

目次

1. 概要	4
1.1 当社製品のご紹介	4
2. 関連ドキュメント	6
3. 動作確認環境	6
4. システム構成	7
4.1 ハードウェア構成	9
4.1.1 電源構成	9
4.1.2 RSSKRX23E-A	10
4.1.3 電力ボード	13
4.1.3.1 構成および外観	13
4.1.3.2 回路説明	14
4.1.4 ペルチェユニット	21
4.2 制御構成	22
4.2.1 動作原理	22
4.2.2 PID 制御	23
4.2.3 温度制御設計	25
4.2.4 温度制御演算の実装	27
5. サンプルプログラム	28
5.1 動作概要	28
5.2 使用する周辺機能と端子一覧	31
5.2.1 AFE・DSAD0	33
5.2.2 S12ADE	34
5.2.3 MTU3,4・DTC	35
5.2.4 SCI5・DMAC0・DMAC3・CMT0	37
5.2.5 ポート	38
5.3 温度制御	39
5.3.1 温度 PID 制御	39
5.3.2 電流 PI 制御	40
5.4 PWM 制御	41
5.5 スロースタートアップ制御	42
5.6 デモ動作	42
5.7 通信制御	43
5.8 プログラム構成	45
5.8.1 ファイル構成	45
5.8.2 マクロ定義	46
5.8.3 構造体及び共用体	48
5.8.4 関数一覧	50
6. プロジェクトをインポートする方法	56
6.1 e ² studio での手順	56
6.2 CS+での手順	57

7. サンプルプログラムを使用した動作結果.....	58
7.1 使用メモリと実行サイクル数.....	58
7.1.1 ビルド条件.....	58
7.1.2 使用メモリ.....	58
7.1.3 実行サイクル数.....	59
7.2 動作例.....	60
7.2.1 ステップ応答.....	60
7.2.2 制御分解能.....	61
Appendix 1 電力ボード部品表.....	62
Appendix 2 電力ボード回路図.....	63
Appendix 3 電力ボードパターン図.....	65
改訂記録.....	70

1. 概要

本書では、ルネサスマイクロコントローラ RX23E-A を使用したペルチェクーラーの温度制御例について説明します。ペルチェクーラー（以下、本システム）は、RX23E-A を搭載した RSKRX23E-A ボード、電力ボード及びペルチェユニットで構成します。

本システムでは、温度制御の実現例として、ペルチェモジュールを用いて温度制御を行います。ペルチェモジュールの温度制御はレーザーダイオードなどの温度依存性の高い素子の特性を一定に保つために用いられます。

本システムは、測温抵抗体による温度計測、PID 制御演算、通信を RX23E-A の 1 チップで実現しています。

1.1 当社製品のご紹介

本システムで使用している当社製品一覧を表 1-1 に示します。

表 1-1 本システムで当社製品一覧

部品型名	部品名称	搭載ボード	搭載数量
R5F523E6ADFL (RX23E-A)	MCU	RSSKRX23E-A	1
ISL80410	LDO	RSSKRX23E-A	1
ISL3159E	RS-422/RS-485 ドライバ	RSSKRX23E-A	1
ISL8560	降圧型 DC/DC コンバータ	電力ボード	1
ISL2111	ハーフブリッジドライバ	電力ボード	2
RJK0654DPB	N チャンネル MOSFET	電力ボード	4
READ2302GSP	OP アンプ	電力ボード	2

● RX23E-A

表 1-2 に本システムで使用している RX23E-A の仕様概略を示します。

RX23E-A は RX23E-A 用評価ボード、Renesas Solution Starter Kit for RX23E-A (RSSKRX23E-A) に搭載しています。RX23E-A は高精度計測が可能な、低ノイズの 24 ビット Δ - Σ A/D コンバータ (DSAD) を 2 回路搭載しています。DSAD にはプログラマブルゲイン計装アンプ (PGA) が搭載されており、ゲインを x1、x2、x4、x8、x16、x32、x64、x128 から選択することができます。また、熱電対、測温抵抗体、ひずみゲージなどのセンサ計測に適したアナログフロントエンド (AFE) 回路を搭載しており、AFE 内蔵のアナログマルチプレクサ (AMUX) の切り替えで、最大 6ch の計測を行うことが可能です。また、逐次比較型の 12 ビット A/D コンバータ (S12AD) を 1 回路搭載しています。

RX23E-A についての詳細は「RX23E-A グループ ユーザーズマニュアル ハードウェア編」を、RSSKRX23E-A についての詳細は「RSSKRX23E-A ユーザーズマニュアル ボード編」を参照ください。

表 1-2 RX23E-A の仕様概略

項目	内容
製品グループ	RX23E-A
型名	R5F523E6ADFL
CPU 最大動作周波数	32MHz
ビット数	32bit
パッケージ/ピン数	LFQFP / 48 ピン
ROM	256K バイト
RAM	32K バイト
動作温度範囲	-40°C ~ +85°C
保存温度範囲	-55°C ~ +125°C

- ISL80410

ISL80410 は RSSKRX23E-A に搭載しています。ISL80410 は 6V~40V の広入力電圧範囲、2.5V~10V の可変出力電圧、無負荷時消費電流 16 μ A の低ノイズ LDO です。RSSKRX23E-A では出力電圧を 5V に設定しています。

- ISL8560

ISL8560 は電力ボードに搭載しています。ISL8560 は 9V~60V の広入力電圧範囲、1.21V~55V の可変出力電圧、最大出力電流 2A の FET 内蔵の降圧型 DC/DC コンバータです。電力ボードでは出力電圧 12.0V に設定しています。

- ISL2111

ISL2111 は電力ボードに搭載しています。ISL2111 は電源電圧 8V~14V で動作する、ブートストラップダイオード内蔵のレール電圧最大 100V 駆動可能なハーフブリッジの N チャンネル MOSFET ドライバです。電力ボードでは ISL2111 を 2 つ使用して、ペルチェモジュール駆動用の 24V のフルブリッジ回路を駆動しています。

- RJK0654DPB

RJK0654DPB は電力ボードに搭載しています。RJK0654DPB は 60V、30A、オン抵抗 8.3m Ω max の N チャンネルパワー MOSFET です。電力ボードではフルブリッジ回路に 4 つ使用しています。

- READ2302GSP

READ2302GSP は電力ボードに搭載しています。READ2302GSP は高駆動能力、高スルーレート、フルレンジ入出力の CMOS デュアルオペアンプです。2.5V~5.5V の低電圧単電源で動作し、小型の 8 ピン TSSOP で提供しています。

2. 関連ドキュメント

- R01UH0801 RX23E-A グループ ユーザーズマニュアル ハードウェア編
- R20UT4542 RSSKRX23E-A ユーザーズマニュアル
- R20AN0540 アプリケーションノート RSSKRX23E-A PC ツールプログラム操作マニュアル
- R01AN4788 アプリケーションノート RX23E-A グループ 測温抵抗体を使用した温度計測例

3. 動作確認環境

動作確認環境を表 3-1 に示します。

表 3-1 動作確認環境

項目	内容
電力ボード	Thermoelectric Controller Board
MCU ボード	RSSKRX23E-A ボード (RTK0ESXB10C00001BJ)
MCU	RX23E-A (R5F523E6ADFL) 電源電圧(VCC, AVCC0) : 5V 動作周波数(ICLK) : 32MHz 周辺動作周波数(PCLKA) : 32MHz (MTU3,4) 周辺動作周波数(PCLKB) : 32MHz (AFE, DSAD0, S12ADE, SCI5) DSAD 動作周波数(f_{DR}) : 4MHz DSAD モジュレータクロック周波数(f_{MOD}) : 0.5MHz
ペルチェユニット	Peltier Unit
ペルチェモジュール	株式会社タイセー UT-7070KA-M
3 線式測温抵抗体	株式会社チノー R060-33
IDE	Renesas e ² studio 2020-07
Tool Chain	Renesas CC-RX V3.02.00
エミュレータ	E2 エミュレータ Lite

4. システム構成

図 4-1 に本システムの構成を、図 4-2 に本システムの外観を示します。本システムは、制御対象のペルチェユニット、ペルチェユニット駆動用の電力ボード、および温度・電流計測、制御演算、通信を行う RSSKRX23E-A ボードで構成しています。

本システムでは、ペルチェモジュールに流れる電流を制御することで、温度を制御します。電流制御はフルブリッジ回路を PWM 制御することにより実現します。電流は RX23E-A 内蔵の 12-bit 逐次比較型 AD コンバータ（以下、S12ADC）を用いて計測し、マルチファンクションタイマパルスユニット（以下、MTU）を用いて電流計測と同期させて PWM 出力で電流を制御します。

ペルチェモジュールの温度は 3 線式測温抵抗体（Resistance Temperature Detector、以下、RTD）を用いて計測します。RTD の抵抗値計測には RX23E-A 内蔵の 24-bit ΔΣ 型 A/D コンバータ（以下、DSAD）を用いて行います。通常、RTD の計測には励起電流源などの外部回路が必要ですが、RX23E-A の AFE 内蔵の励起電流源を用いることで、外付けの IC なしで、高精度な温度計測を行うことが可能です。

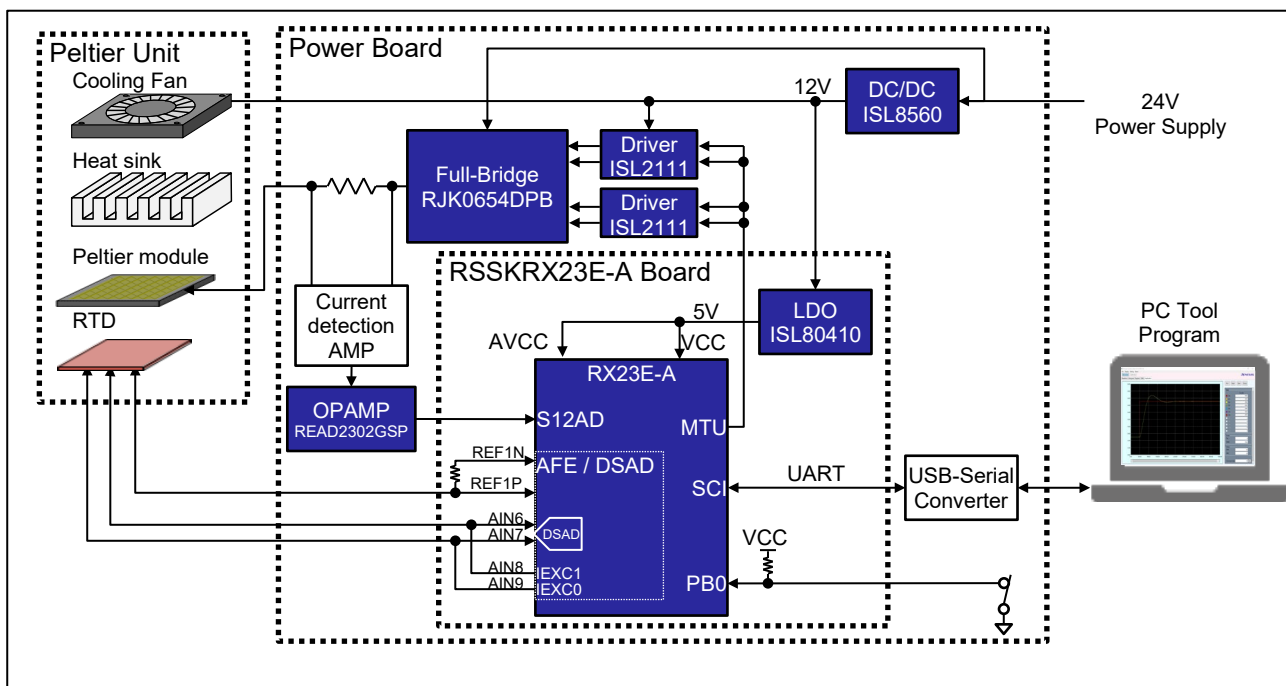


図 4-1 本システムの構成

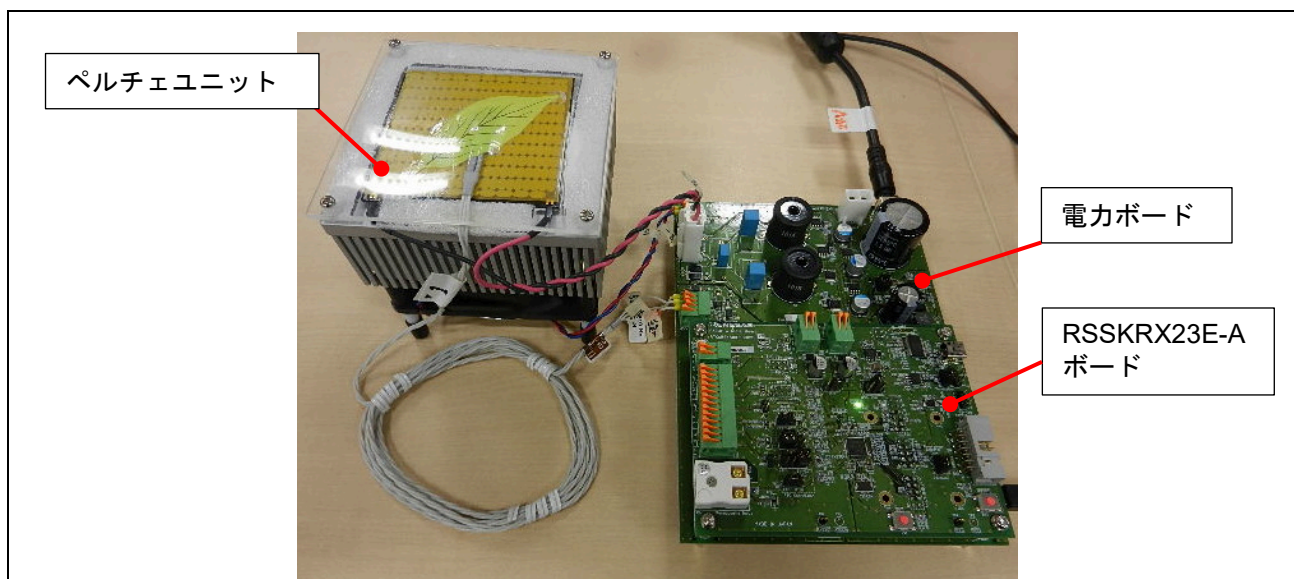


図 4-2 本システムの外観

温度指令値の送信、温度の計測は図 4-3 に示すように RSSKRX23E-A の PC ツールプログラム（以下、PC ツール）の Application タブを用いて行います。また、温度指令値を上下に変化させるデモ動作はスライドスイッチで On/Off します。

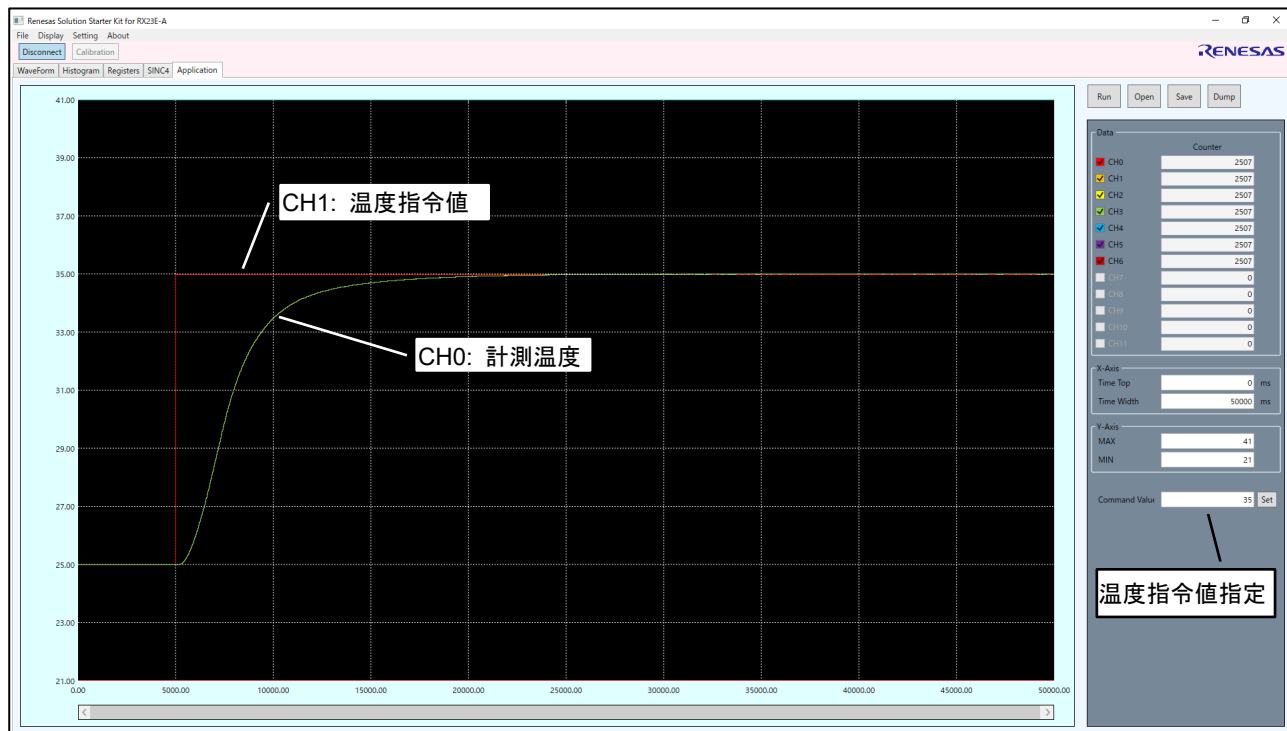


図 4-3 PC ツールプログラムの表示例

4.1 ハードウェア構成

4.1.1 電源構成

図 4-4 に本システムの電源構成を示します。また、表 4-1 に本システムの電源仕様を示します。

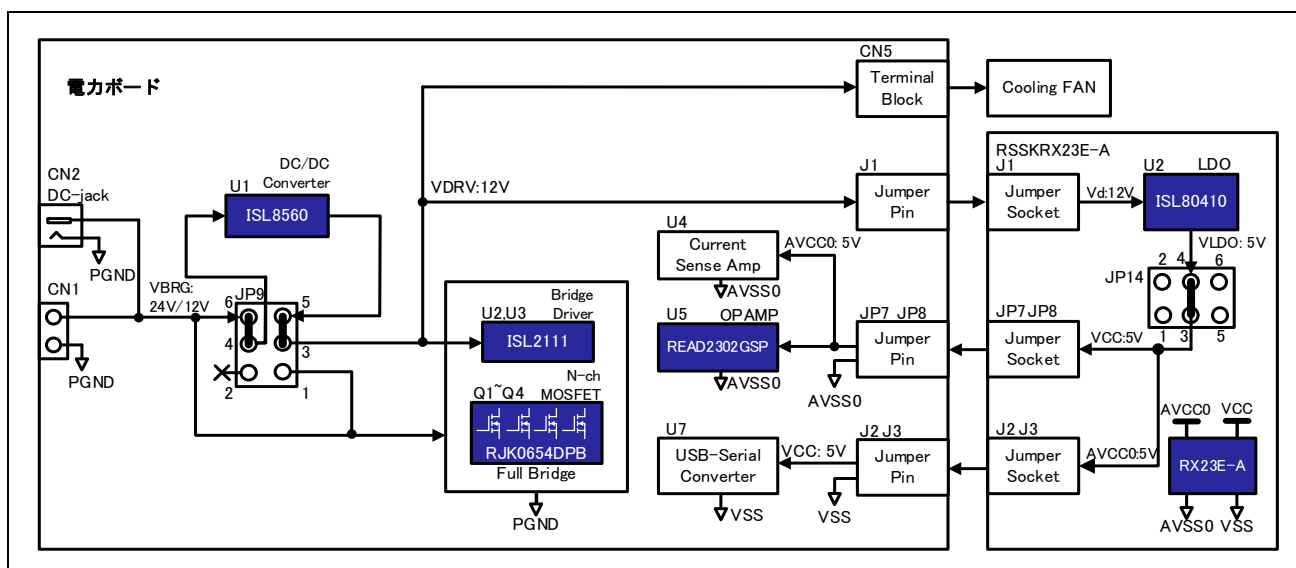


図 4-4 本システムの電源構成

表 4-1 本システムの電源仕様

項目	記号	コネクタ	動作電圧	備考
システム電源	VBRG	CN1 または CN2	24V	最大負荷電流 5A 電力ボードの JP9 の 4-6 番ピンと 3-5 番ピンを接続
			12V	最大負荷電流 10A 電力ボードの JP9 の 2-4 番ピンと 1-3 番ピンを接続
ブリッジドライバ電源	VDRV (Vd)	J1	12V	ブリッジドライバ用および空冷ファン用電源 RSSKRX23E-A の入力電源 RSSKRX23E-A の JP14 の 3-4 番ピンを接続
デジタル電源	VCC	J2 J3	5V	RSSKRX23E-A の U2 の出力
アナログ電源	AVCC0	JP7 JP8	5V	RSSKRX23E-A の U2 の出力 (RSSKRX23E-A でデジタル電源と分離)

本システムの電源電圧は 24V または 12V です。電源は CN1、もしくは CN2 どちらかから入力します。24V 入力時は U1 : DC/DC コンバータ (ISL8560) でブリッジドライバ、空冷ファンおよび RSSKRX23E-A 用の 12V 電源 (VDRV) を生成するために、電力ボードの JP9 の 4-6 番ピンと 3-5 番ピンを接続します。12V 入力時はブリッジドライバ、空冷ファンおよび RSSKRX23E-A に 12V を直接供給するために、電力ボードの JP9 の 2-4 番ピンと 1-3 番ピンを接続します。12V 電源は J1 を介して RSSKRX23E-A に供給します。RSSKRX23E-A に搭載した U2 : LDO (ISL80410) で 5V 電源を生成し、U1 : RX23E-A および、J2、J3、および JP7、JP8 を介して電力ボードの U4 : 電流検出アンプ、U5 : OP アンプ (READ2302GSP)、U7 : USB シリアル変換 IC に VCC、AVCC0 を供給します。RSSKRX23E-A は LDO を使用するために、JP14 の 3-4 番ピンを接続します。

なお、本書では入力電圧 24V で動作確認を行っています。

(2) 電力ボードとの接続

RSSKRX23E-A と電力ボードの接続を表 4-2~表 4-4 に示します。RSSKRX23E-A の信号名は「RSSKRX23E-A ユーザーズマニュアル ボード編」の「Appendix 2. Circuit Diagram」を、電力ボードの信号名は本書の「Appendix 2 電力ボード回路図」を参照ください。

表 4-2 RSSKRX23E-A と電力ボードの接続（電源部）

RSSKRX23E-A			向き	電力ボード		
信号名	参照記号	端子番号		信号名	参照記号	端子番号
VSS	J1	1, 2	←	PGND	J1	1, 2
Vd	J1	3, 4	←	VDRV	J1	3, 4

表 4-3 RSSKRX23E-A と電力ボードの接続（デジタル部）

RSSKRX23E-A			向き	電力ボード		
信号名	参照記号	端子番号		信号名	参照記号	端子番号
VSS	J2	1, 3, 7, 8	→	VSS	J2	1, 3, 7, 8
PB0	J2	5	←	PB0/SW1	J2	5
PB1	J2	6	←	V_DET	J2	6
VCC	J2	2, 4	→	VCC	J2	2, 4
PC4/MTIOC3D	J2	9	←	CTS5#	J2	9
VSS	J3	1	→	VSS	J3	1
VCC	J3	2	→	VCC	J3	2
PH1/TXD5	J3	3	→	TXD5	J3	3
PH0/RXD5	J3	4	←	RXD5	J3	4
P27/IRQ3/SW1	J4	1	→	PWM-AH	J4	1
P26/TXD1	J4	2	→	PWM-AL	J4	2
VSS	J4	3	→	VSS	J4	3
P30/RXD1	J4	4	→	PWM-BH	J4	4
P31/CTS1#	J4	6	→	PWM-BL	J4	6

表 4-4 RSSKRX23E-A と電力ボードの接続（アナログ部）

RSSKRX23E-A			向き	電力ボード		
信号名	参照記号	端子番号		信号名	参照記号	端子番号
AIN5/REF1P	JP3	2	←	REF1P	JP3	2
AIN6	JP4	1	↔	AIN6/IEXC1	JP4	1
AIN7	JP4	2	↔	AIN7/IEXC0	JP4	2
AIN10	JP6	1	←	lfb/AN004	JP6	1
AIN11	JP6	2	←	AVSS0	JP6	2
AVSS0	JP7	1, 2, 6	→	AVSS0	JP7	1, 2, 6
REF0N	JP7	3, 5	←	AVSS0	JP7	3, 5
LSW	JP7	4	←	AVSS0	JP7	4
AVSS0	JP8	1, 2	→	AVSS0	JP8	1, 2
REF0P	JP8	4, 6	←	AVCC0	JP8	4, 6
AVCC0	JP8	5	→	AVCC0	JP8	5

