# ブラシレスモータスタータキット(RX71M)
# [ソフトウェア　チュートリアル編]
# 取扱説明書

ルネサス エレクトロニクス社　RX71M(QFP-144 ピン)搭載
ブラシレスモータスタータキット

-本書を必ずよく読み、ご理解された上でご利用ください

株式会社北斗電子

REV.2.0.0.0

ー目　次ー

# 注意事項

本書を必ずよく読み、ご理解された上でご利用ください

## 【ご利用にあたって】

1. 本製品をご利用になる前には必ず取扱説明書をよく読んで下さい。また、本書は必ず保管し、使用上不明な点がある場合は再読し、よく理解して使用して下さい。
2. 本書は株式会社北斗電子製マイコンボードの使用方法について説明するものであり、ユーザシステムは対象ではありません。
3. 本書及び製品は著作権及び工業所有権によって保護されており、全ての権利は弊社に帰属します。本書の無断複写・複製・転載はできません。
4. 弊社のマイコンボードの仕様は全て使用しているマイコンの仕様に準じております。マイコンの仕様に関しましては製造元にお問い合わせ下さい。弊社製品のデザイン・機能・仕様は性能や安全性の向上を目的に、予告無しに変更することがあります。また価格を変更する場合や本書の図は実物と異なる場合もありますので、御了承下さい。
5. 本製品のご使用にあたっては、十分に評価の上ご使用下さい。
6. 未実装の部品に関してはサポート対象外です。お客様の責任においてご使用下さい。

## 【限定保証】

1. 弊社は本製品が頒布されているご利用条件に従って製造されたもので、本書に記載された動作を保証致します。
2. 本製品の保証期間は購入戴いた日から1年間です。

## 【保証規定】

**保証期間内でも次のような場合は保証対象外となり有料修理となります**

1. 火災・地震・第三者による行為その他の事故により本製品に不具合が生じた場合
2. お客様の故意・過失・誤用・異常な条件でのご利用で本製品に不具合が生じた場合
3. 本製品及び付属品のご利用方法に起因した損害が発生した場合
4. お客様によって本製品及び付属品へ改造・修理がなされた場合

## 【免責事項】

弊社は特定の目的･用途に関する保証や特許権侵害に対する保証等、本保証条件以外のものは明示・黙示に拘わらず一切の保証は致し兼ねます。また、直接的・間接的損害金もしくは欠陥製品や製品の使用方法に起因する損失金・費用には一切責任を負いません。損害の発生についてあらかじめ知らされていた場合でも保証は致し兼ねます。
ただし、明示的に保証責任または担保責任を負う場合でも、その理由のいかんを問わず、累積的な損害賠償責任は、弊社が受領した対価を上限とします。本製品は「現状」で販売されているものであり、使用に際してはお客様がその結果に一切の責任を負うものとします。弊社は使用または使用不能から生ずる損害に関して一切責任を負いません。
保証は最初の購入者であるお客様ご本人にのみ適用され、お客様が転売された第三者には適用されません。よって転売による第三者またはその為になすお客様からのいかなる請求についても責任を負いません。
本製品を使った二次製品の保証は致し兼ねます。

# 安全上のご注意

製品を安全にお使いいただくための項目を次のように記載しています。絵表示の意味をよく理解した上でお読み下さい。

**表記の意味**

| | |
|---|---|
| ⚠ 警告 | 取扱を誤った場合、人が死亡または重傷を負う危険が切迫して生じる可能性がある事が想定される |
| ⚠ 注意 | 取扱を誤った場合、人が軽傷を負う可能性又は、物的損害のみを引き起こすが可能性がある事が想定される |

## 絵記号の意味

| | | | |
|---|---|---|---|
|  | **一般指示**<br>使用者に対して指示に基づく行為を強制するものを示します |  | **一般禁止**<br>一般的な禁止事項を示します |
|  | **電源プラグを抜く**<br>使用者に対して電源プラグをコンセントから抜くように指示します |  | **一般注意**<br>一般的な注意を示しています |

## ⚠ 警告

**以下の警告に反する操作をされた場合、本製品及びユーザシステムの破壊・発煙・発火の危険があります。マイコン内蔵プログラムを破壊する場合もあります。**

1. 本製品及びユーザシステムに電源が入ったままケーブルの抜き差しを行わないでください。
2. 本製品及びユーザシステムに電源が入ったままで、ユーザシステム上に実装されたマイコンまたはIC等の抜き差しを行わないでください。
3. 本製品及びユーザシステムは規定の電圧範囲でご利用ください。
4. 本製品及びユーザシステムは、コネクタのピン番号及びユーザシステム上のマイコンとの接続を確認の上正しく扱ってください。

**発煙・異音・異臭にお気付きの際はすぐに使用を中止してください。**

電源がある場合は電源を切って、コンセントから電源プラグを抜いてください。そのままご使用すると火災や感電の原因になります。

# 注意

**以下のことをされると故障の原因となる場合があります。**

1. 静電気が流れ、部品が破壊される恐れがありますので、ボード製品のコネクタ部分や部品面には直接手を触れないでください。
2. 次の様な場所での使用、保管をしないでください。

   ホコリが多い場所、長時間直射日光があたる場所、不安定な場所、衝撃や振動が加わる場所、落下の可能性がある場所、水分や湿気の多い場所、磁気を発するものの近く
3. 落としたり、衝撃を与えたり、重いものを乗せないでください。
4. 製品の上に水などの液体や、クリップなどの金属を置かないでください。
5. 製品の傍で飲食や喫煙をしないでください。

**ボード製品では、裏面にハンダ付けの跡があり、尖っている場合があります。**

取り付け、取り外しの際は製品の両端を持ってください。裏面のハンダ付け跡で、誤って手など怪我をする場合があります。

**CD メディア、フロッピーディスク付属の製品では、故障に備えてバックアップ(複製)をお取りください。**

製品をご使用中にデータなどが消失した場合、データなどの保証は一切致しかねます。

**アクセスランプがある製品では、アクセスランプ点灯中に電源の切断を行わないでください。**

製品の故障や、データの消失の原因となります。

**本製品は、医療、航空宇宙、原子力、輸送などの人命に関わる機器やシステム及び高度な信頼性を必要とする設備や機器などに用いられる事を目的として、設計及び製造されておりません。**

医療、航空宇宙、原子力、輸送などの設備や機器、システムなどに本製品を使用され、本製品の故障により、人身や火災事故、社会的な損害などが生じても、弊社では責任を負いかねます。お客様ご自身にて対策を期されるようご注意ください。

# CD 内容

添付「ソフトウェア CD」には、以下の内容が収録されています。

・チュートリアル
　TUTORIAL フォルダ以下　[本マニュアルで説明する内容]
・サンプルプログラム
　SAMPLE フォルダ以下
・プログラムのバイナリ（MOT ファイル）
　BIN フォルダ以下
・マニュアル
　manual フォルダ以下

# 注意事項

本マニュアルに記載されている情報は、ブラシレスモータスタータキットの動作例・応用例を説明したものです。

お客様の装置・システムの設計を行う際に、本マニュアルに記載されている情報を使用する場合は、お客様の責任において行ってください。本マニュアルに記載されている情報に起因して、お客様または第三者に損害が生じた場合でも、当社は一切その責任を負いません。

本マニュアルに、記載されている事項に誤りがあり、その誤りに起因してお客様に損害が生じた場合でも、当社は一切その責任を負いません。

本マニュアルの情報を使用した事に起因して発生した、第三者の著作権、特許権、知的財産権侵害に関して、当社は一切その責任を負いません。当社は、本マニュアルに基づき、当社または第三者の著作権、特許権、知的財産権の使用を許諾する事はありません。

# 1. チュートリアル

本チュートリアルでは、マイコンの基本的なプログラムを説明致しますが、ルネサスエレクトロニクスの Web から「RX71M グループ　ユーザーズマニュアル　ハードウェア編」を予めダウンロードして、手元に用意してください。マイコンの詳細な設定は、このマニュアル（以下「ハードウェアマニュアル」と記載する）に記載されています。

また、本マニュアルで説明するプログラムは、ルネサスエレクトロニクス CS+, RX スマート・コンフィグレータの環境向けに作成されていますので、CS+と RX スマート・コンフィグレータの環境を PC にインストールしておいてください。なお、開発環境のインストール等は、ルネサスエレクトロニクス社のマニュアルを参照してください。
（開発環境として、e2studio を使う場合は、CD に含まれる CS+向けのプロジェクトを e2studio で読み込ませて使用する事も可能です。）

マイコンの基本的なプログラムは行えるが、モータ制御は初めてという方を想定した構成となっており、ホールセンサを使用してブラシレスモータを回転させる方法。モータが動作しているときの、電圧や電流を観測する方法。また、モータドライバボードの保護回路の使用方法の習得を目的にしています。

以下が、本チュートリアルで学べる事柄となります。

・マイコンボードを動作させるための初期設定（クロック設定やモジュールスタンバイの解除）
・モータのコイルに流す電流を制御する方法
・A/D 変換
・PWM（パルス幅変調）
・ホールセンサの値を取得する方法
・温度値の取得
・過電流検出の方法
・モータが動作しているときの相電圧・相電流の取得
・マイコンのハードウェアを使用したモータ駆動
・ベクトル型制御（相補 PWM 駆動）
・疑似ホールセンサパターンの生成（ホールセンサレス制御）

－チュートリアル一覧－

| チュートリアル | プロジェクト名 | 内容 |
|---|---|---|
| チュートリアル 1 | RX71M_BLMKIT_TUTORIAL1 | マイコンボードを動作させる初期設定<br>スイッチの読み取りと LED の制御 |
| チュートリアル 2 | RX71M_BLMKIT_TUTORIAL2 | モータへの通電方法<br>（モータは回転しません） |
| チュートリアル 3 | RX71M_BLMKIT_TUTORIAL3 | A/D 変換と PWM 波形の生成方法 |
| チュートリアル 4 | RX71M_BLMKIT_TUTORIAL4 | 実際にモータを回転させる方法 |
| チュートリアル 5 | RX71M_BLMKIT_TUTORIAL5 | ホールセンサの値を利用する方法 |
| チュートリアル 6 | RX71M_BLMKIT_TUTORIAL6 | 過電流・過熱保護 |
| チュートリアル 7 | RX71M_BLMKIT_TUTORIAL7 | 相電圧・相電流の観測 |

チュートリアル 1~7 までは、つながりのある内容となっており、例えばチュートリアル 6 はチュートリアル 5 の内容に「過電流・過熱保護」の機構を追加する内容になっています。一つ前のチュートリアルに少しずつ機能追加を行っていき、モータ制御プログラムを組み立てていく内容です。

| チュートリアル | プロジェクト名 | 内容 |
|---|---|---|
| チュートリアル A | RX71M_BLMKIT_TUTORIAL_A | マイコンのハードウェア制御機構を用いたモータ制御 |

チュートリアル A は、チュートリアル 7 をベースに、マイコンが持っている機能であるブラシレスモータ用出力相切り替え機能を使ってモータを回す内容です。

| チュートリアル | プロジェクト名 | 内容 |
|---|---|---|
| チュートリアル B | RX71M_BLMKIT_TUTORIAL_B | 相補 PWM を使ったモータ制御（回転数固定） |
| チュートリアル B2 | RX71M_BLMKIT_TUTORIAL_B2 | 相補 PWM を使ったモータ制御（回転数可変） |

チュートリアル B は、チュートリアル 7 をベースに、モータ制御の部分をベクトル制御とも呼ばれる相補 PWM 駆動に変えたものです。

| チュートリアル | プロジェクト名 | 内容 |
|---|---|---|
| チュートリアル C | RX71M_BLMKIT_TUTORIAL_C | 疑似ホールセンサパターンを使用した制御 |

チュートリアル C は、チュートリアル 7 をベースに、ホールセンサの部分を、疑似ホールセンサパターン（UVW 相の電圧からホールセンサパターンを生成、ホールセンサレス制御）を選択できるよう変えたものです。

| チュートリアル | プロジェクト名 | 内容 |
|---|---|---|
| チュートリアル BC | RX71M_BLMKIT_TUTORIAL_BC | 疑似ホールセンサパターンと相補 PWM を組み合わせた制御 |

チュートリアル BC は、チュートリアル B とチュートリアル C を組み合わせたもので、相補 PWM を使用して、疑似ホールセンサパターン（ホールセンサレス制御）を選択できるようにしたものです。

チュートリアル 1~7 は連続したチュートリアル。モータを回す上で基本的な内容を 1 ステップずつ追加していく内容。A と B と C はチュートリアル 7 の内容から枝分かれするイメージです。

サンプルプログラム(RX71M_BLMKIT_SAMPLE)は、チュートリアル BC をベースに、相補 PWM 駆動とモータ内蔵ホールセンサ（もしくは、疑似ホールセンサパターン）を使った制御になっています。チュートリアルで学んだ内容をまとめたのがサンプルプログラムです。（サンプルプログラムは、別なマニュアルで内容を説明しています。）

## 1.1. マイコンボード初期設定

参照プロジェクト:RX71M_BLMKIT_TUTORIAL1

本キットに付属のマイコンボード(HSBRX71M100)は、RX71M グループのマイコンを搭載しており、クロック周波数 240MHz で動作させることが出来ます。

マイコンの動作モードやクロック周波数は、プログラムで設定する必要があります。

本プロジェクトでは、

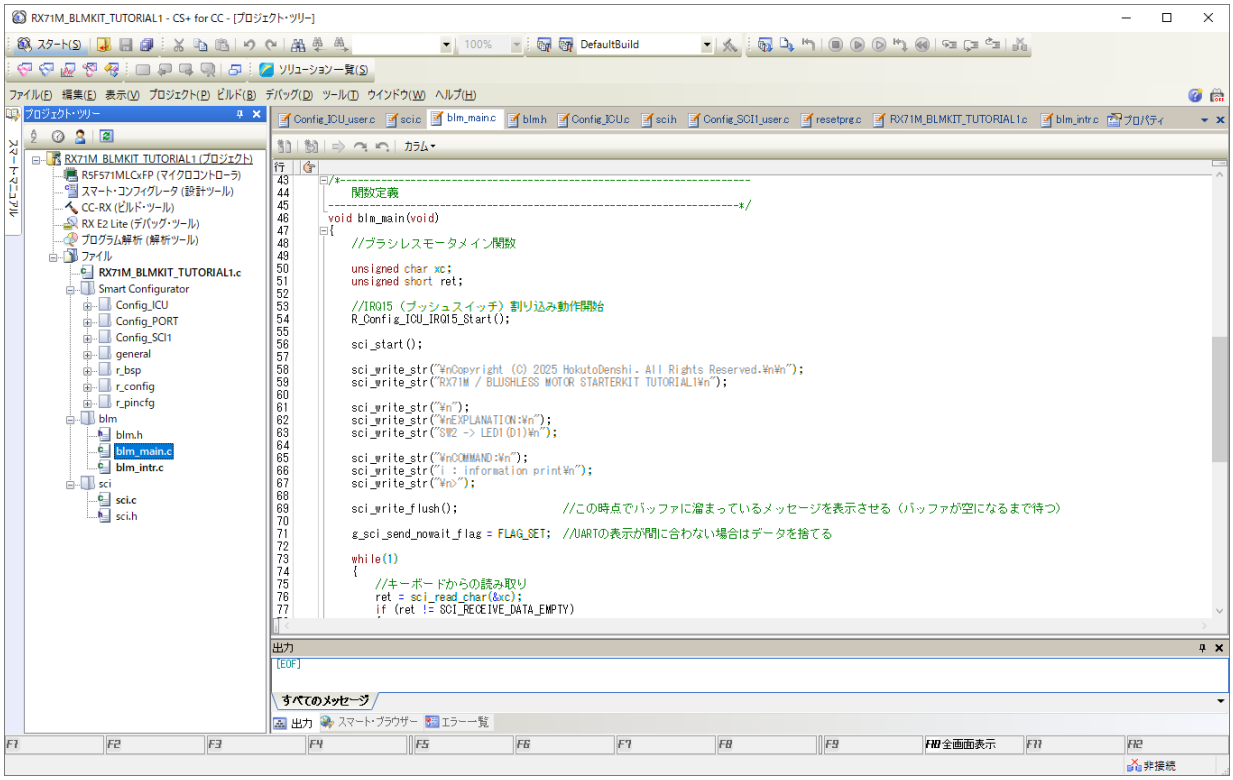
・マイコンボードの初期設定
・基本的な動作

を確認します。(※本プロジェクトは、モータドライバボード・接続ボードをつないだ状態で実行してください)

CD に含まれる、TUTORIAL¥RX71M_BLMKIT_TUTORIAL1 フォルダを PC のストレージにコピーして、コピー先の

RX71M_BLMKIT_TUTORIAL1¥RX71M_BLMKIT_TUTORIAL1.mtpj

をダブルクリックして、CS+を起動してください。



ファイル構成としては、

RX71M_BLMKIT_TUTORIAL1.c
メイン関数を含むソースです。blm_main()を呼び出すようにしています。

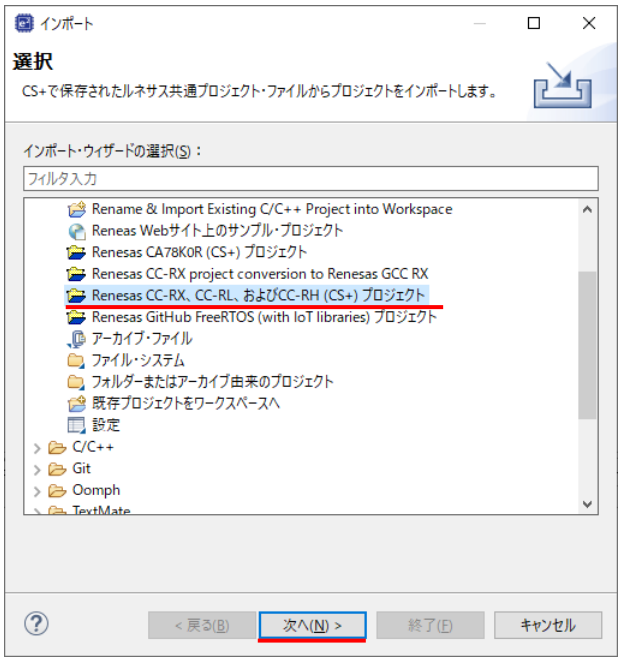
SmartConfigurator 以下
スマート・コンフィグレータを使用して生成されたソースコードがぶら下がります。
この中に含まれるファイルで、Config_SCI1_user.c の様に「_user」が付くファイルには、必要に応じてユーザ作成のプログラムコードを追加します。

blm 以下
ブラシレスモータの駆動用のソースコードが含まれます。TUTOIAL1 では、
blm_main.c
blm_intr.c
blm.h
の 3 つのファイルで構成されています。

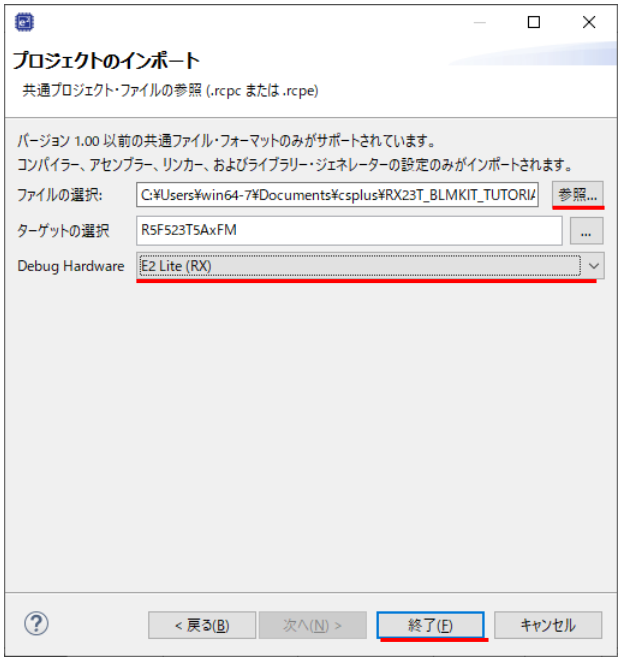
sci 以下
SCI(UART)での文字出力、文字入力のソースコードが含まれます。

CS+ではなく、e2studio を使いたい場合は、

ファイルーインポート




Renesas CC-RX、CC-RL、及び CC-RH(CS+)プロジェクト を選択、次へ

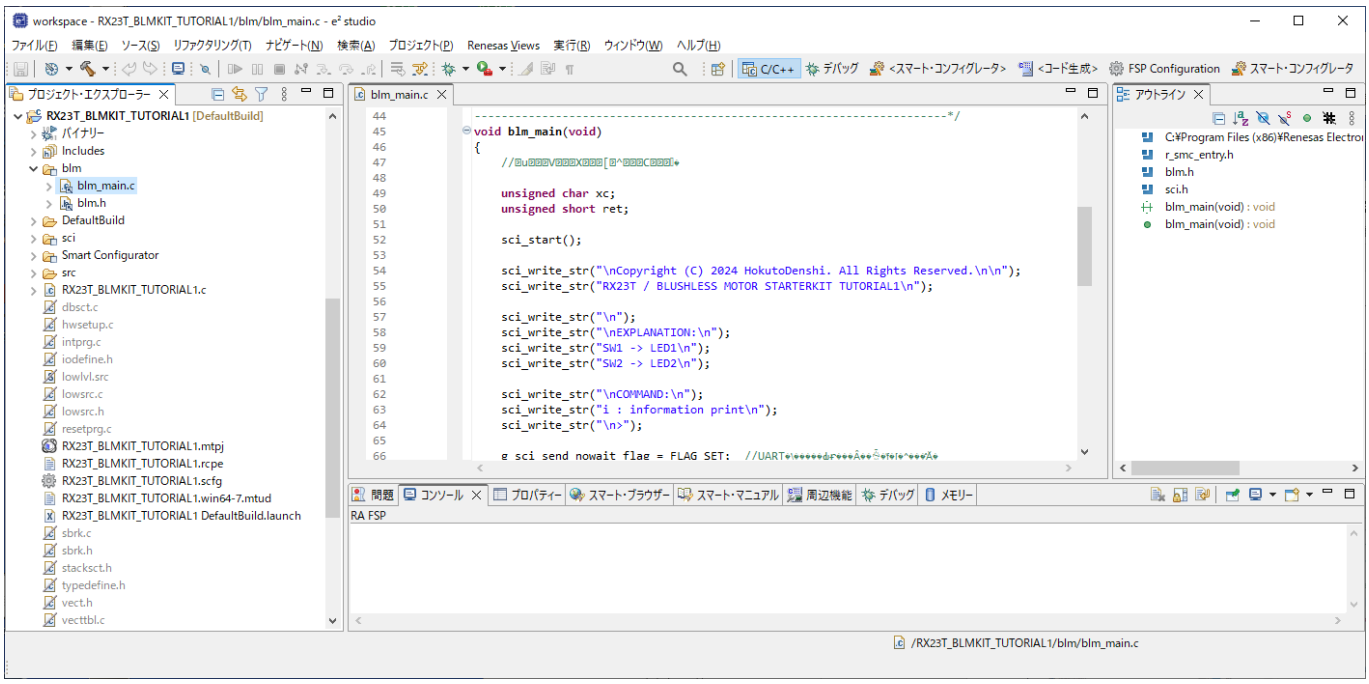



参照 を押して RX71M_BLMKIT_TUTORIAL1, RX71M_BLMKIT_TUTORIAL1 フォルダ内の、RX71M_TUTORIAL1.rcpe, RX71M_TUTORIAL1.rcpe ファイルを選択してください。

ターゲットの選択 は、自動的に入力されますので、変更の必要はありません。

Debug Hardware は、デバッガを使用する場合は、使用するデバッガを選択してください。

終了 を押す。

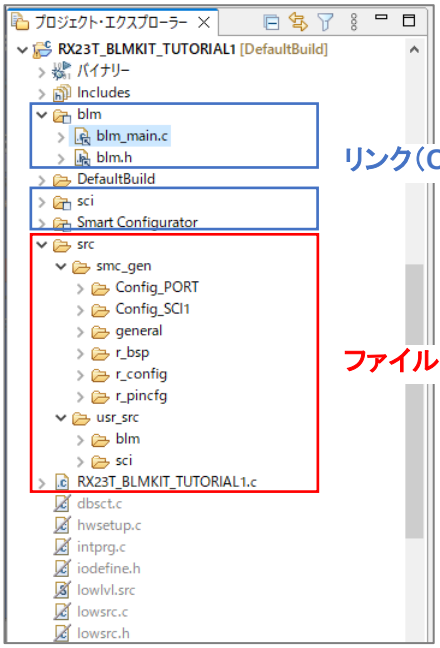



```
void blm_main(void)
{
    unsigned char xc;
    unsigned short ret;

    sci_start();

    sci_write_str("\nCopyright (C) 2024 HokutoDenshi. All Rights Reserved.\n\n");
    sci_write_str("RX23T / BLUSHLESS MOTOR STARTERKIT TUTORIAL1\n");

    sci_write_str("\n");
    sci_write_str("\nEXPLANATION:\n");
    sci_write_str("SW1 -> LED1\n");
    sci_write_str("SW2 -> LED2\n");

    sci_write_str("\nCOMMAND:\n");
    sci_write_str("i : information print\n");
    sci_write_str("\n>");
```

ワークスペースに、RX71M_BLMKIT_TUTORIAL1 プロジェクトがインポートされ、ビルドやデバッガ接続等可能となります。

単純にインポートしただけですと、
→ソースコード内の日本語で書かれたコメントが文字化けする
状態となります。
（コメントの文字化けは、ソースファイルを適当なテキストエディタで開いて文字コードを Shift-JIS→UTF-8 に変換すれば修正可能です。）

スマート・コンフィグレータの設定ファイルは、歯車のアイコンのファイル（RX71M_BLMKIT_TUTORIAL1.scfg)ですので、このファイルをダブルクリックすれば、スマート・コンフィグレータで設定した項目の変更も行えます。

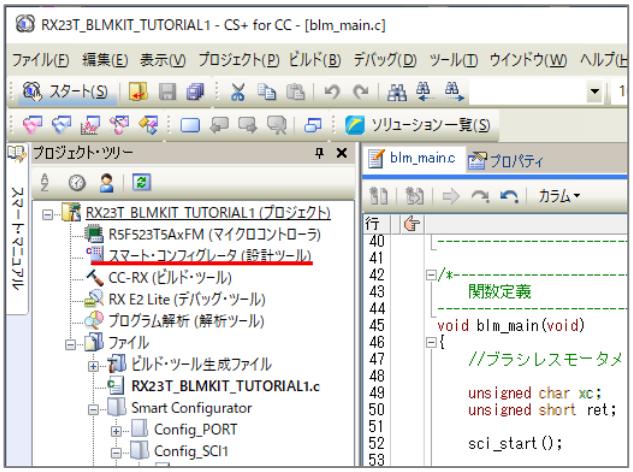



プロジェクト・エクスプローラ上では、ソースフォルダが重複して見えますが、片方は CS+のカテゴリの残骸でリンクになっているので、ファイルの実体としては src 以下となります。

trush（スマート・コンフィグレータの設定時に過去のソースを保存するフォルダ）が存在する場合、フォルダのプロパティを開き、「ビルドからリソースを除外」にチェックが入っていない場合は、チェックを入れてください。

マニュアルの以下の画面は、CS+使用時のハードコピーを示しますが、同様の事は e2studio でも行えるはずです。

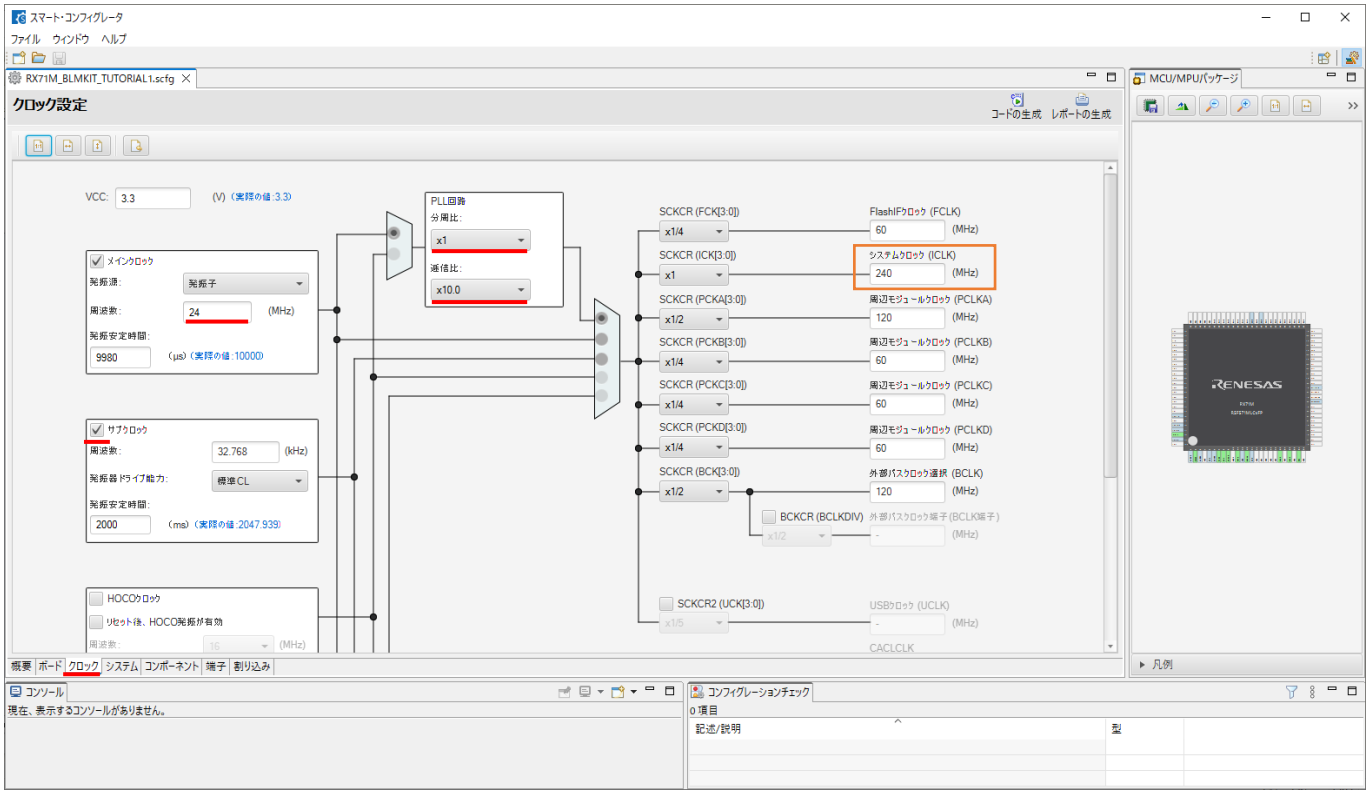
CD に含まれるプロジェクトでは、各種設定済みの状態ですが、どのような項目を設定しているのかを以下で説明します。




スマート・コンフィグレータ（設計ツール）をダブルクリックすると、スマート・コンフィグレータが起動します。（e2studio の場合は、プロジェクト名.scfg ファイルをダブルクリック、スマート・コンフィグレータは e2studio 内のウィンドウに表示されます。）

マイコンで動作するプログラムを作成する場合、クロック等の初期設定が必要です。スマート・コンフィグレータを使用すると、GUI 画面でクロックの設定を行い、コード生成ボタンを押す事で、初期設定のプログラムコードが出力されます。

・「クロック」タブ(RX71M)



基本的には、デフォルトから変更不要です。

周波数　24 を入力

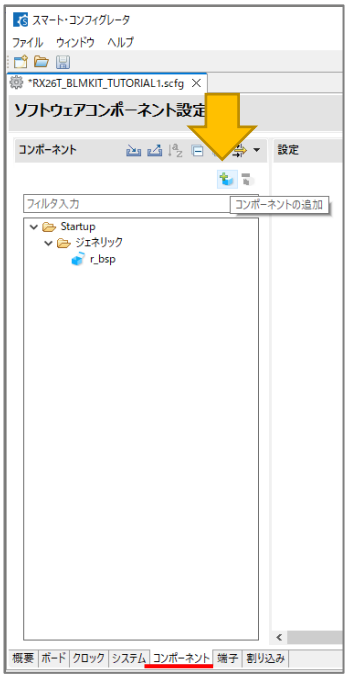
PLL 分周比　x1 を選択

PLL 逓倍比　x10 を選択

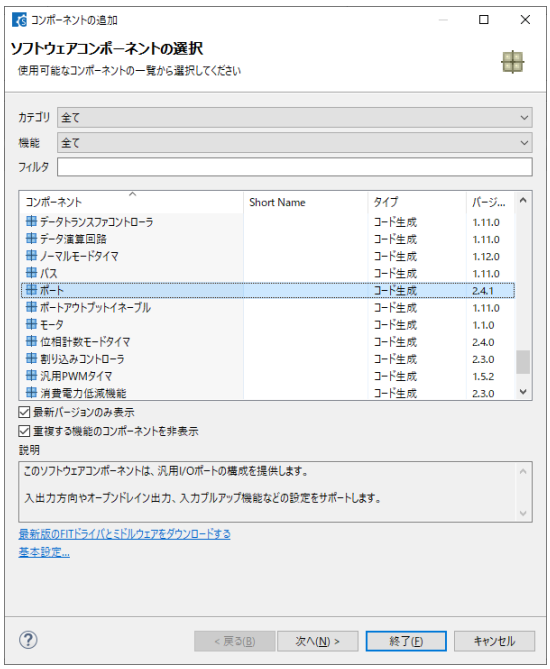
上記設定で、ICLK=240MHz（マイコンの最大動作周波数）の設定となります。

※モータ制御のプログラムでは未使用ですが、サブクロックの欄にチェックを入れると、RTC（リアルタイムクロック）が使用可能となります。）

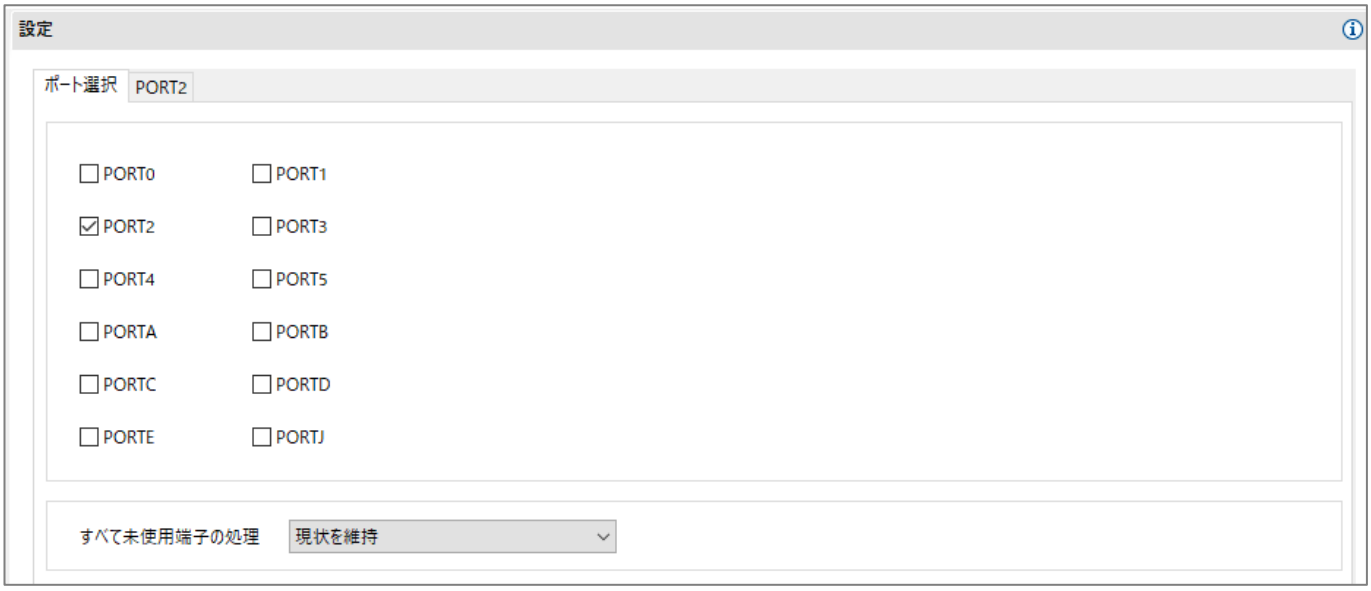
・コンポーネントの追加




「コンポーネント」タブ　コンポーネントの追加ボタン



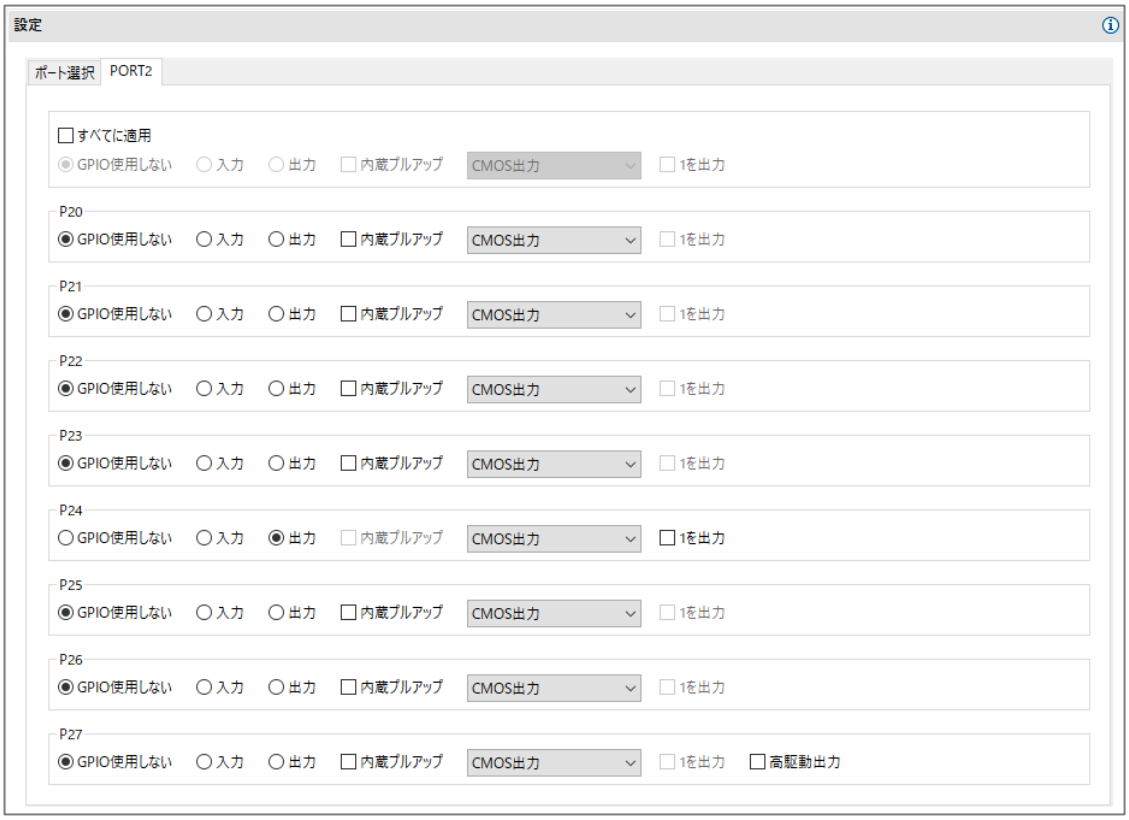
「ポート」を選んで、次へ（もしくは終了）




本チュートリアルでは、基本的なマイコンの設定と、スイッチ, LED を使用した単純なポート操作を行いますので、ここでは

PORT2

にチェックを入れます。




PORT2 では、

P24　出力

に設定します。

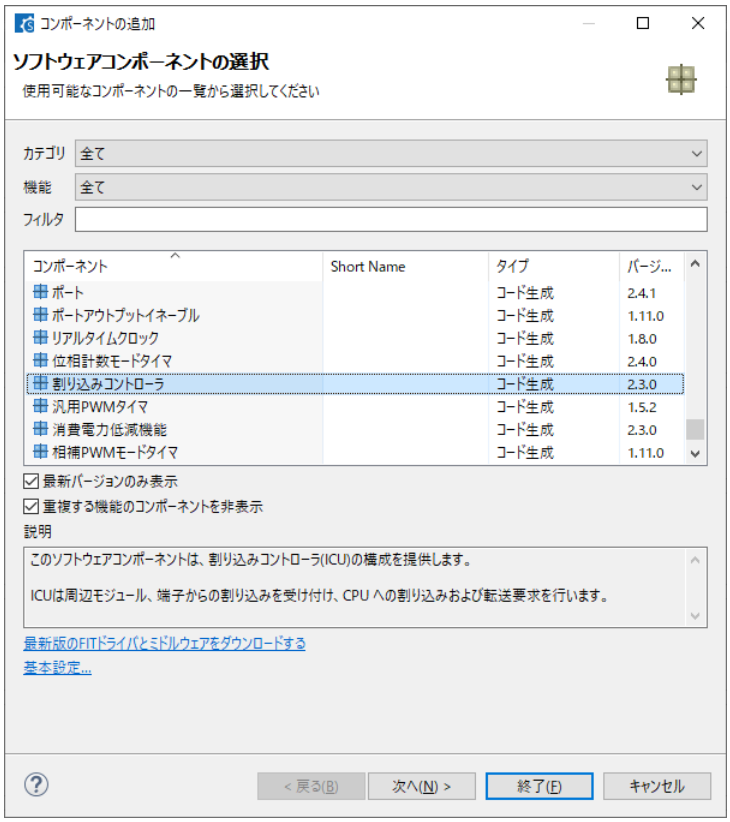
P24 は、HSBRX71M100 では USB-Host の給電（USB-A コネクタに 5V を供給する）端子ですが、この端子を H にすると、マイコンボード上の D1 が点灯します（及び、USB-A コネクタの VBUS に 5V が供給されます。）

本資料で説明するサンプルプログラムでは、モニタ用に D1(LED1)を使用しています。

（本来の USB-A コネクタの使い方からは外れる使用方法ですが、何かインジケータがあった方が動作が判り易いのでそのようにしています。HSBRX71M100 では、J1, J6, J10 のスルーホールがありますので、これらの端子に別途 LED を接続しても良いと思います。）

（マイコンボード上には、LED D9(P05)もありますが、この端子は A/D 変換機能使用時は、出力に設定しないことが推奨されていますので、サンプルプログラムでは未使用としています。）

また、モータの回転の ON/OFF には、マイコンボード上の SW2(P07)を使用しようと思います。スイッチが押された事を検出するため、SW2 の信号は割り込みで処理します。割り込みは、コンポーネントの追加で




割り込みコントローラを選択して、追加します。

SW2 が接続されている P07 は、IRQ15 なので、IRQ15 の項目にチェックを入れて設定を行います。

ここでは、

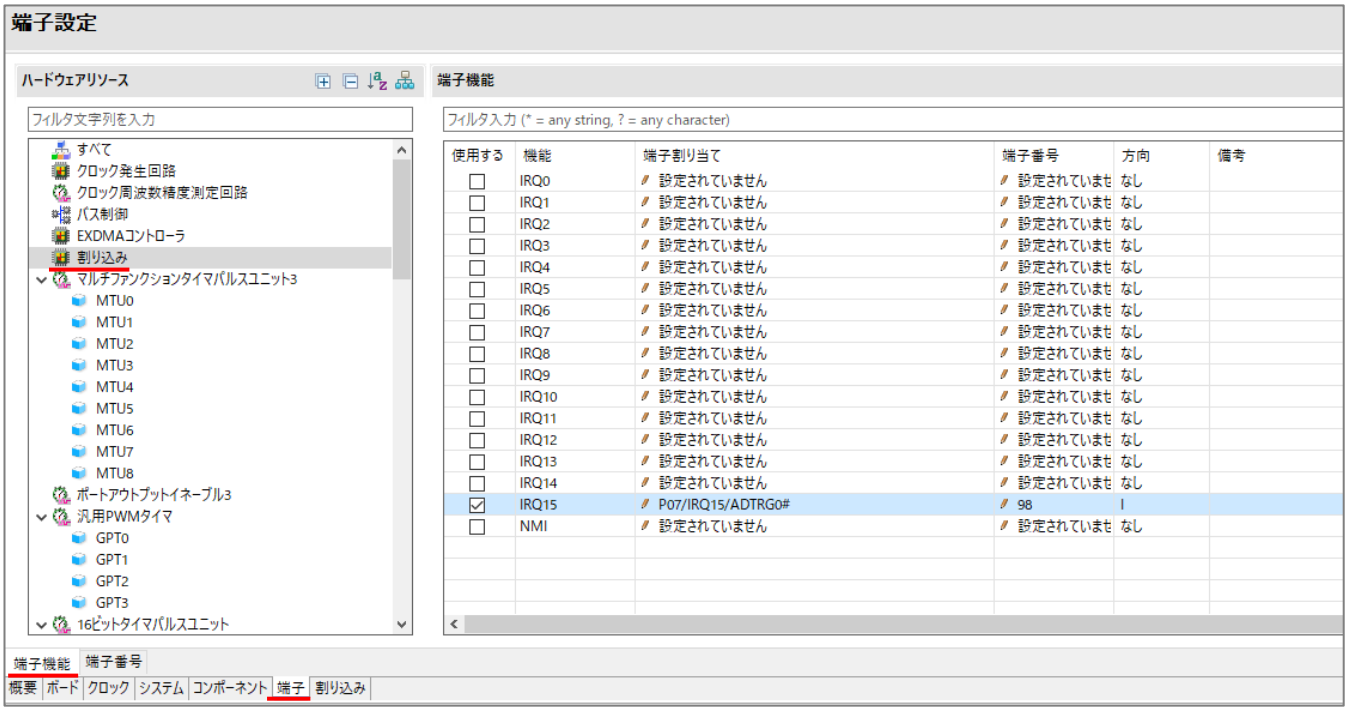
検出タイプ　立下りエッジ

優先順位　レベル 6

デジタルフィルタ　PCLK/64

の設定としています。スイッチを押した際に、反応させる場合は「立ち下がりエッジ」です。優先順位は、レベル 1~レベル 15 まで、割り込みの優先度の設定でです。1 が最低（他の割り込み処理中は後回し）で、15 が最高（他の割り込み処理実行中でも優先的に処理される）です。

デジタルフィルタは、チャタリング防止のために有効化しておきます。

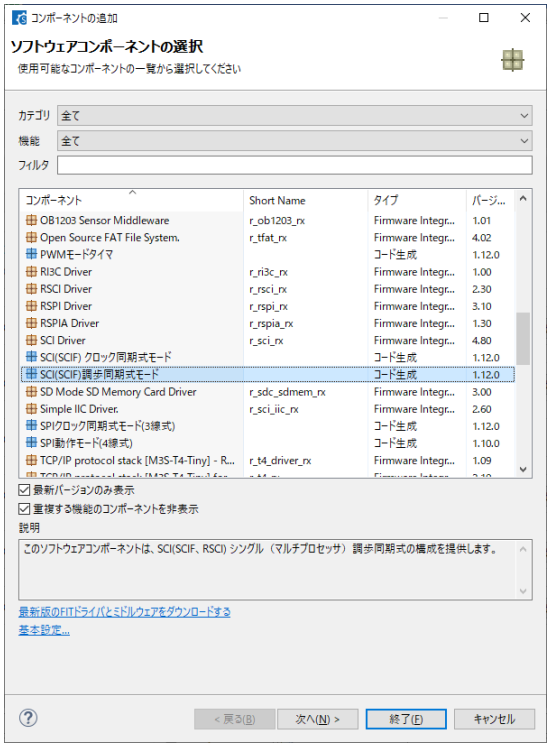



端子タブ－端子機能タブの割り込みで、IRQ15 の端子 P07 を選択してください。（IRQ15 は、P07 と P47 から選択可能となっています。）

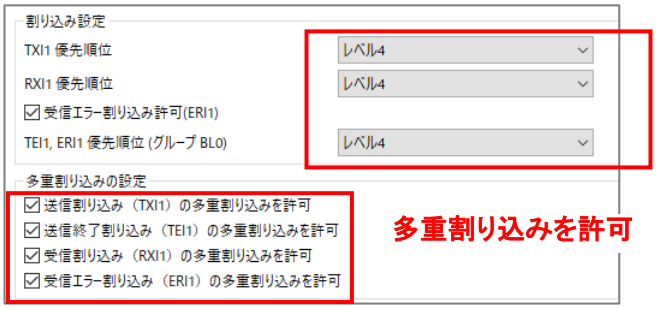
－ポートの設定－

| | 入出力 | 内蔵プルアップ | 1 を出力 | 備考 |
|---|---|---|---|---|
| P24 | 出力 | | | マイコンボード上の LED1(D1) |
| P07 | | | | マイコンボード上の SW2<br>IRQ15 として使用 |

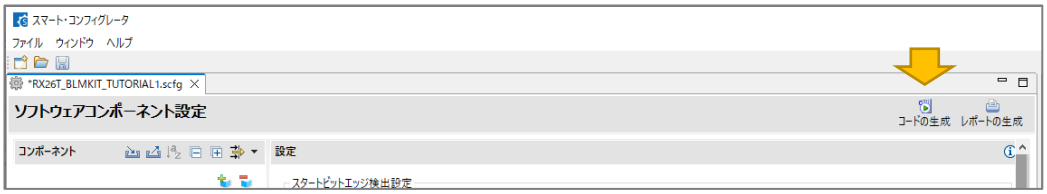
同様に、コンポーネントの追加で、



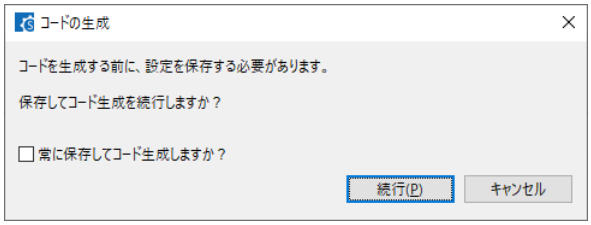

SCI(SCIF)の調歩同期式モード　を追加します。

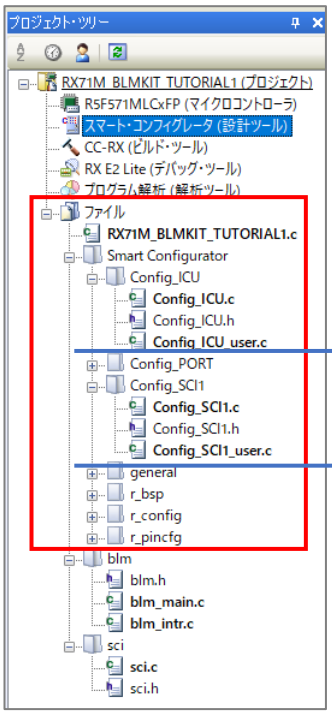

赤で示した部分がデフォルトから変更した部分です。




一通り設定が終わったら、「コード生成」のボタンを押します。これにより、GUI で設定した項目がソースコードに反映されます。（スマート・コンフィグレータで何か設定変更を行った場合は、必ず最後にコード生成してください。）




上記ダイアログが出た場合は、「続行」で問題ありません。




このファイルに、ユーザ作成のプログラムコードを追加する(1)

このファイルに、ユーザ作成のプログラムコードを追加する(2)

スマート・コンフィグレータで設定した部分は、プロジェクト・ツリーの赤枠部分に反映されます。スマート・コンフィグレータ出力ファイルに、ユーザ側で追加したい処理を記載します。ファイルとしては Config_ICU_user.c です。(_user と付くファイルは、ユーザ側で変更して良いファイルとなっています。)

・Config_ICU_user.c

```
/***********************************************************************************************
**********************
Includes
***********************************************************************************************
*********************/
#include "r_cg_macrodriver.h"
#include "Config_ICU.h"
/* Start user code for include. Do not edit comment generated here */
#include "blm.h"
/* End user code. Do not edit comment generated here */
#include "r_cg_userdefine.h"
```

```
#if FAST_INTERRUPT_VECTOR == VECT_ICU_IRQ15
#pragma interrupt r_Config_ICU_irq15_interrupt(vect=VECT(ICU,IRQ15),fint)
#else
#pragma interrupt r_Config_ICU_irq15_interrupt(vect=VECT(ICU,IRQ15))
#endif
static void r_Config_ICU_irq15_interrupt(void)
{
    /* Start user code for r_Config_ICU_irq15_interrupt. Do not edit comment generated here */
    blm_interrupt_irq15();
    /* End user code. Do not edit comment generated here */
}
```

```
/* Start user code
/* End user code.
```

