

永久磁石同期モータの 120 度通電制御 アルゴリズム編

R01AN2657JJ0120
Rev.1.20
2016.10.7

要旨

本アプリケーションノートでは、弊社製マイクロコントローラのサンプルプログラムで使用する永久磁石同期モータの 120 度通電制御について説明します。

動作確認デバイス

—

目次

1. 概説	2
2. 120 度通電制御	2
3. 120 度通電制御における位置・速度算出	3

1. 概説

本アプリケーションノートでは、弊社製マイクロコントローラのサンプルプログラムで使用する永久磁石同期モータ（以降、PMSM）の 120 度通電制御について説明します。

2. 120 度通電制御

図 2-1 のように 60 度毎に通電パターンを変化させると、コイル磁束と回転子の永久磁石との間にトルクが生じ、コイル磁束に同期して回転子が回転します。このとき各スイッチング素子の通電期間が 120 度である事から、120 度通電制御と呼ばれています。

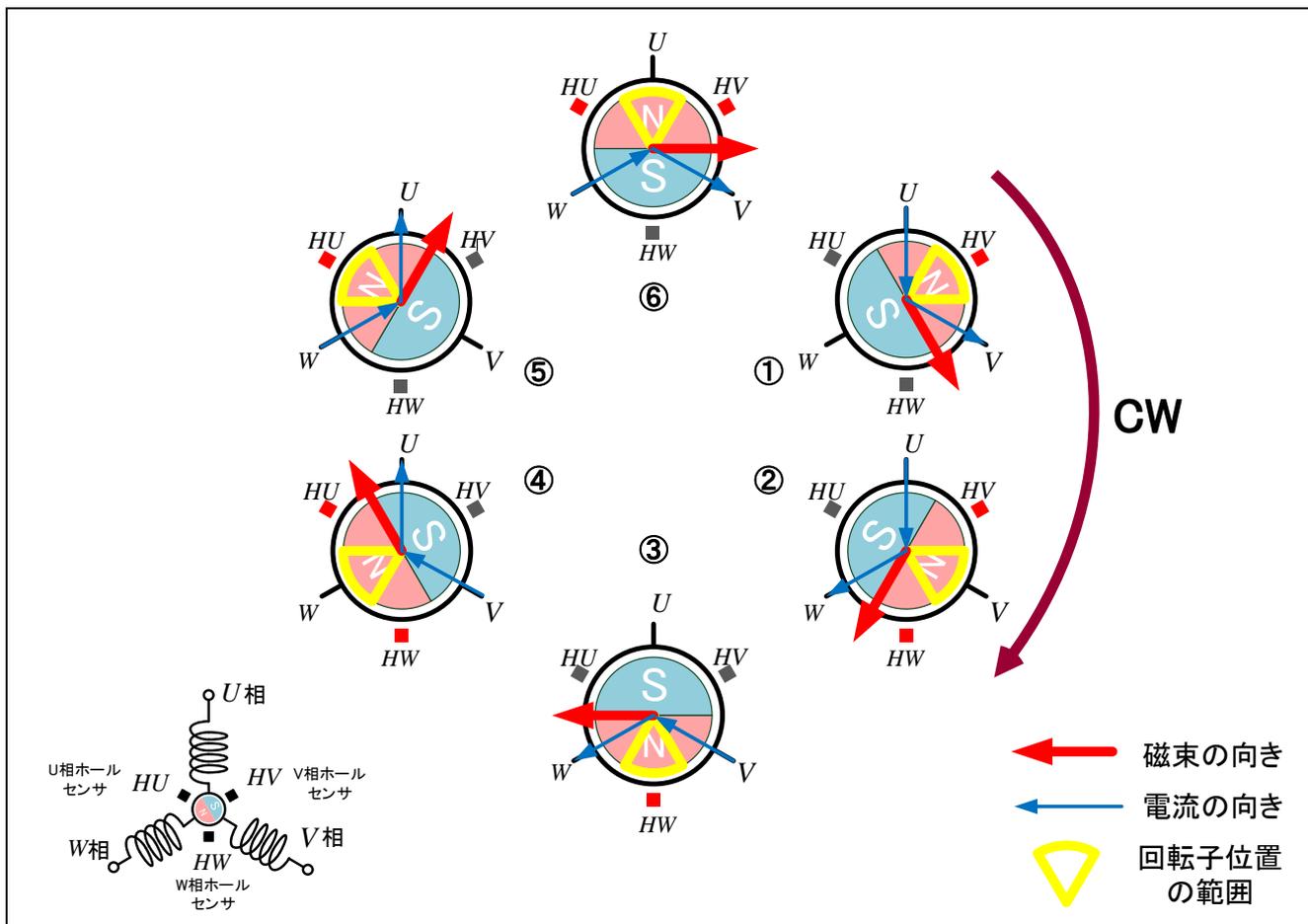


図 2-1 6つの通電パターンと回転子位置範囲例

3. 120 度通電制御における位置・速度算出

3.1 ホールセンサ利用 120 度通電制御