(3) RSSKRX23E-A 変更点

RSSKRX23E-A を電力ボードに接続するために行った変更点を表 4-5 に示します。

表 4-5 RSSKRX23E-A ボード変更点

回路符号	変更前		変更後	
	部品型名	実装面	部品型名	実装面
J1	非実装	-	M20-7830246	半田面
J2	非実装	-	PPTC062LFBN-RC	半田面
J3, J4	非実装	-	M20-7830546	半田面
JP3, JP4, JP6	非実装	-	M20-7820246	半田面
JP7, JP8	M20-9980345	部品面	M20-7830346	半田面
R48~R50	RK73Z1ETTP	部品面	RK73B1ETTP330J	部品面
R60, R61	RK73B1JTDD103J	部品面	非実装	-
R64, R65	RK73B1ETTP330J	部品面	非実装	-
R66, R89~R91	RK73Z1ETTP	部品面	非実装	-
R80	RK73B1JTDD472J	部品面	非実装	-
R85	RK73B1JTDD101J	部品面	非実装	-
C27	CGA2B3X7R1H104K050BB	部品面	非実装	-
C59	CGA3E2X7R1H102K080AA	部品面	非実装	-

4.1.3 電力ボード

4.1.3.1 構成および外観

図 4-7 に電力ボードのシステムブロック図を、図 4-8 に電力ボードの外観を示します。電力ボードの部品表は「Appendix 1 電力ボード部品表」を、回路図は「Appendix 2 電力ボード回路図」を参照ください。

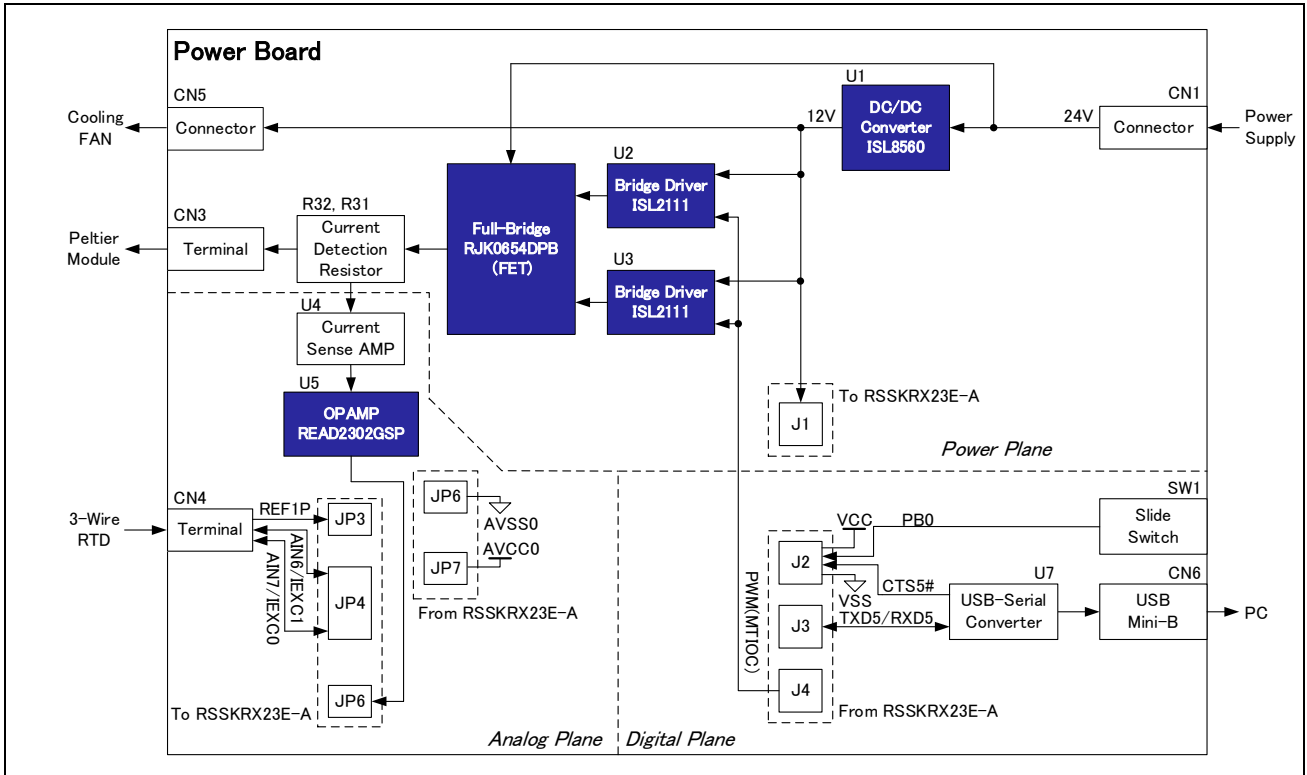


図 4-7 電力ボードのシステムブロック図

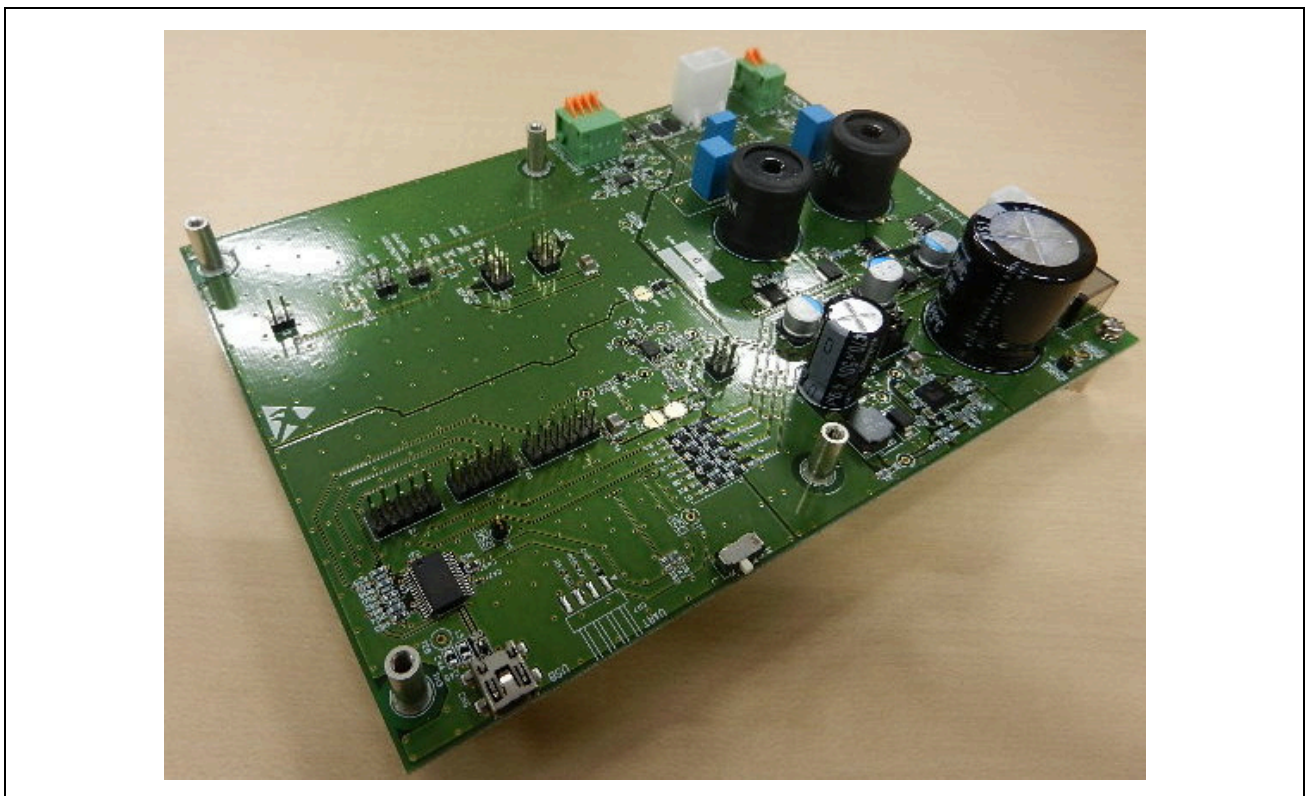


図 4-8 電力ボードの外観

4.1.3.2 回路説明

(1) 電源回路

図 4-9 に電力ボードの DC/DC コンバータ回路を示します。

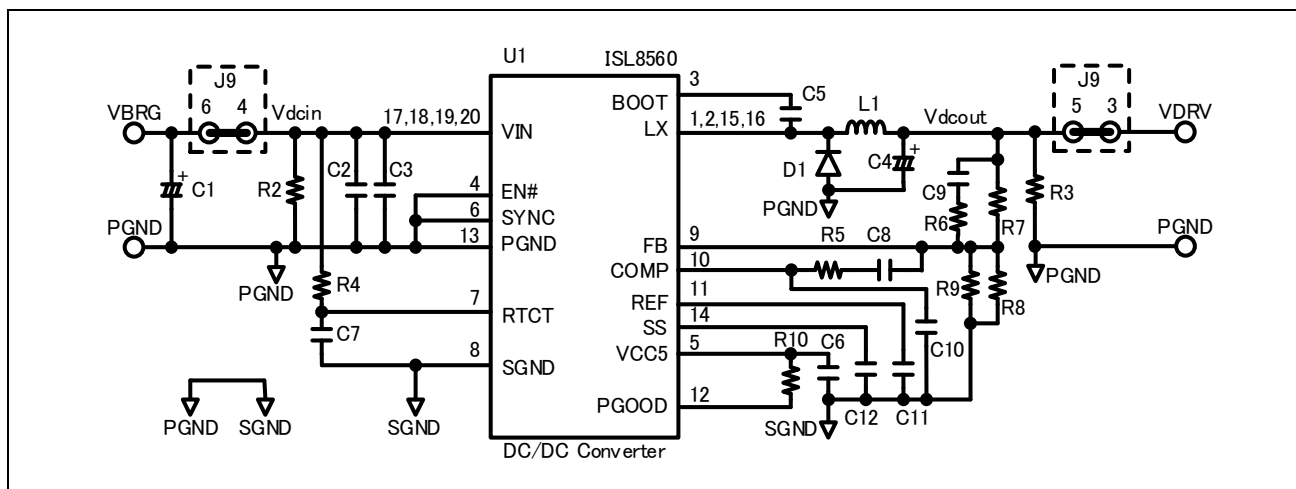


図 4-9 DC/DC コンバータ回路

電力ボードには DC/DC コンバータ ISL8560 を搭載しています。DC/DC コンバータ回路はシステム電源に 24V を入力する場合に使用し、ブリッジドライバ、空冷ファン、RSSKRX23E-A 用の 12V 電源を出力します。DC/DC コンバータを使用する場合は、JP9 の 3-5 番ピンおよび 4-6 番ピンを接続します。

(2) フルブリッジ回路

図 4-10 にフルブリッジ回路を示します。図 4-11 にフルブリッジ回路の動作モードを示します。

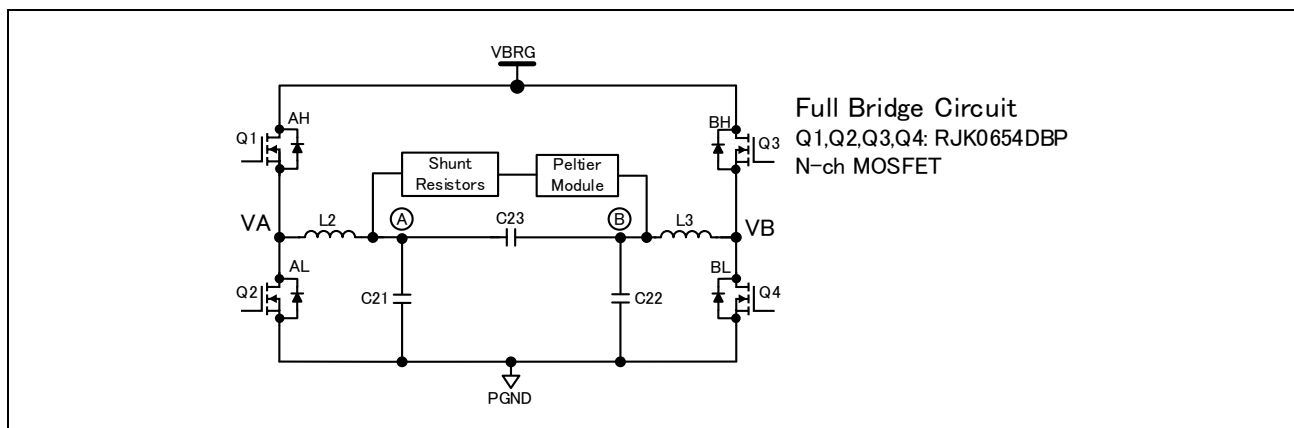


図 4-10 フルブリッジ回路

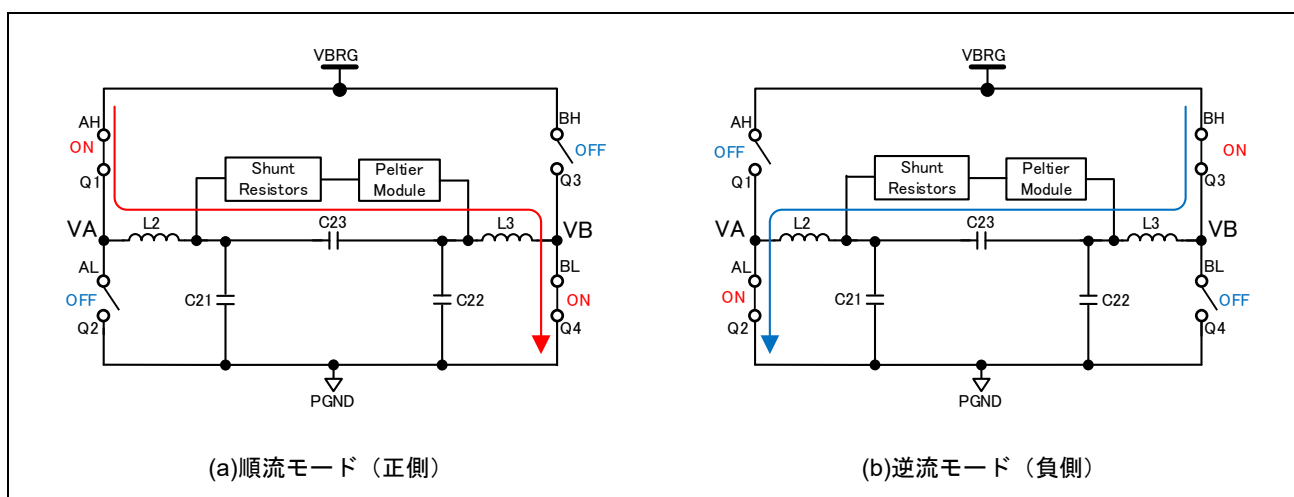


図 4-11 フルブリッジ回路の動作モード

ペルチェクーラーでは、ペルチェモジュールに流れる電流を N-ch MOSFET、Q1、Q2、Q3、Q4 を用いたフルブリッジ回路により制御します。図 4-11 に示すように(a)の順流モードでは、Q1、Q4 を ON にし、ペルチェモジュールに正の電流が流れます。(b)の逆流モードでは、Q2、Q3 を ON にし、ペルチェモジュールに負の電流が流れます。電流の量は、PWM (Pulse Width Modulation) 制御により、FET の ON 時間を変化させることにより制御します。ペルチェモジュールに直列に接続したシャント抵抗は、ペルチェモジュールに流れる電流を検出するために挿入しています。電流検出回路の詳細については「(4) 電流検出回路」を参照してください。

本システムでは、相補 PWM 制御により制御を行います。相補 PWM 制御では Q1 と Q4 に正相、Q2 と Q3 に逆相の PWM 信号を印加します。これにより、相補 PWM では、VA、VB の電圧を制御し、VA と VB の電位差によりペルチェモジュールに流れる電流を制御することができます。相補 PWM により、電流値 0 付近の動作を連続的に切り替えることができます。

図 4-12 にフルブリッジ回路フィルタ部を示します。

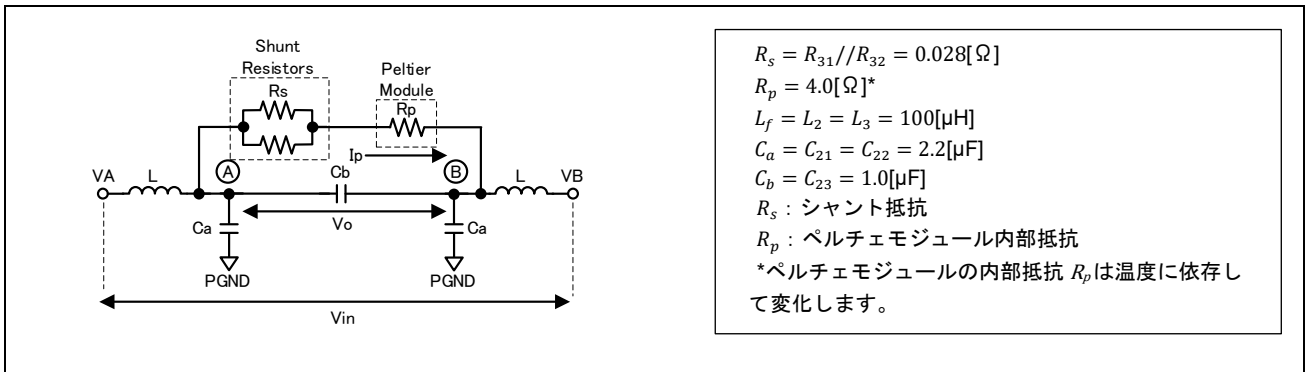


図 4-12 フルブリッジ回路フィルタ部

本フィルタ回路への入力電圧を VA と VB の差電圧を Vin とし、A 点、B 点間の電圧を Vo としたとき、Vin と Vo は以下のような伝達関数で表すことができます。

$$\frac{V_o}{V_{in}} = \frac{1}{L_f(C_a + 2C_b)s^2 + \frac{2L_f}{R_s + R_p}s + 1} \tag{1}$$

ここで、s はラプラス演算子を表します。

なお、ペルチェモジュールに流れる電流 Ip と Vin の関係は以下のように表すことができます。

$$\frac{I_p}{V_{in}} = \frac{1}{R_s + R_p} \cdot \frac{1}{L_f(C_a + 2C_b)s^2 + \frac{2L_f}{R_s + R_p}s + 1} \tag{2}$$

また、(1)式の伝達関数は、2 次のローパスフィルタの一般式を用いて以下のように表すことができます。

$$\frac{V_o}{V_{in}} = \frac{\omega_n^2}{s^2 + 2\zeta\omega_n s + \omega_n^2}, \quad \text{固有角周波数} : \omega_n^2 = \frac{1}{L_f(C_a + 2C_b)}, \quad \text{減衰定数} : \zeta = \frac{1}{R_s + R_p} \sqrt{\frac{L_f}{C_a + 2C_b}} \tag{3}$$

図 4-13 にフルブリッジ回路のフィルタ部の周波数特性を示します。本システムでは、PWM のキャリア周波数を 100kHz に設定しています。フルブリッジ回路のフィルタ部で 100kHz のキャリア周波数成分を -44.6dB 減衰することができます。

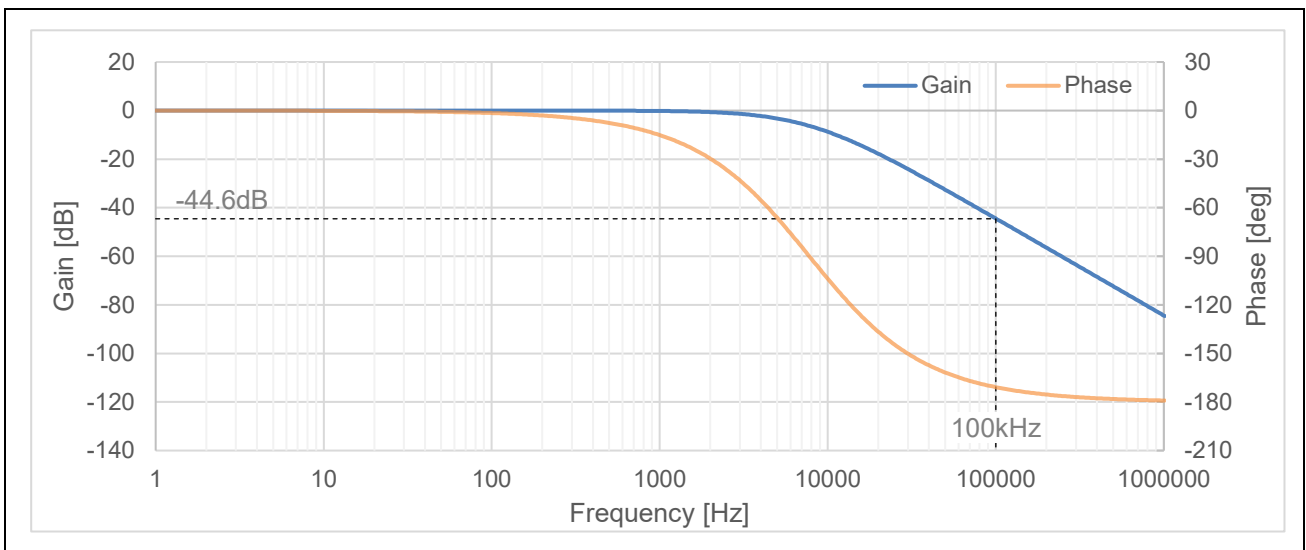


図 4-13 フルブリッジ回路のフィルタ部の周波数特性

(3) PWM 駆動回路

図 4-14 に PWM 駆動回路を示します。

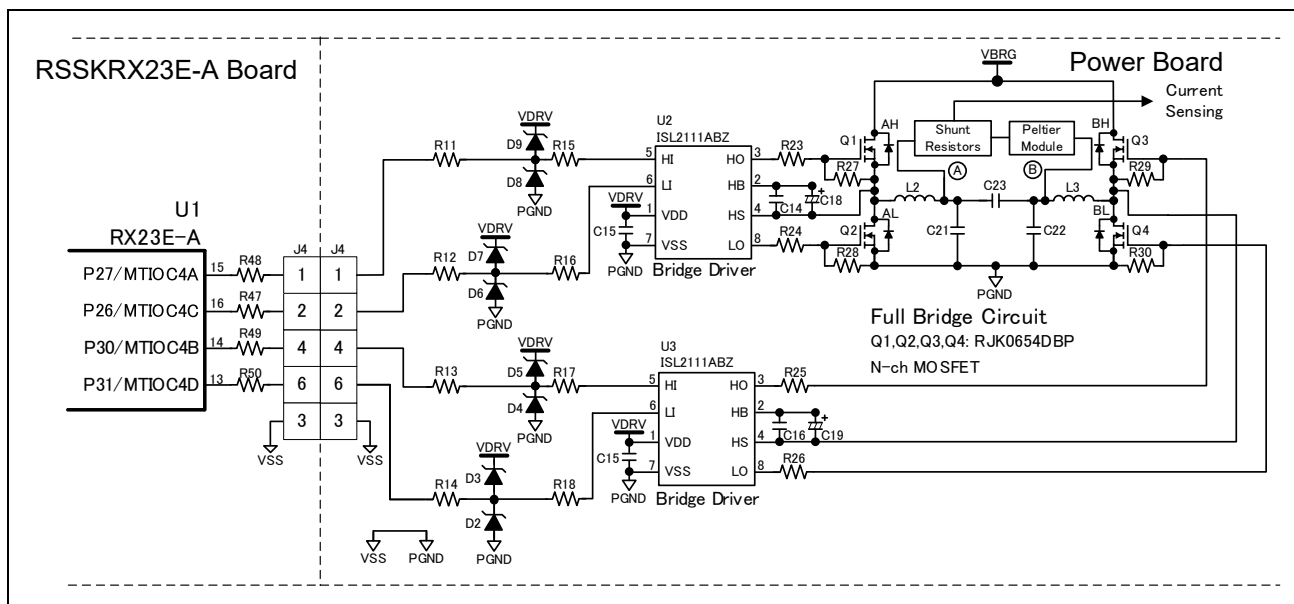


図 4-14 PWM 駆動回路

PWM 信号は RX23E-A の MTIOC4 を用いて出力します。MTIOC4 はハーフブリッジドライバ ISL2111 に入力します。ISL2111 はフルブリッジ回路の N-ch MOSFET、Q1、Q2、Q3、Q4 を駆動します。