の間に、赤字で書いたコードを追加してください(合計 2 行)。

※Start-End で囲まれた以外のところに書くと、「コード生成」ボタンを押した際に、上書きされて消されてしまいます

同様に、Config_SCI1_user.c には、以下合計 4 行を追加してください。

・Config_SCI1_user.c

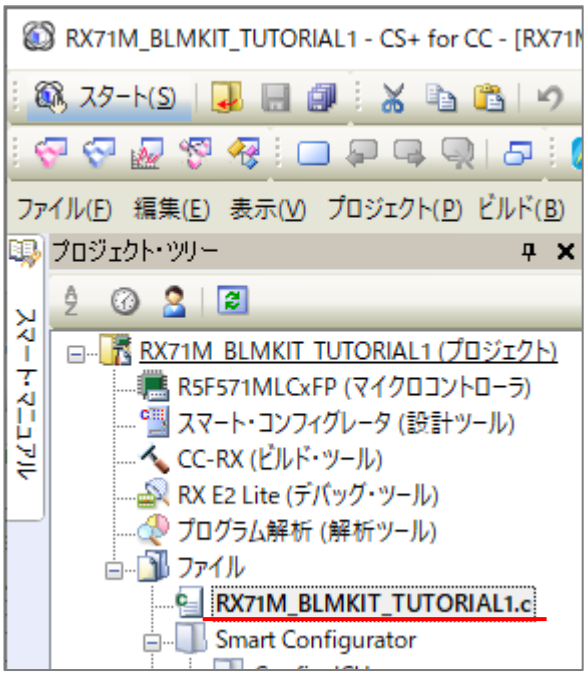
```
/***********************************************************************************************
**********************
Includes
***********************************************************************************************
**********************/
#include "r_cg_macrodriver.h"
#include "Config_SCI1.h"
/* Start user code for include. Do not edit comment generated here */
#include "sci.h"
/* End user code. Do not edit comment generated here */
#include "r_cg_userdefine.h"
```

・Config_SCI1_user.c（中略，続き）

```
/***********************************************************************************************
**********************
* Function Name: r_Config_SCI1_callback_transmitend
* Description  : This function is a callback function when SCI1 finishes transmission
* Arguments    : None
* Return Value : None
***********************************************************************************************
**********************/

static void r_Config_SCI1_callback_transmitend(void)
{
    /* Start user code for r_Config_SCI1_callback_transmitend. Do not edit comment generated here
*/
    intr_sci_send_end();
    /* End user code. Do not edit comment generated here */
}

/***********************************************************************************************
**********************
* Function Name: r_Config_SCI1_callback_receiveend
* Description  : This function is a callback function when SCI1 finishes reception
* Arguments    : None
* Return Value : None
***********************************************************************************************
**********************/

static void r_Config_SCI1_callback_receiveend(void)
{
    /* Start user code for r_Config_SCI1_callback_receiveend. Do not edit comment generated here */
    intr_sci_receive_end();
    /* End user code. Do not edit comment generated here */
}

/***********************************************************************************************
**********************
* Function Name: r_Config_SCI1_callback_receiveerror
* Description  : This function is a callback function when SCI1 reception encounters error
* Arguments    : None
* Return Value : None
***********************************************************************************************
**********************/

static void r_Config_SCI1_callback_receiveerror(void)
{
    /* Start user code for r_Config_SCI1_callback_receiveerror. Do not edit comment generated here
*/
    intr_sci_receive_error();
    /* End user code. Do not edit comment generated here */
}
```

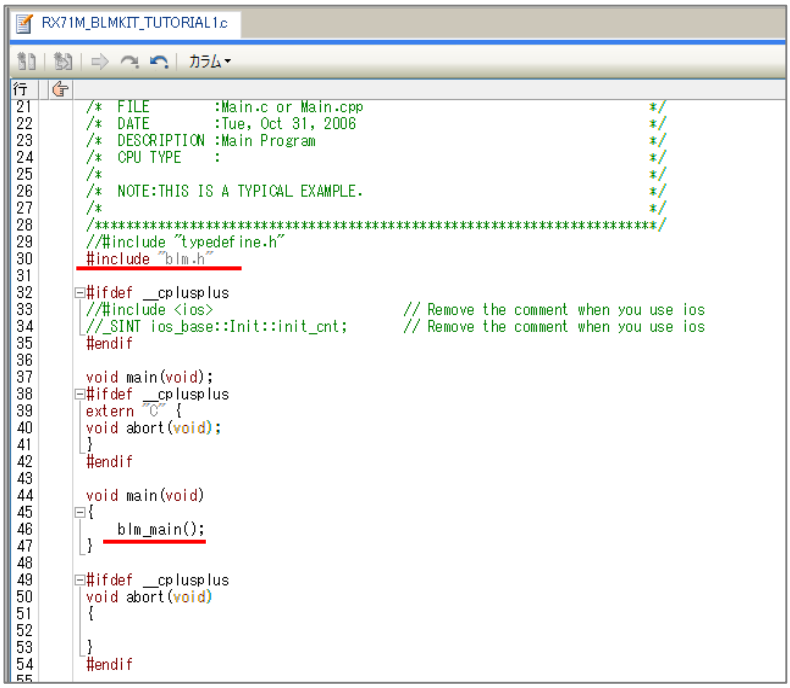
Config_ICU_user.c は、端子割り込みが発生した際の処理。
Config_SCI1_user.c は、SCI1, UART を使用した端末への情報表示に使用しているものです。

次に、ユーザプログラム本体を書き下します。




プロジェクト名.c (RX71M_BLMKIT_TUTORIAL1.c)
というファイルが、メイン関数が記載されているファイルです。

void main(void)がユーザプログラムのスタート地点となります。クロックの設定等、各種初期設定は既に終わった後で、main()関数が呼ばれる形となります。

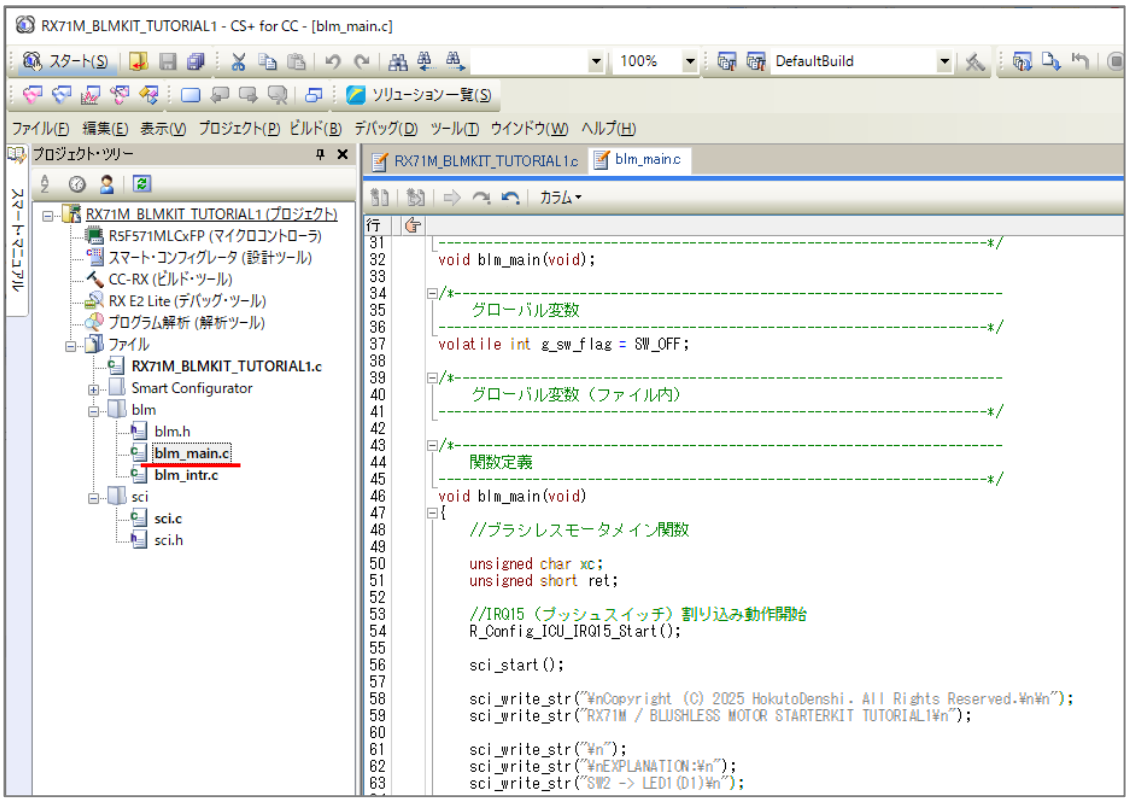


ここでは、

#include "blm.h"　blm_main()のプロトタイプを含むヘッダ

blm_main()　ブラシレスモータ制御のメイン関数

の 2 行を追加します。




blm_main.c

がプログラムの本体となります。

このチュートリアルでは、モータ制御は行っておらず、

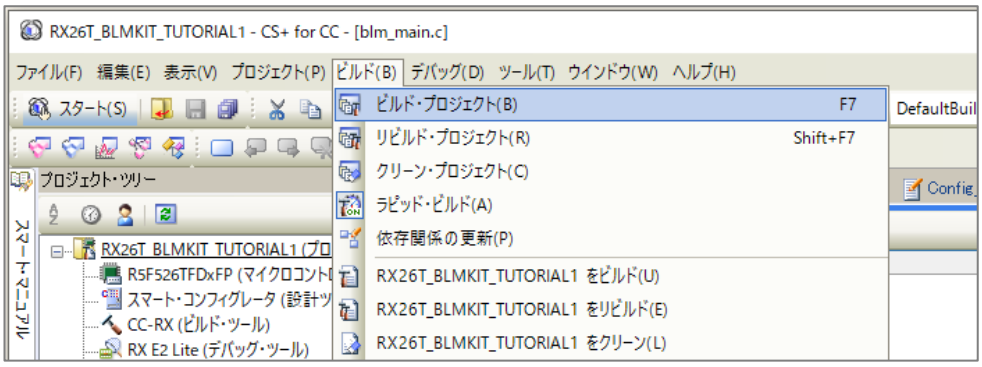
・マイコンボードの初期設定

クロックや汎用 I/O 等の設定方法

・単純な SW と LED の操作

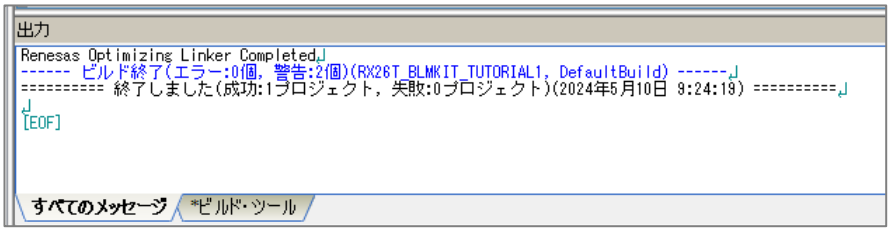
・UART 通信

を行うチュートリアルとなっています。

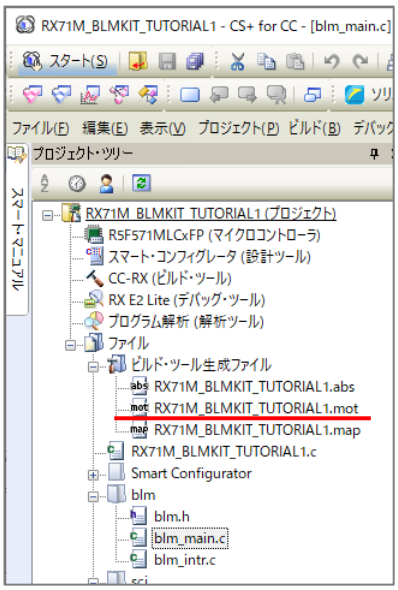



ビルドービルド・プロジェクト

を実行すると、プロジェクトがビルドされます。




ビルド終了（エラー:0 個）であれば問題ありません。



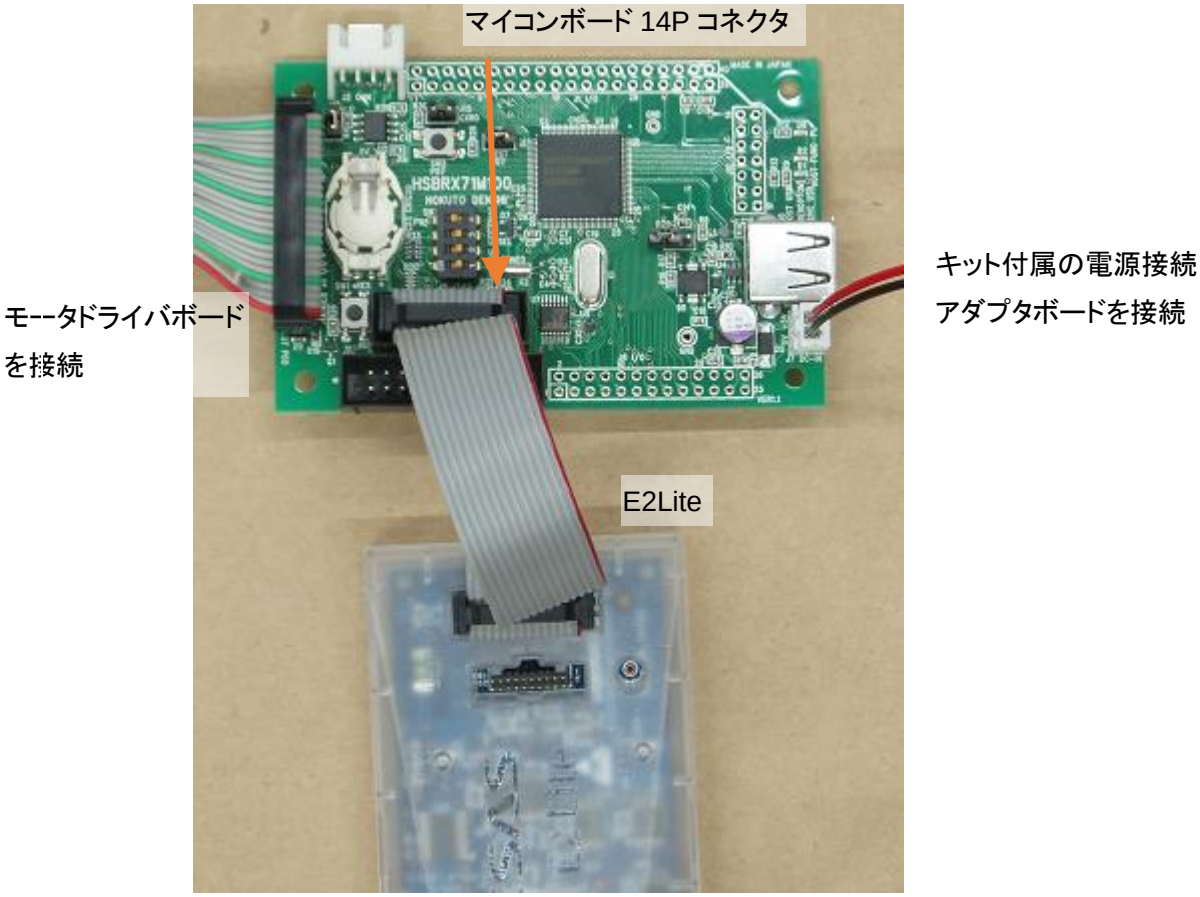

RX71M_BLMKIT_TUTORIAL1.mot がビルドによって生成されたファイル（マイコンの ROM に書き込むファイル）となります。

上記ファイルは、
RX71M_BLMKIT_TUTORIAL1¥DefaultBuild¥RX71M_BLMKIT_TUTORIAL1.mot
に出力されます。

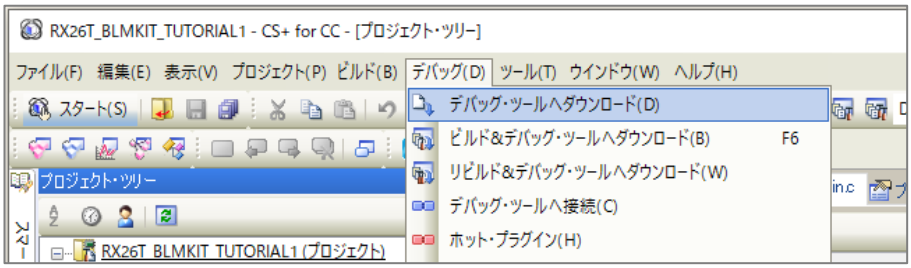
次に、このファイルをマイコンボードに書き込む方法です。

(1)デバッガ接続

E2Lite, E2, E1, E20 をお持ちであれば、デバッガ接続を行えばビルドによって生成されたプログラムをマイコンに書き込んで実行する事ができます。

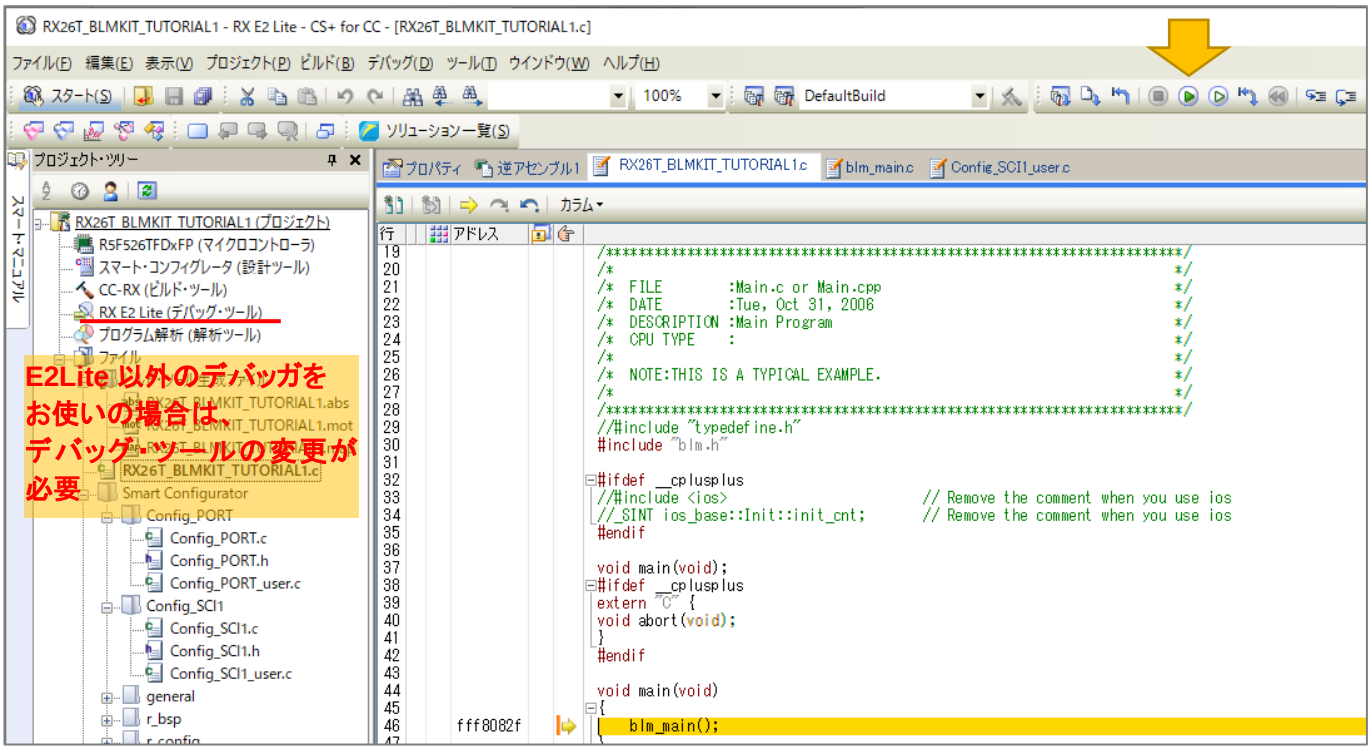



デバッガをマイコンボードの 14P コネクタ(J5)に接続。

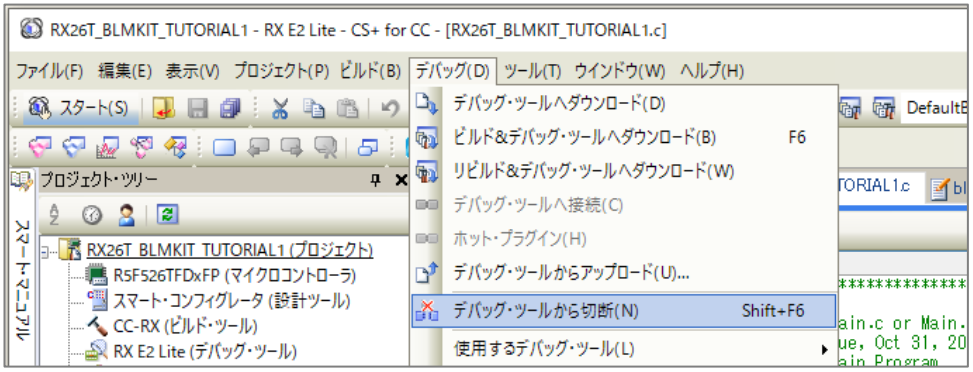



デバッグ－デバッグ・ツールへダウンロード

プログラムの実行を進める



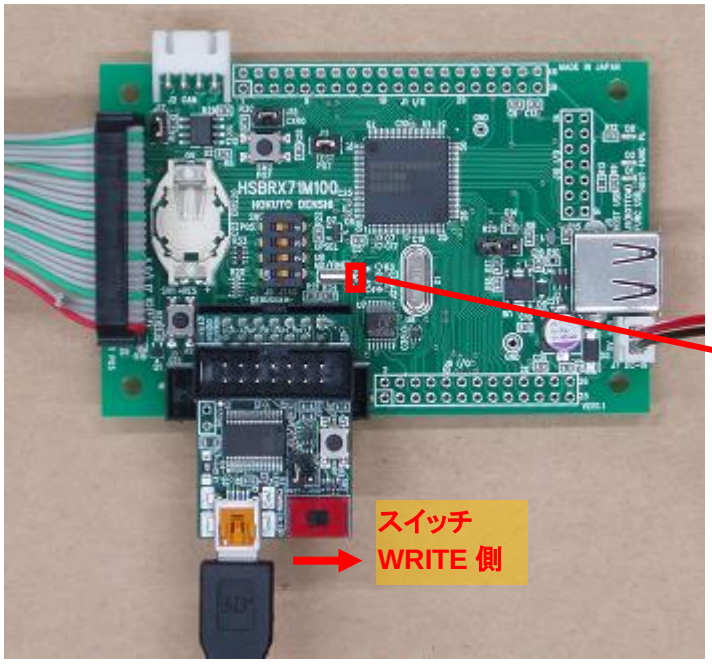

動作確認後、電源を落とす前に



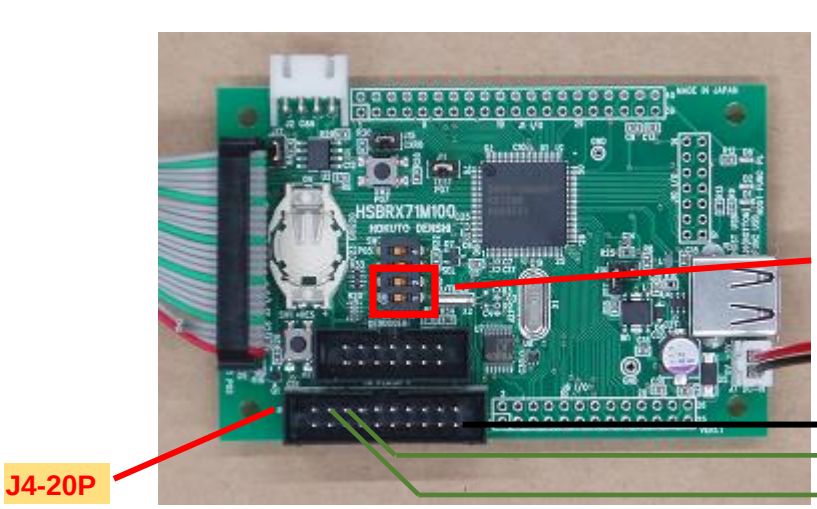

デバッグ－デバッグ・ツールから切断

を行ってから、デバッガの取り外しや電源断を行ってください。

(2)RenesasFlashProgrammer を使用した書き込み




USB-ADAPTER-RX14 を使用する場合




市販の USB-Serial 変換機器を使用する場合

マイコンボードにプログラムを書き込む方法として、RenesasFlashProgrammer（以下 RFP）を使う方法もあります。PC とマイコンボードの接続は、

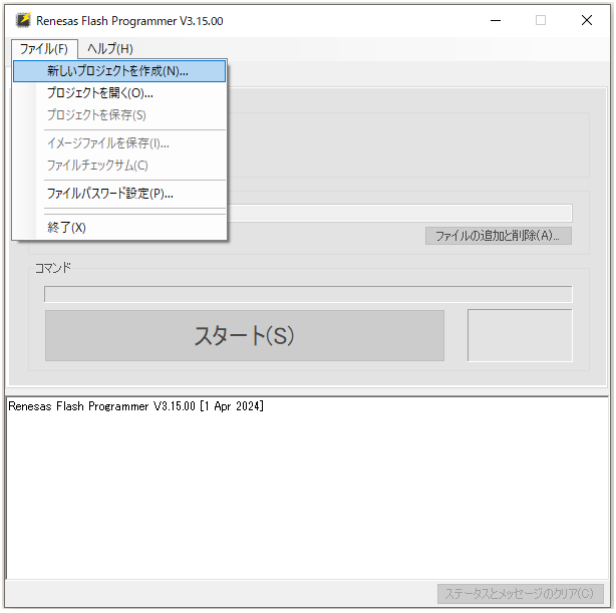
・USB-ADAPTER-RX14（当社製オプションボード）
・USB-Serial 変換機器（市販のもの、0-5V の信号を送受信可能なもの）
・デバッガ(E2Lite, E2, E1, E20)
のいずれかで行ってください。

USB-ADAPTER-RX14 を使用する場合は、スイッチを WRITE 側に設定する必要があります。

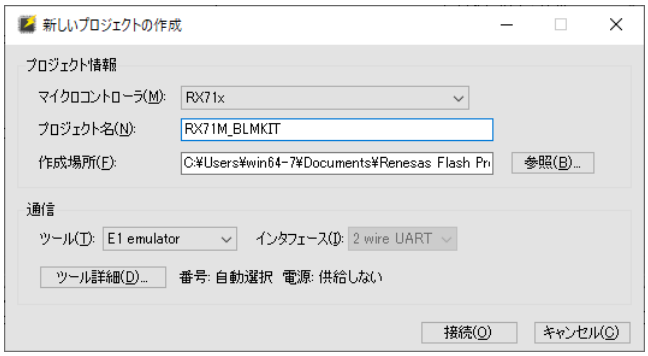
市販の USB-Serial 変換機器を使用する場合は、SW3(DIP-SW)の 1,2 を ON 側に設定する必要があります。

※RenesasFlashProgrammer での書き込みの際、デバッガ（ルネサス E1, E20, E2, E2Lite）を使用する事も可能です

RFP を起動する。




ファイル－新しいプロジェクトを作成



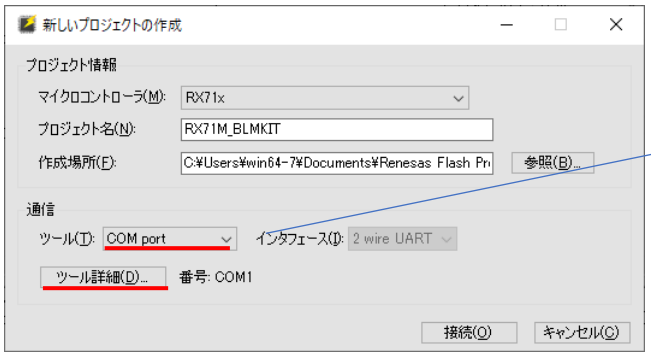

マイクロコントローラ　RX71x を選択

プロジェクト名　任意の名称を入力

ツール　デバッガを使用する場合は使用しているデバッガを選択

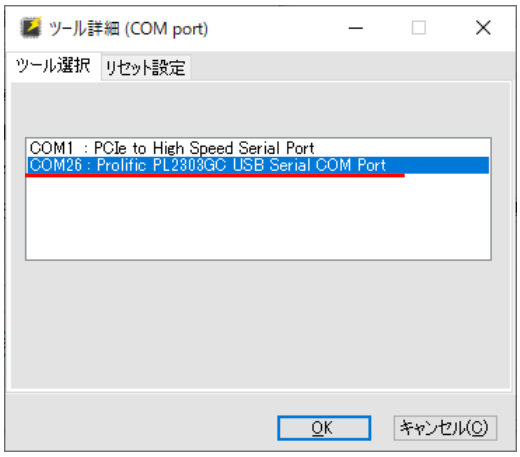
USB-ADAPTER-RX14 または USB-Serial 変換機器を使用する場合は COM port を選択

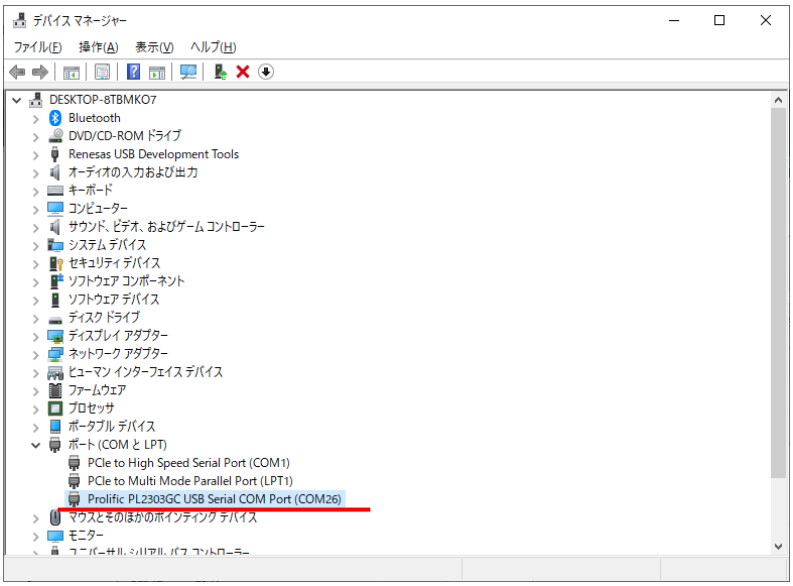
以下、USB-ADAPTER-RX14 を使う前提で説明します。



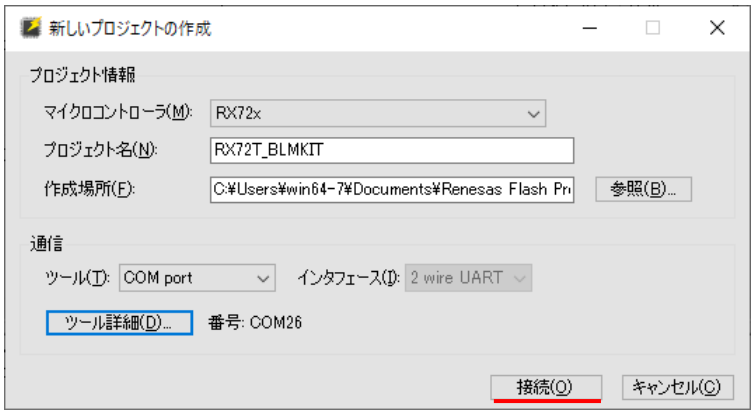

COM port を選択

ツール詳細 を押す

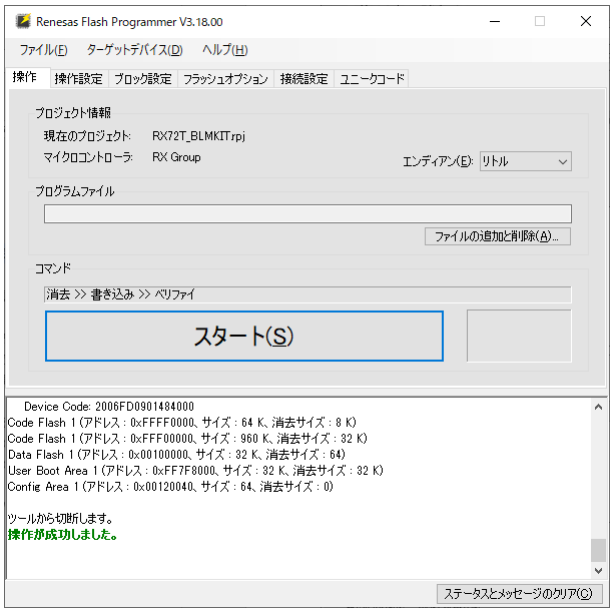



USB-ADAPTER-RX14 の場合は、「Prolific PL2303GC USB Serial Comm Port」として見えている、COM ポート番号を選択。(COM ポート番号か不明な場合は、USB ケーブルを抜いた際にデバイスマネージャ上で見えなくなるデバイスを選択してください。)



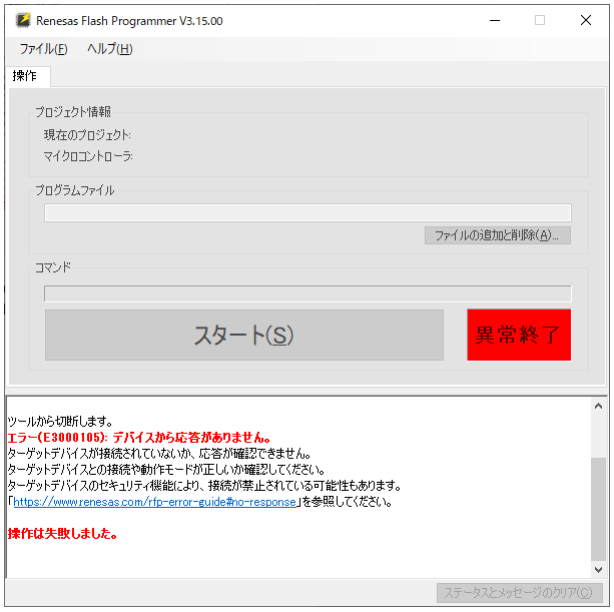

接続ボタンを押す




接続が成功しました　となれば問題ありません。

－エラーとなった場合－

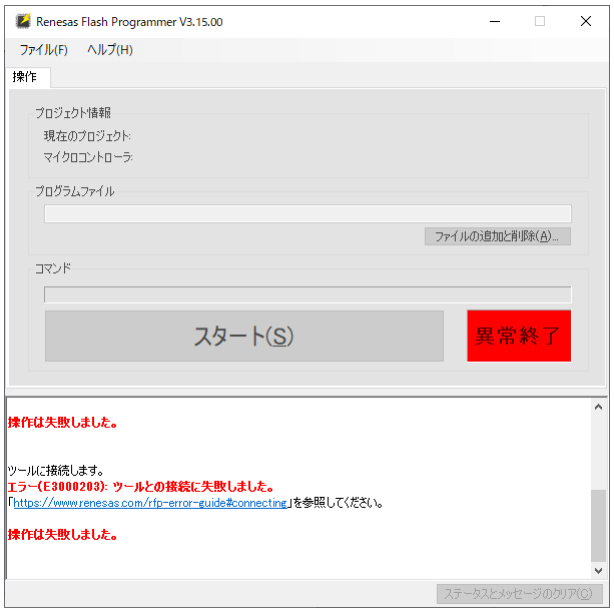
・デバイスから応答がありません




・USB-ADAPTER-RX14 のスイッチが WRITE 側になっている場合は、マイコンをリセット（マイコンボードの SW1 を押す、もしくは USB-ADAPTER-RX14 上のプッシュスイッチを押す）してください
（電源を一度落として再投入する事でも可）

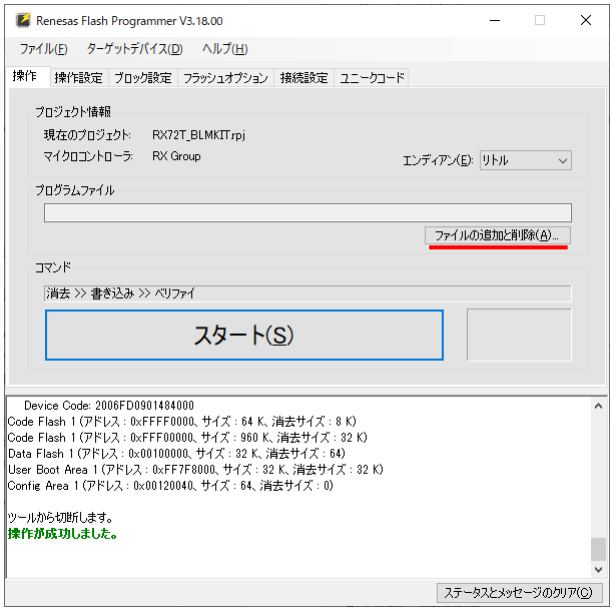
・COM ポート番号が間違えていないかを確認してください

・ツールとの接続に失敗しました

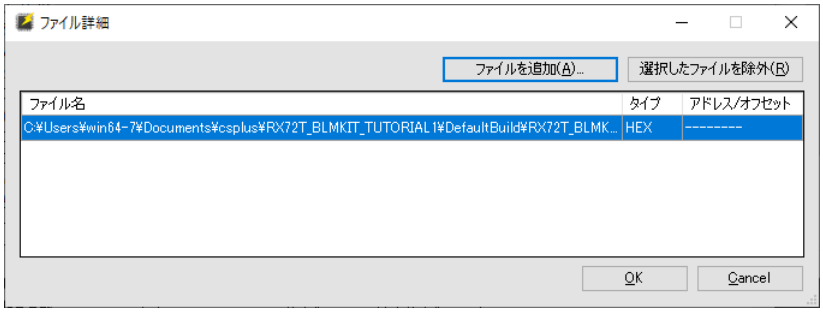



・COM ポート（この例では COM26）で、端末ソフト（teraterm 等）が開いていないか、COM26 を使用しているアプリケーションが存在しないかを確認してください（端末ソフトは閉じてください）

以下、接続が成功した場合の続きです。




ファイルの追加と削除　を押す。

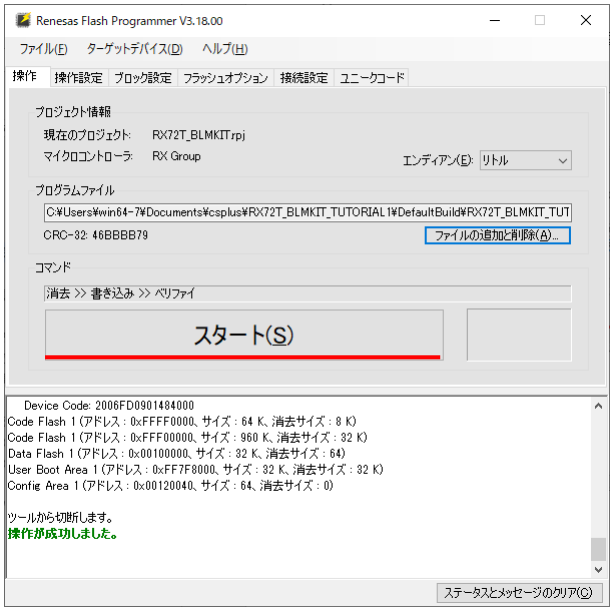



ファイルを追加 を押して、ビルドで生成した（DefaultBuild 以下の）mot ファイルを選択。
OK を押す

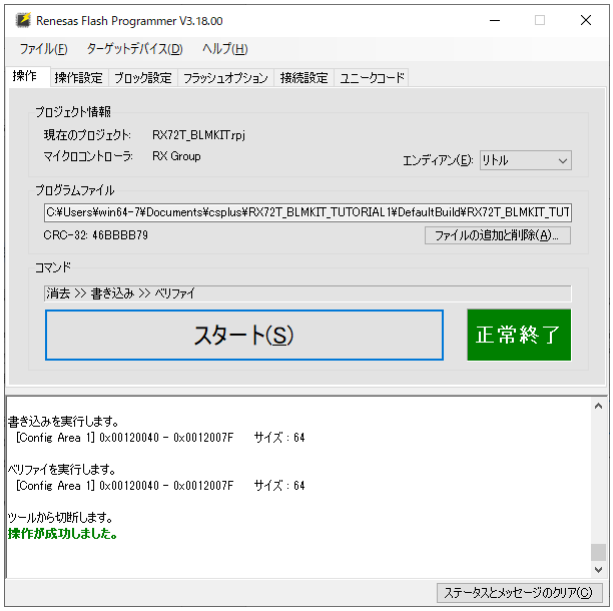
ここで、マイコンのリセットを行ってください。

・マイコンボード上の SW1 を押す
・USB-ADAPTER-RX14 上のプッシュスイッチを押す
・電源を一度落として再投入する

のいずれかを行う。（※デバッガをお使いの場合はリセットは不要です）




スタートを押す。




操作が成功しました、正常終了となれば問題ありません。

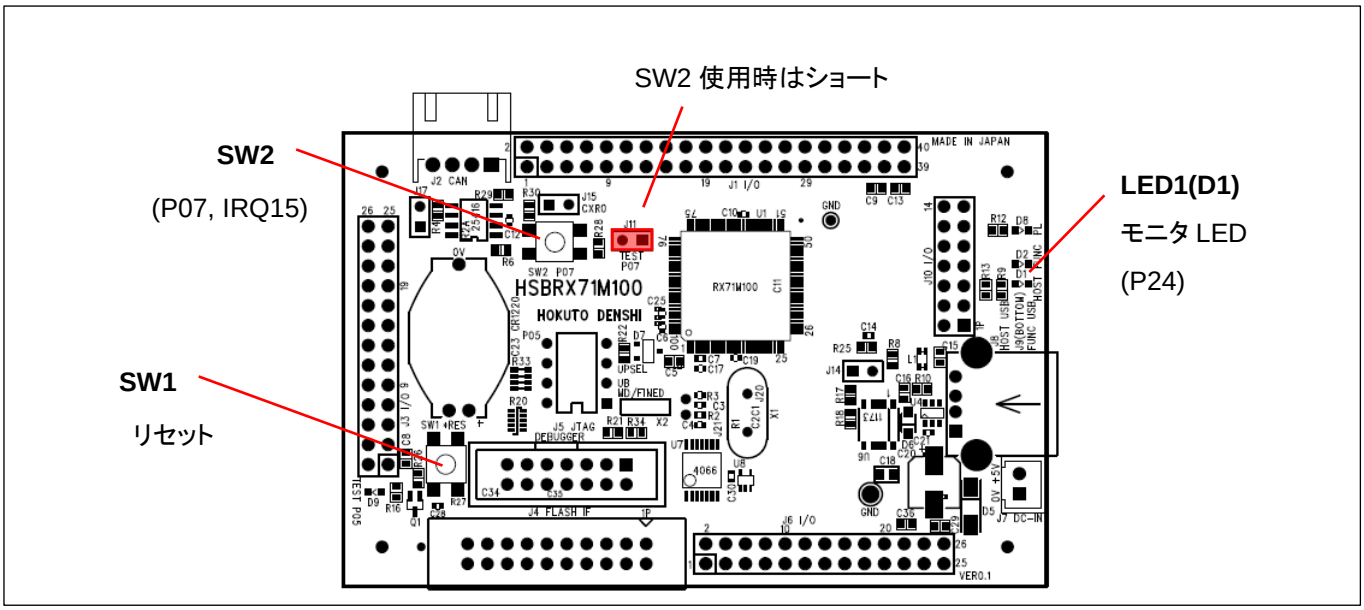
USB-ADAPTER-RX14 をお使いの場合は、スイッチを RUN 方向に切り替えてマイコンをリセットしてください。

USB-Serial 変換機器を使用している場合は、SW3 の 1,2 のスイッチを OFF 方向に設定してマイコンをリセットしてください。

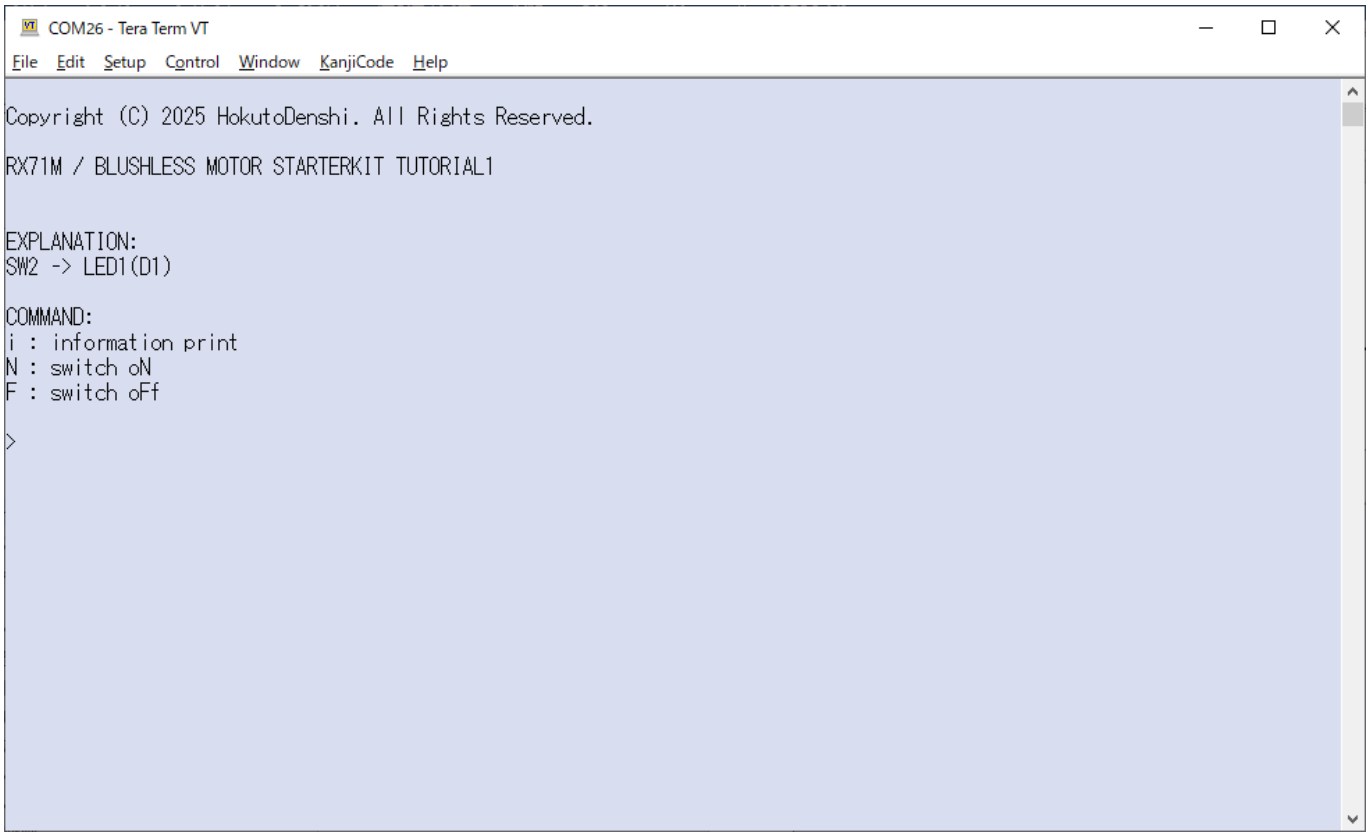
デバッガを使用して書き込みを行った場合は、デバッガを取り外してください。

（デバッガ接続でダウンロードした場合は、実行ボタン（もしくはキーボード F5）を押してください。）

マイコンボード上の SW2（プッシュスイッチ）を押した際に、マイコンボード上の D1(LED1)の ON/OFF が切り替われば、プログラムの書き込みと実行は成功です。



USB-ADAPTER-RX14（もしくは USB-Serial 変換機器）をお使いの場合は、端末ソフト（teraterm 等）を開いて UART 通信の動作を確認してください。




端末は
速度　115,200bps, 8 ビット,  パリティなし, 1 ストップビット
の設定で開いてください。

マイコンをリセットした際に、端末に上記表示が出力されれば、マイコン→PC 間の UART 通信は問題ありません。
端末からキーボードで i を入力してみてください。

```
>
SW -> NOT pressed
SW flag -> OFF
```

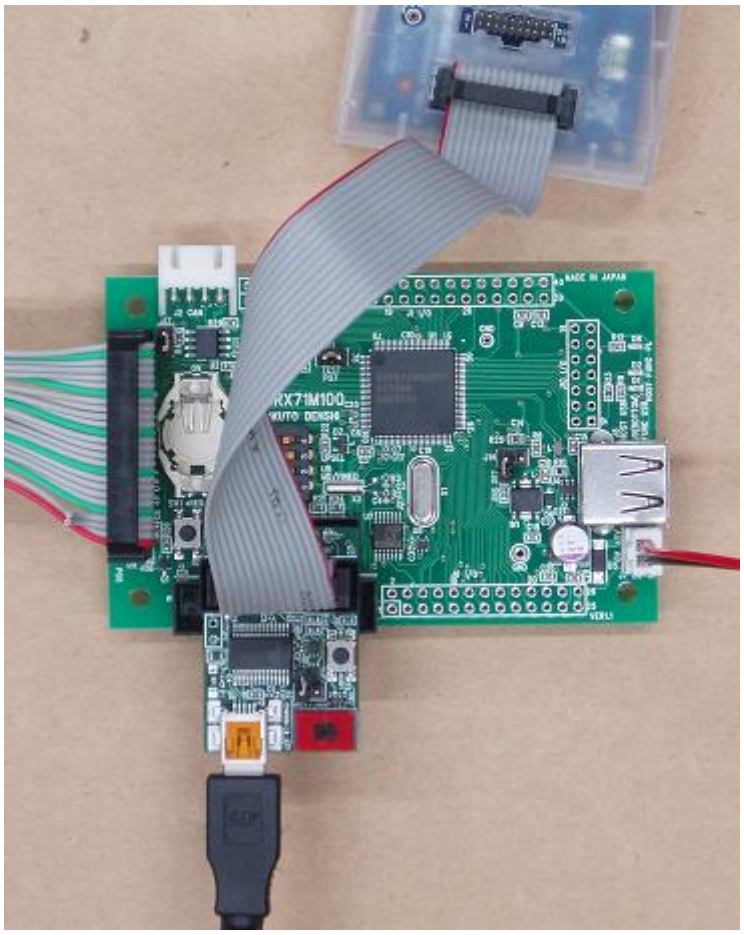
いま SW2 を押しているか否か

SW2 を押す度に ON/OFF が切り替わるフラグ変数の状態

i を入力する度に、SW の状態が表示されれば、PC→マイコンの UART 通信も問題ありません。

以降のチュートリアルでは、UART 通信を使用してモータの回転数を表示させたり、キーボードからの入力で動作を変えられたりするものがありますので、USB-ADAPTER-RX14（もしくは市販の USB-Serial 変換機器）が使える状態となっている事が望ましいです。

・USB-ADAPTER-RX14 とデバッガの接続



USB-ADAPTER-RX14 は、デバッガと同時使用が可能です（デバッグを行いつつ、UART で PC との通信可）。

USB-ADAPTER-RX14 上の 14P コネクタにデバッガを接続してください。

※デバッガは FINE 接続としてください（JTAG 接続の場合は、USB-ADAPTER-RX14 とは併用できません）

TUTORIAL1 のプログラムの動作に関して簡単に説明致します。

blm_main.c

```
void blm_main(void)
{
    //ブラシレスモータメイン関数

    unsigned char xc;
    unsigned short ret;

    //IRQ15（プッシュスイッチ）割り込み動作開始
    R_Config_ICU_IRQ15_Start();

    sci_start();

    sci_write_str("¥nCopyright (C) 2025 HokutoDenshi. All Rights Reserved.¥n¥n");
    sci_write_str("RX71M / BLUSHLESS MOTOR STARTERKIT TUTORIAL1¥n");

    sci_write_str("¥n");
    sci_write_str("¥nEXPLANATION:¥n");
    sci_write_str("SW2 -> LED1(D1)¥n");

    sci_write_str("¥nCOMMAND:¥n");
    sci_write_str("i : information print¥n");
    sci_write_str("N : switch oN¥n");
    sci_write_str("F : switch oFf¥n");
    sci_write_str("¥n>");
```

先頭部分は、

・変数の定義

・UART 通信の開始　sci_start()

・メッセージの表示

を行っています。

```
while(1)
{
    //キーボードからの読み取り
    ret = sci_read_char(&xc);
    if (ret != SCI_RECEIVE_DATA_EMPTY)
    {
        switch(xc)
        {
            case 'i':
                sci_write_str("¥nSW -> ");

                if (BLM_SW_1_PORT == SW_ON)
                {
                    sci_write_str("pressed¥n");
                }
                else
                {
                    sci_write_str("NOT pressed¥n");
                }

 （中略）
            break;
        }
    }
```

次に、キーボードからの入力を読み取り、入力された文字が'i'であれば SW の状態を表示する様にしています。

```
//SWとLEDの連動
if (g_sw_flag == SW_ON) BLM_LED_1_PORT = LED_ON;
else BLM_LED_1_PORT = LED_OFF;
```

スイッチと LED の ON/OFF を連動させる部分です。(g_sw_flag 変数と LED が連動)

blm_intr.c

```
void blm_interrupt_irq15(void)
{
    //IRQ15割り込み

    //g_sw_flagをトグルさせる

    if (g_sw_flag == SW_OFF)
    {
        g_sw_flag = SW_ON;
    }
    else
    {
        g_sw_flag = SW_OFF;
    }
}
```

g_sw_flag 変数は SW2 が押された際に入る割り込み(IRQ15)の度に、SW_OFF(1)と SW_ON(0)を切り替えます。キーボードからも、g_sw_flag 変数を操作できるようになっており、