3.1.1 位置検出

ホールセンサを利用した永久磁石位置の位置検出では、ホールセンサ信号を位置情報としてマイコンに入力します。

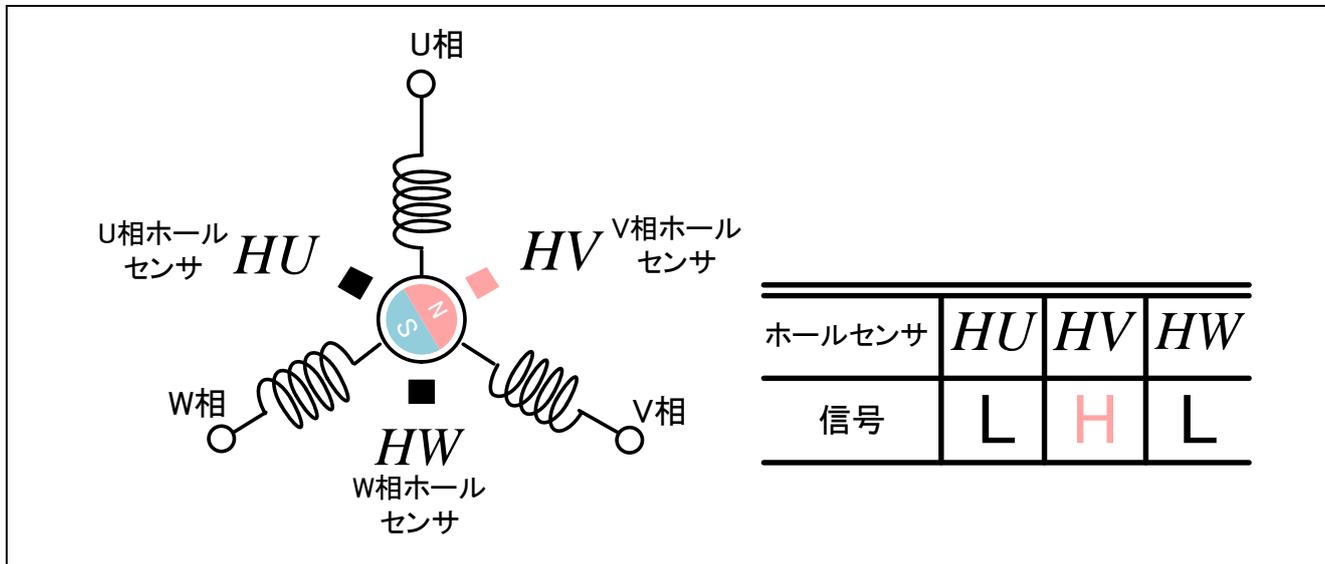


図 3-1 ホールセンサ(HU、HV、HW)の位置と位置信号の例

図 3-1 ではホールセンサは 120 度毎に配置され、それぞれのホールセンサ信号は永久磁石の磁極の変化により切り替わります。この 3 つのホールセンサ信号を組み合わせることで 60 度毎(1 周につき 6 パターン)に位置情報を得ることが出来ます。そのホールセンサ信号の切り替えタイミングで図 3-2 のように各相の通電パターンを変化させます。

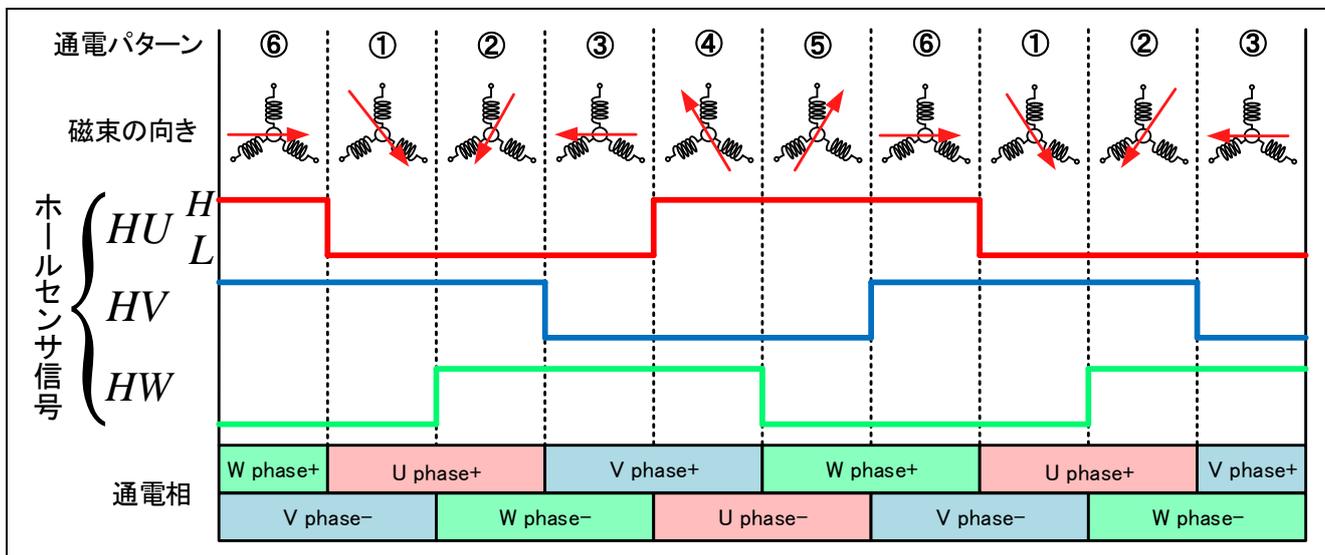


図 3-2 ホールセンサ信号と通電パターンの関係例(回転方向 : CW)

3.1.2 速度演算

モータ回転速度は、マイコン周辺機能のタイマをフリーランニングさせ、ホールセンサ信号による外部割り込みルーチンでタイマ値を取り込み、 2π [rad]前の取り込み値との差分から演算することで求めます。この演算手法を用いると、ホールセンサ取り付け位置が不均一な場合でもその影響を受けずに回転速度を演算することができます。

