

## RX72M グループ

### 永久磁石同期モータのセンサレスベクトル制御 - 2 モータ駆動

#### 要旨

本アプリケーションノートは RX72M マイクロコントローラを使用し、2 個の永久磁石同期モータをベクトル制御で駆動するソフトウェア及びモータ制御開発支援ツール「Renesas Motor Workbench」の使用方法について説明することを目的としています。なお、本アプリケーションノート対象ソフトウェアには、コード生成支援ツール「スマート・コンフィグレータ」を使用しており、特にモータ制御に必要なマルチファンクションタイマパルスユニット、汎用 PWM タイマ及び 12 ビット A/D コンバータのドライバを提供するモータ・コンポーネントを使用しています。

本アプリケーションノートは、2 つのモータを MTU と、GPT で駆動するソフトウェアとそれを動作させるハードウェア構成を説明しています。

本アプリケーションノート対象ソフトウェアはあくまで参考用途であり、弊社がこの動作を保証するものではありません。本アプリケーションノート対象ソフトウェアを使用する場合、適切な環境で十分な評価をしたうえで御使用ください。

#### 動作確認デバイス

本アプリケーションノート対象ソフトウェアの動作確認は下記のデバイスで行っています。

- RX72M (R5F572MNDDBD)

#### 対象ソフトウェア

本アプリケーションノート対象ソフトウェアを下記に示します。

- RX72M\_2MRSSK\_2SPM\_LESS\_FOC\_CSP\_RV100 (IDE : CS+)
- RX72M\_2MRSSK\_2SPM\_LESS\_FOC\_E2S\_RV100 (IDE : e<sup>2</sup>studio)

Evaluation System for BLDC Motor & RX72M CPU カード向け RX72M センサレスベクトル制御ソフトウェア

## 目次

1. 概説	4
1.1 開発環境	4
2. システム概要	5
2.1 ハードウェア構成	5
2.2 ハードウェア改造内容	9
2.2.1 2モータ用拡張ボードを使用しない場合	9
2.2.2 2モータ用拡張ボードを使用する場合	13
2.3 ハードウェア仕様	15
2.3.1 ユーザインタフェース	15
2.3.2 周辺機能	17
2.4 ソフトウェア構成	19
2.4.1 ソフトウェア・ファイル構成	19
2.4.2 スマート・コンフィグレータのファイル構成	20
2.4.3 モジュール構成	23
2.5 ソフトウェア仕様	24
2.6 割込み優先順位	25
3. 制御ソフトウェア説明	26
3.1 制御内容	26
3.1.1 モータ起動/停止	26
3.1.2 A/D変換	26
3.1.3 変調	28
3.1.4 状態遷移	30
3.1.5 始動方法	32
3.1.6 システム保護機能	33
3.1.7 キャリア同期割込み	34
3.2 センサレスベクトル制御ソフトウェア関数仕様	35
3.3 センサレスベクトル制御ソフトウェアマクロ定義	40
3.4 制御フロー（フローチャート）	42
3.4.1 メイン処理	42
3.4.2 100 [μs]周期割り込み（キャリア同期割り込み）処理	43
3.4.3 1 [ms]周期割り込み処理	44
3.4.4 過電流検出割り込み処理	45
4. 評価環境構築方法	46
4.1 e2 studioにおけるプロジェクトのインポート方法	46
4.2 ビルドとデバッグ	47
4.3 モータ制御開発支援ツール「Renesas Motor Workbench」	48
4.3.1 概要	48
4.3.2 Analyzer 機能用変数一覧	49
4.3.3 Analyzer 機能操作例	51
4.3.4 User Button 機能操作例	53
5. 参考ドキュメント	54

改訂記録 .....55

## 1. 概説

本アプリケーションノートでは、RX72M マイクロコントローラを使用した永久磁石同期モータ (PMSM) <sup>注1</sup> のセンサレスベクトル制御ソフトウェアの実装方法及びモータ開発支援ツール「Renesas Motor Workbench」の使用方法について説明します。

なお、このソフトウェアは「永久磁石同期モータのセンサレスベクトル制御 (アルゴリズム編)」 (R01AN3786) のアルゴリズムを使用していますので、アルゴリズムの詳細についてはこちらを参照してください。

以降、2つのモータをそれぞれモータ A、モータ B と称し、モータ A : GPT モータ B : MTU で制御します

【注】 1. 別称 : ブラシレス DC モータ (BLDC)

### 1.1 開発環境

本アプリケーションノート対象ソフトウェアの開発環境を表 1-1、表 1-2 に示します。

表 1-1 ハードウェア開発環境

マイコン	評価ボード	モータ <sup>注3</sup>
RX72M (R5F572MNDDBD)	48V 5A BLDC 用インバータボード(2台) RX72M CPU カード <sup>注1</sup> 2モータ用拡張ボード	TG-55L-KA, 24V (2個) <sup>注2</sup>

表 1-2 ソフトウェア開発環境

IDE バージョン	RX スマート・コンフィグレータ	ツールチェーンバージョン
CS+ : V8.06.00	バージョン 2.10.0	CC-RX : V3.03.00
e <sup>2</sup> studio <sup>注4</sup> : 2021-10	e <sup>2</sup> studio プラグイン版	

ご購入、技術サポートにつきましては、弊社営業及び特約店にお問い合わせください。

- 【注】 1. 48V 5A BLDC 用インバータボード (RTK0EM0000B10020BJ) 及び RX72M CPU カード (RTK0EMXDE0C00000BJ) は、ルネサスエレクトロニクス株式会社の製品です。  
48V 5A BLDC 用インバータボードは Evaluation System for BLDC Motor (RTK0EMX270S00020BJ) に同梱されています。
2. TG-55L-KA は、ツカサ電工株式会社の製品です。  
ツカサ電工株式会社 (<https://www.tsukasa-d.co.jp/>)
3. Evaluation System for BLDC Motor ユーザーズマニュアル (R12UZ0062)  
第 2 章に記載しているインバータ仕様に対応したモータと接続することができます。  
同梱しているモータ以外を使用する場合は、モータの仕様を十分に確認した上でご使用ください。
4. プロジェクトで指定するツールチェーン (C コンパイラ) と同一のバージョンがインポート指定先に存在しない場合は、ツールチェーンが選択されない状態になり、エラーが発生します。プロジェクトの設定画面でツールチェーンの選択状態を確認してください  
選択方法は、FAQ 3000404 を参照してください。  
(<https://ja-support.renesas.com/knowledgeBase/18367361>)

## 2. システム概要

本システムの概要を以下に説明します。

本 APN では、2つのハードウェア構成を説明しています。

- ① 2モータ用拡張ボードを使用しない場合 :  
CPU カードとインバータボードの改造が必要であり、また、ご自身でケーブルを作成する必要があります。
- ② 2モータ用拡張ボードを使用する場合 :  
CPU カードの改造が必要であり、また、ケーブルは市販の物を準備する必要があります。

### 2.1 ハードウェア構成

ハードウェア構成を次に示します。

#### (1). 全体構成(2モータ用拡張ボードを使用しない場合)

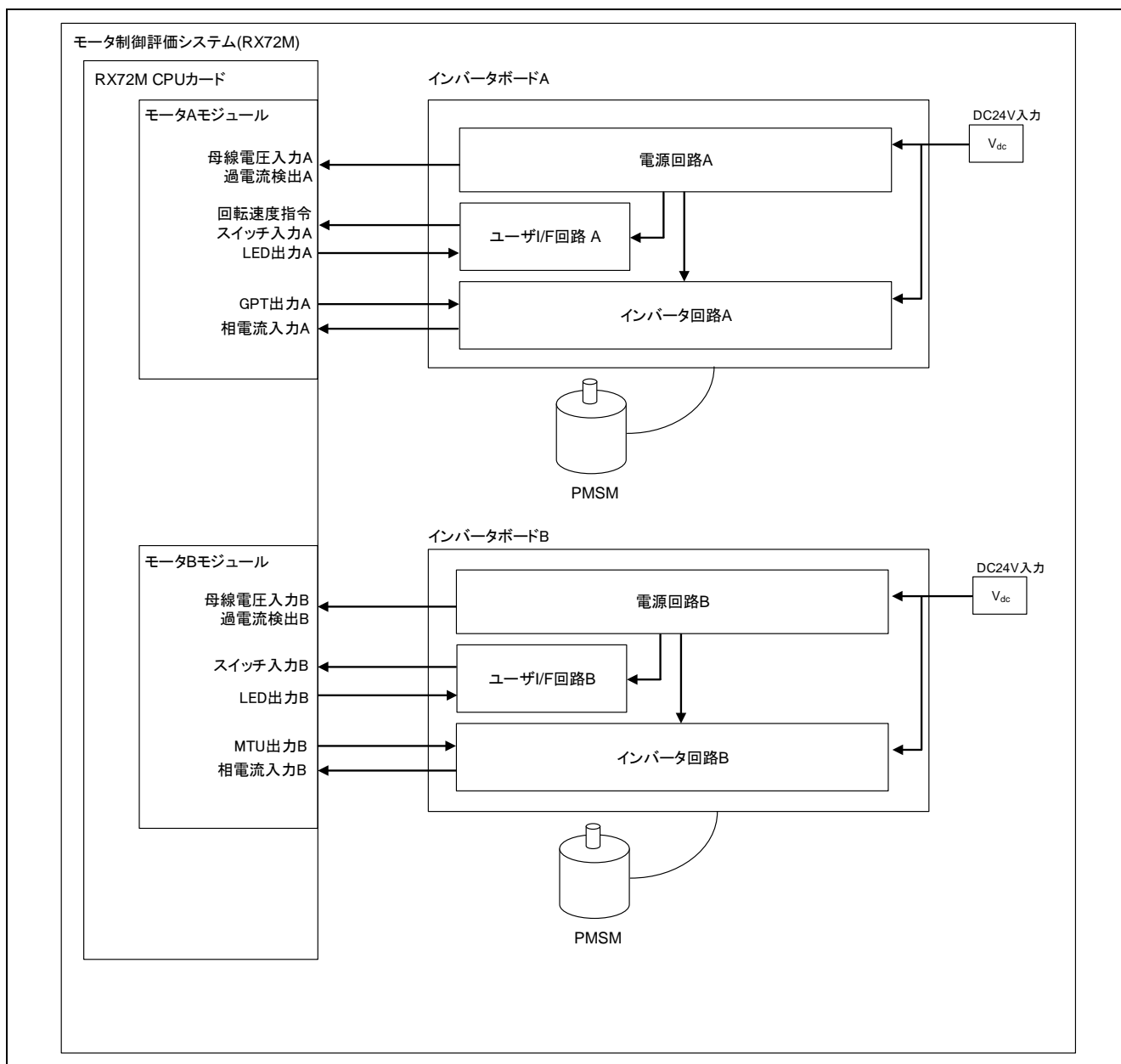


図 2-1 ハードウェア構成図(2モータ用拡張ボードを使用しない場合)

(2). 全体構成(2 モータ用拡張ボードを使用する場合)

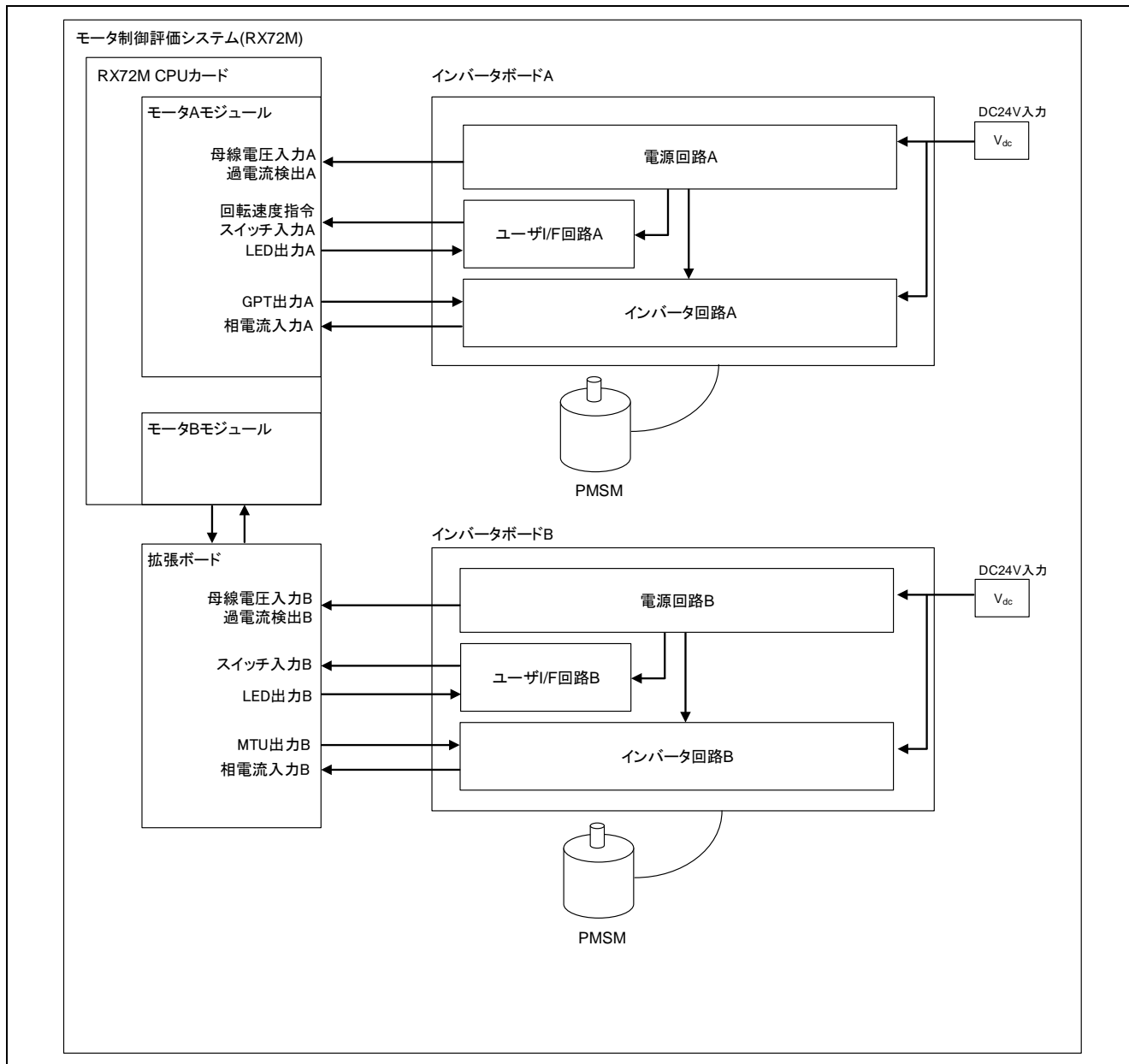


図 2-2 ハードウェア構成図(2 モータ用拡張ボードを使用する場合)

(3). モータ A モジュール構成

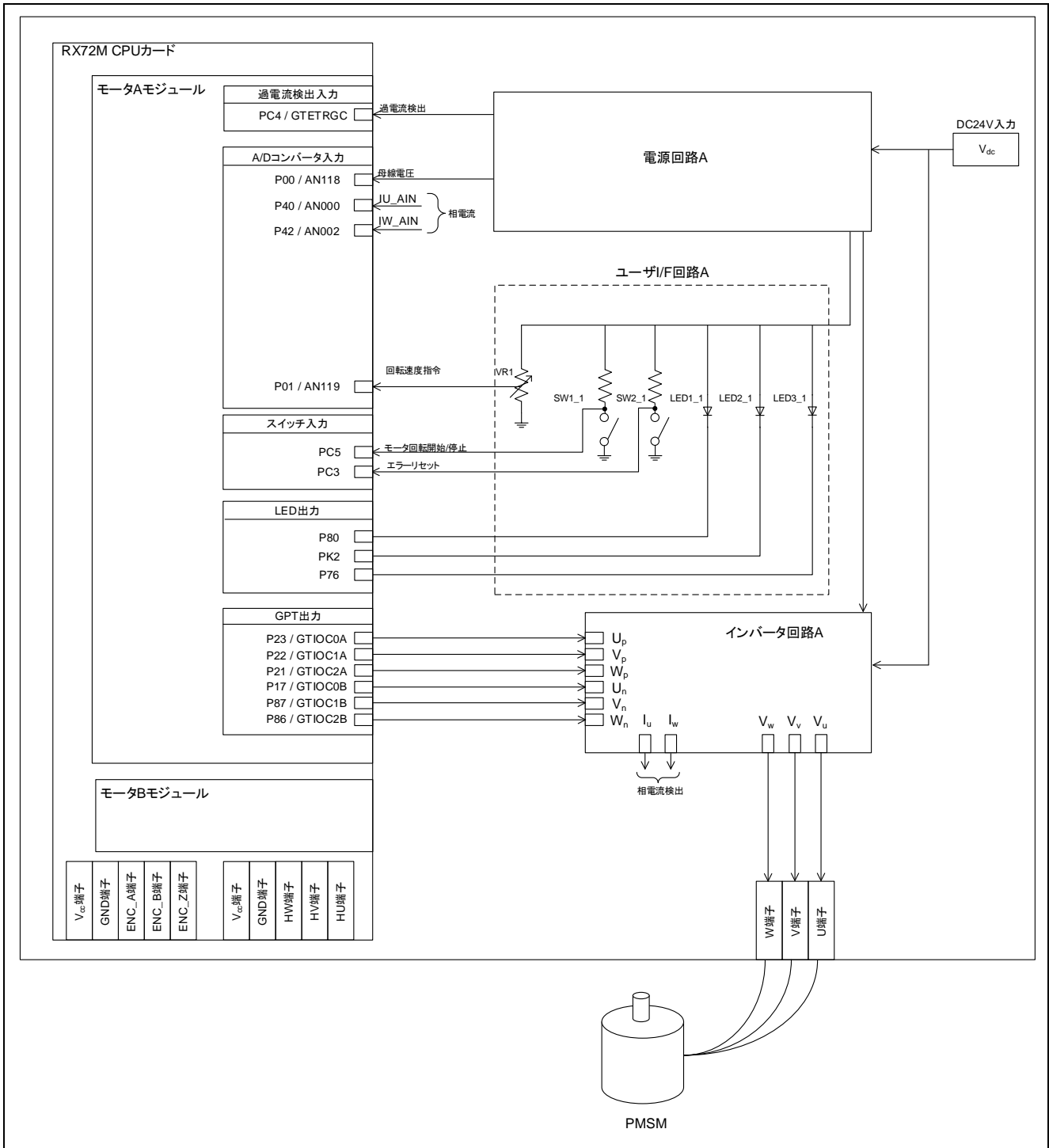


図 2-3 ハードウェア構成図 (モータ A モジュール)

(4). モータ B モジュール構成

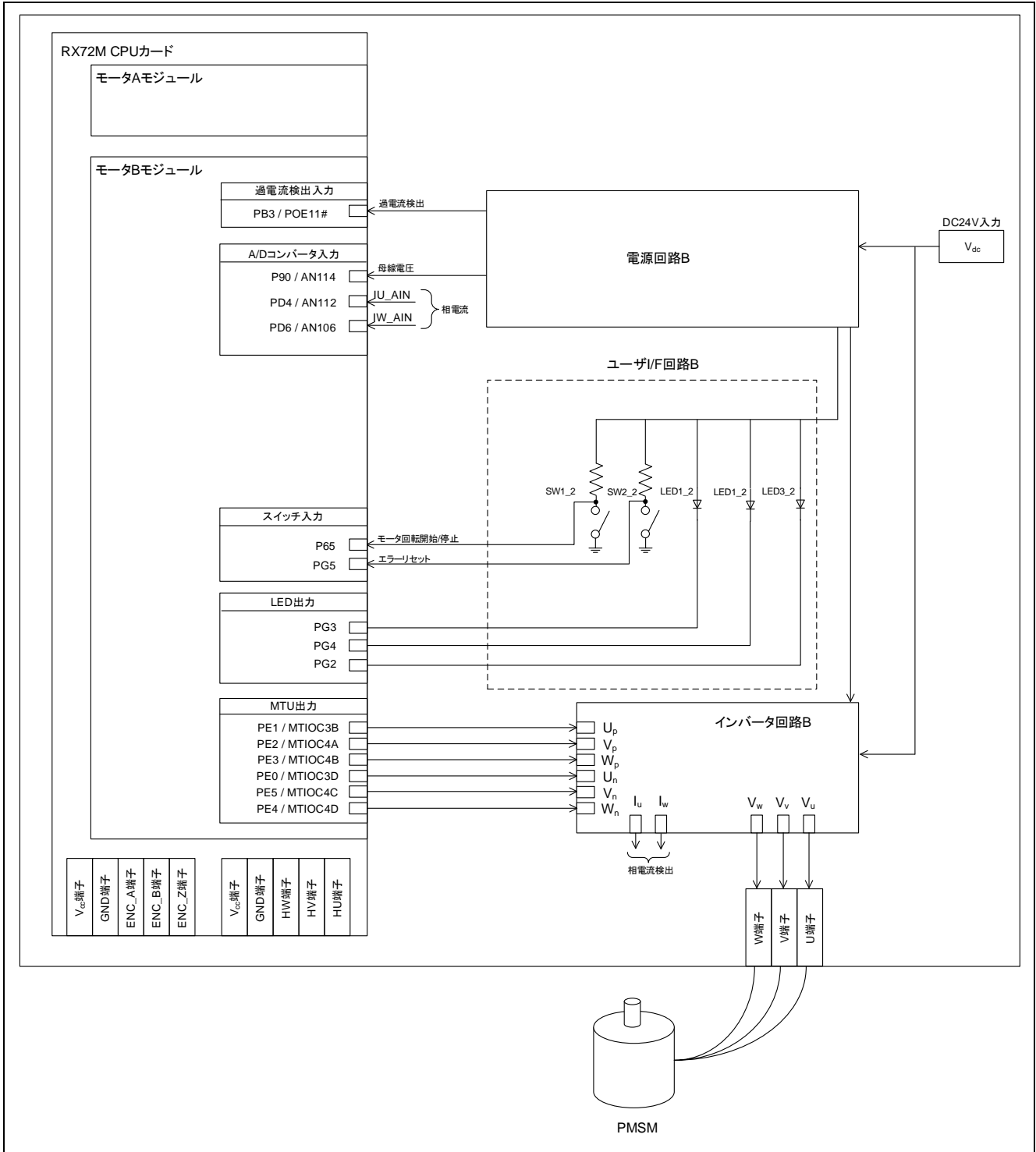


図 2-4 ハードウェア構成図 (モータ B モジュール)