N (switch ON)

F (switch OFF)

キーボードから、N と F で、g_sw_flag が ON/OFF に切り替え可能です。(SW2 はトグル動作となり、N, F コマンドはスイッチを ON する、OFF する、動作です。

blm.h(定数定義)

```
/*----------------------------------------------------------------------
定数定義
----------------------------------------------------------------------*/
#define BLM_LED_1_PORTPORT2.PODR.BIT.B4

#define LED_OFF 0
#define LED_ON  1

#define BLM_SW_1_PORTPORT0.PIDR.BIT.B7

#define SW_ON 0
#define SW_OFF 1
```

TUTORIAL1 では、マイコンボードへのプログラムの書き込み及び、汎用 I/O の入出力とスイッチが押された場合の割り込みの処理、UART 通信(端末への情報表示と、端末からキーボードの読み取り)が行えるようになるのが目的です。

・汎用 I/O への出力

P24=H 出力(P24:LED1(D1), LED が点灯)

→ PORT2.PODR.BIT.B4 = 1;

※P24 と LED1(D1)は直接は接続されておらず、USB のパワースイッチ経由での接続となります

P24=L 出力(LED が消灯)

→ PORT2.PODR.BIT.B4 = 0;

・スイッチが押された事を検知

```
if (g_sw_flag == SW_OFF)
{
    //スイッチが OFF に切り替わった場合の処理
}
else
{
    //スイッチが ON に切り替わった場合の処理
}
```

・端末への文字出力

```
sci_write_str("message¥n"); //¥n は改行
```

・端末からの文字入力

```
unsigned char xc;
ret = sci_read_char(&xc);  //関数の戻り値(ret)が SCI_RECEIVE_DATA_EMPTY の場合はキーボードからの入力なし
```

キーボードからの文字入力があると、xc に文字コード（i の場合は 0x69）が入ります。

以上で、最初のチュートリアルは終了となります。

スマート・コンフィグレータの設定からプログラムのビルド、書き込み、実行とプログラム開発の一通りのフローを経験するチュートリアルですので、RX でのプログラム開発を行った事があれば、本チュートリアルはスキップして頂いて問題ありません。

・チュートリアル 1 での端子設定

| 端子名 | 役割 | 割り当て | 備考 |
|---|---|---|---|
| P24 | LED1(D1) | 出力（初期値 L） | LED，初期状態で LED は消灯<br>※USB パワースイッチ経由での接続 |
| P07 | SW2 | 周辺機能(IRQ15) | マイコンボード上のプッシュスイッチ |
| P26 | UART 通信（送信） | 周辺機能(SCI1) | TXD1 として設定 |
| P30 | UART 通信（受信） | 周辺機能(SCI1) | RXD1 として設定 |

・チュートリアル 1 での使用コンポーネント

| コンポーネント名 | リソース | 用途 | 備考 |
|---|---|---|---|
| r_bsp | | 基本的なマイコン設定 | 初期状態で追加済み |
| Config_ICU | ICU | 端子割り込み | SW2 が押された際に割り込みが掛る設定 |
| Config_PORT | PORT | I/O ポート | |
| Config_SCI1 | SCI1 | UART 通信 | |

## 1.2. モータに電流を流す

参照プロジェクト:RX71M_BLMKIT_TUTORIAL2

モータドライバボードと、マイコンボードは接続してください。

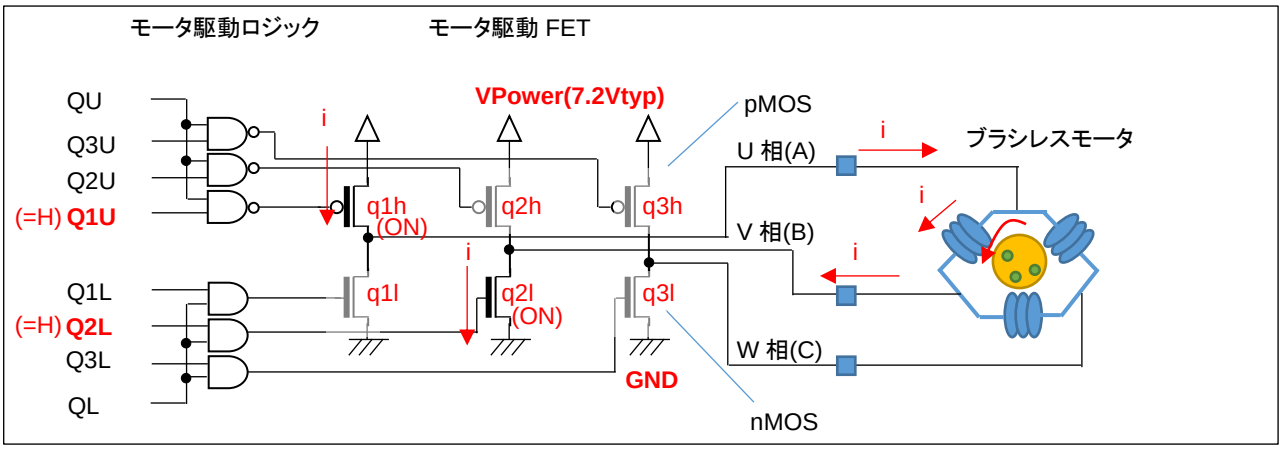
SW2 を押すと、接続したモータドライバボードに、モータに電流を流す信号が送られます。モータに電流を流す信号が送られる際、0.5 秒毎に LED1 の点灯・消灯が切り替わります。SW2 をもう一度押すと信号は止まります。(再度 SW2 を押すと、信号が送られる様になります。SW2 は、信号 ON/OFF のトグル動作となります。)

信号が送られている状態、LED1 の点灯・消灯が切り替わるタイミングで、モータから「カチッ」という音が聞こえてくると思います。このとき、モータに電流を流す制御を行っています。モータは、U(A), V(B), W(C)の 3 本のワイヤでモータドライバボードとつながっています。

※モータ側では、端子に A, B, C と書かれていますが、以降の解説では U, V, W 相という記載を用います、U=A, V=B, W=C です。

3 本のワイヤに対し、モータドライバボード上で、U に H 側の電源(7.2V)を接続し、V に L 側の電源(GND=0V)を接続した場合モータ内部で、U 端子から V 端子に対して電流が流れます。単純に、3 本のワイヤ(UVW)のうち 2 本をアクティブ(片方を電源、もう一方を GND に接続)とする場合、電流の流れ方としては 6 通りあります。

・U 相から V 相に電流を流す設定



トランジスタの駆動パターンですが、モータに電流を流す際は、

| | | | |
|---|---|---|---|
| H 側 | U 相(q1h) | V 相(q2h) | W 相(q3h) |
| L 側 | U 相(q1l) | V 相(q2l) | W 相(q3l) |

合計 6 個のトランジスタの内、H 側 1 箇所、L 側 1 箇所を ON させます。例えば、

q1h と q2l を ON させた場合、Vpower→モータの U 相端子→モータの V 相端子→GND に電流が流れます。…(a)

また、

q2h と q1l を ON させた場合、Vpower→モータの V 相端子→モータの U 相端子→GND に電流が流れます。…(b)

(a)と(b)では、電流が逆方向となります。

q1h と q1l（U 相の H 側と L 側）を ON させる制御は禁止です（モータには電流が流れず、電源間がショートする）。

禁止の組み合わせを省くと、下記の 6 通りとなります。

| | (1) | (2) | (3) | (4) | (5) | (6) |
|---|---|---|---|---|---|---|
| H 側 | q1h=ON | q1h=ON | q2h=ON | q2h=ON | q3h=ON | q3h=ON |
| L 側 | q2l=ON | q3l=ON | q3l=ON | q1l=ON | q1l=ON | q2l=ON |
| 電流の方向 | U→V | U→W | V→W | V→U | W→U | W→V |

上記(1)~(6)の様に制御する事により、U, V, W の 3 相の内 2 本にどちらの向きでも電流を流す事が可能です。

本チュートリアルプログラムでは、6 通りの電流を 500ms 毎に切り替えて流すようにしています。

なお、電流は 500ms 間流すわけではなく、LED の点灯パターンが変化した瞬間 50us の間流す様にしています。

モータに電流を流しているときに、モータの軸に触ると、「カチッ」と音がするタイミングで、わずかに動く感じが指に伝わってくるかと思います。電流が流れる時間は、一瞬のため、モータの軸が動くまではいきませんが、電流を流す時間を増やすとモータの軸の動きが大きくなるというイメージです。また、6 通りの電流の切り替えのタイミング（本チュートリアルでは 500ms）は、モータの回転数に影響するイメージです。

プログラムでは、

・電流の流す方向の切り替えタイミング(500ms)

・電流を流す時間(50us)

を変更する事が出来ます。

blm_main.c 内で、

```
void blm_main(void)
{
    //ブラシレスモータメイン関数

    const float motor_on_time = 50.0e-6f;//モータ通電時間 50[us]（デフォルト）
    /*
    モータの通電時間が長い場合、過大な電流が流れますので、最大でも100[us]程度としてください
    */

    const float motor_rotation_time = 500.0e-3f;//モータ回転周期 500[ms]（デフォルト） 回転周期の1/6の値
（1/6回転に掛かる時間）

    unsigned short cmt0_counter_value;//モータ通電時間のカウンタ設定値
    unsigned short cmt1_counter_value;//モータ回転周期のカウンタ設定値

    unsigned short sw;

    //モータ通電時間（デフォルト50us）のカウンタ値の算出
    cmt0_counter_value = (unsigned short)(motor_on_time / (1.0f/(PCLKB * 1e6f) * 8.0f)) - 1;//PCLKB, 8
分周設定

    //モータ回転周期（デフォルト500ms）のカウンタ値の算出
    cmt1_counter_value = (unsigned short)(motor_rotation_time / (1.0f/(PCLKB * 1e6f) * 512.0f)) - 1;
//PCLKB, 512分周設定

    //モータ通電時間（デフォルト50us）の設定
    CMT0.CMCOR = cmt0_counter_value;

    //モータ回転周期（デフォルト500ms）の設定
    CMT1.CMCOR = cmt1_counter_value;
```

・電流を流す時間：50.0e-6f の部分

・電流の切り替えタイミング：500.0e-3f の部分

上記部分を変えると、タイミングを変えることができますので試してみてください。

（motor_on_time の方は、あまり大きな値にしないでください。～100us 以下を目安に設定する事が推奨です。）

（※モータ内部はコイル（インダクタンス）で構成されており、長時間（＝DC 的に）電圧を印加すると、コイルのインピーダンスが下がり過大な電流が流れるためです）

本プログラムでは、2 つのタイマ（50us と 500ms）を使っています。50us の方は CMT0、500ms の方は CMT1 です。

| タイマ | 用途 | 設定時間 | クロック源 | 分解能 | カウンタ | 最大設定可能時間 |
|---|---|---|---|---|---|---|
| CMT0 | 通電時間 | 50us | PCLKB(60MHz)/8 | 133ns | 16bit | 8.74ms |
| CMT2 | 電流切り替わりタイミング | 500ms | PCLKB(60MHz)/512 | 8.53us | 16bit | 559.2ms |

CMT（コンペアマッチタイマ）は、汎用的に使えるタイマで、カウンタは 16bit です。クロック源は PCLKB を分周したクロックです。

PCLKB をベースにして、分周比は最大 512、カウンタは 16bit($2^{16}$=65536)ですので、設定可能な最大の周期は

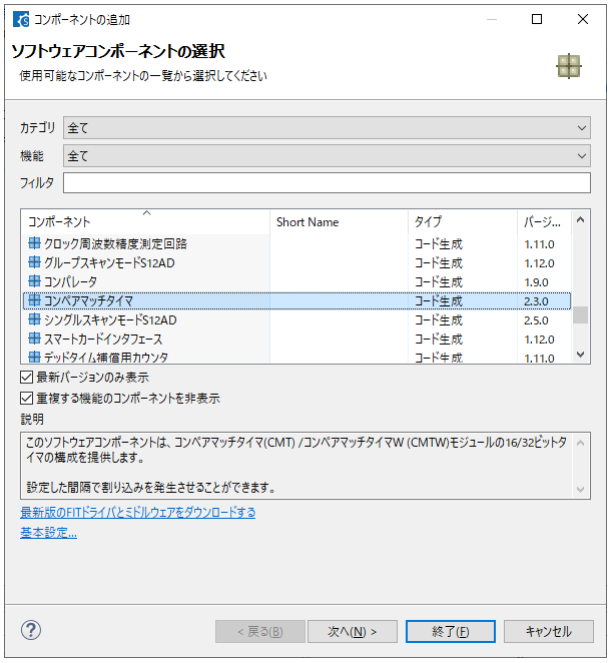
16.67ns × 512 × 65536 = 559.2ms (PCLKB=60MHz)

となります。

モータ制御プログラムでは、タイマは必ず使用する機能となりますので、マイコンのハードウェアマニュアルを参照し、タイマの分解能（1 カウントの時間）や、設定範囲から、適切なタイマを選択していく事となります。
（本チュートリアルでは、CMT を使っていますが、以降のチュートリアルでは別なタイマも使用しています。）

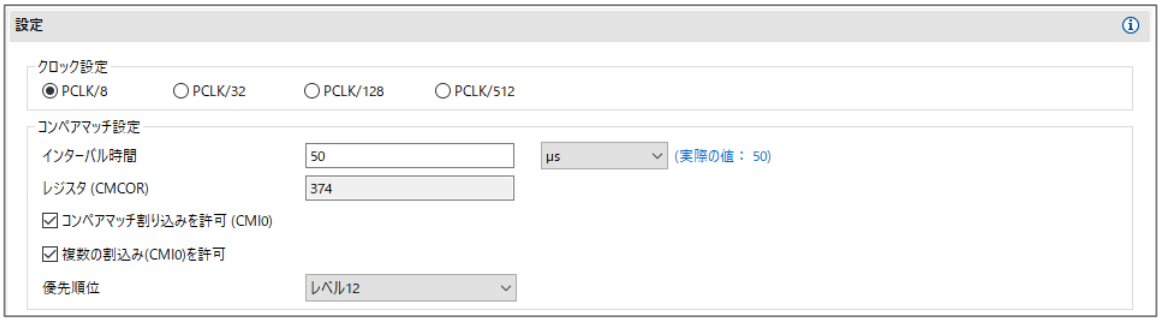
モータに電流を流す処理は、電流の方向を設定後、モータに通電し、タイマ(CMT0=50us)時間経過後に電流を止めるというものです。

タイマ(CMT)の設定は、スマート・コンフィグレータを使用して行っています。コンポーネントの追加で、

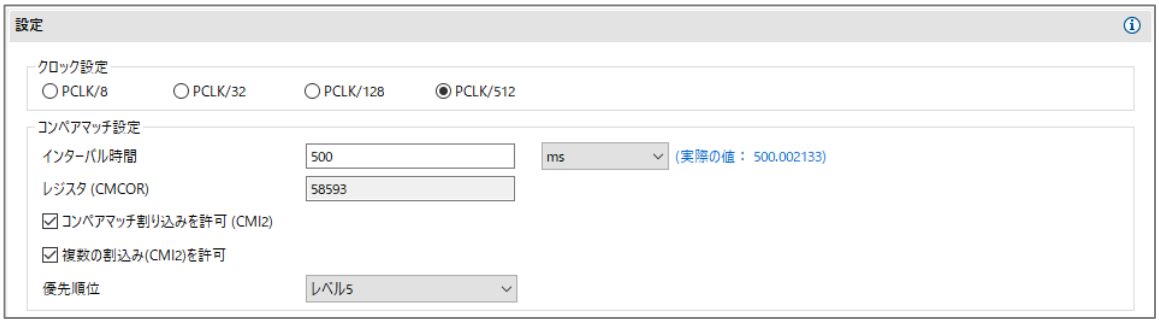



コンペアマッチタイマを選んでください。

・CMT0 の設定




・CMT2 の設定




クロック（分周比）を選び、設定する時間を入力。コンペアマッチ割り込みを許可。

・CMT0 を、周期 50us に設定し、50us 毎に割り込みを行う
・CMT2 を、周期 500ms に設定し、500ms 毎に割り込みを行う

設定が上記となります。

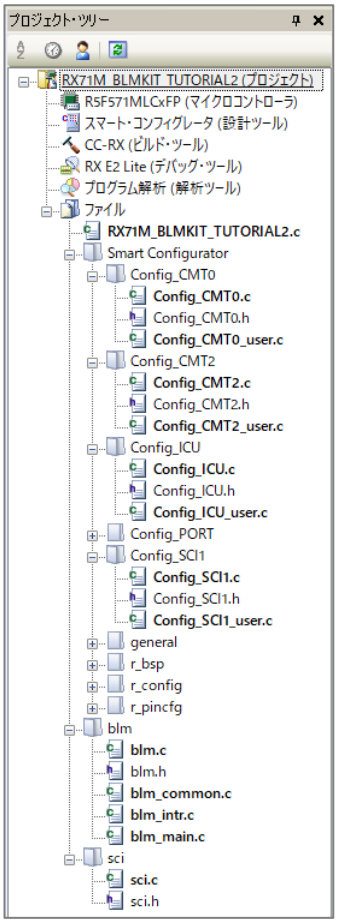
スマート・コンフィグレータ環境下でタイマを使用する場合、GUI で周期等設定が行えますので、タイマ機能を制御するプログラムコードを書き下す必要はありません。

上記で設定しているのは初期値ですので、50us や 500ms という時間を変える場合、
・前出のプログラムコードを変更する
・初期値を GUI 上で変更する(*1)
のどちらでも有効です。

(*1)GUI で時間を設定する場合は、プログラムコードの
CMTn.CMCOR = 値
の部分はコメントアウトしてください。

※スマート・コンフィグレータの設定を変更した場合「コード生成」のボタンを押すのを忘れない様にしてください
（このボタンを押した際に、スマート・コンフィグレータで生成されるプログラムコードが更新されます）

チュートリアル 2 のファイル構成は以下の様になります。




CMT0, CMT2 を追加したので、チュートリアル 1 に対し Config_CMT0, Config_CMT2 が増えています。

blm 以下ですが、

| ファイル名 | 内容 | |
|---|---|---|
| blm.c | モータ制御プログラム関数 | チュートリアルによって変化 |
| blm.h | モータ制御プログラム共通ヘッダ | |
| blm_common.c | モータ制御プログラム関数、共通部分 | チュートリアル非依存の関数 |
| blm_intr.c | モータ制御プログラム割り込み関数 | |
| blm_main.c | モータ制御プログラムメインプログラム | |

となっており、この構成は今後も共通です。

Config_CMT0_user.c は、50us 毎に呼び出される割り込み処理を記載するファイルです。同様に、Config_CMT2_user.c は、500ms 毎の割り込み処理を記載します。

| タイマ | タイミング | 処理内容 |
|---|---|---|
| CMT0 | 50us 周期 | モータの通電時間 |
| CMT2 | 500ms 周期 | モータの電流方向の切り替え |

本チュートリアルでは、2 つのコンペアマッチタイマ(CMT)を使用しています。CMT0 を 50us 周期、CMT2 を 500ms 周期で使用するのは、今後のチュートリアルでも同様です。

・Config_CMT0_user.c

```
/***********************************************************************************************
**********************
Includes
***********************************************************************************************
*********************/
#include "r_cg_macrodriver.h"
#include "Config_CMT0.h"
/* Start user code for include. Do not edit comment generated here */
#include "blm.h"
/* End user code. Do not edit comment generated here */
#include "r_cg_userdefine.h"

（中略）

/***********************************************************************************************
**********************
* Function Name: r_Config_CMT0_cmi0_interrupt
* Description  : This function is CMI0 interrupt service routine
* Arguments    : None
* Return Value : None
***********************************************************************************************
*********************/

#if FAST_INTERRUPT_VECTOR == VECT_CMT0_CMI0
#pragma interrupt r_Config_CMT0_cmi0_interrupt(vect=VECT(CMT0,CMI0),fint)
#else
#pragma interrupt r_Config_CMT0_cmi0_interrupt(vect=VECT(CMT0,CMI0))
#endif
static void r_Config_CMT0_cmi0_interrupt(void)
{
    /* Start user code for r_Config_CMT0_cmi0_interrupt. Do not edit comment generated here */
    blm_interrupt_cmt0();
    /* End user code. Do not edit comment generated here */
}
```

Config_CMT0_user.c には、赤字の 2 行を追加しています。50us 毎に、

r_Config_CMT0_cmi0_interrupt()

が実行されますので、その中で
blm_interrupt_cmt0(); →関数の実体は、blm_intr.c内に記載
を呼ぶ様にしています

（同様に Config_CMT2_user.c には、blm_interrupt_cmt2()を追加しています。）

・blm_intr.c（モータ制御割り込み処理を記載したソース）

```
void blm_interrupt_cmt0(void)
{
    //50us割り込み

    //既定の時間経過するとモータに流れる電流を止める

    blm_drive[BLM_CH_1](BLM_OFF_DIRECTION);

    R_Config_CMT0_Stop();//50usタイマは停止
}

void blm_interrupt_cmt2(void)
{
    //500ms割り込み

    //モータに印加する電流の方向を切り替える

    static unsigned short current_pattern = 1;//初期値

    //電流の向きに応じて、マイコンボード上のLED(LED1, D1)を点滅させる
    switch (current_pattern)
    {
        case 1:
            if (g_sw_flag == SW_ON) blm_led_change_on(BLM_LED_1);
            //スイッチがONの場合 LED1(D1, USB-HOST LED)点灯
            break;

        case 2:
            blm_led_change_off(BLM_LED_1);//LED1を500ms毎に点滅させる
            break;

        case 3:
            if (g_sw_flag == SW_ON) blm_led_change_on(BLM_LED_1);
            break;

        case 4:
            blm_led_change_off(BLM_LED_1);
            break;

        case 5:
            if (g_sw_flag == SW_ON) blm_led_change_on(BLM_LED_1);
            break;

        case 6:
            blm_led_change_off(BLM_LED_1);
            break;
    }

    blm_drive[BLM_CH_1](current_pattern);

    //切り替えたタイミングで50usタイマをONさせる
    CMT0.CMCNT = 0;
    R_Config_CMT0_Start();

    //current_patternを1-6の順番に切り替えてゆく
    current_pattern++;
    if (current_pattern > 6)
    {
        current_pattern = 1;//6を超えたら1に戻る
    }
}
```

blm_interrupt_cmt0 は、R_Config_CMT0_Start() の 50us 後（CMT0 で設定した時間）に実行される

通電終了

blm_interrupt_cmt2 は、500ms（CMT2 で設定した周期）に 1 回実行される

1→2→3→4→5→6→1 の繰り返し

CMT0 タイマスタート
通電開始

blm_interrupt_cmt2()は、500ms に 1 回定期的に実行されます。blm_interrupt_cmt0()は、CMT0 タイマスタート後 50us 経過後に実行されます。CMT0（50us タイマ）は、blm_interrupt_cmt0 内で停止されます。

blm_drive_[]()関数は、モータに引数に応じた方向に電流を流す制御を行う関数です。

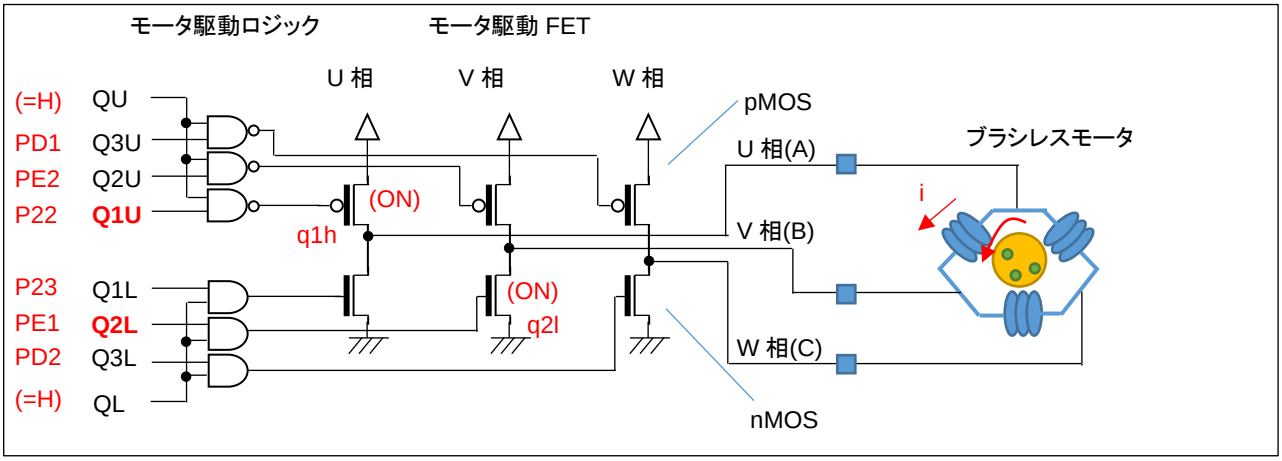
・blm.c

```
void blm_drive_ch1(unsigned short direction)
{
    //ブラシレスモータCH-1制御関数

    //引数
    // direction
    //  OFF_DIRCTION  : 電流OFF
    //  U_V_DIRECTION : U→Vに電流を流す様制御
    //  U_W_DIRECTION : U→Wに電流を流す様制御
    //  V_W_DIRECTION : V→Wに電流を流す様制御
    //  V_U_DIRECTION : V→Uに電流を流す様制御
    //  W_U_DIRECTION : W→Uに電流を流す様制御
    //  W_V_DIRECTION : W→Vに電流を流す様制御

    //戻り値
    // なし

    //P22(Q1U)
    //P23(Q1L)
    //PE2(Q2U)
    //PE1(Q2L)
    //PD1(Q3U)
    //PD2(Q3L)

    switch(direction)
    {
        case BLM_OFF_DIRECTION:
            //P22, P23, PE2, PE1, PD1, PD2 = L
            PORT2.PODR.BYTE &= ~0x0C;
            PORTE.PODR.BYTE &= ~0x06;
            PORTD.PODR.BYTE &= ~0x06;
            break;

        case BLM_U_V_DIRECTION:
            //電流をU→Vに流す設定, P22(Q1U)=H, PE1(Q2L)=H （他はL）
            PORT2.PODR.BIT.B3 = 0;
            PORTE.PODR.BIT.B2 = 0;
            PORTD.PODR.BYTE &= ~0x06;
            PORT2.PODR.BIT.B2 = 1;
            PORTE.PODR.BIT.B1 = 1;
            break;

        case BLM_U_W_DIRECTION:
            //電流をU→Wに流す設定, P22(Q1U)=H, PD2(Q3L)=H
            PORT2.PODR.BIT.B3 = 0;
            PORTE.PODR.BYTE &= ~0x06;
            PORTD.PODR.BIT.B1 = 0;
            PORT2.PODR.BIT.B2 = 1;
            PORTD.PODR.BIT.B2 = 1;
            break;

        case BLM_V_W_DIRECTION:
            //電流をV→Wに流す設定, PE2(Q2U)=H, PD2(Q3L)=H
            PORT2.PODR.BYTE &= ~0x0C;
            PORTE.PODR.BIT.B1 = 0;
            PORTD.PODR.BIT.B1 = 0;
            PORTE.PODR.BIT.B2 = 1;
            PORTD.PODR.BIT.B2 = 1;
            break;

        case BLM_V_U_DIRECTION:
            //電流をV→Uに流す設定, PE2(Q2U)=H, P23(Q1L)=H
            PORT2.PODR.BIT.B2 = 0;
            PORTE.PODR.BIT.B1 = 0;
            PORTD.PODR.BYTE &= ~0x06;
            PORT2.PODR.BIT.B3 = 1;
            PORTE.PODR.BIT.B2 = 1;
            break;
```

```
//モータドライブ電流方向定義
#define BLM_OFF_DIRECTION 0
#define BLM_U_V_DIRECTION 1
#define BLM_U_W_DIRECTION 2
#define BLM_V_W_DIRECTION 3
#define BLM_V_U_DIRECTION 4
#define BLM_W_U_DIRECTION 5
#define BLM_W_V_DIRECTION 6
```

```
        case BLM_W_U_DIRECTION:
            //電流をW→Uに流す設定, PD1(Q3U)=H, P23(Q1L)=H
            PORT2.PODR.BIT.B2 = 0;
            PORTE.PODR.BYTE &= ~0x06;
            PORTD.PODR.BIT.B2 = 0;
            PORT2.PODR.BIT.B3 = 1;
            PORTD.PODR.BIT.B1 = 1;
            break;

        case BLM_W_V_DIRECTION:
            //電流をW→Vに流す設定, PD1(Q3U)=H, PE1(Q2L)=H
            PORT2.PODR.BYTE &= ~0x0C;
            PORTE.PODR.BIT.B2 = 0;
            PORTD.PODR.BIT.B2 = 0;
            PORTE.PODR.BIT.B1 = 1;
            PORTD.PODR.BIT.B1 = 1;
            break;

        default:
            break;
    }
}
```

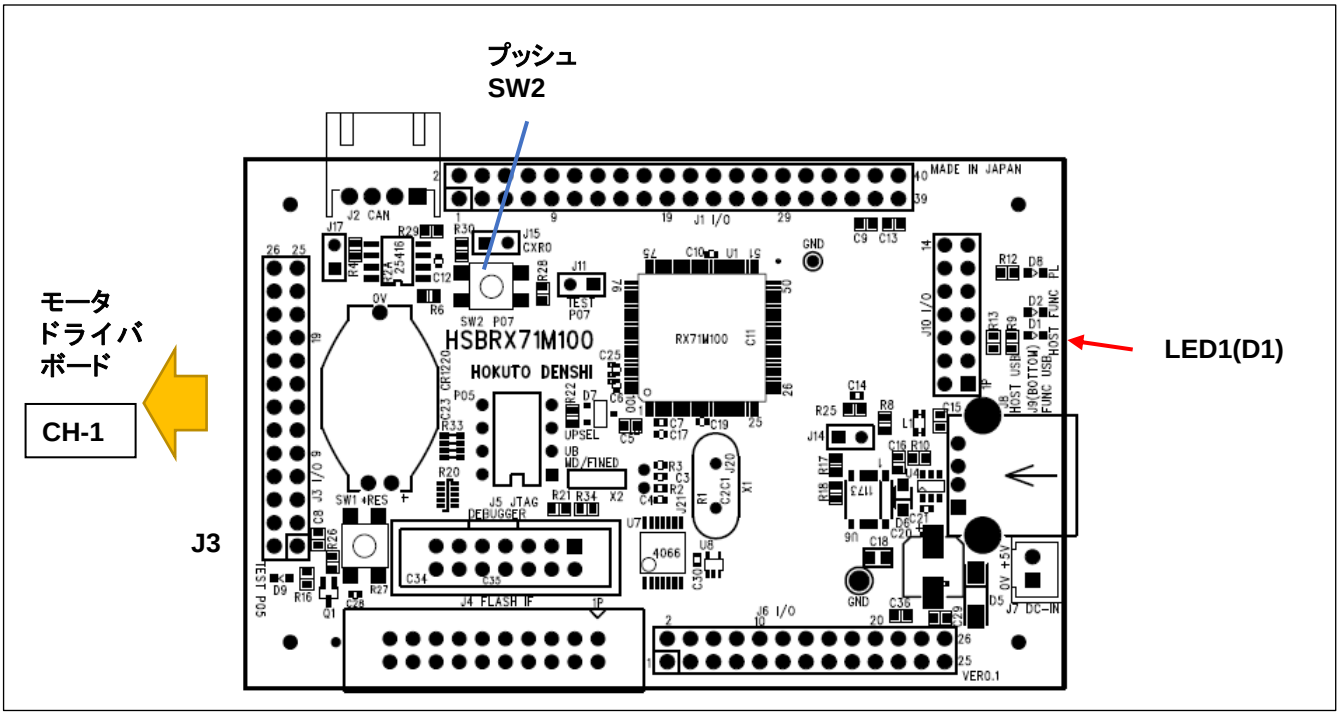
モータドライバボード側では、CH-1 は、P22, P23, PE2, PE1, PD1, PD2 の 6 端子で電流を制御する方式です。P22 と PE1 を H 制御すると、U→V の方向に電流を流す制御となるといった具合です。




P22 は Q1U につながっていて、U 相の H 側を制御しています。PE1 は Q2L につながっていて、V 相の L 側を制御しています。残りも同様で、6 本の信号線が 6 個のモータ駆動 FET を 1 対 1 で制御する形となっています。P22 と PE1 を H とすると、q1h, q2l の 2 つの FET が ON し、モータのコイルを経由して図の i の電流が流れます。U→V 以外の定義も同様に、3 相ある電極の 2 相間に電流を流す設定となります。

なお、SW2 を押して信号を ON にすると、上図の QU=QL=H に制御され、6 本の信号（P22~PD2）が有効になります。SW2 を再度押して信号を OFF にすると、QU=QL=L に制御され、6 本の信号が無効化（P22~PD2 の信号レベルに拘わらず 6 個のモータ駆動 FET が全て OFF 制御）となります。

本プログラムでは、モータの軸が一瞬振れる感覚がありますが、回転には程遠いと思います。モータを回転させる制御まで、あといくつかのステップがあります。ここでは、モータ内の任意のコイルの任意の方向に電流を流す事が、プログラムで行える事を理解してください。




上図で、J3, CH-1 のコネクタにモータドライバモード（その先にモータ）を接続します。このコネクタに接続されたモータを CH-1 と表記します。ブラシレスモータスタータキット(RX71M)では、接続可能なモータは 1 つのみです。

SW2 を押すと、LED1(D1)が点滅して、モータが ON（本チュートリアルでは、モータに」電流を流して、モータからわずかにカチカチ音がするだけですが）します。もう一度 SW2 を押すと、モータは OFF となります。SW2 押す度に、モータの ON/OFF が切り替わる方式です。

また、キーボードからのコマンド、N はモータが ON する動作。F は OFF する動作として働きます。
（SW2 と、キーボードからの入力は、どちらからでも、モータの ON/OFF の切り替えが行えます。）
（この方式は、今後のチュートリアルでも同様です。）

・チュートリアル 2 での端子設定

| 端子名 | 役割 | 割り当て | 備考 |
|---|---|---|---|
| P07 | SW2 | 周辺機能(IRQ15) | マイコンボード上のプッシュスイッチ |
| P21 | QL(CH-1) | 出力 | |
| P22,P23 | Q1U,Q1L(CH-1) | 出力 | |
| P24 | LED1(D1) | 出力（初期値 L） | LED，初期状態で LED は消灯<br>※USB パワースイッチ経由での接続 |
| P26 | UART 通信（送信） | 周辺機能(SCI1) | TXD1 として設定 |
| P30 | UART 通信（受信） | 周辺機能(SCI1) | RXD1 として設定 |
| PD1,PD2 | Q3U,Q3L(CH-1) | 出力 | |
| PD3 | QU(CH-1) | 出力 | |
| PE1,PE2 | Q2L,Q2U(CH-1) | 出力 | |

・チュートリアル 2 での使用コンポーネント

| コンポーネント名 | リソース | 用途 | 備考 |
|---|---|---|---|
| r_bsp | | 基本的なマイコン設定 | 初期状態で追加済み |
| Config_ICU | ICU | 端子割り込み | SW2 が押された際に割り込みが掛る設定 |
| Config_PORT | PORT | I/O ポート | |
| Config_SCI1 | SCI1 | UART 通信 | |
| Config_CMT0 | CMT0 | 50us タイマ | |
| Config_CMT2 | CMT2 | 500ms タイマ | |

※グレーの項目は前チュートリアルから変更なし

－モータ駆動関数の関数ポインタ化に関して－

モータ駆動関数は、
blm_drive_ch1()　[CH-1]
という関数名で作成しています。ブラシレスモータスタータキット(RX71M)は、1 モータ（を想定した作り）のキットなので、ch1 が付く関数のみを用意しています。（_ch2 以降の関数はありません）

本キットのチュートリアルのプログラムでは、blm_drive_ch1()に対して、blm_drive[n]()という別名（関数ポインタ）を与えています。

関数の別名　　関数の実体
blm_drive[0]() → blm_drive_ch1()

上記の様に、関数に別名を設けている理由は、ループで処理を行うためです。

```
for (i=0; i<1; i++)
{
  blm_drive[i](current_direction);
}
```

本キットでは、ch1 しか取り扱いませんのでループで処理する意味がありませんが、他の複数モータを取り扱うキットと共通化のために、ループ回数 1 のループでの処理としています。（他のキットでは、ch 数（＝モータ数）に応じてループ回数が増えます。）

blm_drive 以外の関数も、ループで処理したい関数は同様の構成を取っています。

関数の別名　=　CH 毎の関数名
blm_*xx*[0] = blm_*xx*_ch1　　（*xx* は drive や start, stop など）

という対応となっていて、プログラム内で呼び出す関数が

blm_*xx*_ch1();　　//...(1)

の代わりに

blm_*xx*[BLM_CH1]();　　//BLM_CH1=0　　...(2)

となっているだけで、(1)(2)のどちらでも動作は同じであると認識して頂きたく。

※例えばですが、処理関数に ch の引数を持たせる様に作成する手法（ループで処理するための関数の作り方の例）

```
void blm_drive(int ch)
{
    switch(ch)
    {
        case BLM_CH1:
          //blm_drive_ch1()相当の処理
          break;

         case BLM_CH2:
              //blm_drive_ch2()相当の処理
              break;
```

上記の様に、関数自体にチャネルの引数を持つ様に作るという形でも良いかと思いますが、本キットでは関数自体はチャネル独立で構成して、チャネル独立な関数を関数ポインタ（配列）でまとめる構成としてます。

## 1.3. A/D 変換と PWM を試す

参照プロジェクト:RX71M_BLMKIT_TUTORIAL3

このチュートリアルでは、マイコンの A/D 変換（Analog to Digital 変換）機能と、PWM（Pulse Width Modulation: パルス幅変調）を試してみます。モータを回す制御から一旦離れますが、どちらもモータを動かすのに必要な機能となります。

本プログラムでは、

・VR の回転角に応じたパルス幅の信号が、QL P21 から出力
・モータドライバボード上の温度センサ（サーミスタ, R54）の値を拾う

という動作を行います。本プログラムでは、情報をシリアル通信(UART)で出力します。USB-ADAPTER-RX14（別売オプション）を、J5 に挿す、または、市販の USB-Serial モジュール(RX)を J5-5P(TXD1) または J4-15P(TXD1)に接続してください（シリアル通信のモニタは必須ではありませんが、接続した場合、プログラムの動作が判り易くなると思います）。

・起動時にシリアル端末から出力される情報

```
Copyright (C) 2025 HokutoDenshi. All Rights Reserved.

RX71M / BLUSHLESS MOTOR STARTERKIT TUTORIAL3


EXPLANATION:
SW2 -> CH-1 motor ON/OFF
LED1 : CH-1 active ON/OFF
VR -> duty(0-25%)

COMMAND:
s : stop <-> start display information(toggle)
N : CH-1 motor ON
F : CH-1 motor OFF
>
Motor driver board connection check...
  CH-1 Connected.
```

PC 上では、teraterm 等のシリアル端末ソフトで表示してください

115,200bps, 8bit, none, 1bit の設定で表示できます

Motor driver board connection check... : CH-1 **NOT** Connected. になっている場合は、モータドライバボードを接続しているかをご確認ください。（モータのホールセンサケーブルをモータドライバボードに接続していない場合も、NOT Connected.となります）（NOT Connected となった場合は動作が ON になりません。）

Active は、SW1 が OFF の時は、x になります。

ここで、SW2 を押して動作 ON にします。（または、キーボードからの'N'コマンド）

```
                        CH-1
Motor Driver Board     :  Connect
Active                 :     x
Temperature(A/D value) :  1993
Temperature(degree)    :    24
VR(A/D value)          :  2463
QL duty[%]             :   0.0

  CH-1 START

                        CH-1
Motor Driver Board     :  Connect
Active                 :     o
Temperature(A/D value) :  1991
Temperature(degree)    :    24
VR(A/D value)          :   934
QL duty[%]             :  22.8
```

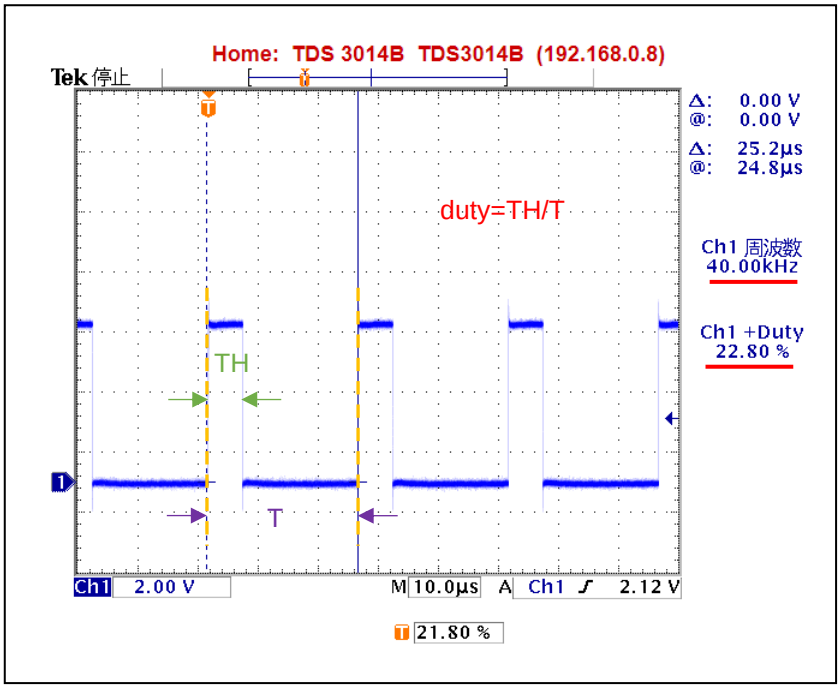
枠内の情報が
3 秒毎に表示されます

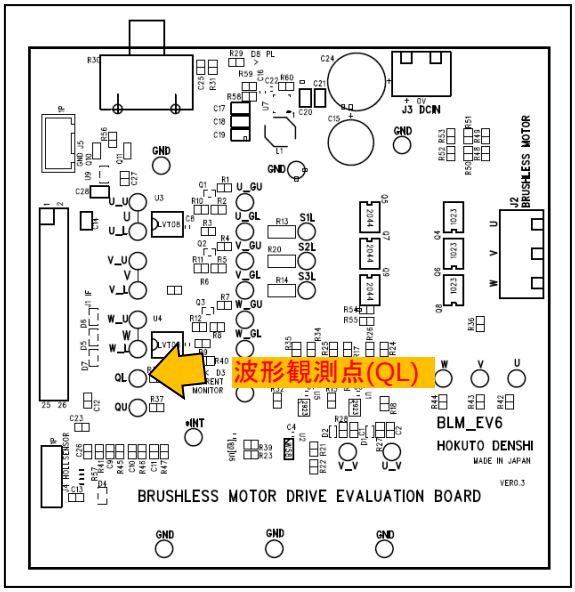
SW を ON にすると、QL duty が 0 からモータドライバボード上の VR に応じた数値に変わります

→実際に PWM 波形が出力されます

上記では、温度センサの A/D 変換値は 1991 で温度に変換すると、24℃。モータドライバボードの、VR の A/D 変換値は 934 で、duty は 22.8%に設定されているという情報が出力されています。

・オシロスコープで QL 端子（モータドライバボード QL 端子）を観測した波形




duty は、VR の回転角度に応じて、0~90%程度の範囲で変化します。QL 波形の周波数は、40kHz です。

※モータドライバボードが接続されていないと認識された場合、Active にはなりません（QL から波形が出力されません）

Tempatature(A/D value)は、温度センサーの出力です。温度センサーの出力は、信号名では AD6、マイコンの P46/AN006 に接続されています。マイコンの当該端子を A/D 変換入力に設定し、A/D 変換機能を使って温度値を取得します。RX71M の A/D 変換機能は、12bit となっているので、0~4095 までの値を取ります。(この値は、約 25℃のときに、2048 になります。温度が高いほど数値は大きくなります)

Tempatature(degree)は、温度センサーの A/D 変換値を摂氏温度に変換したものです。温度の変換は、モータドライバボードの取扱説明書に計算式を示してあります。(計算式は、exp の計算を含む手間のかかるものとなっているので、本プログラムでは予め A/D 変換値と温度の 80 点のテーブルを作成しておき、テーブルから温度を換算しています。)ここでは、24℃となっていますが、ドライヤー等でモータドライバボードの温度センサ部(R54:黒いヒートシンクの下側付近にある)を暖めると、画面表示上の温度も上昇するかと思います。

VR(A/D value)は、モータドライバボード上の VR(ボリューム)を回すと、値が変わるはずです。時計回りに目一杯回すと 0。反時計回りに目一杯回すと、3722(4095×10/11)近傍になるはずです。VR は、プログラム上で値を拾いアナログ入力デバイスとして、任意の用途で使用する事が出来ます。

QL duty は、QL 端子の duty 値となります。この値は、VR の読み取り値に連動して変更を行っています。本プログラムでは(VR の読み取り値/4095×100=)0~90%程度まで設定可能です。この値と、実際に QL 端子から出力されるパルス波形は連動しています。

ここでは、VR の読み取り値をプログラムで処理して、QL 端子の duty 比を決めている事に注意願います。

QL 端子は、

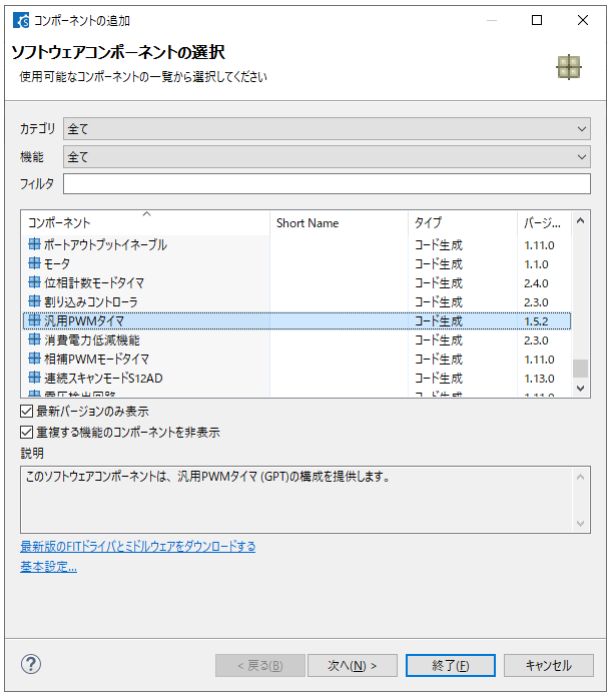
| CH-1 |
| --- |
| P21/GTIOC2A |

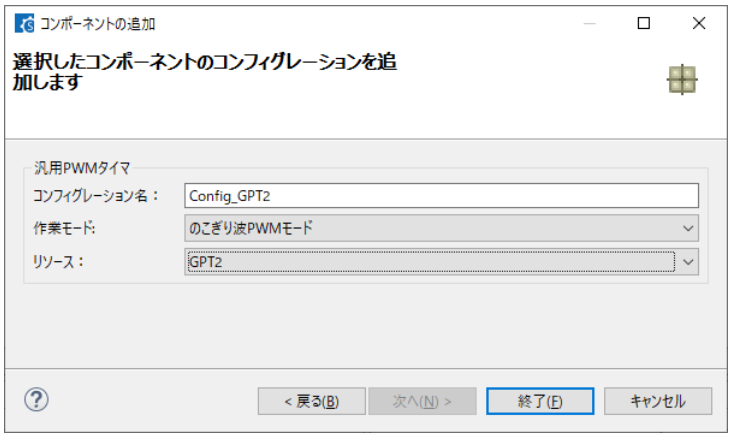
上記の端子に接続されており、GPT タイマの出力端子に設定する事により、H/L の繰り返し波形(矩形波)出力を得る事ができます。

GPT2 の duty 設定値を変えると、QL に出力される、H パルスの幅が変わります。この様に、パルス幅を変える制御を、PWM(パルス幅変調)といい、モータの制御ではよく使用される方式です。

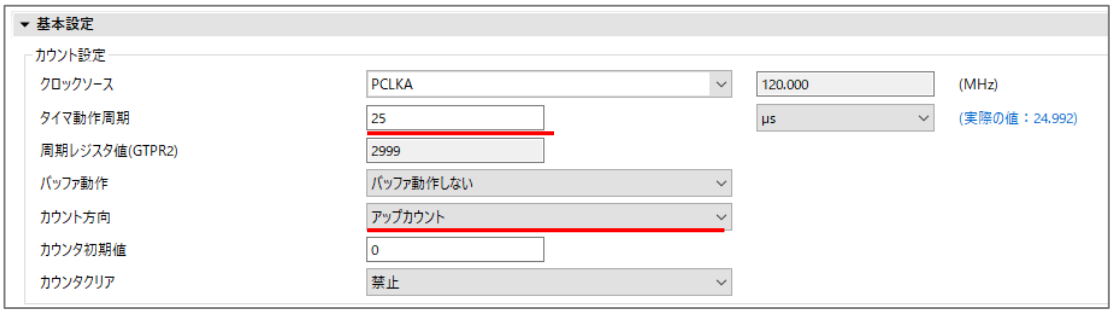
スマート・コンフィグレータでは、

汎用 PWM タイマ(GPT)を設定します。



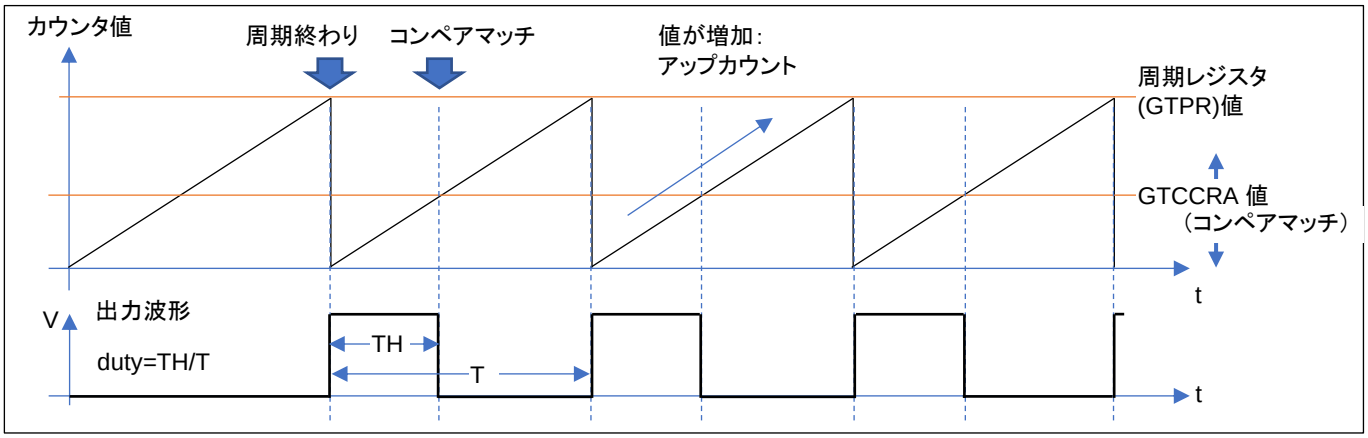




のこぎり波 PWM モードで、GPT2 を使用します。



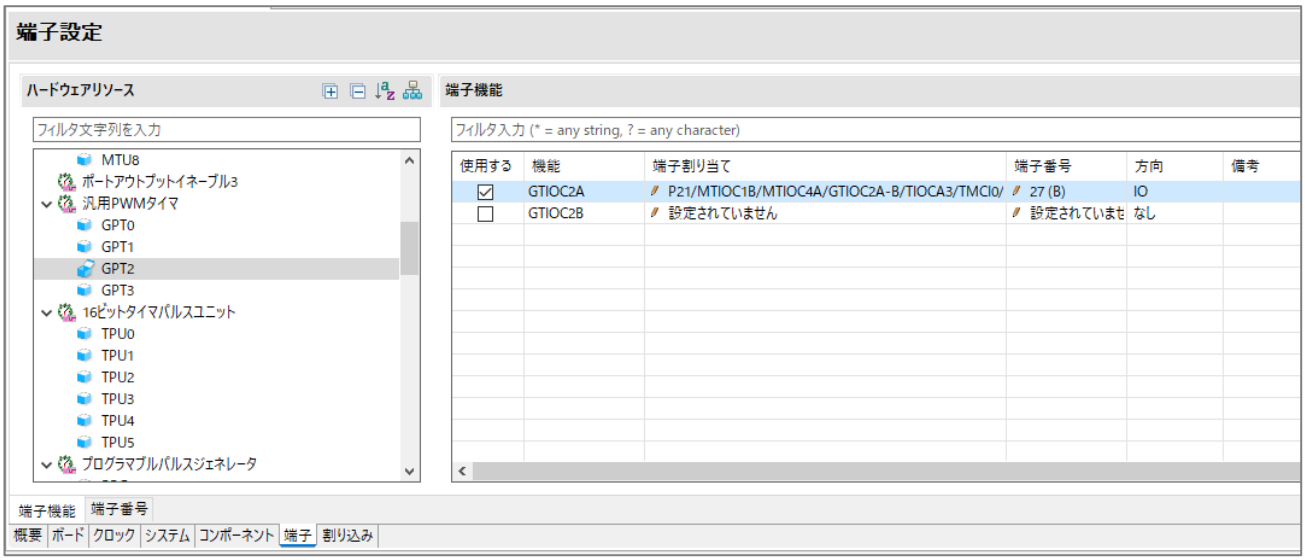

タイマ周期は 25us(40kHz)に設定しています。カウント方向は、アップカウントとしています。


QL は、P21/GTIOC2**A** 端子なので、GTCCR**A** のタブで、PWM 波形出力の設定をします。この設定が、GTIOC2A 端子の出力波形を決めます。