(4) 電流検出回路

図 4-15 にペルチェモジュール電流検出回路を示します。

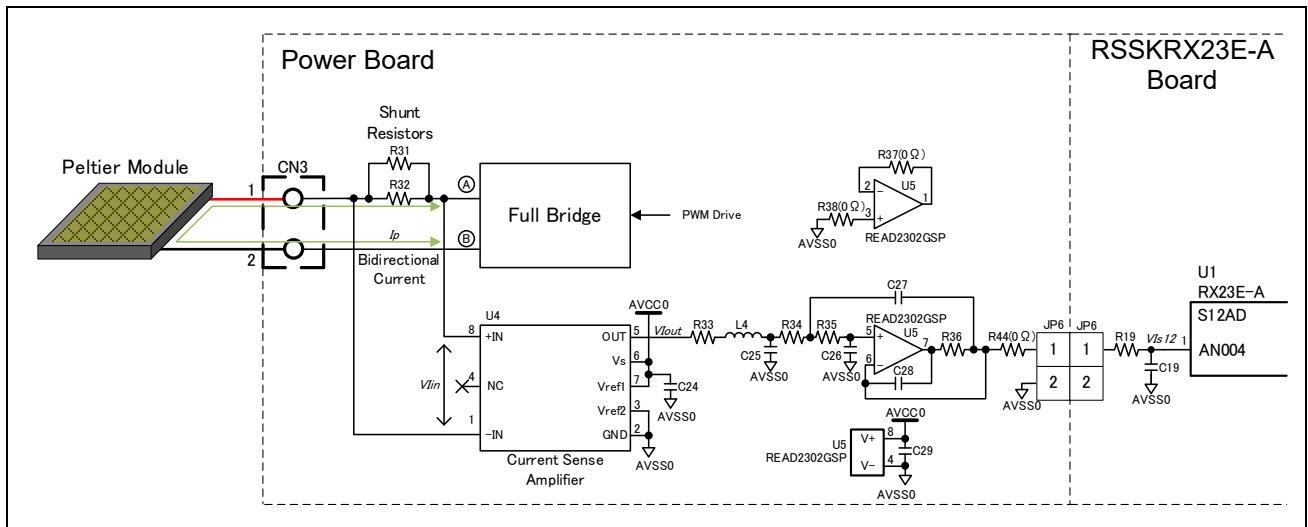


図 4-15 ペルチェモジュール電流検出回路

ペルチェモジュールに流れる電流 I_p はシャント抵抗 (R31、R32) で電圧 V_{in} に変換し、電流検出アンプ U4 に入力します。U4 内部で V_{in} を 20 倍に増幅し、5 番ピンに AVCC0 の 1/2 倍の電圧を中点として、0~AVCC0 までの電圧 V_{out} として出力します。U5 の OP アンプは、カットオフ 442Hz の 2 次ローパスフィルタ回路を構成しています。U5 の出力は JP6 を経由して RX23E-A の 1 番ピンに接続します。RX23E-A の 1 番ピンは S12AD (AN004) として使用します。S12AD 前段の R19、C19 は S12AD のサンプリング用のフィルタです。S12AD の正側基準電圧は AVCC0、負側基準電圧は AVSS0 を使用します。

I_p 、 V_{in} 、 V_{out} 、S12AD への入力電圧値 V_{Is12} および、S12AD の A/D 変換値 $ADdata_{s12}$ のそれぞれについて、定常状態における関係式を下式に示します。

ペルチェモジュールに流れる電流 I_p と電流検出アンプへの入力電圧 V_{in} の関係は、

$$V_{in} = I_p \cdot R_s, \quad R_s = \frac{R_{31}R_{32}}{R_{31} + R_{32}} \tag{4}$$

電流検出アンプの出力電圧 V_{out} は、

$$V_{out} = 20 \cdot V_{in} + \frac{AVCC0}{2} \tag{5}$$

U5、および R19、C19 によるフィルタは DC における増幅率は 1 なので S12AD への入力電圧 V_{Is12} は

$$V_{Is12} = V_{out} \text{ (DC 値)}$$

となります。

S12AD で取得する AD 値、 $ADdata_{s12}$ は、

$$ADdata_{s12} = \frac{V_{Is12}}{AVCC0} \cdot 2^{12} = \left(\frac{20 \cdot I_p \cdot R_s}{AVCC0} + \frac{1}{2} \right) \cdot 2^{12} \tag{6}$$

よって、 $ADdata_{s12}$ から I_p への換算式は以下のように求まります。

$$I_p = \frac{AVCC0}{20 \cdot R_s} \cdot \frac{ADdata_{s12} - 2^{11}}{2^{12}} \tag{7}$$

(5) 3 線式 RTD 計測回路

図 4-16 に 3 線式 RTD 計測回路を示します。

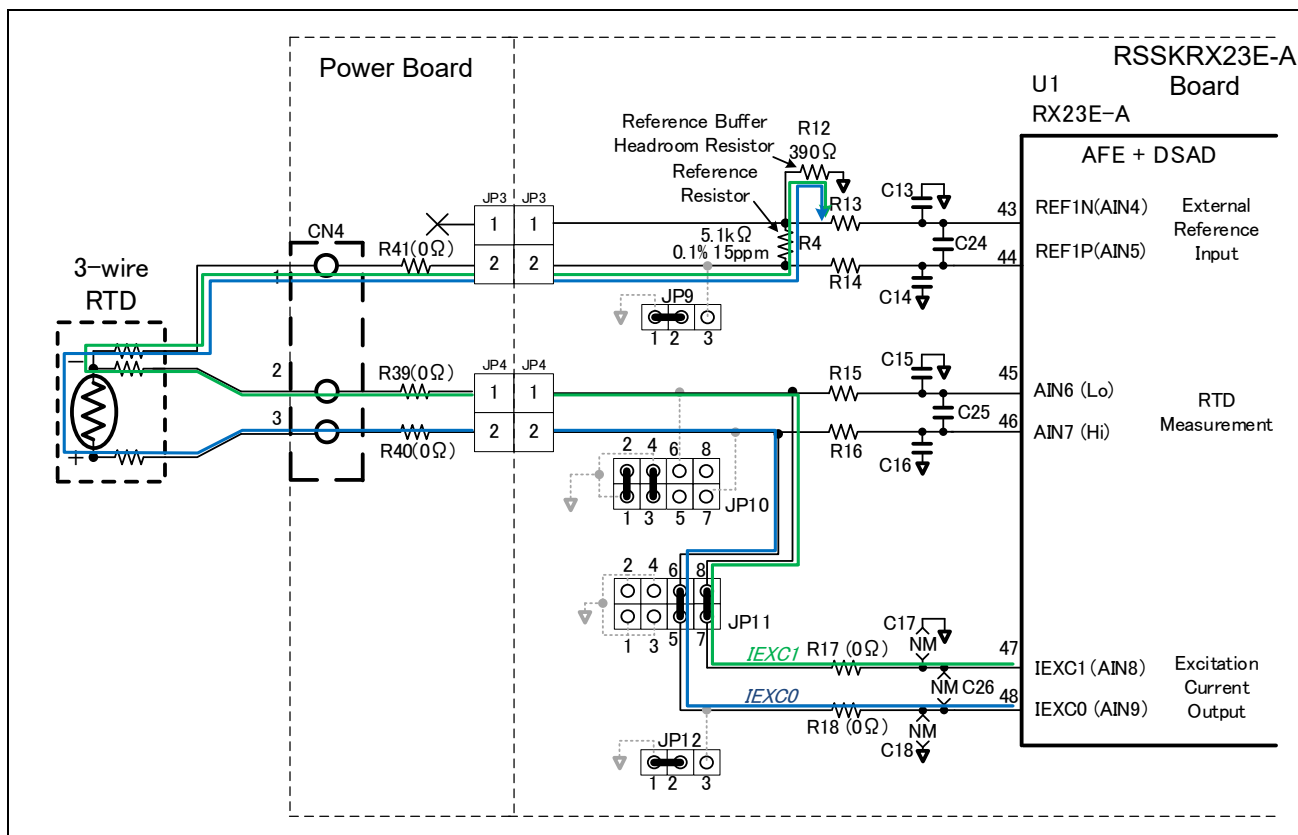


図 4-16 3 線式 RTD 計測回路

3 線式 RTD を電力ボードの CN4 に接続します。CN4 から JP3、JP4 を経由して RSSKRX23E-A に接続しています。3 線式 RTD の計測は AIN8、AIN9 から励起電流源 IEXC0、IEXC1 を出力し、AIN6、AIN7 間の電圧と REF1P、REF1N 間の電圧の比を測定し、MCU 内の演算で、3 線式 RTD の抵抗値を求めます。求めた抵抗値から、温度換算テーブルを用いて温度に換算します。

計測回路の詳細については「RSSKRX23E-A ユーザーズマニュアル ボード編」、RTD による温度計測の実装例については「RX23E-A グループ 測温抵抗体を使用した温度計測例 アプリケーションノート」を参照ください。

(6) USB シリアル変換回路

図 4-17 に本ボードの USB シリアル変換回路を示します。本システムでは RX23E-A の SCI5 インターフェースを使用し UART で通信を行います。U7 の UART-USB 変換 IC により、USB に変換し、PC に接続します。USB 通信で、PC からの指令値の受信と PC への温度計測結果の送信を行います。

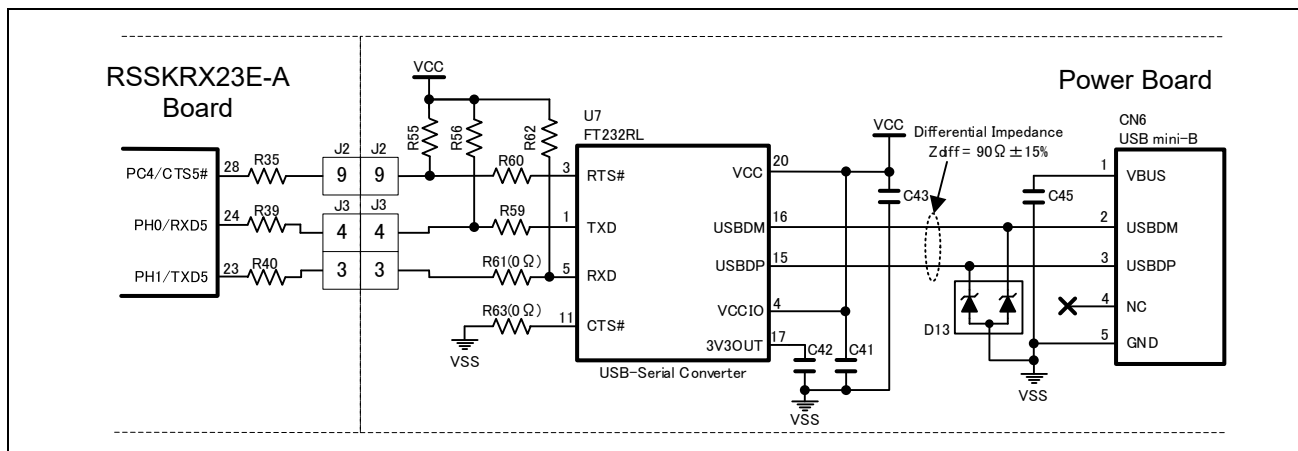


図 4-17 USB シリアル通信回路

4.1.4 ペルチェユニット

図 4-18 にペルチェユニットの構造を示します。また、表 4-6 にペルチェユニットの主要部品を示します。

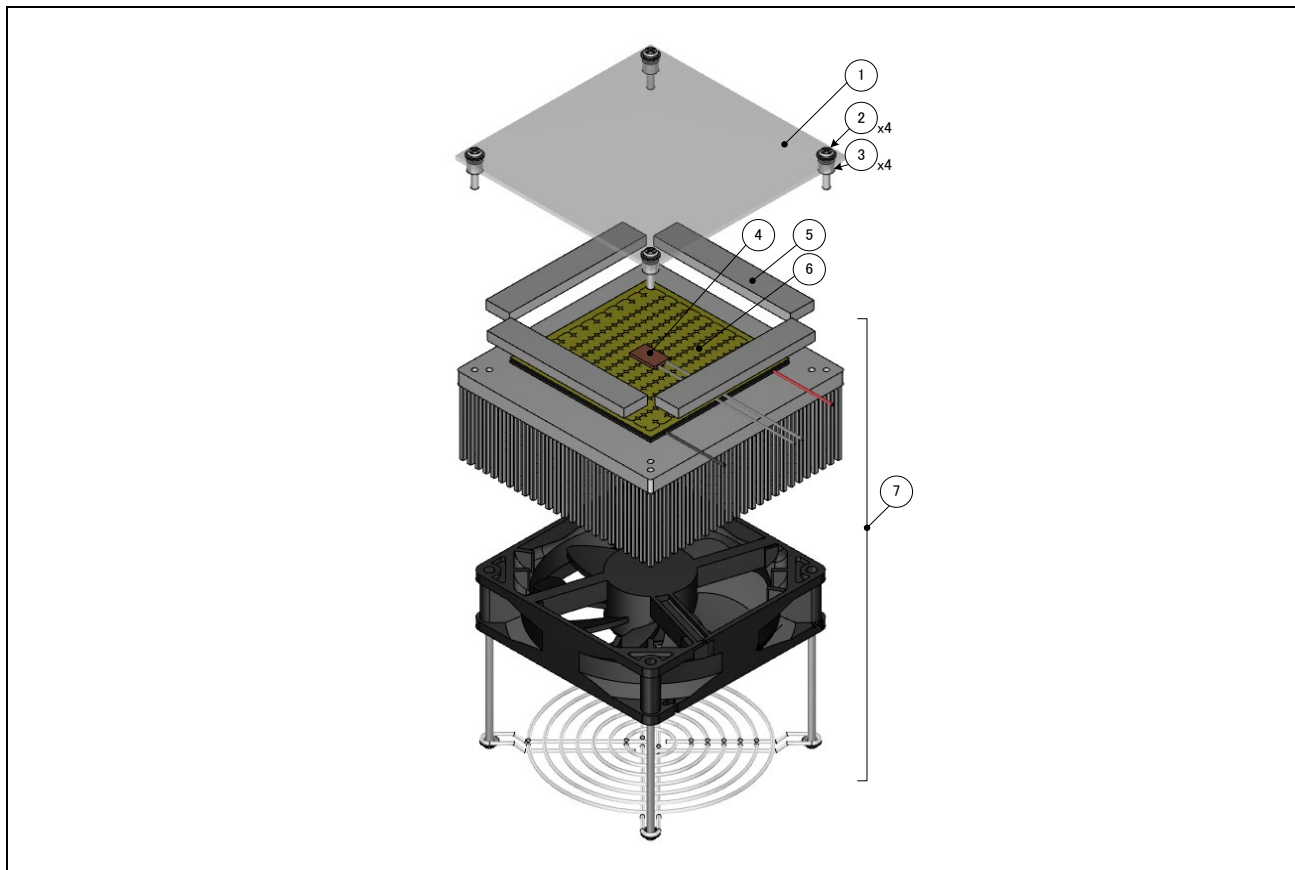


図 4-18 ペルチェユニットの構造

表 4-6 ペルチェユニット主要部品表

番号	部品名	部品型名	数量	メーカー名
1	アクリルカバー	—	1	住友化学株式会社
2	セムスネジ	B-0318	4	株式会社廣杉計器
3	スペーサ	C-303.5	4	
4	3線式 RTD	R060-33	1	株式会社チノー
5	防湿カバー	—	4	—
6	ペルチェモジュール	UT-7070KA-M	1	株式会社タイセー
7	アクティブヒートシンク	FS10040WM-0D5 (Custom)	1	株式会社アルファ

4.2 制御構成

4.2.1 動作原理

図 4-19 に本システムの制御ブロック図を示します。本システムでは制御の応答性と安定性を改善するために、温度 PID 制御と電流 PI 制御の 2 重ループで制御を行います。

本システムの温度制御は次のように動作します。

- ・ PC ツールから指定する温度指令値と、ペルチェ温度の偏差から温度 PID 演算により、電流指令値を算出
- ・ 電流指令値とペルチェ電流の偏差から、電流 PI 演算により出力電圧値を算出
- ・ 出力電圧値からフルブリッジ回路を駆動する PWM のデューティ比に変換
- ・ PWM 制御によりフルブリッジ回路を駆動し、ペルチェ電流を制御
- ・ ペルチェモジュールにペルチェ電流が流れ、ペルチェモジュールの温度が変化

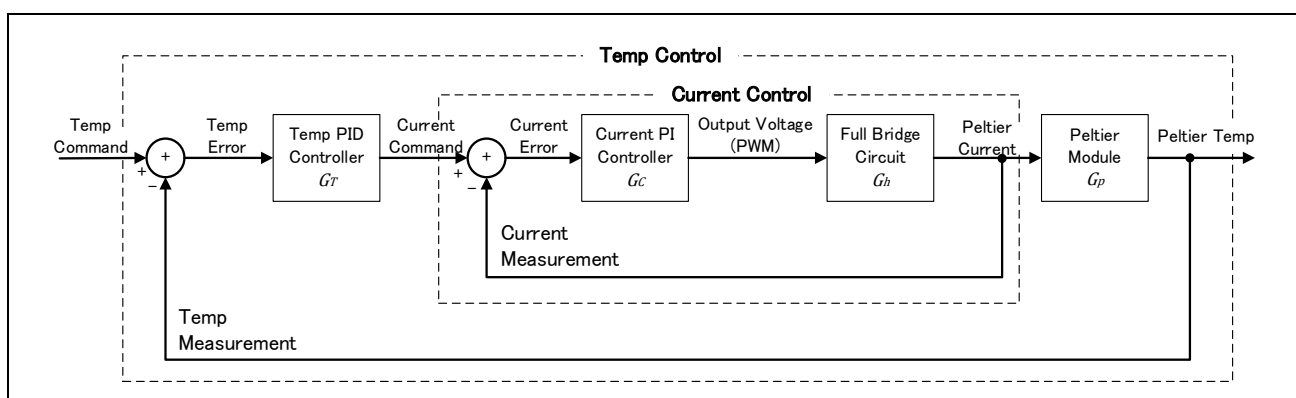


図 4-19 本システムの制御ブロック図

4.2.2 PID 制御

本システムでは電流制御器をPI制御、温度制御器をPID制御で構成しています。電流制御器のブロック図 4-20 に、温度制御器のブロック図 4-21 に示します。

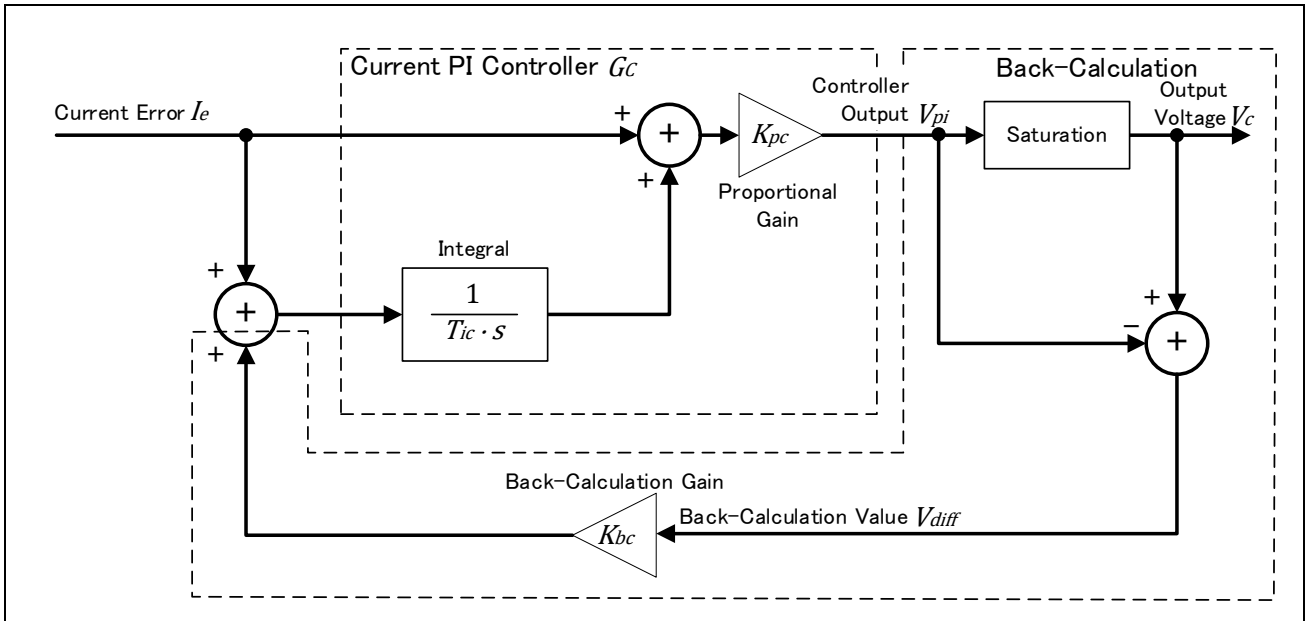


図 4-20 電流 PI 制御器

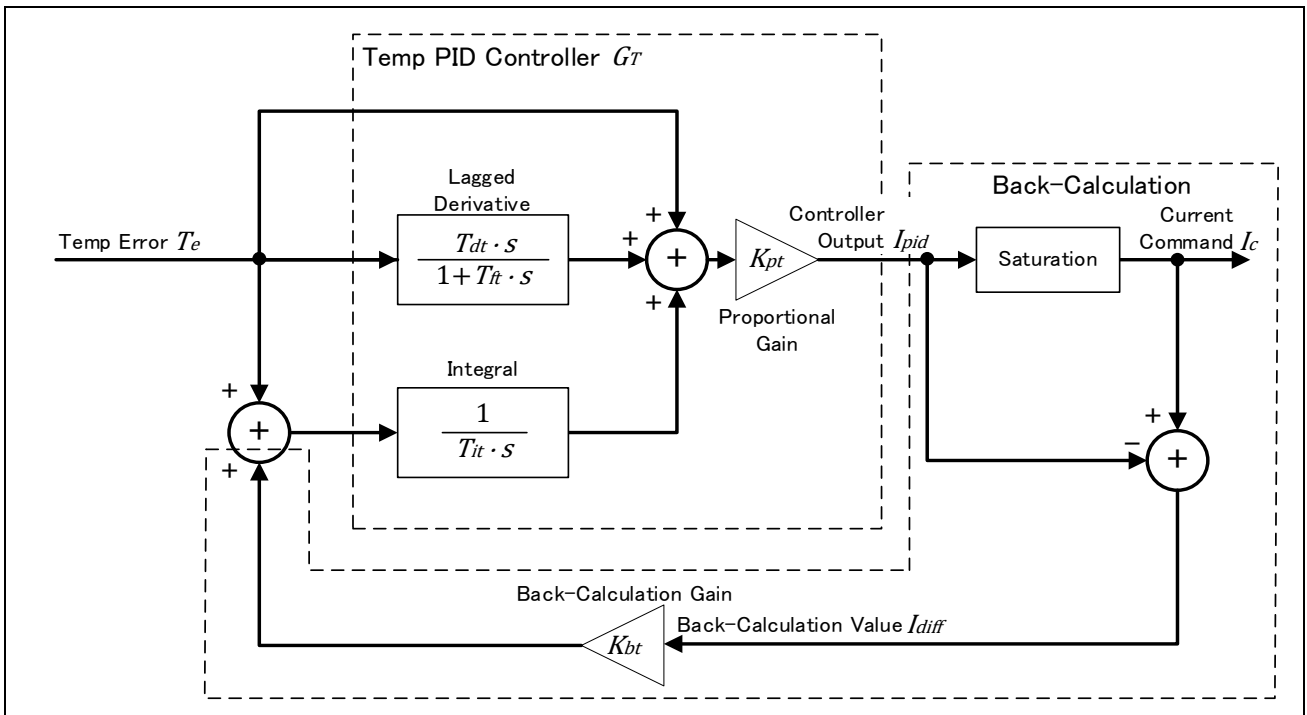


図 4-21 温度 PID 制御器

(1) 制御演算式

$V_{diff} = 0$ のとき、電流 PI 制御器は以下の伝達関数で表されます。

$$G_C = \frac{V_{pi}}{I_e} = K_{pc} \left(1 + \frac{1}{T_{ic} \cdot s} \right) \quad (8)$$

$I_{diff} = 0$ のとき、温度 PID 制御器は以下の伝達関数で表されます。

$$G_T = \frac{I_{pid}}{T_e} = K_{pt} \left(1 + \frac{1}{T_{it} \cdot s} + \frac{T_{dt} \cdot s}{1 + T_{ft} \cdot s} \right) \quad (9)$$