## 2.2 ハードウェア改造内容

本システムを使用するためには、ハードウェアの改造が必要になります。ここでは、先述の（①2モータ用拡張ボードを使用しない場合、②2モータ用拡張ボードを使用する場合）それぞれの改造方法を紹介いたします。なお、本章で紹介している部品はあくまで一例です。使用する部品については、必ずご自身でご確認ください。

### 2.2.1 2モータ用拡張ボードを使用しない場合

- ① インバータボード B の"CNE"にピンヘッダを実装します。

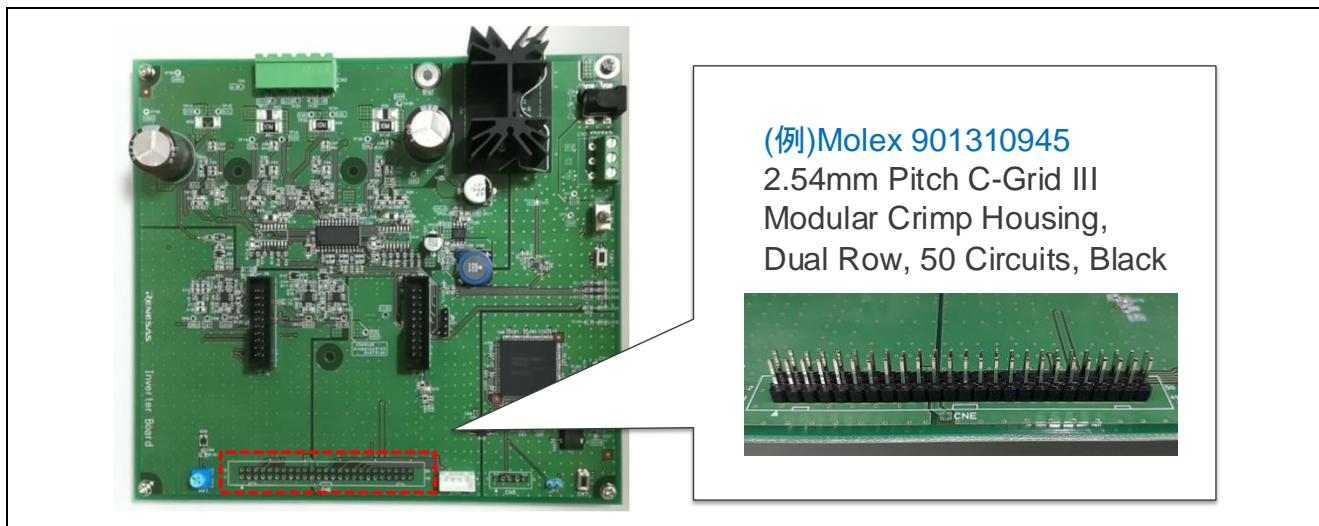


図 2-5 インバータボード B へのピンヘッダ実装

- ② インバータボード B の、R140, R142, R144, R145, R146, R147, R148, R149, R150, R152, R153, R154, R155, R156 に 0Ω 抵抗(サイズ : 0603(mm))を実装します。

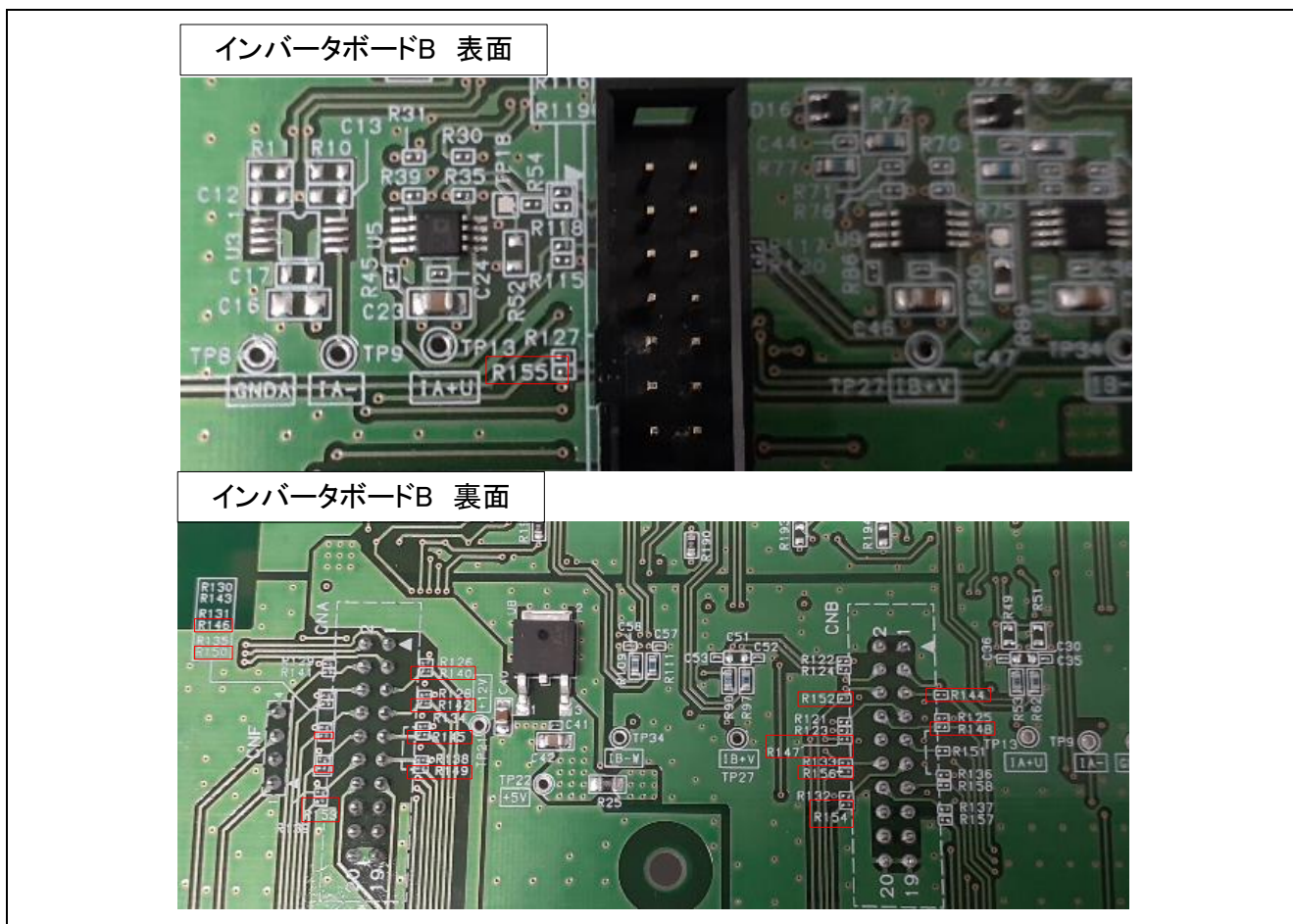


図 2-6 インバータボード B 抵抗実装

- ③ CPU カードの”CNC”にピンヘッダを実装します。

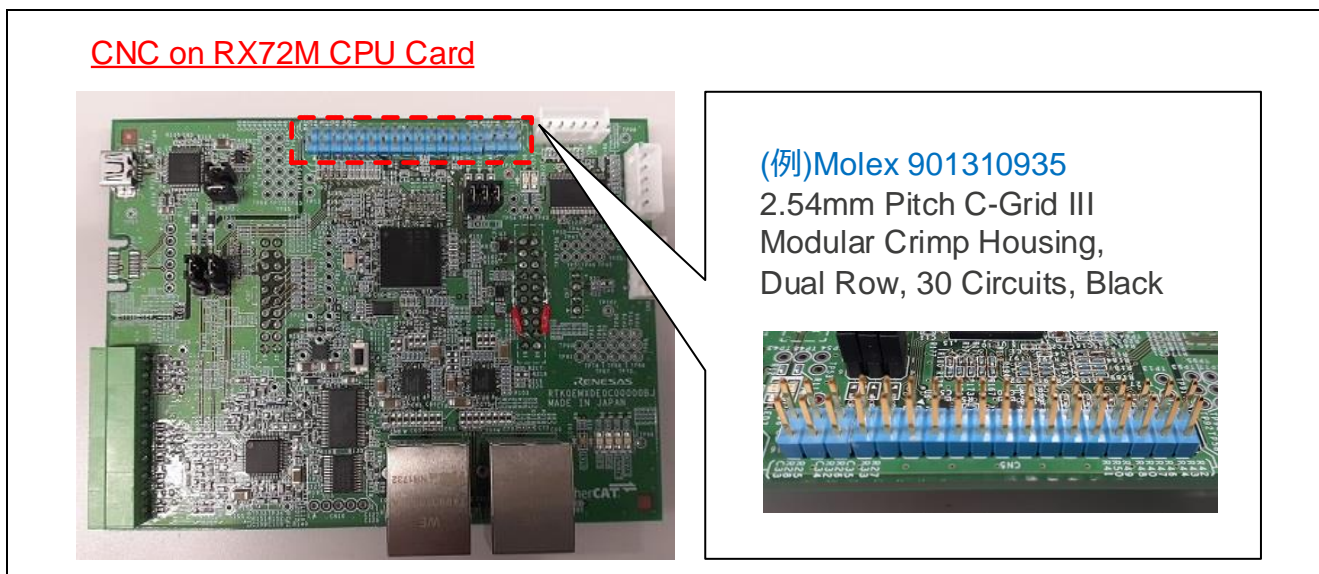


図 2-7 CPU カードピンヘッダ実装

④ インバータボードと CPU カード間の信号を接続します。

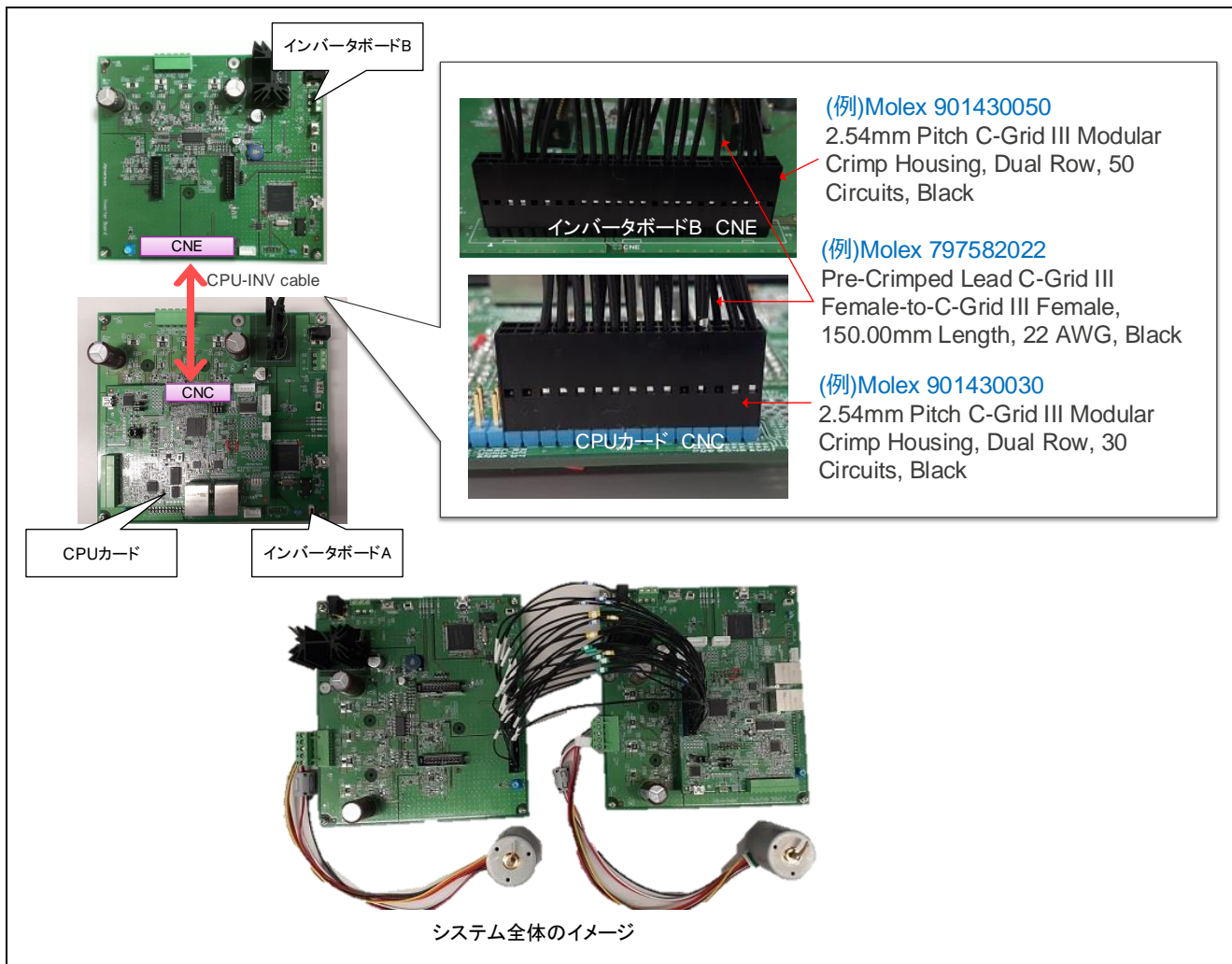


図 2-8 インバータボードと CPU カード間の接続

表 2-1 ピンアサイン表

INV (CNE)		RX72M(CNC)	
Pin#	Pin name	Pin#	Pin name
3	GND_A	1	PGAVSS
12	VDC_EX	2	VPN
16	I_U/A+_EX	3	IU
18	I_V/B+_EX	4	IV
20	I_W/B-_EX	5	IW
4	V_U/A+_EX	7	VU
6	V_V/B+_EX	8	VV
8	V_W/B-_EX	9	VW
23	GND_D	11	VSS
19	GND_A	12	VSS
41	LED1	13	LED1
44	LED2	14	LED2
43	LED3	15	LED3
40	FO#_EX	16	OC#
24	PWM_WL/B-L_EX	17	WN
26	PWM_VL/B+L_EX	18	VN
28	PWM_UL/A+L_EX	19	UN
30	PWM_WH/B-_EX	20	WP
32	PWM_VH/B+H_EX	21	VP
34	PWM_UH/A+H_EX	22	UP
46	SW1	23	SW1
45	SW2	24	SW2
25	GND_D	25	VSS
27	GND_D	26	VSS

2.2.2 2 モータ用拡張ボードを使用する場合

2 モータ用拡張ボードを使用するとボード改造は少なく、市販のケーブルを使用し、1 対 1 接続が実現できます。2 モータ用拡張ボードについては、APN に同梱している情報（CAD データ、回路図、BOMList）を参照ください。

- ① CPU カードの“CNC”にピンヘッダを実装します。

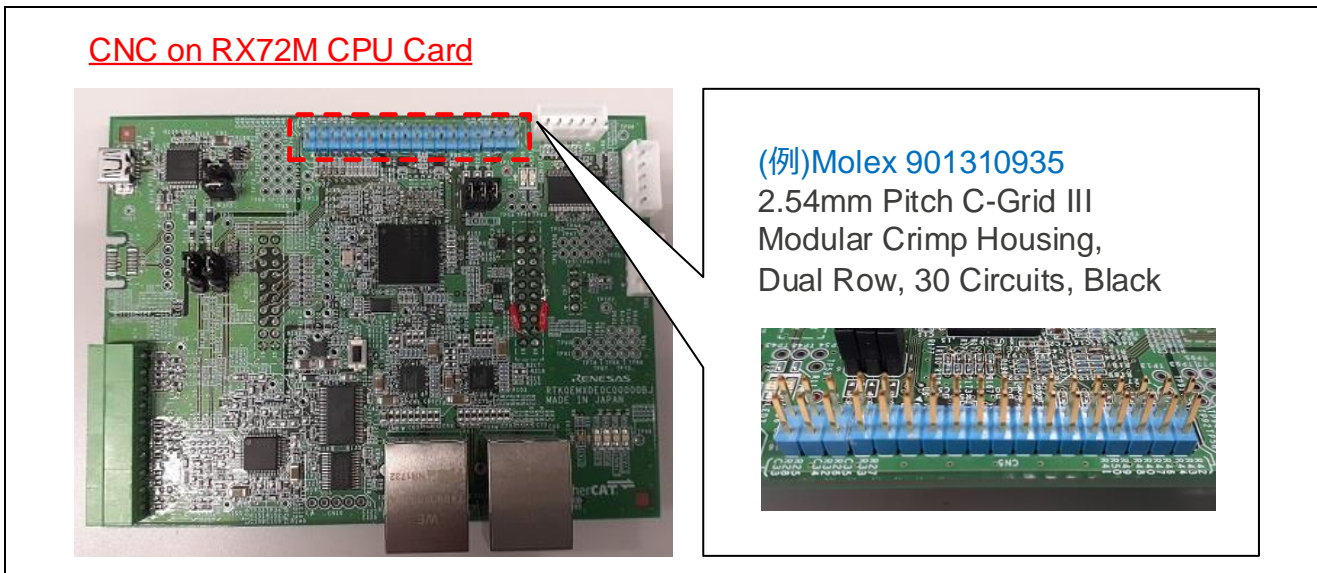


図 2-9 CPU カードピンヘッダ実装

- ② 2 モータ用拡張ボードと CPU カード間の信号を接続します。

2 モータ用拡張ボードの CNC が 34pin に対して、RX72M の CNC は 36pin であるため、エンベロープ無しのコネクタを実装しています。ケーブルで接続する際は、お互いのボードの 1PIN 側を合わせて接続するようにしてください。

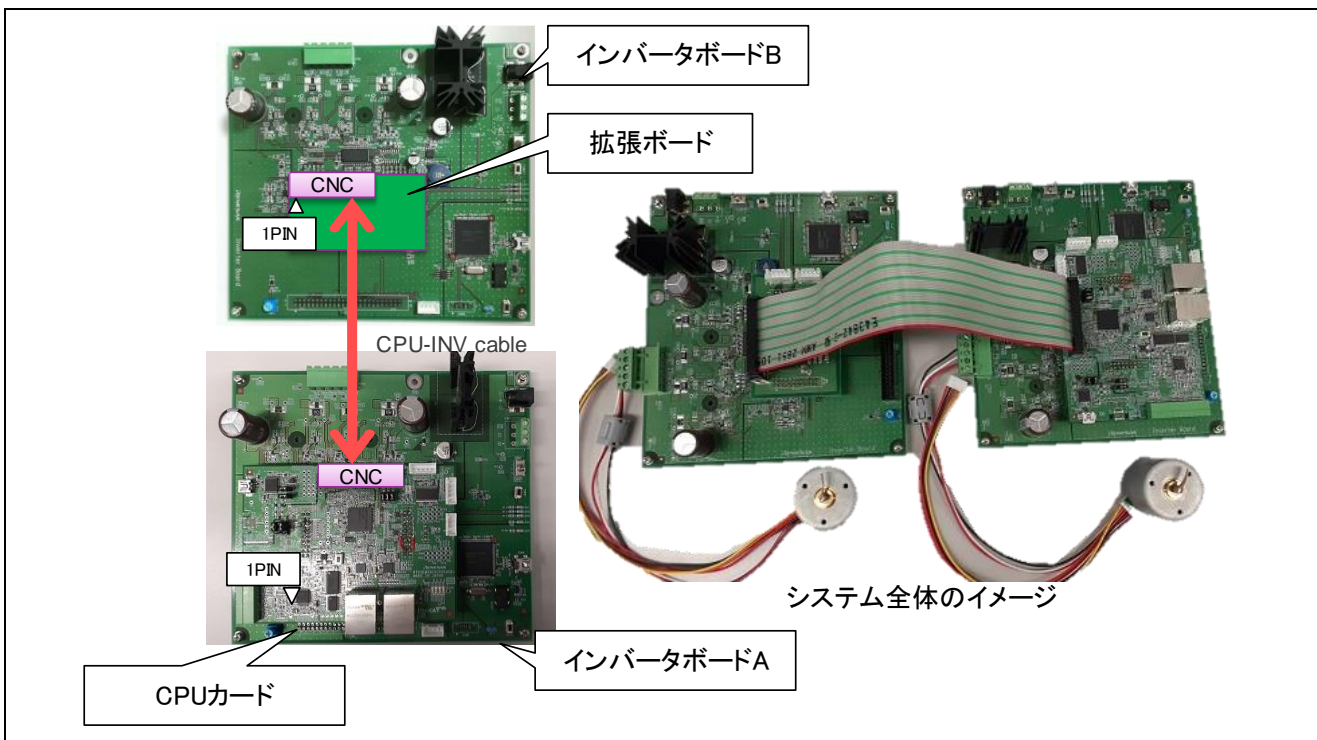


図 2-10 2 モータ用拡張ボードと CPU カード間の接続

表 2-2 ピンアサイン表

2 モータ用拡張ボード (CNC)		RX72M(CNC)	
Pin#	Pin name	Pin#	Pin name
1	PGAVSS_2	1	PGAVSS
2	VPN_2	2	VPN
3	IU_2	3	IU
4	IV_2	4	IV
5	IW_2	5	IW
6	TEMP_2	6	NC
7	VU_2	7	VU
8	VV_2	8	VV
9	VW_2	9	VW
10	VR_2	10	NC
11	GND	11	VSS
12	GND	12	VSS
13	LED1#_2	13	LED1
14	LED2#_2	14	LED2
15	LED3#_2	15	LED3
16	FO#_2	16	OC#
17	WN_2	17	WN
18	VN_2	18	VN
19	UN_2	19	UN
20	WP_2	20	WP
21	VP_2	21	VP
22	UP_2	22	UP
23	SW1#_2	23	SW1
24	SW2#_2	24	SW2
25	GND	25	VSS
26	GND	26	VSS
27	ENC_A_2	27	ENC_A
28	ENC_B_2	28	ENC_B
29	ENC_Z_2	29	ENC_Z
30	GND	30	VSS
31	GND	31	VSS
32	HALL_U_2	32	HALL_U
33	HALL_V_2	33	HALL_V
34	HALL_W_2	34	HALL_W
-	-	35	VRL2
-	-	36	NC