周期終わりで H、コンペアマッチで L、アップカウントに設定しています。
（コンペアマッチレジスタ(GTCCRA)の値は、バッファリングする設定としており、GTCCRC レジスタに値を設定すると、適切なタイミングで GTCCRA レジスタに反映される様になります。）

GTIOC2A は複数の端子から、いずれかの端子を割り当て可能なので、端子タブで、GPT2 の GTIOC2A を P21 に設定してください。

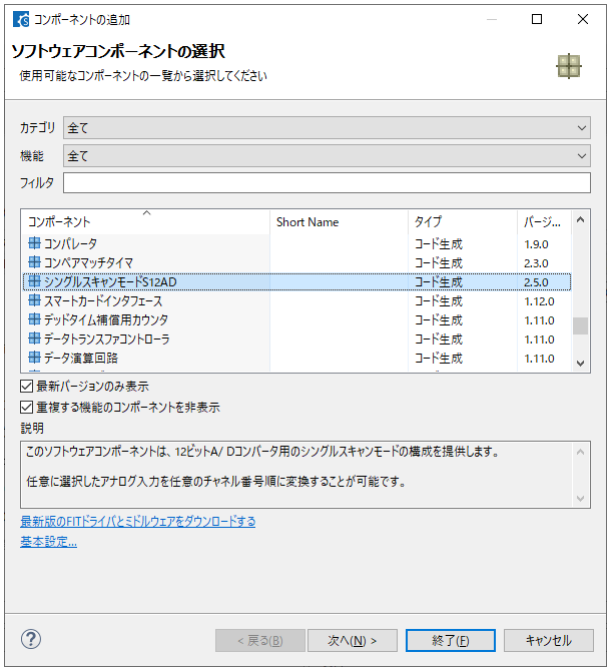


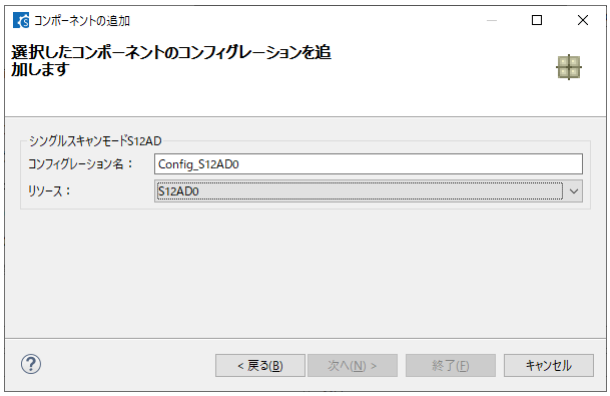

端子設定タブで、GTIOC2A の端子割り当てを、プルダウンから P21 を選ぶようにしてください。

次に、本チュートリアルで使用している A/D 変換の部分に関して説明します。

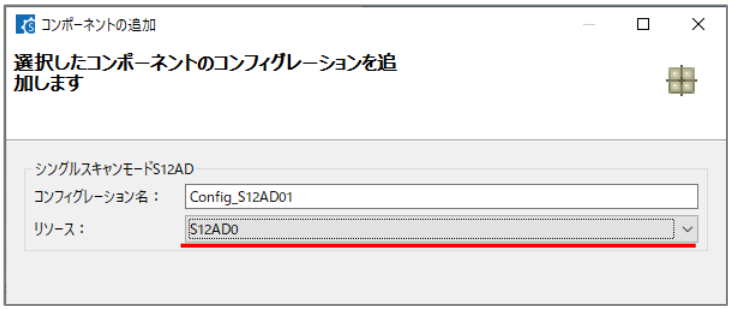
| 接続信号名 | 内容 | 使用端子 |
|---|---|---|
| AD0 | U 相電圧 | P40/AN000 |
| AD1 | V 相電圧 | P41/AN001 |
| AD2 | W 相電圧 | P42/AN002 |
| AD3 | U 相電流 | P43/AN003 |
| AD4 | V 相電流 | P44/AN004 |
| AD5 | W 相電流 | P45/AN007 |
| AD6 | 温度センサ | P46/AN006 |
| AD003 | 電源電圧 | P47/AN007 |
| VR | ボリューム | P65/AN108 |

スマート・コンフィグレータでは、コンポーネント追加で、



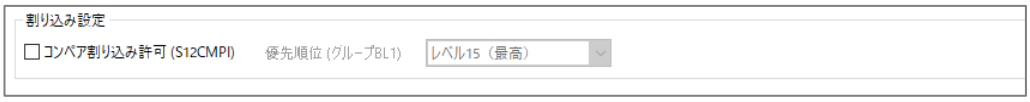



シングルスキャンモード S12AD を追加します。




リソースは S12AD0 を選択。

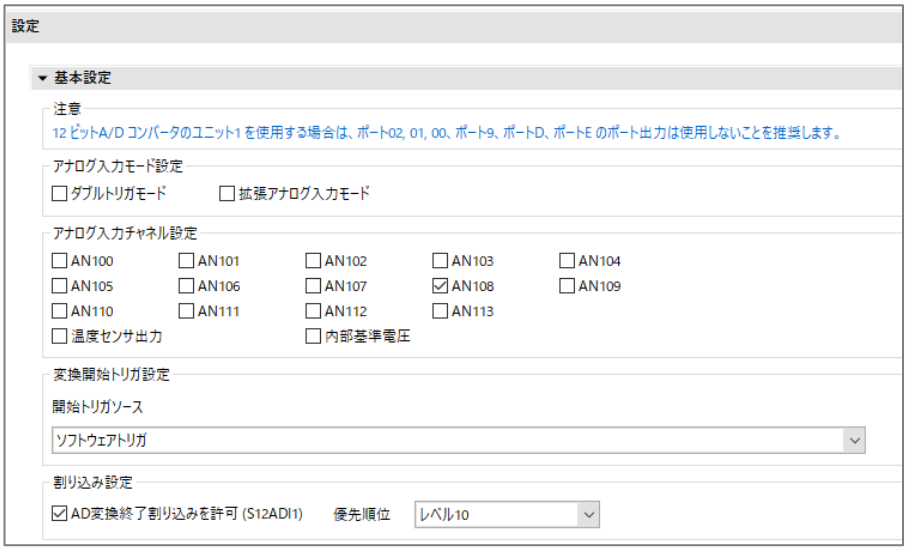

使用している端子（全て）にチェックを入れ、A/D 変換終了割り込みを有効化します。（ここでは、レベル 10 に設定しています。）




下の方にある、コンペア割り込み許可の欄は、コンペア機能は使用していないので、チェックを外しておきます。

同様に、シングルスキャンモード S12AD:リソース S12AD1 を追加します。

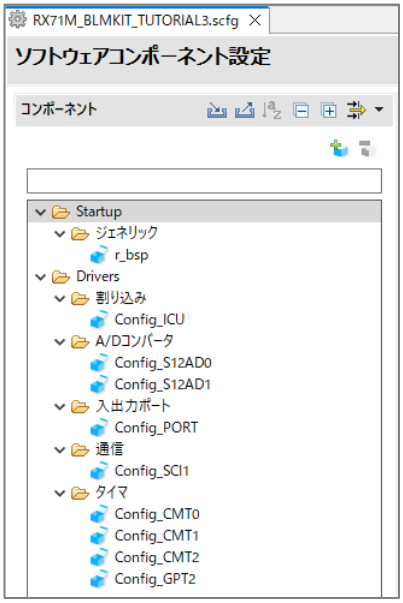
S12AD1 では、




AN108 にチェックを入れます。

上記のアナログ入力チャネルを設定します。

A/D 変換は、AN0xx 端子→S12AD0、AN1xx 端子→S12AD1 で処理されます。



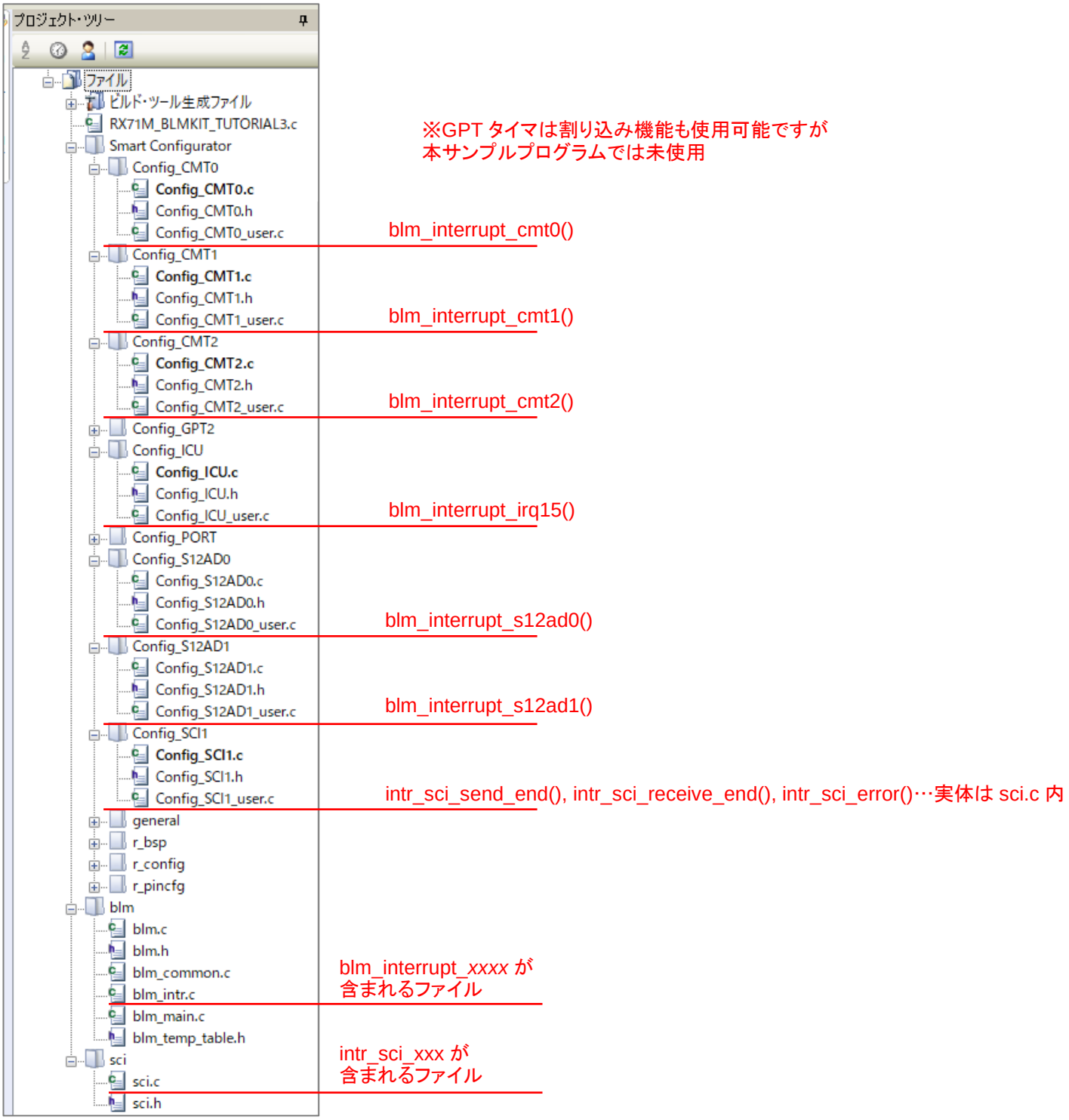

一通りコンポーネントを追加したのが上記となります。

ICU, S12AD0~1, PORT, SCI1, CMT0~2, GPT2 を使用しています。

・CMT0　50us タイマ　A/D 変換の起動とスイッチの読み取り周期
・CMT1　10ms タイマ　VR→duty の更新
・CMT2　500ms タイマ　UART の表示更新タイミング

の用途で使用しています。コンペアマッチタイマ(CMT)は、簡単に使用できるタイマで、定期処理を記載するのに適しています。これ以降のチュートリアルでも、CMT0~CMT2 は同様の使い方をしています。

スマート・コンフィグレータで割り込みを有効にした場合は、_user.c 内の割り込み関数が呼ばれる様になっており、この部分に処理を直接記載しても問題ありませんが、本サンプルプログラムでは、割り込み関数の本体は別ファイルにまとめて記載する様にしています。




A/D 変換とコンペアマッチタイマの割り込みコールバック関数（_user.c に含まれる）内に、割り込み処理を記載した関数呼び出し（blm_interrupt_xxx()関数）を記載しています。割り込み関数本体は、blm_intr.c 内にまとめています（SCI の割り込みを除く）。

・blm_intr.c 内コンペアマッチタイマ割り込み関数

```
void blm_interrupt_cmt0(void)
{
    //50us割り込み

    g_cmt0_counter++;     50us×n 回を観測するためのカウンタ変数

    //A/D変換をキック
    if (g_adc_scan_flag == 0)//前回のA/D変換が完了している場合
    {
        g_adc_scan_flag =  BLM_ADC_FLAG_0 | BLM_ADC_FLAG_1;//フラグセット
        R_Config_S12AD0_Start();                              前回の A/D 変換が終わっていたら
        R_Config_S12AD1_Start();                              A/D 変換開始指示
    }
}

void blm_interrupt_cmt1(void)
{
    //10ms割り込み

    g_cmt1_counter++;
}

void blm_interrupt_cmt2(void)
{
    //500ms割り込み

    g_cmt2_counter++;

    //LED点滅の場合はLEDの状態を反転
    if (g_led_flag == LED_BLINK)
    {
        BLM_LED_1_PORT = ~BLM_LED_1_PORT;
    }
}
```

コンペアマッチタイマの割り込みでは、

・カウンタ変数のインクリメント（メイン関数内でカウンタ変数を使用）

・50us の割り込みでは A/D 変換の開始

を行っています。

A/D 変換が終了すると、A/D 変換終了の割り込みが入ります。（入るように設定しています）

前回の A/D 変換が完了している場合（基本は完了しているはずです）、50us 毎に A/D 変換を起動します。

A/D 変換完了時の処理は、以下の様になっています。

・blm_intr.c 内 S12AD0 割り込み関数

```
void blm_interrupt_s12ad0(void)
{
    //S12AD0変換終了割り込み

    //AN000 CH-1 AD0 U相電圧
    //AN001 CH-1 AD1 V相電圧
    //AN002 CH-1 AD2 W相電圧
    //AN003 CH-1 AD3 U相電流
    //AN004 CH-1 AD4 V相電流
    //AN005 CH-1 AD5 W相電流
    //AN006 CH-1 AD6 温度センサ
    //AN007 CH-1 AD003 電源電圧

    //A/D変換結果をグローバル変数に格納

    g_adc_result[BLM_CH_1].v_u_phase = S12AD.ADDR0;
    g_adc_result[BLM_CH_1].v_v_phase = S12AD.ADDR1;
    g_adc_result[BLM_CH_1].v_w_phase = S12AD.ADDR2;
    g_adc_result[BLM_CH_1].i_u_phase = S12AD.ADDR3;
    g_adc_result[BLM_CH_1].i_v_phase = S12AD.ADDR4;
    g_adc_result[BLM_CH_1].i_w_phase = S12AD.ADDR5;
    g_adc_result[BLM_CH_1].temp = S12AD.ADDR6;
    g_adc_result[BLM_CH_1].v_power = S12AD.ADDR7;

    //A/D変換中フラグを落とす
    g_adc_scan_flag &= ~BLM_ADC_FLAG_0;
}
```

A/D 変換完了割り込み

AD 変換結果を
グローバル変数にコピー

A/D 変換結果レジスタ値を、グローバル変数に代入する処理となっています。(S12AD1 も同様の処理)

g_adc_result[ ].v_u_phase は、U 相の電圧値を保存する変数です。ADDR0 は、AN000 端子の A/D 変換結果が保存されているレジスタです。相電圧、相電流、電源電圧、VR(ボリューム)，温度センサの値を g_adc_result(A/D 変換結果を格納する構造体)にコピーする処理を行っています。

コンペアマッチタイマの起動は、blm_init()関数で行っています。

・blm.c 内初期化関数(blm_init())

```
void blm_init(void)
{
    //ブラシレスモータ初期化関数

    //引数
    // なし

    //戻り値
    // なし

    //変数初期化
    g_cmt0_counter = 0;
    g_cmt1_counter = 0;
    g_cmt2_counter = 0;

    g_adc_scan_flag = 0;

    //タイマスタート
    R_Config_CMT0_Start();//50us
    R_Config_CMT1_Start();//10ms
    R_Config_CMT2_Start();//500ms

    //IRQ15（プッシュスイッチ）割り込み動作開始
    R_Config_ICU_IRQ15_Start();
}
```

コンペアマッチタイマのスタート

blm_main()関数が、モータ制御の処理を行っているプログラムのスタート地点です。

・blm_main.c 内 blm_main()

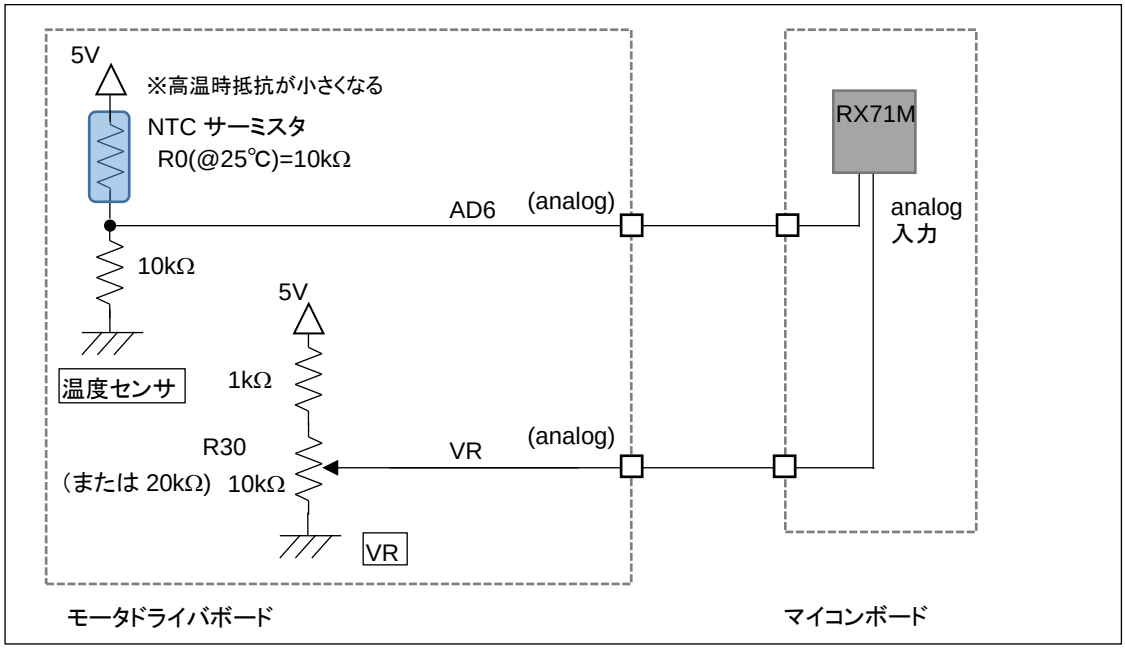
```
void blm_main(void)
{
    //ブラシレスモータメイン関数

    const unsigned long sw_read_interval = (unsigned long)(500e-6 / 50.0e-6);//500us 毎にスイッチの状態をスキャン（50us:CMT0で何カウントか）
    const unsigned long duty_change_interval = (unsigned long)(0.1 / 10.0e-3);//0.1[s]毎（10ms:CMT1で何カウントか）
    const unsigned long information_display_interval = (unsigned long)(3.0 / 500.0e-3);//3秒毎に画面に情報を表示（500ms:CMT2で何カウントか）

    unsigned short prev_state[BLM_CH_NUM] = { BLM_CH_STATE_INACTIVE };

    unsigned short i;

    sci_start();     SCI(UART)の初期化

    sci_write_str("¥nCopyright (C) 2025 HokutoDenshi. All Rights Reserved.¥n¥n");
    sci_write_str("RX71M / BLUSHLESS MOTOR STARTERKIT TUTORIAL3¥n");

（中略）
    blm_init();//初期化
```

sw_read_interval, duty_change_interval, information_display_interval は、それぞれスイッチの読み取りと duty の変更頻度と UART での画面表示頻度を決めている変数です。それぞれ、CMT0(50us), CMT1(10ms), CMT2(500ms)の何カウント毎に処理を行うかを決めています。

・プログラムのメインループ

```
    //メインループスタート
    while(1)
    {
        //スイッチの読み取り(500us毎)→出力ON/OFF
        if (g_cmt0_counter >= sw_read_interval)
        {
            //スイッチは、50us毎×sw_read_interval(10)=500us毎に読み取りを行う

            blm_sw_to_state();      SW を読み取りグローバル変数に代入

            //状態が変化した際スタート・ストップ
            for (i=0; i<BLM_CH_NUM; i++)
            {
                if (g_state[i] != prev_state[i])          SW の状態が変化した際スタート・ストップの処理
                {
                    if (g_state[i] == BLM_CH_STATE_ACTIVE)
                    {
                        blm_start[i]();
                        sci_write_str("¥n  CH-");
                        sci_write_uint16(i+1);
                        sci_write_str(" START¥n");
                    }
                    else
                    {
                        blm_stop[i]();
                        g_duty[i] = 0.0f; //duty設定変数は0にする
                        sci_write_str("¥n  CH-");
                        sci_write_uint16(i+1);
                        sci_write_str(" STOP¥n");
                    }
                    prev_state[i] =  g_state[i];//現在の状態を保存
                }
            }
            g_cmt0_counter = 0;//カウンタ初期化
        }

        //VRをdutyに反映（0.1秒毎）
        if (g_cmt1_counter >= duty_change_interval)
        {
            blm_duty_change();                    0.1 秒に 1 回 VR の読み取り値を duty に反映させる

            //コマンド入力
            blm_command_input();

            g_cmt1_counter = 0;
        }

        //画面表示（3秒に1回）
        if (g_cmt2_counter >=  information_display_interval)
        {
            if (information_display_flag == TRUE) blm_information_display();

            g_cmt2_counter = 0;                   3 秒に 1 回画面表示を行う
        }
    }
```

本チュートリアルでは、温度センサと、VR（ボリューム）の読み取りを行っています。温度センサと VR の接続は、以下の様になっています。




温度センサは、25℃の時サーミスタは 10kΩとなりますので、AD6 端子の電位は 2.5V となります。高温時は電圧が上がる方向に変化します。VR は、軸を（軸方向から見て）反時計回りに回した際出力電位が上がり、最大 4.5V 程度（A/D 変換値で 3720 程度）、最小 0V（（A/D 変換値で 0）となります。

本チュートリアルでは、モータを駆動するという観点からは一旦離れましたが、PWM 波形を生成する、A/D 変換を行うというモータ制御においては重要なマイコン周辺機能を使うチュートリアルとなります。

次のチュートリアルでは、実際にモータを動かしてみます。

・チュートリアル 3 での端子設定

| 端子名 | 役割 | 割り当て | 備考 |
|---|---|---|---|
| P07 | SW2 | 周辺機能(IRQ15) | マイコンボード上のプッシュスイッチ |
| P21 | QL(CH-1) | 周辺機能(GPT2) | GTIOC2A として設定 |
| P22,P23 | Q1U,Q1L(CH-1) | 出力 | |
| P24 | LED1(D1) | 出力（初期値 L） | LED，初期状態で LED は消灯<br>※USB パワースイッチ経由での接続 |
| P26 | UART 通信（送信） | 周辺機能(SCI1) | TXD1 として設定 |
| P30 | UART 通信（受信） | 周辺機能(SCI1) | RXD1 として設定 |
| P40~P47<br>PD0 | A/D 変換 | AN000~AN007<br>AN108 | |
| PD1,PD2 | Q3U,Q3L(CH-1) | 出力 | |
| PD3 | QU(CH-1) | 出力 | |
| PD5 | HS1(CH-1) | 入力，プルアップ | モータドライバボード接続確認に使用 |
| PD6 | HS2(CH-1) | 入力，プルアップ | モータドライバボード接続確認に使用 |
| PD7 | HS3(CH-1) | 入力，プルアップ | モータドライバボード接続確認に使用 |
| PE1,PE2 | Q2L,Q2U(CH-1) | 出力 | |

・チュートリアル 3 での使用コンポーネント

| コンポーネント名 | リソース | 用途 | 備考 |
|---|---|---|---|
| r_bsp | | 基本的なマイコン設定 | 初期状態で追加済み |
| Config_ICU | ICU | 端子割り込み | SW2 が押された際に割り込みが掛る設定 |
| Config_S12AD0 | S12AD0 | A/D 変換 | |
| Config_S12AD1 | S12AD1 | A/D 変換 | |
| Config_PORT | PORT | I/O ポート | |
| Config_SCI1 | SCI1 | UART 通信 | |
| Config_CMT0 | CMT0 | 50us タイマ | |
| Config_CMT1 | CMT1 | 10ms タイマ | |
| Config_CMT2 | CMT2 | 500ms タイマ | |
| Config_GPT2 | GPT2 | PWM 波形生成(CH-1) | |

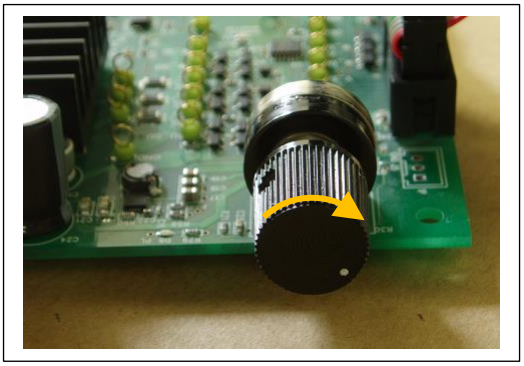
※グレーの項目は前チュートリアルから変更なし

## 1.4. モータを回してみる

参照プロジェクト:RX71M_BLMKIT_TUTORIAL4

プログラムの動作としては、以下となります。

電源投入前に、VR を目一杯時計回り(軸を正面からみて)に回してください。



モータドライバボードに電源を投入してください。

SW2 を押して(もしくは N コマンドを入力)、徐々に VR を反時計回りに回していきます。

（オシロスコープがある場合は、QL 端子の duty を観測してください）
最初は変化がないと思いますが（ここで電源から流れ出る電流がモニタ出来る場合は、徐々に電流値が増していると思います）、ある程度 VR を回すとモータの軸が振動を始めるはずです。

VR をもっと回すと、モータの軸の振動が大きくなり、いずれスムーズに回転を始めると思います（このときの、duty は 15%程度で、電流は、0.15A~0.2A 程度です）。

回転前のモータの軸が振動している状態の時は、消費電流が大きく、回転を始めると消費電流は減ります。

VR をもっと回すと、消費電流は増加します。

VR を目一杯回すと、モータからブーンとうなる音が聞こえてくると思います。（消費電流は~1A 程度となります、本プログラムの duty は最大 25%程度に設定しています）

本プログラムでは、モータに流す電流の向き（＝印加磁界の向き）は、一定周期(6ms)で変化させ、モータに流す電流の大きさは、VR の回転角度に連動させています。

```
Copyright (C) 2025 HokutoDenshi. All Rights Reserved.

RX71M / BLUSHLESS MOTOR STARTERKIT TUTORIAL4


EXPLANATION:
SW2 -> CH-1 motor ON/OFF
LED1 : CH-1 active ON/OFF
VR -> duty(0-25%)

COMMAND:
s : stop <-> start display information(toggle)
N : CH-1 motor ON
F : CH-1 motor OFF
>
Motor driver board connection check...
  CH-1 Connected.
```

起動時、端末には上記メッセージが出力されます。本チュートリアルでは、端末からプロググラムに指示を出すコマンドが用意されており、動作時に端末から"s"を入力すると画面表示を止めることが出来ます。（再度"s"を押すと、画面表示は再開）（s コマンドはチュートリアル 3 から実装）
SW2 を押す代わりに、N コマンドでモータスタート、F コマンドでモータストップさせる事もできます。

・シリアル端末から出力される情報 3 秒に 1 回更新）

```
  CH-1 START

                        CH-1
Motor Driver Board     :  Connect
Active                 :     o
Temperature(A/D value) :  2031
Temperature(degree)    :    25
VR(A/D value)          :     0
QL duty[%]             :   0.0

                        CH-1
Motor Driver Board     :  Connect
Active                 :     o
Temperature(A/D value) :  2022
Temperature(degree)    :    25
VR(A/D value)          :  1054
QL duty[%]             :   6.4

                        CH-1
Motor Driver Board     :  Connect
Active                 :     o
Temperature(A/D value) :  2026
Temperature(degree)    :    25
VR(A/D value)          :  2374
QL duty[%]             :  15.8
```

SW2=プッシュ

Active = o になります
かつ、画面にメッセージが
3 秒毎に表示される様にな
ります

VR を回して duty を増やしていく

duty が増えてくるといずれ回転を
開始します

QL duty の値と回転の様子に着目してください。スムーズに回っている状態ですと 15%程度の duty になるのではないかと思います。それより小さいと、軸が振動するだけで回らず。それより大きいと、モータの振動が大きくなり、スムーズに回る感じではなくなると思います。モータ制御においては、duty の制御（=モータに与える電力）が重要であると言えるかと思います。

本チュートリアルでは、TUTORIAL3 で使用している機能に加え、CMT3 タイマを使用しています。

| コンポーネント | 内容 | 用途 | 備考 |
|---|---|---|---|
| Config_CMT3 | コンペアマッチタイマ(CMT3) | モータに印加する電流（磁界の方向）のシフト | 6ms 周期 |

6ms 毎に流す電流方向を変えていき（印加磁界の方向を変えていき）、モータを回す力を生み出しています。

・blm_intr.c 内 CMT3 割り込み関数

6ms 毎に呼び出される関数

```
void blm_interrupt_cmt3(void)
{
    //6ms割り込み，モータ回転周期タイマ

    //モータに与える磁界を回転させてゆく処理
    //6ms毎に、電流を流す方向を変えてゆく

    static unsigned short loop = 0;
    unsigned short motor_phase_control;
    unsigned short i;

    //ポートデバッグ有効時割り込み処理の先頭でポートをHにして、割り込み処理を抜ける際にポートをLにする
    BLM_DEBUG_PORT_3_H

    switch(loop)
    {
        case 0:
            motor_phase_control = BLM_U_V_DIRECTION;
            break;

        case 1:
            motor_phase_control = BLM_U_W_DIRECTION;
            break;

        case 2:
            motor_phase_control = BLM_V_W_DIRECTION;
            break;

        case 3:
            motor_phase_control = BLM_V_U_DIRECTION;
            break;

        case 4:
            motor_phase_control = BLM_W_U_DIRECTION;
            break;

        case 5:
            motor_phase_control = BLM_W_V_DIRECTION;
            break;

        default:
            motor_phase_control = BLM_OFF_DIRECTION;
            break;
    }

    loop++;
    if (loop >= 6) loop = 0;

    for (i=0; i<BLM_CH_NUM; i++)
    {
        if (g_state[i] == BLM_CH_STATE_ACTIVE)
        {
            //blm_drive[N] は関数ポインタで、blm_drive_chN()
            blm_drive[i](motor_phase_control);
        }
        else
        {
            blm_drive[i](BLM_OFF_DIRECTION);
        }
    }

    BLM_DEBUG_PORT_3_L
}
```

6ms で次の状態に移行

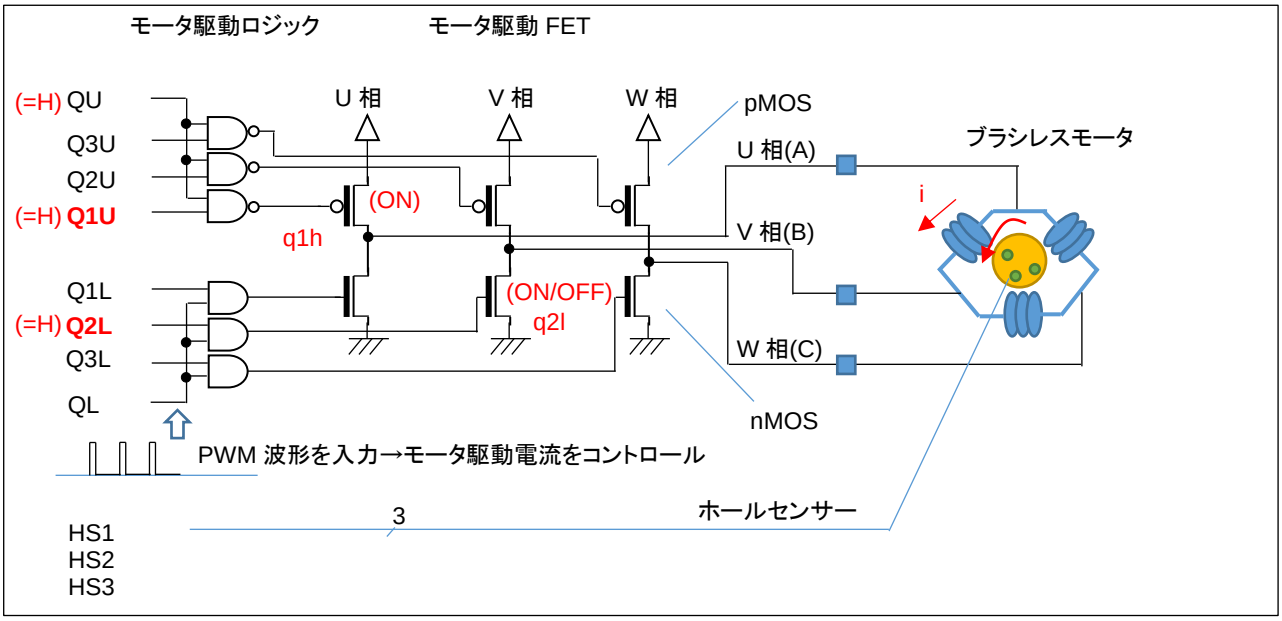
ループ変数をインクリメント

SW を押して ON の状態の場合

実際にモータに流れる電流の向きを変更する

SW が OFF の時は駆動 OFF
（U, V, W 相の pMOS, nMOS の 6 素子全て OFF）

本プログラムでは、スイッチ(SW2)を押してモータが ON ならば、モータに流す電流の向きを 6ms 毎に次の方向に切り替えて行きます。VR に連動した duty は、QL の信号に与えています。




QL には常に、(VR 回転角度に応じた)PWM 波形が入力されています。

プログラム的に g_motor_phase_control = U_V_DIRECTION のとき、q1h は ON(6ms の期間ずっと)していますが、q2l は、ON/OFF を断続的に繰り返しています。(ON している割合が duty 比)モータの U→V に流れる電流も、断続的に流れる・止まるを繰り返しています。duty 比が平均電流となりますので、duty 比を大きくした方がモータの軸を回す力も大きくなります。(pMOS, H 側は ON、nMOS, L 側を PWM 制御)

(U_V_DIRECTION の時は、U 相の H 側(pMOS)と、V 相の L 側(nMOS)のスイッチング素子(MOS FET)が ON します。その他の方向も同様に、H 側と L 側を 1 つずつ ON させます。電流を流す方向は、1.2 章で説明した 6 パターンとなります。)

本プログラムでは、6ms 毎に 1/6 回転する制御としています(回転数は固定です)。1 回転で、36ms なので、回転数としては、28 回転/s。1 分あたりの回転数は、1667rpm です。モータの回転方向は反時計回り(軸方向から見て)です。

これは、回転数を固定とし、モータに流れる平均電流を変化させモータを回転させる手法で、電流が小さいときはモータが回らず、電流が大きいときには(モータが発する音が大きくなり)無駄なエネルギーが消費されています(モータの軸を回す力が大きく、1667rpm より速く回す能力があるにも拘わらず、回転数がプログラムで 1667rpm に固定されているためです)。

特定の回転数でモータを回すためには、モータに流す平均電流を制御する必要があります。ここでは duty 比で電流を変化させていますので、回転数に応じた duty 比の制御が必要になると考えてください。
(なお、モータの軸に負荷をつなげている場合は、負荷の大きさに対応して duty を増やす必要があります。)

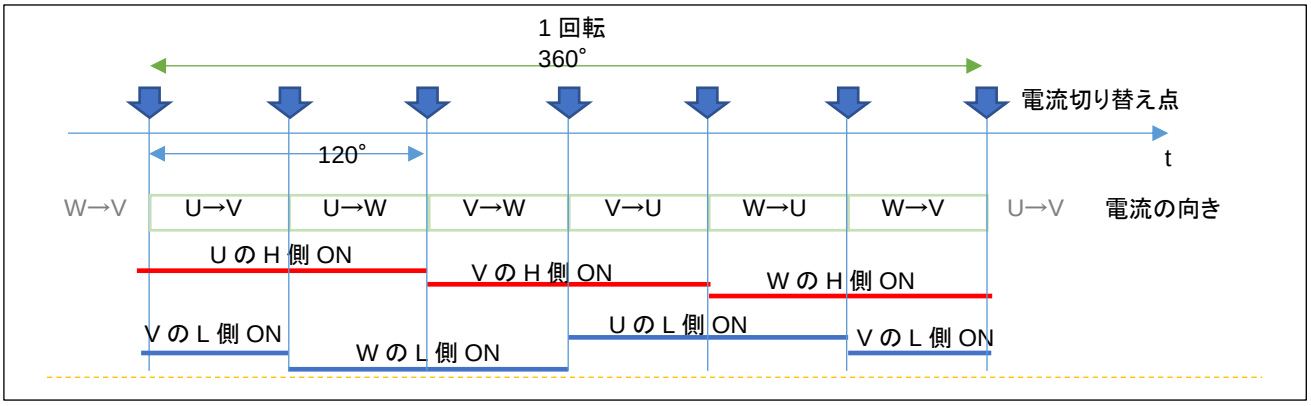
| 時系列 | 電流の向き | U 相 | | V 相 | | W 相 | | H 側 | L 側 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | Q1U (P22) | Q1L (P23) | Q2U (PE2) | Q2L (PE1) | Q3U (PD1) | Q3L (PD2) | | |
| ↓ | U→V | ○ | | | ○ | | | U が ON | V が ON |
| | U→W | ○ | | | | | ○ | | W が ON |
| | V→W | | | ○ | | | ○ | V が ON | |
| | V→U | | ○ | ○ | | | | | U が ON |
| | W→U | | ○ | | | ○ | | W が ON | |
| | W→V | | | | ○ | ○ | | | V が ON |

○は FET（電界効果トランジスタ）が ON（端子を H 制御）です。（空欄は OFF，端子は L 制御）

H 側の制御に着目すると、1 回転の間に U 相が ON するタイミング、V 相が ON するタイミング、W 相が ON するタイミングが 3 回訪れます。L 側の制御においても同様です。

1 回転を 360°とすると、120°単位で ON する素子が切り替わるので、この様な制御は「120 度制御」と呼ばれます。

・120 度制御




本チュートリアルでは、モータに流す電流方向を変化させ、適切な duty を与えればモータが回転する事を示しています。次のチュートリアルでは、モータに内蔵されたセンサを用い、モータが回っているのか、止まっているのか。また、現在の軸の絶対位置を読み取る方法を示します。

・チュートリアル 4 での端子設定

→チュートリアル 3 に同じ

・チュートリアル 4 での使用コンポーネント

| コンポーネント名 | リソース | 用途 | 備考 |
|---|---|---|---|
| r_bsp | | 基本的なマイコン設定 | 初期状態で追加済み |
| Config_ICU | ICU | 端子割り込み | SW2 が押された際に割り込みが掛る設定 |
| Config_S12AD0 | S12AD0 | A/D 変換 | |
| Config_S12AD1 | S12AD1 | A/D 変換 | |
| Config_PORT | PORT | I/O ポート | |
| Config_SCI1 | SCI1 | UART 通信 | |
| Config_CMT0 | CMT0 | 50us タイマ | |
| Config_CMT1 | CMT1 | 10ms タイマ | |
| Config_CMT2 | CMT2 | 500ms タイマ | |
| Config_CMT3 | CMT3 | 6ms タイマ | 印加電流の向きを変化させるのに使用 |
| Config_GPT2 | GPT2 | PWM 波形生成(CH-1) | |

※グレーの項目は前チュートリアルから変更なし

－ポートデバッグに関して－

モータ制御プログラムでは UART に各種情報を出力できるようになっていますが、信号切り替わりや割り込みが入ったタイミング等、リアルタイム性が要求されるような情報は、UART 経由での出力には適していません。

そこで、本チュートリアルでは、I/O ポートをデバッグ用に使用できるよう設定しています。

blm.h 内

```
//デバッグ用ポート
#define BLM_PORT_DEBUG      //定義時ポートによるデバッグを有効化する
```

上記定数を定義した場合は、（デフォルトで有効化しています）

| 端子名 | 接続先 | ポートから L 出力 | ポートから H 出力 | ポートの L/H を切り替える | 備考 |
|---|---|---|---|---|---|
| P54 | J10-1 | DEBUG_PORT_1_L | DEBUG_PORT_1_H | DEBUG_PORT_1_T | |
| P53 | J10-2 | DEBUG_PORT_2_L | DEBUG_PORT_2_H | DEBUG_PORT_2_T | |
| P52 | J10-3 | DEBUG_PORT_3_L | DEBUG_PORT_3_H | DEBUG_PORT_3_T | |
| P51 | J10-4 | DEBUG_PORT_4_L | DEBUG_PORT_4_H | DEBUG_PORT_4_T | |
| P50 | J10-5 | DEBUG_PORT_5_L | DEBUG_PORT_5_H | DEBUG_PORT_5_T | |

上表の端子をデバッグ端子に設定して、モニタする事が出来ます。

例えば、割り込み処理の先頭で

DEBUG_PORT1_H

を実行し、割り込み処理の終わりに

DEBUG_PORT1_L

を入れておくと、P54(J10-1)の H のパルス幅が（概ね）割り込み処理に掛かる時間という事で観測可能です。

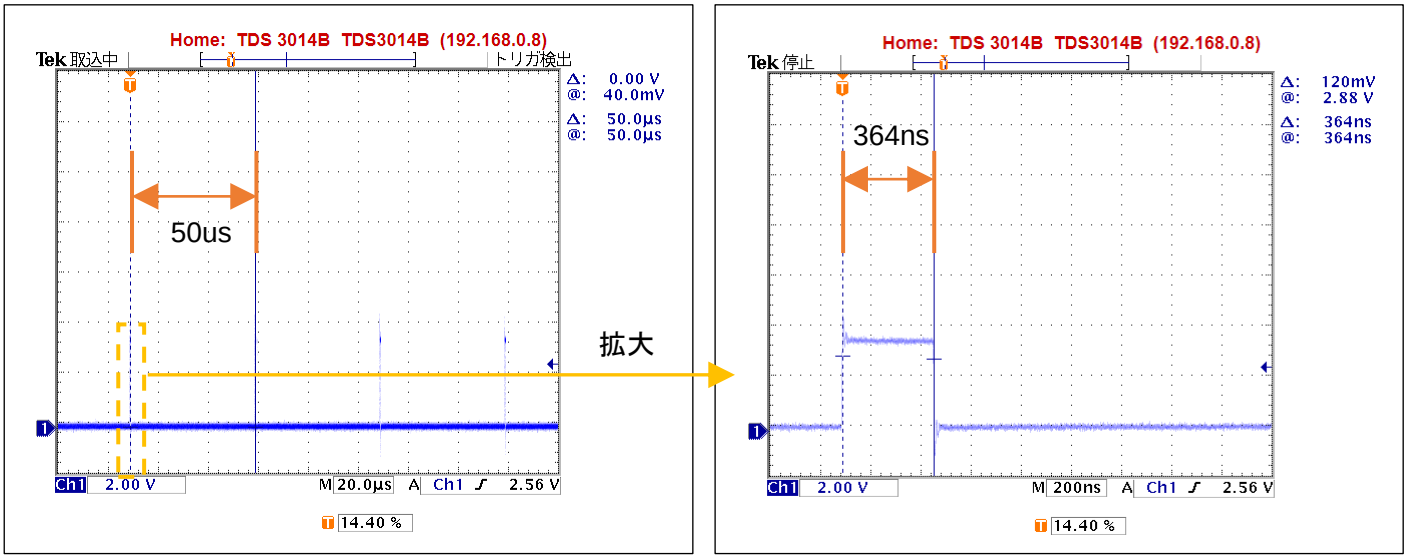
本チュートリアル以降、以下のポートデバッグを入れてあります。

・50us の割り込み処理(CMT0)
DEBUG_PORT_1_H ～ DEBUG_PORT_1_L

・10ms の割り込み処理(CMT1)
DEBUG_PORT_2_H ～ DEBUG_PORT_2_L

・6ms の割り込み処理(CMT3) ※本チュートリアル限定
DEBUG_PORT_3_H ～ DEBUG_PORT_3_L

・50us の割り込み処理(CMT0)をモニタした結果



50us 周期の割り込みを実行しており、パルスが 50us 毎に立っているので、周期設定等の誤りがないことが確認できます。

1 つのパルスを拡大すると、割り込み処理に掛かる時間は、370ns 程度で 50us に対して十分にに短い時間内で割り込み処理が終わっているので問題がない事が判ります。

（もし、割り込み処理の実行時間が 50us を超える様であれば、そのような処理は 50us の割り込み外で実行する様にするなどの判断材料となります。）

## 1.5. ホールセンサの値をみる

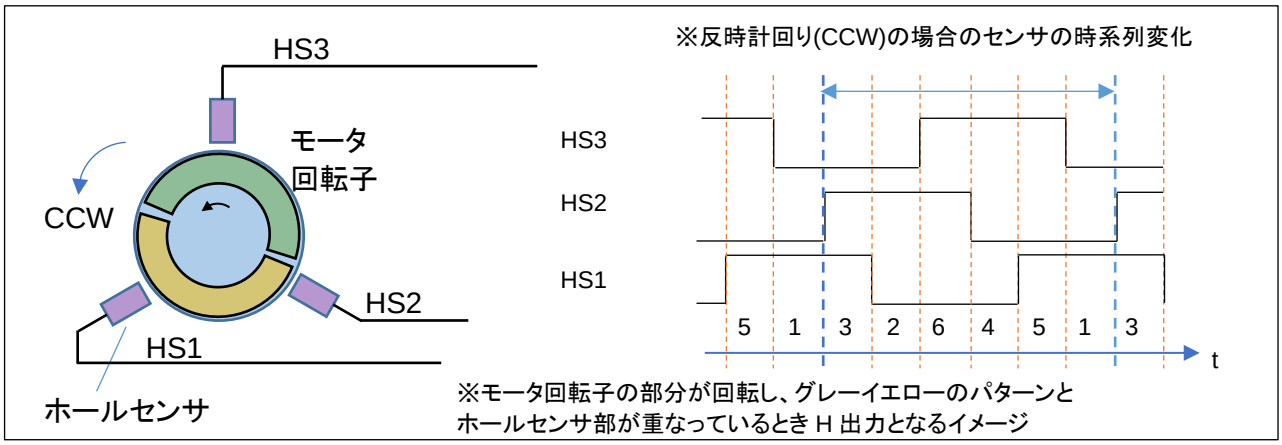
参照プロジェクト:RX71M_BLMKIT_TUTORIAL5

本チュートリアルでは、ホールセンサの値を読み取っています。
TUTORIAL4 同様、必要に応じてシリアル端末を接続してください。

・シリアル端末から出力される情報

```
Motor driver board connection check...
  CH-1 Connected.
                          ← ホールセンサ位置情報 2
pos = 2                   （7 はモータドライバボード未接続）
```

電源を投入すると、上記の表示がシリアル端末に出力されます。
表示は、0.1s 間隔で更新しています。ここで、モータの軸を手で回してみてください。数字が 1 から 6 まで変化すると思います（数値の変化の仕方は、一見順不同に見えると思います）。
この数値は、ホールセンサの位置を示しています。モータの軸は 1 回転あたり、6 回クリック（止まるところ）があると思います。モータの軸が 1 のとき
1　[時計回りに軸を回転] → 5
1　[反時計回りに軸を回転] → 3
となるはずです。この数値は、軸の絶対位置を表しています。




ホールセンサの値は、基本的には duty=50%の矩形波が 120°ずれて出力されるイメージです。

※軸が回る方向を、モータを軸方向から見て、CCW（反時計回り, CounterClockWise）、CW（時計回り, ClockWise）と表記します。

本プログラムで表示される数値は、

| 数値(pos) | [HS3]<br>(bit2) | [HS2]<br>(bit1) | [HS1]<br>(bit0) |
|---|---|---|---|
| ホールセンサ端子 | PD5 | PD6 | PD7 |
| 3 | 0 | 1 | 1 |
| 2 | 0 | 1 | 0 |
| 6 | 1 | 1 | 0 |
| 4 | 1 | 0 | 0 |
| 5 | 1 | 0 | 1 |
| 1 | 0 | 0 | 1 |

0=L
1=H

pos = HS3×4 + HS2×2 + HS1
となります。(プログラムの処理を容易にするため、HS3~HS1 に重み付けを行い加算した数値)

ホールセンサの出力は、接続されているマイコンのピンを単純に入力回路に設定して、デジタル的に読み取っています。

モータの軸を手で回すと、上記表の数値に従い変化 1→5 または 1→3(回転方向による)すると思います。これは、プログラムで「いまモータの回転軸がどの位置にあるのか」を把握できていることを示します。

本モータのホールセンサは、軸 1 回転につき、出力が 6 値変わりますので、軸位置が 60 度変化すると、ホールセンサの出力が変化するという事となります。

※モードライバボードやホールセンサ端子が接続されていない場合は、数値が 7 となります

ここで、SW2 を押してみてください。
(スイッチを ON にすると、pos の画面表示は止まります)

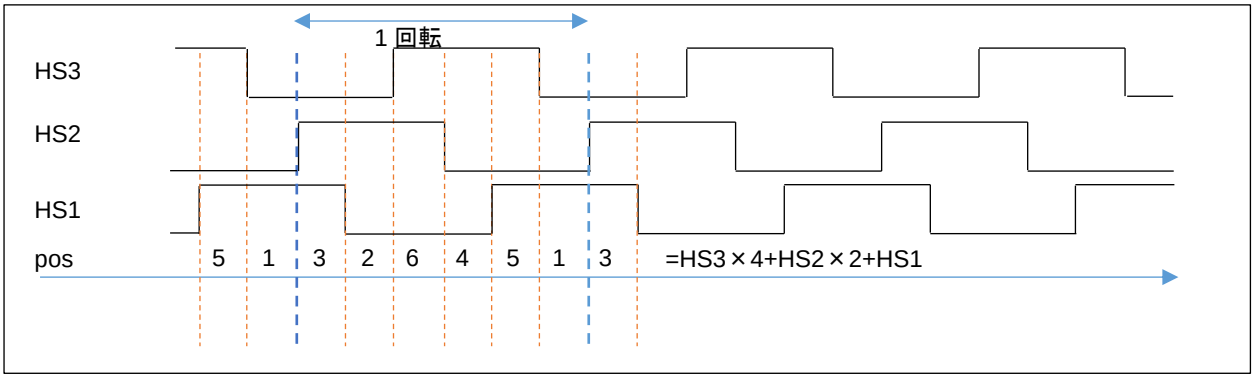
VR を回すと、TUTORIAL4 のプログラム同様、モータが回転を始めると思います。しかし、このプログラムでは、VR の回転に応じてモータの回転数が変わる事(モータの回転数は、音からある程度判断するしかないのですが)にお気付きでしょうか。TUTORIAL4 のプログラムは、回るか・回らないか。回ったときは常に 1670rpm ぐらいで回る(36ms で 1 回転)という動作でした。しかし、このプログラムでは、ホールセンサーの読み取り値が変化したときに電流の向きを変化させます。(正確には、電流の向きを変えるのは、タイマ割り込みの 50us 刻みのタイミングです。)

なお、VR を回す→QL 信号の duty 比を変えるという動作は、TUTORIAL4 と同じです。TUTORIAL4 と異なるのは、電流の向きを変えるタイミングです。TUTORIAL4 では、6ms という決まったタイミングでしたが、本チュートリアルでは、ホールセンサが切り替わったタイミングが電流の向きを切り替えるトリガとなります。