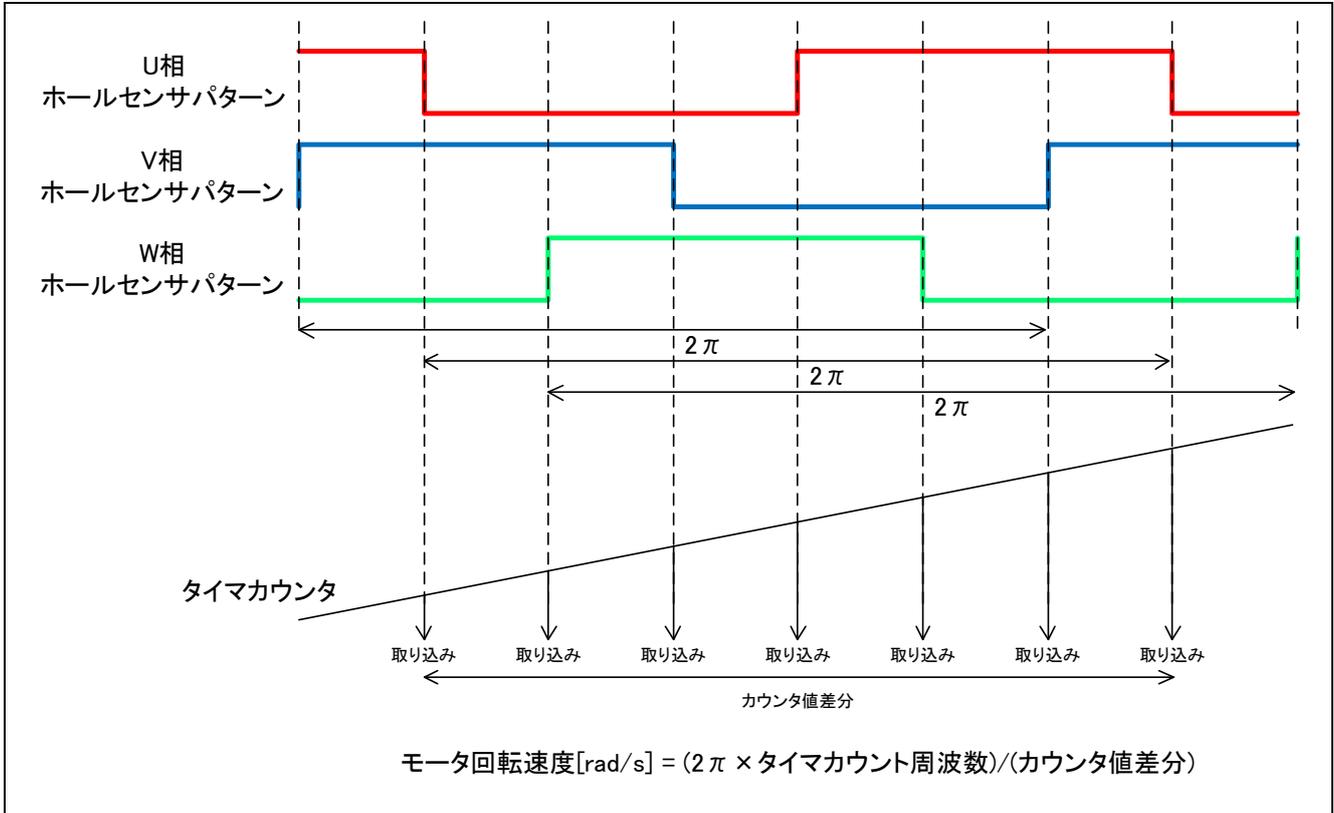


図 3-3 モータ回転速度の演算方法

3.2 センサレス 120 度通電制御

3.2.1 位置推定

センサレス制御では永久磁石位置を知るためのセンサがありませんので、センサに変わって位置情報を得る手段が必要になります。永久磁石同期モータのセンサレス制御では、誘起電圧を検出することで位置を推定することが一般的です。

誘起電圧とは、コイル内を貫く磁束が変化する場合、その変化を妨げるようにその割合に比例してコイルに発生する電圧のことを言います。

例えば、図 3-4 のようにコイルに磁石を近づけた場合を考えます。この場合、コイルを貫く磁束は増加するので、コイルは磁束の増加を妨げるために図の方向に電流を流す起電力を発生させます。（右ねじの法則により、磁石の磁束と逆向きの磁束が発生します）

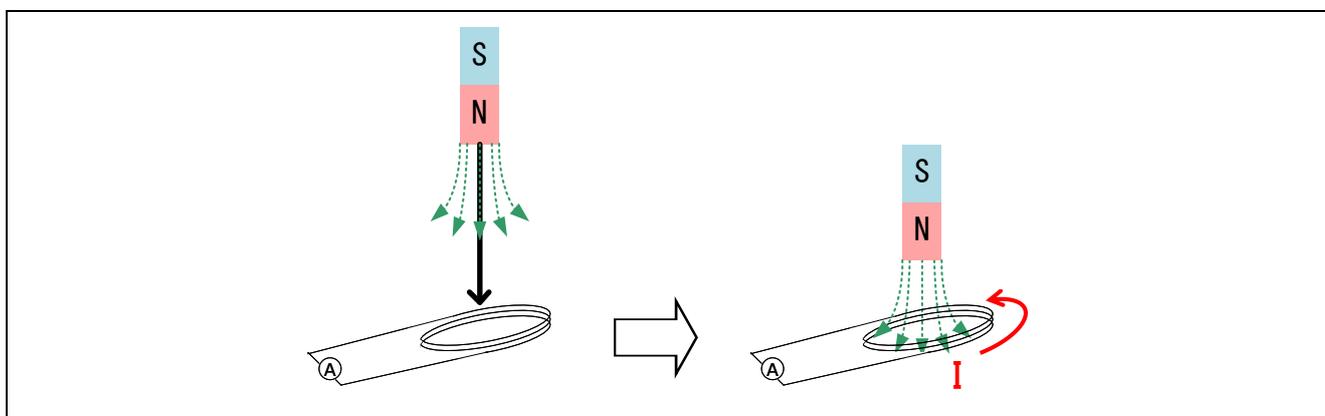


図 3-4 コイルと磁石による誘起電圧

この誘起電圧 E_m は、磁石の磁束を ϕ_m として以下の式で表すことが出来ます。

$$E_m = \frac{d}{dt} \phi_m \dots (1)$$

この現象は回転している永久磁石同期モータでも発生します。永久磁石が回転している場合、各相の鎖交磁束が常に変化することで、誘起電圧が発生しています。

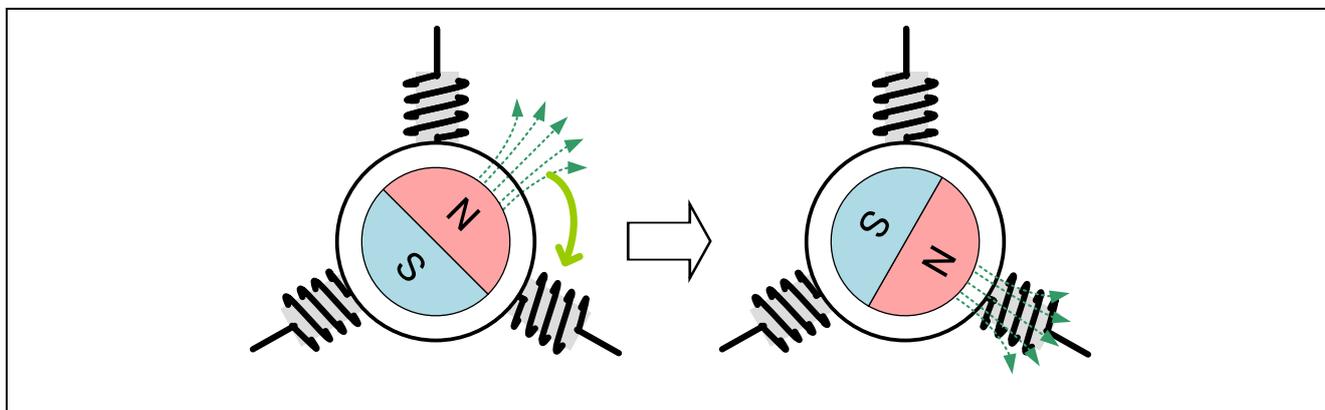


図 3-5 回転する永久磁石同期モータにおける誘起電圧

図 3-6 は、U 相における鎖交磁束の変化を表したもので、縦軸に鎖交磁束の大きさ、横軸に永久磁石の位相を表しています。また、永久磁石の N 極が U 相のコイルを向いている位置を $\theta = 0$ としています。