## 2.3 ハードウェア仕様

### 2.3.1 ユーザインタフェース

本システムのユーザインタフェース一覧を表 2-3 に示します。

表 2-3 ユーザインタフェース

項目	インタフェース部品	機能
回転速度	モータ A 側可変抵抗器 (VR1)	回転速度指令値入力 (アナログ値)
START/STOP 1	モータ A 側トグルスイッチ (SW1_1)	モータ A 回転開始/停止指令
ERROR RESET 1	モータ A 側プッシュスイッチ (SW2_1)	エラー状態からの復帰指令
LED1_1	モータ A 側オレンジ色 LED	・モータ A 駆動時 : 点灯 ・モータ A 停止時 : 消灯
LED2_1	モータ A 側オレンジ色 LED	・エラー検出時 : 点灯 ・通常動作時 : 消灯
START / STOP 2	モータ B 側トグルスイッチ (SW1_2)	モータ B 回転開始/停止指令
ERROR RESET 2	モータ B 側プッシュスイッチ (SW2_2)	エラー状態からの復帰指令
LED1_2	モータ B 側オレンジ色 LED	・モータ B 駆動時 : 点灯 ・モータ B 停止時 : 消灯
LED2_2	モータ B 側オレンジ色 LED	・エラー検出時 : 点灯 ・通常動作時 : 消灯
RESET	プッシュスイッチ (RESET1)	システムリセット

本システムの端子インタフェースを表 2-4、表 2-5 に示します。

表 2-4 端子インタフェース（モータ A 側 GPT 制御）

R5F572MNDDBD 端子機能	機能
P00 / AN118	インバータ母線電圧測定
P01 / AN119	回転速度指令値入力用（アナログ値）
PC5	START/STOP トグルスイッチ（SW1_1）
PC3	ERROR RESET プッシュスイッチ（SW2_1）
P80	LED1_1 点灯/消灯制御
PK2	LED2_1 点灯/消灯制御
P40 / AN000	U1 相電流測定
P42 / AN002	W1 相電流測定
P23 / GTIOC0A	PWM 出力（U <sub>p1</sub> ） / “Low” アクティブ
P22 / GTIOC1A	PWM 出力（V <sub>p1</sub> ） / “Low” アクティブ
P21 / GTIOC2A	PWM 出力（W <sub>p1</sub> ） / “Low” アクティブ
P17 / GTIOC0B	PWM 出力（U <sub>n1</sub> ） / “High” アクティブ
P87 / GTIOC1B	PWM 出力（V <sub>n1</sub> ） / “High” アクティブ
P86 / GTIOC2B	PWM 出力（W <sub>n1</sub> ） / “High” アクティブ
PC4 / GTETRGC	過電流検出時の PWM 緊急停止入力

表 2-5 端子インタフェース（モータ B 側 MTU 制御）

R5F572MNDDBD 端子機能	機能
P90 / AN114	インバータ母線電圧測定
P65	START / STOP トグルスイッチ（SW1_2）
PG5	ERROR RESET プッシュスイッチ（SW2_2）
PG3	LED1_2 点灯/消灯制御
PG4	LED2_2 点灯/消灯制御
PD4 / AN112	U2 相電流測定
PD6 / AN106	W2 相電流測定
PE1 / MTIOC3B	PWM 出力（U <sub>p2</sub> ） / “Low” アクティブ
PE2 / MTIOC4A	PWM 出力（V <sub>p2</sub> ） / “Low” アクティブ
PE3 / MTIOC4B	PWM 出力（W <sub>p2</sub> ） / “Low” アクティブ
PE0 / MTIOC3D	PWM 出力（U <sub>n2</sub> ） / “High” アクティブ
PE5 / MTIOC4C	PWM 出力（V <sub>n2</sub> ） / “High” アクティブ
PE4 / MTIOC4D	PWM 出力（W <sub>n2</sub> ） / “High” アクティブ
PB3 / POE11#	過電流検出時の PWM 緊急停止入力

## 2.3.2 周辺機能

本システムで使用する周辺機能対応表を表 2-6 エラー! 参照元が見つかりません。に示します。

表 2-6 周辺機能対応表

周辺機能	リソース	用途
GPTW	モータ A : CH0, CH1, CH2	相補 PWM 出力
MTU3a	モータ B : CH3, CH4	相補 PWM 出力
12 ビット A/D コンバータ	モータ A : AN000, AN002, AN118, AN119 モータ B : AN112, AN106, AN114	<ul style="list-style-type: none"> <li>回転速度指令値入力</li> <li>各 U/W 相電流測定</li> <li>インバータ母線電圧測定</li> </ul>
CMT	CH0	1 [ms]インターバルタイマ
POEG	モータ A : GTETRGC	PWM 出力端子をハイインピーダンス状態にし、PWM 出力を停止
POE3a	モータ B : POE11#	PWM 出力端子をハイインピーダンス状態にし、PWM 出力を停止

## (1) 汎用 PWM タイマ (GPTW)

チャンネル 0、1、2 (モータ A 側) の PWM 出力動作モードを使用して、デッドタイム付きの出力 (p 側は"Low"アクティブ、n 側は"High"アクティブ) を行います。

## (2) マルチファンクションタイマパルスユニット 3 (MTU3a)

チャンネル 3、4 (モータ B 側) の相補 PWM モードを使用して、デッドタイム付きの出力 (p 側は"Low"アクティブ、n 側は"High"アクティブ) を行います。

## (3) 12 ビット A/D コンバータ (S12ADFa)

U 相電流 1 ( $I_{u1}$ ) と W 相電流 1 ( $I_{w1}$ )、U 相電流 2 ( $I_{u2}$ ) と W 相電流 2 ( $I_{w2}$ )、および、インバータ母線電圧 1 ( $V_{dc1}$ ) と回転速度指令値 (VR1)、インバータ母線電圧 2 ( $V_{dc2}$ ) を、「シングルスキャンモード」で測定します (ハードウェアトリガを使用)。U 相電流 1 ( $I_{u1}$ )、W 相電流 1 ( $I_{w1}$ ) の検出には、サンプル&ホールド機能を使用しています。

モータ A 側 (GPT) の A/D 変換は、イベントリンク機能を使用してキャリア同期割込み (3.1.7 キャリア同期割込みを参照) と連動して動作させています。

モータ B 側 (MTU) の A/D 変換は、A/D 変換開始要求ディレイド機能を使用してキャリア同期割込みと連動して動作させています。

## (4) コンペアマッチタイマ (CMT)

コンペアマッチタイマのチャンネル 0 を、1 [ms]インターバルタイマとして使用します。

## (5) GPTW 用ポートアウトプットイネーブル (POEG)

過電流検出時 (GTETRGC 端子の立ち下がりがエッジ検出時) は PWM 出力端子をハイインピーダンス状態にします。

## (6) ポートアウトプットイネーブル3 (POE3a)

過電流検出時 (POE11#端子の立ち下がリエッジ検出時) は PWM 出力端子をハイインピーダンス状態にします。

2.4 ソフトウェア構成

2.4.1 ソフトウェア・ファイル構成

ソフトウェアのフォルダとファイル構成を下記に示します。

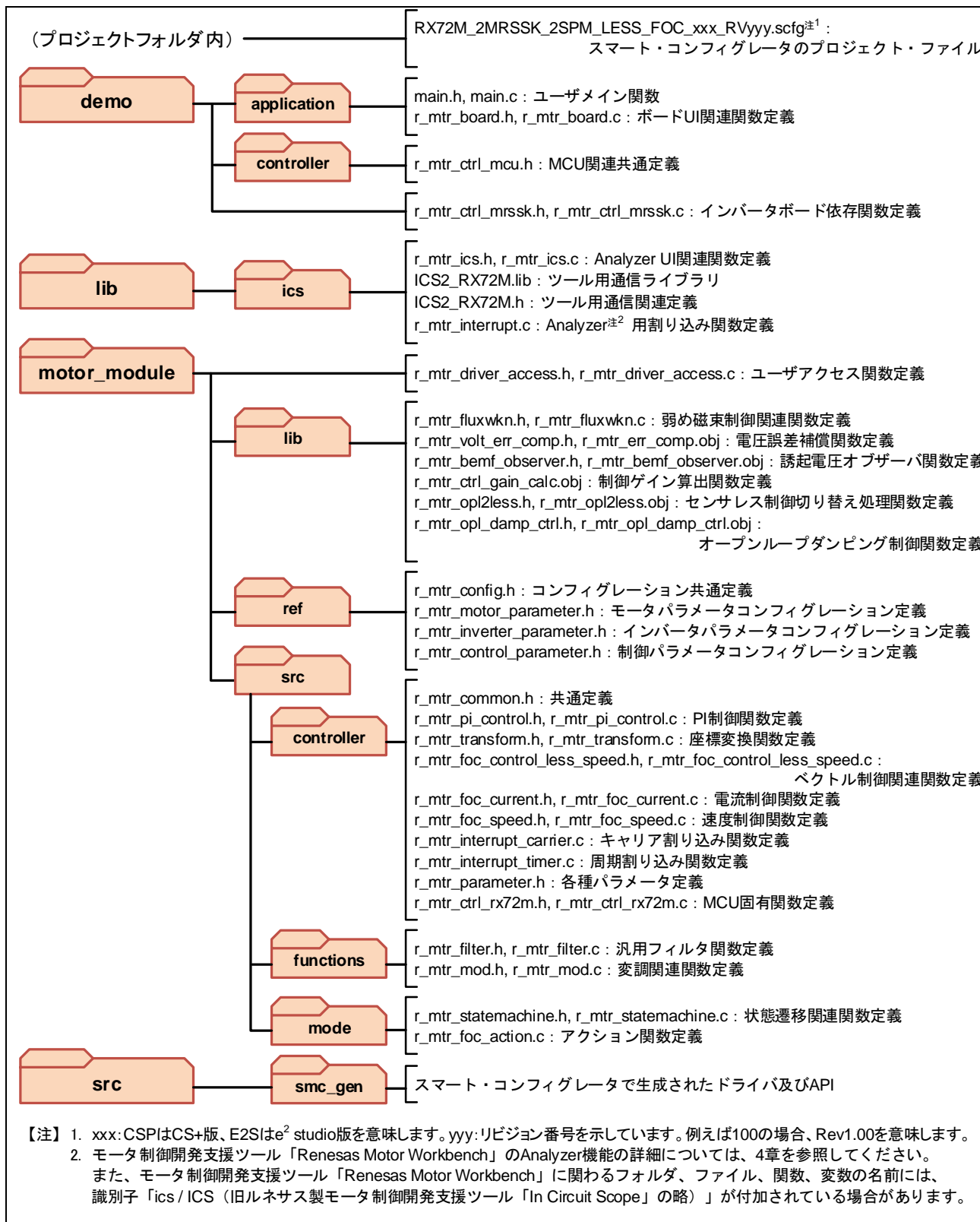


図 2-11 フォルダ・ファイル構成

### 2.4.2 スマート・コンフィグレータのファイル構成

スマート・コンフィグレータ（以下 SC とする）を使用することで、周辺機能ドライバを簡単に生成することができます。また、モータ専用のコンポーネントを使用することで、マルチファンクションタイマパルスユニット、汎用 PWM タイマと 12 ビット A/D コンバータに関するドライバを生成することができます。

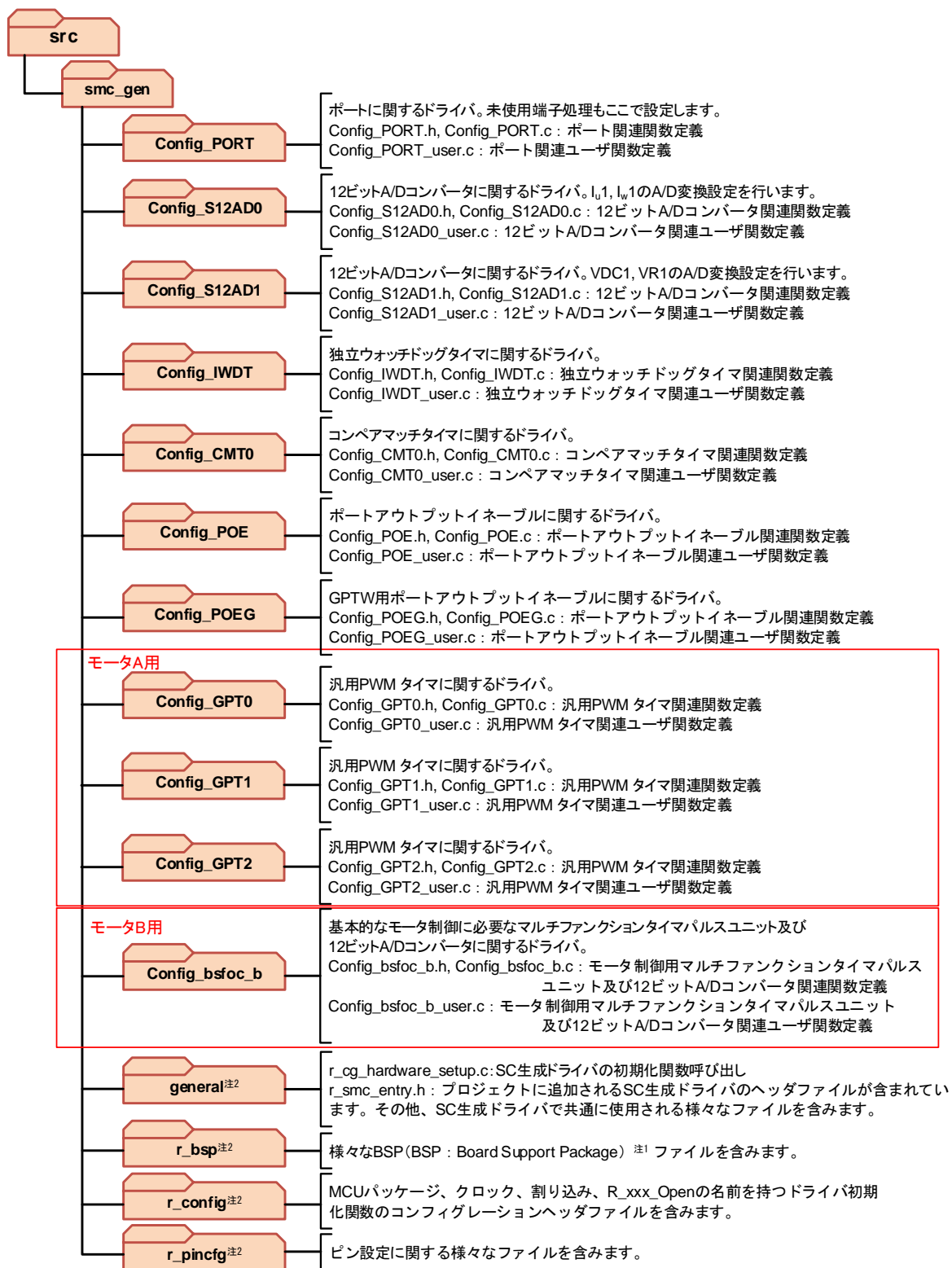
SC は、プロジェクトで使用するマイクロコントローラ、周辺機能、端子機能などの設定情報をプロジェクト・ファイル (\*.scfg) に保存し、参照します。本ソフトウェアの周辺機能設定を確認する場合、以下のファイルを参照してください。

“RX72M\_2MRSSK\_2SPM\_LESS\_FOC\_xxx\_RV yyy.scfg”

(xxx : CSP は CS+版、E2S は e2 studio 版を意味します。yyy : リビジョン番号)

SC で生成したフォルダとファイル構成を図 2-12 に示します。

(スマート・コンフィグレータ出力フォルダ内)



【注】 1. BSPファイルに関しては、“r\_bsp”フォルダ内の“readme.txt”ファイルを参照してください。  
 2. これらのフォルダはSCを使用時、自動的に生成されます。これらのフォルダ及びそれぞれに含まれるファイルに関しては、“RX スマート・コンフィグレータ ユーザーガイド: e<sup>2</sup> studio 編 (R20AN0451)”または“RX スマート・コンフィグレータ ユーザーガイド: CS+ 編 (R20AN0470)”の6.2項を参照してください。

図 2-12 スマート・コンフィグレータのフォルダ・ファイル構成

本ソフトウェア内における SC のモータ・コンポーネントのコンフィグレーション名に関しては、以下の規則に従って命名されています。

Config\_<モータの種類><センサの種類><制御方式>\_<モータ>

また、上記の規則を構成するための定義を以下の表に示します。

表 2-7 モータ・コンポーネントのコンフィグレーション名規則

モータの種類	センサの種類	制御方式	モータ
s : ステッピングモータ b : ブラシレス DC モータ (BLDC) i : 誘導モータ	r : レゾルバ e : エンコーダ m : 磁気エンコーダ s : センサレス h : ホールセンサ	foc : ベクトル制御 120 : 120 度通電制御	a : モータ A b : モータ B

本ソフトウェアでは、BLDC モータをセンサレスかつベクトル制御で駆動させるため、コンフィグレーション名は"Config\_bsloc"となります。

#### SC 生成コードに関する注意点

SC のモータ・コンポーネントは、モータ駆動に必要なマルチファンクションタイマパルスユニットまたは汎用 PWM タイマ、及び 12 ビット A/D コンバータという複数の周辺機能を 1 つのインタフェースで構成することができ、シンプルで理解しやすい GUI として提供しています。

ただし、12 ビット A/D コンバータ専用コンポーネントなど、同じ周辺機能に関するコードを生成する他のコンポーネントも同時に使用する場合、レジスタ設定が上書きされてしまう可能性があります。この場合、影響を受けるコンポーネントによって生成された"<コンフィグレーション名>\_user.c"ファイルを利用して、対策を施すことができます。

2.4.3 モジュール構成

ソフトウェアのモジュール構成を図 2-13 に示します。

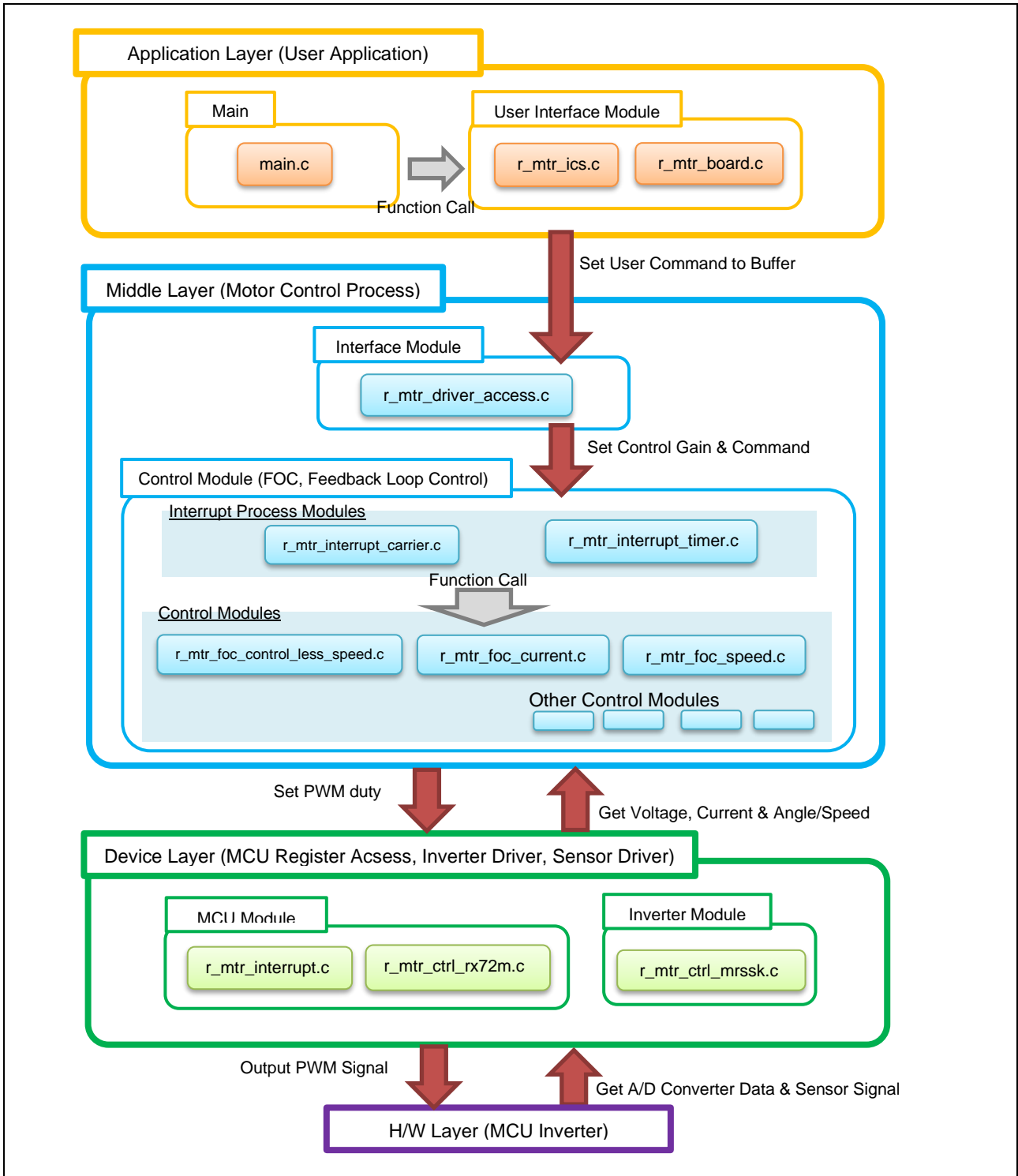


図 2-13 モジュール構成

## 2.5 ソフトウェア仕様

本システムのソフトウェアの基本仕様を下記に示します。センサレスベクトル制御の詳細に関しては「永久磁石同期モータのセンサレスベクトル制御（アルゴリズム編）」（R01AN3786）を参照してください。