モータの軸が 1/6 回転して、ホールセンサの値が変わった時点で、モータの回転軸を引っ張る（押し出す）磁界を生む電流にスイッチできるため、流れる電流（このプログラムでは、VR に連動した duty）を大きくすると、モータの回転軸にかかる力が大きくなり、速く次のホールセンサ切り替え（1/6 回転）に達するため、VR(duty)とモータの回転数が連動する動作となります。

言い換えると、TUTORIAL4 のプログラムは、duty を大きくすると、モータの回転軸は速く次の 1/6 回転に達しますが（pos=5→1 等）、そこ（pos=1）で同じ場所（pos=1）に引っ張る力をキープしますので、エネルギーが無駄に消費され、電流は増加するものの回転数は変わらないという動作です。

・ホールセンサ位置と電流印加方向に関して




| pos | 反時計回り(CCW) | 時計回り(CW) |
|---|---|---|
| 3 | U→V | W→U |
| 2 | U→W | W→V |
| 6 | V→W | U→V |
| 4 | V→U | U→W |
| 5 | W→U | V→W |
| 1 | W→V | V→U |

※矢印の向きは時系列、本チュートリアルでは回転方向は「反時計回り(CCW)」固定です

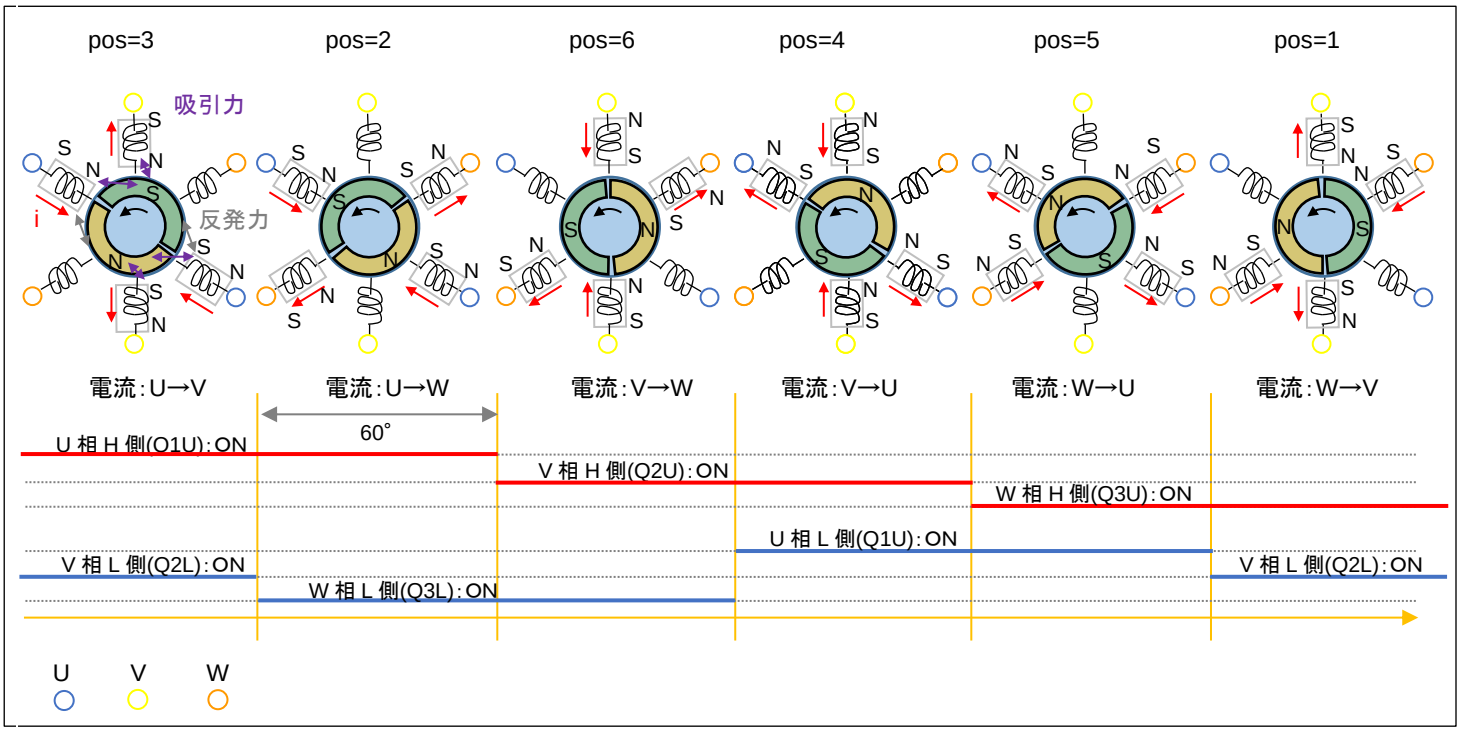
```
                              CH-1
Motor Driver Board        :   Connect
Active                    :       o
rotation speed([rpm])     :    3720
Temperature(A/D value)    :    2095
Temperature(degree)       :      27
VR(A/D value)             :    3305
QL duty[%]                :    24.2
```

本チュートリアルでは、前チュートリアルと異なり、duty の値に応じてモータの回転数が変わります

本チュートリアルでは、回転数の表示が追加されています。

・VR の回転角に応じて duty が変わる：TUTORIAL4 と TUTORIAL5 で同じ動作
・duty に応じて回転数が変わる：TUTORIAL5 での新機構

・反時計回り(CCW)



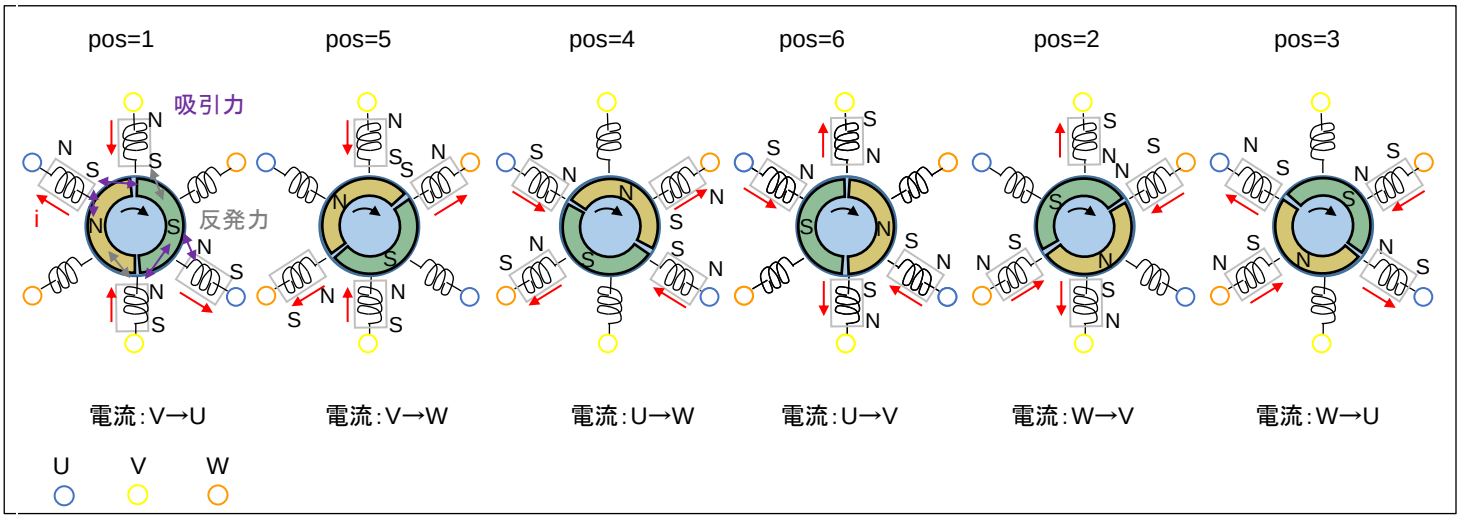

モータが 60 度回転した時点で(60 度回転した事はホールセンサで判断します)、次の電流パターンにシフトさせます。UVW の 3 相、H 側/L 側の計 6 本の制御信号を 120° 毎に ON/OFF を切り替えていく制御となりますので、この制御方法は TUTORIAL4 同様「120 度制御」です。

※コイルの数や配置はイメージです(実際のモータ内部の構成とは必ずしも同じではありません)

[参考]

本チュートリアルでは、回転方向は固定ですが、逆回転(時計回り(CW))させる場合は、以下の様になります。

・時計回り(CW)



・src/blm/blm_intr.c 内 CMT0 割り込み関数 blm_interrupt_cmt0

50us 毎に呼び出される関数

```
//モータ回転制御
for (i=0; i<BLM_CH_NUM; i++)
{
    g_sensor_pos[i] = blm_hall_sensor_pos[i]();

    if (g_state[i] == BLM_CH_STATE_ACTIVE)
    {
#if 1    //1を0に変えると逆回転となる

        //回転方向:CCW
        switch(g_sensor_pos[i])
        {
            case 3:
                blm_drive[i] (BLM_U_V_DIRECTION);
                break;
            case 2:
                blm_drive[i] (BLM_U_W_DIRECTION);
                break;
            case 6:
                blm_drive[i] (BLM_V_W_DIRECTION);
                break;
            case 4:
                blm_drive[i] (BLM_V_U_DIRECTION);
                break;
            case 5:
                blm_drive[i] (BLM_W_U_DIRECTION);
                break;
            case 1:
                blm_drive[i] (BLM_W_V_DIRECTION);
                break;
            default:
                blm_drive[i] (BLM_OFF_DIRECTION);
                break;
        }
#else
        //回転方向:CW
        switch(g_sensor_pos[i])
        {
            case 3:
                blm_drive[i] (BLM_W_U_DIRECTION);
                break;
            case 2:
                blm_drive[i] (BLM_W_V_DIRECTION);
                break;
            case 6:
                blm_drive[i] (BLM_U_V_DIRECTION);
                break;
            case 4:
                blm_drive[i] (BLM_U_W_DIRECTION);
                break;
            case 5:
                blm_drive[i] (BLM_V_W_DIRECTION);
                break;
            case 1:
                blm_drive[i] (BLM_V_U_DIRECTION);
                break;
            default:
                blm_drive[i] (BLM_OFF_DIRECTION);
                break;
        }
#endif
    }
```

ホールセンサ値の読み取り

回転方向：反時計回り(CCW)

ホールセンサ位置 3(HS3..HS1=0b011)の時
U 相から V 相に電流を流す

ホールセンサにより算出された
現在のモータ回転子の位置
(g_sensor_pos)に応じて
流す電流の向きを決める

回転方向：時計回り(CW)
→デフォルト無効

ホールセンサ位置 3(HS3..HS1=0b011)の時
W 相から U 相に電流を流す

ホールセンサの情報を使うことにより、最適なタイミングでモータの軸を引っ張る磁界を生成できますので、本プログラムでは、duty（平均電流:トルクに対応）を増やすと、モータの回転数が上がります。

なお、本チュートリアルでは、回転方向は固定です（軸方向から見て、反時計回り）。実際のアプリケーションで、回転方向を変える必要がある場合は、プログラムのテーブル（pos=3 のとき、U→V に電流を流す）を前ページの図の対応に変える必要があります。

・チュートリアル 5 での画面表示

```
                          CH-1
Motor Driver Board      :  Connect
Active                  :      o
rotation speed([rpm])   :  3720
Temperature(A/D value)  :  2095
Temperature(degree)     :    27
VR(A/D value)           :  3305
QL duty[%]              :  24.2
```

本チュートリアルでは、回転数の表示が追加されています。

50us 毎に、変数値をインクリメントしていき、ホールセンサの値が変化した際、
・変数値を保存
・変数値のリセット（0 代入）
しています。そして、画面表示のタイミングで、変数値を 1 分間あたりの回転数([rpm])に変換しています。

```
period = (float)g_rotation_counter * BLM_CONTROL_PERIOD * 6.0f;          //1回転の周期
rpm = (long)(1.0f / period) * 60L;                                       //[rpm]変換
```

ホールセンサは、1/6 回転で値が変化するので、1 回転あたりの周期は、

50us(=BLM_CONTROL_PERIOD)で（ホールセンサ値が変化するまで）何回カウントされたか　×　50us　×6 ...(1)

で求まります。

回転数は、周期の逆数なので、(1)の逆数が 1 秒あたりの回転数。モータ等の回転数は、rpm, 1 分間あたりの回転数で表すことが多いため、1 秒間あたりの回転数×60 で計算しています。

※両方向の回転に対応させる場合、回転方向により電流を流すテーブルを変更します
※本チュートリアルでは、時計回り(CW)の回転方向のプログラムはコメントアウトで実装されています
※前ページの「回転方向:CW」の方を有効にすれば、モータは逆回転となります
（blm_interrupt_cmt0()内の「#if 1」の部分を「#if 0」に変えると逆回転となります。）

・チュートリアル 5 での端子設定

| 端子名 | 役割 | 割り当て | 備考 |
|---|---|---|---|
| P07 | SW2 | 周辺機能(IRQ15) | マイコンボード上のプッシュスイッチ |
| P21 | QL(CH-1) | 周辺機能(GPT2) | GTIOC2A として設定 |
| P22,P23 | Q1U,Q1L(CH-1) | 出力 | |
| P24 | LED1(D1) | 出力（初期値 L） | LED，初期状態で LED は消灯<br>※USB パワースイッチ経由での接続 |
| P26 | UART 通信（送信） | 周辺機能(SCI1) | TXD1 として設定 |
| P30 | UART 通信（受信） | 周辺機能(SCI1) | RXD1 として設定 |
| P40~P47<br>PD0 | A/D 変換 | AN000~AN007<br>AN108 | |
| PD1,PD2 | Q3U,Q3L(CH-1) | 出力 | |
| PD3 | QU(CH-1) | 出力 | |
| PD5 | HS1(CH-1) | 入力，プルアップ | ホールセンサ入力端子として使用 |
| PD6 | HS2(CH-1) | 入力，プルアップ | ホールセンサ入力端子として使用 |
| PD7 | HS3(CH-1) | 入力，プルアップ | ホールセンサ入力端子として使用 |
| PE1,PE2 | Q2L,Q2U(CH-1) | 出力 | |

・チュートリアル 5 での使用コンポーネント

| コンポーネント名 | リソース | 用途 | 備考 |
|---|---|---|---|
| r_bsp | | 基本的なマイコン設定 | 初期状態で追加済み |
| Config_ICU | ICU | 端子割り込み | SW2 が押された際に割り込みが掛る設定 |
| Config_S12AD0 | S12AD0 | A/D 変換 | |
| Config_S12AD1 | S12AD1 | A/D 変換 | |
| Config_PORT | PORT | I/O ポート | |
| Config_SCI1 | SCI1 | UART 通信 | |
| Config_CMT0 | CMT0 | 50us タイマ | |
| Config_CMT1 | CMT1 | 10ms タイマ | |
| Config_CMT2 | CMT2 | 500ms タイマ | |
| ~~Config_CMT3~~ | ~~CMT3~~ | ~~6ms タイマ~~ | 本チュートリアルでは、削除 |
| Config_GPT2 | GPT2 | PWM 波形生成(CH-1) | |

※グレーの項目は前チュートリアルから変更なし

## 1.6. 過電流・過熱保護の動作

参照プロジェクト:RX71M_BLMKIT_TUTORIAL6

本チュートリアルでは、スイッチを ON にし、VR を回していくとモータが回転し、回転数が上がっていきます。

基本的な動作は、TUTORIAL5 と同じです。TUTORIAL5 のプログラムは、duty の最大値を 25%弱に制限していますが、本プログラムでは 100%まで duty を上げられます。VR を回していくと、回転数が上がりますが、一定以上まで上げた場合、急にモータの回転が止まるはずです(*1)。このとき、LED1 が点滅していると思います。これは過電流保護機構が働いたためです。モータドライバボード側では、過電流検出機構が働くと、*INT が L になります(L パルスが出ます)。マイコンボード側で、この信号は、PD4/IRQ4 につながっており、本プログラムでは以下の条件でモータに流れる電流を遮断し、モータを止める制御を行います。(過電流停止した場合、LED1 が点滅します)

(a)1 回でも*INT の信号が L になった場合
(b)50us 毎に*INT の信号をチェックし、10ms 間に 100 回(*2)以上過電流である場合
(c)50us 毎に*INT の信号をチェックし、1 秒間に 1000 回(*2)以上過電流である場合

過電流の判定基準は、(a)~(c)のどの条件を有効にするかは任意の組み合わせで設定可能です。(a)が一番厳しい判定基準です。(a)を有効にした場合は、(b)(c)の判定前にモータが止まりますので、実質的には

(1) (a)を有効にする　　※本チュートリアルでは、C コマンドで「(a)有効」「(a)無効」を切り替えます
(2) (b)及び(c)を有効にする
(3) (b)を有効化する
(3) (c)を有効化する

のいずれかの選択となります。(b)はある程度短期の判定基準。(c)は平均電流の判定基準のイメージです。(b)は 200 未満(10ms 間に 50us 毎に、200 回の判定となるので、200 以上の数値を指定すると、過電流エラーが検出される事がない)。(c)は、20,000 未満の任意の値を設定可能です。

(*1)電流リミットの掛けられる電源装置をお使いの場合は、電流リミットを 2A 程度に設定してください。
(電流リミットを 1A 程度に設定すると、電源装置側の電流リミットに引っかかり、過電流検出される電流まで達しません。)

(*2)100 回, 1000 回はデフォルトの設定値です。blm.h 内で数値を定義しているので、任意の値に変更可能です。

・起動時のメッセージ

```
Copyright (C) 2025 HokutoDenshi. All Rights Reserved.

RX71M / BLUSHLESS MOTOR STARTERKIT TUTORIAL6


EXPLANATION:
SW2 -> CH-1 motor ON/OFF
LED1 : CH-1 active ON/OFF, Error->BLINK
VR -> duty(0-100%)

COMMAND:
s : stop <-> start display information(toggle)
C : Over current -> ONCE stop ENABLE <-> Over current -> ONCE stop DISABLE [toggle]
X : 10ms Over current -> stop ENABLE <-> 10ms Over current -> stop DISABLE [toggle]
N : CH-1 motor ON
F : CH-1 motor OFF

>
Motor driver board connection check...
  CH-1 Connected.
```

起動時のメッセージは上記の様になっており、C と X のコマンドで過電流停止の条件を変更できるようになっています。キーボードから C, X を入力する度に ON/OFF がトグルで切り替わる様になっています。

| コマンド | 過電流停止の条件 |
|---|---|
| C | 1 回の過電流検出で停止(a) |
| X | 10ms と 1s の規定回数で停止(b)(c) |
| 常に有効 | 1s の規定回数で停止(c) |

C コマンド入力時は、(a)の 1 回の過電流停止を無効化。X コマンド入力時は、(b)の 10ms の条件を無効化します。（再度 C コマンドを入力した場合は、(a)の 1 回の過電流停止を有効化します。）

・シリアル端末から出力される情報（過電流停止）

```
   CH-1 START


                                  CH-1
Motor Driver Board        :   Connect
Active                    :        o
rotation speed([rpm])    : 14280
Temperature(A/D value) :    2091
Temperature(degree)       :       27
VR(A/D value)             :   2565
QL duty[%]                :    68.8

                                  CH-1
Motor Driver Board        :   Connect
Active                    :        o
rotation speed([rpm])    : 12480
Temperature(A/D value) :    2106
Temperature(degree)       :       27
VR(A/D value)             :   2741
QL duty[%]                :    73.6

   CH-1 STOP

 *** OVER CURRENT ( COUNT = ONCE(interrupt) ) ***
```

過電流検出で停止

PC 上では、teraterm 等のシリアル端末ソフトで表示してください

115,200bps, 8bit, none, 1bit の設定で表示できます

VR を回して duty を上げていくと

上記は(a)の 1 回の過電流信号の割り込みで停止した場合です。過電流で停止した場合、一度 SW を OFF にすると、エラーはクリアされます。（SW2 を押す、またはキーボードから'F'コマンドを入力する）

次に、C コマンドを入力して、同様の duty を上げてみます。

・(a)の条件を無効化（C コマンドを入力）

```
Over current stop(ONCE) -> OFF

                                  CH-1
Motor Driver Board        :   Connect
Active                    :        o
rotation speed([rpm])    : 16620
Temperature(A/D value) :    2096
Temperature(degree)       :       27
VR(A/D value)             :   2927
QL duty[%]                :    78.6

   CH-1 STOP

 *** OVER CURRENT ( COUNT = 126 / 10[ms]) ***
```

そうすると、(b)の条件に引っかかってモータが停止します。

次いで、X コマンドを入力します。

・(b)の条件を無効化（C コマンドと X コマンドを入力）

```
10ms Over current stop -> OFF

                                CH-1
Motor Driver Board        :   Connect
Active                    :       o
rotation speed([rpm])     : 15360
Temperature(A/D value) :    2292
Temperature(degree)       :      33
VR(A/D value)             :   2856
QL duty[%]                :   76.7

   CH-1 STOP

 *** OVER CURRENT ( COUNT = 1154 / 1[s]) ***
```

この場合は、(c)の条件に引っかかってモータが停止します。
（一般的には(b)より(c)の方が緩い条件となります。）

過熱保護機能に関しては、モータドライバボード上に搭載されているサーミスタ（1.3 章を参照）の温度のモニタリングを定期的に行い、設定した閾値を超えた場合に、モータを停止させるというものです。

プログラムでは、10ms 間隔で温度のモニタリングを行っており、1 回でも閾値を超えた場合モータが停止します。

・シリアル端末から出力される情報（過熱停止）

```
                                CH-1
Motor Driver Board        :   Connect
Active                    :       o
rotation speed([rpm])     :   2400
Temperature(A/D value) :    2698
Temperature(degree)       :     44
VR(A/D value)             :    671
QL duty[%]                :   18.0

   CH-1 STOP

 *** OVER TEMP ( TEMP = 52 [deg]) ***          過熱検出で停止
```

過熱停止の場合の表示例です。

エラーとなった場合は、LED1 が点灯し動作が停止します、その後 SW を OFF するとエラーはリセットされます。

（LED1 の点滅はエラー表示で、エラーが出ると点滅となり、SW-OFF でモータを停止させるとエラーは解消され、消灯します。モータ回転時は、LED1 は点灯です。）

・blm.c, blm_init()内

```
//エラーチェックフラグ
g_error_check_flag = 0;

//過熱停止有効
g_error_check_flag |= BLM_ERROR_OVER_TEMP_STOP;  //(d)

//1回の過電流検出で停止
g_error_check_flag |= BLM_ERROR_OVER_CURRENT_STOP1;  //(a)

//10msの間規定回数以上の過電流検出で停止
g_error_check_flag |= BLM_ERROR_OVER_CURRENT_STOP2;  //(b)

//1sの間規定回数以上の過電流検出で停止
g_error_check_flag |= BLM_ERROR_OVER_CURRENT_STOP3;  //(c)
```

プログラム内では、

g_error_check_flag

変数の値で、(a)(b)(c)及び過熱停止(d)の有効化を行います。

(a) BLM_OVER_CURRENT_STOP1(=0x2)　1 回の過電流検出信号で停止
(b) BLM_OVER_CURRENT_STOP2(=0x4)　10ms 間に規定の回数（デフォルト 100 回）以上過電流検出で停止
(c) BLM_OVER_CURRENT_STOP3(=0x8)　1 秒間に規定の回数（デフォルト 1000 回）以上過電流検出で停止
(d) BLM_OVER_TEMP_STOP1(=0x1)　　過熱停止

過熱停止と 1 回の過電流検出で停止を有効にする場合。
g_error_check_flag = BLM_OVER_TEMP_STOP1 | BLM_OVER_CURRENT_STOP1;
(g_error_check_flag = 0x3)

g_error_check_flag には、有効にしたい停止方法を OR(|)で与えてください。

・blm.h

```
//過電流停止カウント回数
#define BLM_OVER_CURRENT_COUNT_10MS  100//50us毎にチェックを行い10msあたり100回以上過電流検出で停止（最大200）
#define BLM_OVER_CURRENT_COUNT_1S  1000//50us毎にチェックを行い1sあたり1000回以上過電流検出で停止（最大20,000）

//過熱停止[℃]
#define BLM_OVER_TEMP   50
```

(b)(c)の電流検出の(d)の過熱停止の閾値は、上記で定義されていますので別な値に変える事も可能です。

・過電流検出で使用している端子

モータドライバボード側の信号名は *INT です。この信号がマイコンボード側では以下の端子に接続されています。

| | 端子名 | 備考 |
|---|---|---|
| CH-1 | PD4/IRQ4 | (a)の場合は IRQ4, (b)(c)の場合は汎用入力として使用されます |

※モータドライバボード側の過電流検出は、U 相と V 相の電流が両方 8A ピークを越えた場合*INT=L となります

(a)の IRQ を使用する場合は立ち下がりエッジの検出。(b)(c)の場合は、50us 間隔で端子のレベルを読み取り、10ms, 1s 間の L の回数をカウントします。

・過熱保護で使用している端子

モータドライバボード側の信号名は AD6 です。この信号がマイコンボード側では以下の端子に接続されています。

| | 端子名 | 備考 |
|---|---|---|
| CH-1 | P46/AN006 | A/D 入力として使用 |

(a)1 回でも *INT の信号が L になった場合停止させる処理

・blm_intr.c

IRQ4 は立下りエッジ検出に設定

```
void blm_interrupt_irq4(void)
{
    //CH-1過電流割り込み

    if (g_error_check_flag & BLM_ERROR_OVER_CURRENT_STOP1)
    {
        blm_stop[BLM_CH_1]();
        g_error[BLM_CH_1].status |= BLM_ERROR_OVER_CURRENT_STOP1;
        g_state[BLM_CH_1] = BLM_CH_STATE_INACTIVE;
    }
}
```

CH-1 側、IRQ4 の割り込みが入った場合、即モータを停止させる処理です。
※グレーの部分は、本チュートリアル限定（他のチュートリアルでは、初期状態で有効／無効を選択、本チュートリアルでは、C コマンドの入力により有効／無効を切り替え）

(b)(c)50us 毎に過電流をチェックする処理

・blm_common.c

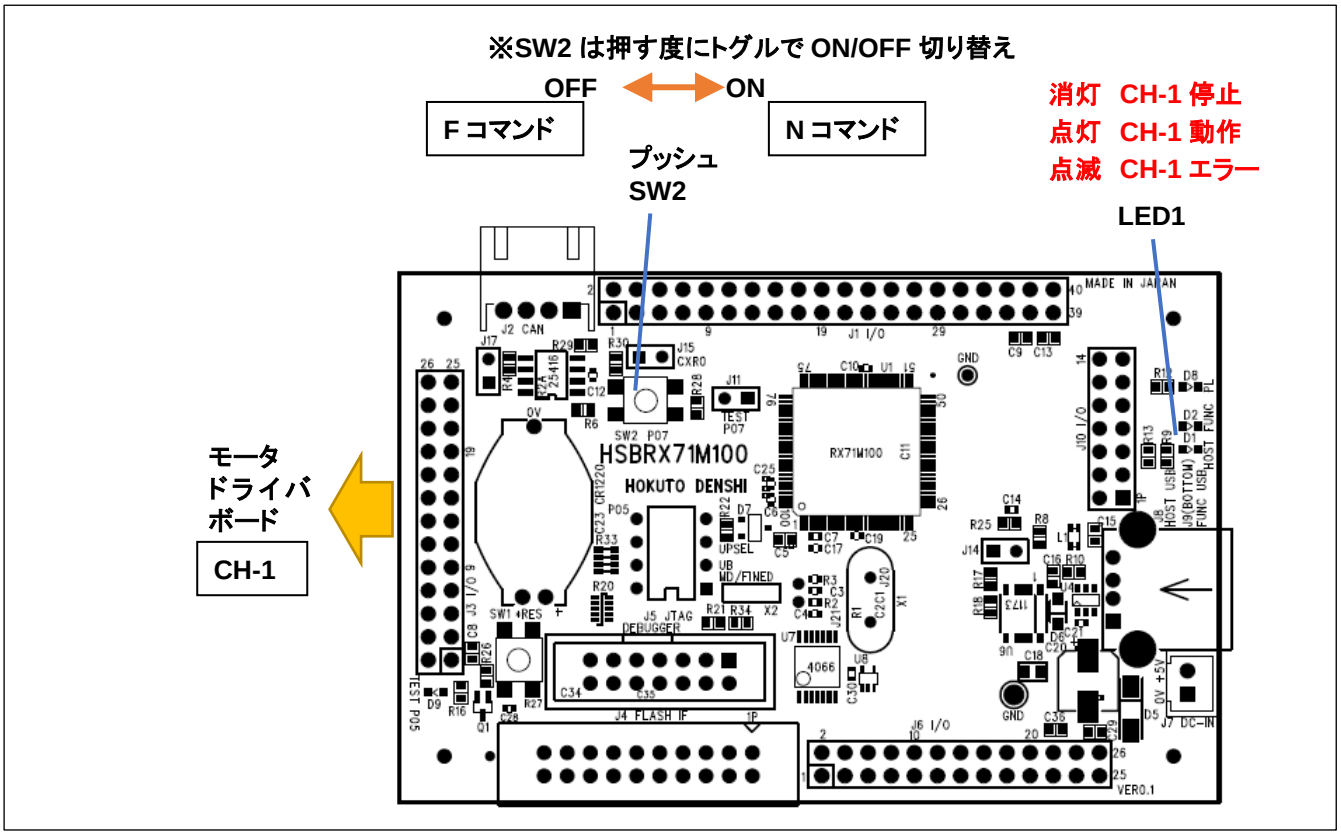
```
unsigned short blm_current_monitor_ch1(void)
{
    //過電流検出 CH-1

    //戻り値
    //  過電流検出なし : 1 (true)
    //  過電流検出あり : 0 (false)

    return PORTD.PIDR.BIT.B4;
}
```

単純に端子のレベルを読む処理
（50us 毎に実行）

50us 毎に電流をチェックするのは、CMT0（50us タイマ）の割り込み処理内で実行しています。

10ms 毎のチェック(b)や 1 秒毎のチェック(c)、過熱停止のチェック(d)は、CMT1(10ms タイマ）の割り込み処理内で実行しています。

・基本的な LED と SW の役割




| | 割り当て | 備考 |
|---|---|---|
| SW2 | CH-1 のモータ回転 ON/OFF | キーボードからも ON/OFF 制御可能 |

| | 割り当て | 備考 |
|---|---|---|
| LED1 | CH-1 ON 時点灯（動作インジケータ） | エラー（過電流、過熱検出）時に点滅 |

・チュートリアル 6 での端子設定

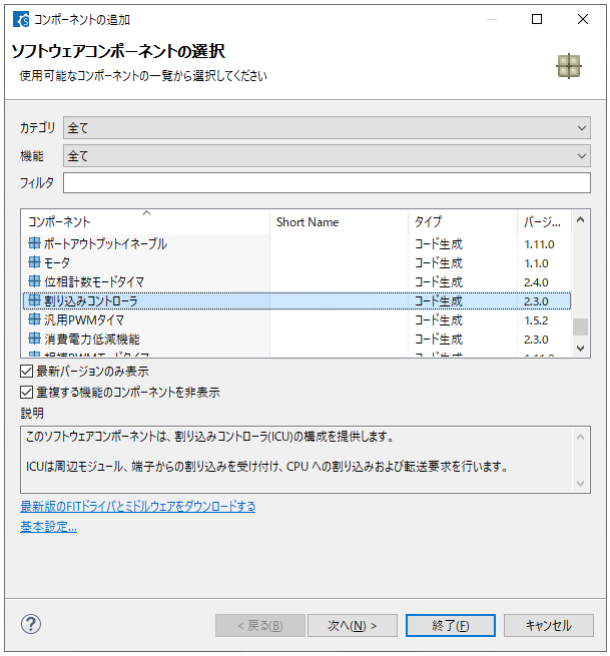
| 端子名 | 役割 | 割り当て | 備考 |
|---|---|---|---|
| P07 | SW2 | 周辺機能(IRQ15) | マイコンボード上のプッシュスイッチ |
| P21 | QL(CH-1) | 周辺機能(GPT2) | GTIOC2A として設定 |
| P22,P23 | Q1U,Q1L(CH-1) | 出力 | |
| P24 | LED1(D1) | 出力（初期値 L） | LED，初期状態で LED は消灯<br>※USB パワースイッチ経由での接続 |
| P26 | UART 通信（送信） | 周辺機能(SCI1) | TXD1 として設定 |
| P30 | UART 通信（受信） | 周辺機能(SCI1) | RXD1 として設定 |
| P40~P47<br>PD0 | A/D 変換 | AN000~AN007<br>AN108 | |
| PD1,PD2 | Q3U,Q3L(CH-1) | 出力 | |
| PD3 | QU(CH-1) | 出力 | |
| PD4 | *INT(CH-1) | 端子割り込み(IRQ4) | プルアップ有効 |
| PD5 | HS1(CH-1) | 入力，プルアップ | ホールセンサ入力端子として使用 |
| PD6 | HS2(CH-1) | 入力，プルアップ | ホールセンサ入力端子として使用 |
| PD7 | HS3(CH-1) | 入力，プルアップ | ホールセンサ入力端子として使用 |
| PE1,PE2 | Q2L,Q2U(CH-1) | 出力 | |

・チュートリアル 6 での使用コンポーネント

| コンポーネント名 | リソース | 用途 | 備考 |
|---|---|---|---|
| r_bsp | | 基本的なマイコン設定 | 初期状態で追加済み |
| Config_ICU | ICU | 端子割り込み<br>過電流停止 | SW2 が押された際に割り込みが掛る設定<br>IRQ4 を立下りエッジで使用 |
| Config_S12AD0 | S12AD0 | A/D 変換 | |
| Config_S12AD1 | S12AD1 | A/D 変換 | |
| Config_PORT | PORT | I/O ポート | |
| Config_SCI1 | SCI1 | UART 通信 | |
| Config_CMT0 | CMT0 | 50us タイマ | |
| Config_CMT1 | CMT1 | 10ms タイマ | |
| Config_CMT2 | CMT2 | 500ms タイマ | |
| Config_GPT2 | GPT2 | PWM 波形生成(CH-1) | |

※グレーの項目は前チュートリアルから変更なし

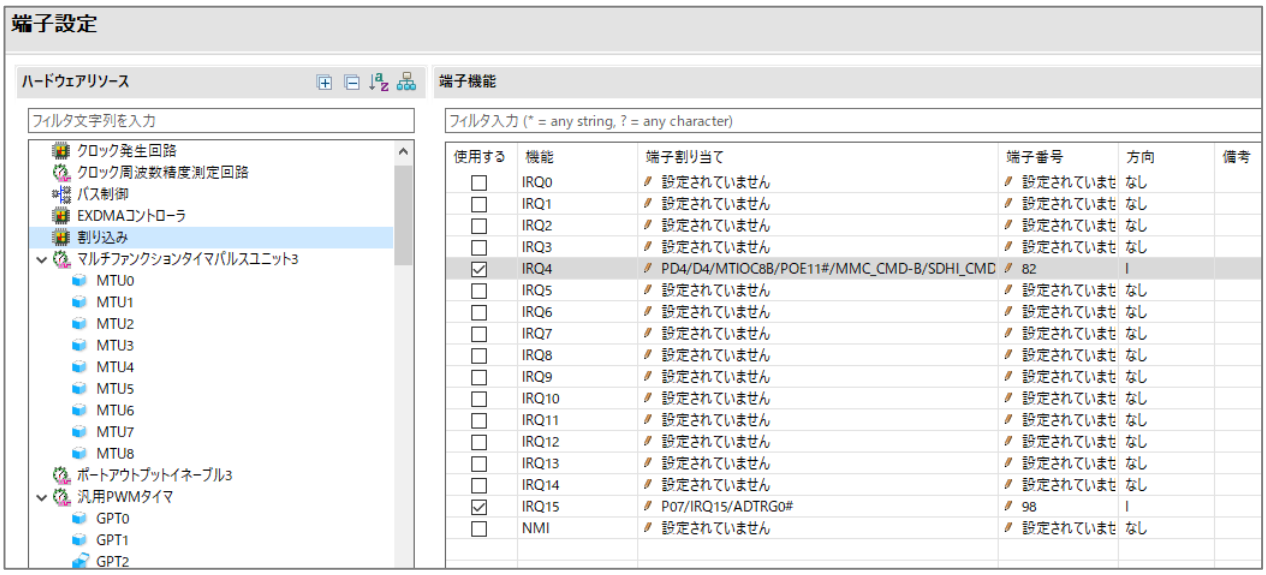
・スマート・コンフィグレータでのコンポーネント追加





検出タイプ「立ち下がりエッジ」、ディジタルフィルタ「PCLK/64」、優先順位「レベル 14」を選択。
IRQ4 を追加で有効化。（IRQ15 は、従来通り）

・スマート・コンフィグレータでの端子設定（端子タブ）




割り込みの IRQ4 の端子割り当て PD4 を選択してください。
（IRQ15 は、P07 を選択…従来通り）

## 1.7. 相電圧・相電流の観測

参照プロジェクト：RX71M_BLMKIT_TUTORIAL7

本プログラムでは、A/D 変換の機能を使い、U, V, W の各相電圧および U, V, W の L 側の電流観測用抵抗に流れている電流を取得します。プログラムの動作としては、TUTORIAL6 と同様です。

・起動時のメッセージ

```
Copyright (C) 2025 HokutoDenshi. All Rights Reserved.

RX71M / BLUSHLESS MOTOR STARTERKIT TUTORIAL7


EXPLANATION:
SW2 -> CH-1 motor ON/OFF
LED1 : CH-1 active ON/OFF, Error->BLINK
VR -> duty(0-100%)

COMMAND:
s : stop <-> start display information(toggle)
A : A/D convert data display
N : CH-1 motor ON
F : CH-1 motor OFF

>
Motor driver board connection check...
   CH-1 Connected.
```

'A'コマンド（キーボードから入力するコマンド）が追加されています。
（過電流停止の挙動を変える C, X コマンドは廃止されています。）

SW1 を ON にして、モータが回っている状態で、キーボードから'A'を入力してください。

・シリアル端末から出力される情報

```
                                CH-1
Motor Driver Board          :   Connect
Active                      :       o
rotation speed([rpm])    : 11760
Temperature(A/D value) :    2059
Temperature(degree)       :      26
VR(A/D value)               :   2322
QL duty[%]                    :   56.7

                    キーボードから'A'を入力
   --- A/D information ---

CH-1 A/D Conversion result

serial V(U) V(V) V(W) I(U) I(V) I(W) V(Power) temp volume
0 2410 2402 2612 21 33 1 3551 2060 2324
1 2419 2397 2625 15 36 0 3552 2058 2324
2 2425 2381 2597 32 1 0 3551 2059 2322
3 2433 2373 2594 24 4 1 3552 2059 2322
4 2438 2365 2593 20 25 1 3553 2059 2322
```

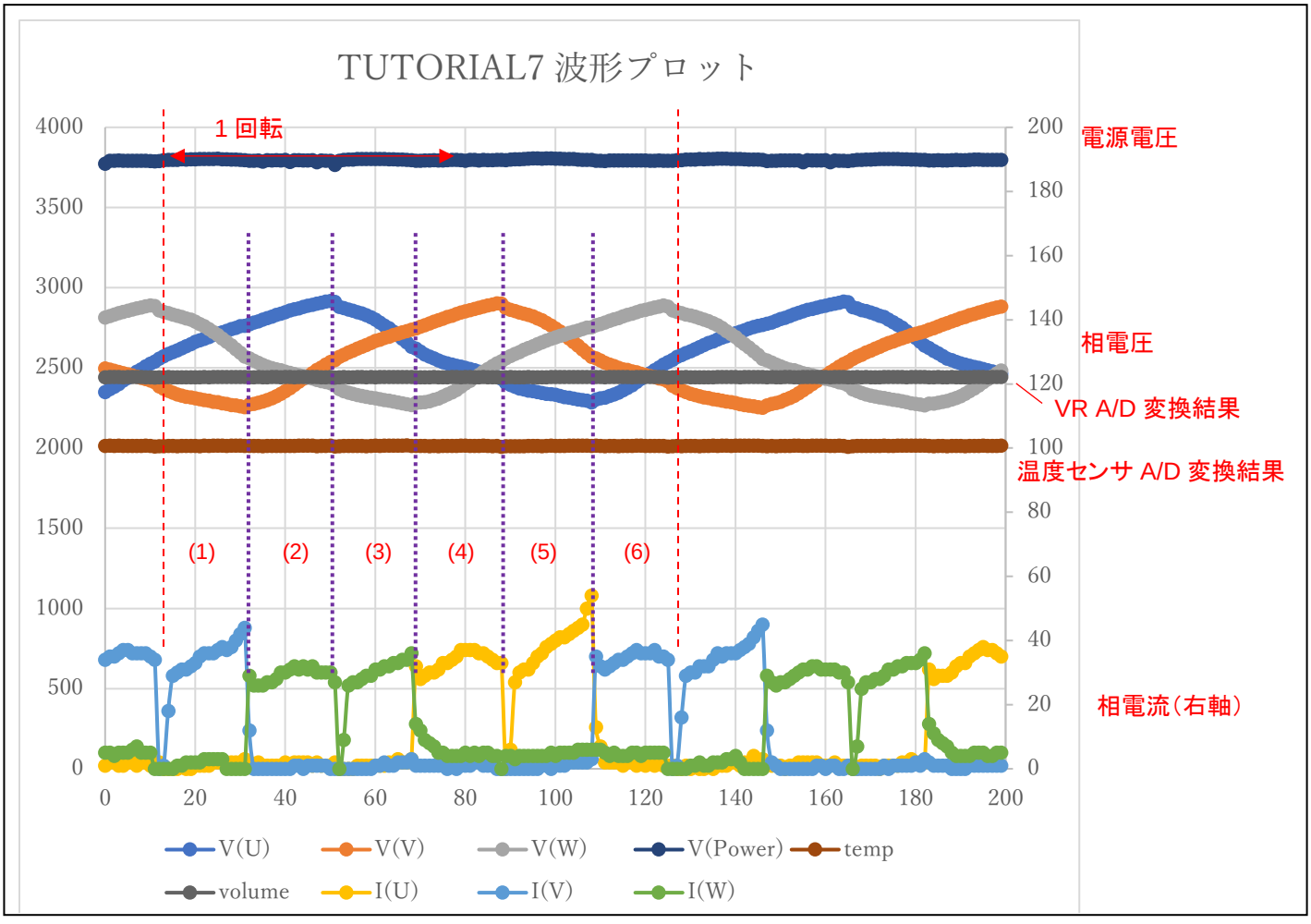
U 相電圧, V 相電圧, W 相電圧
U 相電流, V 相電流, W 相電流,
電源電圧, 温度, VR

合計 9 種のデータを出力します

データのサンプリングレートは 20kHz
（50us 間隔）です

※データは、常時サンプリングされており、'A'を入力した時に、バッファリングされているデータ（400 点分）が表示されます

・シリアル端末から出力される情報を Excel でプロットした波形



波形は、端末に表示された数値をプロットしたものとなります。縦軸は、A/D 変換値となります。RX71M の A/D コンバータは、12bit 精度のため、値は 0~$2^{12}$-1(=0~4095)の範囲の値を取ります。相電圧は、モータの駆動端子を、RC でなだらかにした（LPF 通過後の）波形です。相電流は、GND 側に、電流センスの抵抗がある回路なので、I(U)がプラス方向に振れている＝他から U 相に電流が流れ込んでいる事を示しています。

本チュートリアルでは、前チュートリアル同様、1 回転で 6 回電流の向きを切り替えており、

| | 電流の流れる方向 |
|---|---|
| (1) | U→V |
| (2) | U→W |
| (3) | V→W |
| (4) | V→U |
| (5) | W→U |
| (6) | W→V |

に対応します。

※電流は PWM 駆動しているので、断続的に ON/OFF を繰り返しています。PWM のキャリア周波数と、A/D 変換周期(50us)の関係で波形の見え方は変わります。（RX71M マイコンでは、PWM 波形出力のタイミングで A/D 変換をキックする設定も可能です。）

・src¥blm¥blm_intr.c 内 CMT0 割り込み関数 blm_interrupt_cmt0

```
//回転方向:CCW
switch(g_sensor_pos[i])
{
    case 3:
        blm_drive[i] (BLM_U_V_DIRECTION);
        break;
    case 2:
        blm_drive[i] (BLM_U_W_DIRECTION);
        break;
    case 6:
        blm_drive[i] (BLM_V_W_DIRECTION);
        break;
    case 4:
        blm_drive[i] (BLM_V_U_DIRECTION);
        break;
    case 5:
        blm_drive[i] (BLM_W_U_DIRECTION);
        break;
    case 1:
        blm_drive[i] (BLM_W_V_DIRECTION);
        break;
    default:
        blm_drive[i] (BLM_OFF_DIRECTION);
        break;
```

(1)に対応
(2)に対応
(3)に対応
(4)に対応
(5)に対応
(6)に対応
時系列

※回転方向は反時計回りです

※制御プログラム次第で、波形は変わります

本プログラムでは、A/D 変換の生データを一旦メモリに格納し、それをシリアル端末経由で出力する処理を行っていますが、実際のモータ制御プログラムでは、得られたデータをリアルタイムに処理して、モータの制御に活用する事が出来ます。（チュートリアル（応用編）では、相電圧の変化によりモータを駆動するチュートリアルがあります。）

チュートリアル 7 までが、基本的にモータを回す上で必須となるであろうマイコンの機能を使ったチュートリアルとなります。

・チュートリアル 7 での端子設定
→チュートリアル 6 に同じ

・チュートリアル 7 での使用コンポーネント
→チュートリアル 6 に同じ

# 2. チュートリアル（応用編）

チュートリアル 1~7 までの内容を踏まえ、チュートリアル 7 のプログラムに別な機能を加えたのが 2 章で説明するチュートリアル（応用編）となります。

## 2.1. ハードウェアでの電流方向切り替え

参照プロジェクト：RX71M_BLMKIT_TUTORIAL_A

RX71M マイコンには、3 相ブラシレスモータ駆動機構が用意されており、ホールセンサ値をレジスタに設定する事により、出力の電流方向を切り替える事ができます。

制御方式としては、120° 制御となりますが、タイマ(MTU3)を組み合わせて 3 相の信号を PWM 制御しています。

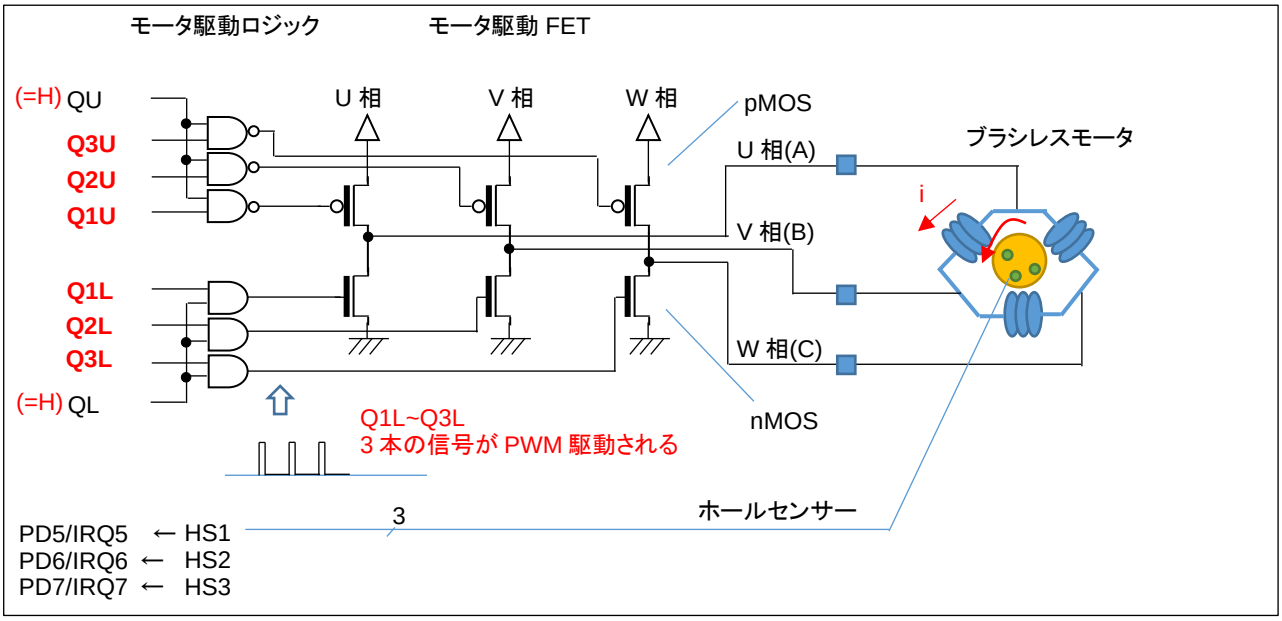
この方式の利点としては、マイコン側で電流方向の切り替えが行われる事です。（電流方向の設定をユーザプログラムで制御する必要がありません）

VR を絞った状態で、SW2 で ON にしてください。その後、徐々に VR を回してみてください。VR の回転角に応じて回転数が変わります。（VR を 1/3 ぐらいまで回さないと回転を始めませんが、一度回転が始まると、duty を絞っても回転を維持します。）

プログラムの動作は、TUTORIAL5~7 とそう変わらない動作ですが、本チュートリアルでは、P22, P23, PE2, PE1, PD1, PD2 の値をユーザプログラムで変更していない点が異なります。

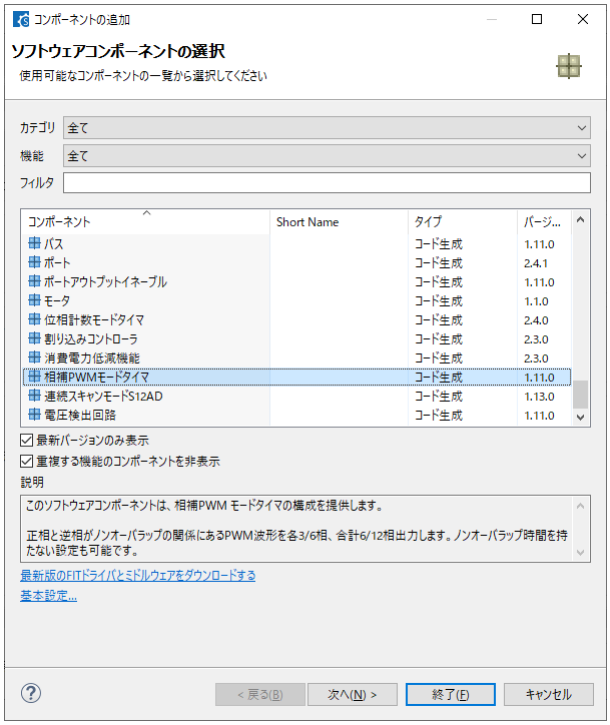
TUTORIAL5~7 では、50us 毎にホールセンサの値を見て、それに応じた電流方法の切り替えをプログラム内で行っていましたが、本チュートリアルでは電流方向の切り替えを行ってる処理のプログラムコードは存在しません。
（50us 毎にホールセンサの値を見ていますが、これは回転数の算出のためです。ホールセンサの値を見ている部分の処理を消しても、モータの回転には影響しません。）

ホールセンサ端子、PD5, PD6, PD7 は割り込み端子として設定を行っており、端子レベルが変化した際、マイコンのブラシレスモータ制御用のレジスタを書き換える処理としてます。この 3 端子の L/H レベルの組み合わせで、出力の電流方向が決まります。

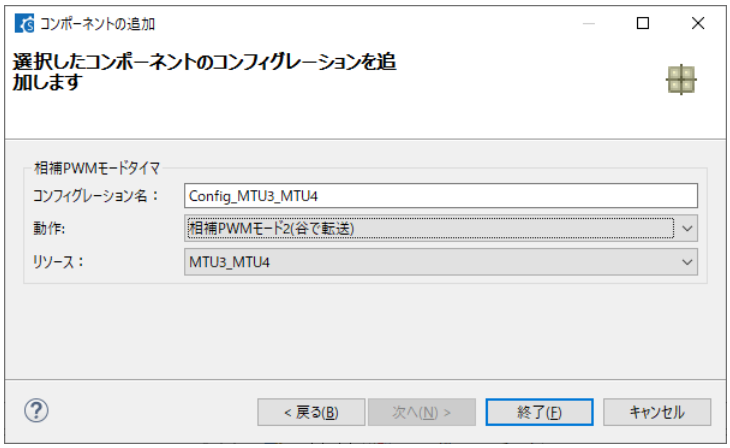



本チュートリアルでは、QU=QL=H とします。Q1U~Q3U, Q1L~Q3L の 6 本の信号がホールセンサ値(HS1~3)に応じて、アクティブ(H)になります。VR の回転角に応じて、PWM の duty は変わります。PWM は、Q1L~Q3L の 3 相に適用されます。Q1U~Q3U は、120° 毎に H か L に制御されます。