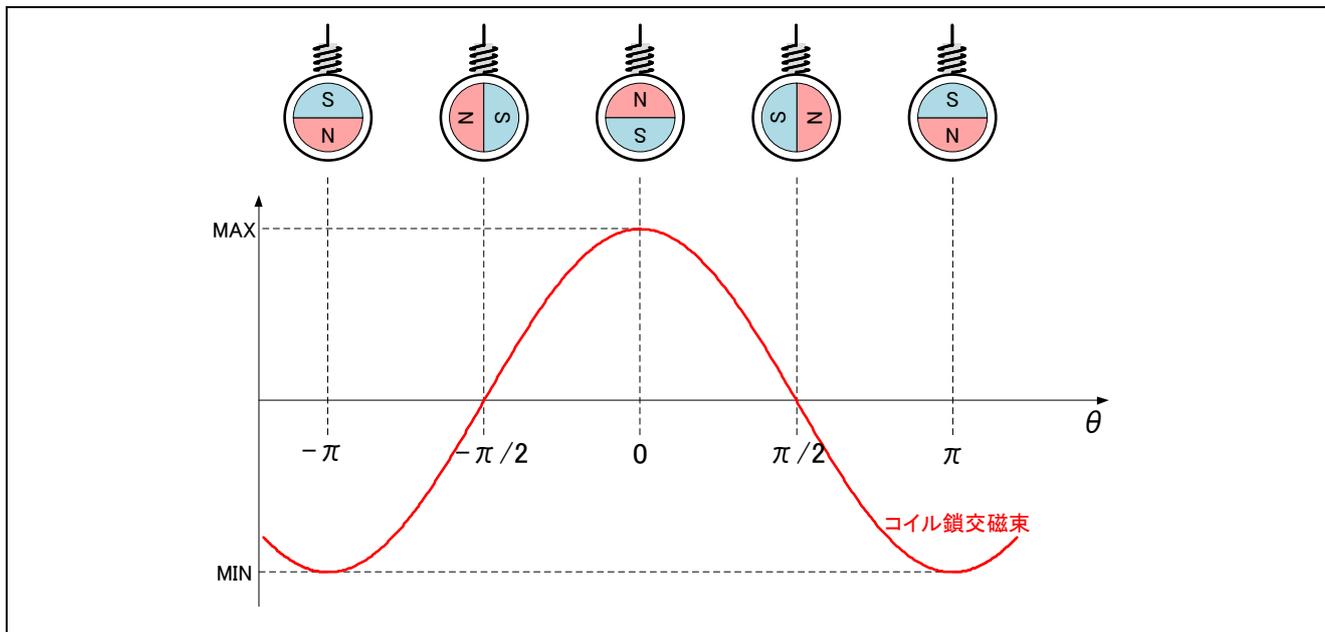


図 3-6 鎖交磁束の変化

U 相の鎖交磁束は余弦波状に変化します。

さらに、V 相、W 相についても同様に考えた場合、V 相、W 相は U 相からそれぞれ $2\pi/3$ 、 $-2\pi/3$ 位相がずれているので、3 相の鎖交磁束は以下の式で表すことができます。

$$\begin{aligned} \varphi_u &= \varphi_m \cos \theta \\ \varphi_v &= \varphi_m \cos\left(\theta - \frac{2}{3}\pi\right) \\ \varphi_w &= \varphi_m \cos\left(\theta + \frac{2}{3}\pi\right) \end{aligned}$$

また、3 相の誘起電圧は角速度を ω とすると、式(1)を用いて以下の式で表すことができます。

$$\begin{aligned} E_u &= \frac{d}{dt} \varphi_u = \frac{d}{dt} \varphi_m \cos \theta = -\omega \varphi_m \sin \theta = \omega \varphi_m \cos\left(\theta + \frac{\pi}{2}\right) \\ E_v &= \frac{d}{dt} \varphi_v = \frac{d}{dt} \varphi_m \cos\left(\theta - \frac{2}{3}\pi\right) = -\omega \varphi_m \sin\left(\theta - \frac{2}{3}\pi\right) = \omega \varphi_m \cos\left(\theta - \frac{\pi}{6}\right) \\ E_w &= \frac{d}{dt} \varphi_w = \frac{d}{dt} \varphi_m \cos\left(\theta + \frac{2}{3}\pi\right) = -\omega \varphi_m \sin\left(\theta + \frac{2}{3}\pi\right) = \omega \varphi_m \cos\left(\theta + \frac{\pi}{6}\right) \end{aligned}$$

本式より、各相に発生する誘起電圧は、永久磁石磁束に対して $\pi/2$ 位相が進んでいることが分かります。つまり、誘起電圧を検出することができれば、永久磁石の位置が推定できるということです。

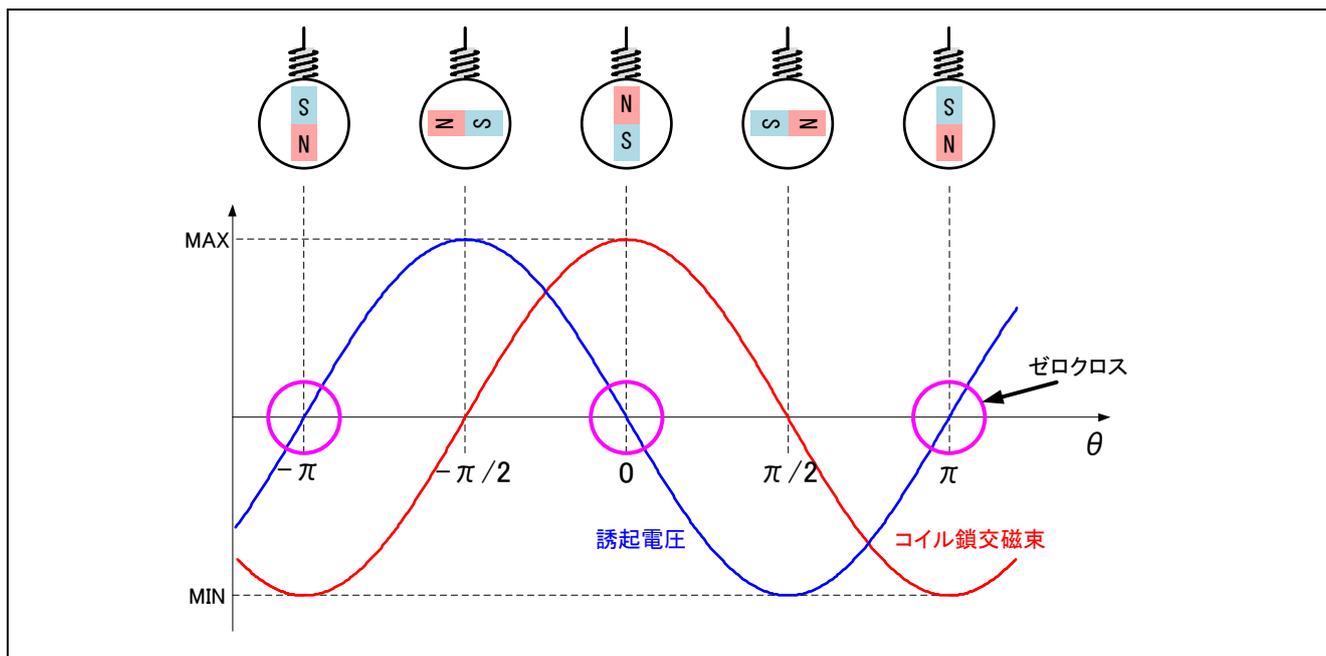


図 3-7 誘起電圧のゼロクロス

ただし、各相の誘起電圧は、モータが回転している間、常に検出できるわけではありません。

120 度通電で駆動中は、3 相のうち 2 相に通電していますので、残りの通電していない 1 相のみ誘起電圧を検出することが出来ます。実際は、誘起電圧が検出できる無通電の相に発生する誘起電圧の符号が替わる点（ゼロクロス）を検出することで位置情報を得ています。