ハードウェアインタフェースを除き、モータ A/B は同じ仕様となります。

表 2-8 センサレスベクトル制御ソフトウェア基本仕様（MTU/GPT 共通）

項目	内容	
制御方式	ベクトル制御	
回転子磁極位置検出	センサレス	
モータ回転開始/停止	SW1_1(モータ A 側)、SW1_2(モータ B 側)のレベルにより判定("Low": 回転開始 "High": 停止) または Renesas Motor Workbench から入力	
入力電圧	DC 24V	
キャリア (PWM) 周波数	20 [kHz](キャリア周期: 50 [μs])	
デッドタイム	2 [μs]	
制御周期	電流制御/位置・速度推定: 100 [μs] 速度制御: 1 [ms]	
回転速度範囲	CW: 0 [rpm]~2650 [rpm] CCW: 0 [rpm]~2650 [rpm] ただし、600 [rpm]以下は速度オープンループで駆動*	
各制御系固有周波数	電流制御系: 300 [Hz] 速度制御系: 1.5 [Hz] 誘起電圧推定系: 1000 [Hz] 位置推定系: 20 [Hz]	
コンパイラ最適化設定	最適化レベル	2 (-optimize = 2) (デフォルト設定)
	最適化方法	コード・サイズ重視の最適化 (-size) (デフォルト設定)
ROM/RAM サイズ	ROM: 28.3 KB RAM: 11.0 KB	
保護停止処理	<p>【モータ A】</p> <p>以下のいずれかの条件の時、モータ A 制御信号出力 (6 本) を非アクティブにする</p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1. 各相の電流が 0.89 [A]を超過 (100 [μs]毎に監視)</li> <li>2. インバータ母線電圧が 28 [V]を超過 (100 [μs]毎に監視)</li> <li>3. インバータ母線電圧が 14[V]未満 (100 [μs]毎に監視)</li> <li>4. 回転速度が 3000 [rpm]を超過 (100 [μs]毎に監視)</li> </ol> <p>外部からの過電流検出信号 (GTETRGC 端子に立ち下りエッジを検出) 及び出力短絡を検出した場合、PWM 出力端子をハイインピーダンスにする</p>	<p>【モータ B】</p> <p>以下のいずれかの条件の時、モータ B 制御信号出力 (6 本) を非アクティブにする</p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1. 各相の電流が 0.89 [A]を超過 (100 [μs]毎に監視)</li> <li>2. インバータ母線電圧が 28 [V]を超過 (100 [μs]毎に監視)</li> <li>3. インバータ母線電圧が 14[V]未満 (100 [μs]毎に監視)</li> <li>4. 回転速度が 3000 [rpm]を超過 (100 [μs]毎に監視)</li> </ol> <p>外部からの過電流検出信号 (POE11#端子に立ち下りエッジを検出) 及び出力短絡を検出した場合、PWM 出力端子をハイインピーダンスにする</p>

【注】 \* センサレスベクトル制御でモータを回す場合は、600 [rpm]より高い回転速度指令値を設定してください。

## 2.6 割り込み優先順位

本システムで使用している割り込みと優先順位を下記に示します。

表 2-9 割り込み優先順位

割り込み レベル	優先度	処理
0	(割り込み禁止)	
1	Min	
2		
3		
4		
5		
6		RMW 通信割り込み
7		
8		
9		
10		
11		1[ms]割り込み処理
12		キャリア同期割り込み (モータ A/B 共に同レベル)
13		
14		
15	Max	過電流異常割り込み (モータ A/B 共に同レベル)

### 3. 制御ソフトウェア説明

本アプリケーションノート対象ソフトウェアについて説明します。

#### 3.1 制御内容

##### 3.1.1 モータ起動/停止

モータの起動と停止は、Renesas Motor Workbench からの入力または SW1\_1, SW1\_2 からの入力によって制御します。

SW1\_1, SW1\_2 には汎用ポートが割り当てられ、“Low”レベルのときスタートスイッチが押されていると判断し、逆に“High”レベルのときはモータを停止すると判断します。

##### 3.1.2 A/D 変換

###### (1) モータ回転速度指令値

モータの回転速度指令値は Renesas Motor Workbench からの入力または VR1 の出力値（アナログ値）を A/D 変換することによって決定します。インバータボード A の VR1 を使用して、モータ A、モータ B 両方の回転速度を決定します。A/D 変換された VR1 の値は、以下の表のように、回転速度指令値として使用します。

表 3-1 回転速度指令値の変換比

項目	変換比（指令値：A/D 変換値）		チャンネル
回転速度指令値	CW	0 [rpm]~2650 [rpm] : 07FFH~0000H	AN119
	CCW	0 [rpm]~2650 [rpm] : 0800H~0FFFH	

###### (2) インバータ母線電圧

以下の表のように、インバータ母線電圧を測定します。変調率の算出と過電圧・低電圧検出(異常時は PWM 停止)に使用します。

表 3-2 インバータ母線電圧の変換比

項目	変換比（インバータ母線電圧：A/D 変換値）	チャンネル
インバータ母線電圧	0 [V]~73.26 [V] : 0000H~0FFFH	[モータ A] AN208 [モータ B] AN209

## (3) U相、W相電流

以下の表のように、U相、W相電流を測定し、ベクトル制御に使用します。

表 3-3 U、W相電流の変換比

項目	変換比 (U相、W相電流 : A/D変換値)	チャンネル
U相、W相電流	-12.5 [A]~12.5 [A] : 0000H~0E8BH * 電流値 = $(5V - 2.5V) / (0.01\Omega * 20) = 12.5A$  このシステムでは電流検出回路を 5V から 3V にレベルシフトしているため、0E8BH が A/D 変換の上限となります。	[モータ A] Iu: AN000 Iw: AN002 [モータ B] Iu: AN100 Iw: AN102

【注】 \* A/D 変換特性の詳細に関しては「RX72M グループ ユーザーズマニュアル ハードウェア編」を参照してください。

## 3.1.3 変調

本アプリケーションノート対象ソフトウェアでは、モータへの入力電圧はパルス幅変調（以降、PWM）によって生成し、PWM 波形は三角波比較法によって生成します。

## (1) 三角波比較法

指令値電圧を実際に出力する方法の一つとして、キャリア波形（三角波）と指令値電圧波形を比較することで出力電圧のパルス幅を決める三角波比較法があります。指令値電圧がキャリア波電圧より大きければスイッチをオン、小さければオフにすることで、正弦波状の指令値電圧を擬似的に出力することができます。

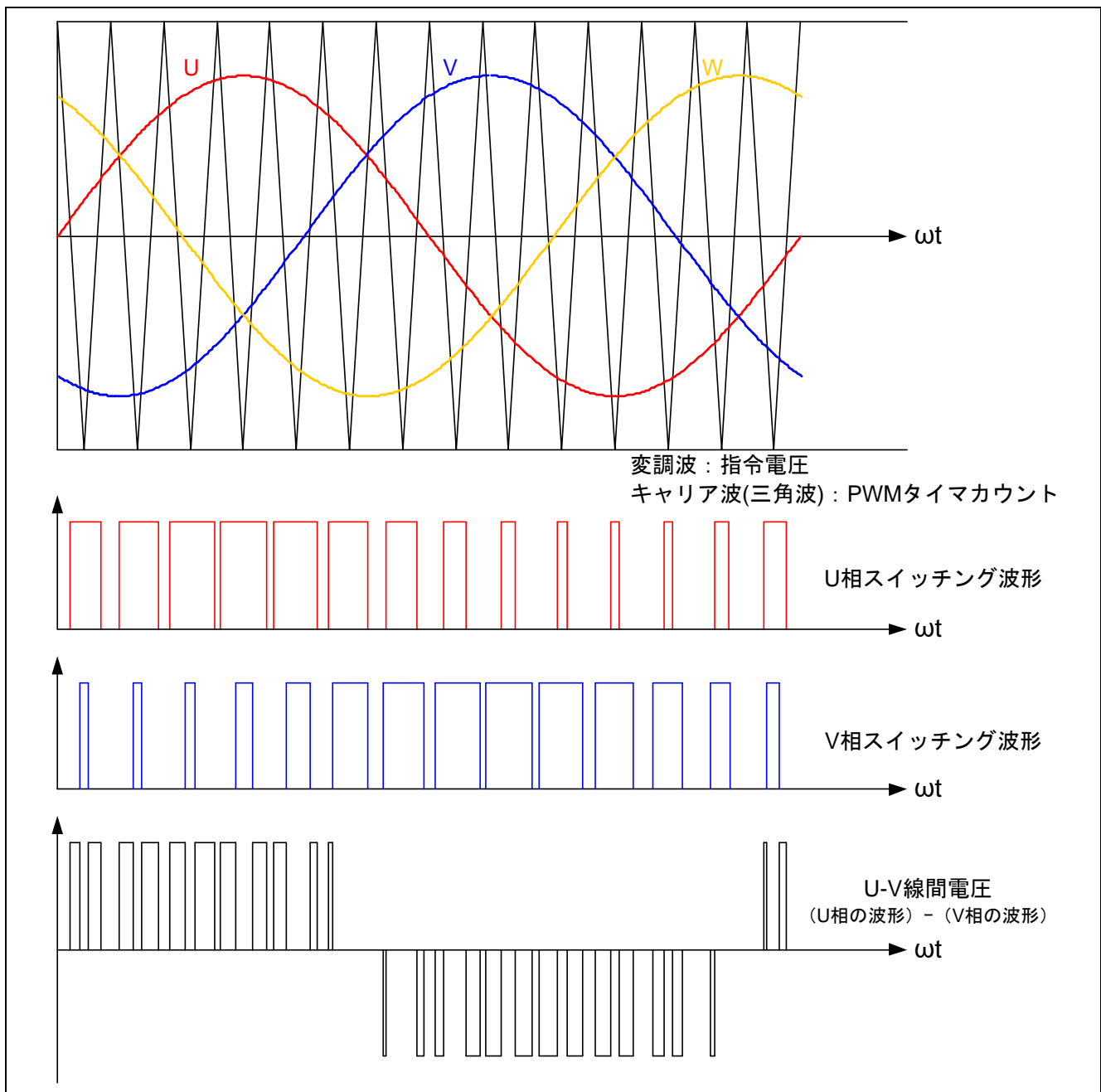


図 3-1 三角波比較法の概念図

図 3-2 のように、出力電圧パルスのキャリア波に対する割合をデューティと呼びます。

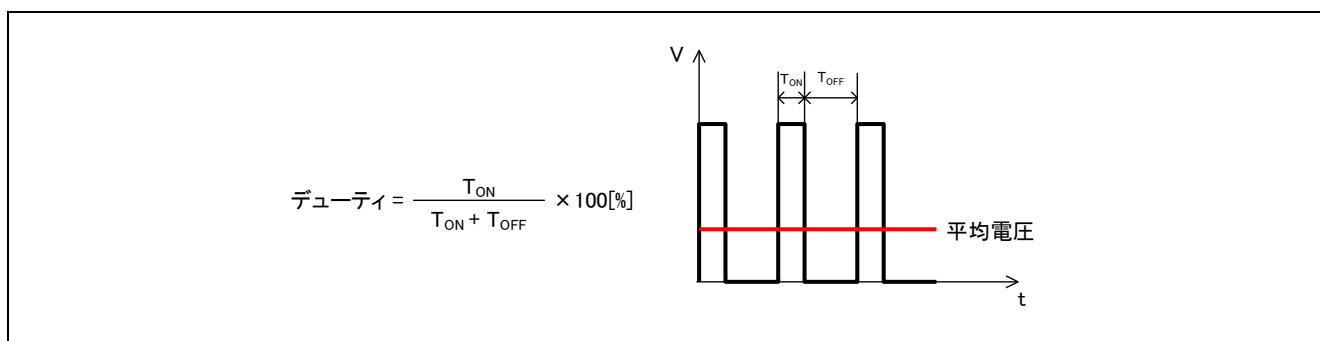


図 3-2 デューティの定義

また、変調率  $m$  を以下のように定義します。

$$m = \frac{V}{E}$$

$m$ : 変調率     $V$ : 指令値電圧     $E$ : インバータ母線電圧

図 3-3 変調率

この変調率を、PWM デューティを決めるレジスタに反映させることで所望の制御を行います。

3.1.4 状態遷移

図 3-4 に本アプリケーションノート対象ソフトウェアにおける状態遷移図を示します。本アプリケーションノート対象ソフトウェアでは、「SYSTEM MODE」と、「RUN MODE」により状態を管理し、「Control Config」は、ソフトウェア内でアクティブになっている制御系を表しています。モータ A、モータ B 共に同じ制御になります。

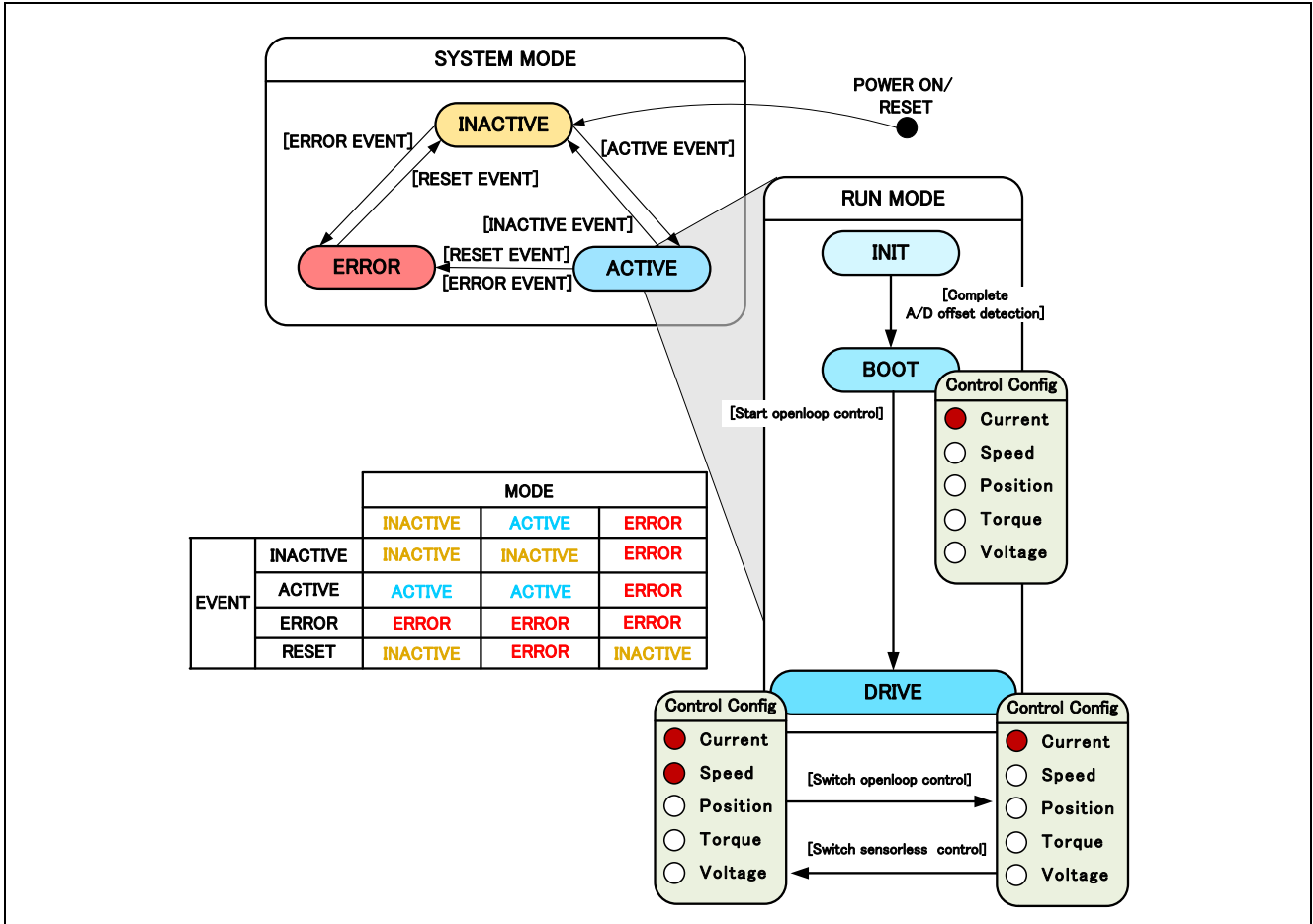


図 3-4 センサレスベクトル制御ソフトウェアの状態遷移図

## (1) SYSTEM MODE

システム動作状態を表します。各イベント (EVENT) の発生により、状態が遷移します。システムの動作状態は、モータ駆動停止 (INACTIVE)、モータ駆動 (ACTIVE)、異常状態 (ERROR) があります。

## (2) RUN MODE

モータの制御状態を表します。システムの状態が ACTIVE になると、モータの駆動状態が図 3-4 の様に遷移します。

## (3) EVENT

各 SYSTEM MODE 中に EVENT が発生すると、その EVENT に従って、システム動作状態が図 3-4 中の表の様に遷移します。各 EVENT の発生要因を下記の表 3-4 に示します。

表 3-4 EVENT 一覧

イベント名	発生要因
INACTIVE	ユーザー操作により発生します
ACTIVE	ユーザー操作により発生します
ERROR	システムが異常を検出したときに発生します
RESET	ユーザー操作により発生します

3.1.5 始動方法

本アプリケーションノート対象ソフトウェアの始動制御内容を図 3-5 に示します。d 軸電流、q 軸電流、速度それぞれの指令値を管理するフラグによってモードをコントロールしています。モータ A、モータ B 共に同じ制御となります。

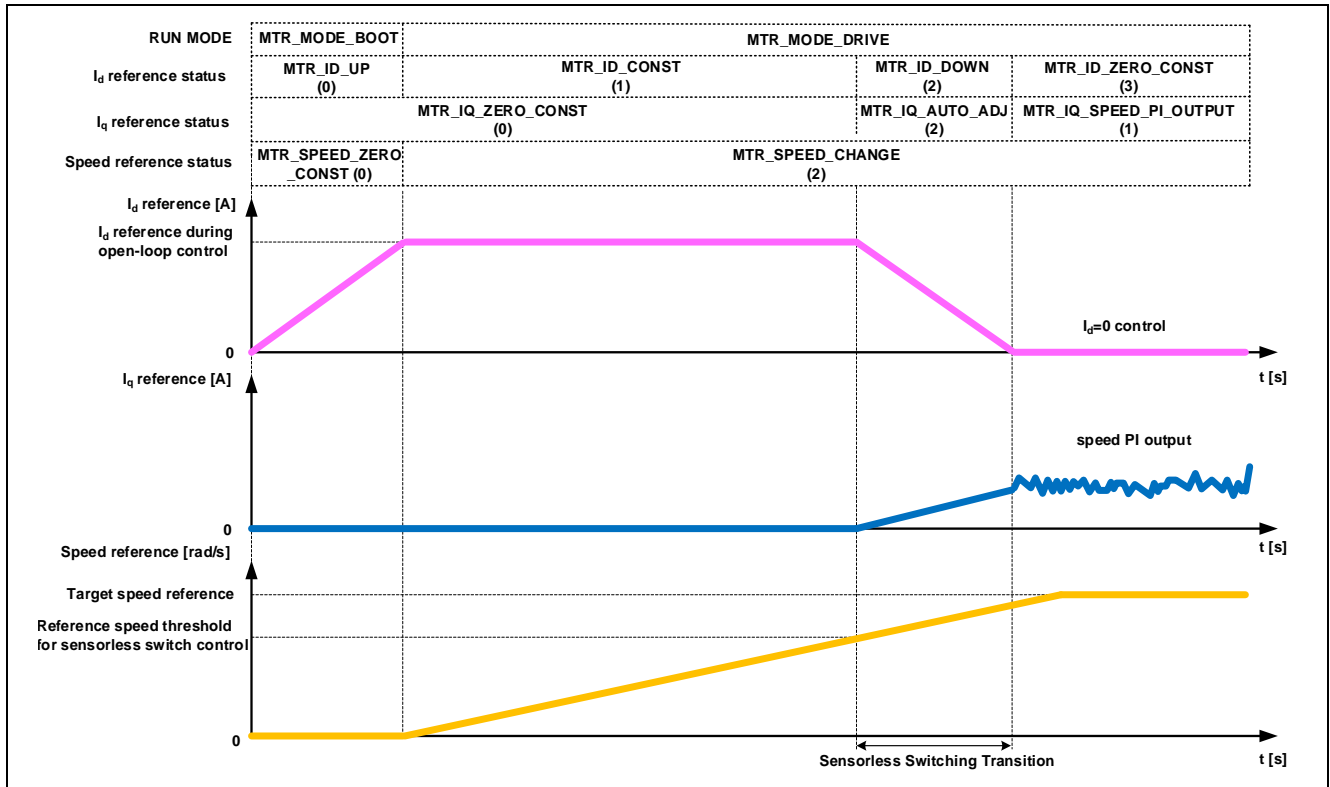


図 3-5 センサレスベクトル制御ソフトウェアの始動制御内容

## 3.1.6 システム保護機能

本アプリケーションノート対象ソフトウェアは、以下のエラー状態を持ち、それぞれの場合に緊急停止する機能を実装しています。システム保護機能に関わる各設定値は表 3-5 を参照してください。