上式において、

s : ラプラス演算子

T_{ic} : 電流 PI 制御器積分時間

T_{it} : 温度 PID 制御器積分時間

T_{dt} : 温度 PID 制御器微分時間

T_{ft} : 温度 PID 制御器不完全微分フィルタ時間

を表します。

(2) 微分要素

温度制御に導入している微分要素は、ペルチェモジュールの応答性の改善に寄与します。微分要素は不要なノイズの増幅を抑制するために、不完全微分要素にし、帯域制限をかけています。

(3) アンチリセットwindアップ

電流制御、温度制御ともに、積分飽和による応答性の悪化を抑えるために、制御器の出力をリミッタで制限し、リミッタ前とリミッタ後の制御器の出力の差を積分器の入力へ帰還しています。これにより、制御器の出力が制限値以上になったときに、積分器への入力小さくなり、積分器の出力が上昇し続けることを抑制することができます。

アンチリセットwindアップにより出力にリミットがかかったときの制御器の出力は以下のようになります。

電流 PI 制御器の出力 V_{pi}

$$V_{pi} = K_{pc} \left\{ \left(1 + \frac{1}{T_{ic} \cdot s} \right) I_e + \frac{1}{T_{ic} \cdot s} \cdot K_{bc} \cdot V_{diff} \right\} \quad (10)$$

温度 PID 制御器の出力 I_{pid}

$$I_{pid} = K_{pt} \left\{ \left(1 + \frac{1}{T_{it} \cdot s} + \frac{T_{dt} \cdot s}{1 + T_{ft} \cdot s} \right) T_e + \frac{1}{T_{it} \cdot s} \cdot K_{bt} \cdot I_{diff} \right\} \quad (11)$$

4.2.3 温度制御設計

図 4-19 における各ブロックの伝達関数を表 4-7 に示します。また制御系の各定数を表 4-8 に示します。

表 4-7 各伝達関数

項目	伝達関数	単位
電流 PI 制御器	$G_C = K_{pc} \left(1 + \frac{1}{T_{ic} \cdot s} \right)$	V/A
温度 PID 制御器	$G_T = K_{pt} \left(1 + \frac{1}{T_{it} \cdot s} + \frac{T_{dt} \cdot s}{1 + T_{ft} \cdot s} \right)$	A/°C
フルブリッジ回路伝達関数	$G_n = \frac{1}{R_s + R_p} \cdot \frac{\omega_n^2}{s^2 + 2\zeta\omega_n s + \omega_n^2}$	A/V
ペルチェモジュール伝達関数*	$G_p = \frac{K_{pel}}{1 + T_p s}$	°C/A

【注】 ペルチェモジュールの伝達関数はペルチェモジュールに電流ステップを入力したときの温度応答を計測し、計測結果から近似値を求めています。

表 4-8 制御系の各定数

記号	説明	値	単位
K_{pc}	電流制御器比例ゲイン	1.2	V/A
T_{ic}	電流制御器積分時間	1.2×10^{-3}	s
K_{bc}	電流制御器積分逆算ゲイン	0.8	A/V
K_{pt}	温度制御器比例ゲイン	3.0	A/°C
T_{it}	温度制御器積分時間	5.0	s
T_{dt}	温度制御器微分時間	1.0	s
T_{ft}	温度制御器不完全微分フィルタ時間	0.1	s
K_{bt}	温度制御器積分逆算ゲイン	0.8	°C/A
ω_n	フルブリッジ回路固有角周波数 $\omega_n^2 = \frac{1}{L_f(C_a + 2C_b)}$	48795.0	rad/s
ζ	フルブリッジ回路減衰定数 $\zeta = \frac{1}{R_s + R_p} \sqrt{\frac{L_f}{C_a + 2C_b}}$	1.2	-
L_f	フルブリッジ回路フィルタインダクタ	100×10^{-6}	H
C_a	フルブリッジ回路ペルチェモジュール間コンデンサ	1.0×10^{-6}	F
C_b	フルブリッジ回路コンデンサ	2.2×10^{-6}	F
R_p	ペルチェ素子の内部抵抗	4.0	Ω
R_s	電流検出抵抗	0.028	Ω
K_{pel}	ペルチェ温度ゲイン	15.3	°C/A
T_p	ペルチェフィルタ時間	28	s

本システムの電流制御と温度制御の一巡伝達関数と閉ループ伝達関数を表 4-9 に示します。電流制御の周波数特性を図 4-22 に、温度制御の周波数特性を図 4-23 に示します。

表 4-9 温度制御ループと電流制御ループの伝達関数

項目	一巡伝達関数	閉ループ伝達関数
電流制御	$L_C = G_C \cdot G_h$	$\omega_C = \frac{L_C}{1 + L_C}$
温度制御	$L_T = G_T \cdot \omega_C \cdot G_p$	$\omega_T = \frac{L_T}{1 + L_T}$

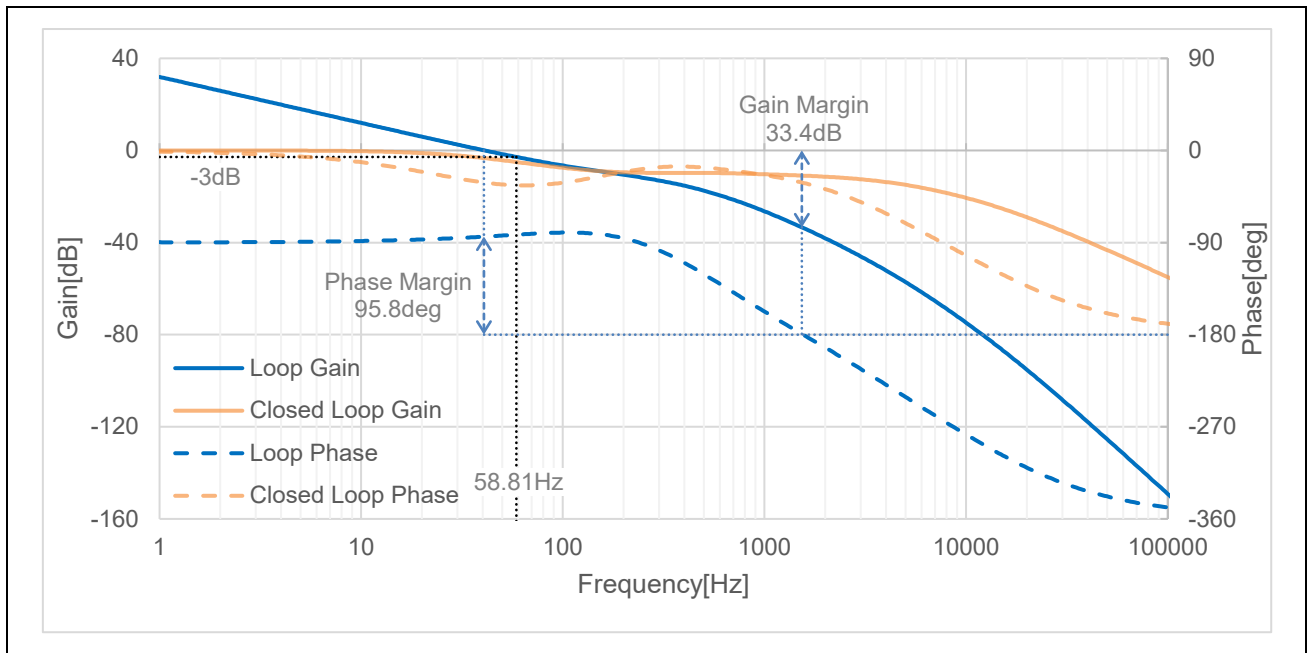


図 4-22 電流制御周波数特性

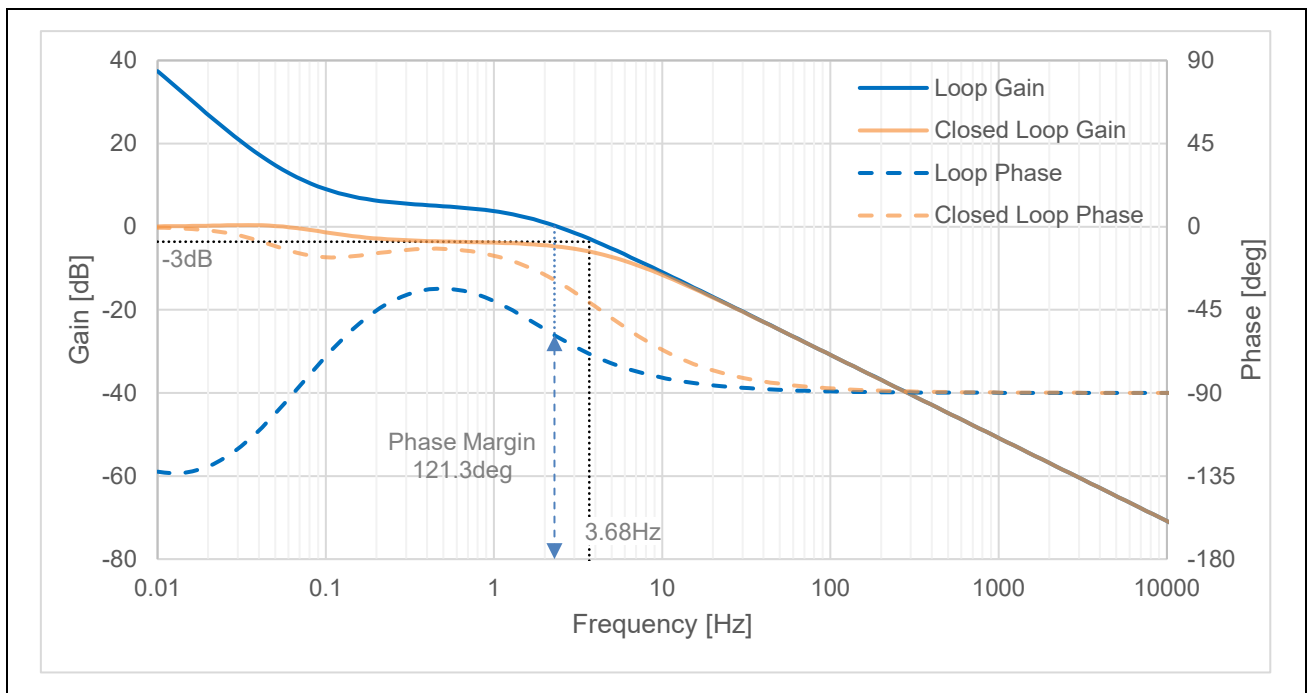


図 4-23 温度制御周波数特性

5. サンプルプログラム

5.1 動作概要

図 5-1 に本サンプルプログラムの処理フローを示します。

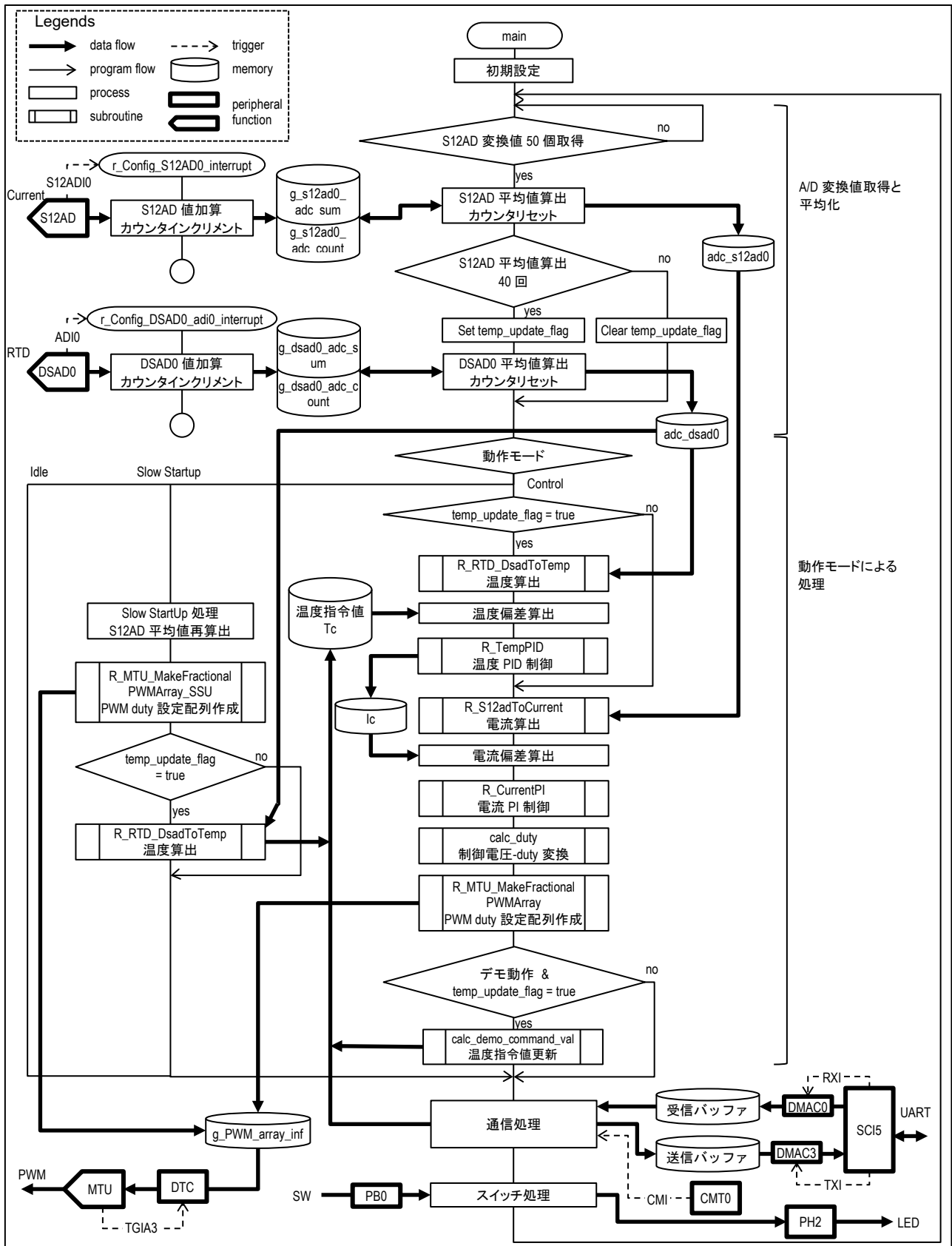


図 5-1 温度制御処理フロー

各処理の概要は次の通りです。

- 初期設定

次の初期設定を行います。

- ・ 通信の送信/受信バッファを初期化し、SCI5 の動作開始
- ・ スイッチ状態の取得とデモ動作設定
- ・ S12AD、DSAD0 の A/D 変換開始
- ・ PWM 出力開始、詳細は 5.4 を参照

- A/D 変換値取得と平均化

S12AD と DSAD0 の A/D 変換値は各割り込み処理関数で取得し、それぞれ取得回数のカウントと A/D 変換値の加算を行います。メインルーチンでは、各 A/D 変換値の平均化処理を行います。S12AD の A/D 変換値を 50 回取得すると平均化を行います。DSAD0 の A/D 変換値は、S12AD の A/D 変換値平均化を 40 回行ったときに平均化し、温度更新フラグを立てます。

- 動作モードによる処理

動作モードによりスロースタートアップ処理又は温度制御処理を行います。

- ・ 起動時にスロースタートアップ処理を行い、温度制御処理に移行します。
- ・ 温度制御処理は温度指令値に基づき温度制御を行います。温度指令値は PC ツールから指示します。またデモ動作中は温度制御処理後に指令値を更新します。

スロースタートアップ処理の詳細は 5.5 を、温度制御処理の詳細は 5.3 を、デモ動作の詳細は 5.6 を参照ください。

- 通信制御

PC ツールプログラムとの通信処理を行います。詳細は 5.7 を参照ください。

- スイッチ処理

スライドスイッチの状態を取得し、デモ動作 On/Off を切り替えます。

ポート PB0 が High で On、Low で Off です。

図 5-2 に制御処理のタイミングチャートを、表 5-1 に使用する割り込みの優先レベルを示します。

起動後、PC ツールとの接続により動作を開始し、S12AD の A/D 変換 50 回毎に処理を行います。初めにスロースタートアップを行い、その後温度制御動作に移行します。

温度制御動作では、S12AD の A/D 変換値 50 個の平均値から制御電流を算出して電流 PI 制御演算を行い、PWM 出力のデューティを設定します。また、電流制御 40 回毎に DSAD の A/D 変換値の平均値から温度を算出し、温度指令値に対する温度 PID 制御演算を行い、電流制御の電流指令値を更新します。

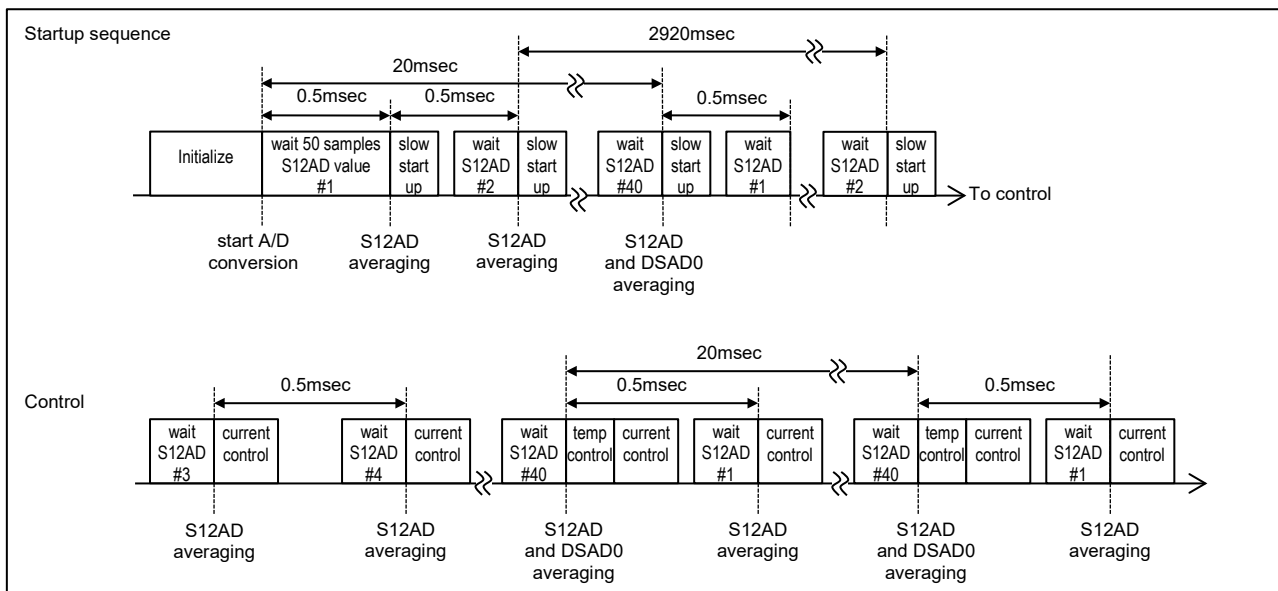


図 5-2 制御処理タイミングチャート

表 5-1 割り込み優先レベル

優先レベル	周辺機能	要因	受付	処理
15	SCI5	RXI5	DMAC0	受信データ転送
15	SCI5	TXI5	DMAC3	送信データ転送
12	MTU3	TGIA3	DTC、プログラム	
10	S12AD	S12ADI0	プログラム	S12AD 変換値取得
8	DSAD0	ADI0	プログラム	DSAD0 変換値取得

5.2 使用する周辺機能と端子一覧

本サンプルプログラムで使用する周辺機能一覧を表 5-2 に、使用端子一覧を表 5-3 に、未使用端子と処置の一覧を表 5-4 に示します。合わせて各周辺機能の設定条件を示します。

周辺機能の設定は Smart Configurator(以降、SC)のコード生成機能を用いて生成しています。

表 5-2 使用する周辺機能一覧

周辺機能	用途
AFE、DSAD0	RTD を介したペルチェモジュールの温度計測、A/D 変換
AFE、S12ADE	ペルチェモジュールの電流計測、A/D 変換
MTU3,4	ペルチェモジュールに印加する電圧の PWM 制御
DTC	MTU3 のコンペアマッチ割り込みをトリガにデューティ設定値を転送
SCI5	PC ツールプログラムとの UART 通信
DMAC0	SCI5 の受信データフル割り込みをトリガにデータ転送
DMAC3	SCI5 の送信データエンpty割り込みをトリガにデータ転送
CMT0	SCI5 の通信タイムアウト検出
ポート PB0	スライドスイッチ (デモ動作切替、High:On, Low:Off)
ポート PH2	LED、点灯でデモ動作

表 5-3 使用端子一覧

ピン番号	端子名	入出力	用途
1	AIN10/AN004	入力	S12ADE による電流計測
6	P37/XTAL	出力	8MHz 水晶発振子
8	P36/EXTAL	入力	8MHz 水晶発振子
13	P31/MTIOC4D	出力	PWM 出力、ペルチェ電流制御(B-L) 初期値 Low 出力
14	P30/MTIOC4B	出力	PWM 出力、ペルチェ電流制御(B-H) 初期値 Low 出力
15	P27/MTIOC4A	出力	PWM 出力、ペルチェ電流制御(A-H) 初期値 Low 出力
16	P26/MTIOC4C	出力	PWM 出力、ペルチェ電流制御(A-L) 初期値 Low 出力
22	PH2	出力	LED1 点灯(デモ動作中)、消灯(通常動作)
23	PH1/TXD5	出力	SCI5 UART 送信
24	PH0/RXD5	入力	SCI5 UART 受信
28	PC4/CTS5#	入力	SCI5 CTS 入力
31	PB0	入力	スライドスイッチ(デモ動作 On/Off 切替)
43	AIN4/REF1N	入力	DSAD0 -側基準電圧
44	AIN5/REF1P	入力	DSAD0 +側基準電圧
45	AIN6	入力	DSAD0 -側入力
46	AIN7	入力	DSAD0 +側入力
47	AIN8/IEXC1	出力	励起電流の出力
48	AIN9/IEXC0	出力	励起電流の出力

表 5-4 未使用端子と処置の一覧

ピン番号	端子名	入出力	未使用の処置
2	AIN11/AN005	入力	GND に接続
12	P35/NMI	入力	VCC にプルアップ
17	P17	出力	Low 出力
18	P16	出力	Low 出力
19	P15/CRXD0	入力	入力 (CAN ドライバの予約)
20	P14/CTXD0	入力	入力 (CAN ドライバの予約)
21	PH3	入力	VCC にプルアップ (CAN ドライバの予約)
25	PC7	出力	Low 出力
26	PC6	出力	Low 出力
27	PC5	出力	Low 出力
29	PB1	入力	フルブリッジドライバの印加電圧モニタ
37	REF0N	入力	AVSS0 に接続 (JP7)
38	REF0P	入力	AVCC0 に接続 (JP8)
39	AIN0	入力	AVSS0 に接続
40	AIN1	入力	AVSS0 に接続
41	AIN2	入力	AVSS0 に接続
42	AIN3	入力	AVSS0 に接続

5.2.1 AFE・DSAD0

RTD を使用したペルチェモジュールの温度計測に AFE、DSAD0 を使用します。AFE、DSAD0 の設定を表 5-5、表 5-6 に示します。

表 5-5 AFE 設定

項目	設定	
バイアス出力設定	未使用	
励起電流設定	動作モード	2 チャンネル出力モード
	励起電流	250 μ A
	IEXC0 出力端子	AIN9
	IEXC0 断線検出アシスト	未使用
	IEXC1 出力端子	AIN8
	IEXC1 断線検出アシスト	未使用
低電圧検出設定	未使用	
ローサイドスイッチ制御設定	未使用	

表 5-6 DSAD0 設定

項目	設定	
アナログ入力チャンネル設定	チャンネル 0 : 有効 チャンネル 1~5 : 無効	
$\Delta \Sigma$ A/D 変換器動作電圧設定	3.6V-5.5V (高精度)	
$\Delta \Sigma$ A/D 変換器動作モード設定	ノーマルモード	
動作クロック設定	PCLKB/8 (4MHz)	
開始トリガソース	ソフトウェアトリガ	
割り込み設定	$\Delta \Sigma$ A/D 変換終了割り込みを許可 (ADIO)	有効
	優先順位	8
	$\Delta \Sigma$ A/D 変換スキャン完了割り込みを許可 (SCANENDIO)	未使用
ユニット間同期スタート設定	未使用	
異常電圧及び断線検出設定	未使用	
チャンネル設定	チャンネル 0	
アナログ入力設定	正入力信号	AIN7
	負の入力信号	AIN6
	基準電圧	REF1P/REF1N
	+側基準電圧のバッファ	有効
	-側基準電圧のバッファ	有効
アンプリファイア設定	アンプ選択	PGA
	PGA ゲイン設定	x32
$\Delta \Sigma$ A/D 変換設定	A/D 変換モード	通常動作
	データ形式	2 の補数形式
	A/D 変換回数	即値モード、1 回
	オーバサンプリング比	512 (976.5625 SPS)
	オフセット補正を設定する	未使用 (デバイスデフォルト)
	ゲイン補正を設定する	未使用 (デバイスデフォルト)
	平均化データを使う	未使用
断線検出アシスト設定	未使用	

