

RX23E-B グループ

内蔵 DAC による 4-20mA 通信例

要旨

本書は、ルネサス マイクロコントローラ RX23E-B を使用して、熱電対温度計測または電圧計測結果を 4-20mA 出力する例について説明します。

4-20mA 電流トランスミッタは、多くのセンシングシステムに採用されている標準的な仕様です。回路構成と接続がシンプルで、配線や接続が少なく済み、電流による通信であるため長距離の通信にも有利です。

RX23E-B には各種センサの高精度計測に適したアナログフロントエンド (AFE) と最高 125kSPS 出力の高速 24 ビット Δ - Σ A/D コンバータ (DSAD) を搭載しています。さらに、16bit D/A コンバータ (R16DA) を搭載し、電流出力回路に高分解能に電圧を出力することで、4-20mA 電流出力機能を実現しています。

Renesas Solution Starter Kit for RX23E-B と本書のサンプルプログラムを使用して、基板を設定温度 -25°C、25°C、85°C の恒温槽に設置し、各温度条件下で設定電流に対する出力電流をマルチメータで計測した結果を下図に示します。誤差は設定電流と出力電流の差を 4mA-20mA スパンである 16mA で割った値、%FS で示しています。計測結果から出力電流誤差は 0.1%FS 以下であることが確認できました。

出力電流を 4mA から 20mA まで変化させたときの電流の整定時間と、A/D 値取得から DA0 端子出力電圧が変化するまでの時間を下表に示します。95%整定時間は出力段フィルタ回路の持つ応答時間 1.3ms が支配的で、A/D 値取得から DA0 端子出力までの MCU 処理時間 20 μ s はほぼ影響しないことが確認できます。

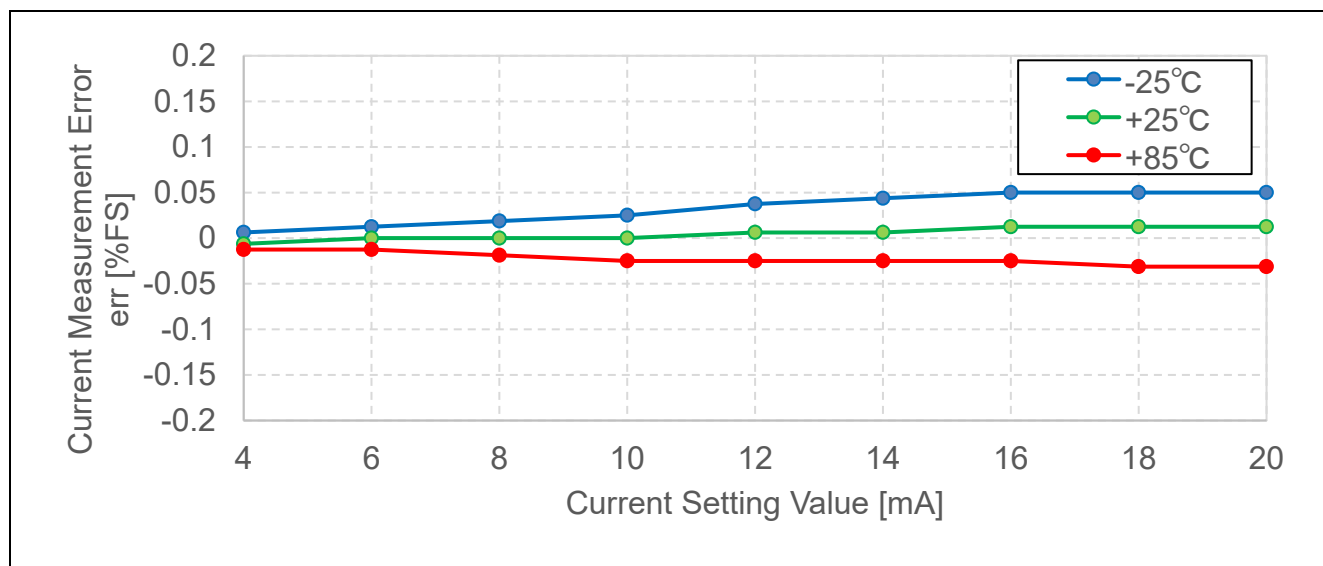


図 電流出力精度評価結果

表 整定時間・応答時間

項目	測定値
95%整定時間	1.3ms
DA0 端子出力反映時間	20 μ s

動作確認デバイス

RX23E-B (R5F523E6LDFP)

目次

1. 概要	4
2. 動作確認環境	7
3. 関連ドキュメント	7
4. 4-20mA 通信	8
4.1 ハードウェア構成	8
4.1.1 4-20mA トランスミッタ	8
4.1.2 温度計測回路	9
4.1.3 電圧計測回路	9
4.2 温度計測	10
4.2.1 熱電対	10
4.2.2 測温抵抗体(RTD)	12
4.2.3 熱電対・RTD の A/D 変換	13
4.2.4 温度算出	14
4.3 電圧計測	16
4.3.1 入力電圧の A/D 変換	16
4.3.2 電圧算出	16
4.4 DSAD キャリブレーション	17
4.5 電流出力	18
4.5.1 電流出力手順	18
4.5.2 電流出力キャリブレーション	19
5. サンプルプログラム	20
5.1 動作概要	20
5.2 使用する MCU 機能と設定	23
5.2.1 温度・電圧計測	25
5.2.2 通信	27
5.2.3 4-20mA 電流出力	28
5.2.4 LED とスイッチ	28
5.2.5 E2 データフラッシュ	29
5.3 プログラム構成	30
5.3.1 ソースファイル構成	30
5.3.2 マクロ定義	31
5.3.3 構造体・共用体	34
5.3.4 関数一覧	37
6. プロジェクトをインポートする方法	46
6.1 e ² studio での手順	46
6.2 CS+での手順	47
7. サンプルプログラムを使用した計測結果	48
7.1 使用メモリと実行サイクル数	48
7.1.1 ビルド条件	48

7.1.2	使用メモリ.....	48
7.1.3	実行サイクル数と処理時間.....	49
7.2	電流出力精度評価.....	50
7.2.1	電流出力精度評価構成.....	50
7.2.2	電流出力精度評価結果.....	51
7.3	温度計測時電流出力評価.....	52
7.3.1	温度計測時電流出力評価構成.....	52
7.3.2	温度計測時電流出力評価結果.....	53
7.4	応答特性評価.....	54
7.4.1	応答特性評価構成.....	54
7.4.2	応答特性評価結果.....	55
	改訂記録.....	56

1. 概要

本書では、ルネサスマイクロコントローラ RX23E-B を使用し、DSAD で取得した各 A/D 値から計測した温度または電圧を、R16DA を使用して 4-20mA 出力する例を説明します。サンプルプログラムは Renesas Solution Starter Kit for RX23E-B (RSSKRX23E-B) ボードで動作し、QE for AFE のアプリケーション TAB で動作条件の設定と、計測中は温度または電圧の計測結果を CH0 に、4-20mA 出力電流設定値を CH1 に表示します。

本例システムを図 1-1 に、操作可能項目について図 1-2、表 1-1 ~ 表 1-3 に示します。

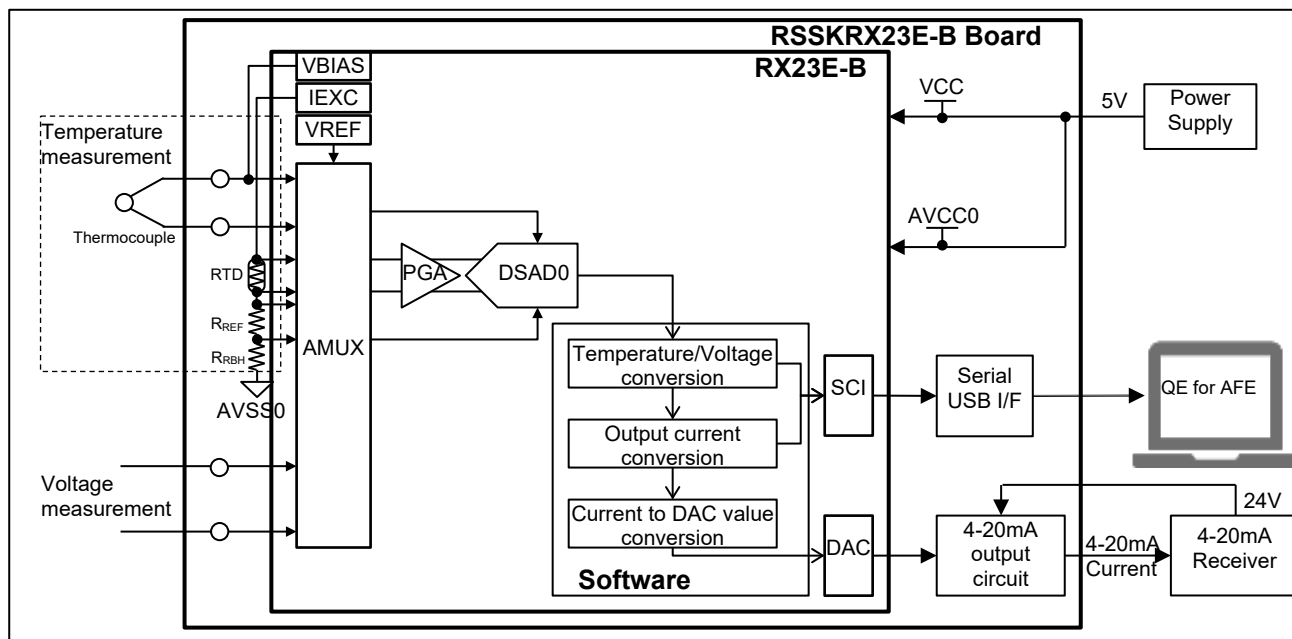


図 1-1 4-20mA 通信システム例

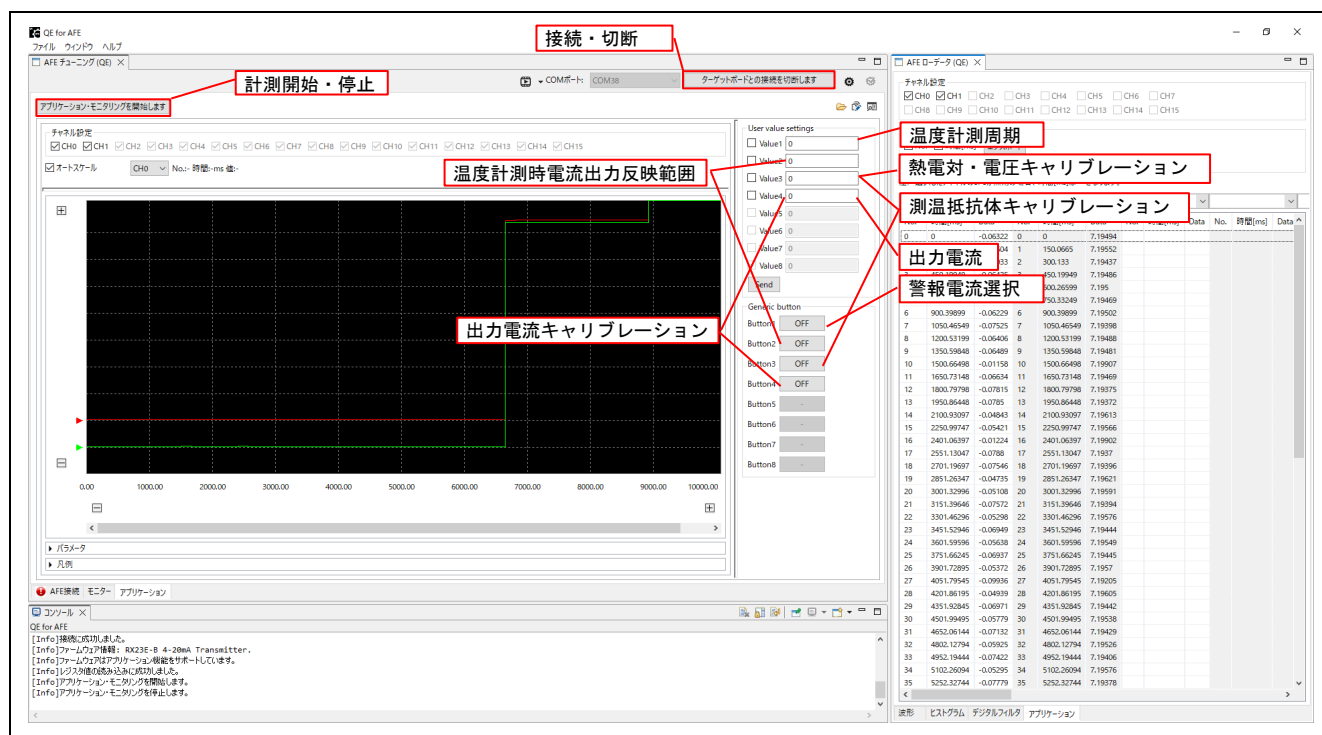


図 1-2 QE for AFE アプリケーション TAB 画面

表 1-1 操作可能項目 (1/2)

太字デフォルト

項目		操作	補足
計測対象選択		RSSKRX23E-B: SW3-1 OFF: 温度計測 ON: 電圧計測	A/D 変換開始時に反映
パラメータ初期化		RSSKRX23E-B: SW2 リセット時 LED0 点灯まで押下	
接続		QE for AFE	LED1 消灯
計測開始・停止		QE for AFE	A/D 変換中 LED0 消灯
(SW3-1:OFF) 温度計測	温度計測周期指定	QE for AFE: Value1 300, 150 [ms]	待機時(LED0 点灯)のみ有効
	温度計測時 電流出力反映範囲	QE for AFE: Button2, Value2 Button2 を押し LED3 点灯後 Value2 で下限温度を指定 LED3 点滅中に Value2 で上限温 度を指定	待機時(LED0 点灯)のみ有効 Default: -40°C~160°C
	熱電対 電圧キャリブレーション	RSSKRX23E-B SW3-1: OFF QE for AFE: Value3 Value3 で入力電圧 1 を指定 LED2 点滅中に Value3 で入力電 圧 2 を指定	待機時(LED0 点灯)のみ有効 A/D 変換中 LED0 消灯 異常終了時 LED2 が 5 回点滅
	測温抵抗体 抵抗キャリブレーション	RSSKRX23E-B SW3-1: OFF QE for AFE: Button3, Value3 Button3 を押し、LED2 点灯後 Value3 で入力抵抗 1 を指定 LED2 点滅中に Value3 で入力抵 抗 2 を指定	待機時(LED0 点灯)のみ有効 A/D 変換中 LED0、LED2 消灯 異常終了時 LED2 が 5 回点滅
(SW3-1:ON) 電圧計測	電圧キャリブレーション	RSSKRX23E-B SW3-1: ON QE for AFE: Value3 Value3 で入力電圧 1 を指定 LED2 点滅中に Value3 で入力電 圧 2 を指定	待機時(LED0 点灯)のみ有効 A/D 変換中 LED0 消灯 異常終了時 LED2 が 5 回点滅

表 1-2 操作可能項目 (2/2)

太字デフォルト

項目	操作	補足
電流出力	警報電流選択 QE for AFE: Button1 ボタン操作で送り選択 3.2, 22.8 , 24.0 [mA]	
	出力電流指定 QE for AFE: Value4	待機時(LED0 点灯)のみ有効 異常終了時 LED3 が 5 回点滅
	出力電流 キャリブレーション QE for AFE: Button4, Value4 Button4 を押し、LED3 点灯後 Value4 で 20mA 電流計測値を指 定後、Value4 で 4mA 電流計測 値指定	待機時(LED0 点灯)のみ有効 異常終了時 LED3 が 5 回点滅
	出力電流異常 -	計測中又は出力電流指定時の出力 電流算出異常は DAC 出力 0、異常 中 LED0 点滅

表 1-3 レジスタ設定変更可能項目

項目	操作	補足
温度計測 【注1】	熱電対入力 PGA ゲイン CH0 の PGA ゲイン設定	キャリブレーション中無効
	測温抵抗体入力 PGA ゲイン CH1 の PGA ゲイン設定	
電圧計測	PGA CH2 の各項目を設定	キャリブレーション中無効 リセットスタートで初期値
	OSR1 【注2】	
	OSR2	

- 【注】 1. 温度計測の MRm、CRm、OSRm、SGCRm レジスタ設定は計測開始時にプログラム保持値（表 5-8）に設定されます。また本表記載以外の変更は正しい動作をしません。
2. 電圧計測の OSR1 設定値は 160 以上です。160 より小さな設定では QE for AFE の通信エラーが発生します。

また、表 1-4 に示すパラメータは E2 データフラッシュにより変更を維持します。

表 1-4 維持パラメータ

項目	記憶数	内訳
温度計測周期選択	1	
温度計測 DSAD0 パラメータ	2 セット	温度計測周期ごと
温度計測時電流出力反映範囲	1 セット	
DSAD0 キャリブレーション時平均回数	1	
DAC 出力設定値変換係数	1 セット	
4-20mA 警句出力選択	1	

【注】 詳細は表 5-23 構造体 st_e2df_data_t 参照

2. 動作確認環境

表 2-1 動作確認環境

項目	内容
ボード	RSSKRX23E-B ボード (RTK0ES1001C00001BJ)
MCU	RX23E-B (R5F523E6LDFP) 電源電圧(VCC, AVCC0): 5V 動作周波数(ICLK): 32MHz 周辺動作周波数(PCLKB, PCLKC): 32MHz DSAD0 動作周波数(f_{OP}): 16MHz DSAD0 モジュレータクロック周波数(f_{MOD}): 4MHz
熱電対	XE-3505-001 (Labfacility Limited)
測温抵抗体	PTS060301B100RP100 (On Board)
熱電対キャリブレータ	CA320 (Yokogawa Test & Measurement Corporation)
Host	Renesas QE for AFE V2.1.1
IDE	Renesas e2 Studio Version 2023-04 Renesas RX Smart Configurator V23.4.0
Tool Chain	Renesas CC-RX V3.05.00
エミュレータ	Renesas E2 エミュレータ Lite