- 過電流エラー

過電流エラーはハードウェア及びソフトウェア両方で検出されます。

ハードウェアからの緊急停止信号（過電流検出）により、PWM 出力端子をハイインピーダンス状態にします。

また、過電流監視周期で U 相、V 相、W 相電流を監視し、過電流（過電流リミット値を超過）を検出した時に、緊急停止します（ソフトウェア検出）。本エラーが発生した場合、エラーが発生した側のモータを停止します。過電流リミット値はモータの定格電流[MP\_NOMINAL\_CURRENT\_RMS]から自動で計算されます。

- 過電圧エラー

過電圧監視周期でインバータ母線電圧を監視し、過電圧（過電圧リミット値を超過）を検出した時に、緊急停止します。過電圧リミット値は検出回路の抵抗値の誤差等を考慮して設定した値です。本エラーが発生した場合、エラーが発生した側のモータを停止します。

- 低電圧エラー

低電圧監視周期でインバータ母線電圧を監視し、低電圧（低電圧リミット値を下回った場合）を検出した時に、緊急停止します。低電圧リミット値は検出回路の抵抗値の誤差等を考慮して設定した値です。本エラーが発生した場合、エラーが発生した側のモータを停止します。

- 回転速度エラー

回転速度監視周期で速度を監視し、速度リミット値を超過した場合、緊急停止します。本エラーが発生した場合、エラーが発生した側のモータを停止します。

表 3-5 各システム保護機能設定値

エラー	閾値	
過電流エラー	過電流リミット値 [A]	0.89
	監視周期 [ $\mu$ s]	100
過電圧エラー	過電圧リミット値 [V]	28
	監視周期 [ $\mu$ s]	100
低電圧エラー	低電圧リミット値 [V]	14
	監視周期 [ $\mu$ s]	100
回転速度エラー	速度リミット値 [rpm]	3000
	監視周期 [ $\mu$ s]	100

3.1.7 キャリア同期割込み

2 モータ制御の場合、1 つの割込み処理内で 2 つのモータを制御すると順次処理となる為、モータ A、モータ B それぞれの制御に差が出ます。その差をなくす為、キャリア同期割込みをモータ A、モータ B 用に異なるタイミングで発生させます。また、割り込み間引き機能を使用し、2 周期(100 $\mu$ s)に 1 回割り込みを発生させることで、モータ A、モータ B が交互に割り込み処理を行うことができます。

本制御プログラムでは、モータ B 側キャリア周期の調整を行うことで実現しています。

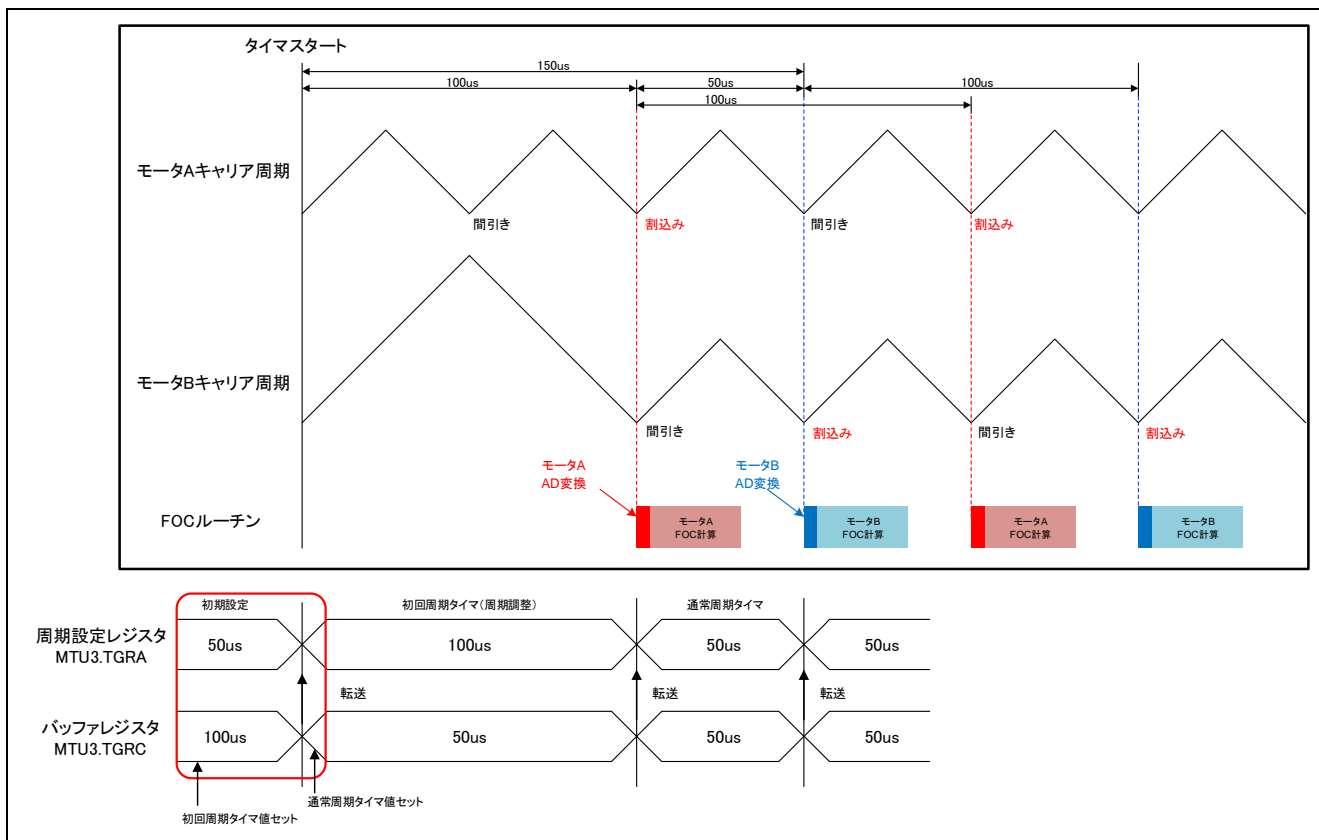


図 3-6 キャリア出力調整

この設定によって、モータ B 側キャリア周期 100 $\mu$ s が終了したのち、以降の周期が 50 $\mu$ s となります。その為、キャリア同期割込みは同時に発生しなくなります。尚、モータ A とモータ B のキャリア同期割込みは、50 $\mu$ s 周期で交互に発生します。その為、割込みの処理時間（エラー発生時の処理時間含めて）を、50 $\mu$ s 内に収める必要があります。

### 3.2 センサレスベクトル制御ソフトウェア関数仕様

本アプリケーションノート対象ソフトウェアにおける制御処理は、主に 100 [μs]周期割り込みと、1 [ms]周期割り込みの2つの割り込みにより構成されています。図 3-7、図 3-8 にあるように、赤破線部が 100 [μs]周期毎に実行される処理で、青破線部が 1 [ms]周期毎に実行される処理になります。

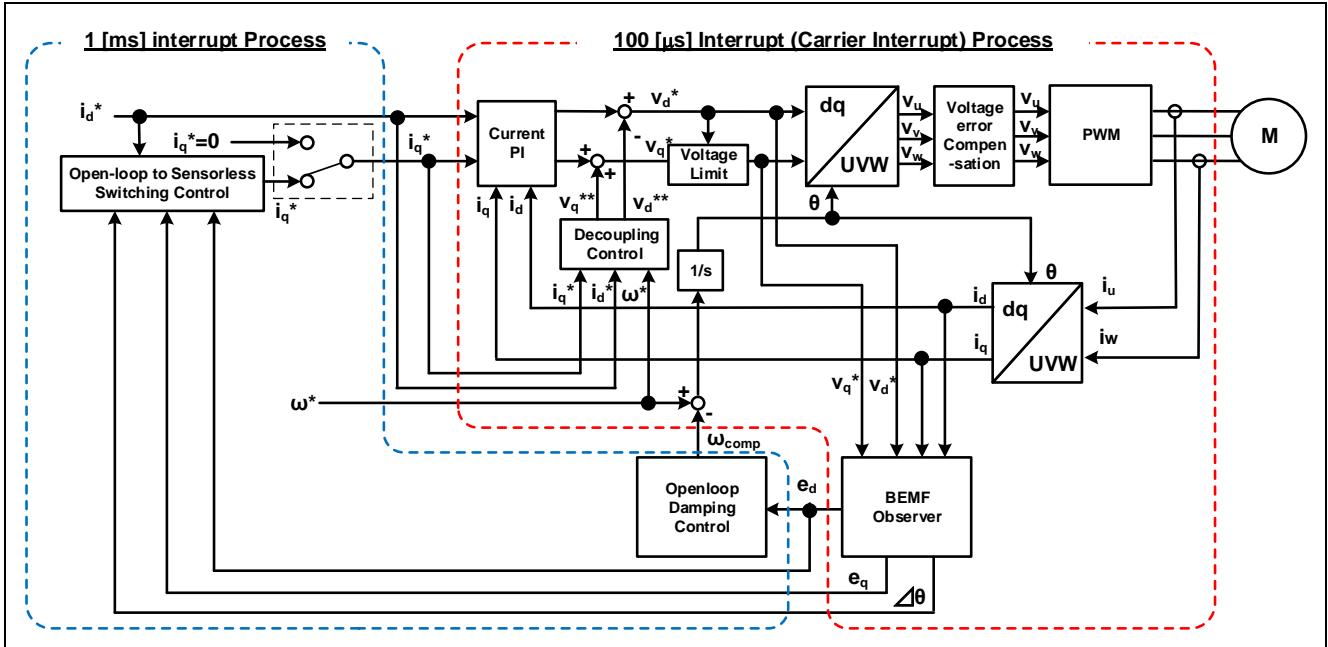


図 3-7 センサレスベクトル制御概略ブロック図（オープンループ制御時）

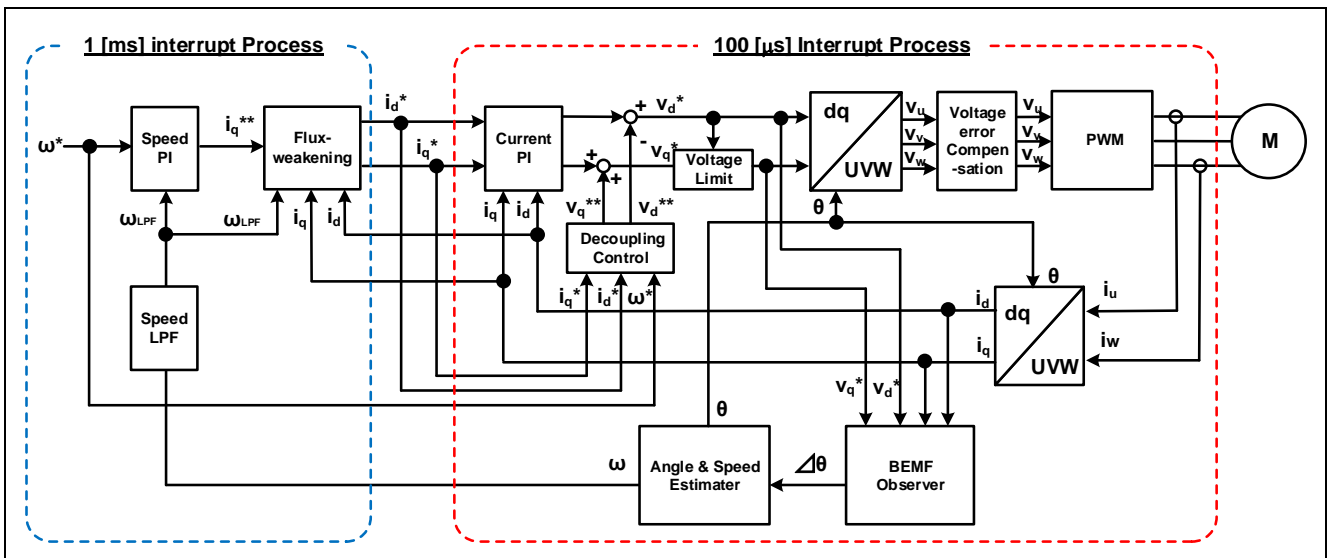


図 3-8 センサレスベクトル制御概略ブロック図（センサレス制御時）

ここでは、2つの割り込み関数と、各割り込み周期毎に実行される関数について仕様を表 3-6～表 3-8 にまとめます。また、各表には、センサレスベクトル制御における主要な関数のみ記載しています。各表に記載のない関数の詳細については、ソースコードを参照してください。

100 [μs]周期割り込みは、モータ A、モータ B それぞれの割り込みトリガで異なる割り込み関数がコールされ、それぞれの割り込み関数内で `mtr_foc_interrupt_carrier` をコールします。呼び出す際の引数としてモータ A 用(`st_foc_a`)、モータ B 用(`st_foc_b`)の構造体のポインタを渡しています。

1 [ms]周期割り込みは、モータ A、モータ B 共通となっており、1度の割り込み関数でモータ A、モータ B 両方の処理を行います。

表 3-6 割り込み関数一覧

ファイル名	関数概要	処理概要
<code>r_mtr_interrupt_carrier.c</code>	<code>mtr_foc_interrupt_carrier</code> 入力 : ( <code>mtr_foc_control_t *</code> ) <code>st_foc</code> / ベクトル制御用構造体ポインタ 出力 : なし	100 [μs]毎に呼び出し <ul style="list-style-type: none"> <li>● 電流、インバータ母線電圧検出</li> <li>● ベクトル制御演算</li> <li>● 電流 PI 制御</li> <li>● 位置・速度推定演算</li> <li>● PWM duty 設定</li> </ul>
<code>r_mtr_interrupt_timer.c</code>	<code>mtr_foc_interrupt_1ms</code> 入力 : ( <code>mtr_foc_control_t *</code> ) <code>st_foc</code> / ベクトル制御用構造体ポインタ 出力 : なし	1 [ms]毎に呼び出し <ul style="list-style-type: none"> <li>● 始動制御</li> <li>● dq 軸電流、速度指令値設定</li> <li>● 速度 PI 制御</li> </ul>

表 3-7 100 [μs]周期割り込み関数内実行関数一覧 (1/2)

ファイル名	関数概要	処理概要
r_mtr_ctrl_mrsk.c	mtr_get_current_iuiw 入力: (float*) f4_iu_ad / U 相電流 AD 変換値ポインタ (float*) f4_iw_ad / W 相電流 AD 変換値ポインタ (uint8_t) u1_id / Motor ID 出力: なし	各相電流の取得
	mtr_get_vdc 入力: (uint8_t) u1_id / Motor ID 出力: (float) f4_temp_vdc / インバータ母線電圧	インバータ母線電圧の取得
r_mtr_foc_control_less_speed.c	mtr_error_check 入力: (mtr_foc_control_t *) st_foc / ベクトル制御構造体ポインタ 出力: なし	エラーの監視
	mtr_current_offset_adjustment 入力: (mtr_foc_control_t *) st_foc / ベクトル制御構造体ポインタ 出力: なし	電流 A/D 変換値からオフセットを除去
	mtr_calib_current_offset 入力: (mtr_foc_control_t *) st_foc / ベクトル制御構造体ポインタ 出力: なし	電流 A/D 変換オフセット算出
	mtr_angle_speed 入力: (mtr_foc_control_t *) st_foc / ベクトル制御構造体ポインタ 出力: なし	磁極位置、速度の推定
	mtr_foc_voltage_limit 入力: (mtr_foc_control_t *) st_foc / ベクトル制御構造体ポインタ 出力: なし	指令電圧制限
r_mtr_foc_current.c	mtr_current_pi_control 入力: (mtr_current_control_t *) st_cc / 電流制御構造体ポインタ 出力: なし	電流 PI 制御
	mtr_foc_current_decoupling 入力: (mtr_current_control_t *) st_cc / 電流制御構造体ポインタ (float) f4_speed_rad / 回転速度 (const mtr_parameter_t *) p_mtr / モータパラメータ構造体ポインタ 出力: なし	非干渉制御
r_mtr_transform.c	mtr_transform_uvw_dq_abs 入力: (const mtr_rotor_angle_t *) p_angle / 位相管理用構造体ポインタ (const float*) f4_uvw / UVW 相ポインタ (float*) f4_dq / dq 軸ポインタ 出力: なし	UVW → dq 座標変換 (絶対変換)
	mtr_transform_dq_uvw_abs 入力: (const mtr_rotor_angle_t *) p_angle / 位相管理用構造体ポインタ (const float*) f4_dq / dq 軸ポインタ (float*) f4_uvw / UVW 相ポインタ 出力: なし	dq → UVW 座標変換 (絶対変換)

表 3-7 100 [μs]周期割り込み関数内実行関数一覧 (2/2)

ファイル名	関数概要	処理概要
r_mtr_volt_err_comp.obj	mtr_volt_err_comp_main 入力: (mtr_volt_comp_t *) st_volt_comp / 電圧誤差補償構造体ポインタ (float*) p_f4_v_array / 3 相電圧補償量配列ポインタ (float*) p_f4_i_array / 3 相電流配列ポインタ (float) f4_vdc / インバータ母線電圧 出力: なし	電圧誤差補償処理
r_mtr_ctrl_rx72m.c	mtr_inv_set_uvw 入力: (float) f4_duty_u / U 相変調率 (float) f4_duty_v / V 相変調率 (float) f4_duty_w / W 相変調率 (uint8_t) u1_id / Motor ID 出力: なし	PWM duty 設定
r_mtr_bemf_observer.obj	mtr_bemf_observer 入力: (mtr_bemf_observer_t *) st_bemf_obs / 誘起電圧オブザーバ構造体ポインタ (float) f4_vd_ref / d 軸電圧指令値 (float) f4_vq_ref / q 軸電圧指令値 (float) f4_id / d 軸電流検出値 (float) f4_iq / q 軸電流検出値 出力: なし	誘起電圧オブザーバ演算
	mtr_bemf_calc_d 入力: (mtr_bemf_observer_t *) st_bemf_obs / 誘起電圧オブザーバ構造体ポインタ (float) f4_speed_rad / 速度推定値 (float) f4_iq / q 軸電流検出値 出力: (float) f4_temp / d 軸誘起電圧推定値	d 軸誘起電圧推定値の算出
	mtr_bemf_calc_q 入力: (mtr_bemf_observer_t *) st_bemf_obs / 誘起電圧オブザーバ構造体ポインタ (float) f4_speed_rad / 速度推定値 (float) f4_id / d 軸電流検出値 出力: (float) f4_temp / q 軸誘起電圧推定値	q 軸誘起電圧推定値の算出
	mtr_angle_speed_pll 入力: (mtr_pll_est_t *) st_pll_est / 位置・速度推定構造体ポインタ (float) f4_phase_err / 位相誤差 (float*) f4_speed / 速度推定値ポインタ 出力: なし	位置・速度推定演算
r_mtr_opl_damp_ctrl.obj	mtr_opl_damp_ctrl 入力: (mtr_opl_damp_t *) st_opl_damp / オープンループダンピング制御構造体ポインタ (float) f4_ed / d 軸誘起電圧推定値 (float) speed_ref / 速度指令値 出力: (float) f4_temp_damp_comp_speed / 速度指令値へのフィードバック値	オープンループダンピング制御処理