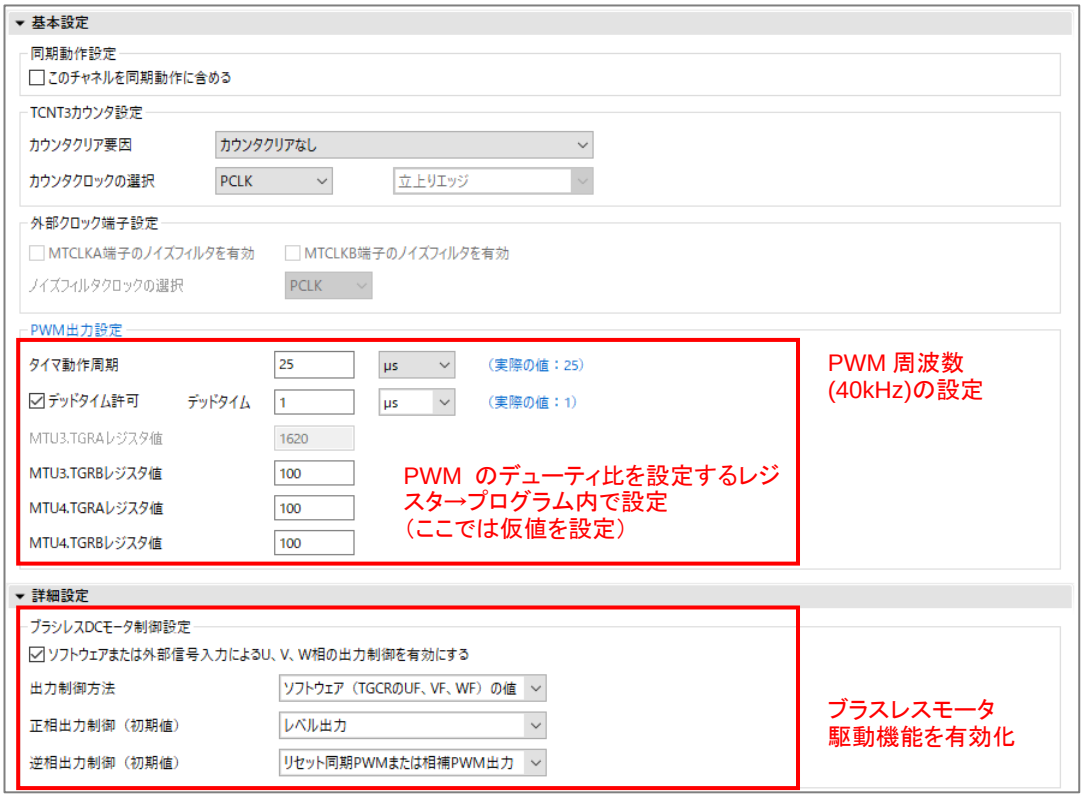
・スマート・コンフィグレータの設定




スマート・コンフィグレータでは、相補 PWM タイマを選択します。




ここでは、相補 PWM モード 2 を選択しています。




タイマは、MTU3(MTU3/MTU4)を使用して、「ブラスレス DC モータ制御設定」を有効化します。

出力設定は、6 相の出力を有効化して、全て「アクティブレベル:H」で設定します。（モータドライバボードが、H で MOS FET が ON して電流を流す仕様のため）

マイコンのブラシレスモータ駆動機能を使うと、ほとんどマイコンのハードウェアのみでモータを回す事ができますので、マイコンがこのような機能を持っていて必要に応じて使うことができると認識して頂ければと思います。

・blm.c

```
void blm_start_ch1(void)
{
    //ブラシレスモータ CH-1動作開始関数

    //引数
    // なし

    //戻り値
    // なし

    //PD3(QU), P23(QL) = H
    PORTD.PODR.BIT.B3 = 1;
    PORT2.PODR.BIT.B3 = 1;

    //3相 : PWM（H側はON時はHレベル、L側はON時はPWM）
    blm_dutyset_ch1(0.0f);
    R_Config_MTU3_MTU4_Start();
    MTU.TRWERA.BIT.RWE = 1;//MTU.TGCRAを操作する

    //ホールセンサ位置に応じた信号波形印加
    if (g_target_direction[BLM_CH_1] == BLM_CW)
    {
        //回転方向CW
        MTU.TGCRA.BIT.UF = PORTD.PIDR.BIT.B7;
        MTU.TGCRA.BIT.VF = PORTD.PIDR.BIT.B5;
        MTU.TGCRA.BIT.WF = PORTD.PIDR.BIT.B6;
    }
    else if (g_target_direction[BLM_CH_1] == BLM_CCW)
    {
        //回転方向CCW
        MTU.TGCRA.BIT.UF = ~PORTD.PIDR.BIT.B7;
        MTU.TGCRA.BIT.VF = ~PORTD.PIDR.BIT.B5;
        MTU.TGCRA.BIT.WF = ~PORTD.PIDR.BIT.B6;
    }
```

QU=QL=H 設定

モータ動作開始

回転方向に応じて
レジスタの「初期値」を設定

※ここではモータ回転開始時の初期値を設定しています
ホールセンサの値が変化した場合は後述の割り込みで
処理しています

・シリアル端末から出力される情報

```
                      CH-1
Motor Driver Board    : Connect
Active               :    o
rotation speed([rpm])  :  4740
target direction       :   CCW
Temperature(A/D value) :  2032
Temperature(degree)    :    25
VR(A/D value)          :  1396
duty[%]               :  34.1
```

基本的には、チュートリアル 7 と変わりませんが、回転方向(target direction)の表示、機能が追加されています。

| | 起動時 | D コマンド入力時 |
|---|---|---|
| | 回転方向反時計回り(CCW) | 回転方向時計回り(CW) |

D コマンドで、回転方向が切り替わります。D コマンドで、回転方向設定後、SW2 でモータを回転させてください。（回転方向は停止中に決定）。回転方向は TGCRA.UF~WF レジスタに設定する値を、ホールセンサの出力とするか、反転信号とするかで変えています。

・スマート・コンフィグレータでの割り込み(Config_ICU)設定


PD5(IRQ5), PD6(IRQ6), PD7(IRQ7)の割り込みの設定をしています。割り込みのタイミングは、両エッジです。IRQ4(PD4)は、過電流検出端子の設定で従来のチュートリアル（チュートリアル 6 以降）でも使用しています。

IRQ5, IRQ6, IRQ7 の割り込みは、いずれの割り込み発生時でも同じ関数を呼ぶ様に設定しています。

・blm_intr.c

```
void blm_interrupt_irq567(void)
{
    //CH-1回転制御（ホールセンサ切り替わり）
    unsigned char tgcra;

    tgcra = MTU.TGCRA.BYTE;

    if (g_target_direction[BLM_CH_1] == BLM_CW)
    {
        //回転方向CW
        tgcra &= ~0x7;//UF,VF,WF=0
        tgcra |= PORTD.PIDR.BIT.B7;//PD7:HS3->UF
        tgcra |= (PORTD.PIDR.BIT.B5 << 1);//PD5:HS1->VF
        tgcra |= (PORTD.PIDR.BIT.B6 << 2);//PD6:HS2->WF
    }
    else if (g_target_direction[BLM_CH_1] == BLM_CCW)
    {
        //回転方向CCW
        tgcra &= ~0x7;//UF,VF,WF=0
        if (PORTD.PIDR.BIT.B7 == 0) tgcra |= 0x1;//*PD7:*HS3->UF ...*:反転
        if (PORTD.PIDR.BIT.B5 == 0) tgcra |= 0x2;//*PD5:*HS1->VF
        if (PORTD.PIDR.BIT.B6 == 0) tgcra |= 0x4;//*PD6:*HS2->WF
    }

    MTU.TGCRA.BYTE = tgcra;//TGCRA.UF,TGCRA.VF,TGCRA.WFにホールセンサの情報をセット
}
```

回転方向 CW の場合は、
HS1~HS3(PD4,PD5,PD6)の値を
レジスタに設定

回転方向 CCW の場合は、
HS1~HS3(PD4,PD5,PD6)の反転値を
レジスタに設定

マイコンが持っている、3 相ブラシレスモータ制御機能を用いると、レジスタにホールセンサ値を設定するだけで、電流方向の切り替えは、マイコンが自動的に行ってくれます。

・チュートリアル A での端子設定

| 端子名 | 役割 | 割り当て | 備考 |
|---|---|---|---|
| P07 | SW2 | 周辺機能(IRQ15) | マイコンボード上のプッシュスイッチ |
| P21 | QL(CH-1) | 出力 | Q1L~Q3L の 3 相 PWM とするので QL は汎用 I/O |
| P22,P23 | Q1U,Q1L(CH-1) | MTIOC3B/3D | 本チュートリアルではタイマ出力端子に設定 |
| P24 | LED1(D1) | 出力（初期値 L） | LED，初期状態で LED は消灯<br>※USB パワースイッチ経由での接続 |
| P26 | UART 通信（送信） | 周辺機能(SCI1) | TXD1 として設定 |
| P30 | UART 通信（受信） | 周辺機能(SCI1) | RXD1 として設定 |
| P40~P47<br>PD0 | A/D 変換 | AN000~AN007<br>AN108 | |
| PD1,PD2 | Q3U,Q3L(CH-1) | MTIOC4B/4D | 本チュートリアルではタイマ出力端子に設定 |
| PD3 | QU(CH-1) | 出力 | |
| PD4 | *INT(CH-1) | 端子割り込み(IRQ4) | プルアップ有効 |
| PD5 | HS1(CH-1) | 端子割り込み(IRQ5) | 割り込みでホールセンサ入力端子として使用 |
| PD6 | HS2(CH-1) | 端子割り込み(IRQ6) | 割り込みでホールセンサ入力端子として使用 |
| PD7 | HS3(CH-1) | 端子割り込み(IRQ7) | 割り込みでホールセンサ入力端子として使用 |
| PE1,PE2 | Q2L,Q2U(CH-1) | MTIOC4C/4A | 本チュートリアルではタイマ出力端子に設定 |

・チュートリアル A での使用コンポーネント

| コンポーネント名 | リソース | 用途 | 備考 |
|---|---|---|---|
| r_bsp | | 基本的なマイコン設定 | 初期状態で追加済み |
| Config_ICU | ICU | 端子割り込み<br>過電流停止<br>ホールセンサ切り替わり検出 | SW2 が押された際に割り込みが掛る設定<br>IRQ4 を立下りエッジで使用<br>IRQ5,6,7 を両エッジで使用 |
| Config_S12AD0 | S12AD0 | A/D 変換 | |
| Config_S12AD1 | S12AD1 | A/D 変換 | |
| Config_PORT | PORT | I/O ポート | |
| Config_SCI1 | SCI1 | UART 通信 | |
| Config_CMT0 | CMT0 | 50us タイマ | |
| Config_CMT1 | CMT1 | 10ms タイマ | |
| Config_CMT2 | CMT2 | 500ms タイマ | |
| Config_MTU3_MTU4 | MTU3/4 | PWM 波形生成 | ブラシレスモータ駆動機能を使用 |

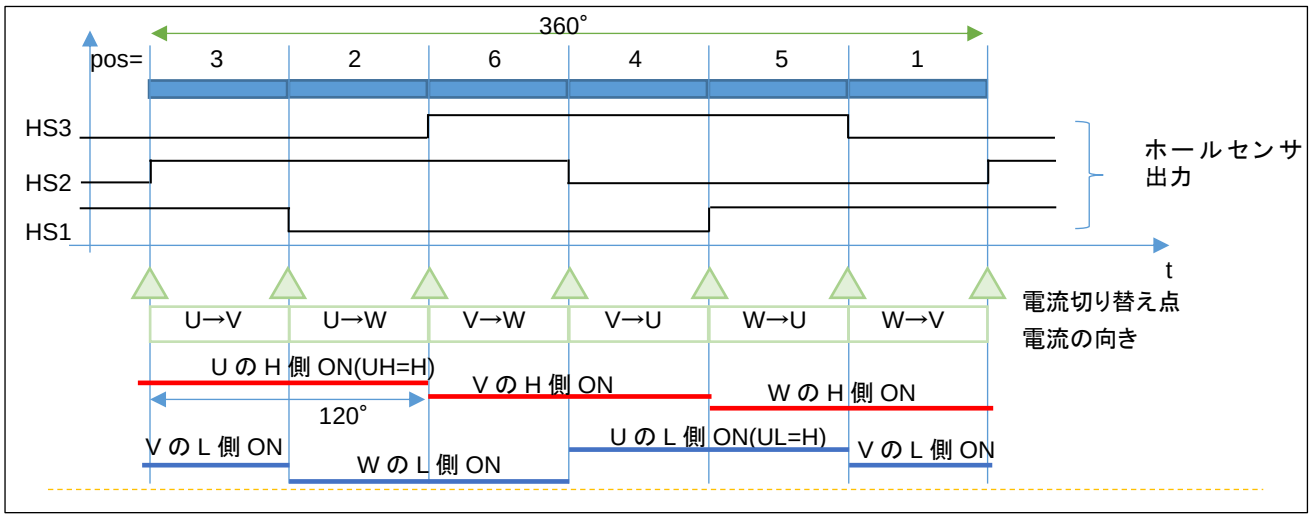
※グレーの項目はチュートリアル 7 から変更なし

チュートリアル 7 では、P21 をタイマ出力端子に設定して、P22, P23, PE2, PE1, PD1, PD2 を汎用 I/O 出力に設定しているが、本チュートリアルでは逆（P21 は汎用出力、P22, P23, PE2, PE1, PD1, PD2 はタイマ出力）としています。

## 2.2. 相補 PWM 信号での駆動

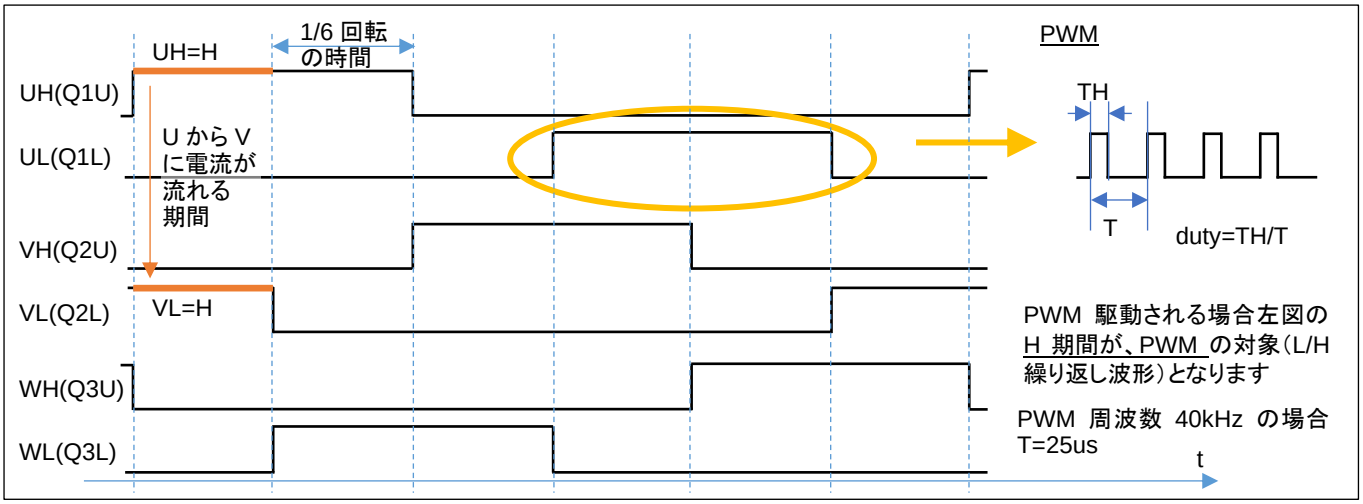
参照プロジェクト:RX71M_BLMKIT_TUTORIAL_B

・120 度制御




TUTORIAL7, TUTORIAL_A でモータを駆動している方式は、H 側と L 側の ON 期間を 60°（1/6 周期）ずらし、H 側の ON の期間, L 側 ON の期間をそれぞれ 120°として、電流の方向を切り替えていく方式で、120°制御です。

・120 度制御の駆動信号

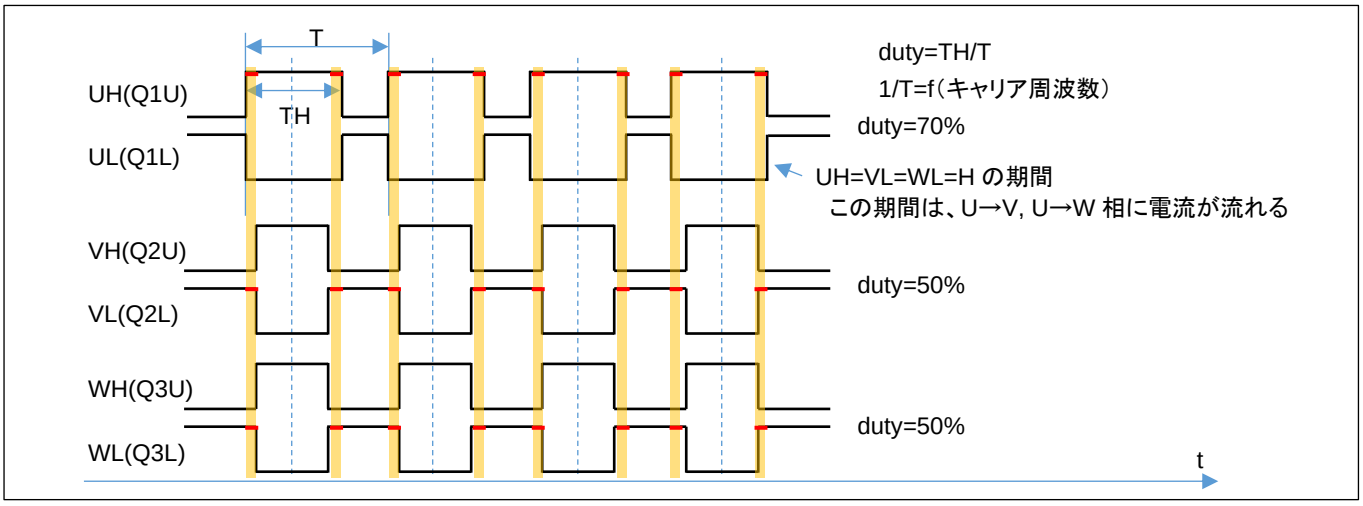



※TUTORIAL_A では、L 側 3 本の信号が PWM 駆動、TUTORIAL7 では Q1L, Q2L, Q3L と AND（論理積）を取る QL が PWM 駆動されることによりモータ側からみると、L 側の 3 本の信号が PWM 駆動となります

120 度駆動では、6 本の信号線の内、H レベルになっている H 側と L 側の 1 ペアの信号線の間で電流が流れます。U 相の H 側と V 相の L 側が H レベルになっている場合は、U→V、V 相の H 側と U 相の L 側が H レベルになっている場合は、V→U の向きに電流が流れます。とある瞬間に着目すると、U→V, U→W, V→U, V→W, W→U, W→V の 6 通りある電流パスの内 1 つのパスに電流が流れているイメージです。

120 度駆動に対し、H 側と L 側の波形を反転信号で駆動する方式は、相補 PWM と呼ばれます。U 相 H 側(UH)と U 相の L 側(UL)は、常に逆相で駆動します。V 相と、W 相も同様です。

・相補 PWM 制御の駆動信号



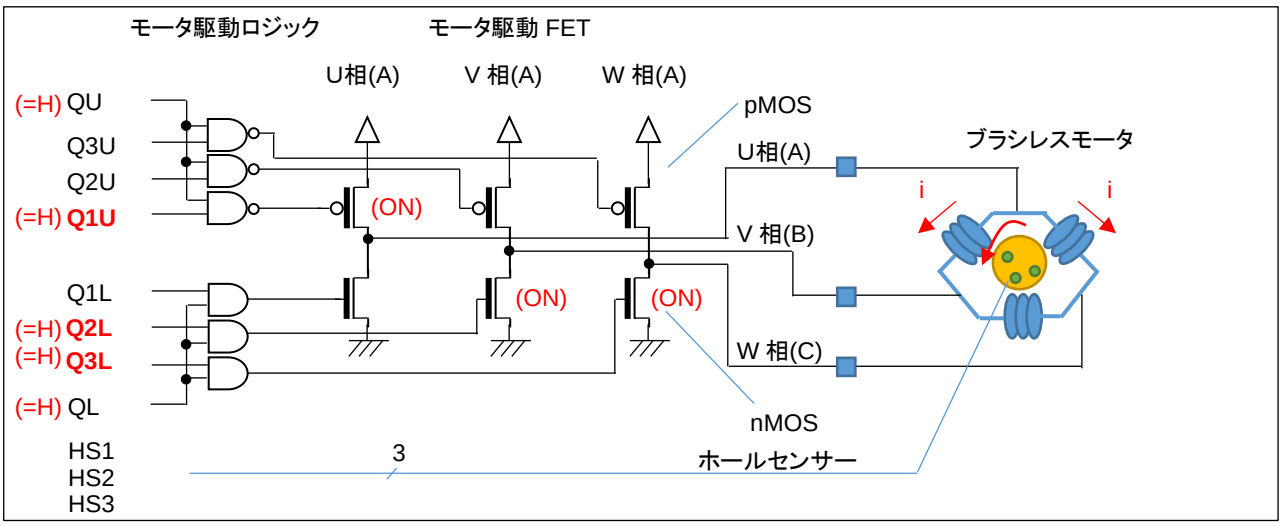

上図の相補 PWM では、

U 相　duty70%
V 相　duty50%
W 相　duty50%

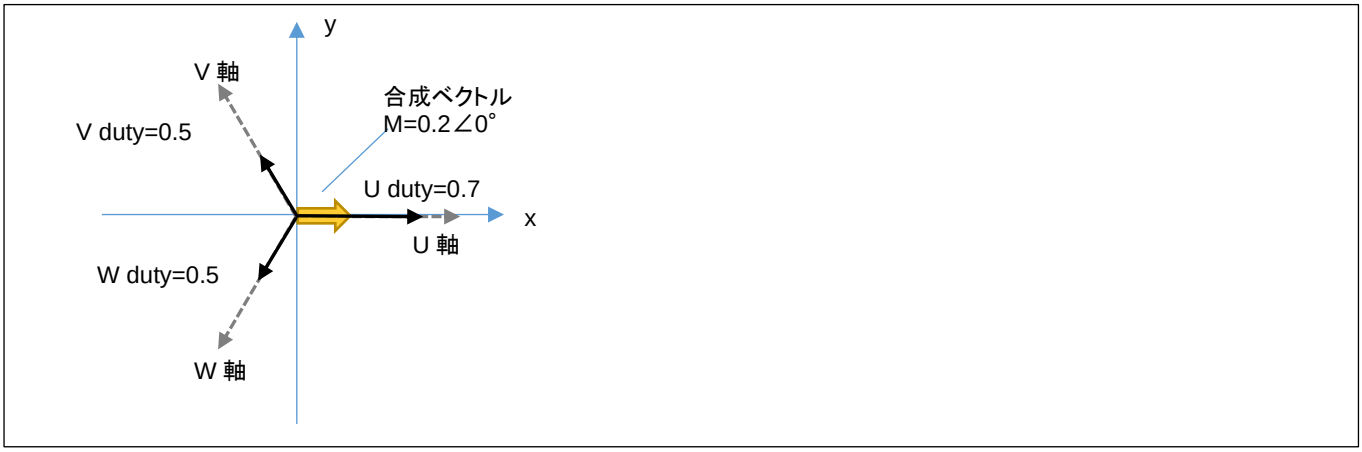
の、PWM 信号となっています。この例では、オレンジ塗りつぶしのタイミングで、（U 相の H 側と V 相の L 側と W 相の L 側が ON しており）

U 相 H　→　V 相 L
U 相 H　→　W 相 L

に電流が流れます。120°制御では、電流の流れるパスは 1 通りでしたが、相補 PWM では、基本的に 2 通りのパスがあります。（duty の高い相から duty の低い相への電流が生じる。）




ここで、duty の差分（70-50=20%）の時間だけ、U→V, U→W に電流が流れる事となります。



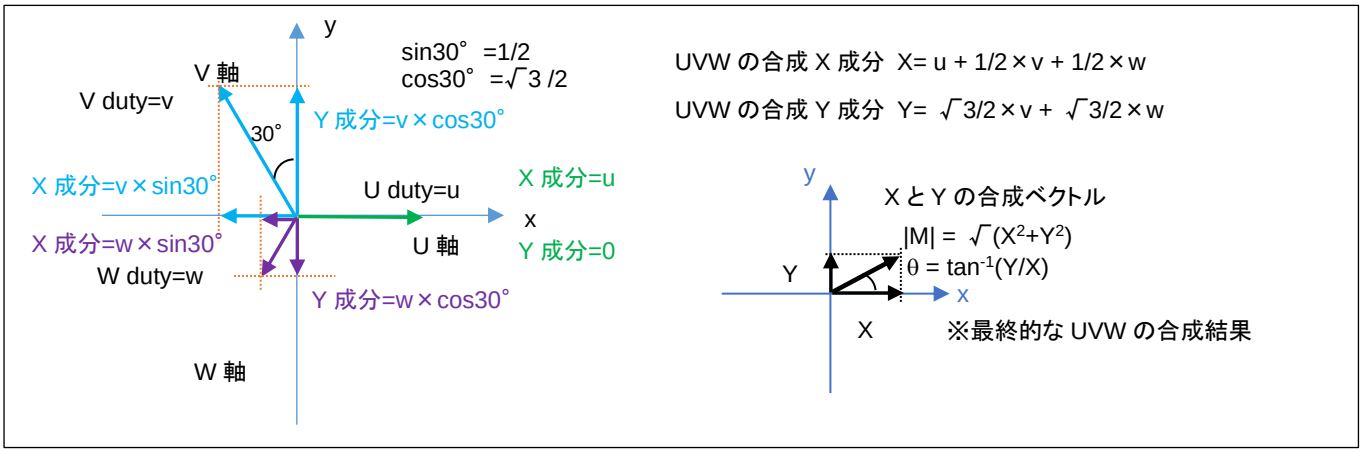

U 相に与える duty を 70%, V, W 相に与える duty を 50%とした場合、図で考えると、U,V,W 相は（上図 U,V,W 軸の方向に）120° の差分があり、それぞれの方向に 0.7, 0.5, 0.5 の強さで引っ張っているイメージです。

U=0.7, V=0.5, W=0.5 の強さで引っ張ると、この場合の合成ベクトルは、U 軸方向に 0.2 の力で引っ張る事となります。

U, V, W の 3 相の duty を調整する事により、「印加する磁界の大きさ（＝電流の大きさ）：黄色の矢印の長さ」と「どの向きに磁界を印加するか（＝UVW のどの方向に電流を流すか）：黄色の矢印の方向」を自由に設定できます。

U=0.7, V=0.5, W=0.5 の 3 本のベクトルの合成ベクトルは、U 軸方向に 0.2(20%)となります。

ここで、x 軸に U 軸を重ねる様にし、V 軸を 120°、W 軸を 240°の位置に取ります。




$$x = U - \frac{V}{2} - \frac{W}{2}$$

$$y = (V - W)\frac{\sqrt{3}}{2}$$

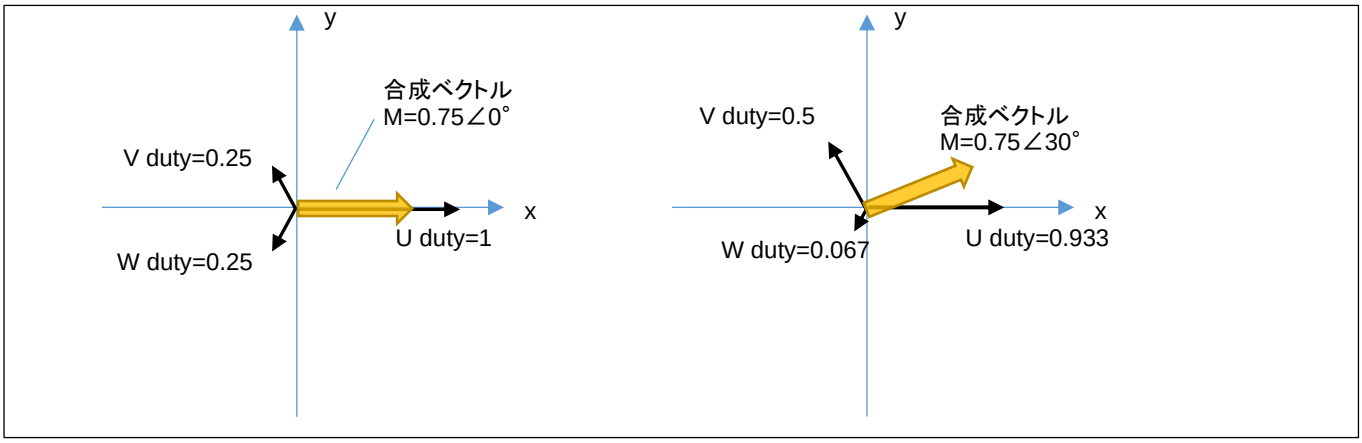
U, V, W の大きさから、x-y 軸（直交座標系）のベクトルに変換することができ、U,V,W の合成ベクトルの長さを|M|、x 軸を基準とした角度をθとすると、

$$|M| = \sqrt{x^2 + y^2}$$

$$\theta = tan^{-1}\frac{y}{x}$$

となります。

ここで、U 相の duty を 1 として、V, W 相の duty を 0.25 とすると、合成ベクトルとしては、U 軸方向に 0.75 となります。同様に V,V,W=(0.933, 0.5, 0.067)とすると、合成ベクトルは強さは 0.75 で角度は U 軸から 30°ずれた位置となります。




120 度制御の場合は、60°単位での切り替え（1 回転で 6 段階、電流の流れる方向＝磁界の方向は 6 パターンしか存在しない）となりますが、相補 PWM では磁界の向きを任意の角度で印加する事が可能です。

120 度制御：1 回転で電流の流れる方向 6 パターンの切り替え
相補 PWM：1 回転の間で合成ベクトルの向きを任意の刻み、角度で切り替えていく事が可能

本チュートリアルのプログラムの動作としては以下となります。

VR を絞った状態で SW を ON にしてください。その後、VR を上げてみてください。どこかでモータが回りだすタイミングがあるはずです。

プログラム動作としては、TUTORIAL4 と同じです。回転数は 2000rpm 固定で、VR により duty を変化させていくプログラムとなっています。（モータの制御に、ホールセンサの値は使っていません。）

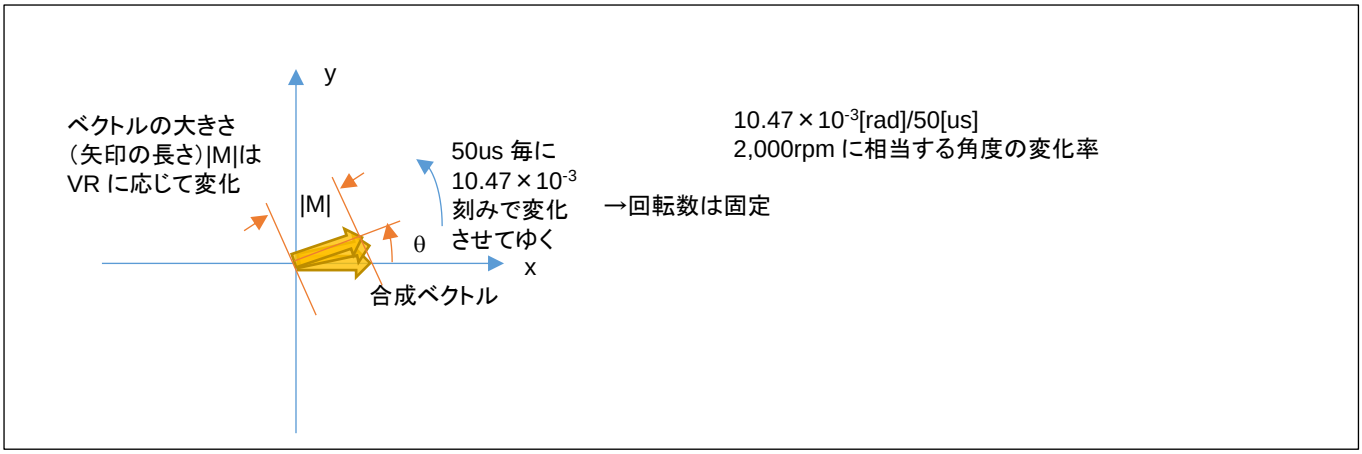
合成ベクトルの大きさ(|M|)=duty は、VR の回転角度に応じて変化します。合成ベクトルの角度(θ)は、50us 毎に動かしていきます。

2000rpm / 60 = 33.3 回転/s
1/33.3 = 30ms …1 回転（2π[rad]で 30ms かかる）
30ms / 50us ×2π = $10.47 \times 10^{-3}$[rad]

本チュートリアルでは、50us(CMT0)の周期割り込みで、磁界の印加角度（合成ベクトルの角度）を変えていく処理としているので、50us 毎に印加角度を $10.47 \times 10^{-3}$[rad]ずつ変化させていけば良い（＝2000rpm の速度で回転するように印加する磁界を動かす）事となります。
→1 回転(2π[rad])で、600 段階(2π/10.47e-3=600)の細かさで磁界の印加方向を切り替える

回転数は固定で duty を VR のツマミの回転に応じて変化させる手法は、TUTORIAL4 と同様です、

duty（合成ベクトルの大きさ|M|）が小さいときはモータは回転せず、大きすぎても効率が下がります（このあたりの関係も TUTORIAL4 と同様です）。最適な duty のとき、モータはスムーズに回ります。




モータを制御する側からすると、

・合成ベクトルの大きさ|M|
・合成ベクトルの角度θ

を与えたいのですが、マイコン側からすると、

・U 相の duty(0~100%)
・V 相の duty(0~100%)
・W 相の duty(0~100%)

の 3 値を与える事となります。

|M|, θを与えた際、U,V,W のそれぞれの強さに分解する方式は一通りではないのですが、本チュートリアルのプログラムでのデフォルトは正弦波駆動（UVW の duty がそれぞれ、正弦波状で変化）としています。

U(duty) = (|M| ・cos θ) /2 + 0.5
V(duty) = (|M| ・cos (θ-120°)) /2 + 0.5
W(duty) = (|M| ・cos (θ-240°)) /2 + 0.5

（0-1 の範囲に正規化）

|M|, θの値から上式で、U,V,W のそれぞれの duty 値に変換しています。

－合成ベクトルの UVW への分解に関して－

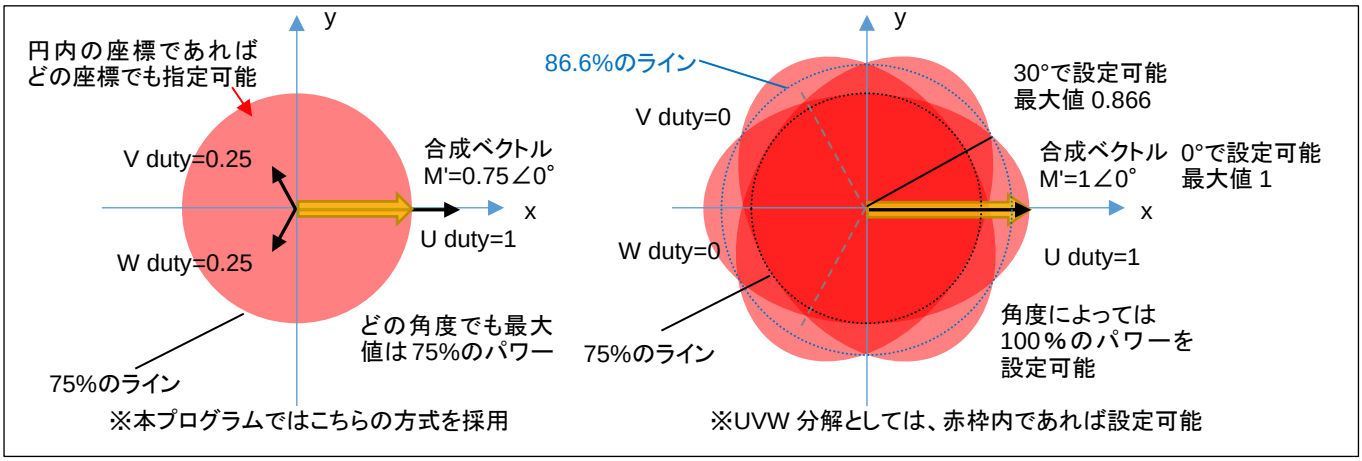
上記手法、計算式（正弦波駆動）を用いると、|M|=1, θ=0 を与えて各相の duty を計算すると、
(U, V, W) = (1.0, 0.25, 0.25)
となり、この合成ベクトルは、
0.75∠0°
となります。0°（U 軸）方向に最大限のパワーを与えたい場合、結果的には 75%のパワーで 0° 方向に力を印加する事となります。

同様に、|M|=1, θ=30° での各相の duty は、
(U, V, W) = (0.933, 0.5, 0.067)
となり、この合成ベクトルは
|M'|∠θ = 0.75∠30°
です。30° 方向に最大限のパワーを与えたい場合でも上記同様、結果的には 75%(=|M'|)のパワーとなります。
（入力として与えた、|M|が|M'|に変換されます。|M'|=0.75×|M|です。）

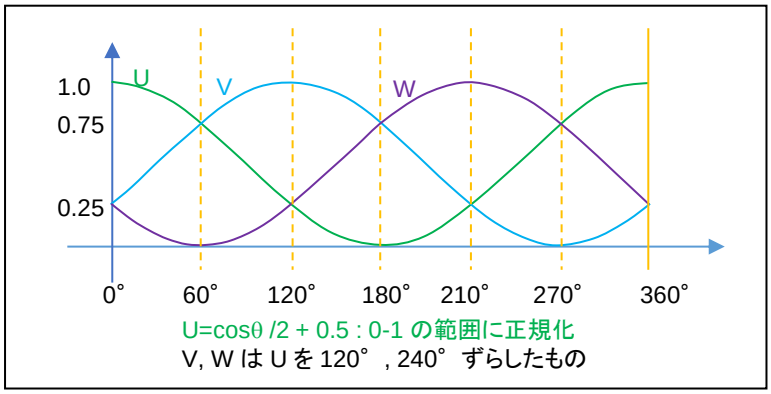
本手法で、UVW の分解を計算した場合、どの角度においても、最大値は 0.75 になります。（0.75 に制限されます）

例えば、3 相の duty を以下の様にすれば、
(U, V, W) = (1.0, 0.0, 0.0) → 1.0∠0°
となります。（|M'| = |M|とする事が可能です）

正弦波駆動ではない別な分解方法を用いると、0° 方向に 100%のパワーを与える事も可能です。但し、全角度に対して、100%のパワーを与える事は、UVW（0°，120°，240°）の 3 本のベクトルの合成では不可能です。（100%のパワーを与えることのできる角度は、0°，120°，240° とその反対側の 60°，180°，300° のみ。）
30° では、(U, V, W) = (1.0, 0.5, 0.0) → 0.866∠30° 、86.6%が理論上の最大パワーとなります。



・本プログラムの UVW 分解（正弦波駆動）




横軸は角度（0~360° のモータ 1 回転）、縦軸は UVW の 3 相に分解したそれぞれの相に与える duty 比(0~1)を示しています

本プログラムの UVW 分解は、各相を正弦波で連続的に変化させる手法で、最大のパワーがどの角度においても、75%に制限されるが、UVW の変化に連続性があり、三角関数の計算は必要であるが、計算式は単純です。cosθの値は-1~1 の範囲の値を取りますので、PWM duty（設定可能なのは 0~100%, 0~1）に対応させるために、2 で割り 0.5 を加算して、0~1 の範囲にシフト（1 に正規化）させています。

duty=100%の設定を行った場合は、UVW の各相の duty の変化は、上記グラフの通り。duty=50%の設定を行った場合は、上記のグラフ×0.5 の値（UVW の各相の duty が 0-50%の範囲で変化）となります。

例えば、60° の方向に duty=100%の設定を行った場合は、
(U,V,W)=(0.75, 0.75, 0) →0.75∠60° （120° 制御で印加可能な最大パワーを基準にすると 75%）
となります。

60° の方向に duty=50%の設定を行った場合は、
(U,V,W)=(0.375, 0.375, 0) →0.375∠60°
となります。

設定した duty が 50%の場合、各相の duty は 0-50%の範囲で変化して、変化率は回転数に応じた値となります。例えば、2,000rpm の場合、1 回転が 30ms なので、30ms で 360° 分の変化（0→0.25→0.5→0.25→0 と変化）をします。本チュートリアルの制御周期は 50us なので、50us 毎に 0.6° ずつの変化となります。

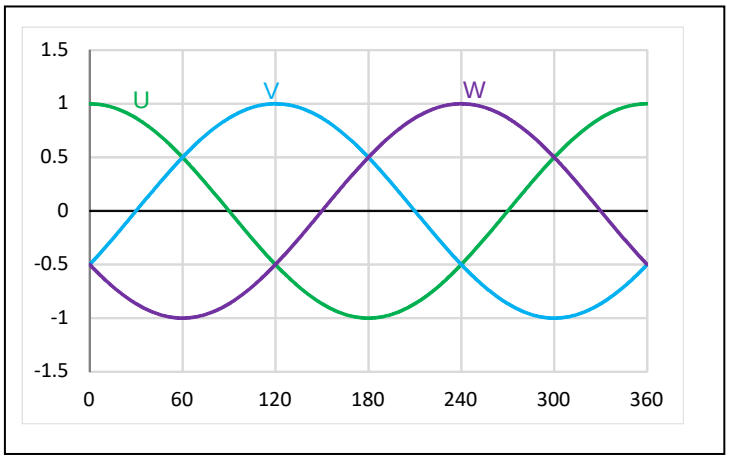
相補 PWM の場合、全体の duty は変化しなくても、UVW 各相の duty は常に変化している動作となります。

正弦波駆動は考え方や計算式はシンプルですが、印加可能なパワーが低いという欠点もありますので、その他の変換方法に関しても考えてみる事とします。

（印加可能なパワーが低い→120° 駆動等の別な駆動方式と同じ電源電圧を与えた場合、モータの回転数や出力パワーが小さくなってしまう。電源のエネルギーをモータ駆動のエネルギーに変換する効率が悪いという事を意味します。）

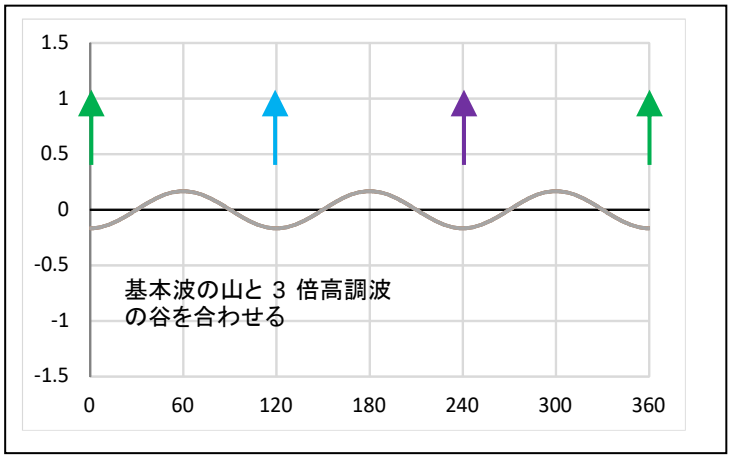
・正弦波駆動＋3 倍高調波の重畳

(1)正弦波駆動による分解（正規化前）



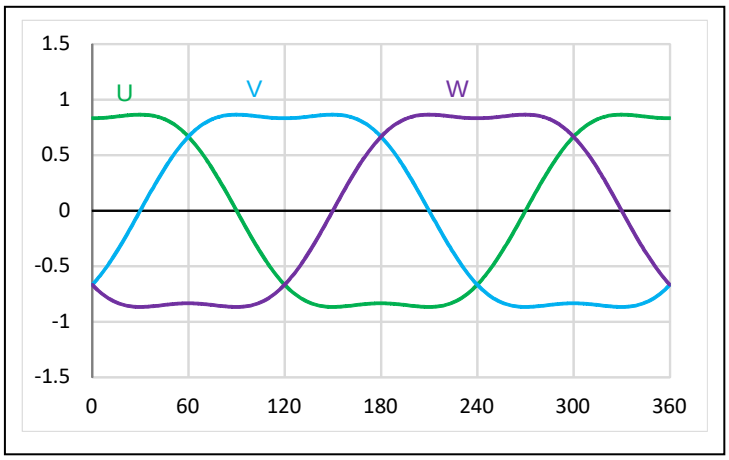

(1)は正弦波による分解の正規化前の UVW（120 度位相をずらした 3 相の単純な正弦波）の値です。

(2)3 倍高調波（振幅 1/6）



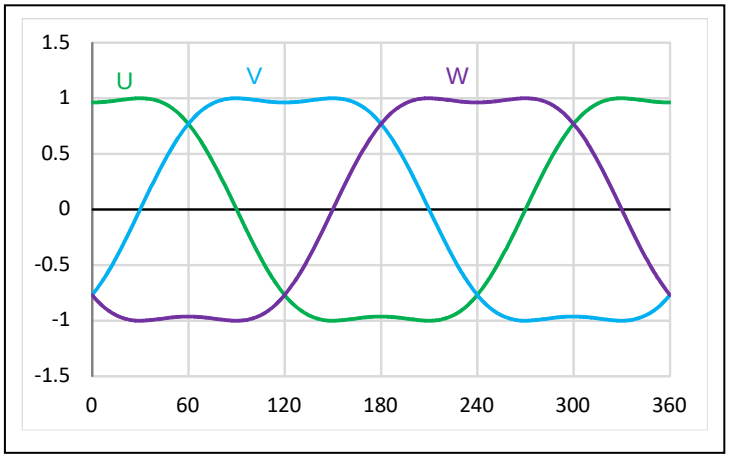

(2)は、周波数を 3 倍に、振幅を 1/6 にした正弦波の波形となります。
（sin で計算する場合は U/V/W 相と同位相、cos で計算する場合は逆位相）

(3)基本波＋3 倍高調波の重畳（(1)+(2)）



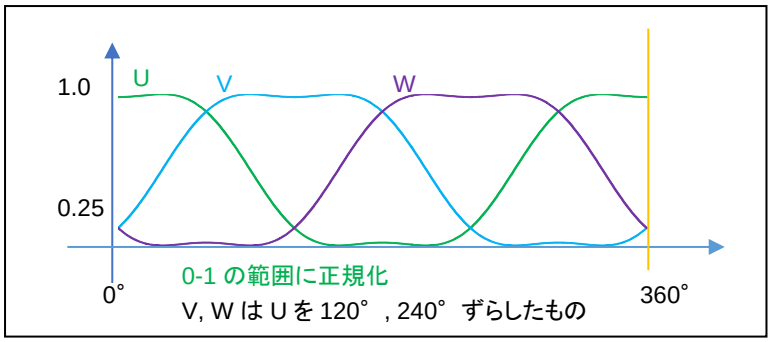
(1)と(2)を単純に足し合わせると、上記の様な波形となります。ここで、(1)の波形は-1～1 の値を取りましたが、(3)の波形は、(1)の波形のピークが抑えられている波形となります。具体的には、最大値が√3/2=0.866 になっています（-0.866～0.866 の値を取る）。3 倍高調波の重畳により、波形のピークが抑えられ、結果的に、全体を伸長する余力（0.866 を 1 に引き延ばす余地）が生じる結果となります。

(4)基本波＋3 倍高調波の重畳のスカラー倍（(3)×2/√3）




(4)は、単純に(3)をスカラー倍（×2/√3, 1.155 倍）したものです。

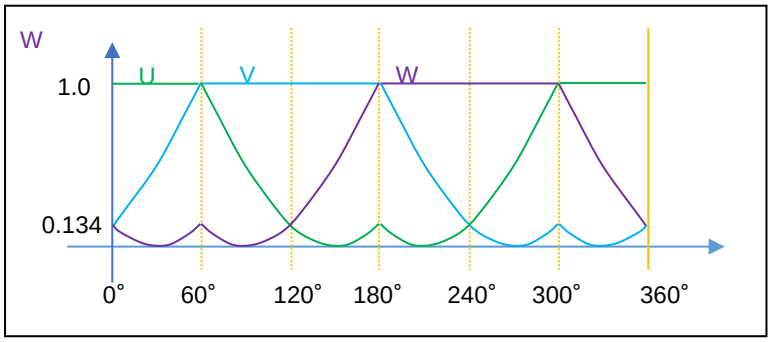
duty としては、0～1（このグラフでは正規化前なので、-1～1 の範囲）の設定が可能です。設定可能な duty をフルに活用する目的で(3)の波形を-1~1 の範囲に引き延ばす処理を行った結果です。




最終的に正規化した後の値（実際に U,V,W 相に設定する duty 値）は、上記の様になります（0-1 の範囲）。

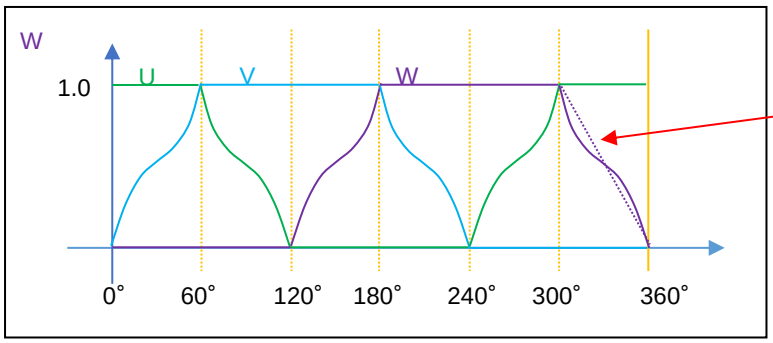
この、正弦波＋3 倍高調波駆動により、設定可能な duty は 0~360° どの角度でも、86.6%(=√3/2)となります。単純な正弦波駆動に対し、2/√3=1.155(+15.5%)設定可能な duty の引き上げが可能となります。

・UVW 分解（別バージョン 1）




どの角度でも設定可能な最大のパワーは、86.6%(=√3/2)であると考えます。例えばですが、上記の様な UVW のカーブとすると（かなり変則的なカーブですが）、設定可能な最大パワーが正弦波駆動の場合の 75%→86.6%に増加します。（但し領域で分けて三角関数と、1 固定で UVW 値を計算する必要があります。）（印加可能な duty としては「正弦波駆動＋3 倍高調波の重畳」と同じ）

・UVW 分解（別バージョン 2）




計算を簡単にするためにこのカーブを直線近似するという「別バージョン 2'」も考えられます
（直線近似した場合、入力の角度に対し、UVW 変換した結果の角度は最大 1.2° 程度ずれますが、それ程大きなずれにはなりません）

3 倍高調波を使用したバージョンや、上記別バージョン 1 でも、モータに 100%の電力を与える事はできません。（120 度制御では、刻みは 60° であるが、最大 100%の電力を与える事ができる。）前ページの右図の赤枠の外周をなぞるように UVW 分解（上記波形）を行うと、0,60,120,180,240,300° の位置では 100%の電力を与える事が可能です。

別バージョン 2 では、

1∠0° →1∠0°（0° 方向には 100%のパワーで引っ張る）

1∠15° →0.897∠15°（15° 方向には 89.7%のパワーになってしまう）

1∠30° →0.866∠30°（30° 方向には 86.6%のパワーになってしまう）角度により最大パワーが異なる変換です。

※「正弦波＋3 倍高調波」と「別バージョン 1」「別バージョン 2」は大体似たようなカーブとなっていると思います
相補 PWM でモータにより多くの電力を与える場合、大体このようなカーブとなる変換であると思います

別バージョン 2 では、三角関数の計算が必要になりますが、図のカーブの部分を直線近似しても傾向は変わらないのでは？というのが、「別バージョン 2'」です。別バージョン 2'では、U,V,W=1 の領域と、直線の領域で考えれば良く、UVW 分解の計算が単純化できます。

・UVW 変換方法のまとめ

| 入力（プログラムで与える\|M\|と角度） | UVW 分解の結果（\|M'\|と角度） | | | |
|---|---|---|---|---|
| | ・正弦波変換（全角度に 75%のパワー）※本チュートリアルのデフォルト設定 | ・正弦波＋3 倍高調波変換・別バージョン 1（全角度に 86.6%のパワー） | ・別バージョン 2（角度により上限を変える） | ・別バージョン 2'（別バージョン 2 の直線近似版） |
| 1∠0° | 0.75∠0° | 0.866∠0° | 1∠0 | 1∠0° |
| 1∠10° | 0.75∠10° | 0.866∠10° | 0.922∠10 | 0.928∠**8.9°（*1)** |
| 1∠20° | 0.75∠20° | 0.866∠20° | 0.879∠20° | 0.882∠**19.1°（*1)** |
| 1∠30° | 0.75∠30° | 0.866∠30° | 0.866∠30 | 0.866∠30° |
| 0.1∠0° | 0.075∠0° | 0.0866∠0° | 0.1∠0° | 0.1∠0° |
| 0.1∠30° | 0.075∠30°（*2) | 0.0866∠30°（*2) | **0.0866∠30°（*2)(*3)** | **0.0866∠30°（*2)(*3)** |