3 相モータでは、このゼロクロスがモータ 1 回転（電気角）する間で各相 2 回、合計 6 回発生します。つまり、このゼロクロスを検出することで 60 度毎の位置検出ができ、ホールセンサと同等の分解能で位置情報を推定することが出来ます。

本システムでは、各相電圧と仮想モータ中点電圧を比較し、その位置関係によって「1」「0」のパターンを作成しています。

さらに、このパターンの位相を $\pi/6$ ずらすことで仮想のホールセンサパターンを作成しています。
 $\pi/6$ は速度推定値から算出しています。

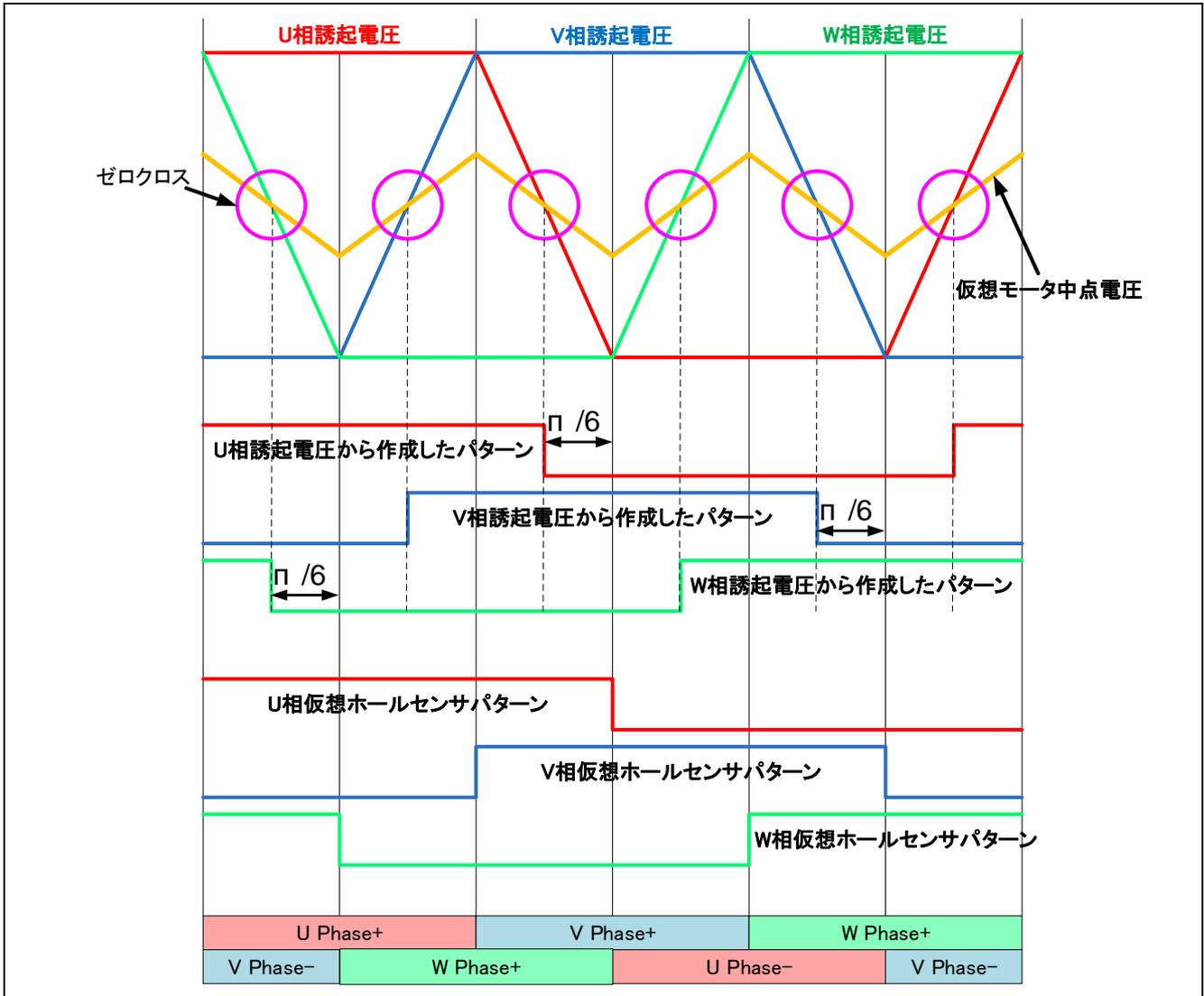


図 3-8 仮想ホールセンサパターン(上アームチョッピング時)

上記ゼロクロス検出方法として

- (1) マイコンの A/D コンバータを使用する方式
- (2) コンパレータを使用する方式

等があります。以降にその代表例を説明します。

(1) マイコンの A/D コンバータを使用する方式

マイコンの A/D コンバータを使用する方式では U、V、W の各相電圧を A/D 変換し、各相の和から仮想的にモータ中点電圧を算出します。測定した各相電圧と算出された仮想の中点電圧を比較することで図 3-8 の様なゼロクロス点を検出する方法です。

