でも、記載内容に一切変更を加えたり、削除したりしないでください。
- 当社は品質、信頼性の向上に努めていますが、半導体・ストレージ製品は一般に誤作動または故障する場合があります。本製品をご使用頂く場合は、本製品の誤作動や故障により生命・身体・財産が侵害されることのないように、お客様の責任において、お客様のハードウェア・ソフトウェア・システムに必要な安全設計を行うことをお願いします。なお、設計および使用に際しては、本製品に関する最新の情報（本資料、仕様書、データシート、アプリケーションノート、半導体信頼性ハンドブックなど）および本製品が使用される機器の取扱説明書、操作説明書などをご確認の上、これに従ってください。また、上記資料などに記載の製品データ、図、表などに示す技術的な内容、プログラム、アルゴリズムその他応用回路例などの情報を使用する場合は、お客様の製品単独およびシステム全体で十分に評価し、お客様の責任において適用可否を判断してください。
- 本製品は、特別に高い品質・信頼性が要求され、またはその故障や誤作動が生命・身体に危害を及ぼす恐れ、膨大な財産損害を引き起こす恐れ、もしくは社会に深刻な影響を及ぼす恐れのある機器（以下“特定用途”という）に使用されることは意図されていませんし、保証もされていません。特定用途には原子力関連機器、航空・宇宙機器、医療機器（ヘルスケア除く）、車載・輸送機器、列車・船舶機器、交通信号機器、燃焼・爆発制御機器、各種安全関連機器、昇降機器、発電関連機器などが含まれますが、本資料に個別に記載する用途は除きます。特定用途に使用された場合には、当社は一切の責任を負いません。なお、詳細は当社営業窓口まで、または当社 Web サイトのお問い合わせフォームからお問い合わせください。
- 本製品を分解、解析、リバースエンジニアリング、改造、改変、翻案、複製等しないでください。
- 本製品を、国内外の法令、規則及び命令により、製造、使用、販売を禁止されている製品に使用することはできません。
- 本資料に掲載してある技術情報は、製品の代表的動作・応用を説明するためのもので、その使用に際して当社及び第三者の知的財産権その他の権利に対する保証または実施権の許諾を行うものではありません。
- 別途、書面による契約またはお客様と当社が合意した仕様書がない限り、当社は、本製品および技術情報に関して、明示的にも黙示的にも一切の保証（機能動作の保証、商品性の保証、特定目的への合致の保証、情報の正確性の保証、第三者の権利の非侵害保証を含むがこれに限らない。）をしておりません。
- 本製品、または本資料に掲載されている技術情報を、大量破壊兵器の開発等の目的、軍事利用の目的、あるいはその他軍事用途の目的で使用しないでください。また、輸出に際しては、「外国為替及び外国貿易法」、「米国輸出管理規則」等、適用ある輸出関連法令を遵守し、それらの定めるところにより必要な手続を行ってください。
- 本製品の RoHS 適合性など、詳細につきましては製品個別に必ず当社営業窓口までお問い合わせください。本製品のご使用に際しては、特定の物質の含有・使用を規制する RoHS 指令等、適用ある環境関連法令を十分調査の上、かかる法令に適合するようご使用ください。お客様がかかる法令を遵守しないことにより生じた損害に関して、当社は一切の責任を負いかねます。

東芝デバイス&ストレージ株式会社

<https://toshiba.semicon-storage.com/jp/>