

低ノイズオペアンプ[®] TC75S67TU 電流センサー向け応用回路

デザインガイド

RD161-DGUIDE-01

概要

本デザインガイドでは、低ノイズオペアンプTC75S67TUを使った電流センサーの設計について説明します。

電流センサーは、検出に使う素子によってシャント抵抗型やホール型、空芯型など何種類かに分類されますが、ここでは最も構造がシンプルなシャント抵抗型の電流センサーにTC75S67TUを応用した回路の設計について解説します。

東芝デバイス&ストレージ株式会社

目次

1. はじめに	3
2. 回路設計	4
2.1. 低ノイズオペアンプ TC75S67TU について.....	4
2.2. 電流センサーについて.....	5
2.3. 電流センサーの仕様.....	5
2.4. 電流センサーの回路設計	6
3. 基板設計	10
3.1. 基板パターン例	10
3.2. 基板設計上の注意点	11
4. 製品概要	12
4.1. TC75S67TU 製品概要.....	12
4.2. 端子説明	13

1. はじめに

デジタル時代の今日でもオペアンプはさまざまな場面で利用されていますが、特に重要なアプリケーションとして各種のセンサーでの利用が挙げられます。

音や光など自然界から得られる情報はいろいろあり、それに応じてセンサー素子にもさまざまな種類があります。一般的にセンサー素子からの出力信号は非常に微弱なものが多く、そのままでは扱いにくいため、ほとんどの場合は増幅して処理されます。

この増幅のために用いられるのがオペアンプです。増幅以外にも、各種センサーにおいてオペアンプはフィルターやI-V変換などに用いられており、オペアンプがなければ現代のほとんどの電子機器は成り立たないと言っても過言ではありません。

これらセンサーでの応用で重要なのがノイズ特性です。オペアンプ自身のノイズが大きいと、肝心のセンサー信号がノイズにマスクされて検出感度の低下や誤検知を招き、所望のセンシング性能を得られなくなる恐れがあります。そのため、このような応用で使用されるオペアンプには低いノイズレベルが求められます。

当社はこのような要求に対応するため、入力換算雑音電圧6 nV/ $\sqrt{\text{Hz}}$ ($f=1$ kHz、 $GV=40$ dB、標準) という低ノイズレベルを実現したオペアンプTC75S67TUをラインアップしています。

本デザインガイドでは、TC75S67TUを使った電流センサーの設計について説明します。TC75S67TUの詳細については下記リンク先データシートをご参照ください。

TC75S67TUのデータシートはこちらから →

[Click Here](#)

2. 回路設計

2.1. 低ノイズオペアンプ TC75S67TU について

本ガイドで説明する電流センサーに使用した低ノイズオペアンプ TC75S67TU は、回路と製造プロセスの両面から対策を行い、当社の従来一般品よりも大きくノイズレベルを低減することに成功しました。

一般に、ノイズは含まれる周波数成分により低周波領域に分布する $1/f$ ノイズと、低周波から高周波まで広い領域に分布するホワイトノイズ（白色雑音）に分けられますが、TC75S67TU では入力換算雑音電圧として、 $1/f$ ノイズが主となる低周波領域で $16 \text{ nV}/\sqrt{\text{Hz}}$ (@ $f=10 \text{ Hz}$)、ホワイトノイズが主となる領域で $6 \text{ nV}/\sqrt{\text{Hz}}$ (@ $f=1 \text{ kHz}$, typ.) という低ノイズレベルを実現しております。図 2.1 に TC75S67TU と当社一般品のノイズレベル-周波数特性を比較したグラフを示します。