3. 関連ドキュメント

- R01UH0972 RX23E-B グループ ユーザーズマニュアル ハードウェア編
- R12UZ0108 RSSKRX23E-B ユーザーズマニュアル
- R01AN6364 RX23E-B グループ RSSKRX23E-B ボード制御プログラム

4. 4-20mA 通信

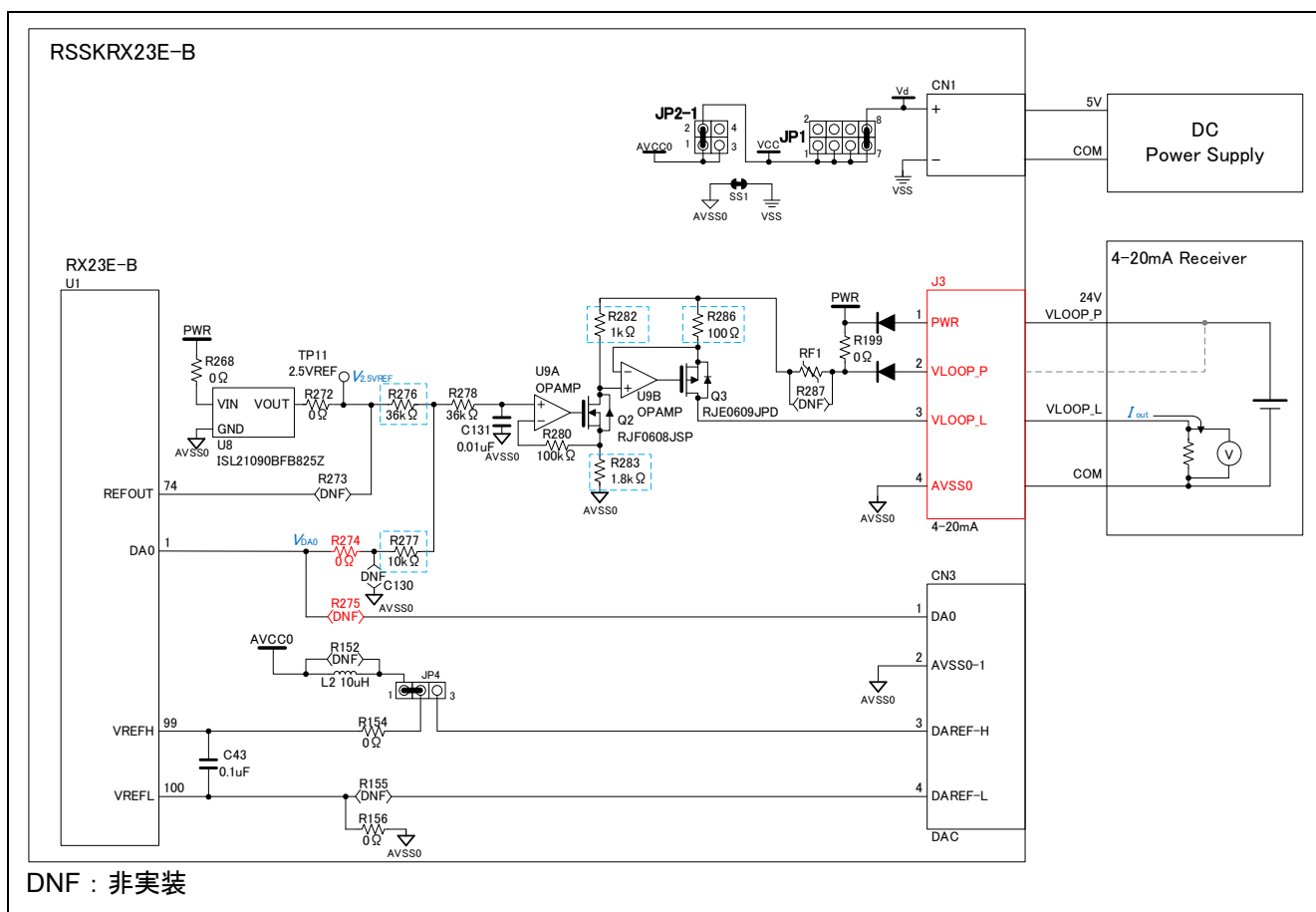
4.1 ハードウェア構成

4.1.1 4-20mA トランスミッタ

RSSKRX23E-B ボードを使用した 4-20mA トランスミッタの構成を図 4-1 に示します。表 4-1 に 4-20mA トランスミッタ構成にするために行った RSSKRX23E-B の部品変更を、表 4-2 にジャンパ設定を示します。

図 4-1 において、DA コンバータの出力電圧 V_{DA0} と出力電流 I_{out} の関係は以下の式で表すことができます。

$$I_{out} = \frac{R_{282}}{R_{283}R_{286}} \left\{ \frac{1}{R_{276} + R_{277}} (R_{276}V_{DA0} + R_{277}V_{2.5VREF}) \right\}$$



4.1.2 温度計測回路

「RSSKRX23E-B ユーザーズマニュアル」の以下を参照ください。

- 2.4.2 熱電対計測回路
- 2.4.3 オンボード RTD による基準接点補償回路

4.1.3 電圧計測回路

電圧計測回路を図 4-2 に示します。

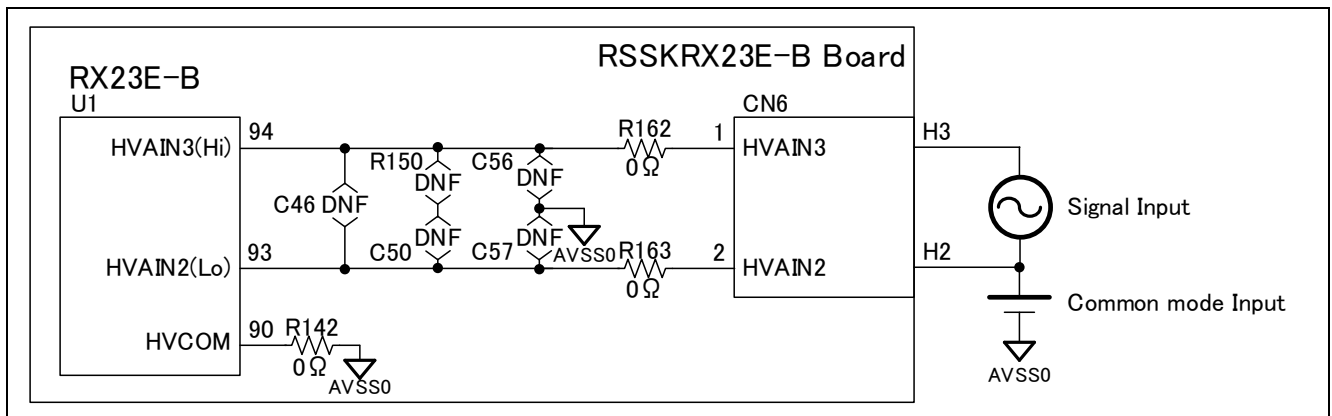


図 4-2 RSSKRX23E-B 電圧計測回路

4.2 温度計測

温度計測は、RSSKRX23E-B ボードに搭載した测温抵抗体(RTD)で計測した温度を基準接点温度として、熱電対で計測します。

取得した熱電対・RTD の各 A/D 変換値から熱電対で計測した温度を算出する手順を図 4-3 に示します。但し、移動平均は無効となるよう移動平均数を 1 に設定しています。

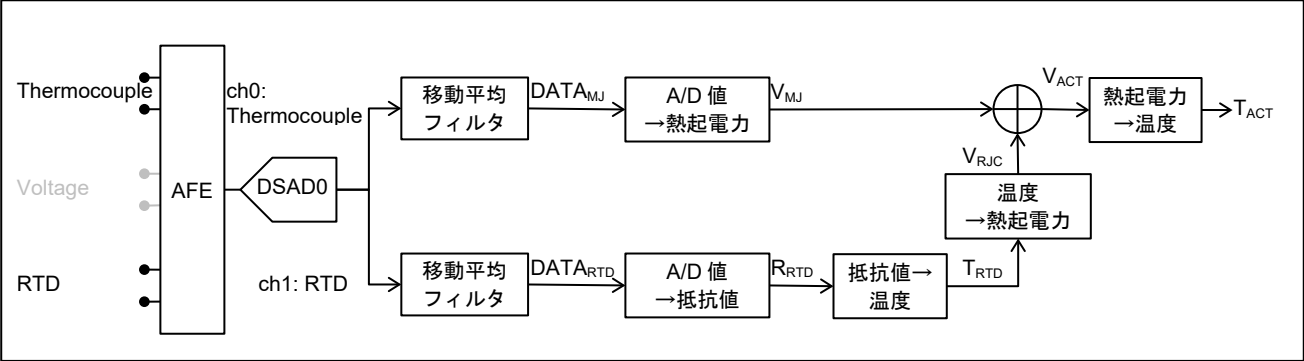


図 4-3 温度算出手順

4.2.1 熱電対

本例に使用する熱電対の仕様を表 4-3 に、熱電対キャリブレーション CA320 の仕様を表 4-4 に示します。

表 4-3 XE-3505-001 仕様抜粋

項目	仕様
Type	K
Tolerance	IEC-584-2 Class 1
Temperature range	-75°C to +250°C
Output voltage range	-2,755μV to 10,153μV (junction reference Temperature: 0°C)

表 4-4 CA320 仕様抜粋

項目	仕様						
Output Type Setting	K						
Output Tolerance 【注】	<table><tr><td>-200.0°C ≤ t < 0.0°C</td><td>0.7 + t x 0.4%</td></tr><tr><td>0.0°C ≤ t < +500.0°C</td><td>0.7</td></tr><tr><td>+500.0°C ≤ t ≤ +1372.0°C</td><td>0.7 + (t - 500) x 0.03%</td></tr></table>	-200.0°C ≤ t < 0.0°C	0.7 + t x 0.4%	0.0°C ≤ t < +500.0°C	0.7	+500.0°C ≤ t ≤ +1372.0°C	0.7 + (t - 500) x 0.03%
-200.0°C ≤ t < 0.0°C	0.7 + t x 0.4%						
0.0°C ≤ t < +500.0°C	0.7						
+500.0°C ≤ t ≤ +1372.0°C	0.7 + (t - 500) x 0.03%						
Compatibility Standard	IEC60584-1						
Temperature Range	-200.0°C to +1372.0°C						
Output voltage Range	-5,891μV to 54,886μV (-200.0°C ≤ t ≤ +1372.0°C) (junction reference Temperature: 0°C)						

【注】 端子 B (バナナ端子) 使用、外部 RJ センサ(別売り) による基準接点補償時

熱電対の温度対出力電圧特性を図 4-4 に示します。

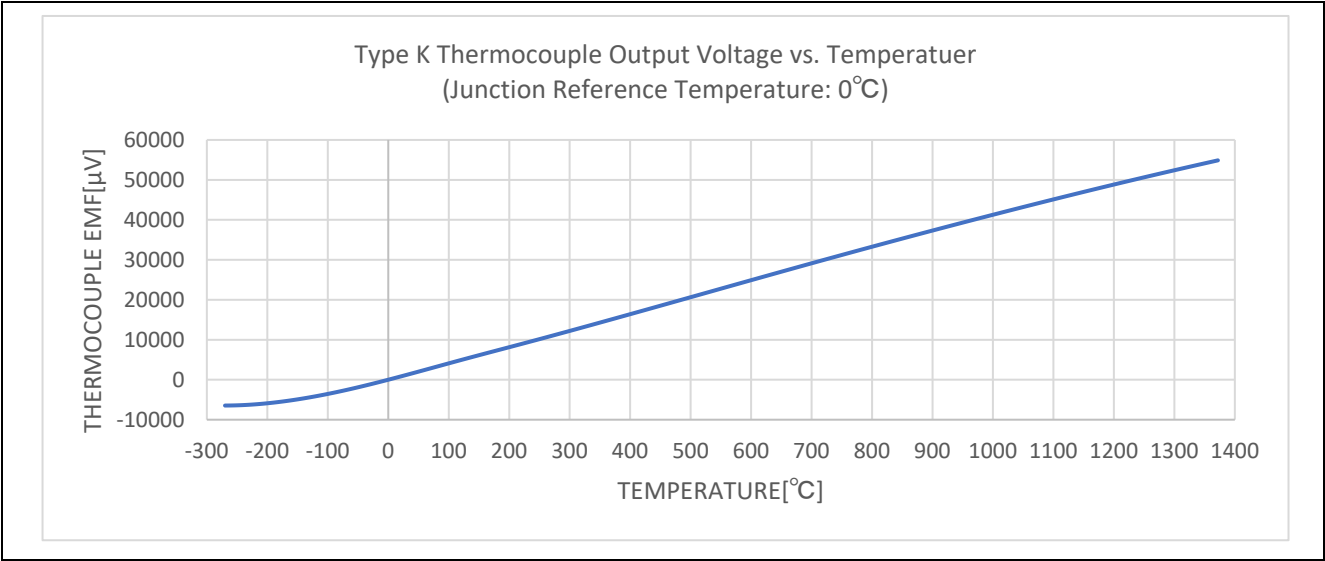


図 4-4 Type K 熱電対温度特性（IEC-60584-1 より）

熱電対は温度に対する熱起電力が非線形のため、温度に対する熱起電力を規定したテーブルを用いて温度に変換します。本例では、IEC60584-1 の規準熱起電力表 type K を参照し、-270°C から 1372°C の範囲で 1°C 刻みの熱起電力のテーブルを使用します。

また、熱電対はフローティングでは電位が安定しないため、AFE のバイアス電圧出力を有効にすることで電位を安定させます。

本例の熱電対起電力の計測条件を表 4-5 に示します。

表 4-5 熱電対計測条件

項目	条件	備考
バイアス電圧	2.5V	RX23E-B VBIAS を Lo 側に適用
DSAD0 基準電圧 VREF0	2.5V	内蔵 VREF 出力を使用
PGA ゲイン GPGA0	x128	熱起電力 19531.25μV 以下【注】

【注】 熱起電力が 19531.25μV を超える場合は PGA ゲイン下げる必要があります。

4.2.2 測温抵抗体(RTD)

本例では RSSKRX23E-B ボード搭載の 4 線式 RTD、PTS060301B100RP100 を使用します。PTS060301B100RP100 仕様抜粋を表 4-6 に、温度に対する抵抗値の特性を図 4-5 に示します。

表 4-6 PTS060301B100RP100 仕様抜粋

項目	仕様
Tolerance Class	F0.3
Resistance values R0 at 0 °C	100Ω
Operating temperature range	-55°C to +155°C
Register value range (Board constraints)	84.271Ω (-40°C)~ 132.803Ω (85°C)
Measurement current $I_{\text{meas.}}$ (DC) ^[注]	0.1mA to 0.50mA

【注】 自己発熱が 0.1°C 未満における定電流

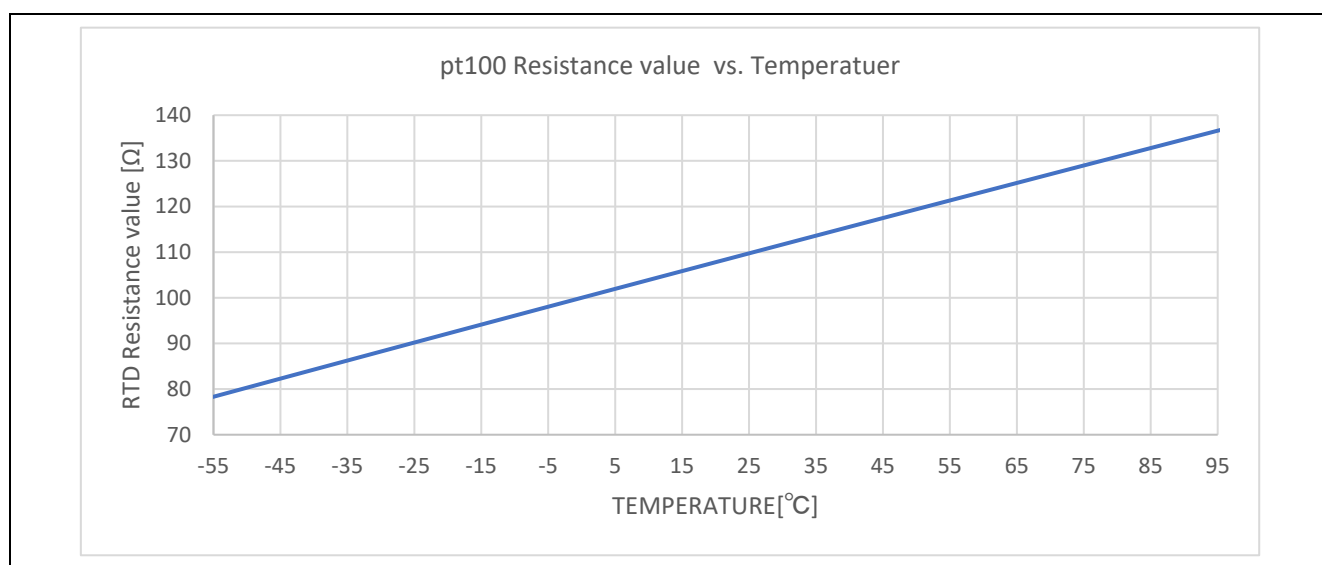


図 4-5 pt100 温度対抵抗値 (IEC 60751 より)