表 3-8 1 [ms]周期割り込み関数内実行関数一覧

ファイル名	関数概要	処理概要
r_mtr_foc_control_less_speed.c	mtr_set_speed_ref 入力：(mtr_foc_control_t *) st_foc / ベクトル制御構造体ポインタ 出力：(float)f4_speed_rad_ref_buff / 速度指令値	速度指令値の設定
	mtr_set_iq_ref 入力：(mtr_foc_control_t *) st_foc / ベクトル制御構造体ポインタ 出力：(float) f4_iq_ref_buff / q 軸電流指令値	q 軸電流指令値の設定
	mtr_set_id_ref 入力：(mtr_foc_control_t *) st_foc / ベクトル制御構造体ポインタ 出力：(float) f4_id_ref_buff / d 軸電流指令値	d 軸電流指令値の設定
r_mtr_foc_speed.c	mtr_speed_pi_control 入力：(mtr_speed_control_t *) st_sc / 速度制御構造体ポインタ (float) f4_speed_rad / 回転速度 出力：(float) f4_iq_ref_calc / q 軸電流指令値	速度 PI 制御
r_mtr_opl2less.obj	mtr_opl2less_iq_calc 入力：(float) f4_ed / d 軸誘起電圧推定値 (float) f4_eq / q 軸誘起電圧推定値 (float) f4_id / オープンループ時 d 軸電流指令値 (float) f4_torque_current / オープンループ時トルク電流 (float) f4_phase_err / 位相誤差 出力：(float) f4_temp_iq_ref / q 軸電流指令値	センサレス切り替え処理時の q 軸電流指令値生成
r_mtr_fluxwkn.obj	R_FLUXWKN_Run 入力：(fluxwkn_t *) p_fluxwkn / 弱め磁束構造体ポインタ (float) f4_speed_rad / 回転速度 (const float*) p_f4_idq / dq 軸電流検出値ポインタ (float*) p_f4_idq_ref / dq 軸電流指令値ポインタ 出力：(uint16_t) p_fluxwkn.u2_fw_status / 弱め磁束処理のステータス	弱め磁束制御

### 3.3 センサレスベクトル制御ソフトウェアマクロ定義

本アプリケーションノート対象ソフトウェアで使用するマクロ定義一覧を次に示します。また、下記一覧には、本アプリケーションノート対象ソフトウェアにおけるコンフィグレーションを設定するマクロ定義のみを記載しています。一覧に記載のないマクロ定義の詳細については、ソースコードを参照してください。

マクロ名に"\_A"が付いているマクロはモータ A 制御用です。マクロ名に"\_B"が付いているマクロはモータ B 制御用で、適したマクロを使用してください。

表 3-9 "r\_mtr\_motor\_parameter.h"マクロ定義一覧

ファイル名	マクロ名	定義値	備考
r_mtr_motor_parameter.h	MP_POLE_PAIRS_A	2	極対数
	MP_MAGNETIC_FLUX_A	0.02159f	磁束 [Wb]
	MP_RESISTANCE_A	8.5f	抵抗 [ $\Omega$ ]
	MP_D_INDUCTANCE_A	0.0045f	d 軸インダクタンス [H]
	MP_Q_INDUCTANCE_A	0.0045f	q 軸インダクタンス [H]
	MP_ROTOR_INERTIA_A	0.0000028f	イナーシャ [ $\text{kgm}^2$ ]
	MP_NOMINAL_CURRENT_RMS_A	0.42f	定格電流 [A(rms)]

表 3-10 "r\_mtr\_control\_parameter.h"マクロ定義一覧

ファイル名	マクロ名	定義値	備考
r_mtr_control_parameter.h	CP_CURRENT_OMEGA_A	300.0f	電流制御系固有周波数 [Hz]
	CP_CURRENT_ZETA_A	1.0f	電流制御系減衰係数
	CP_SPEED_OMEGA_A	1.5f	速度制御系固有周波数 [Hz]
	CP_SPEED_ZETA_A	1.0f	速度制御系減衰係数
	CP_E_OBS_OMEGA_A	1000.0f	誘起電圧推定系固有周波数 [Hz]
	CP_E_OBS_ZETA_A	1.0f	誘起電圧推定系減衰係数
	CP_PLL_EST_OMEGA_A	20.0f	位置推定系固有周波数 [Hz]
	CP_PLL_EST_ZETA_A	1.0f	位置推定系減衰係数
	CP_ID_DOWN_SPEED_RPM_A	600	d 軸電流指令値減算開始速度 (機械角) [rpm]
	CP_ID_UP_SPEED_RPM_A	300	d 軸電流指令値加算開始速度 (機械角) [rpm]
	CP_MAX_SPEED_RPM_A	2650	最大速度 (機械角) [rpm]
	CP_OVERSPEED_LIMIT_RPM_A	3000	回転速度エラー閾値 (機械角) [rpm]
	CP_OL_ID_REF_A	0.3f	オープンループ制御時 d 軸電流指令値 [A]

表 3-11 “r\_mtr\_inverter\_parameter.h”マクロ定義一覧

ファイル名	マクロ名	定義値	備考
r_mtr_inverter_parameter.h	IP_DEADTIME	2.0f	デッドタイム [μs]
	IP_CURRENT_RANGE	25.0f	電流 A/D 変換範囲 [A] (p-p 値)
	IP_VDC_RANGE	73.26f	インバータ母線電圧 A/D 変換範囲 [V]
	IP_INPUT_V	24.0f	インバータ入力電圧 [V]
	IP_CURRENT_LIMIT	10.0f	過電流リミット値 [A]*
	IP_OVERVOLTAGE_LIMIT	28.0f	過電圧リミット値 [V]
	IP_UNDERVOLTAGE_LIMIT	14.0f	低電圧リミット値 [V]

【注】 \* ショット抵抗の定格電力から算出した値です。

表 3-12 “r\_mtr\_config.h”マクロ定義一覧

ファイル名	マクロ名	定義値	備考
r_mtr_config.h	RX72M_MRSSK	—	MCU 選択マクロ定義
	IP_MRSSK	—	インバータ選択マクロ定義
	MP_TG55L	—	モータ選択マクロ定義
	CP_TG55L	—	
	CONFIG_DEFAULT_UI	ICS_UI	デフォルト UI 選択 ICS_UI : RMW の Analyzer を利用した UI BOARD_UI : ボード UI
	FUNC_ON	1	Enable
	FUNC_OFF	0	Disable
	DEFAULT_LESS_SWITCH_A	FUNC_ON	センサレス切り替え処理
	DEFAULT_FLUX_WEAKENING_A	FUNC_OFF	弱め磁束制御
	DEFAULT_VOLT_ERR_COMP_A	FUNC_ON	電圧誤差補償
	DEFAULT_OPENLOOP_DAMPING_A	FUNC_ON	オープンループダンピング制御
	GAIN_MODE_A	MTR_GAIN_DESIGN_MODE	ゲインモード MTR_GAIN_DESIGN_MODE : PI ゲイン設計モード MTR_GAIN_DIRECT_MODE : PI ゲイン直接入力モード
	MOD_METHOD_A	MOD_METHOD_SVPWM	変調方式 MOD_METHOD_SPWM : 正弦波変調 MOD_METHOD_SVPWM : 空間ベクトル変調

3.4 制御フロー（フローチャート）

3.4.1 メイン処理

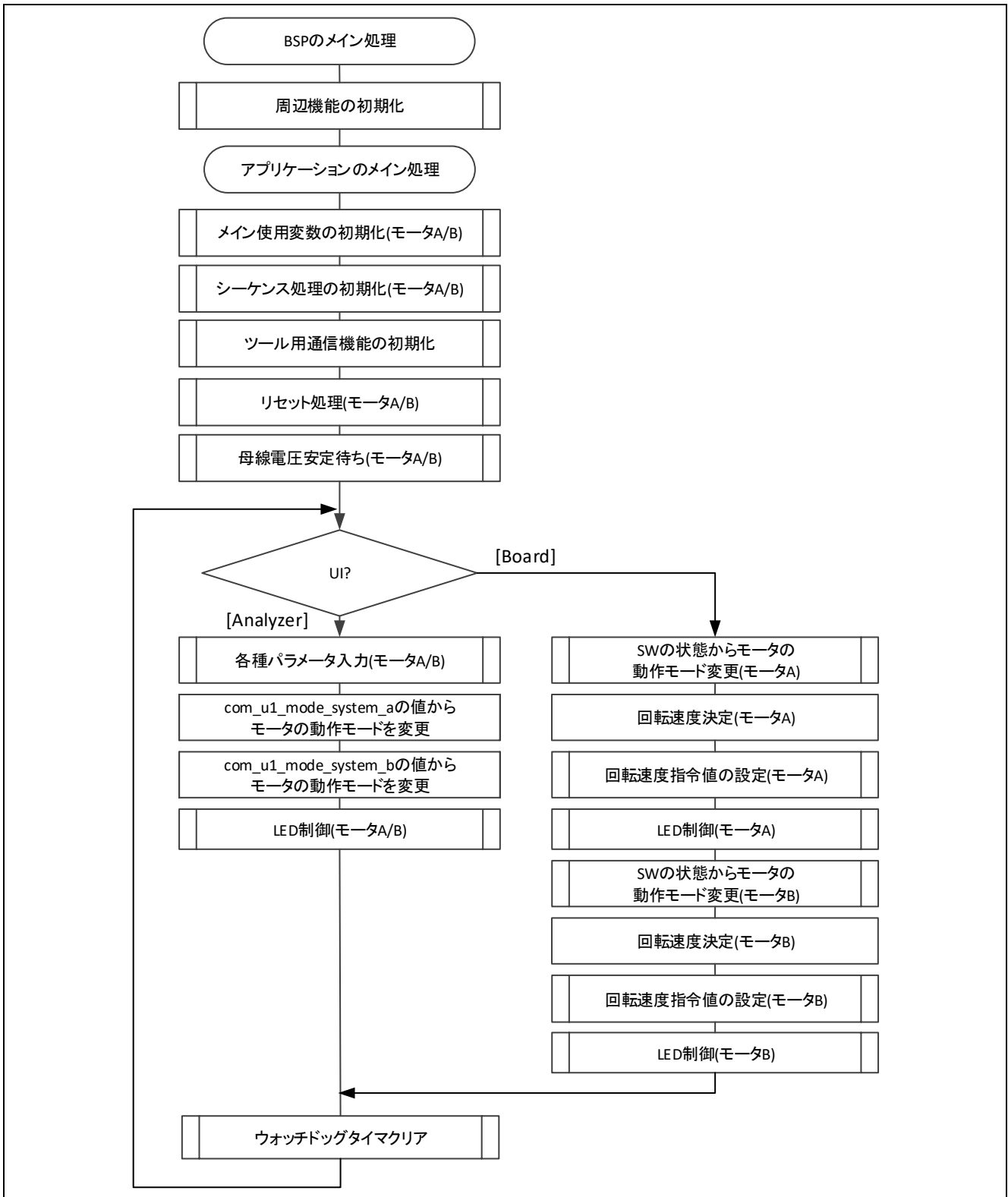


図 3-9 メイン処理フローチャート

3.4.2 100 [μs]周期割り込み（キャリア同期割り込み）処理

モータ A、モータ B は割り込み関数が異なりますが、各々の割り込み関数から共通の関数をコールしておりますので、処理フローは同一になります。

モータ A、モータ B のパラメータ差分は、引数で割り込み処理に渡す事で共通化しております。

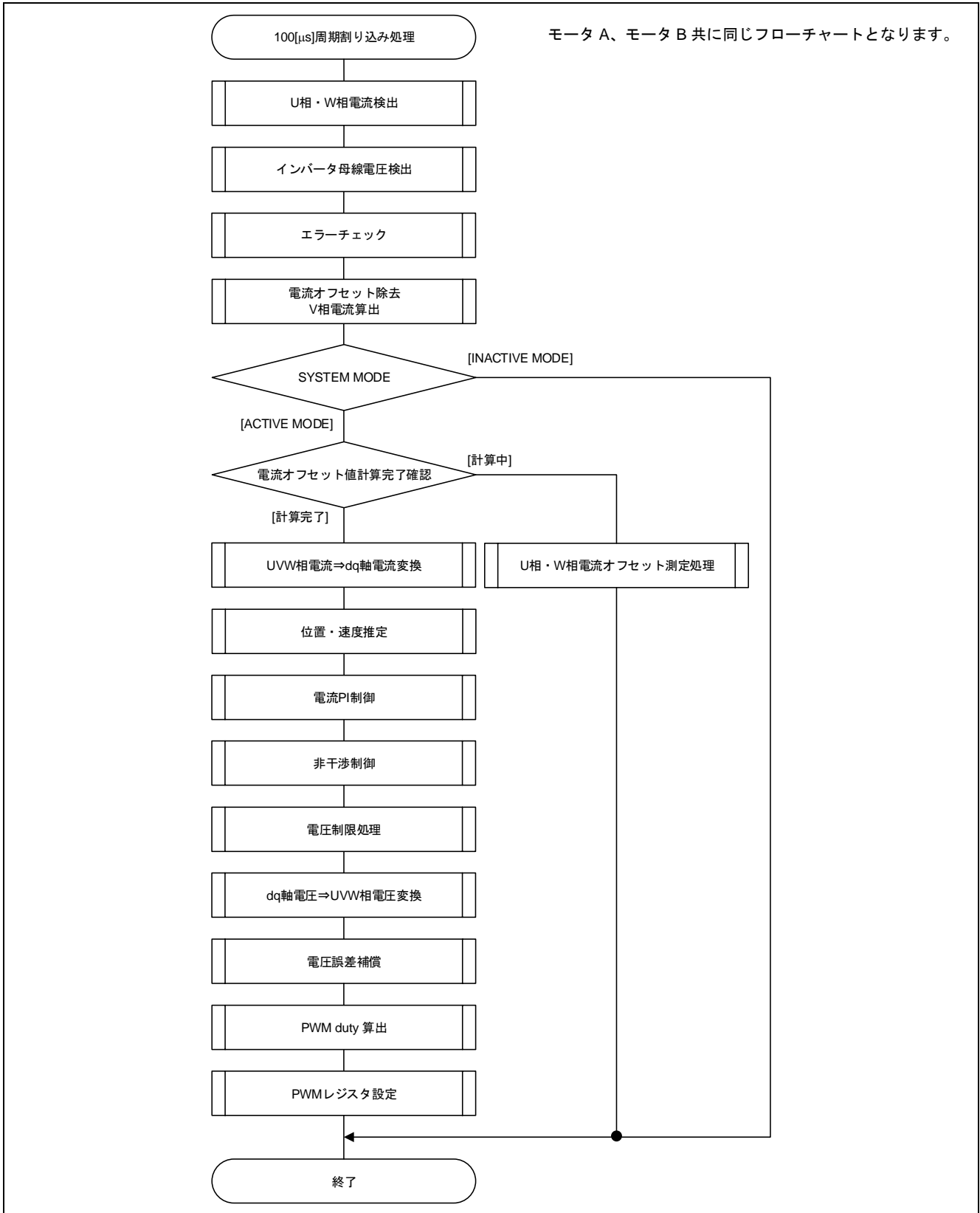


図 3-10 50 [μs]周期割り込み処理フローチャート

3.4.3 1 [ms]周期割り込み処理

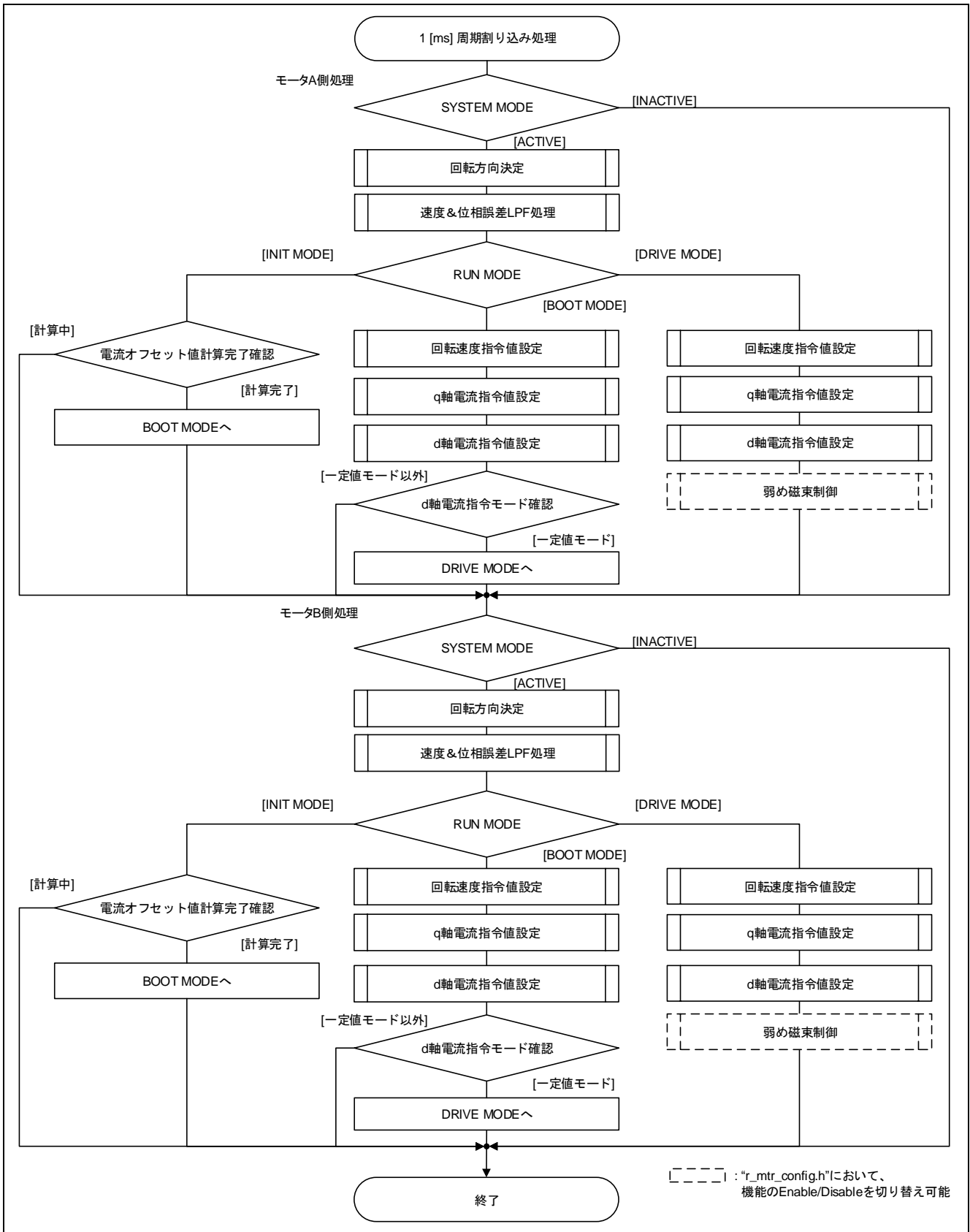


図 3-11 1 [ms]周期割り込み処理フローチャート

## 3.4.4 過電流検出割り込み処理

過電流検出割り込みは、本アプリケーションノート対象ソフトウェアにおける PWM 出力端子のハイインピーダンス制御条件である GTETRGC 端子、POE11#端子の立ち下りエッジ検出時、もしくは出力レベル比較動作による出力短絡検出時に発生する割り込みです。そのため、本割り込み処理の実行開始時点では、すでに PWM 出力端子はハイインピーダンス状態になっており、モータへの出力は停止しています。