この方式は外部に比較回路(コンパレータ)を使用しない為、コンパレータレス方式とも言われています。コンパレータレス方式を実現するためのイメージ図を以下に示します。

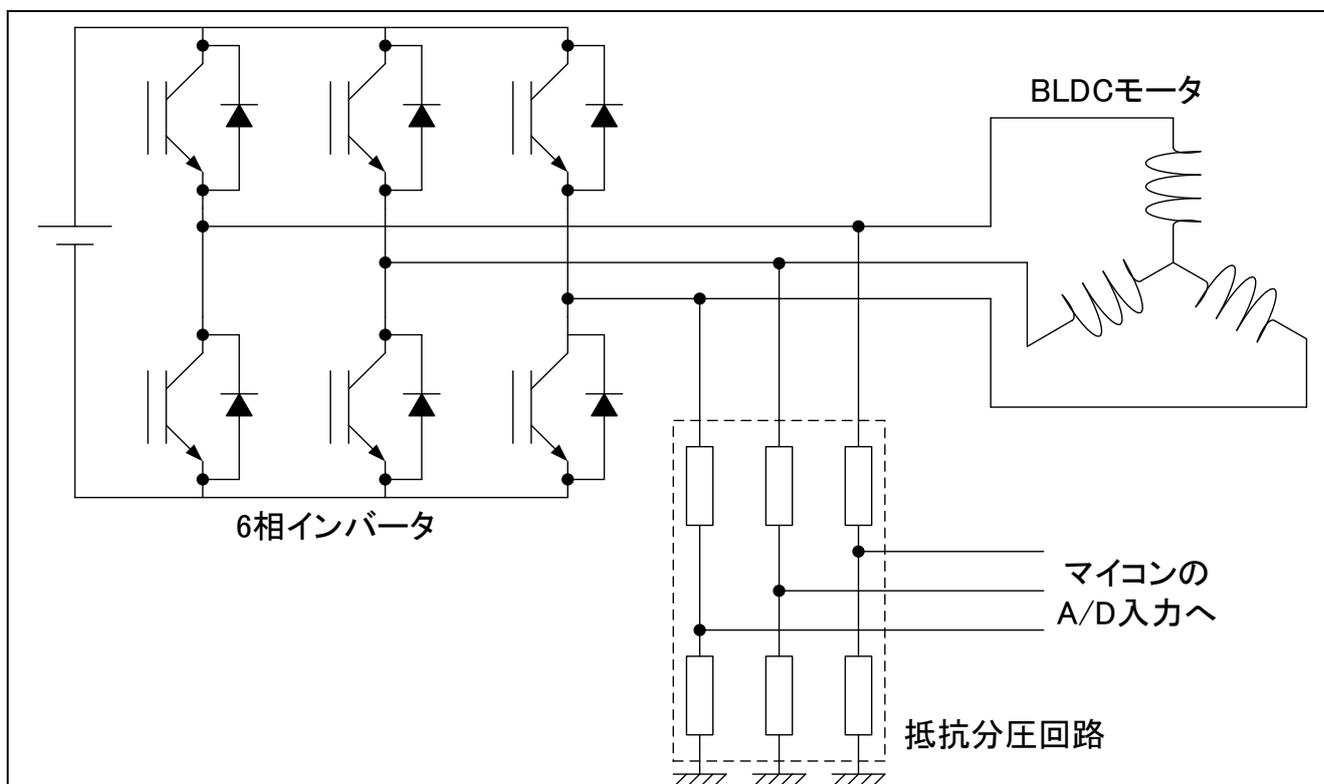


図 3-9 コンパレータレス方式

(2) コンパレータを使用する方式

コンパレータを使用する方式では U、V、W の各相電圧と電気回路的に作られた仮想のモータ中点電圧をコンパレータによって比較することで図 3-8 のようなゼロクロス検出を行います。コンパレータの出力信号をマイコンの外部割り込み等に入力し、これを利用して制御を行います。

コンパレータを使用する方式を実現するためのイメージ図を以下に示します。

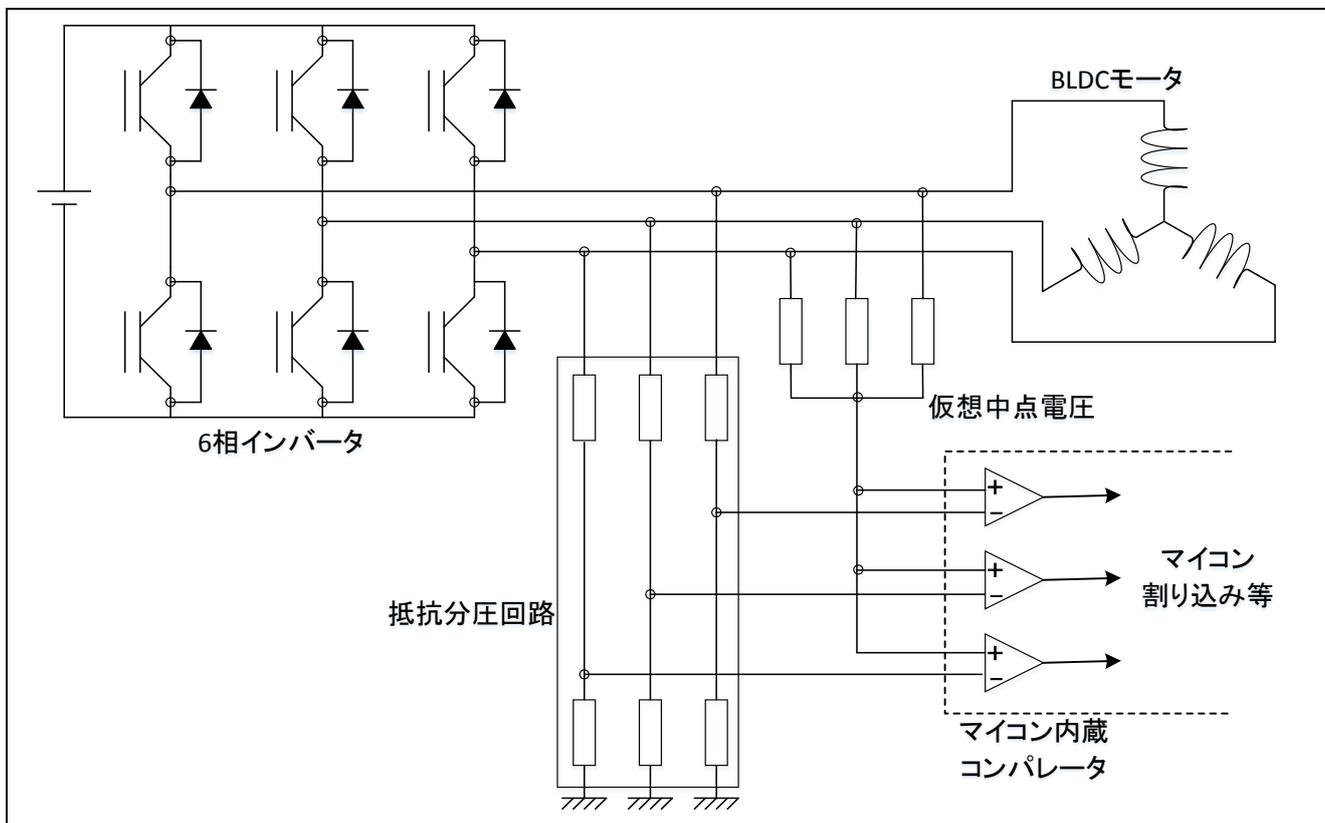


図 3-10 コンパレータ方式（仮想中点回路使用）

実際に検出される誘起電圧は、通電パターン切り替え時に発生する転流電圧と他相の PWM から受ける影響を考慮しなくてはなりません。その影響は図 3-11 に表したような形で現れます。この影響を軽減する方法として簡単なフィルタ回路を使用する方法やソフトウェアフィルタを使用する方法等があります。