本例ではレシオメトリック測定を行います。RTD と基準抵抗 R_{REF} の直列接続に定電流を印加して、 R_{REF} に掛かる電圧を基準電圧 V_{REF1} として RTD の電圧を A/D 変換します。

A/D 変換値から RTD の抵抗値を算出し、抵抗値を温度に換算します。RTD の抵抗値は温度に対して非線形のため、温度に対する抵抗値を規定したテーブルを用いて温度に変換します。本例では、IEC 60751 の Pt100 の規準抵抗値の演算式から、-50°C から 95°C の範囲で 1°C 刻みの抵抗値テーブルを作成しています。

本例の RTD 計測条件を表 4-7 に示します。

表 4-7 RTD 計測条件

項目	条件	備考
計測温度範囲	-50°C ~ 95°C	
励起電流 I_{EXC}	500μA	
PGA ゲイン G_{PGA1}	x32	
基準抵抗値 R_{REF}	5.1kΩ	
DSAD0 基準電圧 V_{REF1}	2.55V	R_{REF} に掛かる電圧を A/D 変換基準電圧とする。 $V_{\text{REF1}} = I_{\text{EXC}} \times R_{\text{REF}} = 2.55\text{V}$ R_{REF} インピーダンスが高いため基準バッファ使用

4.2.3 熱電対・RTD の A/D 変換

熱電対を CH0、RTD を CH1 に割り当てて、DSAD0 のチャネルスキャンにより各電圧を A/D 変換して取得します。本例の計測周期は 300ms と 150ms をプリセットしています。図 4-6 に熱電対および RTD の A/D 変換シーケンスを、表 4-1 に 150ms 周期計測の A/D 変換条件を示します。デジタルフィルタゲインは Sinc フィルタゲイン補正で 1 になるよう補正します。

各 A/D 変換値は DSAD0 の A/D 変換終了割り込みフラグ ADI0 により検知して取得します。取得した A/D 値のチャンネルが CH1 の場合に、一対の A/D 値の取得終了として、温度算出処理を行います。

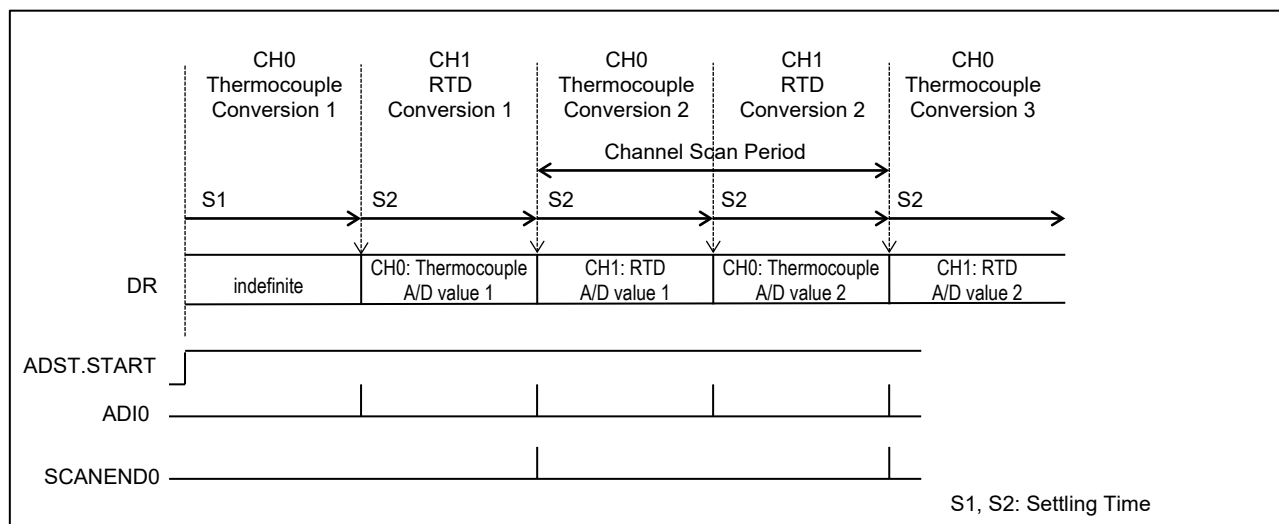


図 4-6 温度計測の A/D 変換シーケンス

表 4-8 温度計測の DSAD0 変換条件（150ms 周期）

モジュレータクロック周波数 F_{MOD} : 4MHz

項目			設定		備考	
			CH0: 熱電対	CH1: RTD		
設定	入力端子		+	AIN11	AIN5	
			-	AIN10	AIN4	
	PGA ゲイン		x128	x32	G _{PGAm} , m=0, 1	
	基準電圧		REFOUT/AVSS0	REF0P/REF0N	V _{REF0} = 5V	
	OSR	OSR1	256			
		OSR2	292			
		総合 OSR	74752	= OSR1 x OSR2		
	デジタル フィルタ	タイプ	SINC4 + SINC4			
		ゲイン補正	1.181567267	1/G _{DFm} , m=0, 1		
チャネルスキャン周期			150.0105ms	= S2 x 2		
			Settling Time 1: S1	75.00552ms		
			Settling Time 2: S2	75.00525ms		
温度計測レート			6.666200033SPS			

【注】 セトリング時間の詳細については、「RX23E-B グループ ユーザーズマニュアル ハードウェア編 36.3.7.2 セトリング時間」を参照ください。

4.2.4 温度算出

移動平均フィルタによりノイズを低減した熱電対および RTD の各 A/D 変換値から、基準接点補償により計測温度を図 4-3 に示す手順で算出します。

(1) RTD による熱電対基準接点温度の計測

(a) RTD 抵抗値の算出

RTD の A/D 変換値 $DATA_{RTD}$ から RTD の抵抗値 R_{RTD} を求めます。PGA の設定ゲインを G_{PGA1} 、DSAD0 の分解能 24bit、基準抵抗値 R_{REF} とすると、 R_{RTD} は次式で算出します。

$$R_{RTD} = \frac{2 \cdot R_{REF}}{2^{24} \cdot G_{PGA1}} \cdot DATA_{RTD} = \frac{R_{REF}}{2^{23} \cdot G_{PGA1}} \cdot DATA_{RTD}$$

(b) 熱電対の基準接点温度の算出

RTD の温度対抵抗値のテーブルから RTD の抵抗値 R_{RTD} 前後の（温度,抵抗値）を取得し、取得した結果から抵抗値 R_{RTD} に相当する温度 T_{RTD} を直線補間により求めます。

抵抗値を R 、温度を T とすると、取得したテーブルの 2 点 $a(T_1, R_1)$ 、 $b(T_2, R_2)$ 間の T 軸と R 軸の距離に対し、 a 点から計測点 $c(T_{RTD}, R_{RTD})$ の T 軸と R 軸の距離の比がそれぞれ同じであることから、その関係を次式で表せます。

$$\frac{R_{RTD} - R_1}{R_2 - R_1} = \frac{T_{RTD} - T_1}{T_2 - T_1} = \alpha$$

上式を整理して、抵抗値 R_{RTD} に対する温度 T_{RTD} を次式で算出します。

$$T_{RTD} = T_1 + \alpha(T_2 - T_1) = T_1 + \frac{R_{RTD} - R_1}{R_2 - R_1} \cdot (T_2 - T_1)$$

(2) 熱電対計測による温度の算出

(a) 熱電対の基準接点熱起電力の算出

RTD で計測した温度 T_{RTD} を熱電対の基準接点温度として、温度対熱起電力のテーブルから温度 T_{RTD} 前後の（温度,熱起電力）を取得し、 T_{RTD} に相当する熱起電力 V_{RJC} を直線補間により求めます。

温度を T 、熱起電力を V とすると、取得したテーブルの 2 点 (T_1, V_1) 、 (T_2, V_2) を通る線分上で、 T_{RTD} に対する熱起電力 V_{RJC} を直線補間式に基づき次式で算出します。

$$V_{RJC} = V_1 + \frac{T_{RTD} - T_1}{T_2 - T_1} \cdot (V_2 - V_1)$$

(b) 熱電対の測温接点熱起電力の算出

熱電対の A/D 変換値 $DATA_{TC}$ から測温接点の熱起電力 V_{MJ} を求めます。PGA の設定ゲイン G_{PGA0} 、A/D 変換値のフルスケール 2^{24} 、DSAD0 の基準電圧を V_{REF0} とすると、測温接点熱起電力 V_{MJ} は次式で算出します。

$$V_{MJ} = \frac{2 \cdot V_{REF0}}{2^{24} \cdot G_{PGA0}} \cdot DATA_{MJ} = \frac{V_{REF0}}{2^{23} \cdot G_{PGA0}} \cdot DATA_{MJ}$$

(c) 基準接点温度 0°C に対する熱電対の熱起電力算出

測温接点熱起電力 V_{MJ} に、基準接点熱起電力 V_{RJC} を加算して、零接点に対する熱電対の熱起電力 V_{ACT} を算出します。

$$V_{ACT} = V_{MJ} + V_{RJC}$$

(d) 温度変換

温度対熱起電力のテーブルから熱起電力 V_{ACT} 前後の（温度, 起電力）を取得し、取得した結果から V_{ACT} に相当する温度 T_{ACT} を直線補間により求めます。

温度を T 、熱起電力を V とすると、取得したテーブルの 2 点 (T_1, V_1) 、 (T_2, V_2) を通る線分上で、熱起電力 V_{ACT} に対する温度 T_{ACT} を直線補間式に基づき次式で算出します。

$$T_{ACT} = T_1 + \frac{V_{ACT} - V_1}{V_2 - V_1} \cdot (T_2 - T_1)$$

4.3 電圧計測

電圧算出の手順を図 4-7 に示します。但し、移動平均は無効となるよう移動平均数を 1 に設定しています。

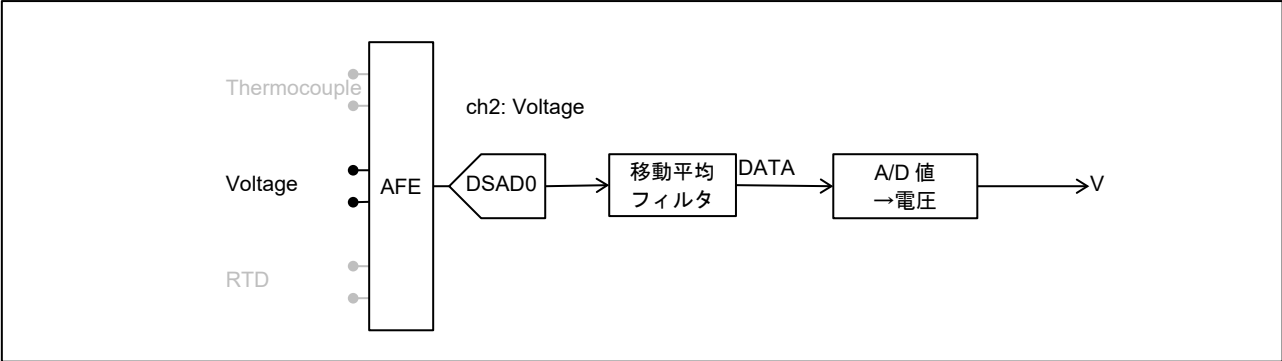


図 4-7 電圧算出手順

4.3.1 入力電圧の A/D 変換

端子入力電圧を DSAD0 で A/D 変換します。本例では DSAD0 の CH2 設定で入力電圧を A/D 変換します。表 4-9 に A/D 変換条件を示します。デジタルフィルタゲインは Sinc フィルタゲイン補正で 1 になるよう補正します。

表 4-9 電圧計測の DSAD0 変換条件

モジュレータクロック周波数: $F_{MOD} = 4\text{MHz}$

項目			CH2	備考	
設定	入力端子		+	HVAIN3	
			-	HVAIN2	
	PGA ゲイン		x1	HVAIN 使用のため $G_{PGA2} = 0.1$	
	基準電圧		REFOUT/AVSS0	$V_{REF2} = 2.5V$	
	OSR	OSR1	256		
		OSR2	16		
		総合 OSR	4096	= OSR1 x OSR2	
	デジタル フィルタ	タイプ	SINC4 + SINC4		
		ゲイン補正	1.0	$1/G_{DF2}$	
データレート			976.5625SPS	= $F_{MOD} / (OSR1 \times OSR2)$	

4.3.2 電圧算出

A/D 変換結果から、端子入力電圧を求めます。

PGA ゲインを G_{PGA2} 、A/D 変換値のフルスケール 2^{24} 、DSAD0 基準電圧を V_{REF2} とすると、A/D 変換結果 DATA に対する入力端子電圧 V は次式で算出します。

$$V = \frac{2 \cdot V_{REF2}}{2^{24} \cdot G_{PGA2}} \cdot \text{DATA}$$

4.4 DSAD キャリブレーション

DSAD のオフセット・ゲイン補正をすることで、A/D 変換精度を高めることができます。本例では「RX23E-B グループ ユーザーズマニュアル ハードウェア編 36.4.6 オフセットエラー/ゲインエラー補正值の算出」の方法に従い、2 種の期待値に対する A/D 変換結果からオフセットおよびゲインの補正值を算出し、DSAD0 に設定します。各キャリブレーション対象の期待値指定を表 4-10 に示します。

表 4-10 キャリブレーション対象の期待値指定

対象	期待値	A/D 期待値	補足
熱電対入力	電圧 V_{IN} [V]	$DATA_{EXP} = V_{IN} \cdot G_{PGA} \cdot (2^{23}/V_{REF})$	熱電対キャリブレータ使用
測温抵抗体入力	抵抗値 R [Ω]	$DATA_{EXP} = R \cdot G_{PGA} \cdot (2^{23}/R_{REF})$	RTD キャリブレータを使用
電圧入力	電圧 V_{IN} [V]	$DATA_{EXP} = V_{IN} \cdot G_{PGA} \cdot (2^{23}/V_{REF})$	

【注】 G_{PGA} : PGA ゲイン、HVAIN 端子入力の場合は $0.1 \times$ PGA ゲイン

V_{REF} : DSAD0 基準電圧(=2.5V)

R_{REF} : 基準抵抗値(=5.1k Ω)

キャリブレーション手順は次の通りです。

(1) オフセット補正

(a) 開始設定

キャリブレーション対象のチャネル n のオフセット補正、ゲイン補正の各レジスタを以下のように設定します。

$OFCR_n = 0x00000000$

$GCR_n = 0x00400000$

(b) キャリブレーション入力 1 の A/D 値を取得

キャリブレーションのための入力信号 REF_1 を印加し、A/D 変換値 $DATA_1$ を取得します。

ここで、キャリブレーション精度を高めるために、所定数の平均を取ります。

(c) オフセットの算出と設定

表 4-10 の算出式により REF_1 に対応する A/D 期待値 $DATA_{EXP1}$ を求め、取得した $DATA_1$ から次式でオフセットを算出して $OFCR_n$ に設定します。

$$OFCR_n = DATA_1 - DATA_{EXP1}$$

(2) ゲイン補正

(a) キャリブレーション入力 2 の A/D 値を取得

キャリブレーションのための入力信号 REF_2 を印加し、A/D 変換値 $DATA_2$ を取得します。

オフセット補正と同様に、キャリブレーション精度を高めるために、所定数の平均を取ります。

(b) ゲイン補正值の算出と設定

表 4-10 の算出式により REF_2 に対応する A/D 期待値 $DATA_{EXP2}$ を求め、取得した A/D 値 $DATA_2$ から次式でゲイン補正值を算出して GCR_n に設定します。

$$GCR_n = 2^{22} \cdot \frac{DATA_{EXP2}}{DATA_2}$$

4.5 電流出力

本例では、表 4-11 に示すように、各計測結果に対して所定の計測レンジを 4mA から 20mA に割り当てて出力します。

表 4-11 4-20mA 出力仕様

項目		設定			説明
		温度計測	電圧計測		
出力電流範囲 I _{LIMITmin} ~ I _{LIMITmax}		3.8 ~ 20.5 [mA]			
出力対応計測 レンジ M _{min} ~ M _{max}		-40℃ ~ 150℃ (default)	PGA x1	±10.0V	計測レンジに対して 4mA ~ 20mA を割当
			PGA x2	±5.0V	
			PGA x4	±2.5V	
警報 出力	電流	3.2, 22.8, 24.0 [mA] から選択			
	条件	A/D 変換エラーが約 1 秒続いた場合に出力 A/D 変換エラー解消後約 1 秒後に解除			