5.2.2 S12ADE

ペルチェモジュールの電流計測に S12ADE を使用します。S12ADE の設定を表 5-7 に示します。

表 5-7 AFE、S12ADE の設定

項目		設定
アナログ入力モード設定		未使用
アナログ入力チャンネル設定		AN004 : 有効 他のチャンネル : 無効
変換開始トリガ設定		MTU4.TADCORA と MTU4.TCNT のコンペアマッチ
割り込み設定	AD 変換終了割り込みを許可 (S12ADI0)	有効
	優先順位	10
A/D 変換値を加算/平均		未使用
A/D 変換動作選択ビット		高速変換動作
高電位側基準電圧選択ビット		AVCC0
低電位側基準電圧選択ビット		AVSS0
自己診断設定		未使用
断線検出アシスト設定		未使用
データレジスタ設定	データレジスタフォーマット	フォーマット : 右詰めにする
	自動クリアイネーブル	自動クリアを禁止
	加算/平均モード選択	加算モード
	加算回数	1 回変換
データ格納バッファ設定		禁止
ウィンドウ機能設定		禁止
ウィンドウ A/B 動作設定		未使用
入力サンプリング時間設定	AN004	0.406[μ s]
イベントリンクコントロールビット設定		全てのスキャン終了時にイベント発生

5.2.3 MTU3,4・DTC

ペルチェモジュールに印加する電圧の PWM 制御のため、MTU3,4 を相補 PWM モード 2 で使用します。MTU のカウントアップ時 S12AD の変換開始トリガを、カウントダウンの谷で PWM のデューティ比を更新します。PWM のカウンタは DTC を使用して設定します。

MTU3,4 の設定を表 5-8 に、DTC の設定を表 5-9 に示します。

表 5-8 MTU3,4 設定

項目		設定
同期動作設定		未使用
TCNT3 カウンタ設定	カウンタクリア要因	カウンタクリアなし
	カウントクロックの選択	PCLK
PWM 出力設定	タイマ運転期間	10 μ s
	デッドタイム	許可、0.5 μ s
	レジスタ初期値(MTU3.TGRB)	100
	レジスタ初期値(MTU4.TGRA)	16
	レジスタ初期値(MTU4.TGRB)	16
ブラシレス DC モータ制御設定		未使用
出力端子設定	MTIOC3A トグル出力を有効にする	未使用
	PWM 出力レベルの設定のバッファ転送タイミング	バッファ転送しない
	V 相 : MTIOC4A 端子の初期出力レベル (正相)	アクティブレベル H
	V 相 : MTIOC4C 端子の初期出力レベル (逆相)	アクティブレベル H
	W 相 : MTIOC4B 端子の初期出力レベル (正相)	アクティブレベル H
	W 相 : MTIOC4D 端子の初期出力レベル (逆相)	アクティブレベル H
割り込み設定	コンペアマッチ割り込み(TGIA3)許可	許可
	割り込み間引き回数	0 回
	優先順位	レベル 12
	コンペアマッチ割り込み(TGIB3)許可	未使用
	コンペアマッチ割り込み(TGIA4)許可	
	コンペアマッチ割り込み(TGIB4)許可	
	アンダーフロー割り込み(TGIV4)許可	
バッファレジスタと同期クリア動作設定		未使用
A/D 変換開始トリガ設定	周期レジスタ値とカウンタ値のコンペアマッチにより A/D 変換開始を要求 (MTU4 のトリガ信号 TRG4ABN)	有効
	周期レジスタ A とカウンタの一致による A/D 変換開始を有効にする。	有効
	A/D 変換トリガ出力条件	カウントアップ時の一致で出力
	A/D 変換開始要求周期レジスタ A 初期値	16
	周期バッファレジスタ A 初期値	16

表 5-9 DTC 設定

項目		設定
起動要因設定	起動要因	MTU3(TGIA3)
	チェーン転送	未使用
転送モード設定		ブロック転送モード
転送データサイズ設定		16 ビット
割り込み設定		指定されたデータ転送終了時、CPU への割り込みが発生
ブロック/リピート転送設定		転送先
転送アドレスと カウント設定	転送元アドレス	0x00000000 (プログラムで指定)、インクリメント
	転送先アドレス	0x000D0A28 (MTU4.TGRC)、インクリメント
	転送回数	1 (プログラムで指定)
	ブロックサイズ	2

5.2.4 SCI5・DMAC0・DMAC3・CMT0

PC ツールプログラムとの通信に SCI5 を調歩同期モードで使用します。受信データの取得には DMAC0、送信データの設定に DMAC3 を使用します。また、通信タイムアウトの検出に CMT0 を使用します。

各周辺機能の設定条件を以下に示します。

表 5-10 SCI5 設定

項目		設定
スタートビットの検出		RXD5 端子の Low レベル
データ・ビット長設定		8 ビット
パリティ設定		禁止
ストップビット設定		1 ビット
データ転送方向設定		LSB ファースト
転送速度設定	転送クロック	内部クロック
	ビットレート	3000000 (3Mbps)
	ビットレートモジュレーション機能有効	有効
	SCK5 端子機能	SCK5 を使用しない
ノイズフィルタ設定		未使用
ハードウェアフロー制御設定		CTS5#
データ処理設定	送信データ処理	DMAC3 で処理する
	受信データ処理	DMAC0 で処理する
割り込み設定	受信エラー割り込み許可	未使用
	TXI5, RXI5, TEI5, ERI5 優先順位	レベル 15
コールバック機能設定		未使用

表 5-11 DMAC 設定

項目		設定	
		DMAC0	DMAC3
DMA 起動要因		SCI5 (RXI5)	SCI5 (TXI5)
起動要因フラグ制御		起動要因フラグをクリアする	
転送モード		フリーランニングモード	ノーマル転送
転送データサイズ		8bit	
転送回数/リピートサイズ/ブロックサイズ		-	1 (ソフトウェアで設定)
転送元アドレス設定	転送先アドレス	0008 A0A5h(SCI5.RDR) アドレス固定	(ソフトウェアで設定) アドレスインクリメント
	転送先アドレスに拡張リピートエリアを設定する	-	有効
	拡張リピートエリア		当該アドレスの下位 8 ビット(256 バイト)
転送先アドレス設定	転送先アドレス	(ソフトウェアで設定) アドレスインクリメント	0008 A0A3h(SCI5.TDR) アドレス固定
	転送先アドレスに拡張リピートエリアを設定する	有効	-
	拡張リピートエリア	当該アドレスの下位 8 ビット(256 バイト)	
割り込み設定		未使用	

表 5-12 CMT0 の設定

項目		設定
クロック設定		PCLKB/512
コンペアマッチ設定	インターバル時間	1000ms
	コンペアマッチ割り込みを許可(CMI0)	許可
	優先順位	レベル 0 (割り込み禁止)

5.2.5 ポート

ポート PB0 とポート PH2 を使用します。表 5-4 に示す未使用ポートは出力 Low に設定します。

ポート PB0 は、スライドスイッチの読み込みに使用します。ポート PH2 は LED の点灯・消灯に使用します。

ポート PB0、PH2 の設定を表 5-13 に示します。

表 5-13 ポート BP0・PH2 の設定

ポート選択	PORTB	PORTH
使用ポート	PB0	PH2
設定	入力 内蔵プルアップ：未使用	出力 CMOS 出力 1 を出力 (LED 消灯)

5.3 温度制御

温度制御は、温度 PID 制御と電流 PI 制御で構成します。

5.3.1 温度 PID 制御

温度 PID 制御は、温度指令値と RTD で計測した現在温度の差から、電流 PI 制御に対する電流指令値を算出します。温度 PID 制御のシグナルフロー図 5-3 に示します。

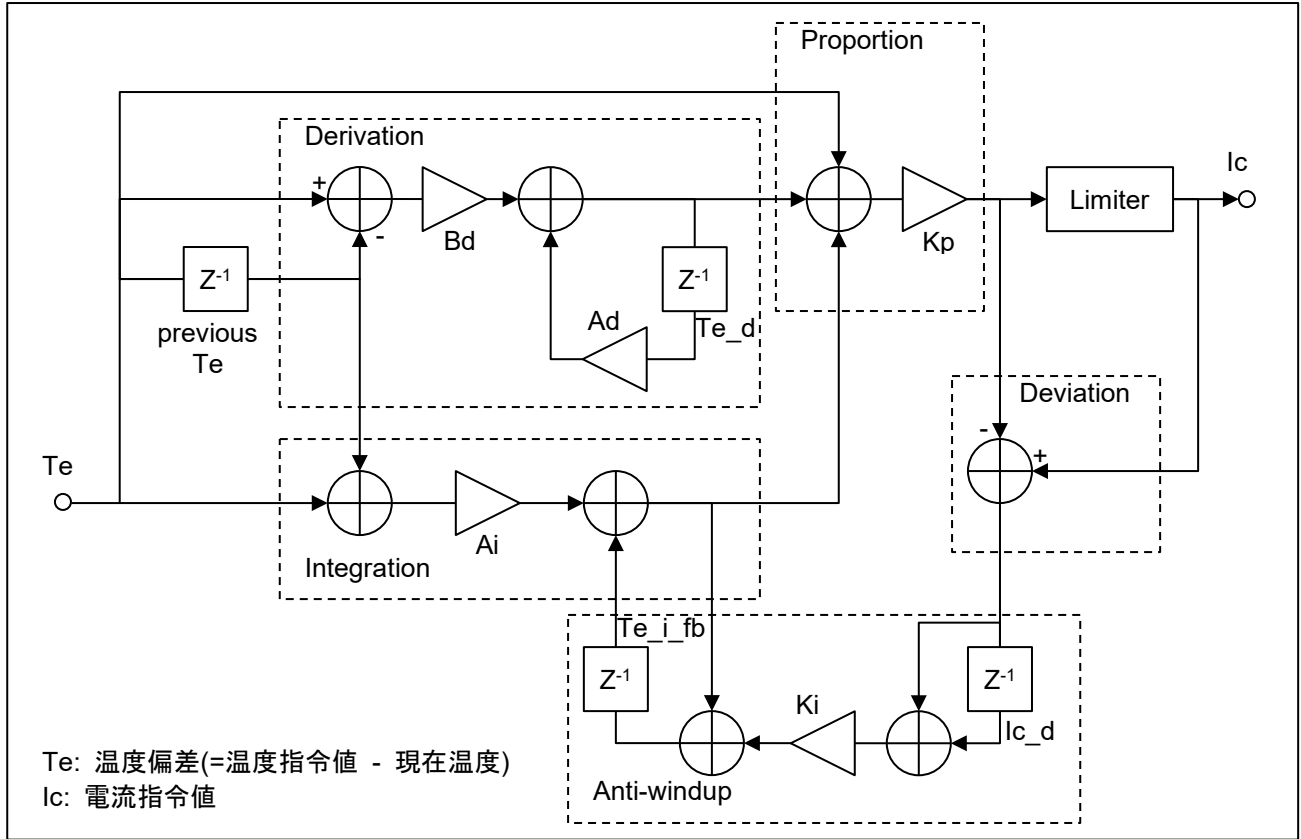


図 5-3 温度 PID 制御シグナルフロー

5.3.2 電流 PI 制御

電流 PI 制御は、電流指令値と現在の電流値の差に対して、ペルチェモジュールに印加する電圧を算出します。算出した電圧は PWM のデューティ値に変換し、PWM 出力デューティとして設定します。電流 PI 制御のシグナルフローを図 5-4 に示します。

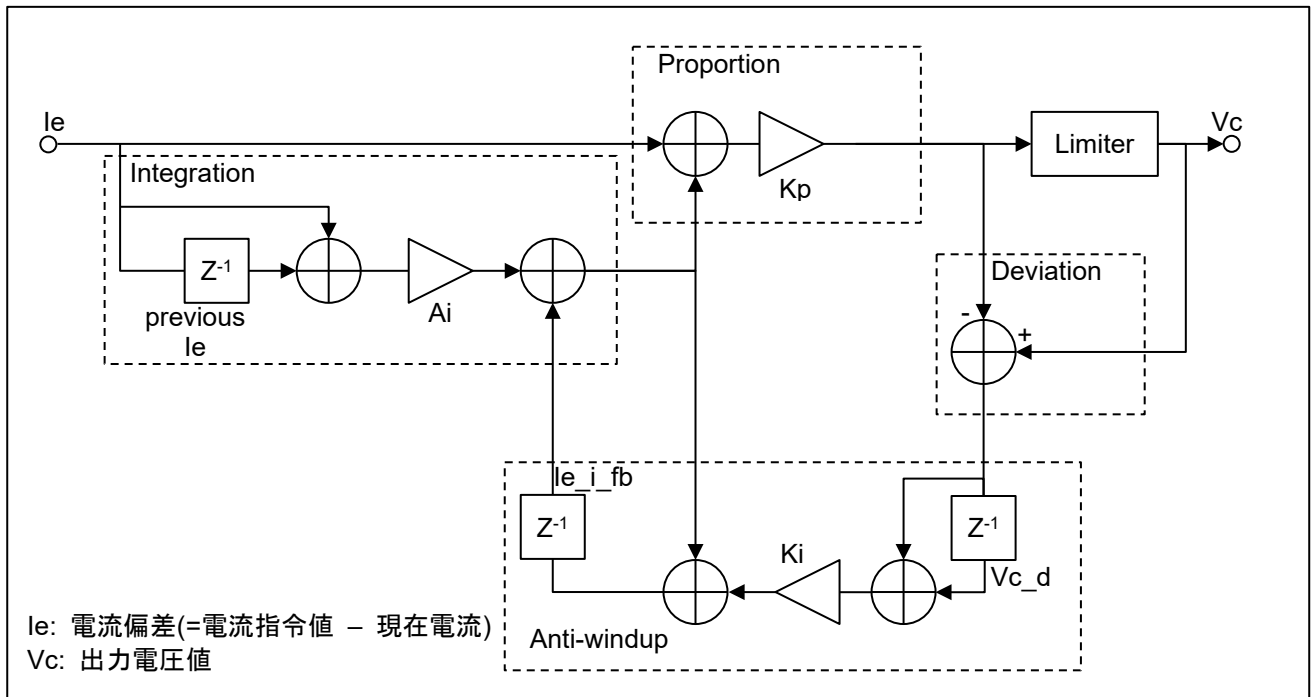


図 5-4 電流 PI 制御シグナルフロー

PWM のデューティ値は、次式のように、ペルチェモジュールに印加する電圧 V_c と、システム電源電圧 V_{BRG} の比で求めます。

$$PWM\ duty = \frac{V_c}{V_{BRG}}$$

求めた PWM デューティ値が設定可能な範囲を越える場合は、各上限・下限値とします。

PWM デューティ値の上限・下限値は表 5-17 のマクロ定義を参照ください。

5.4 PWM 制御

本プログラムでは、「4.1.3.2(2) フルブリッジ回路」に示すように、MTU を使用した相補 PWM 出力により電流の制御を行います。

電流 PI 制御で算出した PWM のデューティ値に対して、MTU に設定する値は分解能が低くなります。精度向上のために、電流制御周期の MTU 設定値の平均が PWM の目標デューティ値となるように、MTU 設定値の+1 または-1 の値を混入した MTU 設定値配列を作成し、MTU 設定値更新周期毎に適用します。PWM 出力のデューティのばらつきはハードウェアのローパスフィルタ効果により平均化されて、電流制御で算出した値に近づきます。本プログラムでは、電流制御周期に対応する MTU 設定値更新周期は 50 回のため、理論上 1/50 の精度向上を見込みます。

図 5-5 に PWM 制御動作のタイミングチャートを示します。

S12AD の A/D 変換開始は MTU の PWM 出力周期と同期させています。MTU 設定値は MTU のコンペアマッチをトリガに MTU 設定値配列から DTC で書き込みます。

電流 PI 制御処理は、S12AD の A/D 変換 50 回毎に行い、算出した PWM デューティ値に対して 50 個の MTU 設定値を配列に格納します。MTU 設定値配列は 2 本あり、プログラムは DTC 転送に使っていない配列に 50 個の設定値を格納します。

S12AD の A/D 変換 50 回終了検知から MTU 設定値配列への設定値格納までに要する処理時間を確保するため、MCU 起動時は PWM 設定値配列サイズを増やし、DTC 転送終了タイミングを遅らせます。本プログラムでは PWM 出力 3 周期分遅らせることで、処理に必要な時間を確保しています。

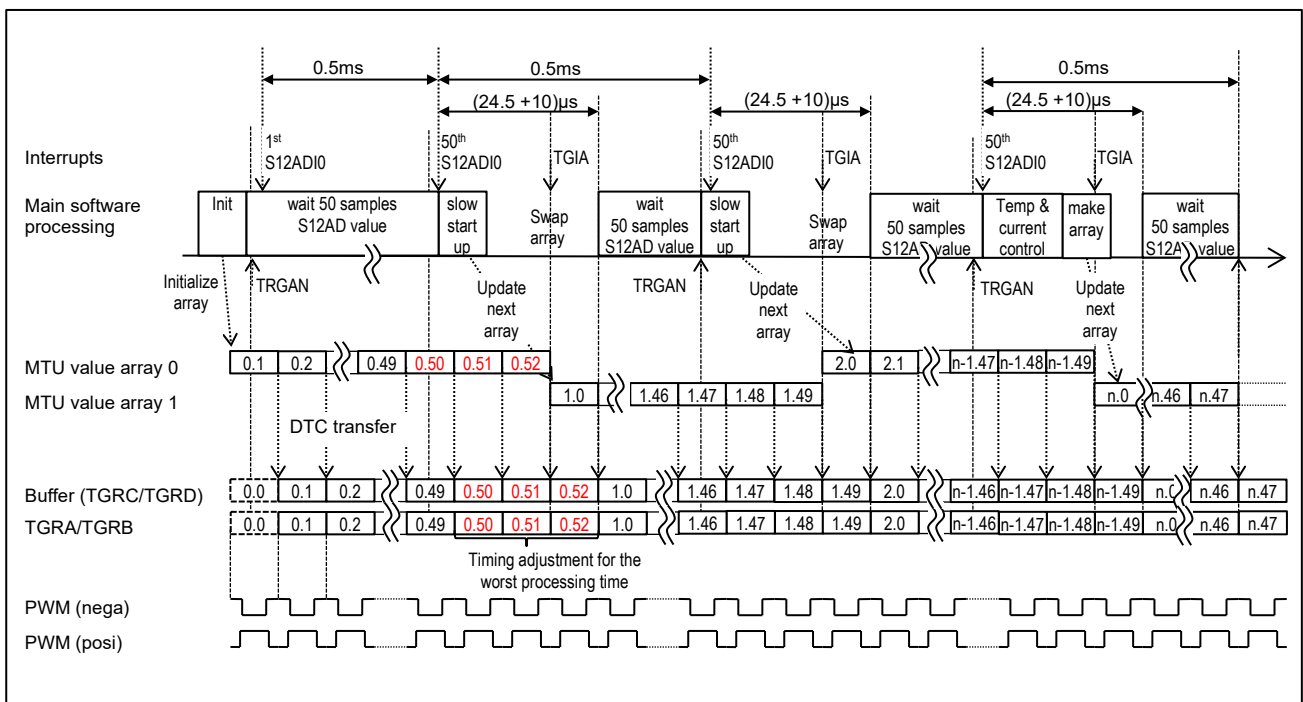


図 5-5 PWM 制御動作タイミングチャート

5.5 スロースタートアップ制御

システム起動時、「4.1.3.2(2)フルブリッジ回路」に示すフルブリッジ回路の立ち上げにスロースタートアップを行います。スロースタートアップ制御は、表 5-14 に示す手順で PWM 出力デューティを変化させ、ペルチェモジュールに印加する電流が 0A になるよう調整します。PWM 出力デューティは 1%/20msec で変化させています。

表 5-14 スロースタートアップシーケンス

シーケンス	PWM 出力デューティ設定				電圧	
	MTIOC4A	MTIOC4B	MTIOC4C	MTIOC4D	Va	Vb
0: 初期設定	0%				12V	
1:	0%		5% to 95%		12V to 0V	
2:	5% to 50%		95% to 50%		0V to 12V	

5.6 デモ動作

スライドスイッチを High にするとデモ動作を行います。デモ動作では温度指令値をマクロで指定した上限温度・下限温度の間で一定ステップ毎に温度を変化させます。デモ動作中は PC ツールからの温度指令値を受け付けません。デモ動作の設定は表 5-17 のマクロ定義を参照ください。

5.7 通信制御

RSSKRX23R-A の通信仕様 Rev.2.0 に基づいて、PC ツールプログラムとの処理を行います。
通信処理のフローを図 5-6 に示します。

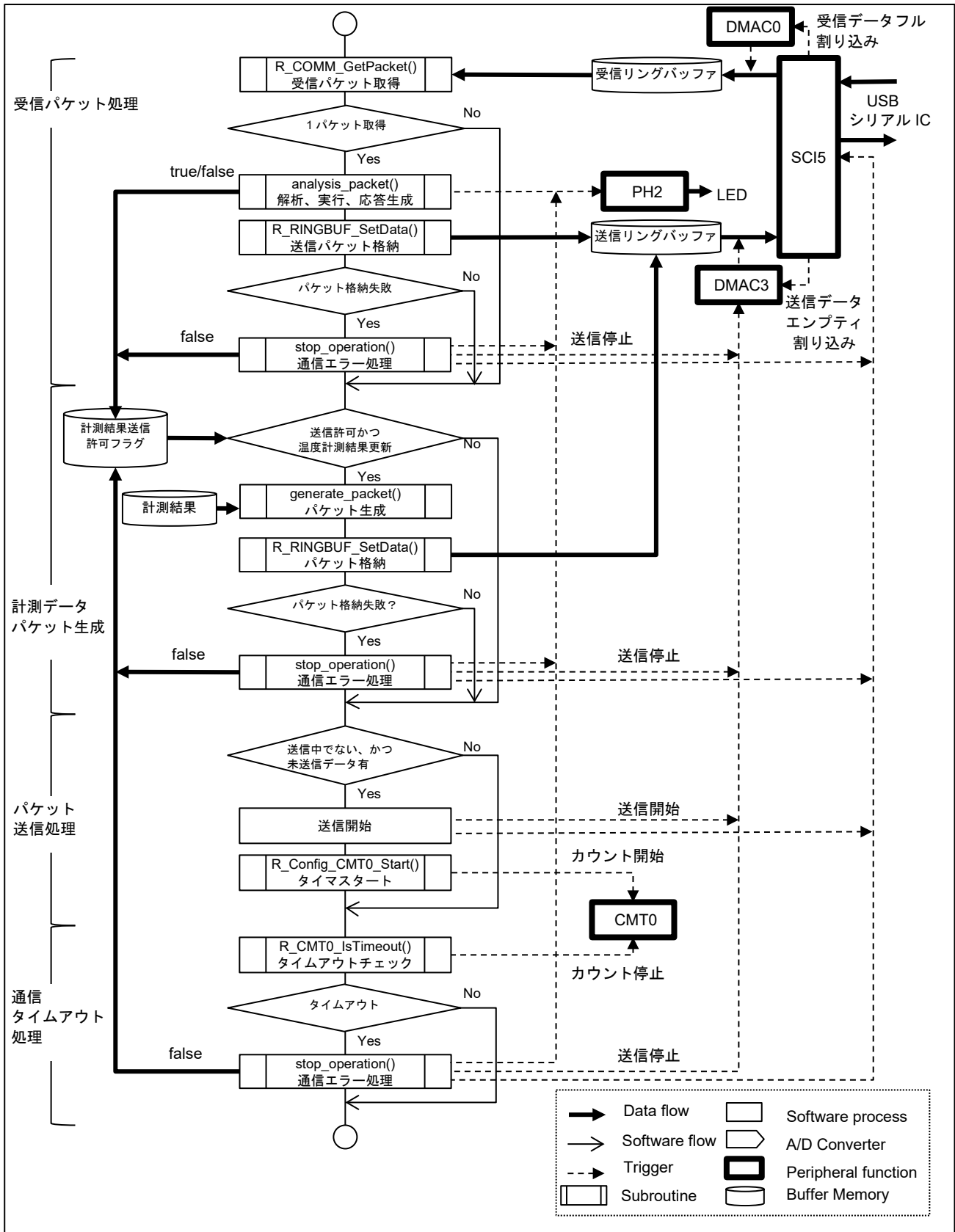


図 5-6 通信処理フロー

各処理の概略は次の通りです。

- 受信パケット処理

受信リングバッファから受信パケットを1つ取得し、コマンドの解析、対応する処理を行い、応答パケットを送信リングバッファに格納します。表 5-15 に本プログラムで対応するコマンドと、コマンドに対応する処理を示します。対応しないコマンドに対しては NACK を返します。