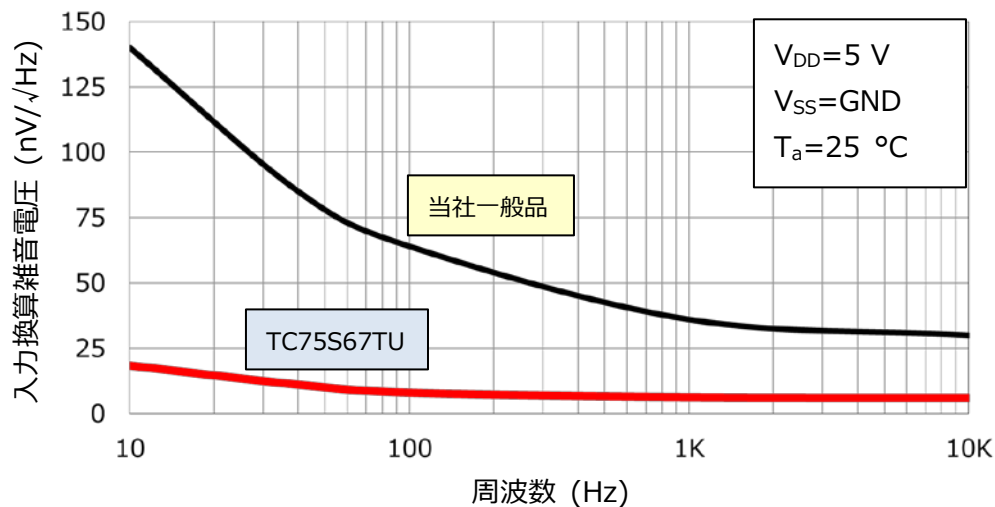


図 2.1 TC75S67TU 入力換算雑音電圧-周波数特性

図 2.1 に示すように TC75S67TU は一般品に比べて、ノイズが大幅に改善されておりますので、微弱信号を扱うセンサーの信号増幅に最適なオペアンプです。

このノイズ特性に加えて、TC75S67TU は 1 pA と入力バイアス電流が非常に小さく、これによって発生するオフセット電圧も小さいという特長もあります。

微弱信号を扱うセンサーではオフセット電圧の影響も大きく、センサー性能の悪化原因になりますので、入力端子にオフセット補正用の抵抗が必要になる場合があります。抵抗は熱雑音を発生させるので、この場合ノイズが悪化する恐れがありますが、TC75S67TU はオフセット電圧が小さいので、オフセット補正用抵抗をつける必要がありません。

以上のような特長をもつ TC75S67TU を使用することで、高感度、高性能なセンサーを設計することが可能です。

TC75S67TU の雑音の詳細については、下記リンク先のアプリケーションノートもご参照ください。

TC75S67TU の雑音についてのアプリケーションノートはこちら →

[Click Here](#)

2.2. 電流センサーについて

電流センシングにはホール素子を用いた磁気センシング方式やシャント抵抗方式など様々な方式がありますが、本ガイドの電流センサーでは、微小抵抗を検出素子に用いたシャント抵抗方式を採用します。図2.2にシャント抵抗型電流センサーの電流検知の仕組みを示します。

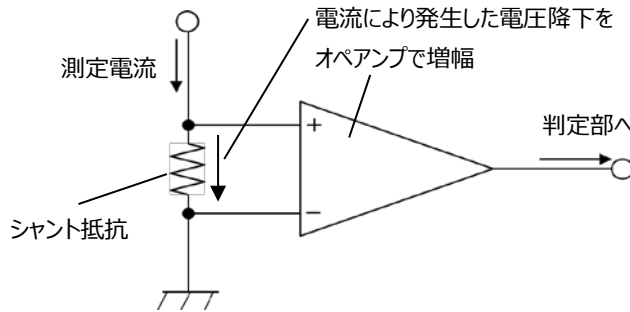


図 2.2 シャント抵抗型電流センサーの検知方法

この図に示す通り、シャント抵抗で発生する電圧降下によって測定電流を検出するというもので、構成はとてもシンプルです。図2.3に、本センサーでシャント抵抗に使用したTE Connectivity社製抵抗器RL73H3AR10FTEを示します。



図 2.3 シャント抵抗 (TE Connectivity 製 RL73H3AR10FTE)

本ガイドの電流センサーは、低ノイズオペアンプであることを生かし、0 A付近の電流の高精度な検知やGNDセンスができるように設計しました。TC75S67TUの f_T が3.5 MHzなので、電流のリングングを検出することもできます。

また、マイコンにはPC上で電流センサー全体の動作制御や測定結果の表示が行えるArduino (アルドウィーノ) を使用しています。ソフトウェアを準備いただければほかのお好きなマイコンを使用することもできますが、十分動作確認してください。

2.3. 電流センサーの仕様

表2.1に本センサーの仕様を示します。

表 2.1 電流センサー回路仕様

項目	仕様
I/F	Arduino 接続
制御方式	Arduino および Shield 接続 PC からの制御
電源電圧	Arduino および Shield 基板供給 5 V
測定電流	最大 2 A
シャント抵抗	TE Connectivity 製 RL73H3AR10FTE 100 mΩ、±1%精度、1 W@70 °C
搭載オペアンプ	東芝デバイス&ストレージ製 TC75S67TU