4.5.1 電流出力手順

図 4-8 に電流出力手順を示します。

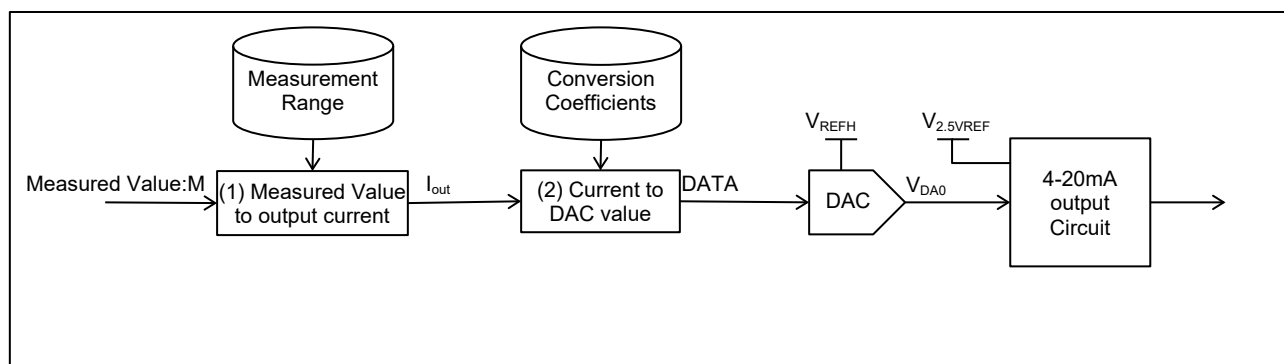


図 4-8 4-20mA 出力設定手順

(1) 計測値を出力電流値に変換

計測レンジを I_{min} : 4mA から I_{max} : 20mA に割り当て、計測値に相当する電流を算出します。算出した電流が出力範囲を超えた場合、出力電流範囲の最大値または最小値とします。

$$I_{out} = \begin{cases} (M - M_{max}) \cdot \frac{(I_{min} - I_{max})}{(M_{max} - M_{min})} + I_{min} \\ I_{LIMITmin}: I_{out} < I_{LIMITmin} \\ I_{LIMITmax}: I_{out} > I_{LIMITmax} \end{cases}$$

(2) 電流値を DAC 設定値に変換

電流値 I_{out} を DAC 出力値変換係数 a , b 、DAC 分解能 16bit、DAC 基準電圧 V_{REFH} から次式のように DAC 設定値 $DATA$ に変換します。

$$DATA = \frac{2^{16}}{V_{REFH}} \cdot \frac{I_{out} - b}{a}$$

DAC 出力値変換係数の初期値は、図 4-1 の回路定数と 4-20mA 出力回路の基準電圧 $V_{2.5VREF}$ から次のように定義します。

$$I_{out} = \frac{R_{282}}{R_{283}R_{286}} \left(\frac{1}{R_{276} + R_{277}} (R_{276}V_{DA0} + R_{277}V_{2.5VREF}) \right)$$

$$= \frac{R_{282}}{R_{283}R_{286}} \left(\frac{1}{R_{276} + R_{277}} \left(R_{276}V_{REF} \frac{DATA}{2^{16}} + R_{277}V_{2.5VREF} \right) \right)$$

$$DATA = \frac{2^{16}}{V_{REFH}} \cdot \frac{I_{out} - \frac{R_{282}R_{277}V_{2.5VREF}}{R_{283}R_{286}(R_{276} + R_{277})}}{\frac{R_{282}R_{276}}{R_{283}R_{286}(R_{276} + R_{277})}} = \frac{2^{16}}{V_{REFH}} \cdot \frac{I_{out} - b}{a}, \quad \begin{cases} a = \frac{R_{282}R_{276}}{R_{283}R_{286}(R_{276} + R_{277})} \\ b = \frac{R_{282}R_{277}V_{2.5VREF}}{R_{283}R_{286}(R_{276} + R_{277})} \end{cases}$$

4.5.2 電流出力キャリブレーション

キャリブレーションにより DAC 出力値変換係数を適正值にすることにより、回路定数のばらつきなどによる電流出力誤差を小さくすることができます。

本例では、DAC 出力設定値に対する出力電流の計測値から、次の手順でキャリブレーションを行います。

(1) 基準電流出力 1 の計測

基準出力電流 I_{REF1} (20mA) を現在の DAC 出力値変換係数で換算した値 $DATA_1$ を DAC に設定し、実際の出力電流 I_1 を計測します。

(2) 基準電流出力 2 の計測

基準出力電流 I_{REF2} (4mA) を現在の DAC 出力値変換係数で換算した値 $DATA_2$ を DAC に設定し、実際の出力電流 I_2 を計測します。

(3) DAC 出力値変換係数の算出

DAC 設定値 $DATA_n$ ($n=1,2$) と実際の出力電流の計測値 I_n から、変換係数を算出します。DAC 設定値 $DATA_n$ に対する DAC 出力電圧 V_n は、DAC 基準電圧 V_{REF} と DAC 分解能 16bit から次式で表せます。

$$V_n = \frac{V_{REF}}{2^{16}} \cdot DATA_n$$

計測した電流 I_n と DAC 出力電圧 V_n から、係数を次式で算出します。

$$\begin{cases} a = \frac{I_1 - I_2}{V_1 - V_2} = \frac{I_1 - I_2}{\frac{V_{REFH}}{2^{16}} (DATA_1 - DATA_2)} \\ b = I_1 - aV_1 = I_2 - aV_2 \end{cases}$$

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。

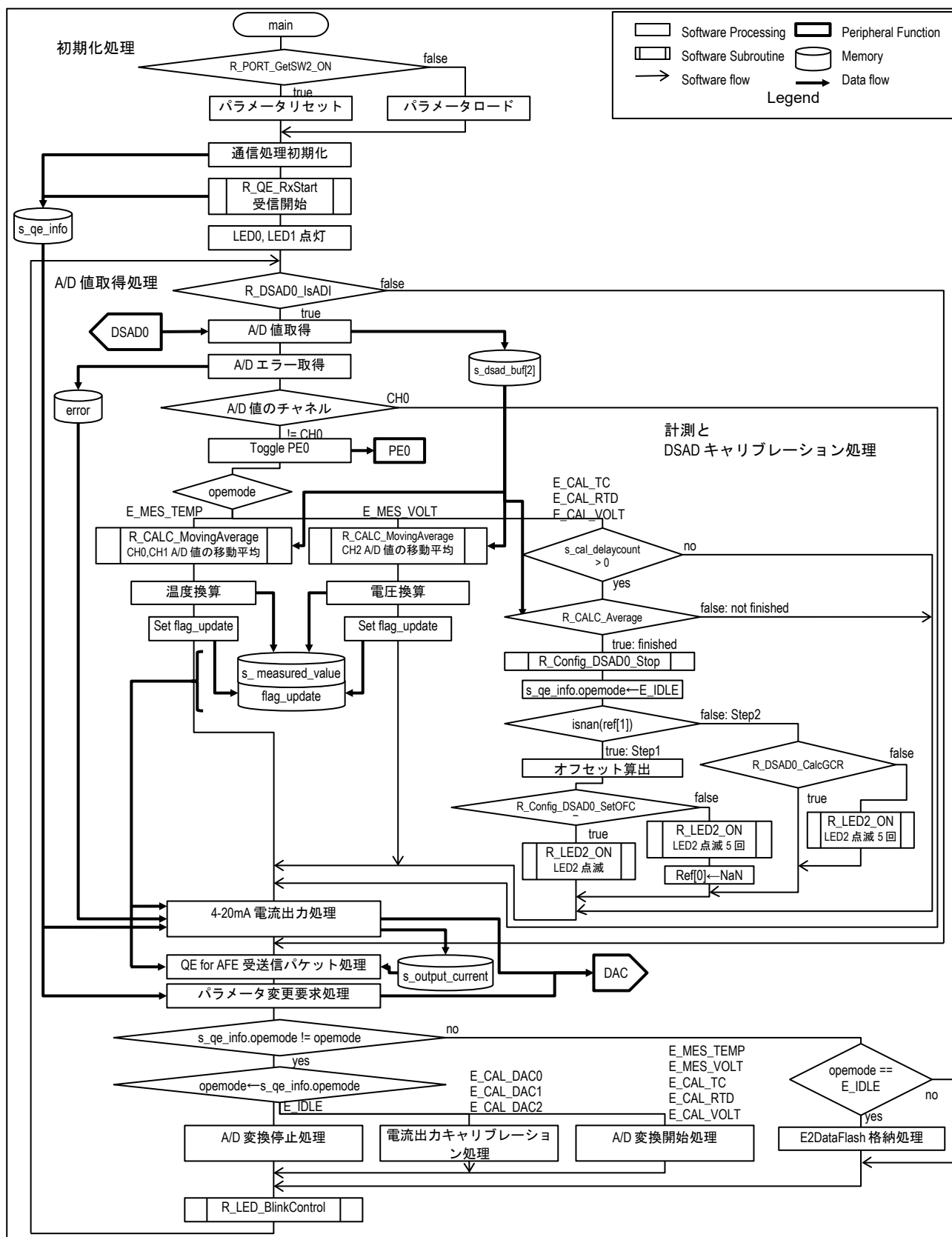


図 5-1 ゼネラルフロー

本プログラムは、s_qe_info 構造体変数のメンバ opemode により動作を規定します。動作モードを表 5-1 に示します。

表 5-1 動作モード

名称	説明
E_IDLE	待機
E_MES_TEMP	温度計測
E_MES_VOLT	電圧計測
E_CAL_TC	熱電対電圧入力キャリブレーション
E_CAL_RTD	測温抵抗体入力キャリブレーション
E_CAL_VOLT	電圧入力キャリブレーション
E_CAL_DAC0	電流出力キャリブレーション
E_CAL_DAC1	
E_CAL_DAC2	

各処理の概要は次の通りです。

- 初期化処理

- 計測条件パラメータのロード

E2 データフラッシュに格納した計測条件パラメータをロードします。

SW2 が押されていた場合は、デフォルト値をロードします。

ロードしたパラメータのオフセット補正值とゲイン補正值がデフォルトの場合、デバイス固有値に変更します。

- DAC 出力開始

初期値 4mA 設定で DAC 出力を行います。

- QE for AFE 通信処理の開始

QE for AFE 通信の各種パラメータを初期化し、受信を開始します。

- LED 点灯

初期化処理の終了を示す LED0、LED1 の点灯を行います。

- A/D 値取得処理

DSAD0 の変換終了(ADI0)を検知したときに、A/D 変換結果を取得し、A/D 値格納配列に格納します。

取得した A/D 変換結果に変換エラーがあった場合、エラー発生を記録します。

- 計測と DSAD キャリブレーション処理

本処理の開始を示す PE0 出力を反転し、A/D 変換開始/停止処理時の opemode により、取得した A/D 値の処理を行います。

- opemode: E_MES_TEMP

CH0, CH1 の A/D 変換結果から温度を算出し、計測結果として保存します。

- opemode: E_MES_VOLT

CH2 の A/D 変換結果から電圧を算出し、計測結果として保存します。

- opemode: E_CAL_TC, E_CAL_RTD, E_CAL_VOLT

動作モードで指定された DSAD0 チャンルのキャリブレーション処理を行います。

- 4-20mA 出力処理

計測結果または警告出力を DAC 出力に反映します。

取得した A/D 変換結果のエラーが約 1 秒継続すると選択された警報電流を出力し、エラー解除が約 1 秒継続すると、計測結果から算出した電流を出力します。

- QE for AFE 受送信パケット処理
QE 通信モジュール API を使用して、QE for AFE からパケットの処理と、計測中であれば計測値と出力電流設定値の送信を行います。送信タイムアウトを検知した場合は、通信処理をリセットします。
表 1-1 に示すユーザ操作に対する処理は、QE for AFE 通信モジュールの各ユーザ関数にて処理します。
QE for AFE 通信モジュールの詳細は、アプリケーションノート「RX23E-B グループ RSKRX23E-B ボード制御プログラム」を参照ください。
- パラメータ変更要求処理
QE for AFE から指定された以下の計測条件パラメータ変更の処理を行います。
 - 温度計測レート選択
 - 温度範囲指定
 - 警告電流選択
 - 出力電流指定
 - DSAD0 設定の変更
- 計測、キャリブレーション開始・終了設定
操作モード opemode が変化した場合、新しい opemode に基づき、計測条件の設定と A/D 変換開始・停止を行います。
 - E_IDLE
A/D 変換の停止、LED0 の点灯
 - E_CAL_DAC0, E_CAL_DAC1, E_CAL_DAC1
「4.5.2 電流出力キャリブレーション」に基づく電流キャリブレーション処理
 - E_MES_TEMP, E_MES_VOLT, E_CAL_TC, E_CAL_RTD, E_CAL_VOLT
各計測またはキャリブレーション用の DSAD0 設定と A/D 変換を開始
- E2 データフラッシュ格納処理
opemode が E_IDLE で変化しない場合、計測条件パラメータに変化があれば E2 データフラッシュ格納パラメータを更新します。

5.2 使用する MCU 機能と設定

本例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 に示します。また、クロック設定を表 5-4 に示します。

周辺機能の設定は Smart Configurator のコード生成機能を用いて生成しています。各周辺機能の設定は用途別に以降に示します。

表 5-2 使用する周辺機能一覧

周辺機能	用途
AFE/DSAD0	入力信号の A/D 変換、熱電対へ BIAS の供給、測温抵抗体へ励起電流の供給
R16DA	4-20mA 電流出力
SCI1	QE for AFE との通信
DMAC0	QE for AFE からのパケット受信
DMAC1	QE for AFE へのパケット送信
CMT0	QE for AFE へのパケット送信エラー検出
CMT1	LED 点滅周期
P70 – P73	LED 点灯制御
PE1 – PE4	スイッチ状態の取得
E2DataFlash	保持パラメータの保存

表 5-3 使用端子一覧

Pin No.	端子名	I/O	用途
1	DA0	O	DA 出力
5	P73	O	LED3
6	P72		LED2
7	P71		LED1
8	P70		LED0
13	XTAL	O	水晶発振子
15	EXTAL	I	
28	P30/RXD1	I	UART1 受信
30	P26/TXD1	O	UART1 送信
39	P15/CTS1#	I	UART1 CTS 入力
62	PE4	I	SW3-2
63	PE3		SW3-1
64	PE2		SW2
65	PE1		SW1
66	PE0	O	計測・DSAD キャリブレーションのための A/D 値取得処理終了通知
74	REFOUT	O	内蔵 VREF 出力
78	AIN10	I/O	熱電対-側入力端子、バイアス電圧
79	AIN11	I	熱電対+側入力端子
80	REF0N	I	測温抵抗体計測の DSAD0 基準電圧入力
81	REF0P		
82	AIN4	I	測温抵抗体-側入力端子
83	AIN5		測温抵抗体+側入力端子
87	AIN9	O	測温抵抗体計測励起電流出力端子
93	HVAIN2	I	電圧計測-側入力端子
94	HVAIN3		電圧計測+側入力端子

表 5-4 クロック設定

項目		設定
使用クロック		メインクロック
	発振源	発振子
	周波数	8MHz
	安定時間	8192 (2048 μ s)
PLL 回路	分周比	x1/2
	逓倍比	x8
SCKCR (FCLK)		x1 (32MHz)
SCKCR (ICLK)		x1 (32MHz)
SCKCR (PCLKA)		x1 (32MHz)
SCKCR (PCLKB)		x1 (32MHz)
SCKCR (PCLKC)		x1 (32MHz)
SCKCR (PCLKD)		x1 (32MHz)

5.2.1 温度・電圧計測

計測には、AFE、DSAD0、を使用します。また、PE0 は計測・DSAD キャリブレーション処理のための A/D 値取得終了を通知するトグル信号出力に使用します。以降に各周辺機能の設定を示します。

表 5-5 AFE の設定

項目		設定
バイアス出力設定	バイアス電圧出力を有効にする	有効
	AIN2 端子出力	無効
	AIN10 端子出力	有効
励起電流出力設定	励起電流出力を有効にする	有効
	動作モード	2 チャネル出力モード
	励起電流	500 μ A
	IEXC0 出力端子	出力停止
	IEXC0 断線検出アシスト	無効
	IEXC1 出力端子	AIN9
	IEXC1 断線検出アシスト	無効
低電圧検出設定		設定しない
ローサイドスイッチ制御設定		設定しない

表 5-6 PORT の設定

項目	設定
ポート選択	PORTE
使用ポート	PE0
設定	出力 CMOS 出力 1 を出力

表 5-7 DSAD0 の設定

連続スキャンモード

項目		設定		
計測対象		温度		電圧
アナログ入力チャネル設定		0	1	2
動作クロック設定		PCLK/2(16MHz)		
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 変換完了割り込み(ADIO)	許可、レベル 0(割り込み禁止)		
	$\Delta \Sigma$ A/D 変換スキャン完了割り込み(SCANEND0)	許可しない		
	$\Delta \Sigma$ A/D チャネル切り替え割り込み(CHCHG0)	許可しない		
電圧異常および断線検出設定		使用しない		
アナログ入力設定	+側入力信号	AIN11	AIN5	HVAIN3
	-側入力信号	AIN10	AIN4	HVAIN2
	基準電圧	REFOUT /AVSS0	REF0P /REF0N	REFOUT /AVSS0
	+側リファレンスバッファ	-	有効	-
	-側リファレンスバッファ	-	有効	-
アンプリファイア設定	アンプ選択	PGA		
	PGA ゲイン設定	x128	x32	x1
$\Delta \Sigma$ 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	1		
	前段オーバーサンプリング比	表 5-8		256
	後段オーバーサンプリング比			16
	オフセット補正值	設定しない		
	ゲイン補正值	設定しない		
断線検出アシスト設定		禁止		
デジタルフィルタ設定	Sinc フィルタ選択	Sinc4 + Sinc4		
	Sinc フィルタゲイン補正值を設定する	設定する		
	Sinc フィルタゲイン補正值	表 5-8		1

表 5-8 温度計測の DSAD0 設定

太字デフォルト

項目		設定			
		計測周期			
		アナログ入力チャネル			
$\Delta \Sigma$ A/D 変換設定	前段オーバーサンプリング比	256		256	
	後段オーバーサンプリング比	585		292	
	Sinc フィルタゲイン設定値	1.173508866 0x004B1AC4		1.181567267 0x004B9ECC	