応答パケットが送信リングバッファに格納できない場合は、通信エラー処理を行います。

表 5-15 パケットとアクション

コマンド	処理
Negotiation	応答パケットでソフトウェアの状態を返す
Read	応答パケットで指定されたレジスタのリード値を返す
Run	計測結果送信許可フラグをセット
Stop	計測結果送信許可フラグをクリア
Command Value	受信した値に温度指令値を更新する（デモ動作中は更新しない）
Extra Information	応答パケットで出力データレートを返す

- 計測データパケット生成

計測結果送信許可フラグがセットかつ温度計測値の更新がある場合、温度指令値と温度計測値の送信パケットを生成し送信リングバッファに格納します。

応答パケットが送信リングバッファに格納できない場合は通信エラー処理を行います。

- パケット送信処理

データ送信中でなく、送信リングバッファに未送信データがある場合、DMAC3 で送信を開始し、タイムアウト検出用の CMT0 で 1 秒のカウントを開始します。

- 通信タイムアウト処理

送信が完了していればタイムアウト検出用の CMT0 を停止します。

送信中の場合、タイマのコンペアマッチを確認し、コンペアマッチが発生していればタイムアウトと判定します。タイムアウトと判定した場合、通信エラー処理を行います。

- 通信エラー処理

送信パケットを送信リングバッファに格納できない場合、または通信タイムアウトが発生した場合、通信を停止して再接続可能とするため、次の処理を行います。

- ・ 送信に使用する SCI5 と DMAC3 を停止
- ・ 送信バッファと温度データ送信許可フラグをクリア

送信・受信に使用するリングバッファは DMAC 転送対象のため、各バッファサイズに合わせたアライメントでアドレス配置をしています。本プログラムでは、セクション名を B_DMACH_REPEAT_AREA として宣言し、最大バッファサイズに合わせて配置を設定しています。

5.8 プログラム構成

5.8.1 ファイル構成

表 5-16 ファイル構成

フォルダ名、ファイル名	説明
src	
└ smc_gen	Smart Configurator 生成
├ Config_AFE	
├ Config_CMT0	
├ Config_DMACH0	
├ Config_DMACH3	
├ Config_DSAD0	
├ Config_DTC	
├ Config_MTU3_MTU4	
├ Config_PORT	
├ Config_S12AD0	
├ Config_SCI5	
├ general	
├ r_bsp	
├ r_config	
└ r_pincfg	
└ main.c	メイン処理
└ r_calc_api.c	汎用演算プログラム
└ r_calc_api.h	汎用演算 API 定義
└ r_communication_control_api.c	通信制御プログラム
└ r_communication_control_api.h	通信制御 API 定義
└ r_current_api.c	電流計測関連プログラム
└ r_current_api.h	電流計測関連 API 定義
└ r_current_pi.c	電流 PI 制御演算プログラム
└ r_current_pi.h	電流 PI 制御演算 API 定義
└ r_ring_buffer_control_api.c	リングバッファ制御プログラム
└ r_ring_buffer_control_api.h	リングバッファ制御 API 定義
└ r_rtd_api.c	測温抵抗体計測演算プログラム、温度対抵抗値テーブル
└ r_rtd_api.h	測温抵抗体計測演算 API 定義
└ r_temp_pid.c	温度 PID 制御演算プログラム
└ r_temp_pid.h	温度 PID 制御演算 API 定義

5.8.2 マクロ定義

表 5-17 main.c 定義一覧

定義名	値	説明
D_PRV_PC_TOOL_USE	1	PC ツールプログラムとの通信 0:使用しない 1:使用する
D_TIME_BASE	10U	S12AD 変換周期 10us
D_COUNT_S12AD	50U	S12AD 平均化数 50
D_COUNT_TEMP	40U	S12AD 周期数による DSAD 変換値平均化周期
D_TIME_TEMP	$D_TIME_BASE * D_COUNT_S12AD * D_COUNT_TEMP / 1000$	温度更新周期[ms]
D_VBRG	24.0F	ブリッジ回路電圧[V]
D_DUTY_MIN	-0.9F	PWM Duty 下限値
D_DUTY_MAX	0.9F	PWM Duty 上限値
D_PWM_DELAY_NUM	3	PWM 設定更新遅延数を PWM 更新周期で示す
D_DEMO_CYCLE	$300U / D_TIME_TEMP$	デモ動作時の温度指令値更新周期、数値部[ms]
D_DEMO_STEP	0.1F	デモ動作時の温度指令値ステップ[°C]
D_DEMO_TC_MIN	15.0F	デモ動作時の温度指令値下限[°C]
D_DEMO_TC_MAX	31.0F	デモ動作時の温度指令値上限[°C]
D_CMD_TC_MIN	10.0F	PC ツールの温度指令値下限[°C]
D_CMD_TC_MAX	50.0F	PC ツールの温度指令値上限[°C]
D_CMD_TC_INIT	25.0F	温度指令値初期値[°C]
D_CMD_IC_MIN	-1.0F	電流指令値下限[A]
D_CMD_IC_MAX	1.0F	電流指令値上限[A]
D_CMD_IC_INIT	0.0F	電流指令値初期値[A]
D_SLOW_DIVISOR	100.0F	パーセンテージ変換パラメータ
D_SLOW_POINT_0	$0.0F / D_SLOW_DIVISOR$	スロースタートアップ Duty 初期値、数値部[%]
D_SLOW_POINT_1	$95.0F / D_SLOW_DIVISOR$	スロースタートアップ step1 Duty 終了値、数値部[%]
D_SLOW_POINT_2	$45.0F / D_SLOW_DIVISOR$	スロースタートアップ step2 Duty 終了値、数値部[%]
D_SLOW_UPDATE	$1.0F / D_SLOW_DIVISOR / (float) D_COUNT_TEMP$	スロースタートアップ Duty 変化量、数値部[%]

表 5-18 r_current_pi.h 定義一覧

定義名	値	説明
D_TS_CURRENT	0.0005F	制御周期[sec]
D_KP_CURRENT	1.2F	比例ゲイン[V/A]
D_TI_CURRENT	0.0012F	積分時間[sec]
D_KB_CURRENT	0.8F	積分逆算ゲイン[A/V]
D_VC_MIN	-21.0F	出力電圧下限[V]
D_VC_MAX	21.0F	出力電圧上限[V]

表 5-19 r_temp_pid.h 定義一覧

定義名	値	説明
D_TS_TEMP	0.02F	制御周期[sec]
D_KP_TEMP	3.0F	比例ゲイン[A/°C]
D_TI_TEMP	5.0F	積分時間[sec]
D_TD_TEMP	1.0F	微分時間[sec]
D_TF_TEMP	0.1F	微分フィルタ時間[sec]
D_KB_TEMP	0.8F	積分逆算ゲイン[°C /A]

表 5-20 r_rtd_api.h 定義一覧

定義名	型	値	説明
D_RTD_RREF	float	5100.0F	R _{REF} 抵抗値 [Ω]
D_RTD_PGA_GAIN	float	32.0F	RTD 計測用 PGA のゲイン G _{PGA} [倍]
D_RTD_CODE_FS	uint32_t	16777216	2 ²⁴
D_RTD_DF_GAIN	float	1.0F	デジタルフィルタゲイン G _{DF}
D_RTD_GAIN	float	$D_RTD_RREF * 4 / (D_RTD_CODE_FS * D_RTD_PGA_GAIN * D_RTD_DF_GAIN)$	A/D 値から RTD 抵抗値[Ω]に変換するための係数 $\frac{4R_{REF}}{2^{24} \cdot G_{PGA} \cdot G_{DF}}$
D_RTD_OFFSET	float	0.0F	RTD 抵抗値オフセット[Ω]
D_RTD_TABLE_SIZE	uint16_t	302	テーブル要素数
D_RTD_TABLE_TOP_TEMPERATURE	float	-50.0F	テーブルの先頭温度[°C]

5.8.3 構造体及び共用体

表 5-21 main.c 構造体一覧

構造体名	st_flag_t		
説明	通信の受信データ解析関数で操作する変数		
メンバ変数	型	名称	説明
	bool	demo_mode	デモ動作 On/Off true: On, false: Off
	bool	tx_run	計測値送信許可 true: 許可, false: 禁止
	float	demo_range	デモ動作温度レンジ

表 5-22 r_current_pi 構造体一覧

構造体名	st_current_pi_coef_t		
説明	電流 PI 制御係数		
メンバ変数	型	名称	説明
	float	Kp	比例係数
	float	Ai	積分係数
	float	Ki	積分逆算係数
	float	vc_min	電圧値の下限值 [V]
float	vc_max	電圧値の上限値 [V]	
構造体名	st_current_pi_data_t		
説明	電流 PI 制御内部データ		
メンバ変数	float	le	電流偏差前値
	float	Vc_d	電圧制限偏差前値
	float	le_i_fb	積分逆算値前値

表 5-23 r_temp_pid 構造体一覧

構造体名	st_temp_pid_coef_t		
説明	温度 PID 制御係数		
メンバ変数	型	名称	説明
	float	Kp	比例係数
	float	Ad	微分係数
	float	Bd	微分係数
	float	Ai	積分係数
	float	Ki	積分逆算係数
	float	ic_min	電流指令値の下限値 [A]
float	ic_max	電流指令値の上限値 [A]	
構造体名	st_temp_pid_data_t		
説明	温度 PID 制御内部データ		
メンバ変数	float	Te	温度偏差前値
	float	Te_d	微分出力前値
	float	Te_i_fb	温度逆算前値
	float	Ic_d	電流制限偏差前値

表 5-24 r_ring_buffer_control_api 構造体一覧

構造体名	st_ring_buf_t		
説明	リングバッファ情報		
メンバ	型	名称	説明
	uint8_t *	p_buf	リングバッファのポインタ
	size_t	length	リングバッファ長
	uint32_t	r_index	リードインデックス
	uint32_t	w_index	ライトインデックス

表 5-25 Config_MTU3_MTU4 構造体/共用体一覧

共用体名	u_mtu_duty_t		
説明	MTU の PWM デューティ設定値		
メンバ	型	名称	説明
	uint32_t	both	32bit 値
	uint16_t	each.neg	逆相 16bit 値
	uint16_t	each.pos	正相 16bit 値
構造体名	st_mtu_isr_inf_t		
説明	MTU 割り込み関数との共有変数構造体		
メンバ	u_mtu_duty_t *	p_ptr	MTU の PWM デューティ設定値配列へのポインタ
	uint32_t	num	配列要素数

5.8.4 関数一覧

表 5-26 main.c 関数一覧

関数名/概要	戻り値		引数			
	型	値	I/O	型	変数名	説明
main main 関数	void	-	-	void	-	-
stop_operation DMAC、SCI の停止、リングバッファの初期化	void	-	I	st_ring_buf_t*	ary	リングバッファへのポインタ
generate_packet 計測値パケットの作成	size_t	パケット長	I	uint8_t	send_pkt[]	パケット格納配列
			I	float	txdata_ch[]	送信データ配列
			I	uint16_t	tx_flag	送信 ch 指定 (ビット割当)
analysis_pakect 受信パケットに従い、コマンド実行し、応答パケットを格納する。 Run/Stop コマンドの場合、計測結果送信許可フラグを更新。	size_t	応答パケット長	I	uint8_t const	rcv_pck[]	受信パケット格納配列
			O	uint8_t	send_pkt[]	応答パケット格納配列
			O	float *	p_cmd_val ue	温度指令値変数へのポインタ
			O	st_flag_t *	p_flag	本関数で操作するフラグの構造体変数へのポインタ
			O	uint8_t *	p_mode	動作モード変数のポインタ
calc_duty 電圧値に対応する PWM デューティを算出	float	デューティ値 (-0.90 ~ +0.90)	I	float	Vc	電圧値
			I	float	Vbrg	ブリッジ回路電圧
calc_demo_command_val デモ用温度指令値の算出	float	新温度指令値	I	float	temp	現温度指令値
calc_temp_to_demo_command_val 指定温度からデモ用温度指令値初期値を算出	float	温度指令値初期値	I	float	temp	温度

表 5-27 r_calc_api 関数一覧

関数名/概要	戻り値		引数			
	型	値	I/O	型	変数名	説明
R_CALC_BinarySearch 検索テーブルを2分検索し、検索するデータを越えない最近値のインデックスを返す	uint16_t	インデックス値	I	const float *	p_data_table	検索テーブルのポインタ(昇順)
			I	uint16_t	table_size	検索テーブルの要素数
			I	float	data	検索するデータ
R_CALC_Lerp (x0,y0)、(x1,y1)の2点を通る直線に対して、xに対するyを求めめる	float	直線補間結果	I	float	x0	x0の値
			I	float	y0	y0の値
			I	float	x1	x1の値
			I	float	y1	y1の値
			I	float	x	xの値
R_CALC_Limit valの値をmin、maxの範囲に制限する	float	制限結果	I	float	val	対象値
			I	float	min	下限値
			I	float	max	上限値

表 5-28 r_communication_control_api 関数一覧

関数名/概要	戻り値		引数			
	型	値	I/O	型	変数名	説明
R_COMM_GetPacket 受信リングバッファから、1パケット読み出す	size_t	パケット長[Byte]	I	st_ring_buf_t *	r_buf	受信リングバッファのポインタ
			O	uint8_t	r_packet[]	受信パケット格納配列

表 5-29 r_current_api 関数一覧

関数名/概要	戻り値		引数			
	型	値	I/O	型	変数名	説明
R_S12adToCurrent A/D変換値から電流を算出	float	電流[A]	I	float	s12ad	S12AD変換値

表 5-30 r_current_pi 関数一覧

関数名/概要	戻り値		引数			
	型	値	I/O	型	変数名	説明
R_CurrentPI 電流PI制御演算	float	電圧値[V]	I	float	le	電流偏差[A]
			I	st_current_pi_coef_t *	p_coef	電流PI制御係数構造体変数へのポインタ
			I/O	st_current_pi_data_t *	p_data	電流PI制御内部データ構造体変数へのポインタ

表 5-31 r_temp_pid 関数一覧

関数名/概要	戻り値		引数			
	型	値	I/O	型	変数名	説明
R_TempPID 温度 PID 制御演算	float	電流指令値 [A]	I	float	Te	温度偏差[°C]
			I	st_temp_pid_coef_t*	p_coef	温度 PID 制御係数構造体変数へのポインタ
			I/O	st_temp_pid_data_t*	p_data	温度 PID 制御内部データ構造体変数へのポインタ

表 5-32 r_ring_buffer_control_api 関数一覧

関数名/概要	戻り値		引数			
	型	値	I/O	型	変数名	説明
R_RINGBUF_GetData リングバッファから指定バイト数を読み出す	size_t	読み出し バイト数	I	st_ring_buf_t*	ary	リングバッファへのポインタ
			O	uint8_t	data[]	データ格納配列
			I	size_t	len	読み出しバイト数
			I	bool	index_update	インデックス更新フラグ true:更新する false:更新しない
R_RINGBUF_SetData リングバッファへ指定バイト数書き込む	size_t	書き込み バイト数	O	st_ring_buf_t*	ary	リングバッファへのポインタ
			I	uint8_t	data[]	データ格納配列
			I	size_t	len	書き込みバイト数
R_RINGBUF_GetDataLength リングバッファに格納されたバイト数を読み出す	size_t	格納バイト数	I	st_ring_buf_t*	ary	リングバッファへのポインタ
R_RINGBUF_SetDataIndex リングバッファのインデックスを更新する	uint32_t	インデックス値	O	st_ring_buf_t*	ary	リングバッファへのポインタ
			I	uint16_t	value	インデックス値
			I	uint8_t	select	対象インデックス 0:Read, 1:Write

表 5-33 r_rtd_api.c 関数一覧

関数名/概要	戻り値		引数			
	型	値	I/O	型	変数名	説明
R_RTD_DsadToTemp DSAD 変換値から温度を算出	float	温度[°C]	I	float	dsad	DSAD 変換値

表 5-34 Config_CMT0 ユーザー定義関数一覧

関数名/概要	戻り値		引数			
	型	値	I/O	型	変数名	説明
R_CMT0_IsTimeout タイムアウトかどうかを返す	bool	false:カウント中 true:タイムアウト	I	bool	flag	カウンタ停止 false:続行 true:停止
R_CMT0_CntClear CMT0 のコンペアマッチタイマカウンタをクリアする	void	-	-	void	-	-

表 5-35 Config_DMACH0 ユーザー定義関数一覧

関数名/概要	戻り値		引数			
	型	値	I/O	型	変数名	説明
R_DMACH0_SetDestAddr DMACH0 の DMDAR を設定	void	-	I	void *	p_addr	destination address
R_DMACH0_GetDestAddr DMACH0 の DMDAR を返す (マクロ関数)	void *	DMDAR の値	-	void	-	-

表 5-36 Config_DMACH3 ユーザー定義関数一覧

関数名/概要	戻り値		引数			
	型	値	I/O	型	変数名	説明
R_DMACH3_SetSrcAddr DMACH3 の DMSAR を設定	void	-	I	void *	p_addr	source address
R_DMACH3_SetTxCnt DMACH3 の DMCRA を設定	void	-	I	uint32_t	cnt	transfer count

表 5-37 Config_DSAD0 ユーザー定義関数一覧

関数名/概要	戻り値		引数			
	型	値	I/O	型	変数名	説明
r_Config_DSAD0_adi0_interrupt DSAD の ADI0 割り込みハンドラ DSAD 変換値を取得して積算、積算 回数をインクリメント	void	-	-	void	-	

表 5-38 Config_DTC ユーザー定義関数一覧

関数名/概要	戻り値		引数			
	型	値	I/O	型	変数名	説明
R_Config_DTC_SetParam MTU の PWM デューティ設定値の DTC 転送設定	void	-	I	void *	addr	設定値配列の先頭アドレス
			I	uint16_t	num	転送要素数

表 5-39 Config_MTU3_MTU4 ユーザー定義関数一覧

関数名/概要	戻り値		引数			
	型	値	I/O	型	変数名	説明
r_Config_MTU3_MTU4_tgia3_interrupt MTUのTGIA3 割込みハンドラ 次のDTC 転送設定と転送開始	void	-	-	void	-	
R_MTU_SetPort PWM 出力ポート設定	void	-	I	uint8_t	config	ポート設定 - 0 正相/逆相 Low 固定 - 1 正相 Low 固定, 逆相 有効 - 2 正相/逆相 有効
R_MTU_FillPWMArray 設定値配列を posi、nega で埋める	void	-	O	u_mtu_duty_t*	array	設定値配列へのポインタ
			I	uint16_t	posi	正相デューティ設定値
			I	uint16_t	nega	逆相デューティ設定値
			I	size_t	num	配列の要素数
R_MTU_MakeFractionalPWMArray duty に対応する MTU の PWM デューティ設定値を配列に格納する	void	-	I	float	duty	PWM デューティ 指定値
			O	u_mtu_duty_t*	array	設定値配列へのポインタ
			I	size_t	num	配列の要素数
R_MTU_MakeFractionalPWMArraySSU スロースタートアップ時の duty に対応する MTU の PWM デューティ設定値を配列に格納する	void	-	I	float	duty	PWM デューティ 指定値
			O	u_mtu_duty_t*	array	設定値配列へのポインタ
			I	size_t	num	配列の要素数

表 5-40 Config_PORT ユーザー定義関数一覧

関数名/概要	戻り値		引数			
	型	値	I/O	型	変数名	説明
R_LED1_On LED1 を点灯 (マクロ関数)	void	-	-	void	-	
R_LED1_Off LED1 を消灯 (マクロ関数)	void	-	-	void	-	
R_SWITCH_Get スイッチ状態の取得 (マクロ関数)	uint8_t	スイッチ状態(0/1)	-	void	-	
R_PORT_KeyScan チャタリング吸収をしたスイッチの状態を取得	uint16_t	スイッチ状態(0/1)		uint16_t	key_current	前回のスイッチ状態

表 5-41 Config_S12AD0 ユーザー定義関数一覧

関数名/概要	戻り値		引数			
	型	値	I/O	型	変数名	説明
r_Config_S12AD0_interrupt S12AD の S12ADI0 割込みハンドラ S12AD 変換値を取得して積算、積算回数をインクリメント	void	-	-	void	-	-

表 5-42 Config_SCI5 ユーザー定義関数一覧

関数名/概要	戻り値		引数			
	型	値	I/O	型	変数名	説明
R_SCI5_IsTransferEnd 送信状態の取得	bool	false:送信中 true:送信終了	-	void	-	
R_SCI5_SendStart 送信開始指示	MD_STATUS	MD_OK	-	void	-	
R_SCI5_SendStop 送信中止指示	MD_STATUS	MD_OK	-	void	-	
R_SCI5_ReceiveStart 受信開始指示	MD_STATUS	MD_OK	-	void	-	

6. プロジェクトをインポートする方法

サンプルコードは e² studio のプロジェクト形式で提供しています。本章では、e² studio および CS+ヘブプロジェクトをインポートする方法を示します。インポート完了後、ビルドおよびデバッグの設定を確認してください。

6.1 e² studio での手順

e² studio でご使用になる際は、下記の手順で e² studio にインポートしてください。

(使用する e² studio のバージョンによっては画面が異なる場合があります。)

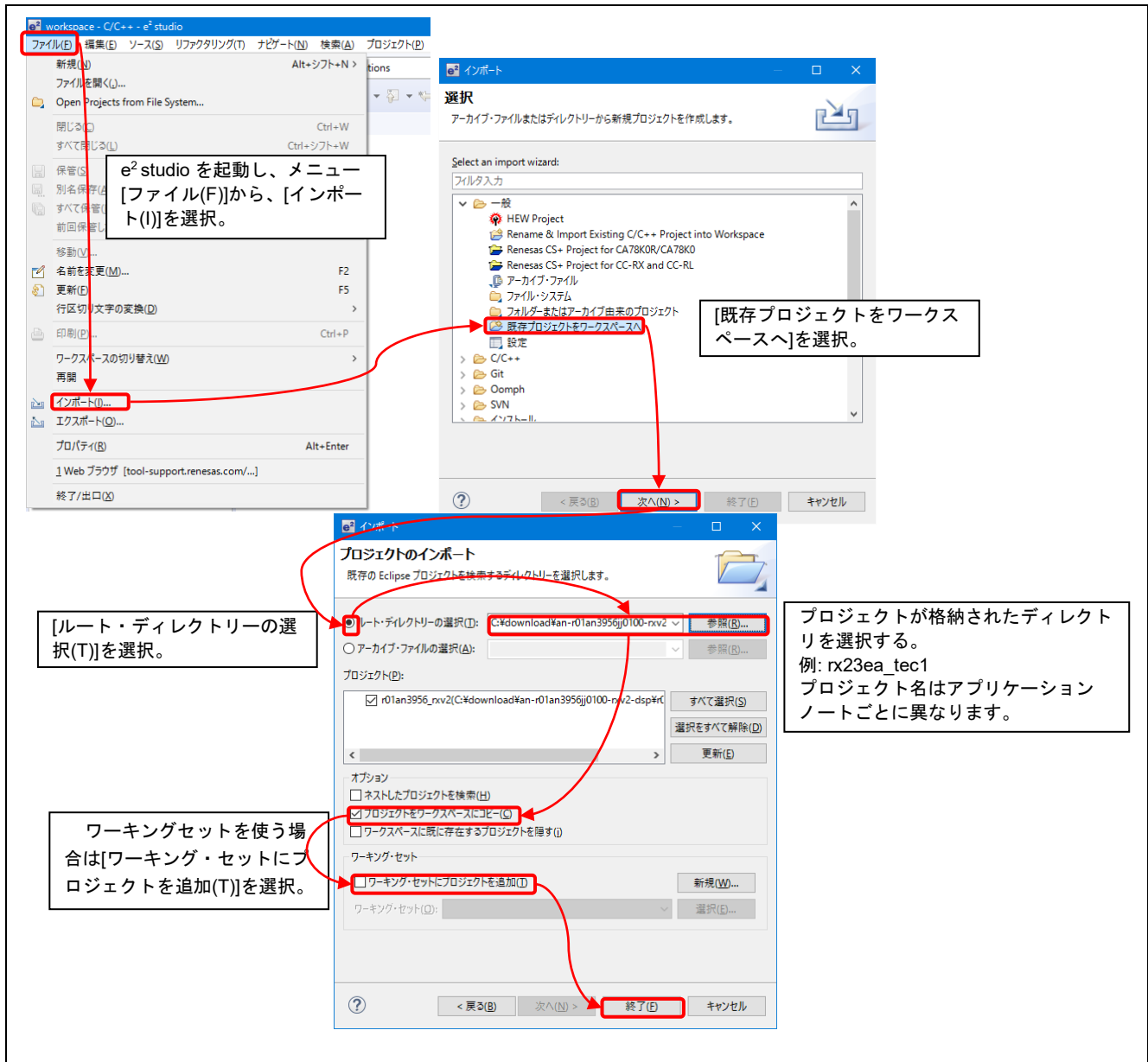


図 6-1 プロジェクトを e² studio にインポートする方法

6.2 CS+での手順

CS+でご使用になる際は、下記の手順でCS+にインポートしてください。

(使用するCS+のバージョンによっては画面が異なる場合があります。)