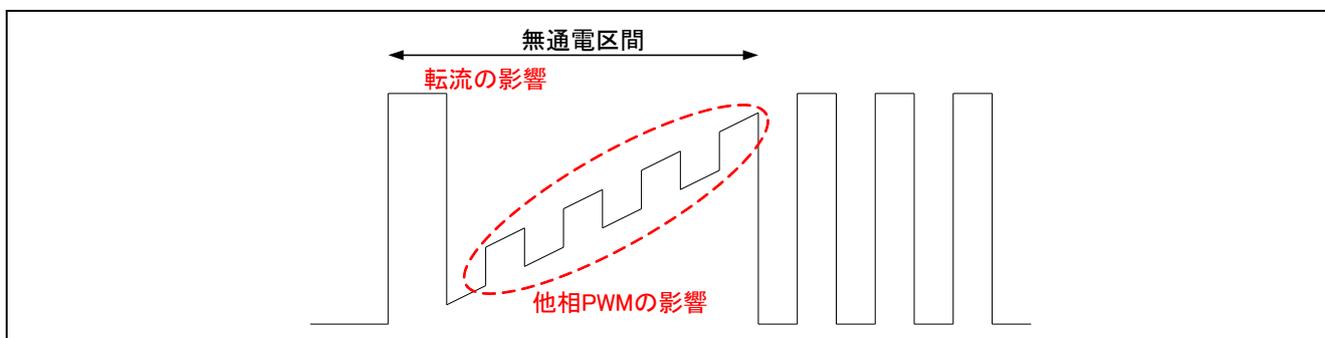


図 3-11 転流と他相 PWM の影響概念図

3.2.2 速度演算

モータ回転速度は、マイコン周辺機能のタイマをフリーランニングさせ、図 3-8 の様に検出したゼロクロス点においてタイマ値を取り込み、 2π [rad]前の取り込み値との差分から演算します。

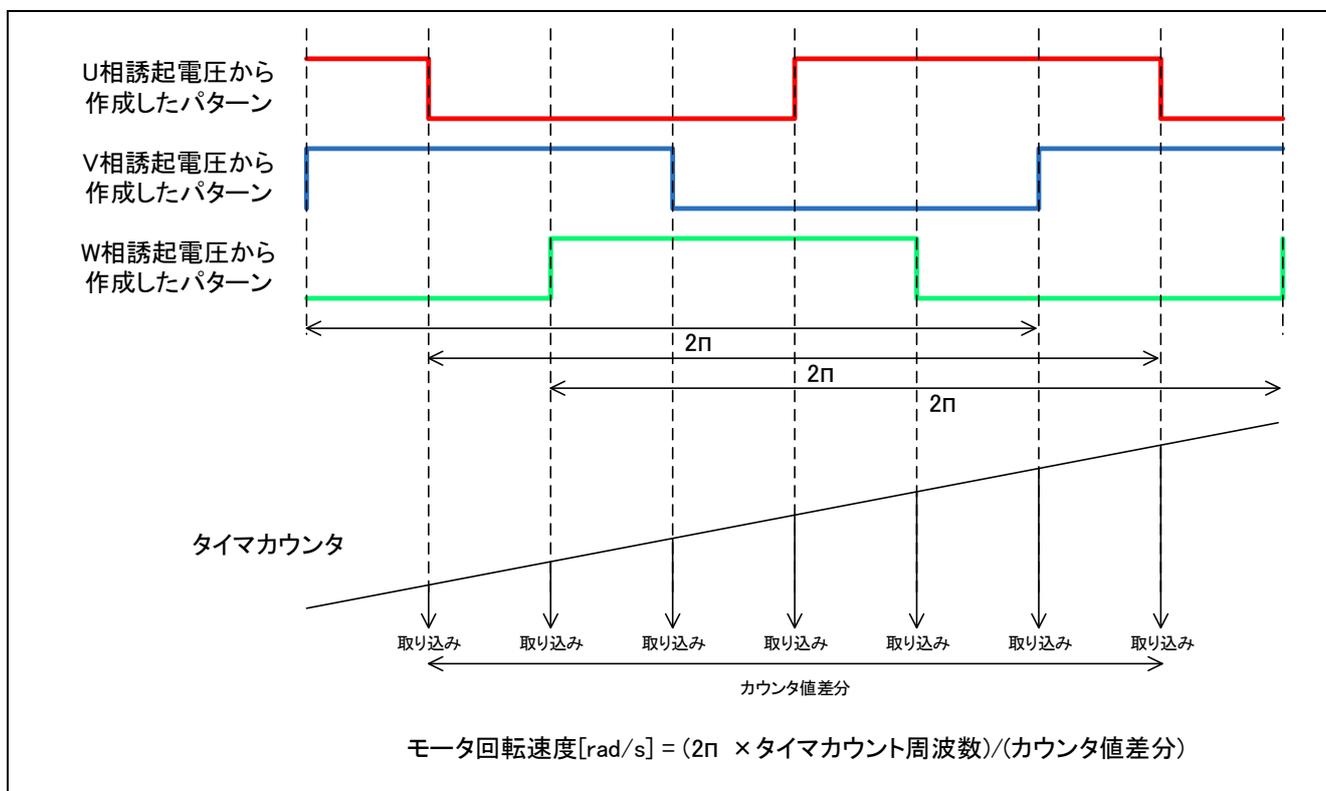


図 3-12 モータ回転速度の演算方法

3.2.3 始動方法

誘起電圧は永久磁石が回転していないと発生しません。つまり、始動時は誘起電圧を使用して磁石の位置を推定することができません。

そのため始動方法として、永久磁石の位置にかかわらず、強制的に通電パターンを変化させることで回転磁界を発生させ、ゼロクロスが検出できる速度まで回転させる方法があります。

詳細な内容については、実装編を参照ください。

ホームページとサポート窓口

ルネサス エレクトロニクスホームページ

<http://japan.renesas.com/>

お問い合わせ先

<http://japan.renesas.com/contact/>

すべての商標および登録商標は、それぞれの所有者に帰属します。

改訂記録

Rev.	発行日	改訂内容	
		ページ	ポイント
1.00	2015.03.31	—	新規発行
1.10	2016.03.24	—	24V Motor Control Evaluation System for RX23T 改版に伴い再発行
1.20	2016.10.07	10	コンパレータを用いたゼロクロス検出方式に関する 記述を追加

製品ご使用上の注意事項

ここでは、マイコン製品全体に適用する「使用上の注意事項」について説明します。個別の使用上の注意事項については、本ドキュメントおよびテクニカルアップデートを参照してください。