5.2.2 通信

QE for AFE との通信に SCI1、DMAC0、DMAC1、CMT0 を使用します。以降に各周辺機能の設定を示します。

表 5-9 SCI1 の設定

調歩同期式モード
作業モード: 送信/受信

項目		設定
スタートビット検出設定		RXD1 端子の立ち下がりエッジ
データ・ビット長		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	4Mbps
	ビットレートモジュレーション機能	使用しない
	SCK1 端子機能	SCK1 を使用しない
ノイズフィルタ設定		使用しない
ハードウェアフロー制御設定		CTS1#
データ処理設定	送信データ処理	DMAC で処理する
	受信データ処理	DMAC で処理する
割り込み設定	受信エラー割り込み許可	しない
	TXI1, RXI1, TEI1, ERI1 優先順位	レベル 0(割り込み禁止)
コールバック機能設定		なし

表 5-10 DMAC の設定

項目		設定	
		DMAC0	DMAC1
転送設定	起動要因	SCI1 (RXI1)	SCI1 (TXI1)
	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	ノーマルモード
	転送データサイズ	8 ビット	
	転送回数/リピートサイズ/ ブロックサイズ	-	(実行時に設定)
転送元アドレス設定	転送元アドレス	0x0008A025(SCI1.RDR) アドレス固定	(実行時に設定) インクリメント
	転送元アドレスに拡張リ 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 9 ビット (512 バイト)
転送先アドレス設定	転送先アドレス	(プログラムで設定) インクリメント	0x0008A023(SCI1.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 9 ビット (512 バイト)	
割り込み設定		割り込み許可しない	

表 5-11 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)

5.2.3 4-20mA 電流出力

4-20mA 電流出力設定に R16DA を使用します。

表 5-12 DA の設定

項目		設定
D/A チャンネル 0 設定	DA0 を使用	使用
	バッファ出力プルダウンビット	有効
D/A 変換停止時アナログ出力インピーダンス制御ビット		D/A 変換停止時のアナログ出力端子は 1kΩ プルダウン
D/A A/D 同期設定		設定しない

5.2.4 LED とスイッチ

LED の点灯・消灯に P70~P73 を、点滅周期に CMT1 を使用します。また、SW1, SW2, SW3 の状態取得に PE1~PE4 を使用します。

PORT の設定を表 5-13 に、CMT1 の設定を表 5-14 に示します。

表 5-13 PORT の設定

項目	設定							
ポート選択	PORT7				PORTE			
使用ポート	P70	P71	P72	P73	PE1	PE2	PE3	PE4
設定	出力 CMOS 出力 1 を出力				入力			

表 5-14 CMT1 の設定

項目		設定
クロック設定		PCLK/512
コンペアマッチ設定	インターバル時間	250ms
	コンペアマッチ割り込みを許可(CMI1)	許可 優先順位：レベル 0(割り込み禁止)

5.2.5 E2 データフラッシュ

設定パラメータを保持するために E2 データフラッシュを使用します。E2 データフラッシュへのアクセスには FIT フラッシュモジュールを使用します。

表 5-15 FIT フラッシュモジュールの設定

項目	設定
Parameter check	Enable parameter checks
Enable code flash programming	Only data flash
Enable BGO/Non-blocking data flash operation	Forces data flash API function to block until completed.
Enable BGO/Non-blocking code flash operation	Forces ROM API function to block until completed.
Enable code flash self-programming	Programming code flash while executing in RAM.

5.3 プログラム構成

5.3.1 ソースファイル構成

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_CMT1	
├ Config_DA	
├ Config_DMACH0	
├ Config_DMACH1	
├ Config_DSAD0	
├ Config_PORT	
├ Config_SCI1	
├ general	
├ r_bsp	
├ r_config	
├ r_flash_rx	
└ r_pincfg	
└ r_4_20ma_cfg.h	各初期値定義
└ main.c	メイン関数
└ r_calc_api.c	各種演算
└ r_calc_api.h	
└ r_crnt_api.h	
└ r_crnt_api.c	4-20mA 出力電流換算処理
└ r_crnt_cfg.h	
└ r_led_api.c	
└ r_led_api.h	LED 操作
└ r_qe_api.c	QE for AFE 通信モジュール
└ r_qe_api_user.c	
└ r_qe_api.h	
└ r_qe_cfg.h	
└ r_qe_cfg_typedef.h	
└ r_qe_packet.h	
└ r_qe_sc_if.h	
└ r_ring_buffer_control_api.c	
└ r_ring_buffer_control_api.h	
└ r_rtd_api.h	測温抵抗温度換算処理
└ r_rtd_api.c	
└ r_rtd_cfg.h	
└ r_thermocouple_api.h	熱電対温度換算処理
└ r_thermocouple_api.c	
└ r_thermocouple_cfg.h	
└ r_voltage_api.h	電圧計測換算処理
└ r_voltage_api.c	
└ r_voltage_cfg.h	

5.3.2 マクロ定義

表 5-17 r_4_20mA_cfg.h 定義一覧

定義名	値	説明
D_CFG_MES_TEMP_RATE_INDEX	1	温度計測周期選択初期値 0: 300ms 1: 150ms
D_CFG_CRNT_ALERT_INDEX	1	4-20mA 警告出力選択初期値
D_CFG_CRNT_ALERT_TIME_SEC	1.0	4-20mA 警告出力時定数 [s]
D_CFG_CAL_AVERAGE_NUM	128	DSAD キャリブレーション時平均回数 初期値
D_CFG_CAL_DELAY	5.0F	DSAD キャリブレーション開始遅延時間[s]
D_CFG_TEMP_MOVINGAVERAGE_NUM	1	温度計測移動平均数初期値
D_CFG_VOLT_MOVINGAVERAGE_NUM	1	電圧計測移動平均数初期値
D_CFG_XCRM_ERROR_VALUE	0x08000000	初期化用 GCRm, OFCRm エラー値
D_CFG_TEMP_DSAD_PRM_DEFAULT_300MS	表 5-8 参照	温度計測 DSAD0 パラメータ初期値
D_CFG_TEMP_DSAD_PRM_DEFAULT_150MS		
D_CFG_TEMP_RANGE_MIN	-40.0f	温度計測時電流出力反映下限値 [°C]
D_CFG_TEMP_RANGE_MAX	160.0f	温度計測時電流出力反映上限値 [°C]
D_CAL_AVERAGE_NUM_MIN	1	キャリブレーション平均回数最小値
D_CAL_AVERAGE_NUM_MAX	512	キャリブレーション平均回数最大値
D_MOVINGAVERAGE_NUM_MIN	1	移動平均数最小値
D_MOVINGAVERAGE_NUM_MAX	128	移動平均数最大値

表 5-18 r_crnt_cfg.h 定義一覧

定義名	値	説明
D_CRNT_CFG_ALERT_INDEXES	3	4-20mA 警告出力選択肢数
D_CRNT_CFG_AEERT_CURRENT_0	3.2f	4-20mA 警告出力電流 0 [mA]
D_CRNT_CFG_AEERT_CURRENT_1	22.8f	4-20mA 警告出力電流 1 [mA]
D_CRNT_CFG_AEERT_CURRENT_2	24.0f	4-20mA 警告出力電流 2 [mA]
D_CRNT_CFG_DACVREF	5.0F	DAC 基準電圧 [V]
D_CRNT_CFG_RESOLUTION	16	DAC ビット数
D_CRNT_CFG_DAC_ERROR_VALUE	0	エラー時 DAC 出力設定値
D_CRNT_CFG_R276	36.0	4-20mA 出力回路定数 [kΩ]
D_CRNT_CFG_R277	10.0	
D_CRNT_CFG_R282	1.0	
D_CRNT_CFG_R283	1.8	
D_CRNT_CFG_R286	0.1	
D_CRNT_CFG_VREF	2.5	4-20mA 出力回路基準電圧 $V_{2.5VREF}$ [V]
D_CRNT_CFG_COEF_A_DEFAULT	「4.5.1 電流出力手順」参照	DAC 出力設定値変換係数初期値
D_CRNT_CFG_COEF_B_DEFAULT		

表 5-19 r_rtd_cfg.h 定義一覧

定義名	値	説明
D_RTD_CFG_TYPE	1	測温抵抗体選択 1: 4 線式 2: 3 線式
D_RTD_CFG_RREF	5100.0	R _{REF} 抵抗値[Ω]
D_RTD_CFG_DSADRES	24	A/D コンバータ分解能 [bits]
D_RTD_CFG_OFFSET	0.0F	測温抵抗体抵抗値オフセット [Ω]

表 5-20 r_thermocouple_cfg.h 定義一覧

定義名	値	説明
D_TC_CFG_VREF	2.5F	A/D 変換基準電圧 [V]
D_TC_CFG_DSADRES	24	A/D コンバータ分解能 [bits]

表 5-21 r_voltage_cfg.h 定義一覧

定義名	値	説明
D_VOLTAGE_CFG_VREF	2.5F	A/D 変換基準電圧[V]
D_VOLTAGE_CFG_DSADRES	24	A/D コンバータ分解能 [bits]

表 5-22 r_qe_cfg.h 設定一覧

定義名	値	説明
D_QE_CFG_TX_RINGBUF_SIZE	512U	送信リングバッファサイズ [byte]
D_QE_CFG_RX_RINGBUF_SIZE	512U	受信リングバッファサイズ [byte]
D_QE_CFG_FORMAT_REV	3	通信仕様リビジョン
D_QE_CFG_READ	1	レジスタ読み出し許可
D_QE_CFG_WRITE	1	レジスタ書き込み許可
D_QE_CFG_USER_VAL0	1	User Value 使用設定 0: 不使用 1: 使用
D_QE_CFG_USER_VAL1	1	
D_QE_CFG_USER_VAL2	1	
D_QE_CFG_USER_VAL3	1	
D_QE_CFG_USER_VAL4	0	
D_QE_CFG_USER_VAL5	0	
D_QE_CFG_USER_VAL6	0	
D_QE_CFG_USER_VAL7	0	
D_QE_CFG_EX_SPS	1	SPS 情報サポート 0: しない 1: する
D_QE_CFG_EX_USER_BTN0	1	User Button 使用設定 0: 不使用 1: 使用
D_QE_CFG_EX_USER_BTN1	1	
D_QE_CFG_EX_USER_BTN2	1	
D_QE_CFG_EX_USER_BTN3	1	
D_QE_CFG_EX_USER_BTN4	0	
D_QE_CFG_EX_USER_BTN5	0	
D_QE_CFG_EX_USER_BTN6	0	
D_QE_CFG_EX_USER_BTN7	0	
D_QE_CFG_CH0	0x3	データ送信 CH 使用設定 0x3: 計測値送信 0x0: 不使用
D_QE_CFG_CH1	0x3	
D_QE_CFG_CH2	0x0	
D_QE_CFG_CH3	0x0	
D_QE_CFG_CH4	0x0	
D_QE_CFG_CH5	0x0	
D_QE_CFG_CH6	0x0	
D_QE_CFG_CH7	0x0	
D_QE_CFG_CH8	0x0	
D_QE_CFG_CH9	0x0	
D_QE_CFG_CH10	0x0	
D_QE_CFG_CH11	0x0	
D_QE_CFG_CH12	0x0	
D_QE_CFG_CH13	0x0	
D_QE_CFG_CH14	0x0	
D_QE_CFG_CH15	0x0	
D_QE_CFG_TXT_INFO	"RX23E-B 4-20mA Transmitter"	プログラム情報
D_QE_CFG_TXERRCHK_EN	1	送信エラー検出有効
D_QE_CFG_TIMEOUT	0	タイムアウトでエラーを検出
D_QE_CFG_SCI	1	通信に使用する SCI 番号
D_QE_CFG_DMAC_RX	0	受信処理 DMAC チャンネル
D_QE_CFG_DMAC_TX	1	送信処理 DMAC チャンネル
D_QE_CFG_CMT	0	タイムアウト検出用 CMT 番号

5.3.3 構造体・共用体

表 5-23 main.c 一覧

構造体名	st_e2df_data_t		
説明	データフラッシュに格納する計測条件パラメータ		
メンバ	型	名称	説明
	uint32_t	temp_index_rate	温度計測周期選択
	st_dsad0_prm_t	temp_dsad [D_MES_TEMP_INDEXES][2]	温度計測 DSAD0 パラメータ配列
	st_crnt_range_t	temp_range	温度計測時電流出力反映範囲
	uint32_t	calibration_average_num	キャリブレーション時 A/D 値平均回数
	st_crnt_coef_t	crnt_coef	DAC 出力設定値変換係数
	uint32_t	alert_index	4-20mA 警告出力選択
構造体名	st_calibration_data_t		
説明	DSAD キャリブレーションパラメータ		
メンバ	型	名称	説明
	float	ref[2]	計測値 (2 点)
	float	val[2]	取得 A/D 値 (2 点)
	st_dsad0_prm_t *	p_dsad_prm	温度計測 DSAD0 パラメータへのポインタ
	uint32_t	target	DSAD0 の対象チャンネル
共用体名	st_alert_data_t		
説明	4-20mA 警告検出パラメータ		
メンバ	型	名称	説明
	uint32_t	err_count	エラー連続回数
	uint32_t	alert_count	警告出力連続回数
	uint32_t	alert_threshold	警告出力するエラー連続回数

表 5-24 r_calc_api.h 一覧

構造体名	st_calc_moveavg_data_t		
説明	移動平均処理パラメータ		
メンバ	型	名称	説明
	int32_t	count	取得データ数
	float	sumdata	取得データ合計値
	float *	p_deldata	取得データ格納配列へのポインタ
	int32_t	avgnum	移動平均数
構造体名	st_calc_average_data_t		
説明	平均処理パラメータ		
メンバ	型	名称	説明
	uint32_t	num	平均数
	uint32_t	count	取得データ数
	float	sum	取得データ合計値

表 5-25 r_crnt_api.h 一覧

構造体名	st_crnt_range_t		
説明	計測値範囲		
メンバ	型	名称	説明
	float	min	計測範囲下限値
	float	max	計測範囲上限値
構造体名	st_crnt_coef_t		
説明	DAC 出力値変換係数		
メンバ	型	名称	説明
	float	a	係数 a (傾き)
	float	b	係数 b (切片)
構造体名	st_crnt_caldata_t		
説明	DAC 出力値変換係数キャリブレーションパラメータ		
メンバ	型	名称	説明
	uint16_t	val[2]	DAC 設定値 (2 点)
	float	current[2]	計測電流値 (2 点)

表 5-26 r_qe_cfg_typedef.h ユーザ拡張一覧

列挙型名	e_processing_mode_t		
説明	内部処理モード		
メンバ	名称	値	説明
	E_MES_TEMP	0	温度計測
	E_MES_VOLT	1	電圧計測
	E_CAL_TC	4	熱電対入力キャリブレーション
	E_CAL_RTD	5	測温抵抗体入力キャリブレーション
	E_CAL_VOLT	6	電圧入力キャリブレーション
	E_CAL_DAC0	8	電流出力キャリブレーション STEP0
	E_CAL_DAC1	9	電流出力キャリブレーション STEP1
	E_CAL_DAC2	10	電流出力キャリブレーション STEP2
	E_IDLE	-1	待機
	E_INITIAL	E_IDLE	初期モード
構造体名	st_qe_api_t		
説明	QE for AFE 通信モジュールパラメータ (ユーザ拡張部のみ記載)		
メンバ	型	名称	説明
	e_processing_mode_t	opemode	内部処理モード
	float *	p_dsad_cal_ref0	キャリブレーション計測値 0 へのポインタ
	float	user_value[2]	QE for AFE: Value _n 受信値
	float	sps_temp	温度計測レート
	float	sps_volt	電圧計測レート
	union	user_flags	ユーザ定義フラグ
	uint8_t	flags	8 ビットフラグ
	struct	bit	フラグの各ビット割当
	uint8_t:1	temp_rate_index	温度計測レート変更要求
	uint8_t:1	temp_range	温度範囲変更要求
	uint8_t:1	alert	4-20mA 警告出力電流選択変更要求
	uint8_t:1	write_reg	レジスタ設定変更要求
	uint8_t:1	out_current	4-20mA 出力電流指定要求

表 5-27 Config_DSAD0.h ユーザ定義一覧

構造体名	st_dsad0_prm_t		
説明	DSAD0 設定パラメータ		
メンバ	型	名称	説明
	uint8_t	pga	CRm レジスタ GAIN ビット設定値
	uint32_t	osr	OSRm レジスタ設定値
	uint32_t	sgcr	SGCRm レジスタ設定値
	uint32_t	gcr	GCRm レジスタ設定値
	uint32_t	ofcr	OFCRm レジスタ設定値

5.3.4 関数一覧

表 5-28 main.c

関数名	main			
説明	main 関数			
引数	I/O	型	名称	説明
	-	void	-	-
戻り値	O	void	-	

表 5-29 r_crnt_api

関数名	R_CRNT_ValToCurrent			
説明	計測値範囲に対する計測値に対応する出力電流値を算出、電流値がリミット電流を超えた場合はリミット電流値を返す			
引数	I/O	型	名称	説明
	I	float	val	計測値
	I	const st_crnt_range_t *	pRange	計測値範囲へのポインタ
	O	float *	pRslt	電流値[mA]の格納先ポインタ
戻り値	O	bool	true: 正常終了 false: リミット電流値	
関数名	R_CRNT_CurrentToDAC			
説明	電流値を DAC 設定値に変換、失敗の場合 D_CRNT_CFG_DAC_ERROR_VALUE を返す			
引数	I/O	型	名称	説明
	I	float	Val	電流値[mA]
	I	const st_crnt_coef_t *	pCoef	DAC 出力値変換係数へのポインタ
	O	uint16_t *	pRslt	DAC 出力値の格納先ポインタ
戻り値	O	bool	true: 成功 false: 失敗	
関数名	R_CRNT_CalcCoef			
説明	キャリブレーションパラメータから DAC 出力値変換係数を算出			
引数	I/O	型	名称	説明
	I	st_crnt_caldata_t *	pCalData	キャリブレーションパラメータへのポインタ
	O	st_crnt_coef_t *	pCoef	DAC 出力値変換係数へのポインタ
戻り値	O	bool	true: 成功 false: 失敗	