(*1)別バージョン 2'のみ入力角度と実際に印加される角度に誤差が生じます（最大 1.2° 程度）

別バージョン 2 は角度により最大パワーが異なる（120 度駆動と PWM のハイブリッド？）の様な方式です。

(*2)この部分の変換は、0.1∠30° にする事も可能です。（考え方次第です）角度により設定上限が異なるだけで、上限に達しない範囲では入力の duty 値を変えずに変換するという考え方も取り得ます。

(*3)上限は、10° で 0.928, 15° で 0.897, 20° で 0.882, 30° で 0.866）

－合成ベクトルの UVW への分解に関して(2)－

正弦波駆動の UVW 分解で、

U=(cosθ×|M|) / 2 + 0.5　(1)

（V, W はθに 120°, 240°を加えて算出）

/ 2 + 0.5 は cos（-1~1 を取る）を 0~1（各相の duty として設定できる範囲）に変換する操作です（1 に正規化）。(1)式では、ベクトルの大きさ|M|を乗算した後で、正規化を行っています。（本プログラムのデフォルトで採用している計算式）

U={(cosθ×**1**) / 2 + 0.5}　×|M|　(2)

ここで、U の値は|M|=1 で計算し、正規化後に|M|を乗算するとどうなるか考えてみます。

|M|=1（入力の duty=100%）の時は、(1)と(2)で計算結果は変わりません。

|M|=0.5, θ=30°のケースで考えてみます。

(1)式で U, V, W を計算すると、(U, V, W) = (0.717, 0.5, 0.283)　(1')
(2)式で U, V, W を計算すると、(U, V, W) = (0.467, 0.25, 0.033)　(2')

となります。

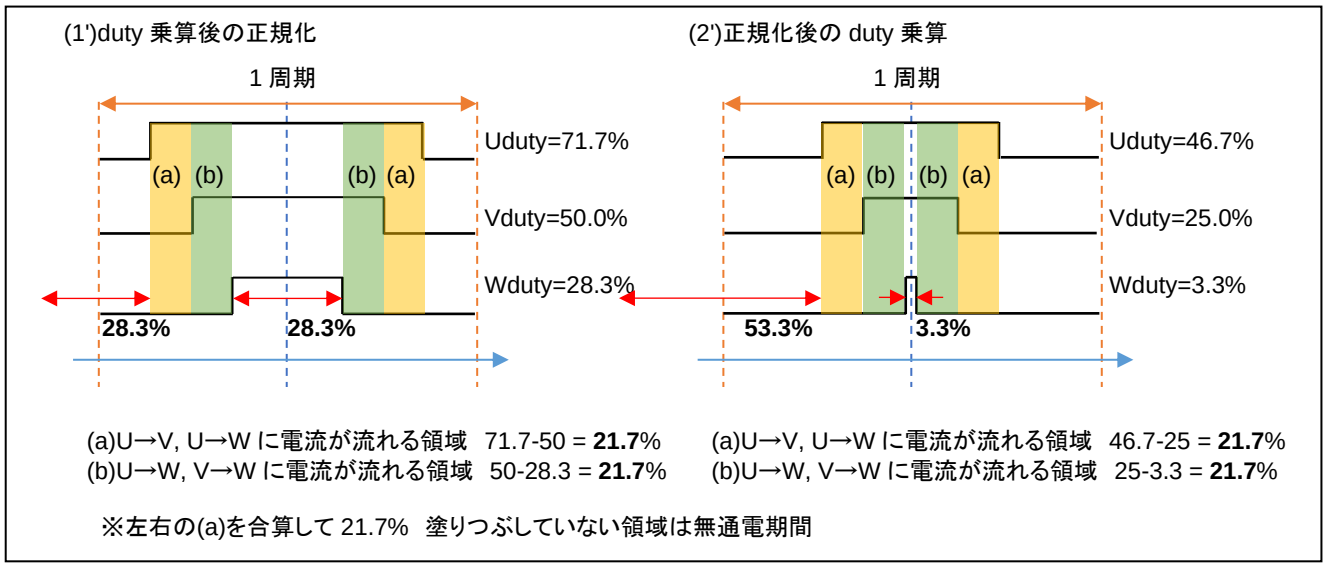
(1')と(2')で、UVW 各相の値は異なりますが、合成結果は

|M'| = 0.375
θ = 30°

で変わりません。

角度は、（当たり前ですが）入力の通り。ベクトルの大きさは、入力の 75%になるので、0.5×0.75=0.375 です。

この、(1')と(2')の違いは？




1 周期における電流の流れるタイミングは異なります。2 相間に流れる電流の大きさは同じです。

※上図は、1 周期（キャリア周波数 40kHz の場合は、25us）を示しており、同じ波形が繰り返されるイメージです（50us 毎に角度を変えていくので、各相の duty は徐々に変化しますが、（ミクロな観点で見ると）基本的には 1 周期の左右に（ほぼ）同じ 1 周期の波形が来るイメージです。）

(1')(2')で電流が流れない時間（図の白い部分）は、
(1') : 100-71.7 + 28.3 = 56.6%
(2') : 100-46.7 + 3.3 = 56.6%
と同じですが、（赤矢印）
(1') : 28.3%と 28.3%で分割
(2') : 53.3%と 3.3%で分割
となります。(2')の場合は、(b)と(b)の間がほとんど空かない代わりに(a)と次の 1 周期の(a)の時間が空き、電流の流れない時間が長く続きます（この例だと 53.3%）。

この、(1')と(2')の違いが、モータのトルクや回転の滑らかさ、消費電力等に影響を与える事は考えられます。

しかし、基本的には、モータにどの程度の電力を与えるか、どの方向に引っ張るかという事が重要ですので、UVW 分解法における無電流期間の分布はそれ程大きな問題にはならないと考えます。

（PWM のキャリア周波数を変える事でも無電流期間と電流を流す期間の分布は変わります。…周波数を上げると全体が圧縮される。キャリア周波数の変更と、(1')と(2')どちらの式とするかは同じような影響かと思います。）

・通電期間の時系列(1')

| | n-1 周期 | ← | | | 1 周期 | | | → | n+1 周期 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | 無通電 | 無通電 | (a) | (b) | 無通電 | (a) | (b) | 無通電 | 無通電 |
| (1') | 14.15% | 14.15% | 10.85% | 10.85% | 28.3% | 10.85% | 10.85% | 14.15% | 14.15% |
| | 28.3% | | 21.7% | | 28.3% | 21.7% | | 28.3% | |
| | →t | | | | | | | | |

周期の 28.3%無通電、21.7%通電の繰り返し。

・通電期間の時系列(2')

| | n-1 周期 | ← | | | 1 周期 | | | → | n+1 周期 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | 無通電 | 無通電 | (a) | (b) | 無通電 | (a) | (b) | 無通電 | 無通電 |
| (2') | 26.65% | 26.65% | 10.85% | 10.85% | 3.3% | 10.85% | 10.85% | 26.65% | 26.65% |
| | 53.3% | | 21.7% | | 3.3% | 21.7% | | 53.3% | |
| | →t | | | | | | | | |

周期の 53.3%無通電、21.7%通電、3.3%無通電、21.7%通電、53.3%無通電の繰り返し。

※塗りつぶしが通電期間

通電時間と無通電期間のバランスが取れるのが(1')の方式。短い無通電期間が中央（＝三角波 PWM の頂点）に来るのが(2')の方式です。

なお、30°で duty を変える場合、

| | (1') | (2') |
|---|---|---|
| 0.1∠30° | (0.543, **0.5**, 0.457) | (0.093, 0.05, 0.007) |
| 0.2∠30° | (0.587, **0.5**, 0.413) | (0.187, 0.1, 0.013) |
| 0.3∠30° | (0.630, **0.5**, 0.370) | (0.280, 0.15, 0.02) |

(1)式を使った場合、V 相の duty は常に 50%となります。この場合、0.5∠30°の場合同様に、無通電の期間が 1/2 分割されて分布する事となります。（バランスの関係は、上記 0.5∠30°と同様になります。）

本チュートリアル、サンプルプログラムでは、(1)式を使い(1')になる様な分解法ですが、duty, θを UVW 相に分解する方法は無数に存在します（そもそも正弦波変換なのか、他の変換方法を採るのか。正規化前に duty を乗じるのか、正規化後に乗じるのか、です）。どの手法が正解なのかは、一概にはなんとも言えません。

本キットでは、デフォルトが最大パワーが 75%に制限される UVW 分解法としてますが、この場合 120 度制御に比べて最高回転数が劣ります。最高回転数を稼ぐ事を目的とするのであれば、120 度制御とするか、相補 PWM では UVW の分解方法がポイントになるかと考えます。（UVW 分解方法は、モータ制御の目的に応じ色々なバリエーションが考えられます。）

※サンプルプログラム内には、
「正弦波駆動」(デフォルト) `blm_angle_to_uvw_duty_sin` (1)
(2)式を使った正規化後に duty を乗じる方式(正弦波駆動) `blm_angle_to_uvw_duty_sin_post` (2)
「正弦波+3 倍高調波」 `blm_angle_to_uvw_duty_sin_3harmonic` (3)
「正弦波+3 倍高調波, duty を正規化後に乗じる」 `blm_angle_to_uvw_duty_sin_3harmonic_post` (4)
「別バージョン 1」(全角度に 86.6%のパワー) `blm_angle_to_uvw_duty1` (5)
「別バージョン 2」(60° 刻みで 100%のパワー) `blm_angle_to_uvw_duty2` (6)
「別バージョン 2'」(別バージョン 2 の直線近似版] `blm_angle_to_uvw_duty2x` (7)
の合計 7 種類の UVW 分解関数を用意しています。
(blm.c, blm_dutyset()関数内で、g_blm_angle_to_uvw_duty()関数を呼び出している部分を変更)
(サンプルプログラムでは、UVW 分解法の動作の違いを見ることができます。)

・blm.c

```
//UVW 分解方法:(1)の正弦波駆動を指定 ※7 行の内いずれかのコメントアウトを外す(関数ポインタなのでプログラムの実行中に切り替えても OK)
blm_angle_to_uvw_duty = blm_angle_to_uvw_duty_sin;                 //(1)正弦波駆動(デフォルト)
//blm_angle_to_uvw_duty = blm_angle_to_uvw_duty_sin_post;           //(2)正弦波駆動, duty を後から乗算
//blm_angle_to_uvw_duty = blm_angle_to_uvw_duty_sin_3harmonic;      //(3)正弦波 3 倍高調波重畳
//blm_angle_to_uvw_duty = blm_angle_to_uvw_duty_sin_3harmonic_post; //(4)正弦波 3 倍高調波重畳, duty を後から乗算
//blm_angle_to_uvw_duty = blm_angle_to_uvw_duty1;                   //(5)別バージョン 1, 全方向に 86.6%のパワー
//blm_angle_to_uvw_duty = blm_angle_to_uvw_duty2;                   //(6)別バージョン 2, 60°で割り切れる角度では 100%のパワー
//blm_angle_to_uvw_duty = blm_angle_to_uvw_duty2x;                  //(7)別バージョン 2' 別バージョン 2 を直線近似したもの
```

blm_angle_to_uvw_duty()関数が UVW 分解で呼び出される関数名(関数ポインタ)です。

(関数ポインタ) = (関数の実体)
blm_angle_to_uvw_duty = blm_angle_to_uvw_duty_sin_3harmonic;
を実行すると、blm_angle_to_uvw_duty()関数の実体が、blm_angle_to_uvw_duty_sin_3harmonic()になります。

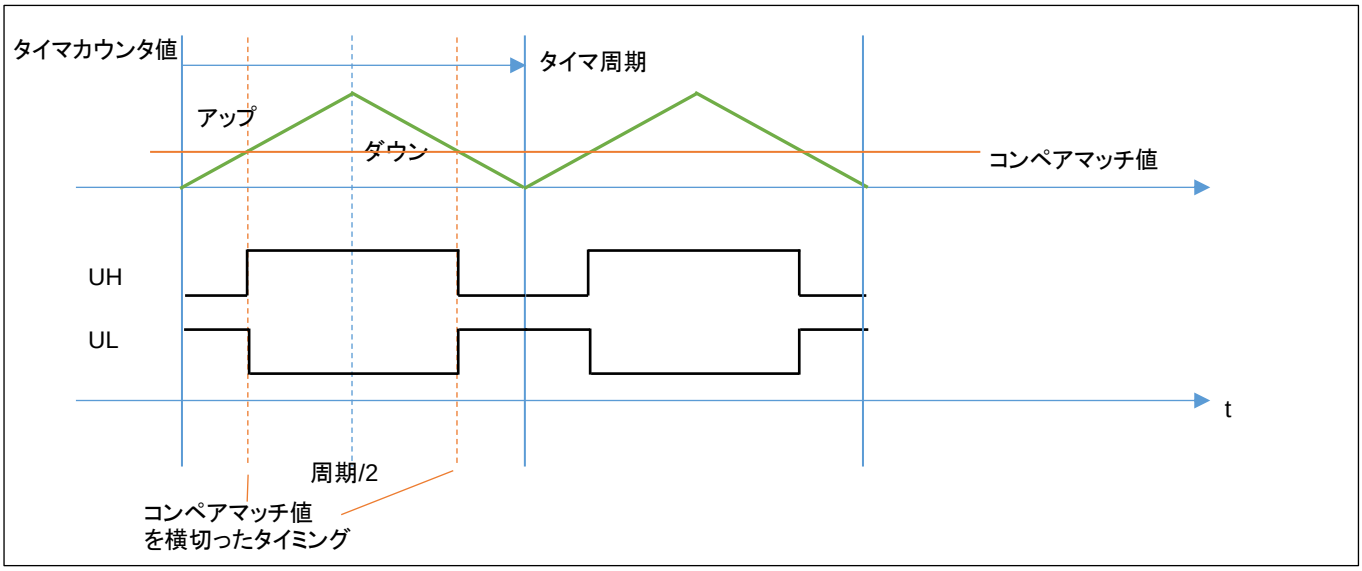
初期化時(blm_init()内で)指定しても良いですし、任意のタイミング(モータ駆動中でも)で UVW 変換関数の実体を変更する事が可能です。

・起動時のメッセージ

```
Copyright (C) 2025 HokutoDenshi. All Rights Reserved.

RX71M / BLUSHLESS MOTOR STARTERKIT TUTORIAL B


EXPLANATION:
SW2 -> CH-1 motor ON/OFF
LED1 : CH-1 active ON/OFF, Error->BLINK
VR -> duty(0-40%)

COMMAND:
s : stop <-> start display information(toggle)
A : A/D convert data display
D : rotation direction->CCW <-> roration direction->CW (toggle)
1 : UVW calc -> sine
2 : UVW calc -> sine(2)
3 : UVW calc -> sine + 3harmonic
4 : UVW calc -> sine + 3harmonic(2)
5 : UVW calc -> another version
6 : UVW calc -> another version(100% power)
7 : UVW calc -> another version(100% power)(2)
N : CH-1 motor ON
F : CH-1 motor OFF

>
Motor driver board connection check...
  CH-1 Connected.
```

本チュートリアルでは、キーボードからのコマンド入力により、UVW 分解法を 7 種類の内から変更可能です。モータ回転時にも変更は可能です。UVW 分解法と duty の関係（起動時のデフォルトの 1（正弦波：75%の変換）から 3（3 倍高調波：86.6%の変換）や 6（角度によっては 100%のパワー）に変更すると、同じ回転数でも duty を小さく設定できるはずです）を確かめてみてください。

・相補 PWM 波形をカウンタを使って生成する方法



相補 PWM を構成するタイマは、周期の 1/2 まではアップカウント、周期の 1/2 から 1 周期まではダウンカウントとなる動作です。設定したコンペマッチ値を横切った際、出力は反転します。周期は固定とし、コンペアマッチ値を、U, V, W でそれぞれ別な値とすることで、U, V, W それぞれの相で別個の duty の矩形波を得ることができます。

U_コンペアマッチ値 = (1.0 - U(duty)) × 周期/2 （U(duty)は 1 に正規化済みの値）
※V, W も同様

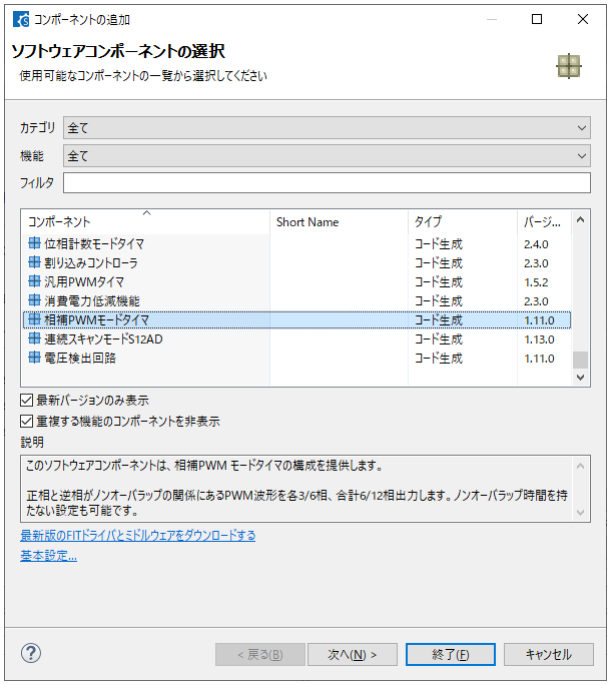
| | 割り当て(CH-1) |
|---|---|
| U 相 | MTU3.TGRB |
| V 相 | MTU4.TGRA |
| W 相 | MTU4.TGRB |

各 CH のタイマは、上記を使用しています。

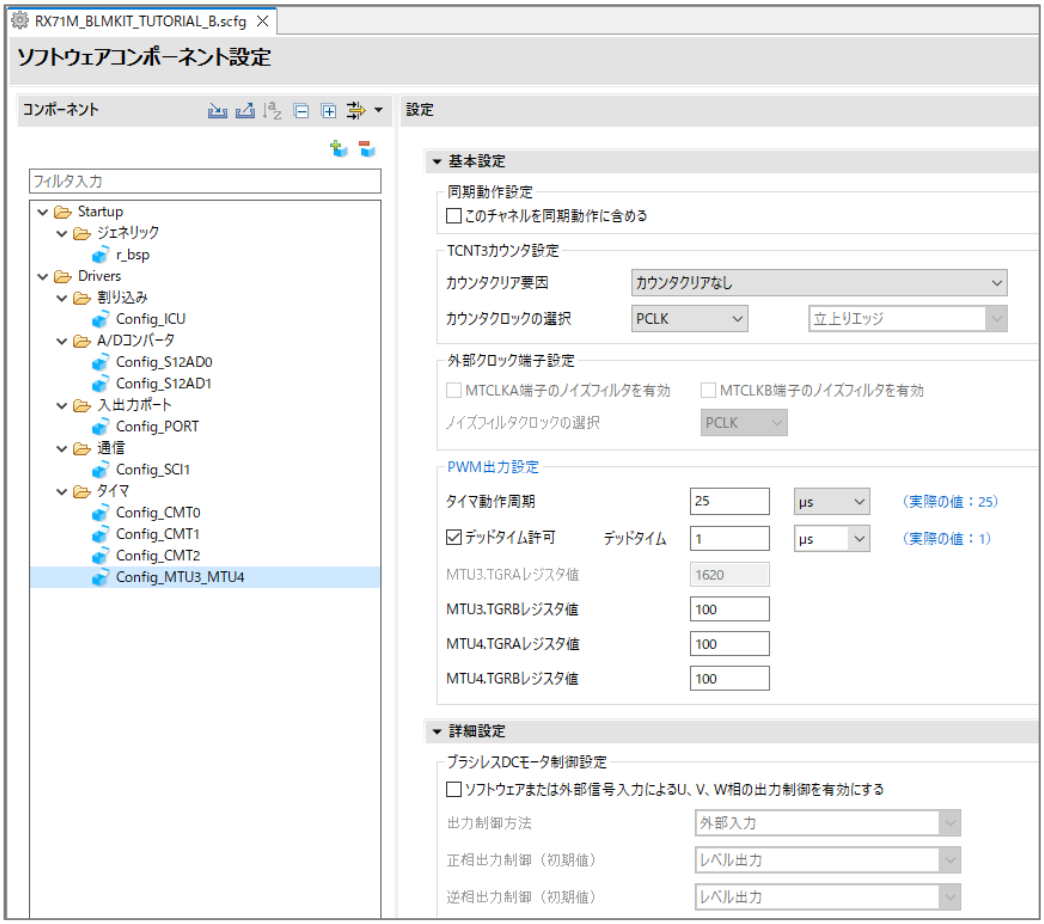
※3 相の相補 PWM の生成には、タイマを 3 つ使用します

・CH-1, CH-2 では MTU を使用

スマート・コンフィグレータでは、




相補 PWM モードタイマというコンポーネントが用意されています。（本チュートリアルでは、「相補 PWM モード 2」（谷転送）を選んでいます。）（前ページの図の、カウンタ値（緑線）の谷のタイミングでコンペアマッチ値の変更を反映させる方式です。）（チュートリアル A と同じ）



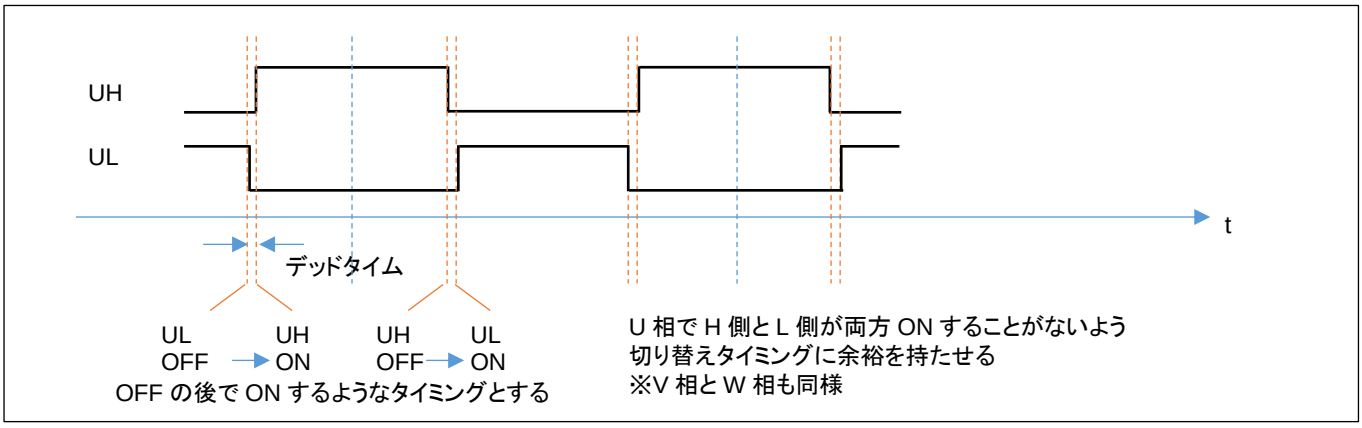

周期（ここでは 25us, 40kHz）や、デッドタイム値（ここでは、1us）などを設定します。

チュートリアル A では、「ブラシレス DC モータ制御設定」にチェックを入れましたが、本チュートリアルでは使用しません。


出力端子設定は、チュートリアル A 同様「アクティブレベル:H」です。（モータドライバボードの仕様で決まる部分なので、本チュートリアルでも変わらない）

相補 PWM では、デットタイムを設定しています。

これは、相補 PWM で、Posi（=UH 側信号）と Nega（=UL 側信号）を、単に反転させる訳ではなく、時間差を付けて切り替える制御となります。




UH の信号と UL の信号が同時に ON すると、電流はモータのコイルではなく、出力回路部の MOS FET のみに流れます（電源が pMOS－nMOS を経由して GND にショート）ので、その様な状態を避けるための制御となります。

3 相の相補 PWM 駆動を行う場合は、使用するタイマ(MTU3/MTU4)は、1 個のモータあたり 3 つ必要ですが、マイコンから見るとタイマはハードウェア（CPU リソースを消費することなく、一定タイミングで切り替わる）ですので、マイコン側のプログラムとしては、適切なタイミングで PWM の各相 duty（UVW の 3 相の duty には、ベクトルの大きさ|M|と角度θの情報が含まれます）を設定すれば良い事となります。

ブラシレスモータの制御としては、単純な 120 度制御と、相補 PWM を用いたベクトル制御の 2 通りがメジャーな制御方式です。本チュートリアルのプログラムは、ホールセンサは回転数の算出に用いているだけで、回転の制御には使っていません。次の TUTORIAL_B2 では、相補 PWM とホールセンサを組み合わせて、モータを制御しています。（TUTORIAL5（回転制御にホールセンサを使用）に対応した相補 PWM 版が TUTORIAL_B2 となります。）

※デッドタイムを指定すると、設定 duty には誤差が生じますが、本プログラムではデッドタイム指定に伴う誤差の補正は行っていません。

・シリアル端末から出力される情報

```
                      CH-1
Motor Driver Board    : Connect
Active               :    o
UVW calculation method : (1)
target speed([rpm])   :  2000
target direction      :   CCW
rotation speed([rpm]) :  1980
Temperature(A/D value) :  2101
Temperature(degree)   :    27
VR(A/D value)         :  2678
duty[%]               :  26.2
```

(1)~(7)のどの UVW 分解法を選んでいるかが表示されます。

| | 起動時のデフォルト | D コマンドで切り換え |
|---|---|---|
| | 回転方向反時計回り(CCW) | 回転方向時計回り(CW) |

D コマンドで回転方向が変わります（チュートリアル A と同じ動作です）。回転方向は

CCW : 50us 毎に印加角度を $10.47 \times 10^{-3}$[rad]増やす

CW : 50us 毎に印加角度を $10.47 \times 10^{-3}$[rad]減らす

という違いです。（SW を ON にしたタイミングで、設定されている回転方向が適用されます。回転中に D コマンドを入力しても回転方向は変わりません。）

・チュートリアル B での端子設定

| 端子名 | 役割 | 割り当て | 備考 |
|---|---|---|---|
| P07 | SW2 | 周辺機能(IRQ15) | マイコンボード上のプッシュスイッチ |
| P21 | QL(CH-1) | 出力 | Q1L~Q3L の 3 相 PWM とするので QL は汎用 I/O |
| P22,P23 | Q1U,Q1L(CH-1) | MTIOC3B/3D | 本チュートリアルではタイマ出力端子に設定 |
| P24 | LED1(D1) | 出力（初期値 L） | LED，初期状態で LED は消灯<br>※USB パワースイッチ経由での接続 |
| P26 | UART 通信（送信） | 周辺機能(SCI1) | TXD1 として設定 |
| P30 | UART 通信（受信） | 周辺機能(SCI1) | RXD1 として設定 |
| P40~P47<br>PD0 | A/D 変換 | AN000~AN007<br>AN108 | |
| PD1,PD2 | Q3U,Q3L(CH-1) | MTIOC4B/4D | 本チュートリアルではタイマ出力端子に設定 |
| PD3 | QU(CH-1) | 出力 | |
| PD4 | *INT(CH-1) | 端子割り込み(IRQ4) | プルアップ有効 |
| PD5 | HS1(CH-1) | 入力，プルアップ | ホールセンサ入力端子として使用 |
| PD6 | HS2(CH-1) | 入力，プルアップ | ホールセンサ入力端子として使用 |
| PD7 | HS3(CH-1) | 入力，プルアップ | ホールセンサ入力端子として使用 |
| PE1,PE2 | Q2L,Q2U(CH-1) | MTIOC4C/4A | 本チュートリアルではタイマ出力端子に設定 |

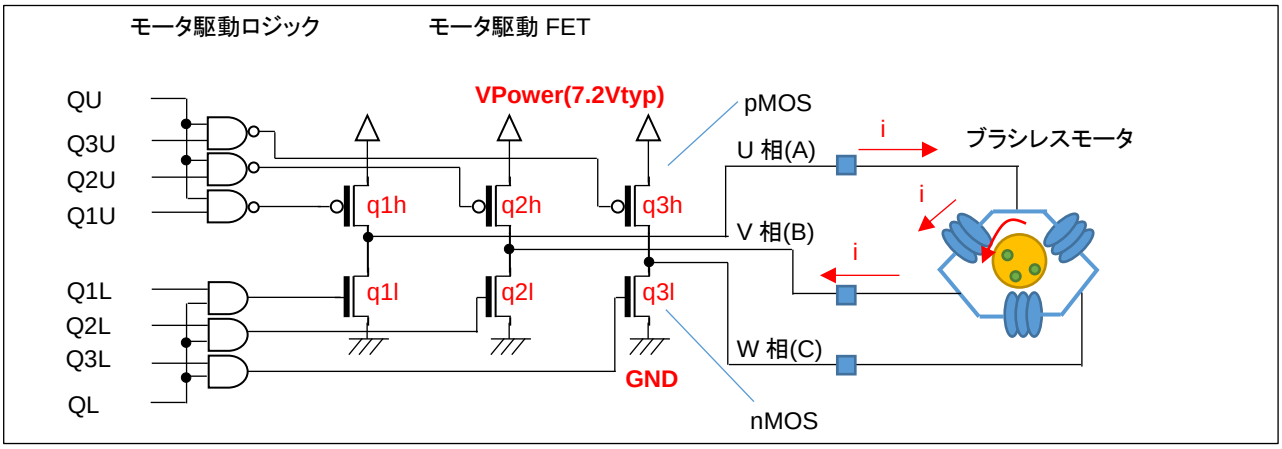
・チュートリアル B での使用コンポーネント

| コンポーネント名 | リソース | 用途 | 備考 |
|---|---|---|---|
| r_bsp | | 基本的なマイコン設定 | 初期状態で追加済み |
| Config_ICU | ICU | 端子割り込み<br>過電流停止 | SW2 が押された際に割り込みが掛る設定<br>IRQ4 を立下りエッジで使用 |
| Config_S12AD0 | S12AD0 | A/D 変換 | |
| Config_S12AD1 | S12AD1 | A/D 変換 | |
| Config_PORT | PORT | I/O ポート | |
| Config_SCI1 | SCI1 | UART 通信 | |
| Config_CMT0 | CMT0 | 50us タイマ | |
| Config_CMT1 | CMT1 | 10ms タイマ | |
| Config_CMT2 | CMT2 | 500ms タイマ | |
| Config_MTU3_MTU4 | MTU3/4 | PWM 波形生成 | ブラシレスモータ駆動機能を使用 |

※グレーの項目はチュートリアル 7 から変更なし

モータ駆動用タイマとしては以下の様になっています。

| チュートリアル | 使用タイマ | 備考 |
|---|---|---|
| ~チュートリアル 7 | GPT2 | 1 相の PWM 波形生成に使用 |
| チュートリアル A | MTU3/MTU4 | 3 つのタイマを使用しているが、3 つのタイマの duty 値は同値を設定 |
| チュートリアル B | MTU3/MTU4 | 3 つのタイマに別々な値を設定して、相補 PWM 制御 |




チュートリアル 7 までは、GPT2 を使い GTIOC2A を QL に接続。1 つの PWM 信号で、L 側(q1l, q2l, q3l)の 3 つの FET を PWM 駆動する方式です。(q1h, q2h, q3h の H 側の FET は、120° 単位でいずれかの FET が ON)

チュートリアル A では、QU=QL=H 固定。Q1L, Q1L, Q3L の 3 本の信号が、アクティブ時に PWM 駆動される方式です。(H 側の FET は 120° 単位でいずれかの FET が ON)
→q1h~q3l の FET で考えると、チュートリアル 7 とチュートリアル A では同じ動作です
→Q1L, Q2L, Q3L の PWM の duty 値は、VR に連動して同じ値となります

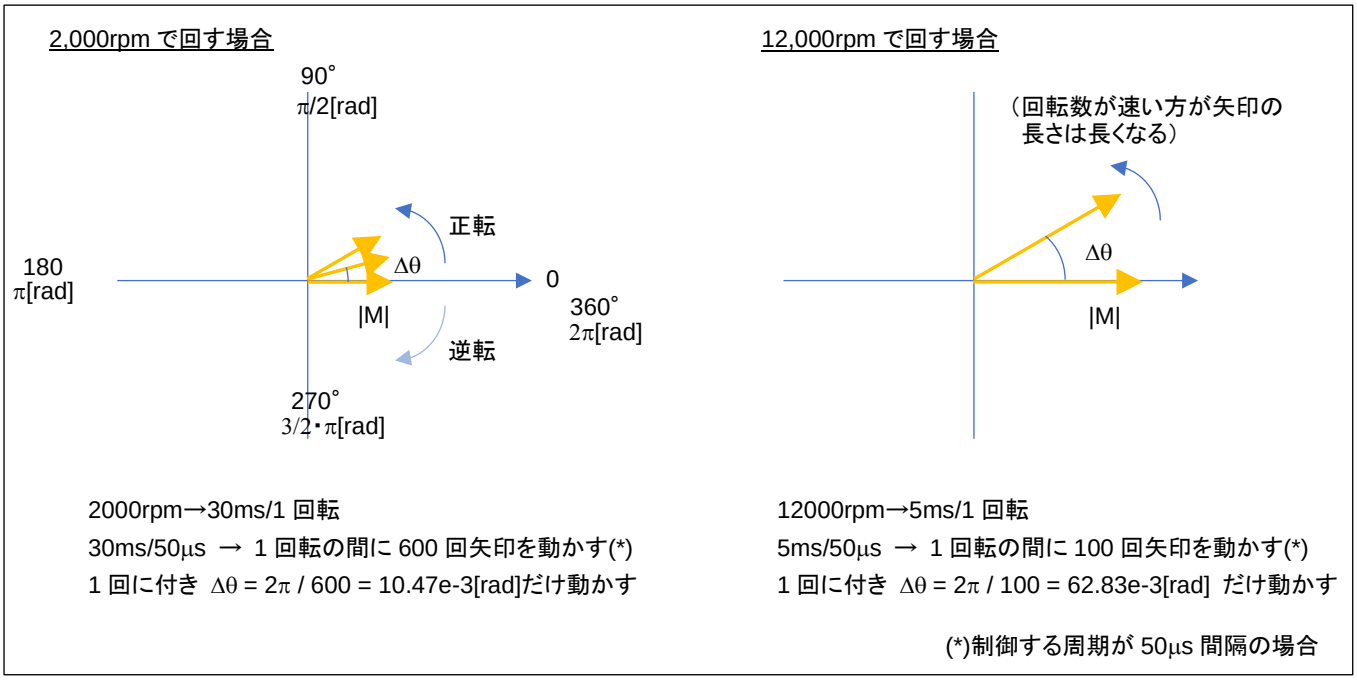
チュートリアル B では、QU=QL=H 固定。Q1U, Q2U, Q3U, Q1L, Q2L, Q3L の 6 本の信号が PWM 駆動されます。U 相 duty=(Q1U, Q1L), V 相 duty=(Q2U, Q2L), W 相 duty=(Q3U, Q3L)となり、duty 値は 3 値別々の値を取ります。Q1U と Q1L は、デッドタイムを持つので U 相 duty 値にデッドタイムを持たせた値(Q1U(PWM1)と Q1L(PWM1')は微妙にずれた duty 値)です。(結果的に、6 値の duty で 6 本の信号が駆動されます。)

| | Q1U | Q2U | Q3U | Q1L | Q2L | Q3L | QU | QL | 備考 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| ～チュートリアル 7 | 120 度 | 120 度 | 120 度 | 120 度 | 120 度 | 120 度 | H 固定 | PWM | PWM duty は VR に対応 |
| チュートリアル A | 120 度 | 120 度 | 120 度 | 120 度 ＋ PWM | 120 度 ＋ PWM | 120 度 ＋ PWM | H 固定 | H 固定 | PWM duty は VR に対応 Q1L と Q2L と Q3L の PWM duty は同値 |
| チュートリアル B | PWM1 | PWM2 | PWM3 | PWM1' | PWM2' | PWM3' | H 固定 | H 固定 | PWM duty は 3 値 (厳密には 6 値) |

120 度は、1 回転の内 120°（1/3 の期間）ON(=H)、残りの 240° は OFF(=L)
120 度＋PWM は、1 回転の内 120°（1/3 の期間）PWM 波形、残りの 240° は OFF(=L)
PWM1 と PWM1'はデッドタイムの分のみずれがある、基本は、PWM1, PWM2, PWM3 の 3 値

本節で登場した、相補 PWM 制御に関してまとめると以下の様になります。

・相補 PWM



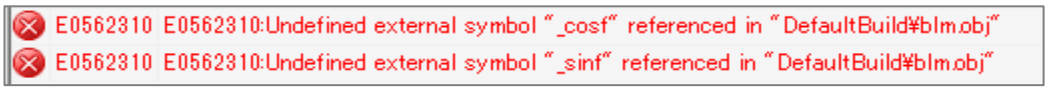

・矢印をΔθずつ動かしていく（矢印→モータに印加する磁界の方向）
・矢印を 1 回転させる＝モータが 1 回転
・θをどちらに動かすかでモータの回転方向を変えられる
・|M|の値は回転数に応じて制御する必要がある（|M|の値→モータに与える電力に相当）
・|M|, θの値は、前出の UVW 分解法にて 3 値の duty 値に変換する
→プログラム的には 3 値の duty 値を取り扱う、デッドタイム付与はマイコンの機能で行うのでプログラム的に 6 値の duty を計算する必要はない

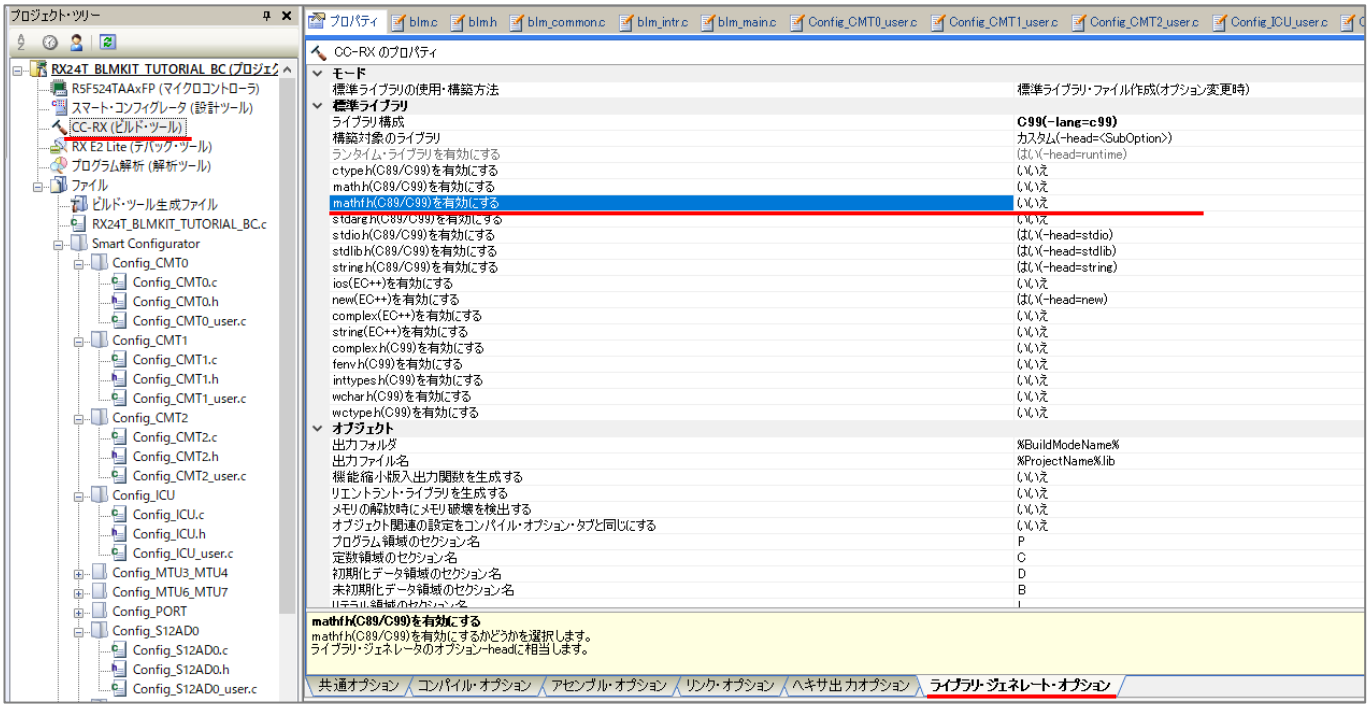
－三角関数の使用に関して－

本チュートリアルでは、三角関数を使用しています。

CC-RX のデフォルト設定では、リンク時に三角関数（sinf()や cosf()）がリンクされません。

→コンパイルは通りますが、リンク時にエラーとなります




CC-RX のプロパティ、ライブラリ・ジェネレート・オプションタブで、

mathf.h(C89/C99)を有効にする　いいえ　→　はい　に変更

上記設定により、cosf()や sinf()の実体がリンクされる様になります。

## 2.3. 相補 PWM 信号での駆動（ホールセンサ使用）

参照プロジェクト：RX71M_BLMKIT_TUTORIAL_B2

TUTORIAL_B では、VR のツマミを動かすとスムーズに回転する領域がありますが、duty を増やしても回転数が増加する事はありません（TURORIAL4 の相補 PWM 版です）。回転数は増加しないのに、消費電流だけ増える形です。

duty を増やすと回転数が duty に応じて増加する（TUTORIAL5 の相補 PWM 制御版）のが、本チュートリアルです。

ー制御方式に関してー

| | 制御方式 | ホールセンサ<br>（回転制御に使用しているか） |
|---|---|---|
| TUTORIAL4（1.4 節） | 120°+PWM | 未使用 |
| TUTORIAL5（1.5 節） | 120°+PWM | 使用 |
| TUTORIAL_B（2.2 節） | 相補 PWM | 未使用 |
| TUTORIAL_B2（本節） | 相補 PWM | 使用 |

・チュートリアル B での blm_intr.c（50us 割り込み関数内）

```
if (g_state[i] == BLM_CH_STATE_ACTIVE)
{
    //UVWの磁界印加割合を設定
    blm_dutyset[i](g_angle[i], g_duty[i]);

    //印加磁界角度を進める
    if (g_target_direction[i] == BLM_CCW)
    {
        g_angle[i] += g_angle_diff[i];
        if (g_angle[i] > PI2)
        {
            g_angle[i] -= PI2;
        }
    }
    else if (g_target_direction[i] == BLM_CW)
    {
        g_angle[i] -= g_angle_diff[i];
        if (g_angle[i] < 0.0f)
        {
            g_angle[i] += PI2;
        }
    }
```

g_angle_diff[i] = $10.47 \times 10^{-3}$

50us 毎に決まった角度
（2000rpm に相当する $10.47 \times 10^{-3}$[rad]）
を加算する

角度が際限なく大きくなるといずれオーバフロ
ーするので、PI2（定数で 2π）に制限する

逆回転の場合は、角度を減算する

チュートリアル B では角度の増分は、常に一定値（2,000rpm に相当する角度）としています。そのため、回転した場合の回転数は設定した duty に拘わらず、大体 2,000rpm です。

それに対し、本チュートリアルではホールセンサの値を見て、
(1)50us 毎の角度増分を決定する（回転が速いときは角度増分を増やす）[チュートリアル B では固定値]
(2)相補 PWM の印加角度(θ)をホールセンサの位置に合わせる
という処理を行っています。

※50us 毎に角度を加算するという、基本的な回転制御の部分はチュートリアル B での制御と変わりません

・チュートリアル B2 での blm_intr.c（50us 割り込み関数内）

```
if (g_state[i] == BLM_CH_STATE_ACTIVE)
{
    //理想位置を算出
    ideal_angle = blm_ideal_angle(g_sensor_pos[i], g_target_direction[i], g_angle_forward[i]);
                                                    ホールセンサが切り替わった際の理想的な角度を算出
    //速度のずれを g_angle_diff に反映
    g_angle_diff[i] = blm_angle_diff_calc(g_angle_diff[i], ideal_angle, g_angle[i],
g_target_direction[i]);
                                    (1)理想的な角度と現在の角度を比較して 50us 毎の角度増分値を
                                    理想的な角度となるように近づけていく
    //印加角度をセンサから算出される理想位置にずらす
    g_angle[i] = ideal_angle;
}                                   (2)印加角度を理想値に上書き
```

blm_ideal_angle()関数はホールセンサの位置（チュートリアル 4 の pos=1~6）に応じた、そのタイミングでの理想的な角度を算出する関数です。

g_angle_diff[i]は、チュートリアル B では 2,000rpm で算出した固定値でしたが、本チュートリアルでは、ホールセンサ切り替わり時の「理想角度」と「現在の角度」を比較して、50[us]毎の角度増分を理想値に近づける様に変更しています。印加角度の理想値は、以下で算出しています。

・blm.c（blm_ideal_angle()関数内）

```
if(direction == BLM_CCW)
{
    switch(pos)
    {
        case 3:
            ret = RAD_330_DEGREE;
            break;                  RAD_330_DEGREE = 2π/360×330= 5.76 [rad]
        case 2:                     …330°をラジアン変換した値
            ret = RAD_30_DEGREE;
            break;
        case 6:
            ret = RAD_90_DEGREE;
            break;
        case 4:
            ret = RAD_150_DEGREE;
            break;
        case 5:
            ret = RAD_210_DEGREE;
            break;
        case 1:
            ret = RAD_270_DEGREE;
            break;
        default:
            return 0;
            break;
    }
```

単純にホールセンサ位置と角度の対応テーブルとしています。(ホールセンサが 3 に切り替わった際は、印加角度が 330°となっているのが理想)

また、50us 毎に進める印加角度に関しては、下記で計算しています。

・blm.c

```
float blm_angle_diff_calc(float diff_angle, float ideal_angle, float angle, short
target_direction)
{
    //制御周期(50us)毎の角度増分を計算する関数

    //引数
    // diff_angle : 現状の角度差分
    // ideal_angle : センサ切り替わり時の理想的な角度
    // angle : 現状の角度


    //戻り値
    //  計算後の diff_angle

    /*
     * ideal_angle = angle
     * となる様に、diff_angleを微調整する
     *
     * ideal_angle - angle が
     *
     *  プラス : 現状のdiff_angleが遅い
     *  マイナス : 現状のdiff_angleが速い
     */

    float angle_sub;

    angle_sub = ideal_angle - angle;

    //PI(180[°])より大きな場合はdiff_angleを変更しない
    if (angle_sub > PI)      PI = π = 3.141592...(円周率)
    {
        return diff_angle;
    }

    //-PI2(-360[°])より小さな場合はdiff_angleを変更しない
    if (angle_sub < -PI2)
    {
        return diff_angle;
    }

    //角度は、-PI ~ PI (-180°~180°) の範囲内に変換する
    if (angle_sub < -PI) angle_sub += PI2;   PI2 = 2π

    //理想との差分をBLM_ANGLE_DIFF_FEEDBACKの割合で埋めていく
    return diff_angle + angle_sub * BLM_ANGLE_DIFF_FEEDBACK * target_direction;
}
```

=0.01f (1%)

50us 毎の角度増分を決定する部分は、現状の角度増分(diff_angle)に対し、理想値とのずれ(angle_sub)を加算するのですが、1 回で理想値にしてしまうのではなく、BLM_ANGLE_DIFF_FEEDBACK(=0.01)(1%)ずつ差分を埋めていく(diff_angle を滑らかに変化させる)方式です。

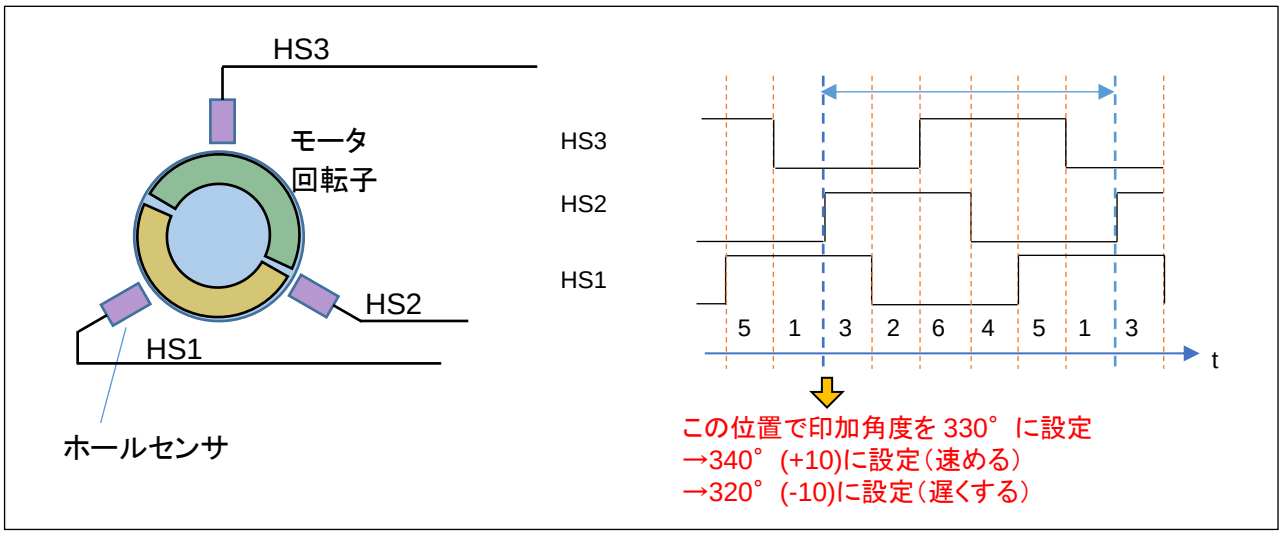
・シリアル端末から出力される情報

```
                        CH-1
Motor Driver Board       : Connect
Active                  :    o
UVW calculation method   : (1)
diff angle -> speed([rpm]):  4140
forward angle([deg])     :    0
target direction         :  CCW
rotation speed([rpm])    :  4140
Temperature(A/D value)   :  2047
Temperature(degree)      :    25
VR(A/D value)            :  1777
duty[%]                  :  43.4
```

diff angle -> speed　は、現在の磁界印加角度増分を回転数[rpm]に直したものです。(duty に応じた印加角度増分となる様、計算された値)

foward angle は進角調整値です。

基本的には、いままでのチュートリアルと大きくは変わりませんが、進角(forward angle)の表示、機能が追加されています。進角調整はホールセンサ位置と磁界の印加角度の関係を調整する機能です。

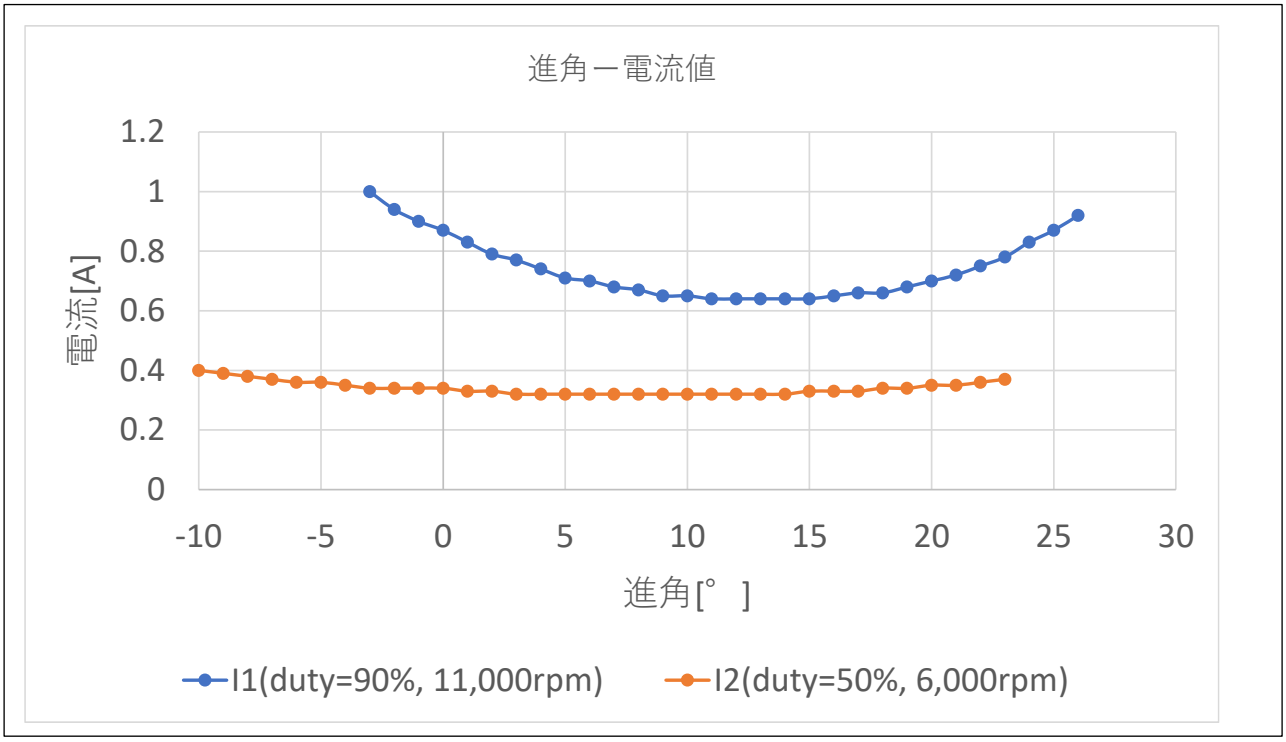



ホールセンサの出力が切り替わるタイミングで磁界の印加角度を設定していますが、この角度を速めたり遅くしたりする機能が進角調整です。この進角の値は、シリアル端末のキーボードで設定を行います。

| | -1° | +1° | リセット(=0) |
|---|---|---|---|
| CH-1 | q | w | e |

キーボードから'q'を入力すると角度が 1° 遅くなります。'w'で 1° 速くする方向です。'e'で初期値(=0)に戻します。調整範囲は±45° の範囲です(blm.h 内で定義、変更は可能)。モータが停止しているときでも変更は可能です。一般に高速回転時は、進角を+の方向(エンジンでしたら点火タイミングを速めるイメージでしょうか、モータであれば磁界の引っ張る角度を少し前の方に設定する)にすると、消費電流が減る(効率が上がる)事が期待できます。