CS+を起動し、スタート画面から、[e² studio/CubeSuite/High-performance Embedded Workshop/PM+のプロジェクトを開く]を選択。

プロジェクトを選択する。
例: rx23ea_tec1
プロジェクト名はアプリケーションノートごとに異なります。

拡張子[.rcpc]のファイルを選択して[開く]ボタンを押す。

[e² studio 用プロジェクト・ファイル(*.rcpc)]を選択。

プロジェクト種類: 「空のアプリケーション(CC-RX)」を選択し、プロジェクト名と作成場所を指定してください。

図 6-2 プロジェクトをCS+にインポートする方法

7. サンプルプログラムを使用した動作結果

7.1 使用メモリと実行サイクル数

7.1.1 ビルド条件

サンプルプログラムのビルド条件を表 7-1 に示します。この設定は、PC ツール対応のメモリ配置を除いてプロジェクト生成時のデフォルト設定です。

表 7-1 ビルド条件

項目	設定
Compiler	-isa=rxv2 -define=D_PC_TOOL_USE=1 -utf8 -nomessage -output=obj -debug -outcode=utf8 -nologo
Linker	-noprelink -output="rx23ea_tec1.abs" -form=absolute -nomessage -vect=_undefined_interrupt_source_isr -list=rx23ea_tec1.map -nooptimize -rom=D=R,D_1=R_1,D_2=R_2 -nologo
追加セクション	-start=B_DMAC_REPEAT_AREA_1/02000

7.1.2 使用メモリ

サンプルプログラムのメモリ使用量を表 7-2 に示します。

表 7-2 メモリ使用量

項目	サイズ [byte]	備考
ROM	12898	
Code	9760	
Data	3138	
RAM	8287 (3295)	【注】
Data	3167	
Stack	5120 (128)	【注】

【注】 “()”で示す RAM の使用量は Stack の使用量から算出

7.1.3 実行サイクル数

「図 5-1 温度制御処理フロー」各ブロックの実行サイクル数と処理負荷を表 7-3 に示します。

表 7-3 実行サイクル数・実行時間・処理負荷

ICLK=32MHz

項目		最大実行サイクル数 (実行時間)	処理負荷 [%]	条件
温度 制御	S12A/D 平均化処理から温度 PID 制御・電流 PI 制御まで	567cycle (17.72μsec)	3.55	S12A/D、DSAD の割込各 1 回を含む
	PWM Duty 設定配列作成	338cycle (10.56μsec)	2.12	
	S12AD 変換終了割り込み処理	46cycle (1.44μsec)	8.89	処理負荷は割込回数 49 回
	DSAD 変換終了割り込み処理	47cycle (1.47μsec)	0.94	割込 1 回
	計	934cycle (29.19μsec)	5.84	温度制御の最大負荷 電流 PI 制御まで+Duty 配列作成
シス テム	デモ動作処理	45cycle (1.41μsec)	0.29	
	通信制御	543cycle (16.97μsec)	3.40	計測値パケット生成 STOP コマンド受信
	スイッチ処理	63cycle (1.97μsec)	1.97	
	計	2977cycle (93.04μsec)	18.61	温度制御をデモ動作で行っ た場合

7.2 動作例

7.2.1 ステップ応答

温度指令値を 25°C から 35°C に変化させたときのステップ応答と、温度制御を行わずペルチェモジュールに 0.5A の電流を入力したときの温度変化を図 7-1 に示します。

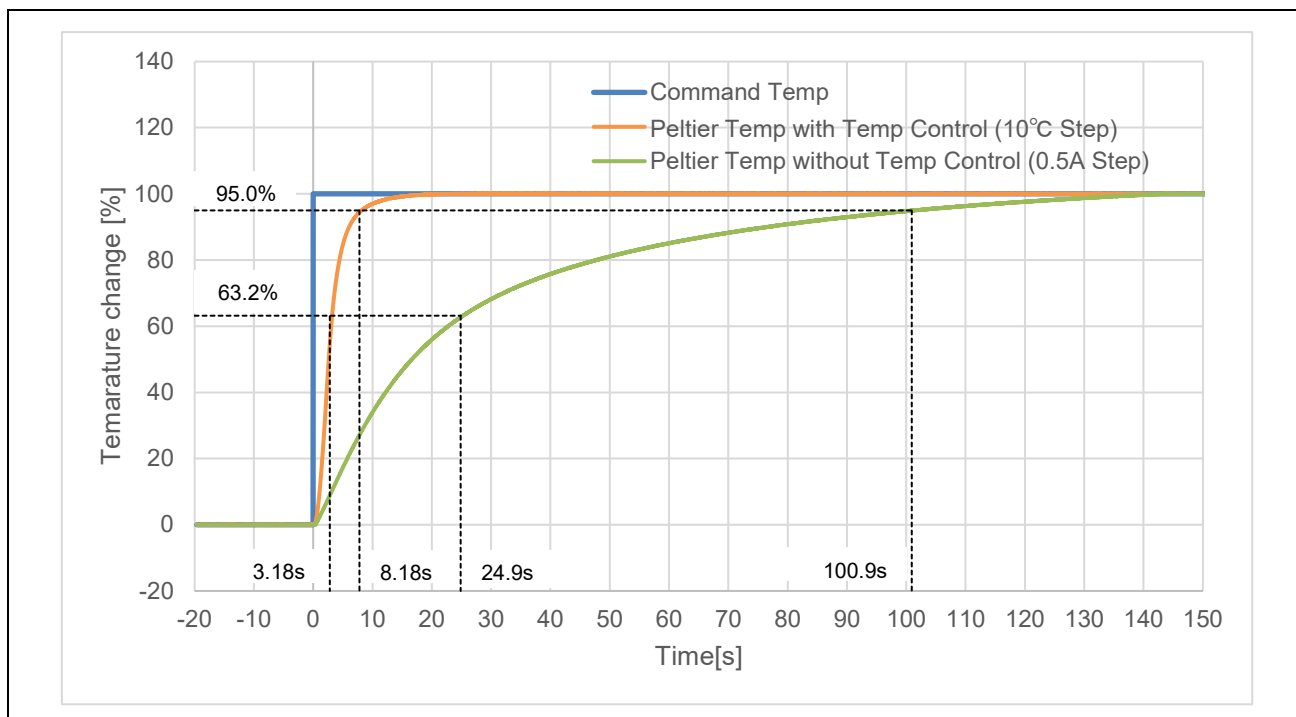


図 7-1 温度ステップ応答

表 7-4 温度ステップ応答特性

項目	温度制御の測定結果	ペルチェモジュール応答 (温度制御なし)
63.2%時間	3.18 [s]	24.9 [s]
オーバーシュート	なし	なし
±5%整定時間	8.18 [s]	100.9 [s]

図 7-1 および表 7-4 より、ペルチェモジュールの温度応答は温度制御なしと比較して、温度制御を行うことで最終値の 63.2% に到達する時間が 24.9 秒から 3.18 秒まで短縮し、応答性が大幅に改善していることが確認できました。

7.2.2 制御分解能

本システムに 5m°C 刻みで温度指令値入力したときの温度制御の応答を図 7-2 に示します。本システムは DSAD により高精度の温度計測を行うことができます。計測結果より、5m°C の微小な温度制御を実現することが確認できます。

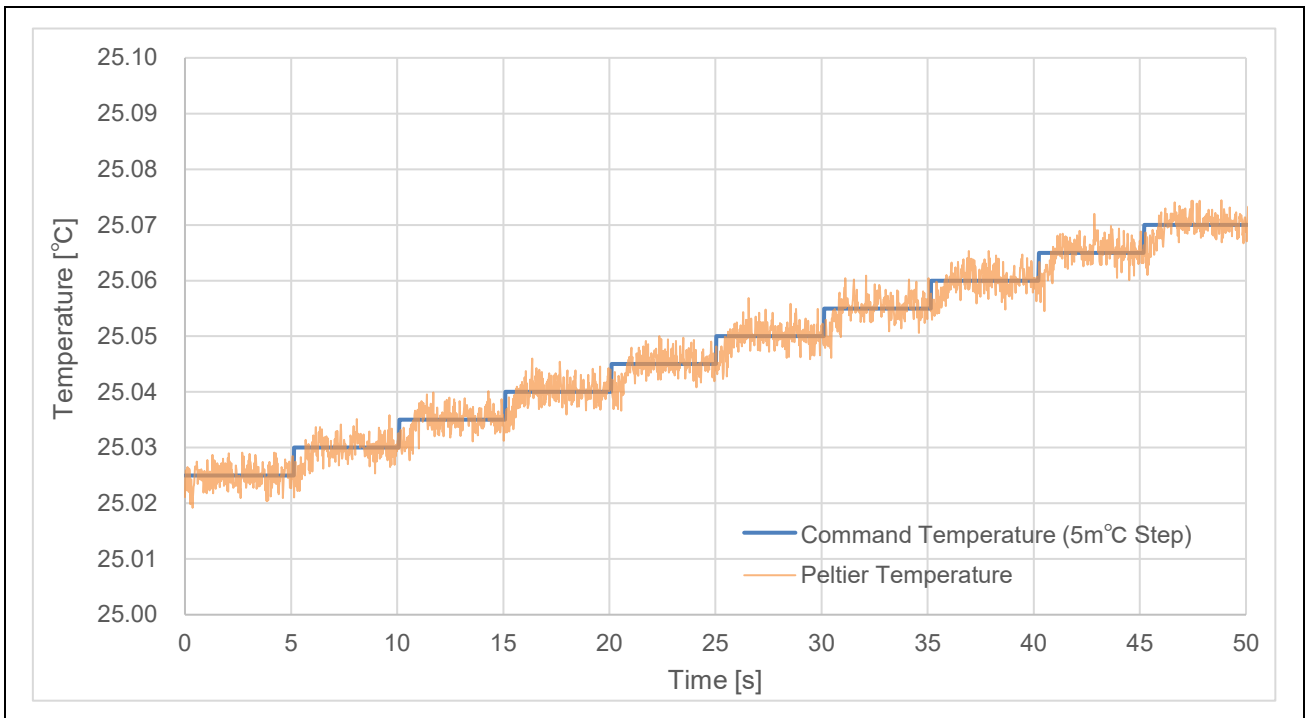


図 7-2 温度制御応答 (5m°C step)

室温環境下 (25°C) で 25°C に温度制御した状態で、温度計測値 1000 サンプルの平均値に対するヒストグラムを図 7-3 に示します。温度偏差は rms 値で 1.94m°C (P-P 値:12.0m°C)です。RTD Pt100 の感度を 385mΩ/°C、励起電流を 250uA とすると、RX23E-A への入力電圧に対する温度感度は 96.25uV/°C なので、入力換算電圧は 186.3 nVrms、P-P 値で 1157.9 nV となります。入力換算電圧から算出した温度制御の有効分解能とノイズフリー分解能を以下に示します。

有効分解能 :	1.94 m°C (19.71bit, 186.3 nV 相当)
ノイズフリー分解能 :	12.0 m°C (17.07bit, 1157.9 nV 相当)

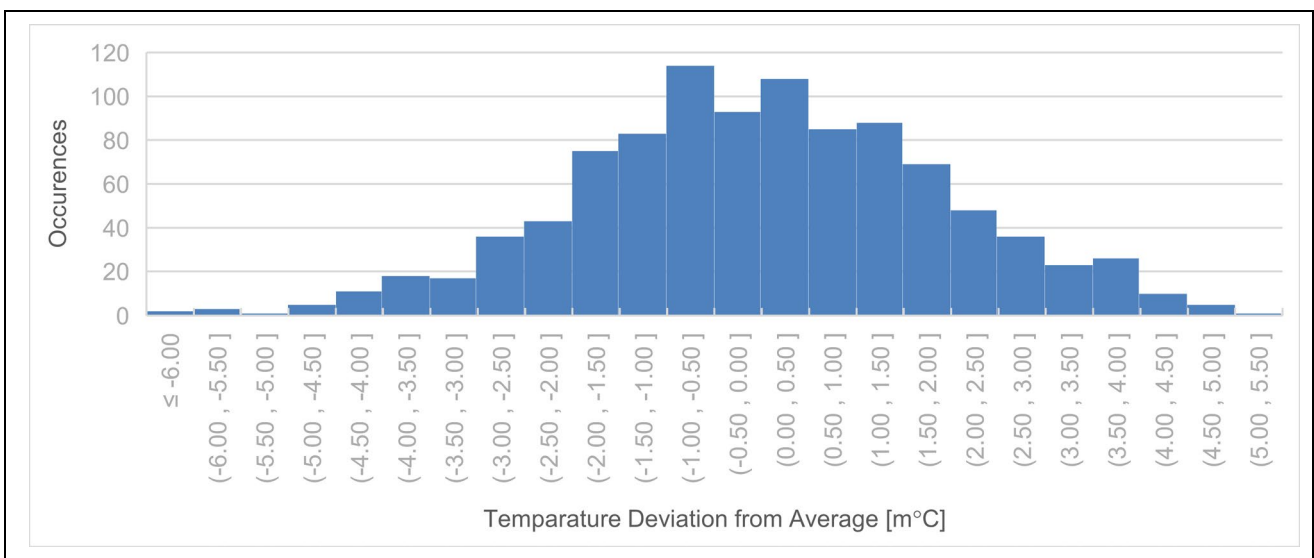
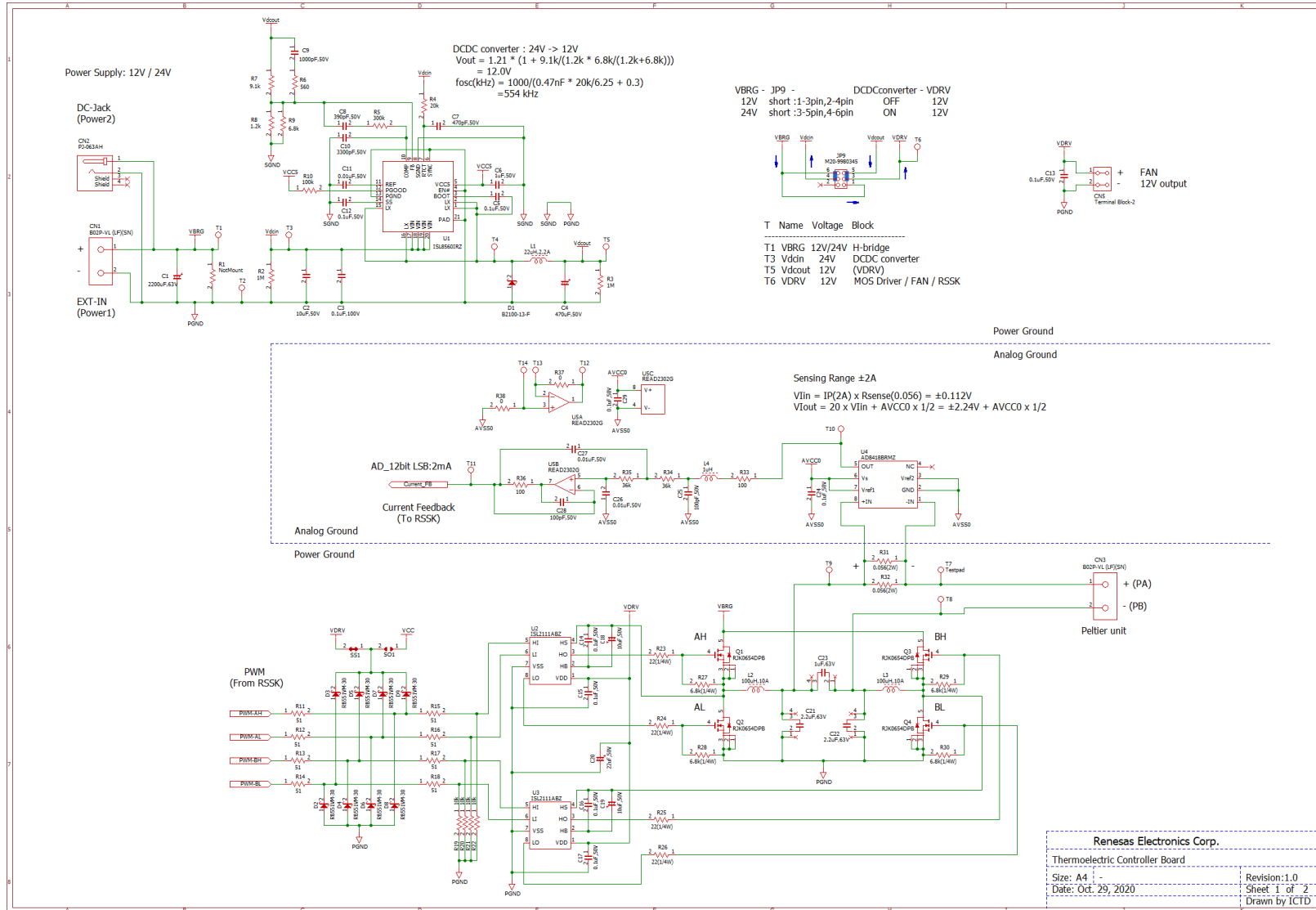