表 5-30 r_calc_api

関数名	R_CALC_MovingAverage			
説明	指定された移動平均数の平均値を算出			
引数	I/O	型	名称	説明
	I	const float	data	入力値
	I/O	st_calc_moveavg_data_t *	p_cal_moveavg	移動平均処理パラメータへのポインタ
戻り値	O	float	移動平均値	
関数名	R_CALC_MovingAverageReset			
説明	移動平均処理パラメータのリセット			
引数	I/O	型	名称	説明
	I/O	st_calc_moveavg_data_t *	p_cal_moveavg	移動平均処理パラメータへのポインタ
	I	int32_t	average_num	移動平均数
戻り値	-	void	-	
関数名	R_CALC_Average			
説明	指定された平均回数の平均値を算出			
引数	I/O	型	名称	説明
	I	float	input	入力値
	I/O	st_calc_average_data_t *	average	平均処理パラメータへのポインタ
	O	float *	result	平均結果格納先へのポインタ
戻り値	O	bool	true: 平均処理終了 false: 未終了	
関数名	R_CALC_AverageInit			
説明	平均処理パラメータの初期化			
引数	I/O	型	名称	説明
	I/O	st_calc_average_data_t *	average	平均処理パラメータへのポインタ
	I	uint32_t	num	平均回数
戻り値	-	void	-	
関数名	R_CALC_BinarySearch			
説明	指定値以下の最大値に該当するテーブルのインデックスを二分岐検索により求める			
引数	I/O	型	名称	説明
	I	const float *	p_data_table	検索対象の昇順テーブルへのポインタ
	I	uint16	table_size	テーブル要素数
	I	float	data	指定値
戻り値	O	uint16_t	インデックス値	
関数名	R_CALC_Lerp			
説明	2 点(x0,y0)、(x1,y1)を通る直線上の x に対する y を求める			
引数	I/O	型	名称	説明
	I	float	x0	x0 値
	I	float	y0	y0 値
	I	float	x1	x1 値
	I	float	y1	y1 値
	I	float	x	x 値
戻り値	O	float	y 値	

表 5-31 r_led_api

関数名	R_LED_ON			
説明	LED の点灯・消灯・点滅を指定			
引数	I/O	型	名称	説明
	I	uint32_t	led	LED 番号: 0 ~ 3
	I	bool	flag	true: 点灯 false: 消灯
	I	int32_t	count	点滅回数 0: 点滅無し >0: 点滅回数 -1: 回数指定なし点滅
戻り値	-	void	-	
関数名	R_LED_BlinkControl			
説明	LED の点滅処理			
引数	I/O	型	名称	説明
	-	void	-	-
戻り値	-	void	-	
関数名	R_LED_IsBlink			
説明	LED が点滅中であるかを取得			
引数	I/O	型	名称	説明
	I	uint32_t	led	LED 番号: 0 ~ 3
戻り値	O	bool	true: 点滅中 false: 点滅でない	

表 5-32 r_rtd_api

関数名	R_RTD_DsadToTemp			
説明	DSAD0 の A/D 値から温度を算出			
引数	I/O	型	名称	説明
	I	float	dsad	A/D 値
	O	float	gain	PGA ゲイン
戻り値	O	float	測温抵抗体温度 [°C]	
関数名	R_RTD_ResistanceToDSAD			
説明	測温抵抗体の抵抗値から DSAD0 の A/D 値を算出			
引数	I/O	型	名称	説明
	I	float	resistance	抵抗値 [Ω]
	I	float	gain	PGA ゲイン
戻り値	O	float	A/D 値	

表 5-33 r_thermocouple_api

関数名	R_TC_TempToEmf			
説明	温度から熱電対の熱起電力を算出			
引数	I/O	型	名称	説明
	I	float	temp	温度 [°C]
戻り値	O	float	熱起電力 [μV]	
関数名	R_TC_EmfToTemp			
説明	熱電対の熱起電力から温度を算出			
引数	I/O	型	名称	説明
	I	float	emf	熱起電力 [μV]
戻り値	O	float	温度 [°C]	
関数名	R_TC_DsadToEmf			
説明	DSAD0 の A/D 値から熱起電力を算出			
引数	I/O	型	名称	説明
	I	float	dsad	A/D 値
	I	float	gain	PGA ゲイン
戻り値	O	float	熱起電力 [μV]	
関数名	R_TC_VoltageToDSAD			
説明	電圧から DSAD0 の A/D 値を算出			
引数	I/O	型	名称	説明
	I	float	voltage	電圧 [V]
	I	float	gain	PGA ゲイン
戻り値	O	float	A/D 値	

表 5-34 r_voltage_api

関数名	R_VOLTAGE_DsadToVoltage			
説明	DSAD0 の A/D 値から電圧を算出			
引数	I/O	型	名称	説明
	I	float	dsad	A/D 値
	O	float	gain	PGA ゲイン
戻り値	O	float	電圧 [V]	

関数名	R_VOLTAGE_VoltageToDSAD			
説明	電圧からから DSAD0 の A/D 値を算出			
引数	I/O	型	名称	説明
	I	float	voltage	電圧 [V]
	I	float	gain	PGA ゲイン
戻り値	O	float	A/D 値	

表 5-35 r_qe_api_user.c ユーザ定義処理

ユーザ処理のみ記載

関数名	r_QE_NegotiationUser
説明	LED1 を消灯
関数名	r_QE_WriteUser
説明	opemode が E_IDLE であれば受け付け、flags.write_reg をセット
関数名	r_QE_RunUser
説明	opemode が E_IDLE かつ *pdsad_cal_ref0 が NaN であれば受け付け、SW3-1 状態に基づき opemode を E_MES_TEMP または E_MES_VOLT に設定
関数名	r_QE_StopUser
説明	opemode が E_MES_TEMP または E_MES_VOLT であれば受け付け、opemode を E_IDLE に設定
関数名	r_QE_UserValueUser ^[注]
説明	各 User Value No.ごとに受付可否判断を行い、受け付ける場合は、opemode の設定または対応するフラグをセットし、受信値を user_value に格納
関数名	r_QE_ExSpsInfoUser
説明	SW3-1 状態に基づき、sps_temp または sps_volt から sps 情報を作成
関数名	r_QE_ExUseButtonStatusUser ^[注]
説明	各 Button No.ごとに受付可否判断を行い、受け付ける場合は対応するフラグをセット
関数名	r_QE_ResetUser
説明	opemode を E_IDLE に設定し、LED1 を点灯

【注】 対応する QE for AFE の各機能については表 1-1、表 1-2 参照

表 5-36 Config_CMT1 ユーザ定義関数一覧

関数名	R_CMT1_IsCompareMatch			
説明	CMT1 コンペアマッチを検出			
引数	I/O	型	名称	説明
	-	void	-	-
戻り値	O	bool	true: コンペアマッチ発生 false: コンペアマッチ未発生	

関数名	R_CMT1_IsCount			
説明	CMT1 の動作状態を取得（マクロ関数）			
引数	I/O	型	名称	説明
	-	void	-	-
戻り値	O	bool	true: カウント中 false: カウント停止	

表 5-37 Config_DSAD0 ユーザ定義関数 (1/3)

関数名	R_Config_DSAD0_CHnEN			
説明	A/D 変換対象チャネルの指定			
引数	I/O	型	名称	説明
	I	uint8_t	channel	有効にするチャネルを対応するビットで指定 1: 有効 0: 無効
戻り値	-	void	-	
関数名	R_Config_DSAD0_SetParam			
説明	指定したチャネルにパラメータを設定			
引数	I/O	型	名称	説明
	I	uint32_t	ch	設定するチャネル
	I	st_dsad0_prm_t *	prm	DSAD0 設定パラメータへのポインタ
戻り値	-	void	-	
関数名	R_Config_DSAD0_SetOFCR			
説明	指定したチャネルの OFCRm レジスタに値を設定			
引数	I/O	型	名称	説明
	I	uint32_t	ch	設定するチャネル
	I	int32_t	ofs	設定値
戻り値	O	bool	true: 成功 false: 失敗、設定値が範囲外	
関数名	R_Config_DSAD0_SetGCR			
説明	指定したチャネルの GCRm レジスタに値を設定			
引数	I/O	型	名称	説明
	I	uint32_t	ch	設定するチャネル
	I	uint32_t	gcr	設定値
戻り値	O	bool	true: 成功 false: 失敗、設定値が範囲外	
関数名	R_DSAD0_IsADI			
説明	ADI0 の検出			
引数	I/O	型	名称	説明
	-	void	-	-
戻り値	-	void	-	
関数名	R_DSAD0_GetMaxVoltage			
説明	PGA ゲインから計測可能最大入力電圧を算出			
引数	I/O	型	名称	説明
	I	float	gain	PGA ゲイン
戻り値	O	float	計測可能入力最大電圧 [V]	
関数名	R_DSAD0_GetMultiScanRate			
説明	指定した複数チャネルのチャネルスキャンレートを算出			
引数	I/O	型	名称	説明
	I	uint8_t	channel	対象チャネルを対応するビットで指定 1: 有効 0: 無効
戻り値	O	float	スキャンレート per sec	

表 5-38 Config_DSAD0 ユーザ定義関数 (2/3)

関数名	R_DSAD0_PGAToGain			
説明	CRm.GAIN 設定値から PGA ゲインを算出			
引数	I/O	型	名称	説明
	I	uint8_t	pga	CRm.GAIN 設定値
戻り値	O	float	PGA ゲイン	
関数名	R_DSAD0_GetPGAGain			
説明	指定したチャンネルの PGA ゲインを算出			
引数	I/O	型	名称	説明
	I	uint32_t	ch	取得するチャンネル
戻り値	O	float	PGA ゲイン	
関数名	R_DSAD0_CalcGCR			
説明	A/D 期待値と A/D 変換結果から GCRm レジスタのゲイン補正値を算出して設定			
引数	I/O	型	名称	説明
	I	float	val	取得した A/D 値
	I	float	ref	期待する A/D 値
	I	uint32_t *	gcr	ゲイン補正値設定先へのポインタ
戻り値	O	bool	true: 成功 false: 失敗、算出結果が範囲外	
関数名	R_DSAD0_GetOSRValue			
説明	指定したチャンネルのオーバーサンプリング比を取得			
引数	I/O	型	名称	説明
	I	uint32_t	ch	取得するチャンネル
戻り値	O	uint32_t	オーバーサンプリング比	
関数名	R_DSAD0_GetGAIN			
説明	指定したチャンネルの CRm.GAIN 設定値の取得（マクロ関数）			
引数	I/O	型	名称	説明
	I	uint32_t	ch	取得するチャンネル
戻り値	O	uint8_t	指定チャンネルの CRm.GAIN 設定値	
関数名	R_DSAD0_GetOFCR			
説明	指定したチャンネルの OFCRm レジスタ設定値の取得（マクロ関数）			
引数	I/O	型	名称	説明
	I	uint32_t	ch	取得するチャンネル
戻り値	O	int32_t	指定チャンネルの OFCRm レジスタ設定値	
関数名	R_DSAD0_GetGCR			
説明	指定したチャンネルの GCRm レジスタ設定値の取得（マクロ関数）			
引数	I/O	型	名称	説明
	I	uint32_t	ch	取得するチャンネル
戻り値	O	int32_t	指定チャンネルの GCRm レジスタ設定値	
関数名	R_DSAD0_GetGCRAAddr			
説明	指定したチャンネルの GCR レジスタアドレスを取得（マクロ関数）			
引数	I/O	型	名称	説明
	I	uint32_t	ch	取得するチャンネル
戻り値	O	int32_t	GCR レジスタアドレス	

表 5-39 Config_DSAD0 ユーザ定義関数 (3/3)

関数名	R_DSAD0_ConvSignedValue			
説明	DR レジスタ値から符号付き A/D 値を取得（マクロ関数）			
引数	I/O	型	名称	説明
	-	uint32_t	val	DR レジスタ値
戻り値	O	int32_t	符号付き A/D 値	
関数名	R_DSAD0_GetChannel			
説明	DR レジスタ値からチャンネル情報を取得（マクロ関数）			
引数	I/O	型	名称	説明
	I	uint32_t	val	DR レジスタ取得値
戻り値	O	uint32_t	チャンネル情報	
関数名	R_DSAD0_GetErrorFlags			
説明	DR レジスタ値から ERR 及び OVF フラグを抽出（マクロ関数）			
引数	I/O	型	名称	説明
	I	uint32_t	val	DR レジスタ取得値
戻り値	O	uint32_t	ERR 及び OVF フラグ	

表 5-40 Config_PORT ユーザ定義関数

関数名	R_Config_PORT_LED0_ON R_Config_PORT_LED1_ON R_Config_PORT_LED2_ON R_Config_PORT_LED3_ON			
説明	各 LED の点灯・消灯			
引数	I/O	型	名称	説明
	-	bool	flag	true: 点灯 false: 消灯
戻り値	-	void	-	
関数名	R_Config_PORT_LED0_Blink R_Config_PORT_LED1_Blink R_Config_PORT_LED2_Blink R_Config_PORT_LED3_Blink			
説明	各 LED の点灯・消灯の反転			
引数	I/O	型	名称	説明
	-	void	-	-
戻り値	-	void	-	
関数名	R_PORT_LED0_IsON R_PORT_LED1_IsON R_PORT_LED2_IsON R_PORT_LED3_IsON			
説明	各 LED の点灯・消灯を取得			
引数	I/O	型	名称	説明
	-	void	-	-
戻り値	O	bool	true: 点灯 false: 消灯	
関数名	R_PORT_GetSW1_ON R_PORT_GetSW2_ON R_PORT_GetSW3_1_ON R_PORT_GetSW3_2_ON			
説明	各スイッチの状態を取得			
引数	I/O	型	名称	説明
	-	void	-	-
戻り値	O	bool	true: pressing false: releasing	

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+へ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。)

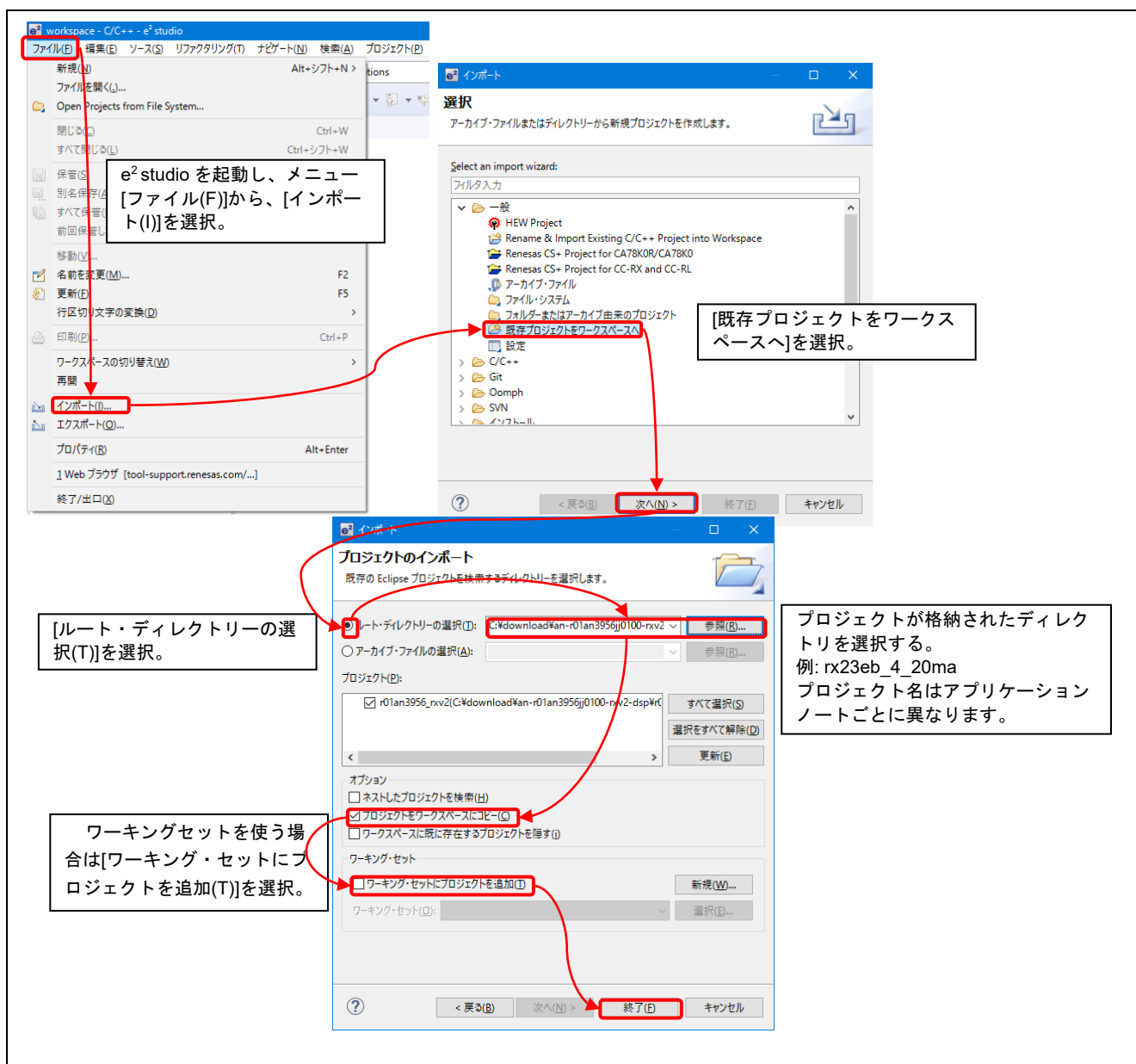


図 6-1 プロジェクトを e² studio にインポートする方法

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。)