1. 未使用端子の処理

【注意】未使用端子は、本文の「未使用端子の処理」に従って処理してください。

CMOS製品の入力端子のインピーダンスは、一般に、ハイインピーダンスとなっています。未使用端子を開放状態で動作させると、誘導現象により、LSI周辺のノイズが印加され、LSI内部で貫通電流が流れたり、入力信号と認識されて誤動作を起こす恐れがあります。未使用端子は、本文「未使用端子の処理」で説明する指示に従い処理してください。

2. 電源投入時の処置

【注意】電源投入時は、製品の状態は不定です。

電源投入時には、LSIの内部回路の状態は不確定であり、レジスタの設定や各端子の状態は不定です。

外部リセット端子でリセットする製品の場合、電源投入からリセットが有効になるまでの期間、端子の状態は保証できません。

同様に、内蔵パワーオンリセット機能を使用してリセットする製品の場合、電源投入からリセットのかかる一定電圧に達するまでの期間、端子の状態は保証できません。

3. リザーブアドレス（予約領域）のアクセス禁止

【注意】リザーブアドレス（予約領域）のアクセスを禁止します。

アドレス領域には、将来の機能拡張用に割り付けられているリザーブアドレス（予約領域）があります。これらのアドレスをアクセスしたときの動作については、保証できませんので、アクセスしないようにしてください。

4. クロックについて

【注意】リセット時は、クロックが安定した後、リセットを解除してください。

プログラム実行中のクロック切り替え時は、切り替え先クロックが安定した後に切り替えてください。

リセット時、外部発振子（または外部発振回路）を用いたクロックで動作を開始するシステムでは、クロックが十分安定した後、リセットを解除してください。また、プログラムの途中で外部発振子（または外部発振回路）を用いたクロックに切り替える場合は、切り替え先のクロックが十分安定してから切り替えてください。

5. 製品間の相違について

【注意】型名の異なる製品に変更する場合は、製品型名ごとにシステム評価試験を実施してください。

同じグループのマイコンでも型名が違うと、内部ROM、レイアウトパターンの相違などにより、電氣的特性の範囲で、特性値、動作マージン、ノイズ耐量、ノイズ輻射量などが異なる場合があります。型名が違う製品に変更する場合は、個々の製品ごとにシステム評価試験を実施してください。

ご注意書き

1. 本資料に記載された回路、ソフトウェアおよびこれらに関連する情報は、半導体製品の動作例、応用例を説明するものです。お客様の機器・システムの設計において、回路、ソフトウェアおよびこれらに関連する情報を使用する場合には、お客様の責任において行ってください。これらの使用に起因して、お客様または第三者に生じた損害に関し、当社は、一切その責任を負いません。
2. 本資料に記載されている情報は、正確を期すため慎重に作成したのですが、誤りがないことを保証するものではありません。万一、本資料に記載されている情報の誤りに起因する損害がお客様に生じた場合においても、当社は、一切その責任を負いません。
3. 本資料に記載された製品データ、図、表、プログラム、アルゴリズム、応用回路例等の情報の使用に起因して発生した第三者の特許権、著作権その他の知的財産権に対する侵害に関し、当社は、何らの責任を負うものではありません。当社は、本資料に基づき当社または第三者の特許権、著作権その他の知的財産権を何ら許諾するものではありません。
4. 当社製品を改造、改変、複製等しないでください。かかる改造、改変、複製等により生じた損害に関し、当社は、一切その責任を負いません。
5. 当社は、当社製品の品質水準を「標準水準」および「高品質水準」に分類しており、各品質水準は、以下に示す用途に製品が使用されることを意図しております。
標準水準： コンピュータ、OA機器、通信機器、計測機器、AV機器、
家電、工作機械、パーソナル機器、産業用ロボット等
高品質水準： 輸送機器（自動車、電車、船舶等）、交通用信号機器、
防災・防犯装置、各種安全装置等
当社製品は、直接生命・身体に危害を及ぼす可能性のある機器・システム（生命維持装置、人体に埋め込み使用するもの等）、もしくは多大な物的損害を発生させるおそれのある機器・システム（原子力制御システム、軍事機器等）に使用されることを意図しておらず、使用することはできません。たとえ、意図しない用途に当社製品を使用したことによりお客様または第三者に損害が生じても、当社は一切その責任を負いません。なお、ご不明点がある場合は、当社営業にお問い合わせください。
6. 当社製品をご使用の際は、当社が指定する最大定格、動作電源電圧範囲、放熱特性、実装条件その他の保証範囲内でご使用ください。当社保証範囲を超えて当社製品をご使用された場合の故障および事故につきましては、当社は、一切その責任を負いません。
7. 当社は、当社製品の品質および信頼性の向上に努めていますが、半導体製品はある確率で故障が発生したり、使用条件によっては誤動作したりする場合があります。また、当社製品は耐放射線設計については行っておりません。当社製品の故障または誤動作が生じた場合も、人身事故、火災事故、社会的損害等を生じさせないよう、お客様の責任において、冗長設計、延焼対策設計、誤動作防止設計等の安全設計およびエージング処理等、お客様の機器・システムとしての出荷保証を行ってください。特に、マイコンソフトウェアは、単独での検証は困難なため、お客様の機器・システムとしての安全検証をお客様の責任で行ってください。
8. 当社製品の環境適合性等の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合せください。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、適用される環境関連法令を十分調査のうえ、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、当社は、一切その責任を負いません。
9. 本資料に記載されている当社製品および技術を国内外の法令および規則により製造・使用・販売を禁止されている機器・システムに使用することはできません。また、当社製品および技術を大量破壊兵器の開発等の目的、軍事利用の目的その他軍用用途に使用しないでください。当社製品または技術を輸出する場合は、「外国為替及び外国貿易法」その他輸出関連法令を遵守し、かかる法令の定めるところにより必要な手続を行ってください。
10. お客様の転売等により、本ご注意書き記載の諸条件に抵触して当社製品が使用され、その使用から損害が生じた場合、当社は何らの責任も負わず、お客様にてご負担して頂きますのでご了承ください。
11. 本資料の全部または一部を当社の文書による事前の承諾を得ることなく転載または複製することを禁じます。

注1. 本資料において使用されている「当社」とは、ルネサス エレクトロニクス株式会社およびルネサス エレクトロニクス株式会社とその総株主の議決権の過半数を直接または間接に保有する会社をいいます。

注2. 本資料において使用されている「当社製品」とは、注1において定義された当社の開発、製造製品をいいます。



ルネサスエレクトロニクス株式会社

■営業お問合せ窓口

<http://www.renesas.com>

※営業お問合せ窓口の住所は変更になることがあります。最新情報につきましては、弊社ホームページをご覧ください。

ルネサス エレクトロニクス株式会社 〒135-0061 東京都江東区豊洲3-2-24（豊洲フォレストシア）

■技術的なお問合せおよび資料のご請求は下記へどうぞ。
総合お問合せ窓口：<http://japan.renesas.com/contact/>