・進角設定値と電流値の変化




duty を 90%に設定し、11,000[rpm]程度でモータを回転させ、キーボードから q/w を入力し進角調整を行った場合の電流値を示します。この例では、進角を 13° 程度に設定した場合、一番電流値が減る事が観測されました。また、duty を 50%程度に設定し、6,000[rpm]程度でモータを回転させた場合は 8° 程度が電流値最小となりますが、ほぼフラットな電流値のカーブとなります。

高速回転時の方が

・電流が最小となる角度が大きい

・進角調整の効果が（電流の減少率）が大きい

という事が言えるかと思います。

本チュートリアルでは、デバッグ情報を追加で表示させる事が可能です。

・起動時のメッセージ

```
RX71M / BLUSHLESS MOTOR STARTERKIT TUTORIAL B2


EXPLANATION:
SW2 -> CH-1 motor ON/OFF
LED1 : CH-1 active ON/OFF, Error->BLINK
VR -> duty(0-100%)

COMMAND:
s : stop <-> start display information(toggle)
A : A/D convert data display
D : rotation direction->CCW <-> roration direction->CW (toggle)
q : forward angle -1  [CH-1]
w : forward angle +1  [CH-1]
e : forward angle =0  [CH-1]
1 : UVW calc -> sine
2 : UVW calc -> sine(2)
3 : UVW calc -> sine + 3harmonic
4 : UVW calc -> sine + 3harmonic(2)
5 : UVW calc -> another version
6 : UVW calc -> another version(100% power)
7 : UVW calc -> another version(100% power)(2)
z : debug display(toggle)
N : CH-1 motor ON
F : CH-1 motor OFF

>
```

q~y は、前出の進角調整の機能です。

'z'を入力するとホールセンサ切り替わり時の角度が表示される様になります。（もう一度'z'を入力すると表示されなくなります）

'z'を入力し、デバッグ出力を有効化すると、ホールセンサが切り替わったタイミングで

・シリアル端末から出力される情報

```
c1:pos:2:deg:35(-5)
c1:pos:6:deg:91(-1)
c1:pos:4:deg:140(9)
c1:pos:5:deg:218(-8)
c1:pos:1:deg:269(0)
c1:pos:3:deg:325(4)
```

c1: CH-1

pos:2 ホールセンサの位置=2 に切り替わったタイミング

deg:35 その時の磁界印加角度

(-5) 理想 30° に対して 35 なので差分-5°（=理想－現在値）

が表示されます。

'z'の入力に応じて表示、非表示は切り替わります。
(3 秒に 1 回表示される回転数等の情報は、's'コマンドで表示・非表示の切り替えが可能です。)

なお、非表示(起動時のデフォルト)にした場合でも、表示するかどうかの条件分岐のオーバヘッドはあります。(表示処理のために多少処理が重たくなります。)完全に表示する機能を無効化する場合は、

・blm.h

```
//デバッグ表示
#define BLM_DEBUG_PRINT_1  //定義時デバッグ情報を出力を可能とする
```

上記定義を未定義(コメントアウトや削除)とすると、表示に掛かる処理のオーバヘッドはなくなります。

※UART の表示速度より出力される情報量が多い場合は、表示用のバッファが溢れた時点で一部の表示は失われます(表示が途中で切れるケースもあります)

・チュートリアル B2 での端子設定
→チュートリアル B に同じ

・チュートリアル B2 での使用コンポーネント
→チュートリアル B に同じ

## 2.4. センサレス駆動

参照プロジェクト:RX71M_BLMKIT_TUTORIAL_C

本チュートリアルでは、モータの電流印加方向の切り替えをホールセンサを使用しないで制御する方式を試します。

制御方法は、TUTORIAL7 と同じ、120 度制御です。

| | 起動時のデフォルト | コマンドにより切り替え | 用途 |
|---|---|---|---|
| S コマンド | 通常 | 始動制御 | 始動制御切り替え |
| H コマンド | ホールセンサ使用 | ホールセンサ未使用 | 電流切り替え方式選択 |

電源を投入した後(VR は絞った状態としてください)、SW2 を押してモータを ON にして VR を回していくとモータが回転を始めるはずです。

但し、この時の動作は TUTORIAL7 と変わりません。ホールセンサの切り替わりのタイミングで電流方向の切り替えを行っています。

モータが回転している状態で、H コマンドを入力してみてください。(回転している状態で H コマンドで動作を切り替えても、見た目上の変化は生じないと思います。H コマンドを入力すると、モータの電流方向切り替えは、疑似ホールセンサパターンで行われる様になります。再度 H コマンドを入力すると再度ホールセンサを使用する制御となります。

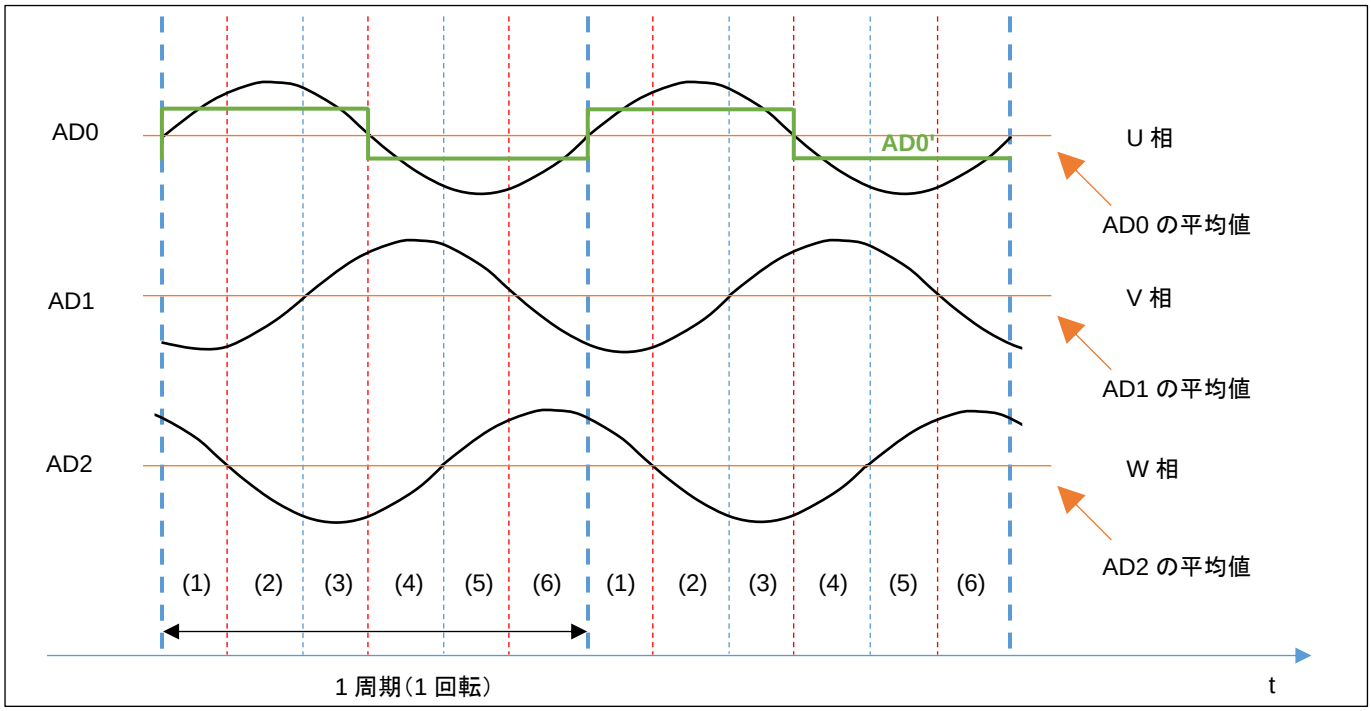
ホールセンサを使用しない場合は、ホールセンサの切り替わりを模擬した疑似ホールセンサパターンを使って電流の切り替えを行いますが、疑似ホールセンサパターンの取得には、モータが回転している事が条件となります。
→ホールセンサを使用しない場合、モータ停止時の軸の位置は判らない

そこで、最初はホールセンサを使用して回転を始めさせ、ある程度回転した状態で、H コマンドを入力してセンサレス駆動へと移行します。

(モータの回転が止まった場合は、H コマンドモータのホールセンサを使用する様に切り替えてモータを回転させてから再度 H コマンドでホールセンサを使用しない状態に切り替えてください。)

疑似ホールセンサパターンの生成には、UVW の相電圧を使用しています。

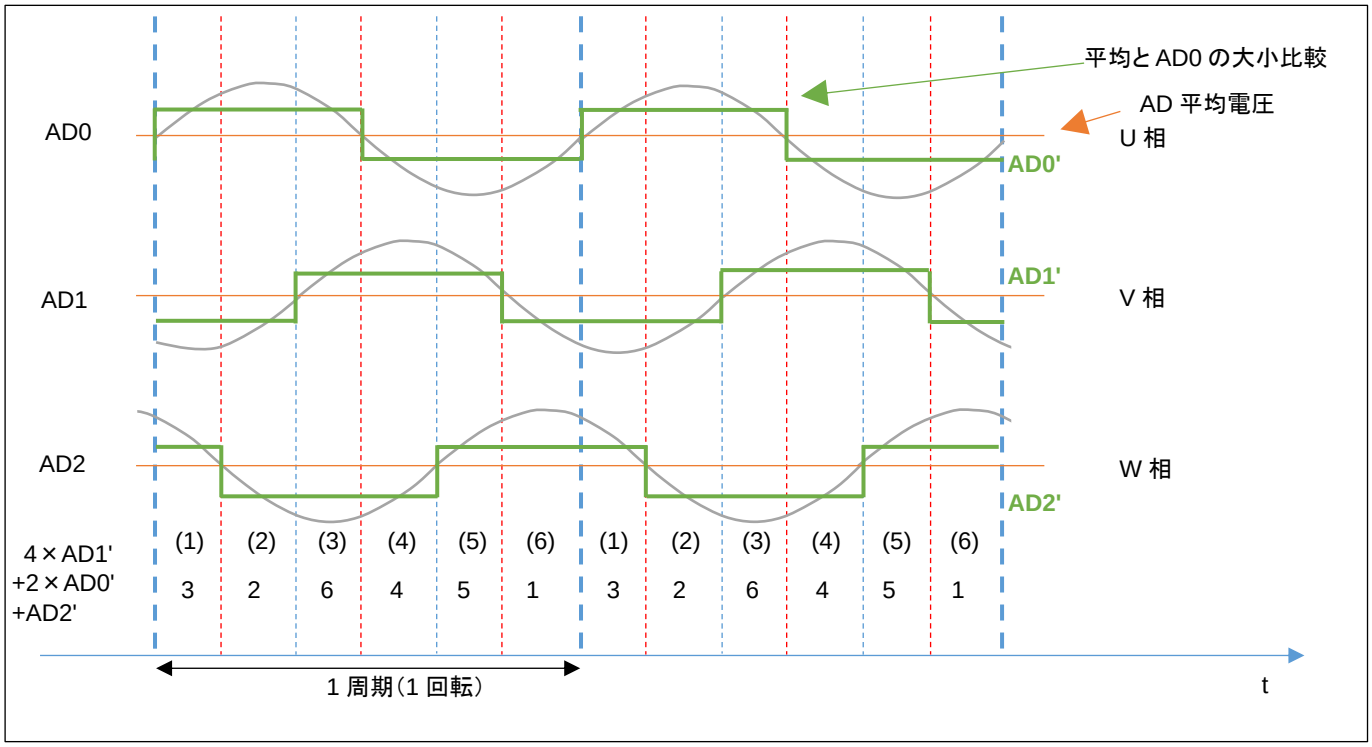
・各相電圧 LPF を通した波形




AD0~AD2 の信号は、UVW 各相電圧の LPF(Low Pass Filter, 低域通過フィルタ)通過後の波形です。PWM 制御を行った相電圧は、複雑な波形となりますが、LPF で信号処理を行うと、sin 波に近い波形となります。
AD0~AD2 は、マイコンの A/D 変換機能を使用して値を取得しているので、得られる値は電圧値ではなく、A/D 変換値(0~4095)です。ここでは、AD0 の平均値と現在の AD0 の値が判ればよいので、A/D 変換値のままで大小比較を行います。

AD0(U 相電圧)の平均値と AD0 の大小比較を行う事により、AD0'(デジタル的な値、0/1 値)を得ることが出来ます

この、AD0'の信号を使う事により、モータの軸の位置を特定して、モータに印加する電流の向きを切り替えます。

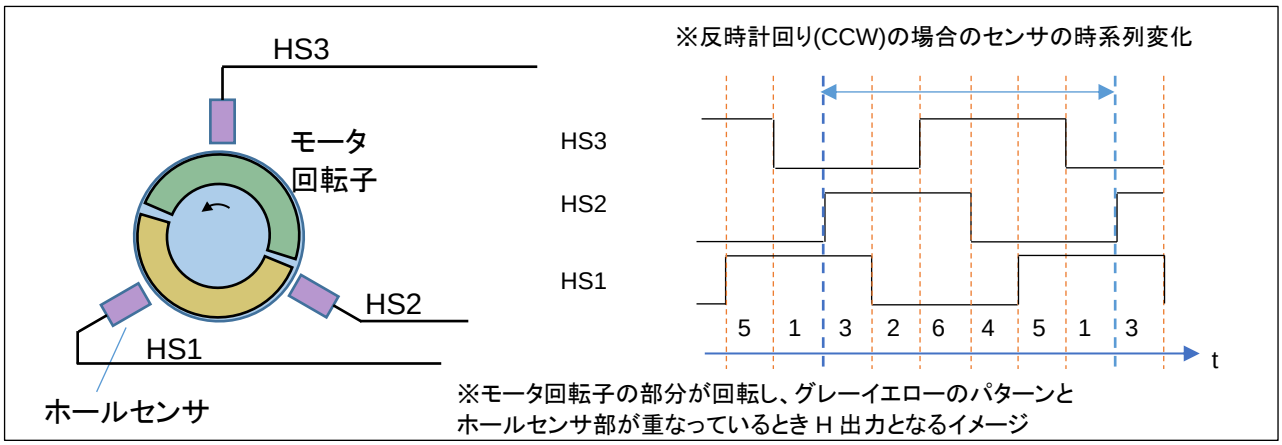



ホールセンサを使用した既存のプログラムをそのまま使う場合、AD0'~AD2'の 0/1 信号を生成して、重み付け

4×AD1' + 2×AD0' + AD2'

を行う事で、1~6 までの数値が得られます。この値を疑似ホールセンサパターンとします。

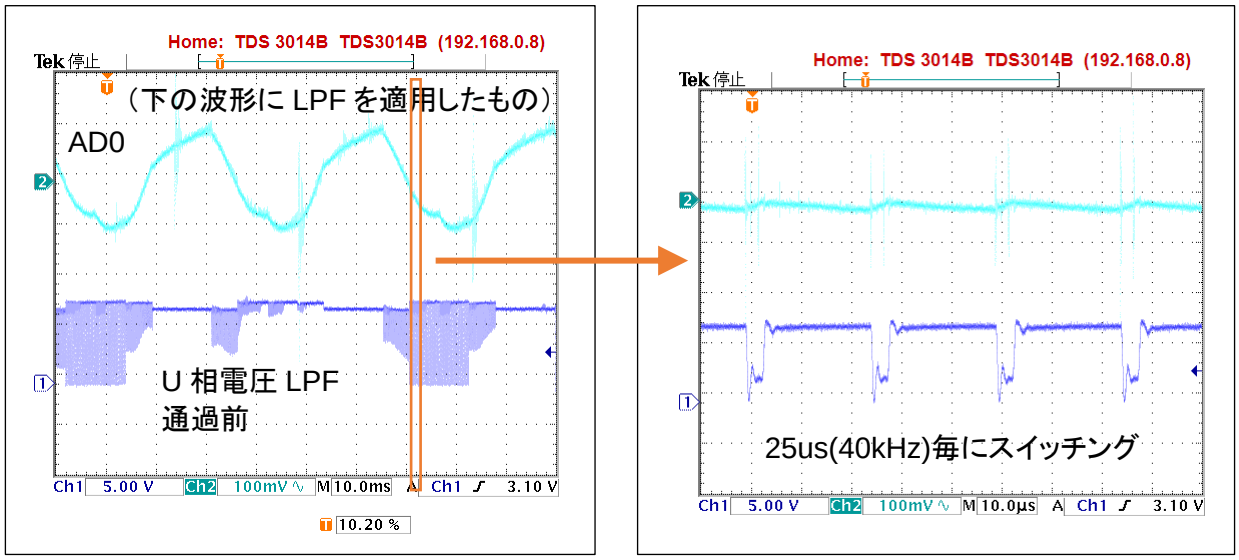
この、3, 2, 6, 4, 5, 1 の値、順番がホールセンサ




の出力と一致する様に重み付けを行ったので、プログラム的には、「ホールセンサの値(1~6)」と疑似ホールセンサパターン(1-6)」を同様に処理します。(センサ値と電流の印加方向の関係は、ホールセンサ，疑似ホールセンサパターンで同じです。)

※回転方向が CW(時計回り)の場合、モータのホールセンサと同じ出力を得る場合、重み付けの計算は、4×$\overline{AD2'}$ + 2×$\overline{AD1'}$ + $\overline{AD0'}$となります。本チュートリアルでは回転方向は、CCW のみ対応しています。サンプルプログラム(RX71M_BLMKIT_SAMPLE)には、回転方向 CW に対応したコードが記載されています。

・AD0 電圧の A/D 変換値の取得

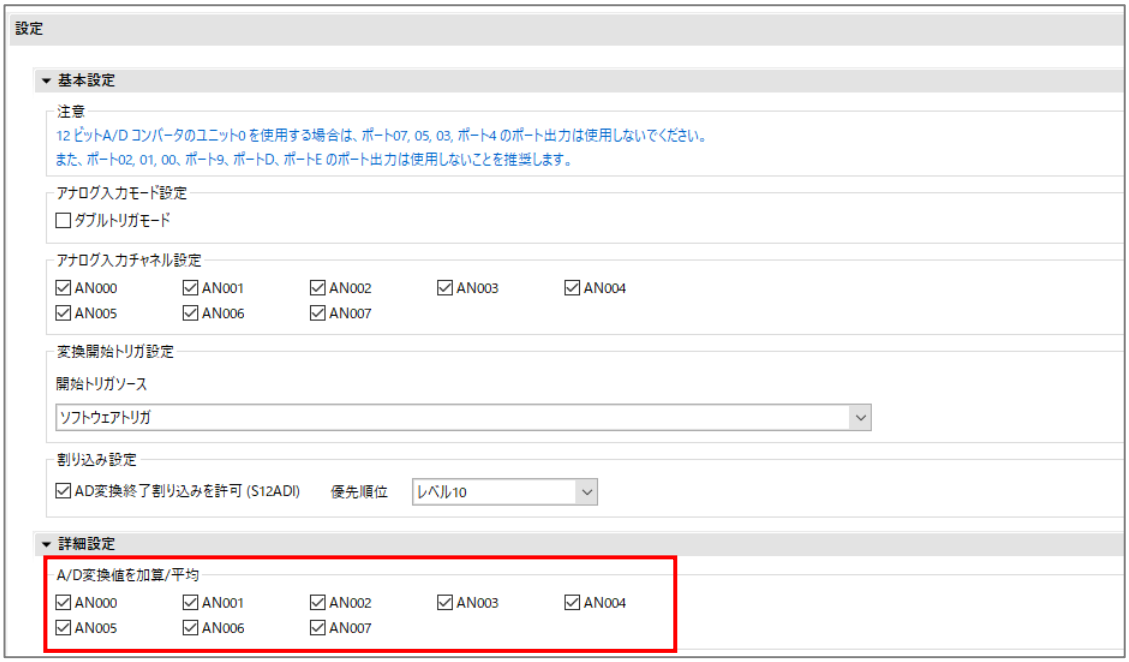



時間軸を拡大（左の 10ms/div に対し 10us/div）

モータ端子の U 相電圧は LPF 通過前は（V→W に電流が流れているタイミング等で）パルス状の信号が発生していたり、（U 相が動かないタイミングでは）止まっていたり、一見意味のない信号に見えます。この信号に LPF を適用すると、AD0 の信号が得られます。LPF は、モータドライバボード上の回路で処理されています。

LFP 通過後の AD0 の信号でも、U 相電流が ON/OFF するタイミング等では、ノイズが乗るので本チュートリアルでは、A/D 変換値の平均化を取る様にしています。

・マイコンの A/D 変換での平均化





このような設定を行う事により、A/D 変換実行時間は増加しますが、ユーザ側はプログラム上で演算することなく、平均値が得られます。

※なお、本チュートリアルでは、使用していませんが、PWM 波形を生成しているタイマに同期して A/D 変換をキックする事も可能です（その場合、波形切り替えのタイミングとずらして、A/D 変換をキックする事ができます）

・平均値（AD0 の DC 的な平均値）の算出

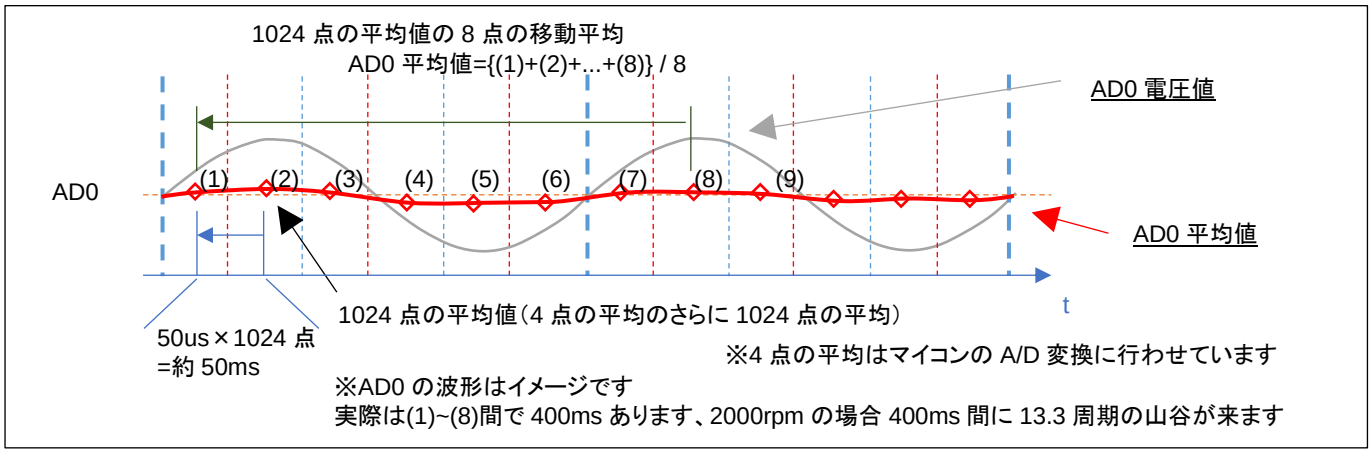
AD0 の信号は、LPF 通過後も sin カーブ状態ですので、AD0 との比較対象に使用する長期間の平均値を計算してします。本チュートリアルでは、1024 点の平均値を取り、さらに 1024 点の平均値 8 点の移動平均を求めています。

1024 点の平均は、51.2ms に相当し、1024 点×8 点は大体 400ms に相当します。

・blm.h

```
//ADC長期間の移動平均
#define BLM_ADC_LONG_AVERAGE 1024   //1024点の平均を求める（256, 512, 1024, 2048, 4096の値が有効）
（中略）
#define BLM_ADC_LONG_AVERAGE_HIST 8 //1024点の平均値の8点の移動平均を取り最終的な平均値を求める
（2,4,8,16,32の値が有効）
```

1024 点や 8 点は、blm.h 内の定数定義で変更可能です。




AD0 変換値は、50us 毎の A/D 変換値を 1024 点平均を取り、その 1024 点の平均値の移動平均を AD0 の平均値とします。

時間が t=(8)の時は、(1)~(8)の平均値を AD0 平均値とし、t=(9)の時は(2)~(9)の平均値を AD0 平均値とします。（約 50ms 毎に、最新の 1024 点の平均値を取り込み、400ms 前の値を捨てる形で、平均値は更新されます。＝移動平均の考え方）

・AD0(,AD1, AD2)の移動平均と閾値のオプション

AD0(,AD1, AD2)は、マイコンの A/D 変換の機能で 4 値の平均を取っていますが、追加で
(1)移動平均値を取る(*1)
(2)ヒステリシス特性を持たせる
2 つのオプションを用意しています。

(*1)前出の移動平均の話は、「AD0 の平均値」の算出時の話で、AD0 の平均値の算出の際は 8 点の移動平均を取っています。この部分では、平均値ではなく、現在値をどう取り扱うかの話です。

・blm.h

```
//ADC短期間の移動平均
#define BLM_ADC_SHORT_AVERAGE_HIST 8 //移動平均のポイント数（2,4,8,16,32の値が有効）
```

```
//疑似ホールセンサパターン
#define BLM_HALL_PSEUDO_SENSOR_AVERAGE 0x1 //b0=1:電圧の移動平均をホールセンサパターンとする, b0=0:その時の電圧(A/D値4点の平均）をホールセンサパターンとする
#define BLM_HALL_PSEUDO_SENSOR_HYS 0x2 //b1=1:ヒステリシスを有効にする, b1=0:ヒステリシス無効
#define BLM_HALL_PSEUDO_SENSOR_HYS_VAL 16 //16 = 13mV/3300mV*4096, 13mV程度ヒステリシスを付ける
```

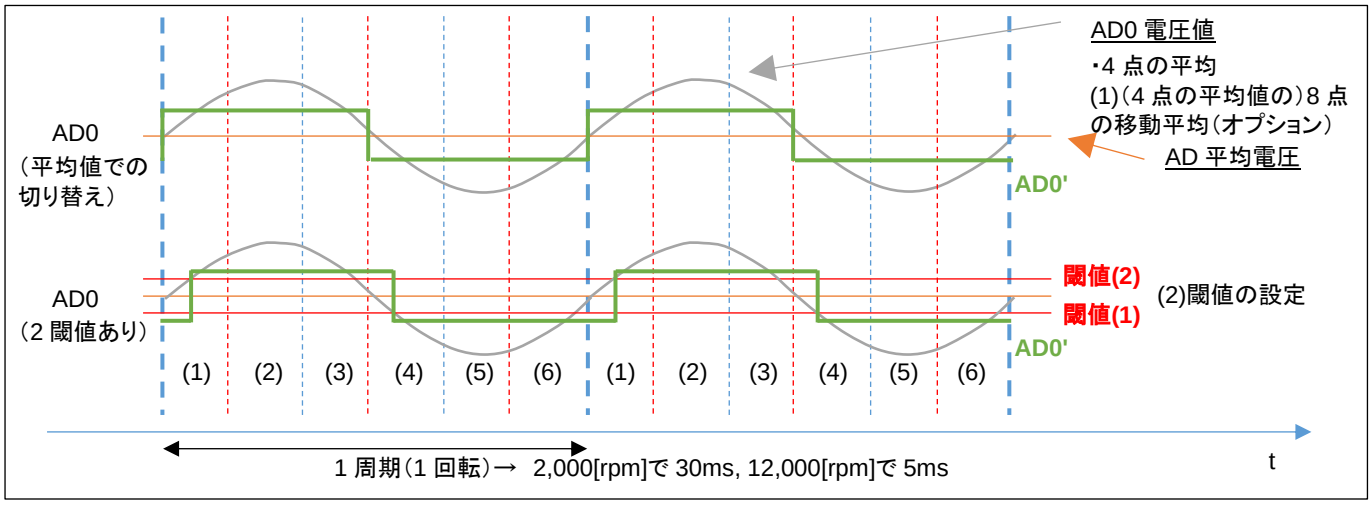
(1)移動平均の算出（プログラムでの平均化）

プログラムでは、AD0(,AD1, AD2)の A/D 変換値の移動平均を計算して使用できる様にしています。

'a'コマンドで、AD0 値の移動平均を取る様になります（デフォルトでは 8 点）。

マイコンの A/D 変換で、4 点の平均を取っていますが、4 点の平均値のさらに 8 点の移動平均を AD0 の値として使用します。

マイコンの A/D 変換機能での平均化に加え、ユーザプログラムでの移動平均化を行いノイズ対策を行える様にしています。



(2)ヒステリシスの有効化

AD0 の平均電圧との比較では、単純な大小比較（デフォルト）と、ヒステリシスを持たせた比較（オプション）が選べるようになっています。

ヒステリシスは、'h'コマンドで有効・無効を切り替えます。

※一般的にはノイズの多い信号を処理する場合はヒステリシス（0→1 に切り替わる閾値と 1→0 に切り替わる閾値に差を付ける）があった方が誤動作を防止できます

AD0 の移動平均を取る(1)とヒステリシス(2)は、どちらも低速回転時は有効／無効で大差なし。高速回転時は、有効にすると、（電流方向の切り替えが遅くなる分）消費電流が増えるイメージです。

・起動時のメッセージ

```
Copyright (C) 2025 HokutoDenshi. All Rights Reserved.

RX71M / BLUSHLESS MOTOR STARTERKIT TUTORIAL C


EXPLANATION:
SW2 -> CH-1 motor ON/OFF
LED1 : CH-1 active ON/OFF, Error->BLINK
VR -> duty(0-100%)

COMMAND:
s : stop <-> start display information(toggle)
A : A/D convert data display
S : Normal operation <-> Starting operation(toggle)
H : Hall sensor use <-> Pseudo hall sensor pattern use(toggle)
a : pseudu hall sensor pattern <-> average volatage(toggle)
h : pseudu hall sensor pattern <-> hysterisis volatage(toggle)
z : debug display(toggle)
N : CH-1 motor ON
F : CH-1 motor OFF

>
```

起動時は、平均化('a)とヒステリシス('h')は両方 OFF です。キーボードからのコマンド入力'a', 'h'で有効・無効がトグルで切り替わります。

・疑似ホールセンサパターンのデバッグ表示

キーボードから'z'を入力すると、疑似ホールセンサパターンのデバッグ表示を行います。

・シリアル端末から出力される情報

```
c1:pos:5,5h
c1:pos:1,1h
c1:pos:1,3h
c1:pos:3,3h
c1:pos:2,2h
c1:pos:2,2h
c1:pos:6,6h
c1:pos:4,4h
c1:pos:4,4h
c1:pos:5,5h
c1:pos:5,1h
c1:pos:1,1h
c1:pos:3,3h
c1:pos:3,3h
c1:pos:2,2h
c1:pos:2,6h
c1:pos:6,6h
c1:pos:4,4h
c1:pos:4,5h
c1:pos:5,5h
c1:pos:1,1h
c1:pos:1,1h
```

上記の様な出力が得られます。

c1: CH-1

pos: 6,6h

6 ホールセンサの位置情報

6 疑似ホールセンサパターンの位置情報

h 現在制御にホールセンサを使用

p 現在制御に疑似ホールセンサパターンを使用

（デフォルトでは、2ms 毎に表示）

この表示により、疑似ホールセンサパターンとホールセンサの値が合っているか、どちらが速く切り替わるかを確認可能です。

・モータの始動に関して

先に示したモータの始動方法は、「ホールセンサを使用して初期始動を行う」という方式です。

ホールセンサレスで制御する目的で、ホールセンサを使用するというのは、矛盾があると思います。

通常は、センサレス駆動の場合、始動時は「ホールセンサの値」「疑似ホールセンサパターンの値」どちらも使用できないので、一定回転数で電流の向きを変化させてモータを始動します。モータ始動後は、疑似ホールセンサパターンの値を使って回転を維持させます。

モータの始動にホールセンサを使わない手順を以下に示します。

(1)SW=OFF の状態で H コマンドを入力して疑似ホールセンサパターンを使う設定とします

```
HALL Sensor -> Pseudo hall sensor pattern
```

(2)S コマンドを入力して始動モードにします
→モータに印加する電流を 6ms 毎に 1/6 回転(1,667[rpm])する様に切り替える設定です

```
Operation mode -> StartUP
```

(3)VR を絞り SW を ON にします

(4)VR を回していきます
→この時の動作は 1.4 章の TUTORIAL4 のモータの回転数は一定、duty は可変という状態です
（電流の切り替えは一定時間間隔に行われ、ホールセンサ、疑似ホールセンサパターンのどちらも使用しない動作です。）

(5)モータが安定して回る様になったら、S コマンドを入力して始動モードをやめます
→モータは、疑似ホールセンサパターンでの制御となります

```
Operation mode -> Normal
```

本チュートリアルでは、(5)の手順（始動制御状態からセンサレス駆動への移行）は手動で行う事としていますが、一般的なセンサレス駆動の場合、この部分をプログラムで判断して自動的に移行させる事となります。

・シリアル端末から出力される情報（3 秒毎に表示される回転数等の情報）

```
                      CH-1
Motor Driver Board     : Connect
Active                :     o
hall sensor           :  Pseudu hall sensor pattern, phase voltage
  average    ->  OFF
  hysteresis ->  OFF
rotation speed([rpm])  :  4440
Temperature(A/D value) :  2053
Temperature(degree)    :    26
VR(A/D value)          :  1204
QL duty[%]             :  29.4
```

ホールセンサ区分（モータ内蔵ホールセンサか、疑似ホールセンサパターンか）と、疑似ホールセンサパターンの際には、平均化とヒステリシスの ON/OFF が表示されます。

※本チュートリアルでは、回転数の計算やモータドライバボードの接続確認にホールセンサケーブルがつながっている事が前提となっています。（ホールセンサケーブルを接続しない状態では、モータドライバボード未接続となりモータに信号は送られません）

・チュートリアル C での端子設定

→チュートリアル 7 に同じ

・チュートリアル C での使用コンポーネント

| コンポーネント名 | リソース | 用途 | 備考 |
|---|---|---|---|
| r_bsp | | 基本的なマイコン設定 | 初期状態で追加済み |
| Config_ICU | ICU | 端子割り込み<br>過電流停止 | SW2 が押された際に割り込みが掛る設定<br>IRQ4 を立下りエッジで使用 |
| Config_S12AD0 | S12AD0 | A/D 変換 | A/D 変換は平均化を適用 |
| Config_S12AD1 | S12AD1 | A/D 変換 | A/D 変換は平均化を適用 |
| Config_PORT | PORT | I/O ポート | |
| Config_SCI1 | SCI1 | UART 通信 | |
| Config_CMT0 | CMT0 | 50us タイマ | |
| Config_CMT1 | CMT1 | 10ms タイマ | |
| Config_CMT2 | CMT2 | 500ms タイマ | |
| Config_CMT3 | CMT3 | 6ms タイマ | 始動制御に使用 |
| Config_GPT2 | GPT2 | PWM 波形生成(CH-1) | |

※グレーの項目はチュートリアル 7 から変更なし

## 2.5. センサレス＋相補 PWM 駆動

参照プロジェクト:RX71M_BLMKIT_TUTORIAL_BC

本チュートリアルは、2.4 節のセンサレス駆動(TUTORIAL_C)（疑似ホールセンサパターン使用）のモータ駆動部を、2.3 節の相補 PWM 駆動(TUTORIAL_B2)に置き換え、2 つのチュートリアルを組み合わせたものです。

TUTORIAL_C 同様、モータの起動は 2 通り（ホールセンサで起動するか、一定回転数で起動）です。

・ホールセンサでの起動

(1)SW を OFF, VR を絞った状態とします

(2)SW を ON にして、VR を回していき、モータを回転させます
→この時はホールセンサを使用しています、TUTORIAL_B2 と同じ動作です

(3)H コマンドでセンサレス動作に切り替える
→モータの回転制御に疑似ホールセンサパターンを使用する様に切り替わります

```
HALL Secsor -> Pseudo hall sensor pattern
```

・一定回転数で起動

(1)S コマンドを入力
→一定回転数（2000rpm で磁界印加角度を進めていく設定）

```
Operation mode -> StartUP
```

(2) H コマンドでセンサレス動作に切り替える
→モータの回転に疑似ホールセンサパターンを使う設定

```
HALL Secsor -> Pseudo hall sensor pattern
```

(3) VR を絞り、SW を ON にして、VR を回していき、モータを回転させます
→この時の動作は 2.2 章の TUTORIAL_B のモータの回転数は一定、duty は可変という状態です

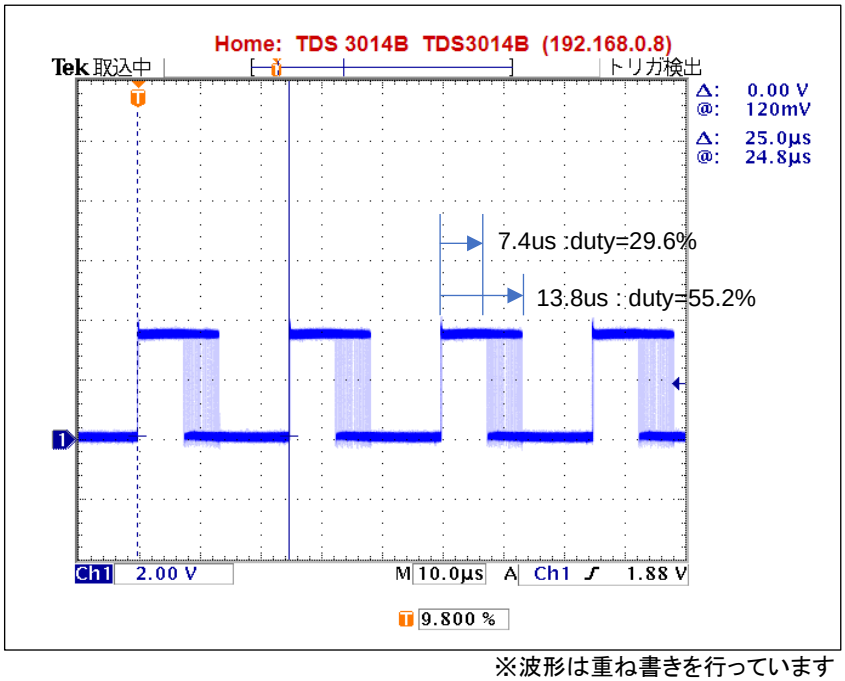
(4)モータが安定して回る様になったら、S コマンドで始動モードを切り替えます
→モータの回転制御に疑似ホールセンサパターンを使用する様に切り替わります

```
Operation mode -> Normal
```

※H コマンド、S コマンドはトグル動作なので画面表示が上記のメッセージとなる様に、場合によっては 2 回入力してください

本チュートリアルは、TUTORIAL_B2 と TUTORIAL_C の組み合わせなので、特に新しい要素はありません。

・PWM 波形イメージ（相補 PWM）




※波形は重ね書きを行っています

・矩形波の周期は 25us(40kHz)

・duty は、徐々に変化していく

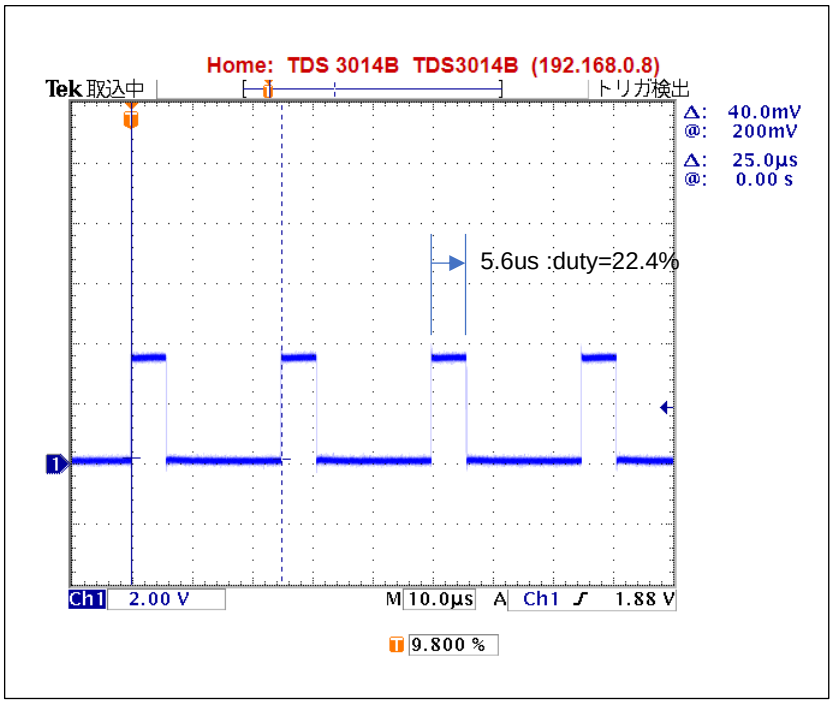
→duty が約 30~55%の間、連続的に変化している

（波形取得時に、VR は回していません。モータに印加する duty は一定の状態でも、U 相, V 相, W 相の個々の波形の duty は連続的に変化する動作となります。）

→隣り合うパルスで徐々に duty が変化していく形となります

（上記の波形は、1 相の波形ですが、6 相全ての波形の duty が同じように動いています）

・PWM 波形イメージ（120 度制御）



・矩形波の周期は 25us(40kHz)
・duty は、VR を回さない限り変化なし
（上記の様な波形が、U, V, W 相の L 側の 3 相で出ているタイミングと出ていないタイミングがあります）
（チュートリアル 7 等では、H 側は duty=100%、ON のタイミングでは、H を維持、L 側のみ PWM 駆動）

相補 PWM の波形は、duty が連続的に変化するという点で、120 度制御に比べるとノイズが大きい形となります。（120° 制御では、決まった位置にスイッチングノイズが発生するのでスイッチングノイズが生じないタイミングで A/D 変換を行えば良いが、相補 PWM ではスイッチングノイズが生じるタイミングが常に移動）そのため、疑似センサパターンの判定時に平均化やヒステリシスを有効にした方が動作が安定する事は考えられます。

・起動時にシリアル端末から出力される情報

```
Copyright (C) 2025 HokutoDenshi. All Rights Reserved.

RX71M / BLUSHLESS MOTOR STARTERKIT TUTORIAL BC


EXPLANATION:
SW2 -> CH-1 motor ON/OFF
LED1 : CH-1 active ON/OFF, Error->BLINK
VR -> duty(0-100%)

COMMAND:
s : stop <-> start display information(toggle)
A : A/D convert data display
D : rotation direction->CCW <-> roration direction->CW (toggle)
S : Normal operation <-> Starting operation(toggle)
H : Hall sensor use <-> Pseudo hall sensor pattern use(toggle)
a : pseudu hall sensor pattern <-> average volatage(toggle)
h : pseudu hall sensor pattern <-> hysterisis volatage(toggle)
q : forward angle -1  [CH-1]
w : forward angle +1  [CH-1]
e : forward angle =0  [CH-1]
1 : UVW calc -> sine
2 : UVW calc -> sine(2)
3 : UVW calc -> sine + 3harmonic
4 : UVW calc -> sine + 3harmonic(2)
5 : UVW calc -> another version
6 : UVW calc -> another version(100% power)
7 : UVW calc -> another version(100% power)(2)
z : debug display(LEVEL1)(toggle)
x : debug display(LEVEL2)(toggle)
N : CH-1 motor ON
F : CH-1 motor OFF

>
```

2 種類のデバッグ表示（'z', 'x'で表示・非表示の切り替え）がある点が今までのチュートリアルとの相違です。

・シリアル端末から出力される情報（3 秒毎に表示される回転数等の情報）

```
                          CH-1
Motor Driver Board        : Connect
Active                   :     o
hall sensor              :  Pseudu hall sensor pattern, phase voltage
  average    ->  OFF
  hysteresis ->  OFF
rotation control(PHASE)   : Normal(2)
UVW calculation method    : (1)
diff angle -> speed([rpm]):  4560
forward angle([deg])      :     0
target direction          :   CCW
rotation speed([rpm])     :  4620
Temperature(A/D value)    :  2025
Temperature(degree)       :    25
VR(A/D value)             :  2049
duty[%]                   :  50.0
```

rotation control は、

S コマンドで

StartUp(1)　回転数 2,000rpm で磁界印加角度を動かす（始動制御）

Normal(2)　印加 duty に応じた回転数（通常）

が切り替わります。

diff angle -> speed は、現在の磁界印加角度増分から計算される回転数です。

（rotation speed は、ホールセンサの切り替わりタイミングから算出される回転数です。）

・'z'コマンドで表示される内容（チュートリアル C と同じ）

```
c1:pos:3,3p
c1:pos:2,2p
c1:pos:2,6p
c1:pos:6,6p
c1:pos:4,4p
```

z コマンドでは、モータ内蔵ホールセンサと疑似ホールセンサパターンの値を表示します（2ms 毎の読み取り）。

c1: CH-1 側である事を示す

pos:2,6p モータ内蔵ホールセンサ=2, 疑似ホールセンサパターン=6, 現在の制御=疑似ホールセンサパターンである事を示す（モータ内蔵ホールセンサを使用している場合は最後の文字は'h'）

・'x コマンドで表示される内容

```
c1:pos:1:deg:270(0)
c1:pos:3:deg:332(-2)
c1:pos:2:deg:25(4)
c1:pos:2:deg:90(0)
c1:pos:4:deg:151(-1)
c1:pos:5:deg:210(0)
c1:pos:1:deg:269(0)
c1:pos:3:deg:333(-3)
c1:pos:2:deg:25(4)
c1:pos:2:deg:91(-1)
c1:pos:4:deg:150(0)
c1:pos:5:deg:209(0)
c1:pos:1:deg:270(0)
c1:pos:3:deg:330(0)
c1:pos:2:deg:29(0)
c1:pos:6:deg:90(0)
c1:pos:4:deg:150(0)
c1:pos:5:deg:207(2)
c1:pos:1:deg:271(-1)
```

x コマンドは、センサ位置が切り替わった際の角度を表示します。

c1: CH-1 側である事を示す

pos:3 ホールセンサの切り替わり時の値（'P'コマンドで選択した側のホールセンサ値）

deg:330(0) その時の角度が 330°，理想とのずれ 0°

'z', 'x'どちらのコマンドも、過去のチュートリアルで表示している内容です。

・チュートリアル BC での端子設定

→チュートリアル B2 に同じ

・チュートリアル BC での使用コンポーネント

→チュートリアル B2 に同じ

※但し、AD 変換は平均化を指定

以上で、チュートリアル編は終了となります。

チュートリアルで扱った内容をまとめたのが、サンプルプログラム(RX71M_BLMKIT_SAMPLE)となります。サンプルプログラムに関しては、別の資料（「ソフトウェア　サンプルプログラム編」）に内容をまとめています。

## 2.6. 数値演算に関して

－三角関数(cos)の計算に関して－

相補 PWM のプログラムでは、制御周期(50us)毎に cos の計算を行って UVW 相の duty（UVW 分解）を計算しています。最近のマイコンでは TFU（三角関数をハードウェアで計算するユニット）を搭載しているものもあり、高速に cos, sin の計算ができます。RX71M には TFU は搭載されていませんので、RX71M のプログラムでは、初期化関数(blm_init)内で、0-180° の範囲で 1° 刻みで計算してテーブル化したデータを生成し、プログラム内で cos, sin の値はテーブル参照で利用しています。

・RX71M 向けの blm.c（blm_angle_to_uvw_duty()関数内）

```
//COS, SINテーブル計算
for (i=0; i<=180; i++)
{
    //0-180°の範囲のCOS値をテーブル化する
    g_cos_table[i] = cosf((float)i / 180.0f * PI);

    //0-180°の範囲のSIN値をテーブル化する
    g_sin_table[i] = sinf((float)i / 180.0f * PI);
}
```

実際に三角関数の計算を使用している UVW 分解の関数でベンチマークを取ると以下の様な速度となりました。

| 関数名 | RX71M テーブル化で計算 | RX71M cosf, sinf 関数で計算 | [参考] RX26T TFU で計算 | 備考 |
|---|---|---|---|---|
| blm_angle_to_uvw_duty_sin | 246us | 396us | 225us | デフォルトの正弦波駆動 |
| blm_angle_to_uvw_duty_sin_post | 246us | 396us | 225us | ↑の後から duty を乗算 |
| blm_angle_to_uvw_duty_sin_3harmonic | 366us | 552us | 333us | 3 倍高調波重畳 |
| blm_angle_to_uvw_duty_sin_3harmonic_post | 366us | 552us | 333us | ↑の後から duty を乗算 |
| blm_angle_to_uvw_duty1 | 212us | 312us | 184us | 別バージョン 1 |
| blm_angle_to_uvw_duty2 | 278us | 398us | 245us | 別バージョン 2 |
| blm_angle_to_uvw_duty2x | 118us | ← | 236us | 別バージョン 2 の直線近似（三角関数の計算未使用） |

※ベンチマークは、上記関数を 0° ~360° まで 1° 刻みで 360 回計算した場合の実行時間

TFU 搭載のマイコン（RX26T@120MHz）で TFU で計算した場合、RX71M@240MHz でテーブル化したよりも高速に三角関数の値を取得する事が出来ています。RX71M では、テーブル化もしくは、sinf, cosf を使用する方法しかありませんが、将来 TFU 搭載マイコンを使用する場合は、TFU の使用を検討してみてください。

※RX71M では高速化のためにテーブル化を行いましたが、ベンチマークを取ってみると三角関数の関数を使用した場合に比べて実行時間が半分にもなっていません。テーブル化するのであれば、もう少しチューニングが必要かもしれません。（または、素直に cosf, sinf の関数（→CC-RX ではライブラリで提供）を使用しても良いかも知れません。）

ー浮動小数点数の計算に関してー

RX マイコン(RX71M), CC-RX の環境では、

double 型 2.0 等
float 型 2.0f 等

はどちらも、単精度浮動小数点数（4 バイト型）として扱われます。

（コンパイラ(CC-RX)オプションで、
double 型、及び long double 型の精度　単精度として扱う(-dbl_size=4)
がデフォルトになっています。）

そのため、double と float どちらでも、4 バイト精度(float)で計算されます（float で扱うようなコードが生成されます）。
（a = a * 2.0 は float の演算として処理されます）

そのため RX では、2.0 と 2.0f を厳密に区別しなくても、それ程問題にならないケースが多いと思われます。

PC でのプログラムに慣れている方（組み込み系はあまり触らない方）なら、

2　（整数）
2.0　（浮動小数点数）

の使い分けは行うが、あえて

2.0f　（float 型の浮動小数点数）

を使うケースがあまりないかもしれません。

コンパイラオプションで

double 型、及び long double 型の精度　倍精度として扱う(-dbl_size=8)

とすると、

float　マイコンに FPU が搭載されているので、ハードウェアで高速に演算
double　ハードウェアでは一発で計算できないので、ソフトウェアライブラリでの演算（極端に演算速度が落ちる）

となります。これは、double 型の変数を使った場合、計算が遅いというだけの話ではなく、float 型の変数 a を使った計算においても、

```
a = a * 2.0;
```

2.0 が double 型の定数として取り扱われるので、乗算の部分が double 型の演算となり、計算が遅くなります。

よって、上記の計算は

```
a = a * 2.0f;
```

である必要があります。

（RX で、デフォルトからオプションを変更しない場合は、あまり意識する必要はありませんが）モータ制御の様なリアルタイム制御では、演算速度は重要な要素となりますので、double 型の精度が必要のない計算は、2.0f の様に f サフィックスを付ける様にしてください。

# 取扱説明書改定記録

| バージョン | 発行日 | ページ | 改定内容 |
|---|---|---|---|
| REV.2.0.0.0 | 2025.4.2 | — | 初版発行 |

## お問合せ窓口

最新情報については弊社ホームページをご活用ください。

ご不明点は弊社サポート窓口までお問合せください。

株式会社 北斗電子

〒060-0042 札幌市中央区大通西 16 丁目 3 番地 7

TEL 011-640-8800　FAX 011-640-8801

e-mail：support@hokutodenshi.co.jp (サポート用)、order@hokutodenshi.co.jp (ご注文用)

URL:https://www.hokutodenshi.co.jp

ルネサス エレクトロニクス RX71M(QFP-100 ピン)搭載
ブラシレスモータスタータキット

# ブラシレスモータスタータキット (RX71M) [ソフトウェア　チュートリアル編] 取扱説明書

株式会社 北斗電子

 2025 年 4 月 2 日改訂 REV.2.0.0.0 (250402)