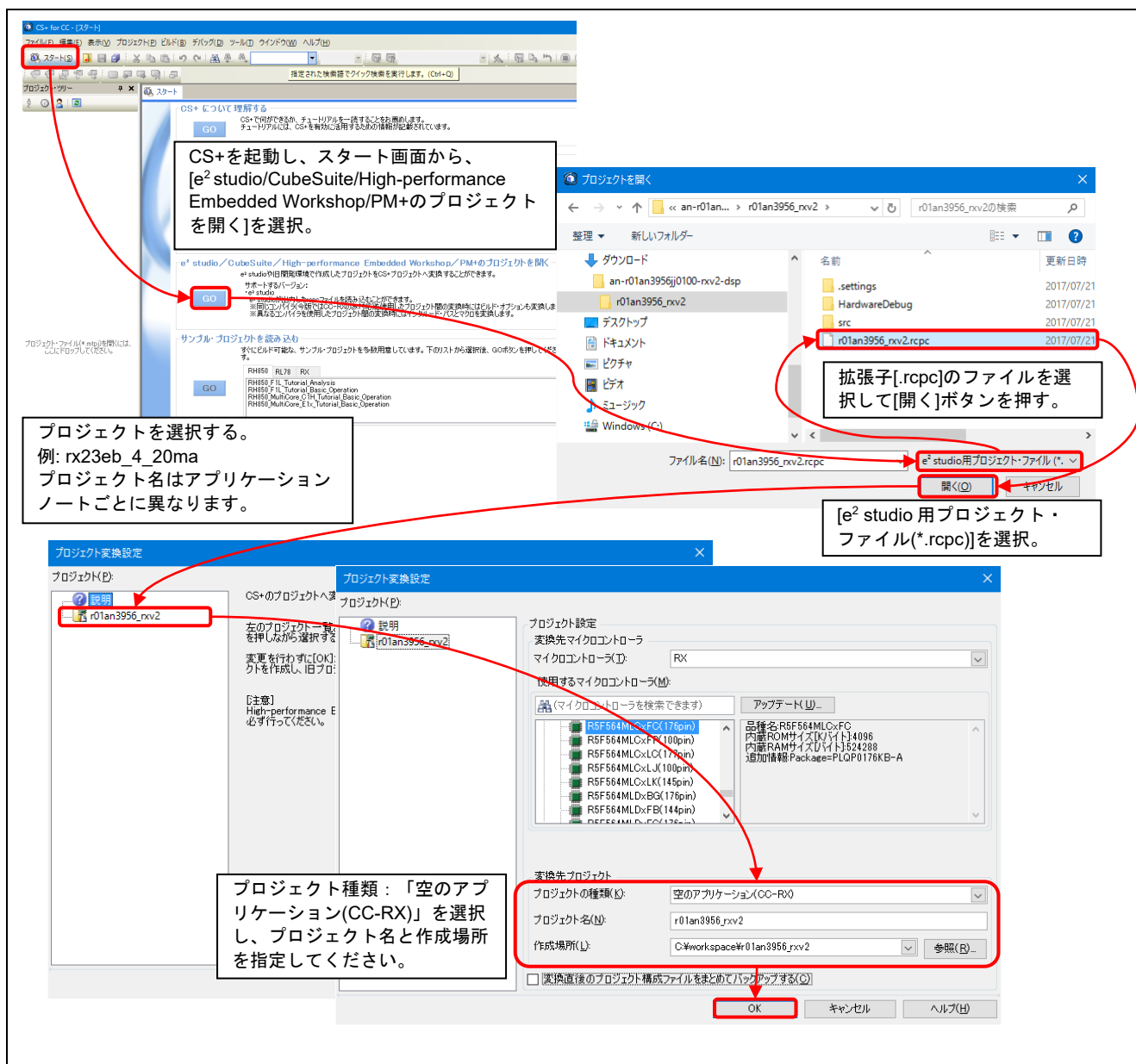


図 6-2 プロジェクトをCS+にインポートする方法

7. サンプルプログラムを使用した計測結果

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。

表 7-1 ビルド条件

項目	設定
Compiler	-isa=rxv2 -utf8 -nomessage -output=obj -obj_path=\${workspace_loc}/\${ProjName}/\${ConfigName}} -debug -outcode=utf8 -listfile="\$(dir \$@)\\$(basename \$(notdir \$<)).lst" -show=source,conditionals,definitions,expansions -nologo
Linker	-noprelink -output="rx23eb_4_20ma.abs" -form=absolute -nomessage -vect=_undefined_interrupt_source_isr -list=rx23eb_4_20ma.map -show=all -nooptimize -rom=D=R,D_1=R_1,D_2=R_2 -cpu=RAM=00000000-00007fff, FIX=00080000-00083fff, FIX=00086000-00087fff, FIX=00088000-0008dfff, FIX=00090000-0009ffff, FIX=000a0000-000bffff, FIX=000c0000-000fffff, ROM=00100000-00101fff, FIX=007fc000-007fc4ff, FIX=007ffc00-007fffff, ROM=fffc0000-ffffffffff -nologo
セクション	SU,SI,B_1,R_1,B_2,R_2,B,R/04,B_DMACE_REPEAT_AREA_1/04000, C_DATAFLASH/0100000,PRResetPRG,C_1,C_2,C,C\$,D*,W*,L, P/0FFFC0000,EXCEPTVECT/0FFFFFFF80,RESETVECT/0FFFFFFFC

【注】 コンパイラ設定のユーザ設定以外のインクルードパスは省略

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	22953	
Code	13634	
Data	9319	
E2 DataFlashROM	108	
RAM	14543 (10395)	【注】
Data	9423	
Stack	5120 (972)	【注】

【注】 “()”で示す RAM の使用量は Stack の使用量から算出

7.1.3 実行サイクル数と処理時間

温度計測時、および電圧計測時の CPU 実行サイクル数等をそれぞれ表 7-3、表 7-4 に示します。

表 7-3 実行サイクル数・実行時間・処理負荷（温度計測）

ICLK=32MHz

DSAD0 変換終了周期: 75.00525ms

項目	実行サイクル数 (実行時間)	処理負荷 [%]	条件
A/D 値取得処理	42cycle (1.31μs)	0.0017	CH1 取得時
計測処理	360cycle (11.25μs)	0.0150	
4-20mA 出力処理	325cycle (10.16μs)	0.0135	正常出力時
QE for AFE 通信処理	430cycle (13.44μs)	0.0179	計測結果送信時
その他	477cycle (14.91μs)	0.0199	
計	1634cycle (51.06μs)	0.0681	

【注】処理負荷は DSAD0 変換終了周期中の実行時間で算出

表 7-4 実行サイクル数・実行時間・処理負荷（電圧計測）

ICLK=32MHz

DSAD0 変換終了周期: 1.024ms

項目	実行サイクル数 (実行時間)	処理負荷 [%]	条件
A/D 値取得処理	46cycle (1.40μs)	0.1404	
計測処理	72cycle (2.25μs)	0.2197	
4-20mA 出力処理	325cycle (10.16μs)	0.9918	正常出力時
QE for AFE 通信処理	430cycle (13.44μs)	1.3123	計測結果送信時
その他	477cycle (14.91μs)	1.4557	
計	873cycle (27.28μs)	2.6642	

【注】処理負荷は DSAD0 変換終了周期中の実行時間で算出

7.2 電流出力精度評価

7.2.1 電流出力精度評価構成

電流出力評価の構成を図 7-1 に、計測に使用した機器を表 7-5 に示します。図 7-1 において、マルチメータで出力電流 I_{out} を計測しています。電流の経路には AVSS0 との間に電圧変換抵抗 R_d (250Ω)を挿入しています。

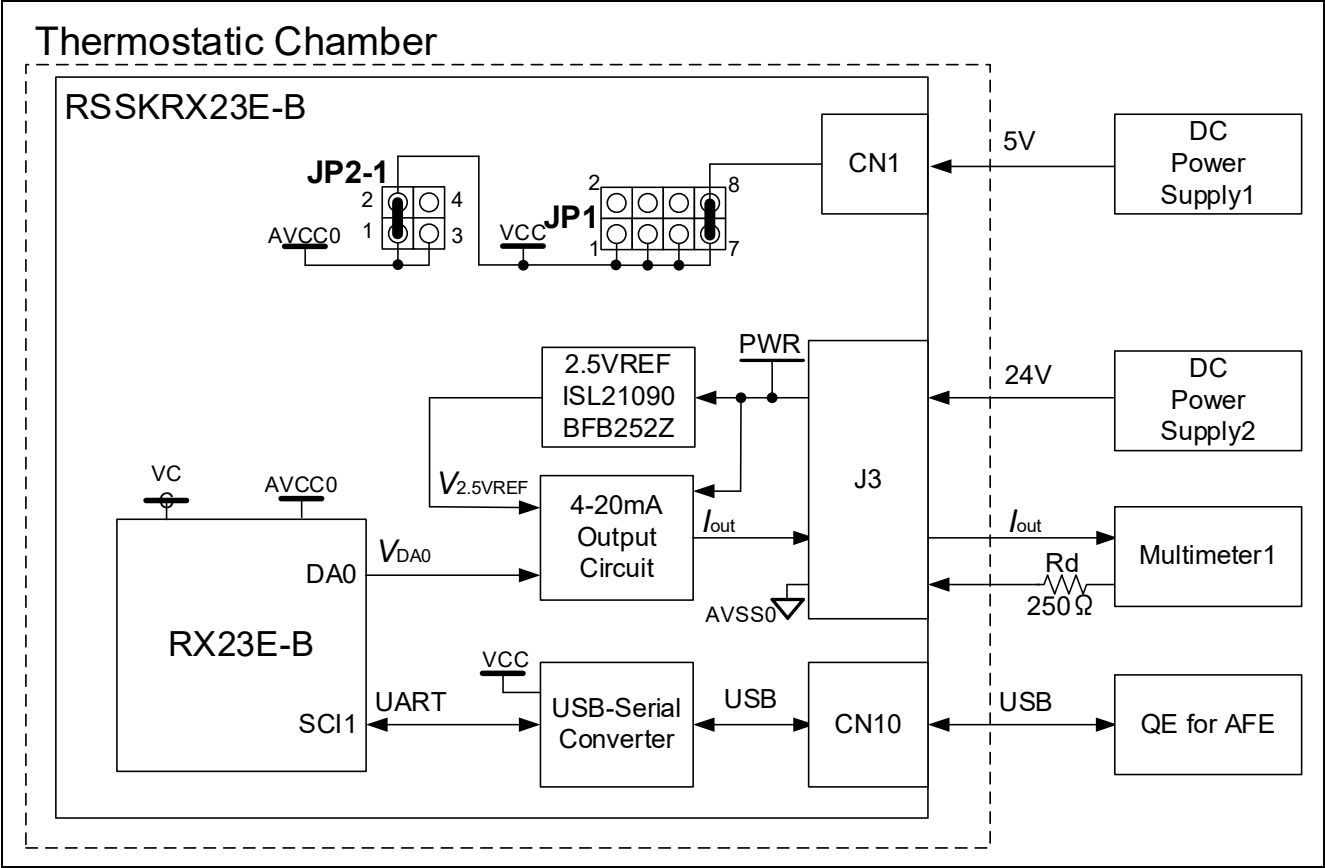


図 7-1 電流出力精度評価の構成

表 7-5 電流出力精度評価の使用機器

使用機器	型式	メーカー名
DC Power Supply1	PA14A1	ShibaSoku Co., Ltd.
DC Power Supply2	PA36-2A	TEXIO TECHNOLOGY CORPORATION.
Multimeter1	34401A	Keysight Technologies
Thermostatic Chamber	SU-241	ESPEC CORP.

7.2.2 電流出力精度評価結果

基板を設定温度-25℃、25℃、85℃の恒温槽に設置し、各温度条件下でマルチメータで計測した出力電流 I_{out} と、4mA から 20mA まで 2mA 刻みで設定した電流 I_{ref} に対する計測電流誤差 err を図 7-2 に示します。計測電流誤差 err は下式のように出力電流 I_{out} と設定電流 I_{ref} の差を電流出力レンジ 4mA-20mA である 16mA で割ったもので、フルスケールに対する誤差（%FS）で表しています。

$$err = (I_{out} - I_{ref}) \cdot \frac{100}{16} [\%FS]$$

計測に際し電流出力キャリブレーションを恒温槽設定温度 25℃のときに 1 回だけ行っています。

計測結果から出力電流の誤差は 0.1%FS 以下であることが確認できます。

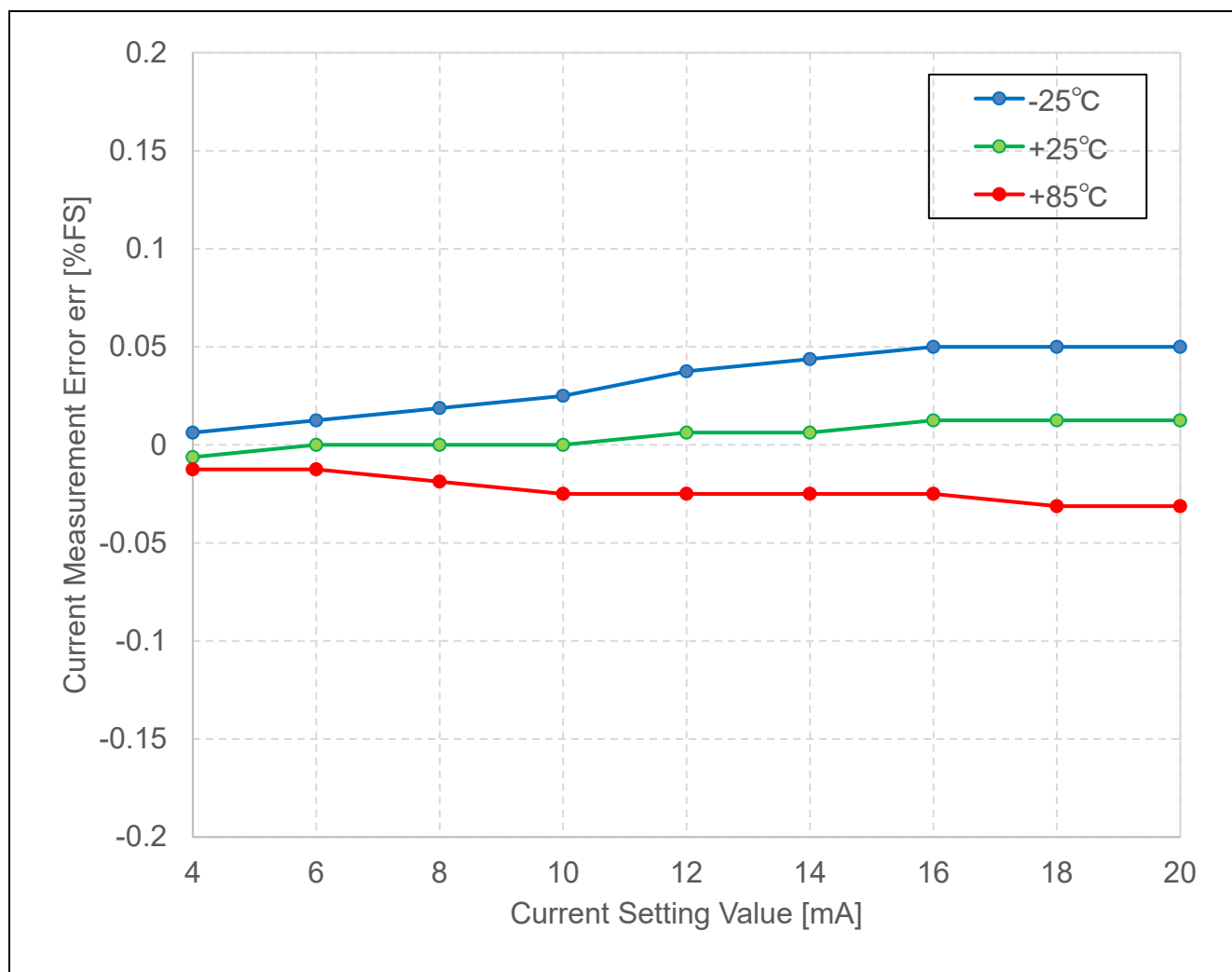


図 7-2 電流出力精度評価結果

7.3 温度計測時電流出力評価

7.3.1 温度計測時電流出力評価構成

温度計測時電流出力評価の構成を図 7-3 に、計測に使用した機器を表 7-6 に示します。図 7-3 において、4-20mA 出力電流 I_{out} はマルチメータで計測します。計測対象の熱電対は、基準温度計測用の 4 線式 RTD と熱的に結合した状態で恒温槽に入れ、恒温槽内の各温度を計測します。基準温度計測用の 4 線式 RTD はマルチメータで計測します。