本割り込み処理は、割り込みが発生したモータに対し処理を行います。

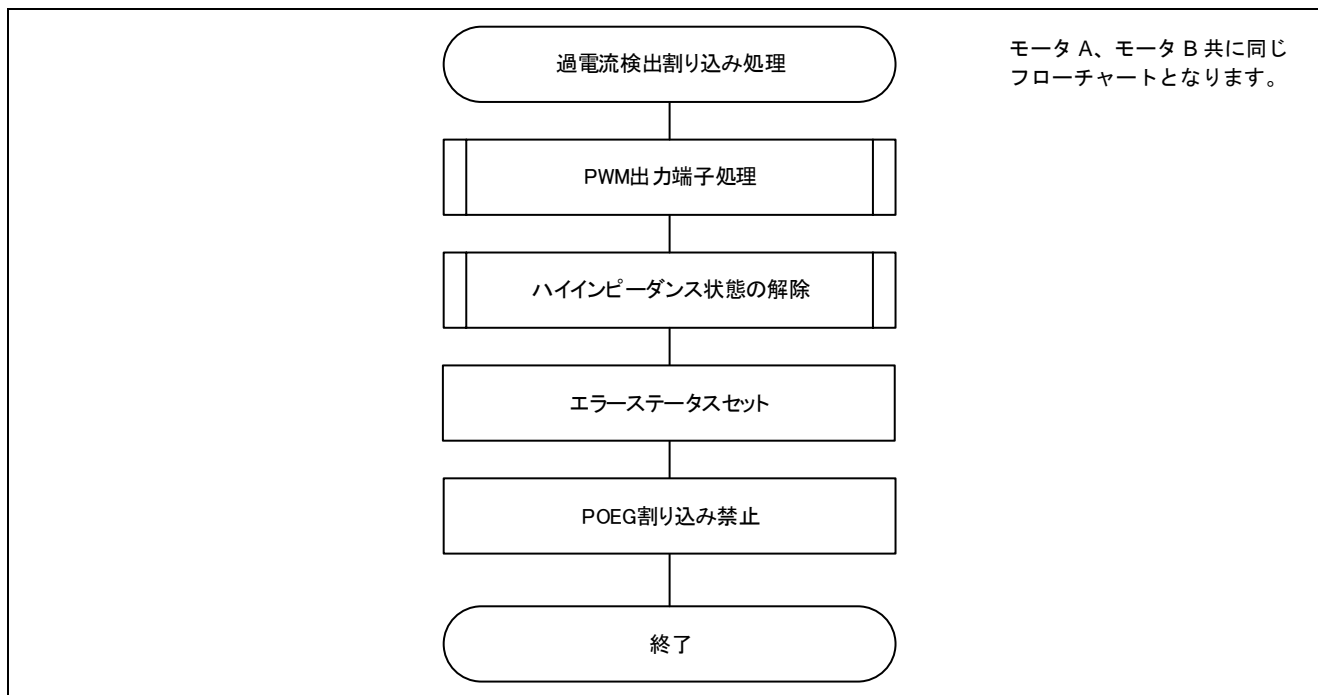


図 3-12 過電流検出割り込み処理フローチャート

## 4. 評価環境構築方法

本アプリケーションノート対象ソフトウェアを使った評価環境の構築方法について説明します。

### 4.1 e2 studio におけるプロジェクトのインポート方法

サンプルソフトは、以下の手順で e2 studio にインポートできます。CS+版は、この操作は不要です。

#### 1. File → Import

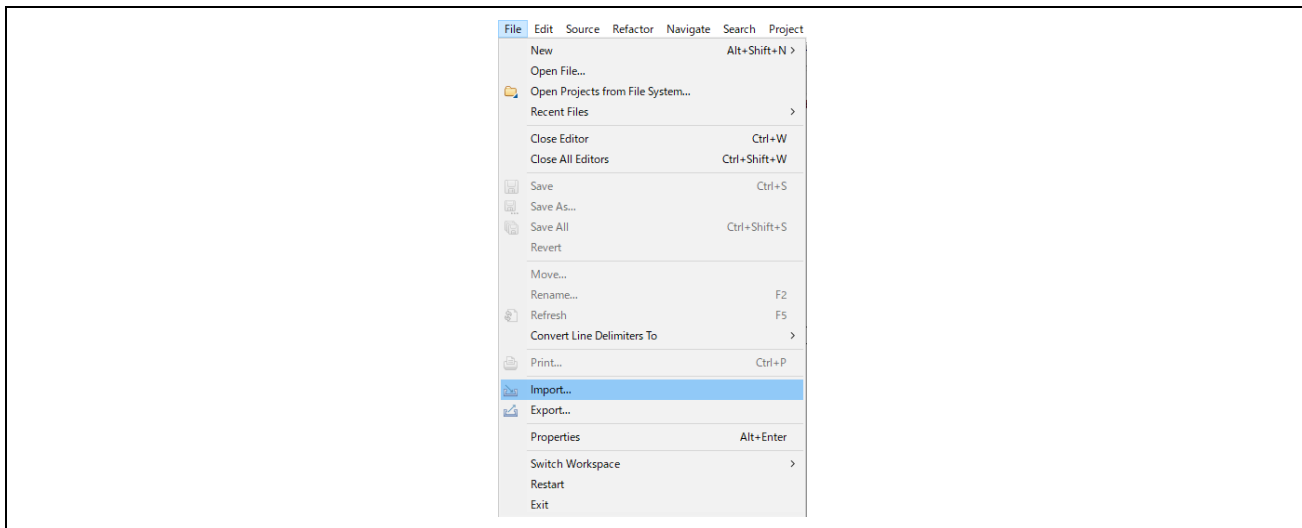


図 4-1 ファイルメニュー

2. 「Existing Projects into Workspace」を選択し、[次へ]ボタンをクリックします。

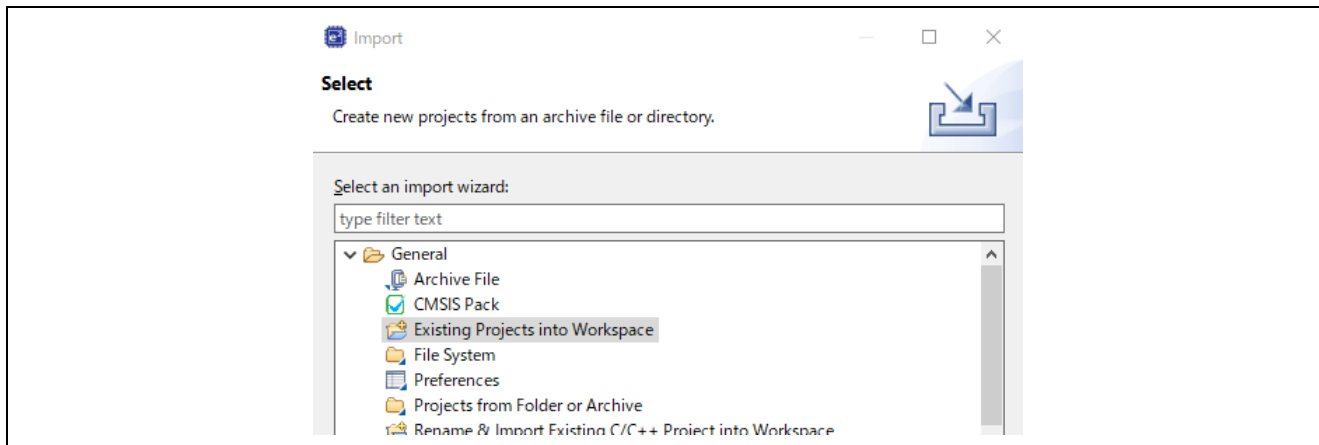


図 4-2 インポートメニュー

3. プロジェクトファイルを選択します。 Finish ボタンをクリックすると、プロジェクトがインポートされます。

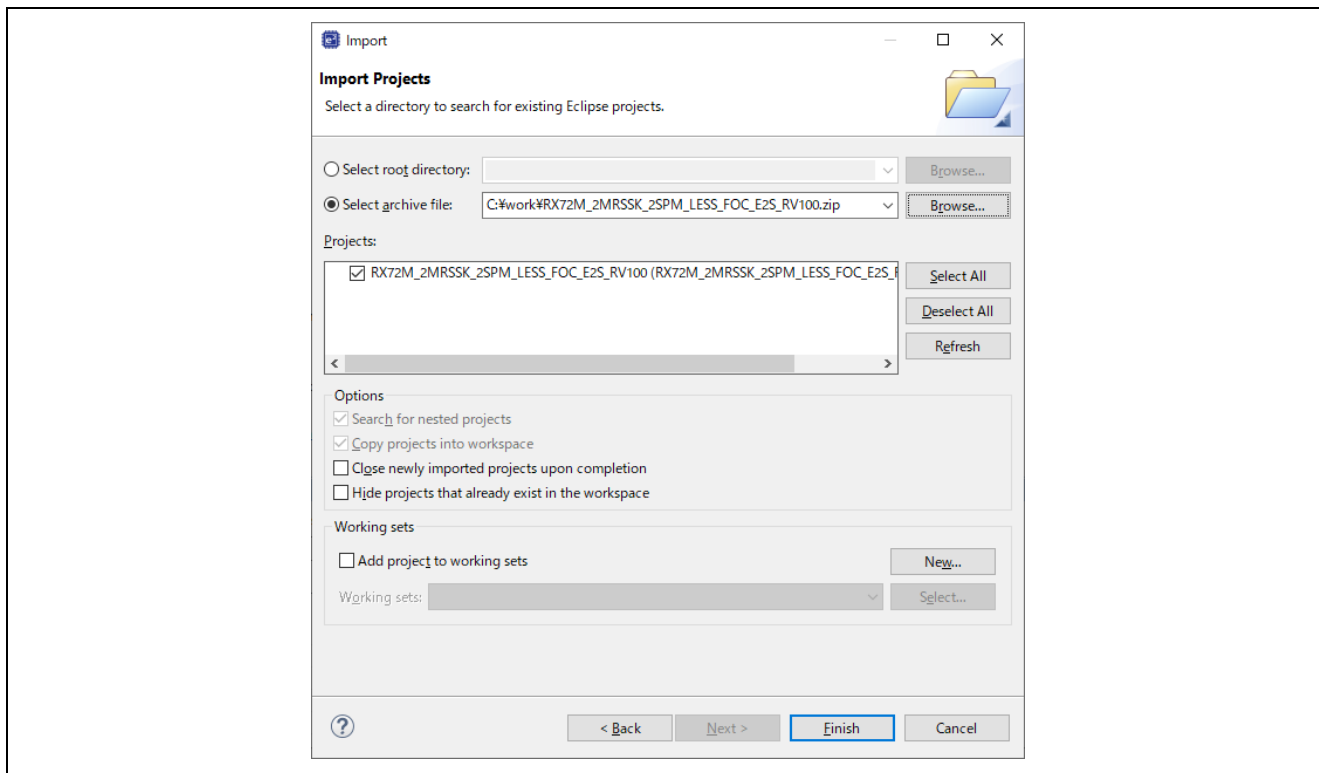


図 4-3 プロジェクトのインポート

## 4.2 ビルドとデバッグ

e2 studio 版の場合は、「e2 studio ユーザーズマニュアル入門ガイド (R20UT4204)」を、CS+版の場合は、「CS+ V8.0600 統合開発環境 ユーザーズマニュアル RX デバッグ・ツール編 (R20UT4977)」「CS+ 統合開発環境 ユーザーズマニュアル CC-RX ビルド・ツール操作編 (R20UT3478)」参照してください。

## 4.3 モータ制御開発支援ツール「Renesas Motor Workbench」

### 4.3.1 概要

本アプリケーションノート対象ソフトウェアでは、モータ制御開発支援ツール「Renesas Motor Workbench」をユーザインタフェース（回転／停止指令、回転速度指令等）として使用します。使用方法などの詳細は「Renesas Motor Workbench ユーザーズマニュアル」を参照してください。

モータ制御開発支援ツール「Renesas Motor Workbench」は弊社 WEB サイトより入手してください。

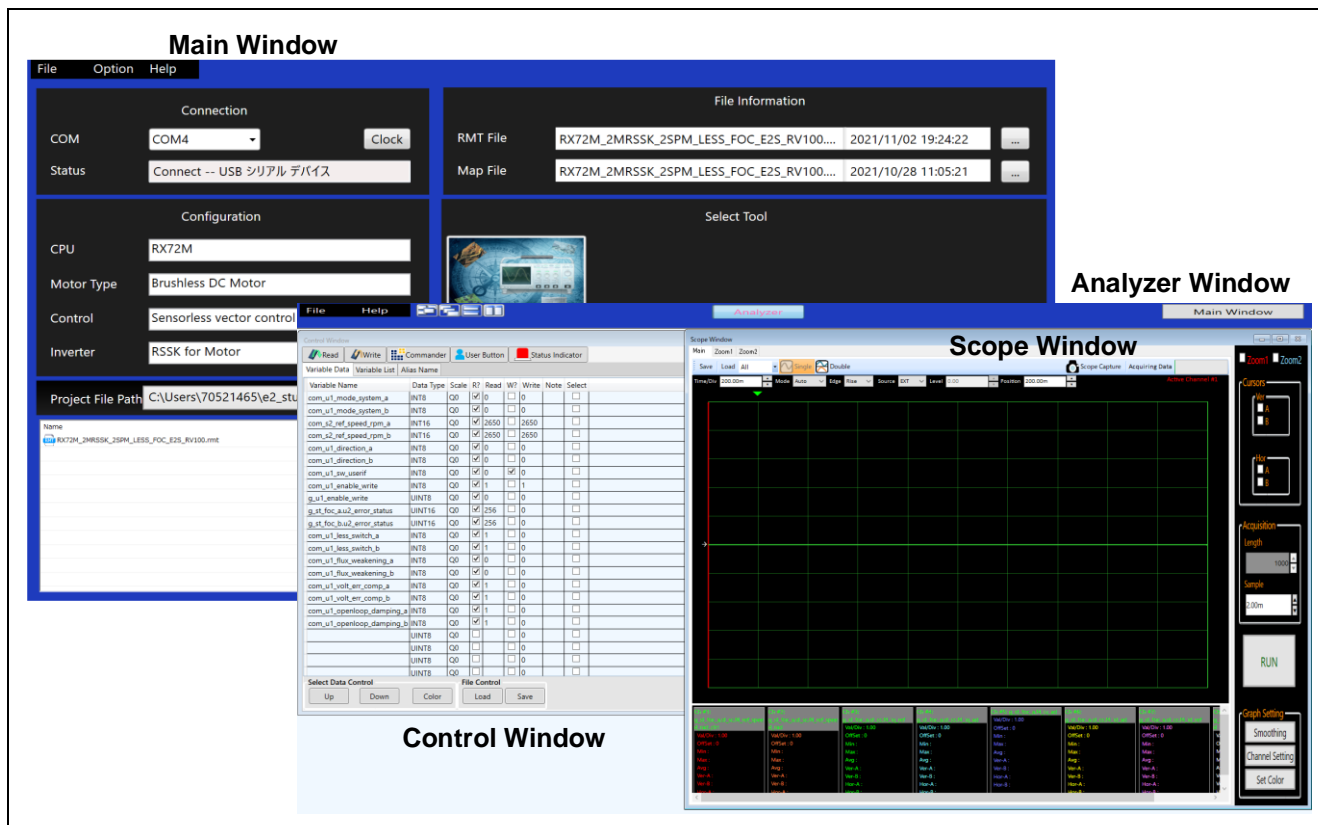



図 4-4 Renesas Motor Workbench 外観

### モータ制御開発支援ツール「Renesas Motor Workbench」の使い方



- ① ツールアイコン  をクリックしツールを起動する。
- ② Main Panel の MENU バーから、[RMTFile] → [Open RMT File (O)]を選択。プロジェクトフォルダの“ics”フォルダ内にある RMT ファイルを読み込む。
- ③ “Connection”の COM で接続されたキットの COM を選択する。
- ④ Select Tool 右上の‘Analyzer’ボタンをクリックし、Analyzer 機能画面を表示する。
- ⑤ “4.3.3 Analyzer 機能操作例”を元にモータを駆動させる。

## 4.3.2 Analyzer 機能用変数一覧

Analyzer ユーザインタフェース使用時の入力用変数一覧を表 4-1 に示します。なお、これらの変数への入力値は com\_u1\_enable\_write に g\_u1\_enable\_write と同じ値を書き込んだ場合に「Middle Layer」内の対応する変数へ反映されます。ただし、(\*)が付けられた変数は com\_u1\_enable\_write に依存しません。

変数名に”\_a”が付いている変数はモータ A 制御用です。モータ B を制御する場合は、変数名に”\_b”が付いている変数を使用してください。表 4-1 には、モータ A 制御用変数のみ記載しています。

表 4-1 Analyzer 機能入力用変数一覧 (1/2)

Analyzer 機能入力用変数名	型	内容
com_u1_sw_userif (*)	uint8_t	ユーザインタフェーススイッチ 0 : Analyzer 使用 (デフォルト) 1 : ボード使用
com_u1_mode_system_a (*)	uint8_t	ステート管理 0 : ストップモード、1 : ランモード、3 : リセット
com_u1_direction_a	uint8_t	回転方向 0 : CW 1 : CCW
com_s2_ref_speed_rpm_a	int16_t	速度指令値 (機械角) [rpm]
com_u2_mtr_pp_a	uint16_t	極対数
com_f4_mtr_r_a	float	抵抗 [ $\Omega$ ]
com_f4_mtr_ld_a	float	d 軸インダクタンス [H]
com_f4_mtr_lq_a	float	q 軸インダクタンス [H]
com_f4_mtr_m_a	float	磁束 [Wb]
com_f4_mtr_j_a	float	イナーシャ [ $\text{kgm}^2$ ]
com_u2_offset_calc_time_a	uint16_t	電流オフセット値計算時間 [ms]
com_f4_limit_speed_change_a	float	速度指令最大増減幅 (電気角) [krpm/s]
com_u2_max_speed_rpm_a	uint16_t	速度最大値 (機械角) [rpm]
com_u2_id_up_speed_rpm_a	uint16_t	d 軸電流指令値加算開始速度 (機械角) [rpm]
com_f4_id_up_time_a	float	d 軸電流指令値加算時間 [ms]
com_f4_ref_id_a	float	オープンループ制御時 d 軸電流指令値 [A]
com_u2_id_down_speed_rpm_a	uint16_t	d 軸電流指令値減算開始速度 (機械角) [rpm]
com_f4_id_down_time_a	float	d 軸電流指令値減算時間 [ms]
com_f4_speed_omega_a	float	速度制御系固有周波数 [Hz]
com_f4_speed_zeta_a	float	速度制御系減衰係数
com_f4_current_omega_a	float	電流制御系固有周波数 [Hz]
com_f4_current_zeta_a	float	電流制御系減衰係数
com_f4_e_obs_omega_a	float	誘起電圧推定系固有周波数 [Hz]
com_f4_e_obs_zeta_a	float	誘起電圧推定系減衰係数
com_f4_pll_est_omega_a	float	位置推定系固有周波数 [Hz]
com_f4_pll_est_zeta_a	float	位置推定系減衰係数
com_f4_id_kp_a	float	d 軸電流 PI 制御比例ゲイン
com_f4_id_ki_a	float	d 軸電流 PI 制御積分ゲイン
com_f4_iq_kp_a	float	q 軸電流 PI 制御比例ゲイン
com_f4_iq_ki_a	float	q 軸電流 PI 制御積分ゲイン
com_f4_speed_kp_a	float	速度 PI 制御比例ゲイン
com_f4_speed_ki_a	float	速度 PI 制御積分ゲイン
com_u2_overspeed_limit_rpm_a	uint16_t	速度超過エラー閾値 (機械角) [rpm]
com_f4_nominal_current_rms_a	float	定格電流 [A (rms)]
com_f4_switch_phase_err_deg_a	float	センサレス制御切り替え可能位相誤差 (電気角) [deg]
com_f4_opl2less_sw_time_a	float	センサレス切り替え処理時間 [s]
com_f4_ed_hpf_omega_a	float	d 軸誘起電圧 HPF カットオフ周波数 [Hz]
com_f4_ol_damping_zeta_a	float	オープンループダンピング制御減衰係数

表 4-1 Analyzer 機能入力用変数一覧 (2/2)

Analyzer 機能入力用変数名	型	内容
com_f4_ol_damp_fb_limit_rate_a	float	オープンループダンピング制御フィードバックリミット率
com_f4_phase_err_lpf_cut_freq_a	float	位相誤差 LPF カットオフ周波数 [Hz]
com_u1_less_switch_a	uint8_t	センサレス切り替え処理 0 : ON 1 : OFF
com_u1_flux_weakening_a	uint8_t	弱め磁束制御 0 : ON 1 : OFF
com_u1_volt_err_comp_a	uint8_t	電圧誤差補償 0 : ON 1 : OFF
com_u1_openloop_damping_a	uint8_t	オープンループダンピング制御 0 : ON 1 : OFF
com_u1_enable_write	uint8_t	変数書き換え許可 (g_u1_enable_write と同じ値を書き込んだ場合に書き込み許可)

次にセンサレスベクトル制御の駆動評価を行う際に観測することの多い主要な構造体変数の一覧を表 4-2 に示します。Analyzer 機能で波形表示する際や変数の値を読み込む際に参考にしてください。一覧にない変数の詳細についてはソースコードを参照してください。

変数名に”\_a”が付いている変数はモータ A 制御用です。モータ B を制御する場合は、変数名に”\_b”が付いている変数を使用してください。表 4-2 には、モータ A 制御用変数のみを記載しています。

表 4-2 センサレスベクトル制御主要変数一覧

センサレスベクトル制御主要変数名	型	内容
g_st_foc_a.st_cc.f4_id_ref	float	d 軸電流指令値 [A]
g_st_foc_a.st_cc.f4_id_ad	float	d 軸電流検出値 [A]
g_st_foc_a.st_cc.f4_iq_ref	float	q 軸電流指令値 [A]
g_st_foc_a.st_cc.f4_iq_ad	float	q 軸電流検出値 [A]
g_st_foc_a.f4_iu_ad	float	U 相電流検出値 [A]
g_st_foc_a.f4_iv_ad	float	V 相電流検出値 [A]
g_st_foc_a.f4_iw_ad	float	W 相電流検出値 [A]
g_st_foc_a.st_cc.f4_vd_ref	float	d 軸電圧指令値 [V]
g_st_foc_a.st_cc.f4_vq_ref	float	q 軸電圧指令値 [V]
g_st_foc_a.f4_refu	float	U 相電圧指令値 [V]
g_st_foc_a.f4_refv	float	V 相電圧指令値 [V]
g_st_foc_a.f4_refw	float	W 相電圧指令値 [V]
g_st_foc_a.f4_modu	float	U 相変調率
g_st_foc_a.f4_modv	float	V 相変調率
g_st_foc_a.f4_modw	float	W 相変調率
g_st_foc_a.f4_ed	float	d 軸誘起電圧推定値 [V]
g_st_foc_a.f4_eq	float	q 軸誘起電圧推定値 [V]
g_st_foc_a.st_rotor_angle.f4_rotor_angle_rad	float	磁極位置推定値 (電気角) [rad]
g_st_foc_a.st_sc.f4_ref_speed_rad_ctrl	float	速度指令値 (電気角) [rad/s]
g_st_foc_a.st_sc.f4_speed_rad	float	速度推定値 (電気角) [rad/s]
g_st_foc_a.f4_phase_err_rad	float	位相誤差 (電気角) [rad]
g_st_foc_a.u2_error_status	uint16_t	エラーステータス

## 4.3.3 Analyzer 機能操作例

Analyzer 機能を使用し、モータを操作する例を以下に示します。操作は、“Control Window”で行います。“Control Window”の詳細は、「Renesas Motor Workbench ユーザーズマニュアル」を参照してください。

変数名に“\_a”が付いている変数はモータ A 制御用です。モータ B を制御する場合は、変数名に“\_b”が付いている変数を使用してください。以下の操作例は、モータ A 制御用変数のみで記載しています。