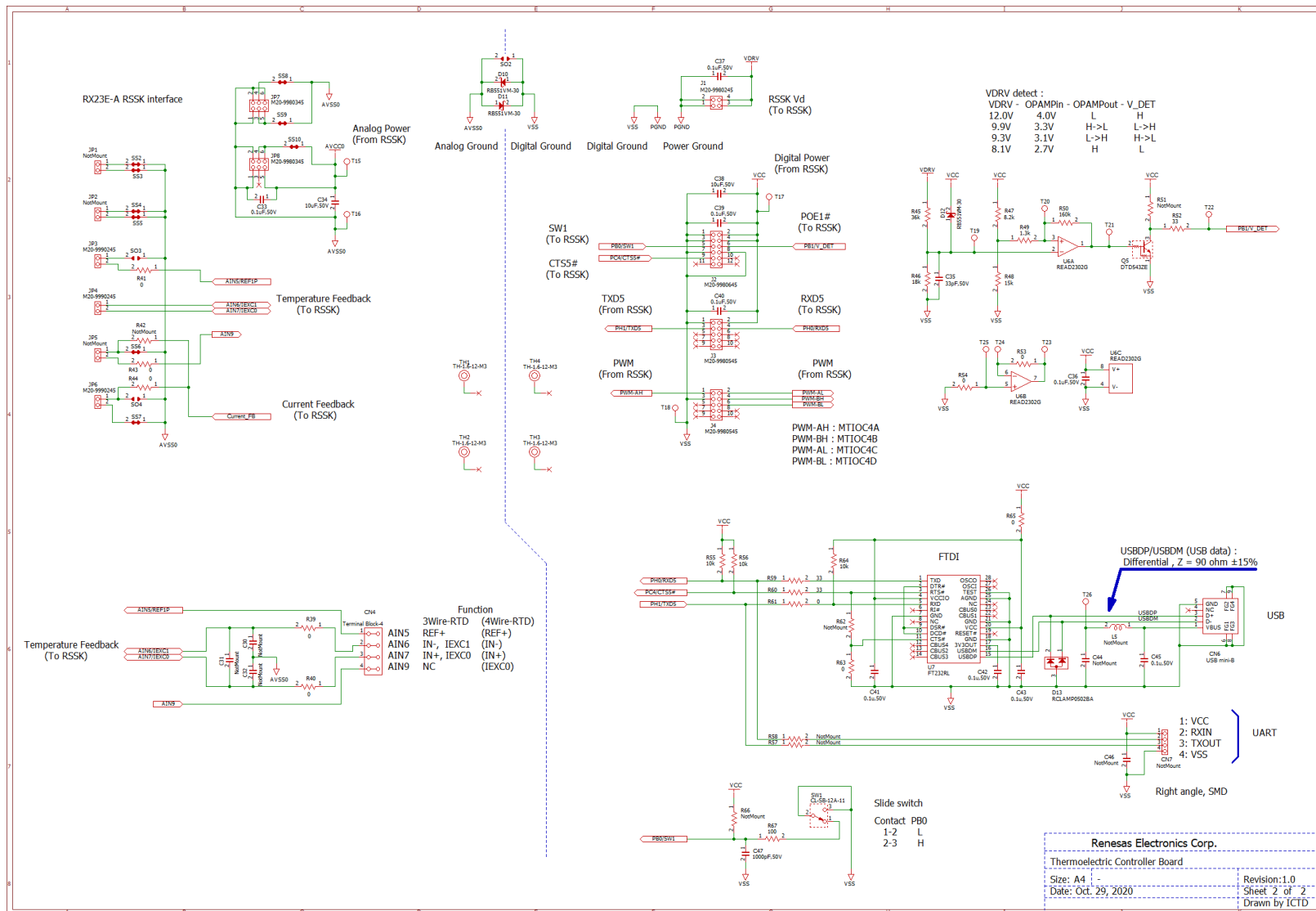
図 7-3 室温環境での温度制御偏差

Appendix 1 電力ボード部品表

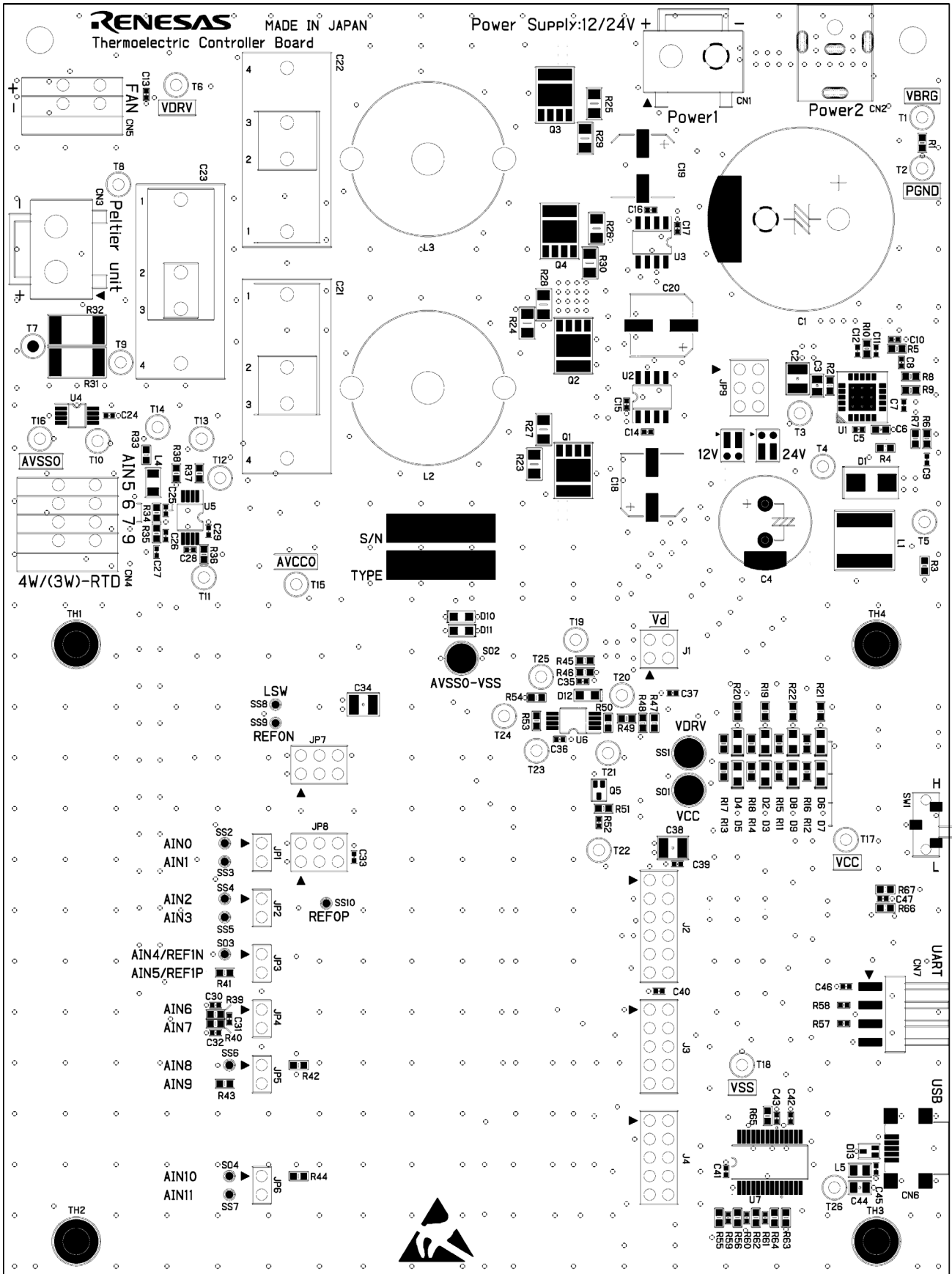
No.	Quantity (Mounted)	Reference Designator (Mounted)	Reference Designator (Not Mounted)	Description	Part Name	Manufacturer Part Name(*)	Manufacturer
1	1	U1		DCDC converter,2A	IC	ISL8560IRZ	Renesas
2	2	U2,U3		MOS driver	IC	ISL2111ABZ	Renesas
3	1	U4		Current sense	IC	AD8418BRMZ	ADI
4	2	U5,U6		OPAMP	IC	READ2302G	Renesas
5	1	U7		USB to UART interface	IC	FT232RL	FTDI
6	4	Q1,Q2,Q3,Q4		60V,30A	MOS-FET	RJK065ADPB	Renesas
7	1	Q5		12V,500mA	Digital Transistor	DTD543ZE	Rohm
8	2	CN1,CN3		2-pin	Connector	B02P-VL(LF)(SN)	JST
9	1	CN2		DC-Jack, 24VDC,8A	Connector	PJ-063AH	CUI
10	1	CN4		Terminal Block-4	Connector	FFKDSA1/H-2.54-4	Phoenix Contact
11	1	CN5		Terminal Block-2	Connector	FFKDSA1/H-2.54-2	Phoenix contact
12	1	CN6		USB mini-B	Connector	UB-M5BR-G14-4S	JST
13	2	R31,R32		56mohm(2W)	Resistor	TLRH3AWTTE56L0F	KOA
14	4	R23,R24,R25,R26		22(1/4W)	Resistor	CRCW120622R0FKEAC	Vishay / Dale
15	11	R37,R38,R39,R40,R41,R43 R44,R53,R54,R63,R65		0	Resistor	RK73Z1JTTD	KOA
16	8	R11,R12,R13,R14 R15,R16,R17,R18		51	Resistor	RK73H1JTDD51R0F	KOA
17	3	R33,R36,R67		100	Resistor	RK73H1JTDD1000F	KOA
18	1	R6		560	Resistor	RK73H1JTDD5600F	KOA
19	1	R8		1.2k	Resistor	RK73H1JTDD1201F	KOA
20	1	R49		1.3k	Resistor	RK73H1JTDD1301F	KOA
21	1	R9		6.8k	Resistor	RK73H1JTDD6801F	KOA
22	1	R47		8.2k	Resistor	RK73H1JTDD8201F	KOA
23	1	R7		9.1k	Resistor	RK73H1JTDD9101F	KOA
24	1	R48		15k	Resistor	RK73H1JTDD1502F	KOA
25	1	R46		18k	Resistor	RK73H1JTDD1802F	KOA
26	7	R19,R20,R21,R22, R55,R56,R64		10k	Resistor	RK73H1JTDD1002F	KOA
27	1	R4		20k	Resistor	RK73H1JTDD2002F	KOA
28	3	R34,R35,R45		36k	Resistor	RK73H1JTDD3602F	KOA
29	1	R10		100k	Resistor	RK73H1JTDD1003F	KOA
30	1	R50		160k	Resistor	RK73H1JTDD1603F	KOA
31	1	R5		300k	Resistor	RK73H1JTDD3003F	KOA
32	2	R2,R3		1M	Resistor	RK73H1JTDD1004F	KOA
33	1	R61		0	Resistor	RK73Z1ETTP	KOA
34	3	R52,R59,R60		33	Resistor	RK73H1ETTP33R0F	KOA
35	4	R27,R28,R29,R30		6.8k(1/4W)	Resistor	RK73H2BTDD6801F	KOA
36	1	C35		33pF,50V	Ceramic capacitor	GCG1555C1H330JB01D	Murata
37	2	C25,C28		100pF,50V	Ceramic capacitor	GCM1555C1H101JA16D	Murata
38	1	C7		470pF,50V	Ceramic capacitor	GCM1555C1H471JA16D	Murata
39	1	C8		390pF,50V	Ceramic capacitor	GCM1555C1H391FA16D	Murata
40	2	C9,C47	C30,C32	1000pF,50V	Ceramic capacitor	GRM1555C1H102JA01D	Murata
41	1	C10		3300pF,50V	Ceramic capacitor	GCM1557R1H332KA37J	Murata
42	3	C11,C26,C27	C31	0.01uF,50V	Ceramic capacitor	GCM1557R1H103KA55D	Murata
43	18	C5,C12,C13,C14,C15,C16 C17,C24,C29,C33,C36,C37 C39,C40,C41,C42,C43,C45	C46	0.1uF,50V	Ceramic capacitor	CGA2B3X7R1H104K050BB	TDK
44	1	C3		0.1uF,100V	Ceramic capacitor	C2012JB2A104K125AA	TDK
45	1	C6		1uF,50V	Ceramic capacitor	GRT188R61H105KE13D	Murata
46	3	C2,C34,C38		10uF,50V	Ceramic capacitor	GCM32EC71H106KA03K	Murata
47	2	C18,C19		10uF,50V	Electrolytic capacitor	PCX1H100MCL1GS	Nichicon
48	1	C20		22uF,50V	Electrolytic capacitor	PCX1H220MCL6GS	Nichicon
49	1	C4		470uF,50V	Electrolytic capacitor	UHD1H471MH	Nichicon
50	1	C1		2200uF,6.3V	Electrolytic capacitor	LLS1J22MELA	Nichicon
51	2	C21,C22		2.2uF,6.3V	Film capacitor	B32529D0225J	TDK
52	1	C23		1uF,6.3V	Film capacitor	B32529C0105J	TDK
53	1	L4		1uH,455mA	Coil	NLFV25T-1R0M-EF	TDK
54	1	L1		22uH,2.2A	Coil	NRS8040T220MJGJ	TAIYO YUDEN
55	2	L2,L3		100uH,10A	Coil	AIRD-02-101K	Abrakon
56	11	D2,D3,D4,D5,D6,D7 D8,D9,D10,D11,D12		30V,500mA	Diode	RB551VM-30	Rohm
57	1	D1		100V,2A	Diode	B2100-13-F	Diodes
58	1	D13		ESD protection	Diode	RCLAMP0502BA	Semtech
59	1	J1		HEADER 2X2	Pin header	M20-9980245	Harwin
60	1	J2		HEADER 6X2	Pin header	M20-9980645	Harwin
61	2	J3,J4		HEADER 5X2	Pin header	M20-9980545	Harwin
62	3	JP3,JP4,JP6	JP1,JP2,JP5	HEADER 2	Pin header	M20-9990245	Harwin
63	3	JP7,JP8,JP9		HEADER 3X2	Pin header	M20-9980345	Harwin
64	1	SW1		1 pole,2 positions	Slide switch	CL-SB-12A-11	NIDEC COPAL
65	4	TH1,TH2,TH3,TH4		M3,1.2mm	Through hole tap	TH-1.6-12-M3	MAC8
66	0		CN7	NotMount (HEADER 4,SMD, right angle)	Pin header	M20-8890445	Harwin
67	0		R1,R42,R51,R62,R66	NotMounted 1608	Resistor	-	-
68	0		R57,R58	NotMounted 1005	Resistor	-	-
69	0		C44	NotMounted 4.7uF,50V	Ceramic capacitor	GRM21BC71H475KE11L	Murata
70	0		L5	NotMounted EMI filter	Ferrite bead	MI0805K400R-10	Laird
M1	2			Brass, both-sides female spacer	Spacer	ASB-315E	Hirosugi
M2	2			Brass, M3 6mm	Screw	B-0306-S1	Hirosugi
M3	4			Brass, male-female spacer	Spacer	BSB-315E	Hirosugi
M4	1			4 position, 2.54mm pitch consolidated	Jumper socket	JS-42060-02	Hirosugi

Appendix 2 電力ボード回路図

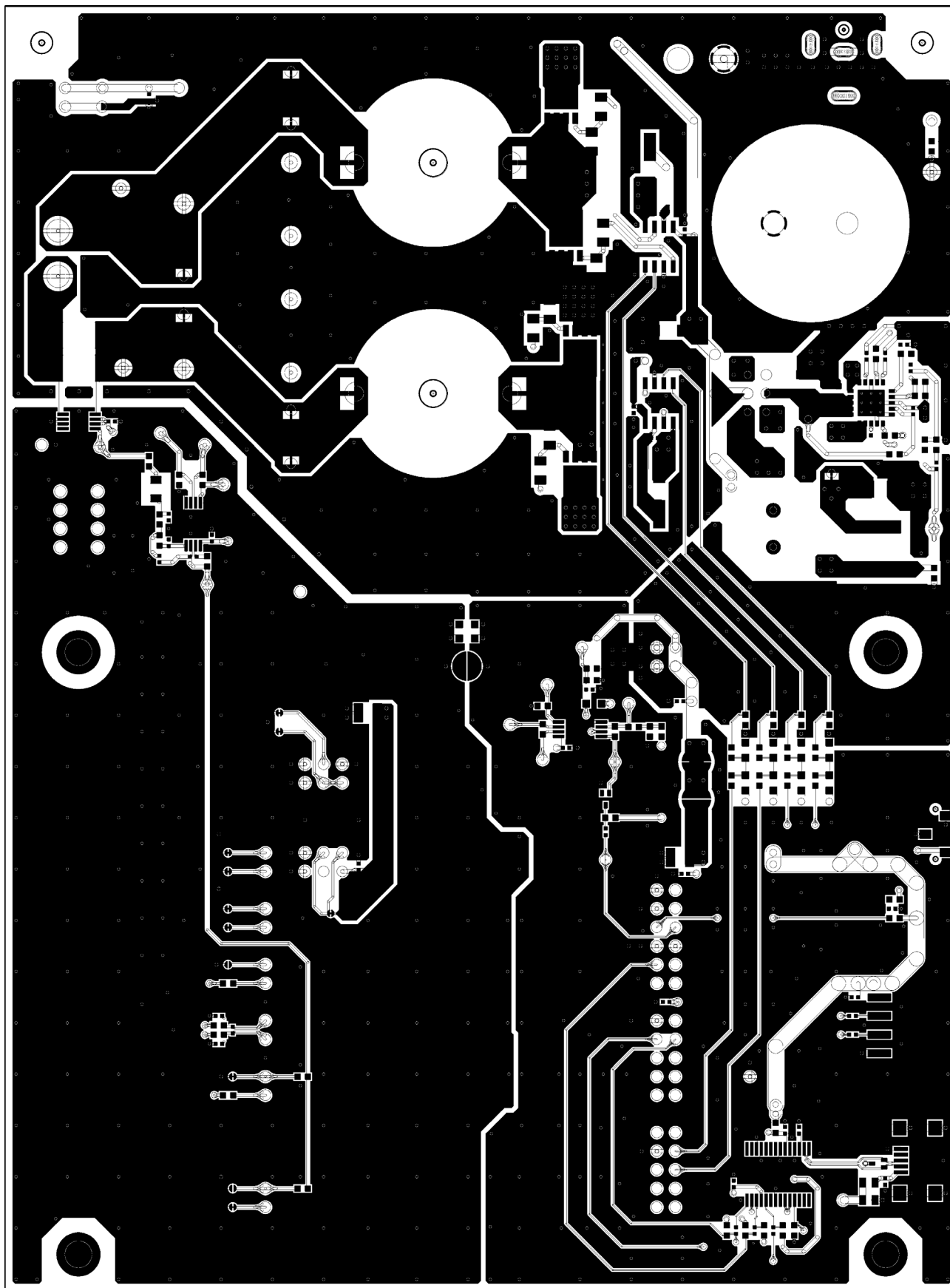




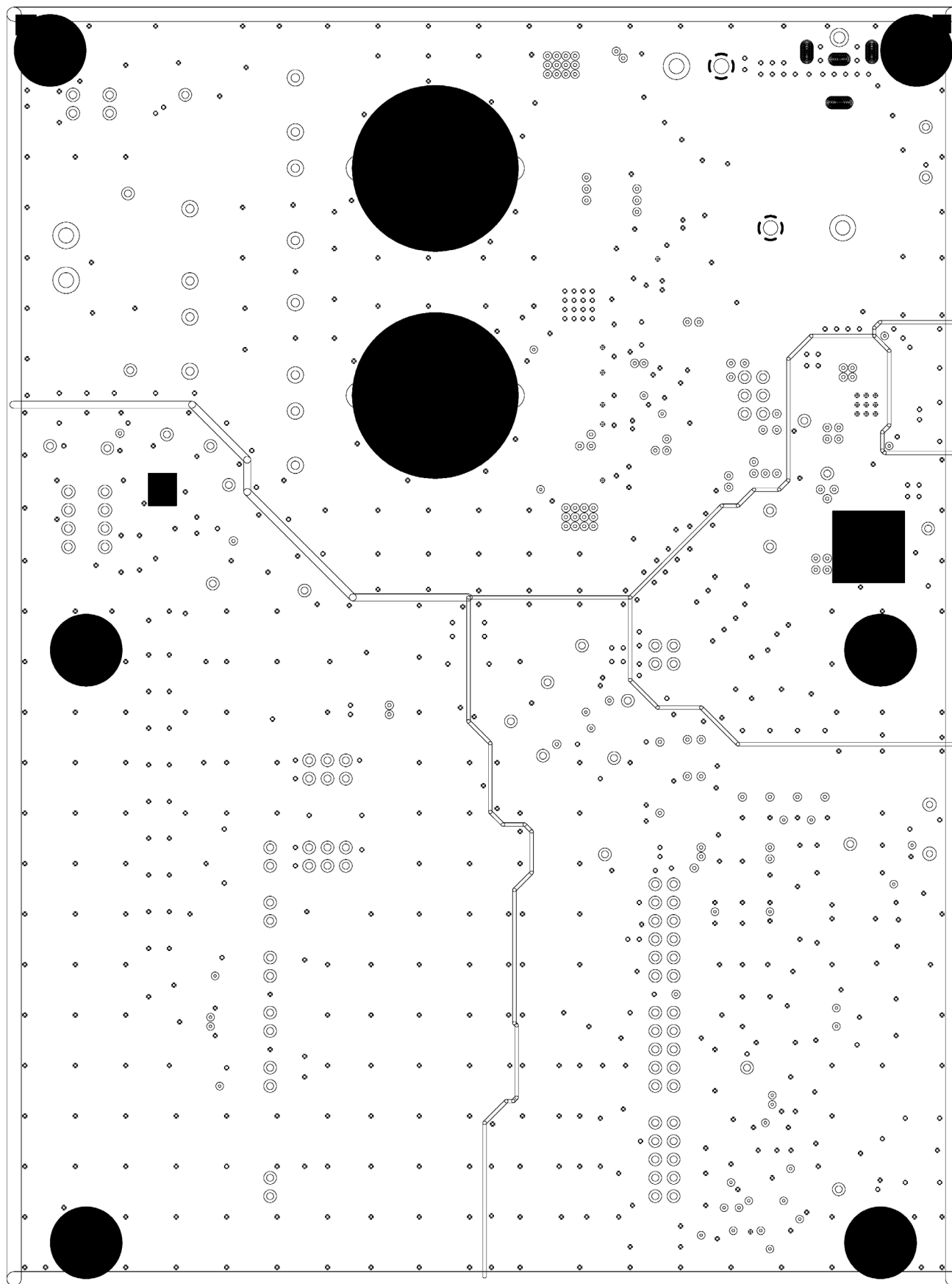
Appendix 3 電力ボードパターン図



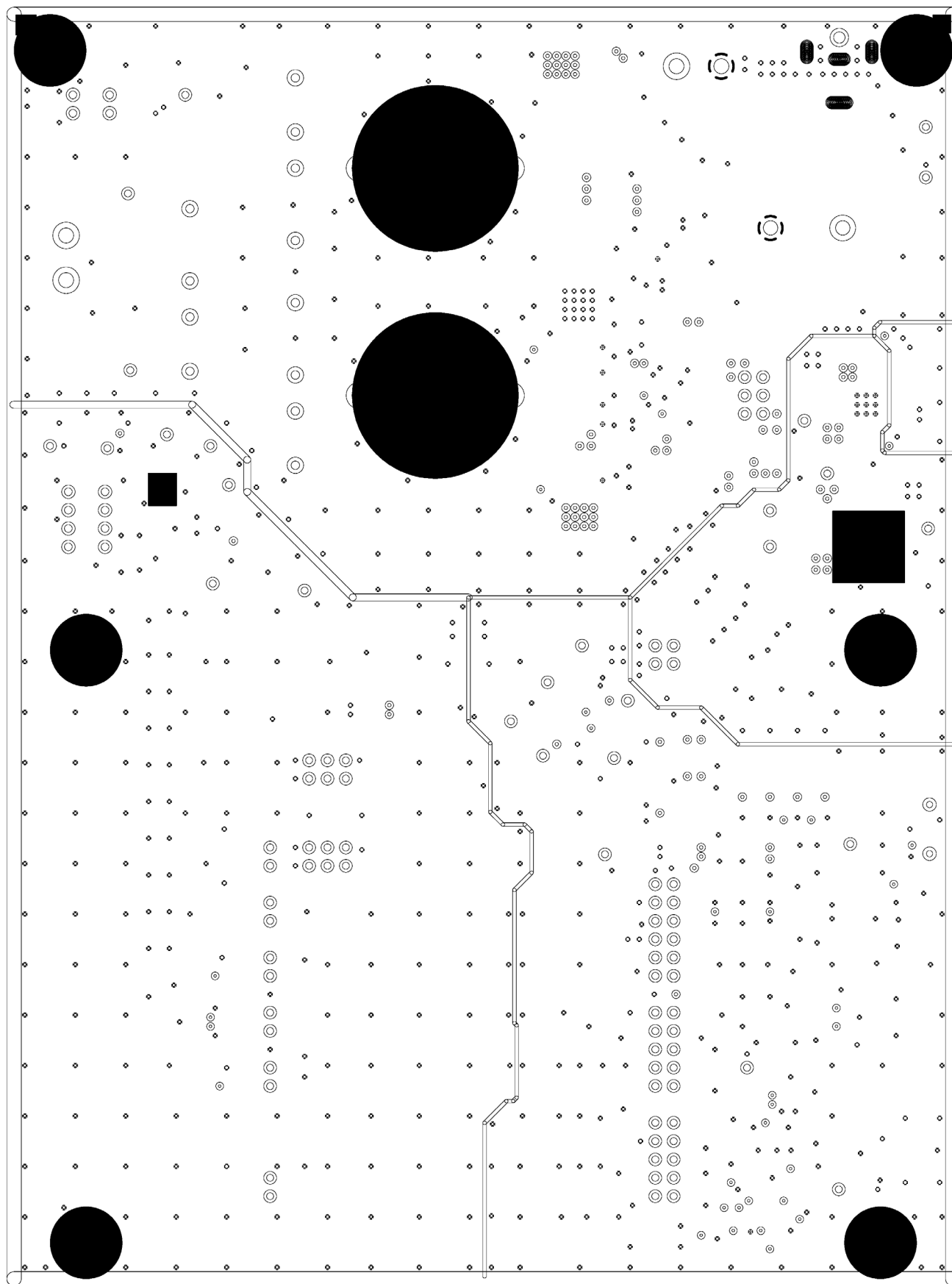
Silkscreen on the Component (Top) Side



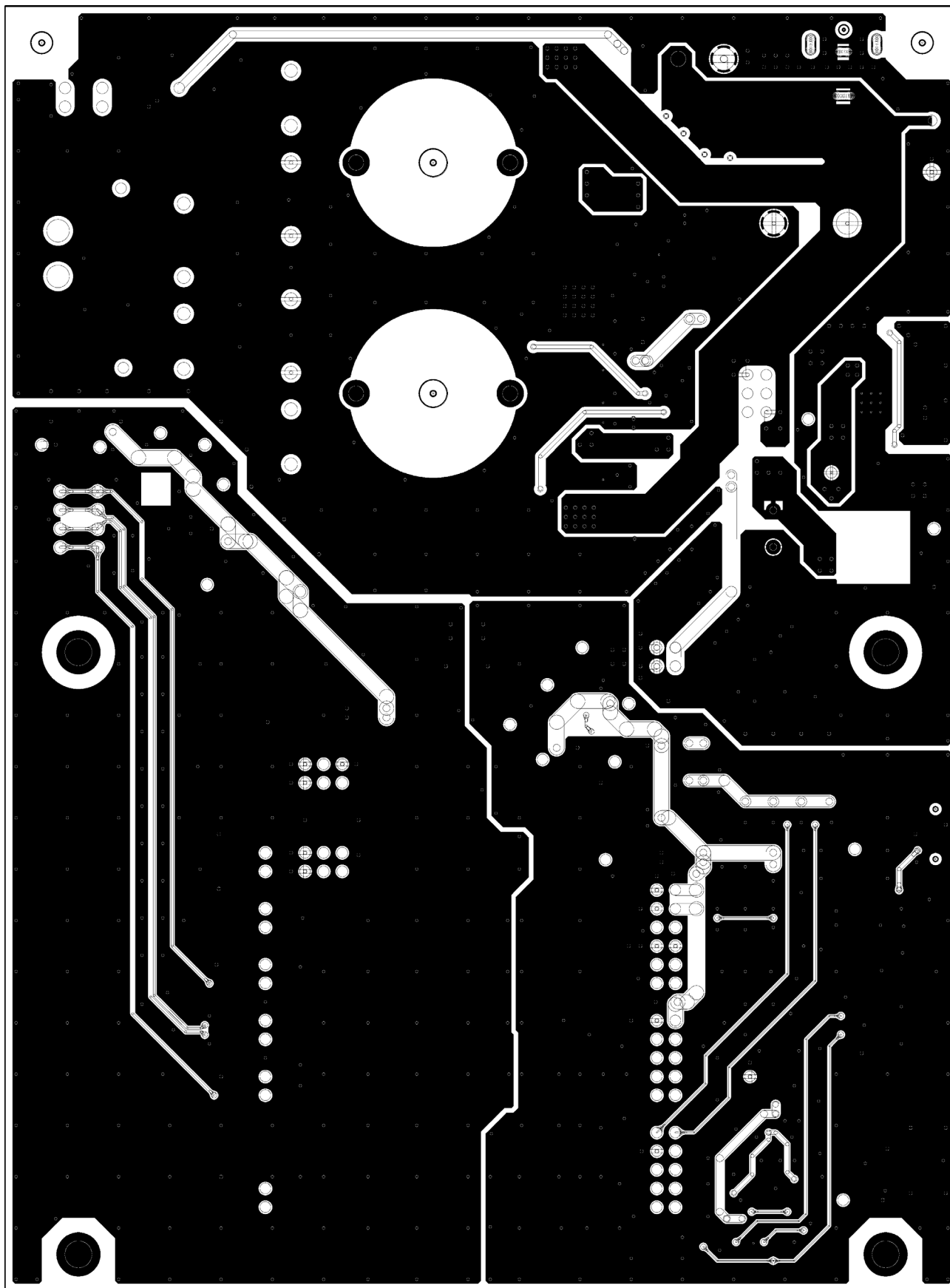
Layer 1: Top Side Layer



Layer 2: Ground Plane



Layer 3: Ground Plane



Layer 4: Bottom Side Layer (Viewed from the Component Side)

改訂記録

Rev.	発行日	改訂内容	
		ページ	ポイント
1.00	Dec.25.20	-	-

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

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。型名が違う製品に変更する場合は、個々の製品ごとにシステム評価試験を実施してください。

ご注意書き

1. 本資料に記載された回路、ソフトウェアおよびこれらに関連する情報は、半導体製品の動作例、応用例を説明するものです。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

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/

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。