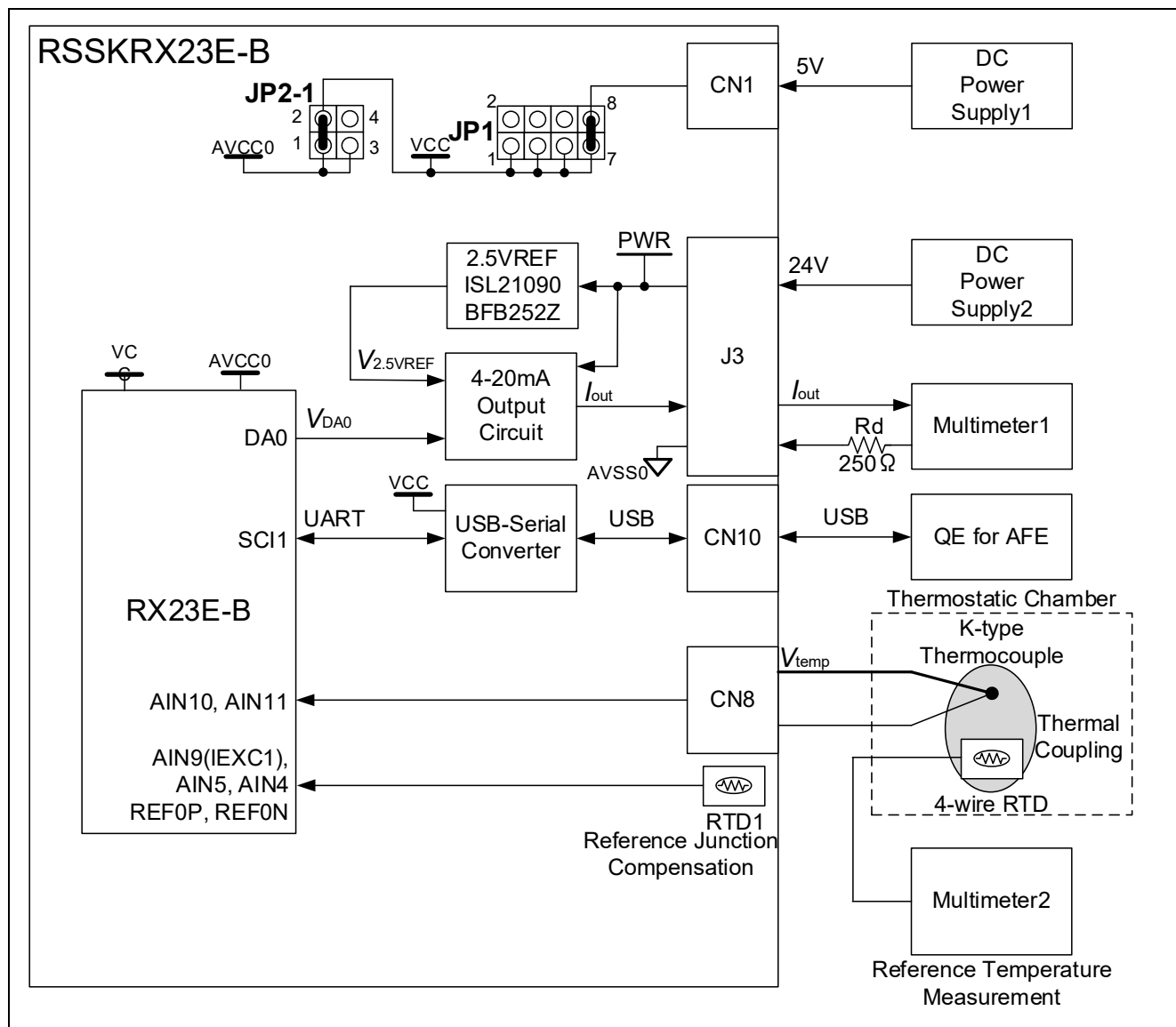


図 7-3 温度計測時電流出力の評価構成

表 7-6 温度計測時電流出力評価の使用機器

使用機器	型式	メーカー名
DC Power Supply1	PA14A1	ShibaSoku Co., Ltd.
DC Power Supply2	PA36-2A	TEXIO TECHNOLOGY CORPORATION.
Multimeter1	34401A	Keysight Technologies
Multimeter2	34461A	Keysight Technologies
Thermostatic Chamber	SU-241	ESPEC CORP.

7.3.2 温度計測時電流出力評価結果

熱電対で各設定温度における恒温槽内の温度を計測し、温度計測結果を 4-20mA 出力電流に出力し、そのときの出力電流 I_{out} をマルチメータで計測し、計測電流値から計測温度に換算します。各恒温槽設定温度に対する計測温度誤差 err を図 7-4 に示します。

計測温度誤差 err は下式のように出力電流値から換算した計測温度 T_{out} とマルチメータで計測した基準温度計測用 4 線式 RTD の温度計測値 T_{ref} の差によって求めます。精度の目安として、計測に使用した K 型熱電対の許容誤差と、基準接点補償用のオンボード 4 線式 RTD の許容誤差を加算した値を灰色の点線で示しています。

$$err = (T_{out} - T_{ref}) [^{\circ}\text{C}]$$

図 7-4 から、温度計測誤差がセンサの許容誤差以内に収まっていることが確認できます。

なお、計測に際し熱電対計測は -40℃ と 160℃ の 2 点の熱起電力に相当する電圧で、基準接点補償用のオンボード RTD 計測は 0℃ と 85℃ の 2 点に相当する抵抗値でそれぞれ 1 回ずつキャリブレーションを行っています。

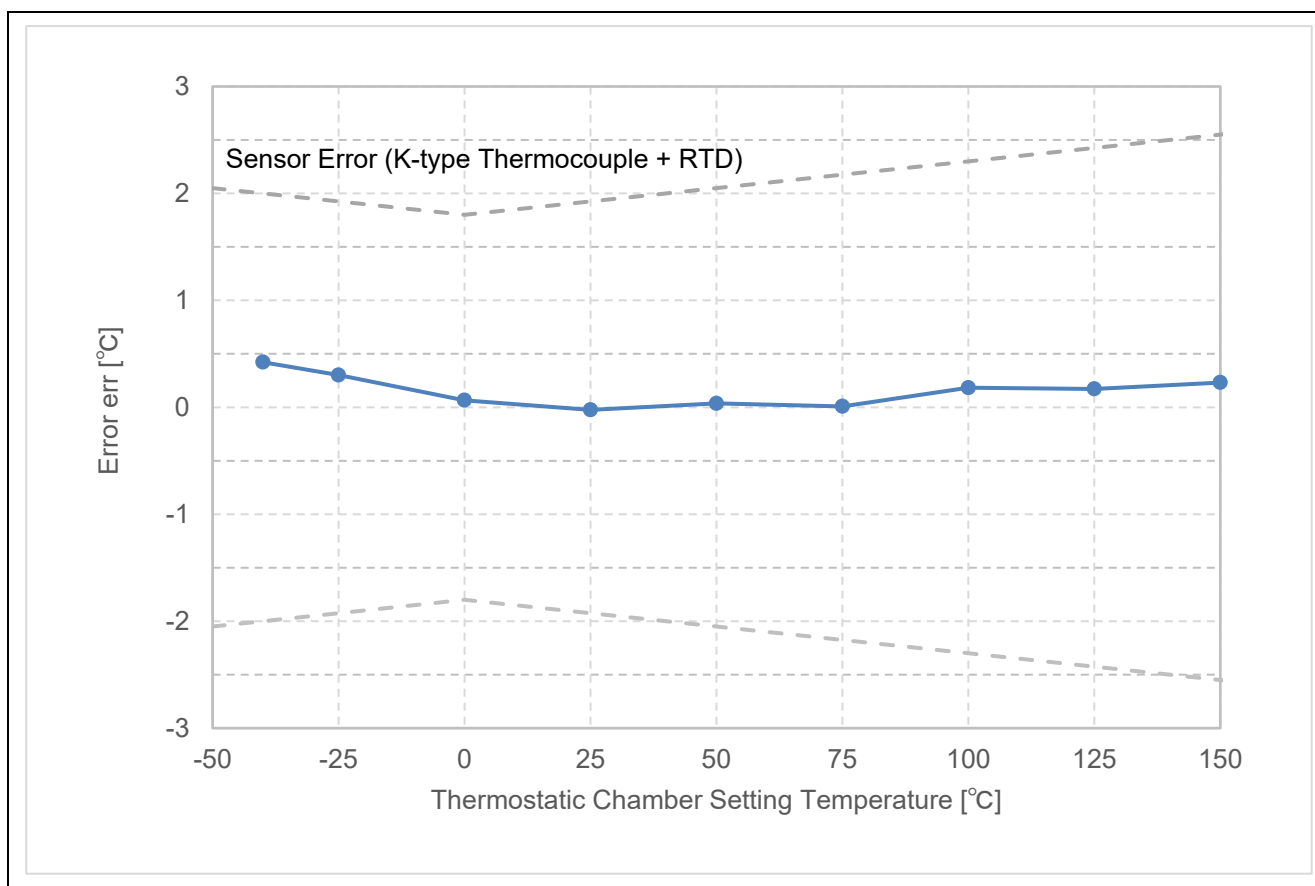


図 7-4 温度計測時電流出力評価結果

7.4 応答特性評価

7.4.1 応答特性評価構成

応答特性評価の構成を図 7-5 に、計測に使用した機器を表 7-7 に示します。図 7-3 においてオシロスコープにより、出力電流 I_{out} 、DA0 出力 V_{DA0} 、A/D 値取得完了時にトグルするテスト用トグル信号出力 V_{toggle} を計測し、A/D 値取得完了から、出力電流値が目標値に到達するまでの時間と、DA0 端子電圧が変化し始めるまでの時間を計測します。

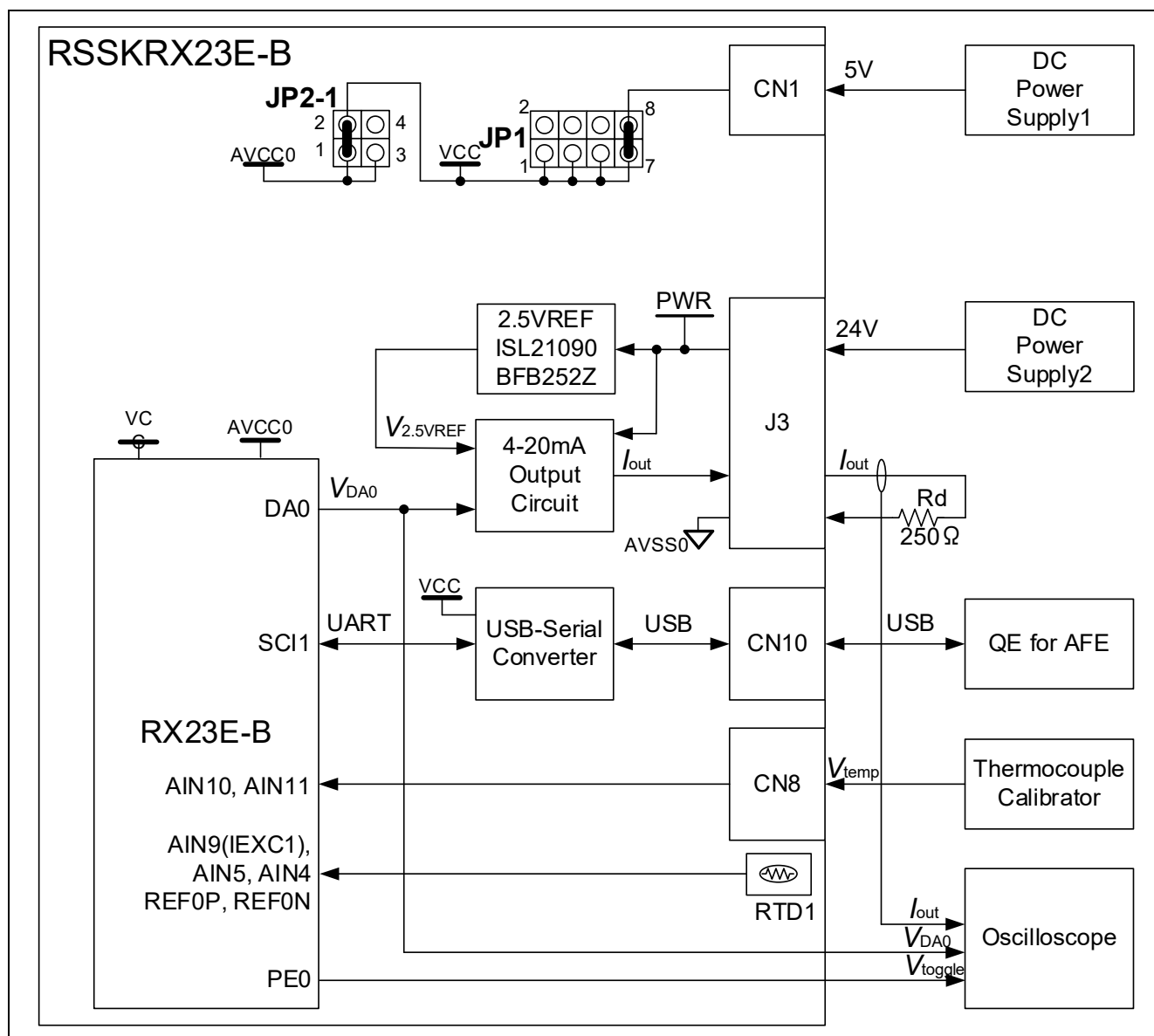


図 7-5 応答特性評価の構成

表 7-7 応答特性評価の使用機器

項目	型式	メーカー名
DC Power Supply1	PA14A1	ShibaSoku Co., Ltd.
DC Power Supply2	PA36-1.5AD	TEXIO TECHNOLOGY CORPORATION.
Oscilloscope	DL9505L	Yokogawa Test & Measurement Corporation
Current Probe	701932	Yokogawa Test & Measurement Corporation
Thermocouple Calibrator	CA320	Yokogawa Test & Measurement Corporation

7.4.2 応答特性評価結果

熱電対キャリブレーションの出力を、出力電流が 4mA から 20mA に変化するように設定し、そのときの電流波形をオシロスコープで計測しました。電流応答波形を図 7-6、DA0 出力反映時間を図 7-7、結果のまとめを表 7-8 に示します。

図 7-6 より、電流変換回路の 95% 整定時間は約 1.3ms であることが確認できます。R276、R277、R278、C131 で構成される 4-20mA 出力段フィルタ回路の 95% 整定時間が約 1.3ms であることから、この応答は 4-20mA 出力電流回路のフィルタ時定数に依存していることがわかります。また、図 7-7 より、A/D 値取得から DA0 の電圧変化が発生するまでは約 20 μ s で MCU の処理が応答時間にほとんど影響しないことが確認できます。

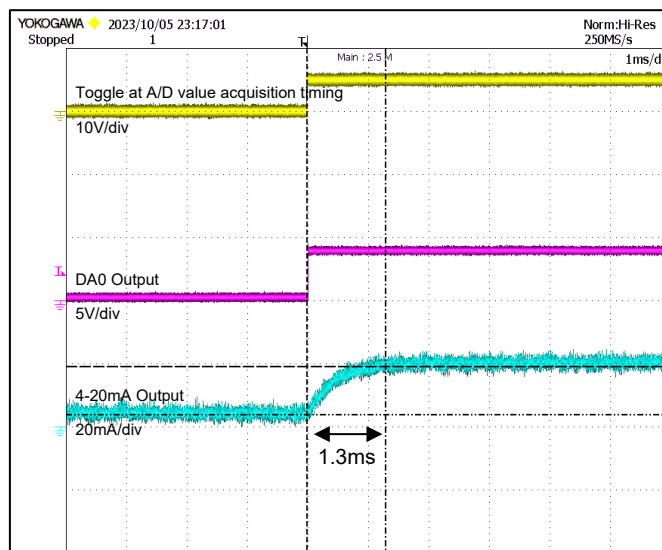


図 7-6 電流応答波形

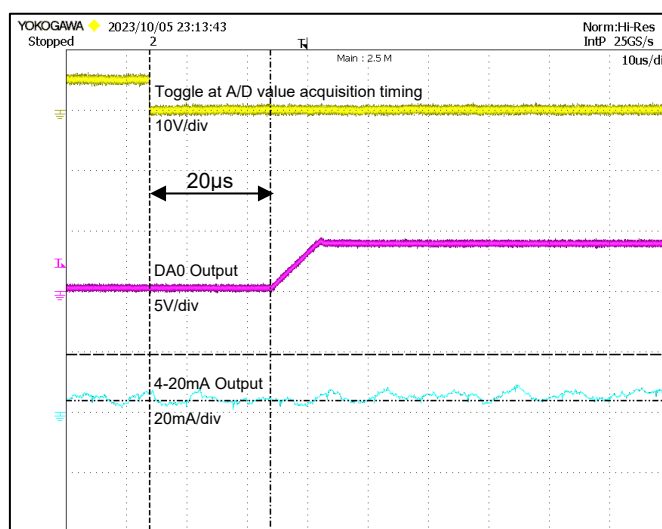


図 7-7 DA0 出力反映時間

表 7-8 整定時間・応答時間

項目	測定値
95% 整定時間	1.3ms
DA0 出力反映時間	20 μ s

改訂記録

Rev.	発行日	改訂内容	
		ページ	ポイント
1.00	Oct.25.23	-	初版

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、入力信号や入出力ブルアップ電源を入れないでください。入力信号や入出力ブ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くと、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みます。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、改変、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、改変、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、これに限りません。）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としします。
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。