- モータを回転させる

- ① “com\_u1\_mode\_system\_a”、“com\_s2\_ref\_speed\_rpm\_a”、“com\_u1\_enable\_write”の[W?]欄に“チェック”が入っていることを確認する。
- ② 指令回転速度を“com\_s2\_ref\_speed\_rpm\_a”の[Write]欄に入力する。
- ③ “Write”ボタンを押す。
- ④ “Read”ボタンを押して現在の“com\_s2\_ref\_speed\_rpm\_a”、“g\_u1\_enable\_write”の[Read]欄を確認する。
- ⑤ MCU 内の変数値へ反映させるため、“com\_u1\_enable\_write”に④で確認した、“g\_u1\_enable\_write”と同じ値を入力する。
- ⑥ “com\_u1\_mode\_system\_a”の[Write]欄に“1”を入力する。
- ⑦ “Write”ボタンを押す。

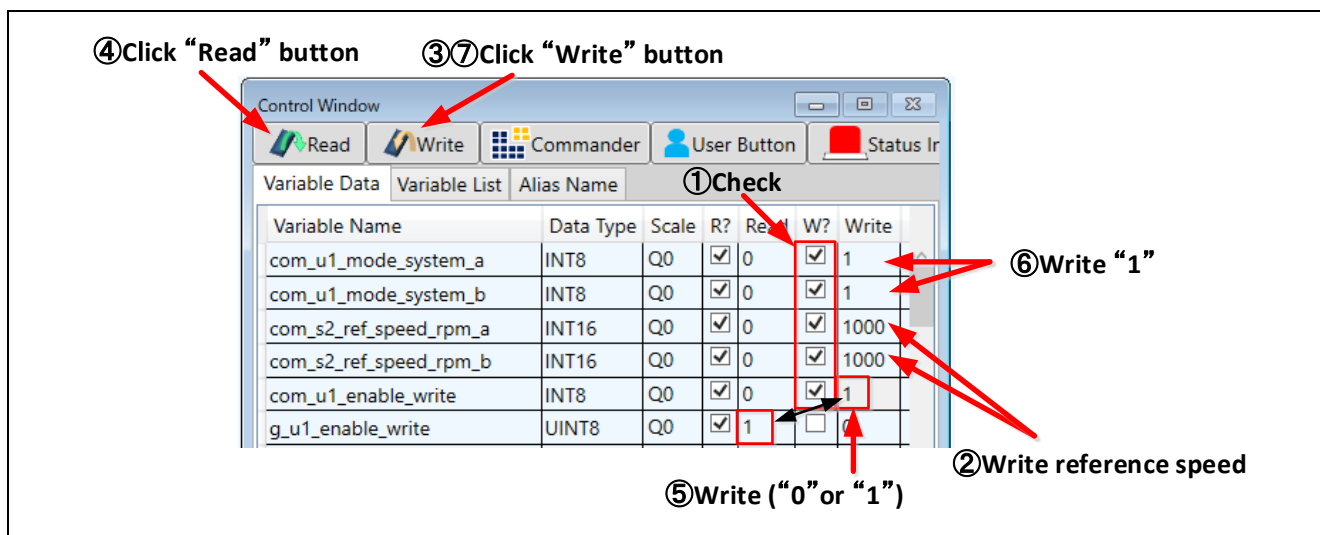


図 4-5 モータ回転の手順

- モータを停止させる

- ① “com\_u1\_mode\_system\_a”の[Write]欄に“0”を入力する。
- ② “Write”ボタンを押す。

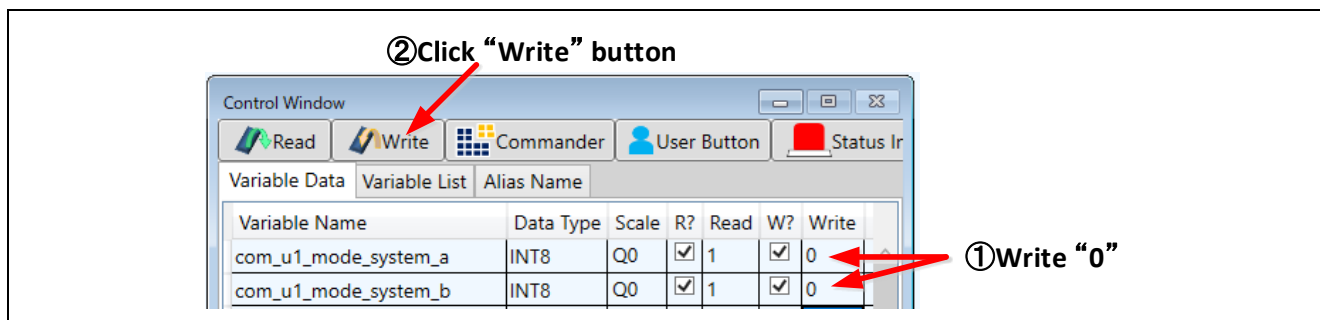


図 4-6 モータ停止の手順

- 止まってしまった（エラー）場合の処理
  - “com\_u1\_mode\_system\_a”の[Write]欄に“3”を入力する。
  - “Write”ボタンを押す。

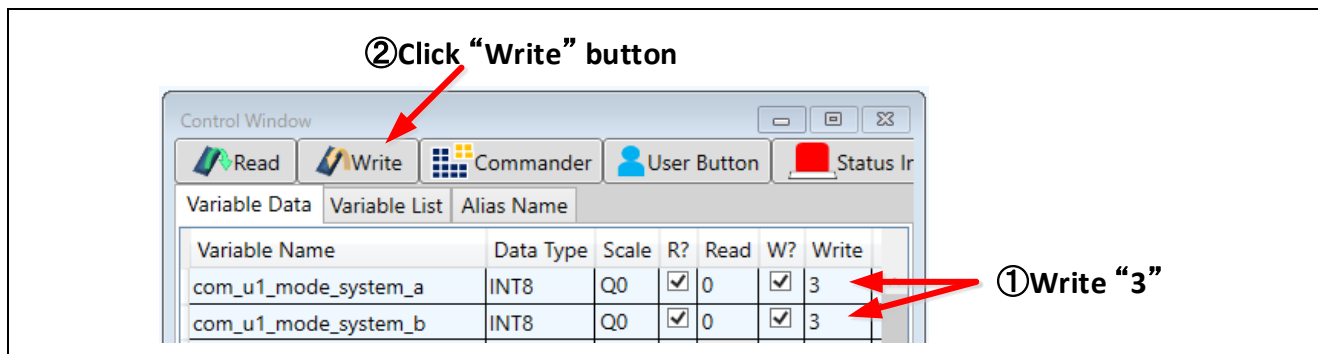


図 4-7 エラー解除の手順

4.3.4 User Button 機能操作例

User Button 機能を使用し、モータを操作する例を以下に示します。

- モータを駆動する／停止する

図 4-8 のように設定することで、ボタンを押すごとに駆動と停止が切り替わります。

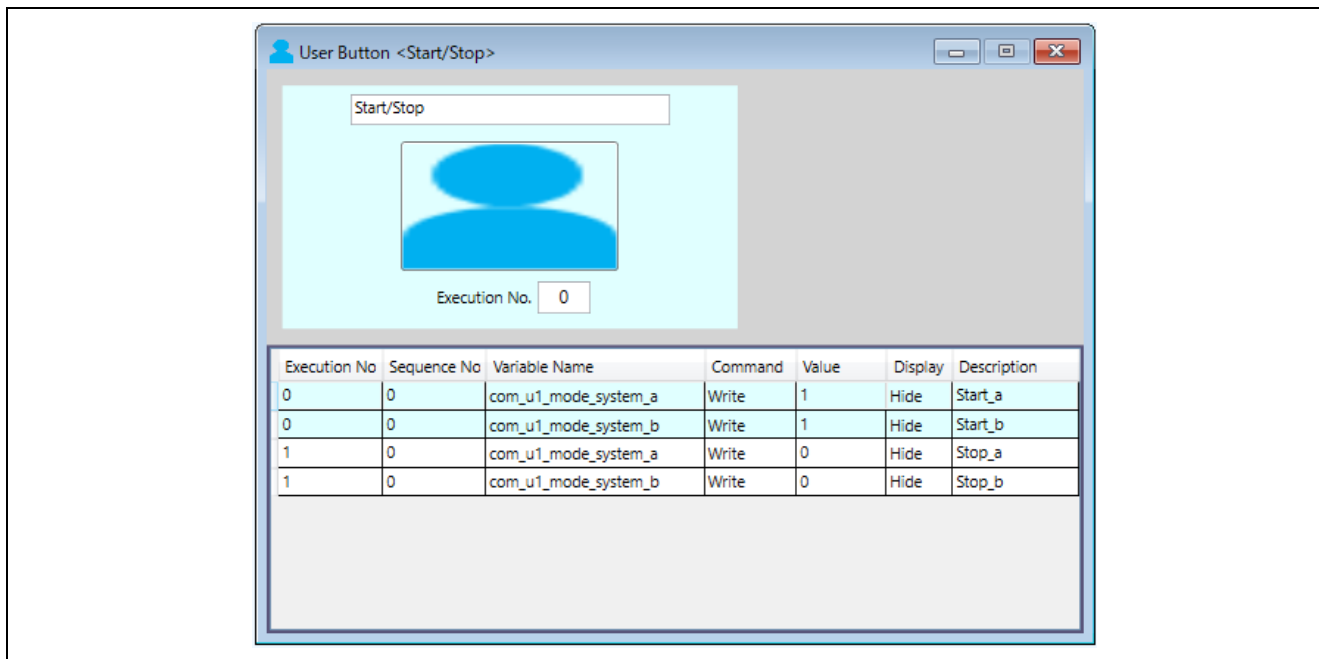


図 4-8 モータの回転／停止

- 速度指令を変更する

図 4-9 のように設定することで、速度指令を入力し、ボタンを押すことで速度指令が変更できます。

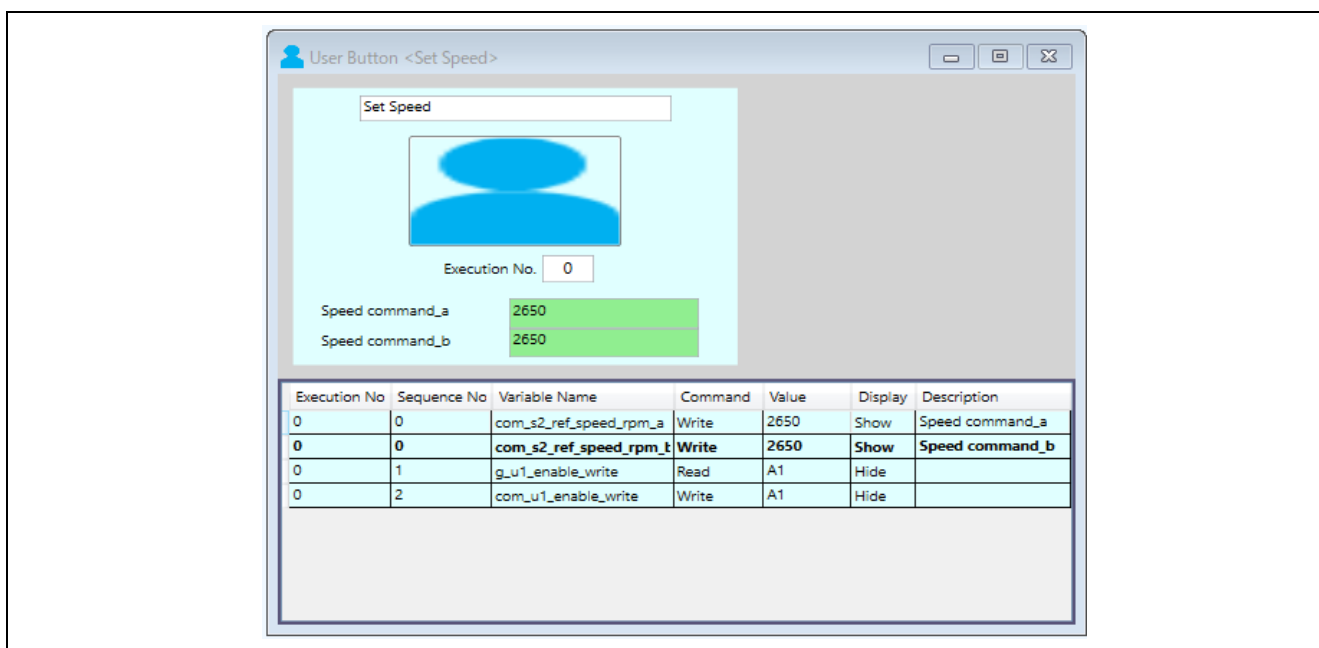


図 4-9 速度指令の変更

## 5. 参考ドキュメント

- RX72M グループ ユーザーズマニュアル ハードウェア編 (R01UH0804)
- 永久磁石同期モータのセンサレスベクトル制御 (アルゴリズム編) (R01AN3786)
- Renesas Motor Workbench ユーザーズマニュアル (R21UZ0004)
- Evaluation System for BLDC Motor ユーザーズマニュアル (R12UZ0062)
- スマート・コンフィグレータ ユーザーズマニュアル RX API リファレンス編 (R20UT4360)
- RX スマート・コンフィグレータ ユーザーガイド : CS+編 (R20AN0470)
- RX スマート・コンフィグレータ ユーザーガイド : e<sup>2</sup> studio 編 (R20AN0451)

## 改訂記録

Rev.	発行日	改訂内容	
		ページ	ポイント
1.00	Dec.20.21	—	新規発行

## 製品ご使用上の注意事項

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

### 1. 静電気対策

CMOS 製品の取り扱いの際は静電気防止を心がけてください。CMOS 製品は強い静電気によってゲート絶縁破壊を生じることがあります。運搬や保存の際には、当社が出荷梱包に使用している導電性のトレーやマガジンケース、導電性の緩衝材、金属ケースなどを利用し、組み立て工程にはアースを施してください。プラスチック板上に放置したり、端子を触ったりしないでください。また、CMOS 製品を実装したボードについても同様の扱いをしてください。

### 2. 電源投入時の処置

電源投入時は、製品の状態は不定です。電源投入時には、LSI の内部回路の状態は不確定であり、レジスタの設定や各端子の状態は不定です。外部リセット端子でリセットする製品の場合、電源投入からリセットが有効になるまでの期間、端子の状態は保証できません。同様に、内蔵パワーオンリセット機能を使用してリセットする製品の場合、電源投入からリセットのかかる一定電圧に達するまでの期間、端子の状態は保証できません。

### 3. 電源オフ時における入力信号

当該製品の電源がオフ状態のときに、入力信号や入出力プルアップ電源を入れないでください。入力信号や入出力プルアップ電源からの電流注入により、誤動作を引き起こしたり、異常電流が流れ内部素子を劣化させたりする場合があります。資料中に「電源オフ時における入力信号」についての記載のある製品は、その内容を守ってください。

### 4. 未使用端子の処理

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

### 5. クロックについて

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

### 6. 入力端子の印加波形

入力ノイズや反射波による波形歪みは誤動作の原因になりますので注意してください。CMOS 製品の入力がノイズなどに起因して、 $V_{IL}$  (Max.) から  $V_{IH}$  (Min.) までの領域にとどまるような場合は、誤動作を引き起こす恐れがあります。入力レベルが固定の場合はもちろん、 $V_{IL}$  (Max.) から  $V_{IH}$  (Min.) までの領域を通過する遷移期間中にチャタリングノイズなどが入らないように使用してください。

### 7. リザーブアドレス（予約領域）のアクセス禁止

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

### 8. 製品間の相違について

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

## ご注意書き

1. 本資料に記載された回路、ソフトウェアおよびこれらに関連する情報は、半導体製品の動作例、応用例を説明するものです。回路、ソフトウェアおよびこれらに関連する情報を使用する場合、お客様の責任において、お客様の機器・システムを設計ください。これらの使用に起因して生じた損害（お客様または第三者いずれに生じた損害も含まれます。以下同じです。）に関し、当社は、一切その責任を負いません。
2. 当社製品または本資料に記載された製品データ、図、表、プログラム、アルゴリズム、応用回路例等の情報の使用に起因して発生した第三者の特許権、著作権その他の知的財産権に対する侵害またはこれらに関する紛争について、当社は、何らの保証を行うものではなく、また責任を負うものではありません。
3. 当社は、本資料に基づき当社または第三者の特許権、著作権その他の知的財産権を何ら許諾するものではありません。
4. 当社製品を組み込んだ製品の輸出入、製造、販売、利用、配布その他の行為を行うにあたり、第三者保有の技術の利用に関するライセンスが必要となる場合、当該ライセンス取得の判断および取得はお客様の責任において行ってください。
5. 当社製品を、全部または一部を問わず、改造、変更、複製、リバースエンジニアリング、その他、不適切に使用しないでください。かかる改造、変更、複製、リバースエンジニアリング等により生じた損害に関し、当社は、一切その責任を負いません。
6. 当社は、当社製品の品質水準を「標準水準」および「高品質水準」に分類しており、各品質水準は、以下に示す用途に製品が使用されることを意図しております。

標準水準： コンピュータ、OA 機器、通信機器、計測機器、AV 機器、家電、工作機械、パーソナル機器、産業用ロボット等

高品質水準： 輸送機器（自動車、電車、船舶等）、交通管制（信号）、大規模通信機器、金融端末基幹システム、各種安全制御装置等

当社製品は、データシート等により高信頼性、Harsh environment 向け製品と定義しているものを除き、直接生命・身体に危害を及ぼす可能性のある機器・システム（生命維持装置、人体に埋め込み使用するもの等）、もしくは多大な物的損害を発生させるおそれのある機器・システム（宇宙機器と、海底中継器、原子力制御システム、航空機制御システム、プラント基幹システム、軍事機器等）に使用されることを意図しておらず、これらの用途に使用することは想定していません。たとえ、当社が想定していない用途に当社製品を使用したことにより損害が生じても、当社は一切その責任を負いません。

7. あらゆる半導体製品は、外部攻撃からの安全性を 100%保証されているわけではありません。当社ハードウェア/ソフトウェア製品にはセキュリティ対策が組み込まれているものもありますが、これによって、当社は、セキュリティ脆弱性または侵害（当社製品または当社製品が使用されているシステムに対する不正アクセス・不正使用を含みますが、これに限られません。）から生じる責任を負うものではありません。当社は、当社製品または当社製品が使用されたあらゆるシステムが、不正な改変、攻撃、ウイルス、干渉、ハッキング、データの破壊または窃盗その他の不正な侵入行為（「脆弱性問題」といいます。）によって影響を受けないことを保証しません。当社は、脆弱性問題に起因したまたはこれに関連して生じた損害について、一切責任を負いません。また、法令において認められる限りにおいて、本資料および当社ハードウェア/ソフトウェア製品について、商品性および特定目的との合致に関する保証ならびに第三者の権利を侵害しないことの保証を含め、明示または黙示のいかなる保証も行いません。
8. 当社製品をご使用の際は、最新の製品情報（データシート、ユーザーズマニュアル、アプリケーションノート、信頼性ハンドブックに記載の「半導体デバイスの使用上の一般的な注意事項」等）をご確認の上、当社が指定する最大定格、動作電源電圧範囲、放熱特性、実装条件その他指定条件の範囲内でご使用ください。指定条件の範囲を超えて当社製品をご使用された場合の故障、誤動作の不具合および事故につきましては、当社は、一切その責任を負いません。
9. 当社は、当社製品の品質および信頼性の向上に努めていますが、半導体製品はある確率で故障が発生したり、使用条件によっては誤動作したりする場合があります。また、当社製品は、データシート等において高信頼性、Harsh environment 向け製品と定義しているものを除き、耐放射線設計を行っておりません。仮に当社製品の故障または誤動作が生じた場合であっても、人身事故、火災事故その他社会的損害等を生じさせないよう、お客様の責任において、冗長設計、延焼対策設計、誤動作防止設計等の安全設計およびエージング処理等、お客様の機器・システムとしての出荷保証を行ってください。特に、マイコンソフトウェアは、単独での検証は困難なため、お客様の機器・システムとしての安全検証をお客様の責任で行ってください。
10. 当社製品の環境適合性等の詳細につきましては、製品個別に必ず当社営業窓口までお問合せください。ご使用に際しては、特定の物質の含有・使用を規制する RoHS 指令等、適用される環境関連法令を十分調査のうえ、かかる法令に適合するようご使用ください。かかる法令を遵守しないことにより生じた損害に関して、当社は、一切その責任を負いません。
11. 当社製品および技術を国内外の法令および規則により製造・使用・販売を禁止されている機器・システムに使用することはできません。当社製品および技術を輸出、販売または移転等する場合は、「外国為替及び外国貿易法」その他日本国および適用される外国の輸出管理関連法規を遵守し、それらの定めるところに従い必要な手続きを行ってください。
12. お客様が当社製品を第三者に転売等される場合には、事前に当該第三者に対して、本ご注意書き記載の諸条件を通知する責任を負うものいたします。
13. 本資料の全部または一部を当社の文書による事前の承諾を得ることなく転載または複製することを禁じます。
14. 本資料に記載されている内容または当社製品についてご不明な点がございましたら、当社の営業担当者までお問合せください。

注 1. 本資料において使用されている「当社」とは、ルネサス エレクトロニクス株式会社およびルネサス エレクトロニクス株式会社が直接的、間接的に支配する会社をいいます。

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

(Rev.5.0-1 2020.10)

## 本社所在地

〒135-0061 東京都江東区豊洲 3-2-24（豊洲フォレシア）

[www.renesas.com](http://www.renesas.com)

## お問合せ窓口

弊社の製品や技術、ドキュメントの最新情報、最寄の営業お問合せ窓口に関する情報などは、弊社ウェブサイトをご覧ください。

[www.renesas.com/contact/](http://www.renesas.com/contact/)

## 商標について

ルネサスおよびルネサスロゴはルネサス エレクトロニクス株式会社の商標です。すべての商標および登録商標は、それぞれの所有者に帰属します。