2.4. 電流センサーの回路設計

図 2.4 に本ガイドの電流センサーの基板写真を、図 2.5 に全体回路をそれぞれ示します。本センサーは全体が 1 枚の基板上に構成されています。点線で囲った各部ごとに順次、電圧増幅度やフィルターなどの設定と動作について説明します。



図 2.4 電流センサー基板写真

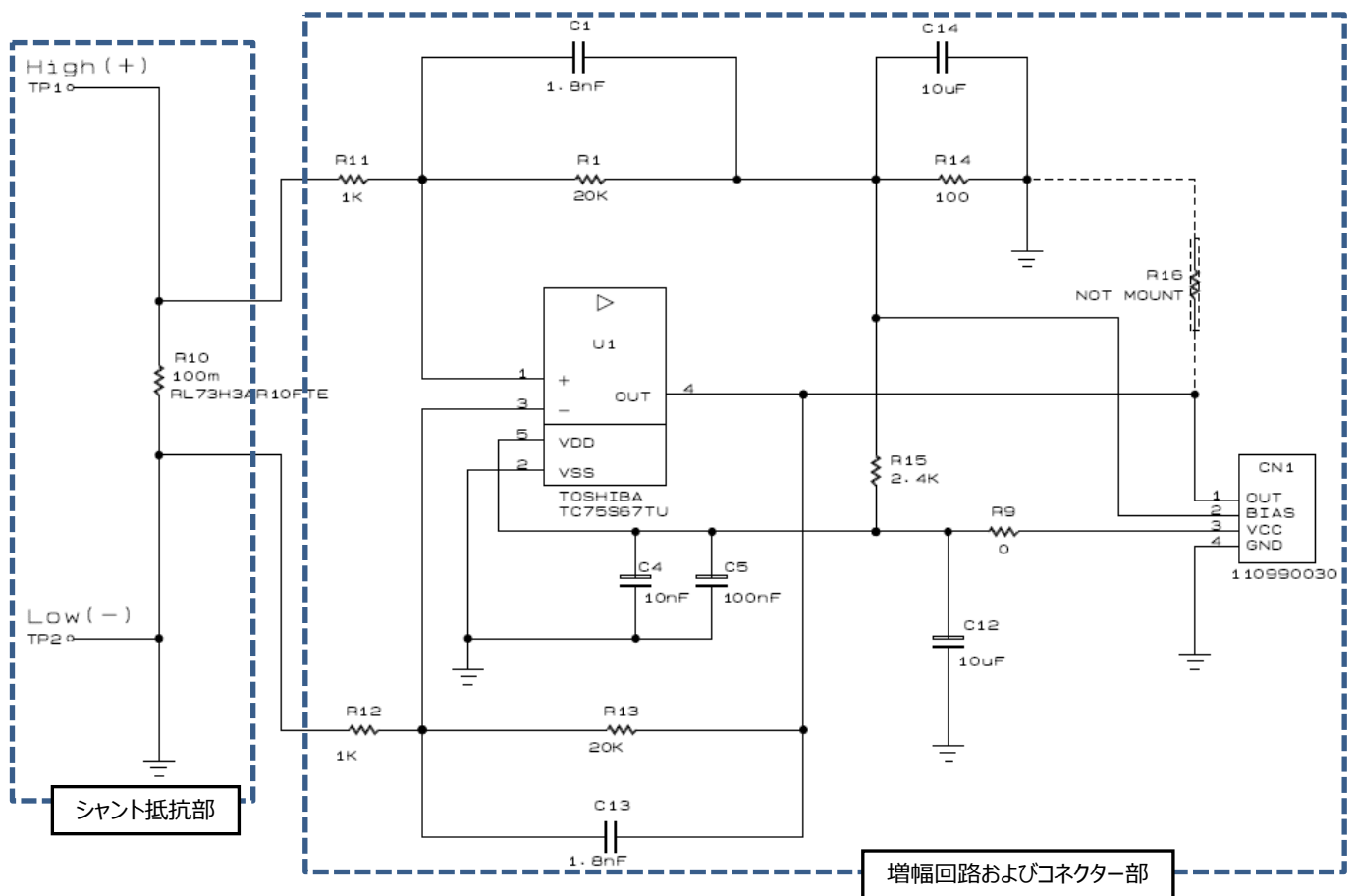


図 2.5 電流センサー全体回路図

図 2.6 にシャント抵抗部を示します。

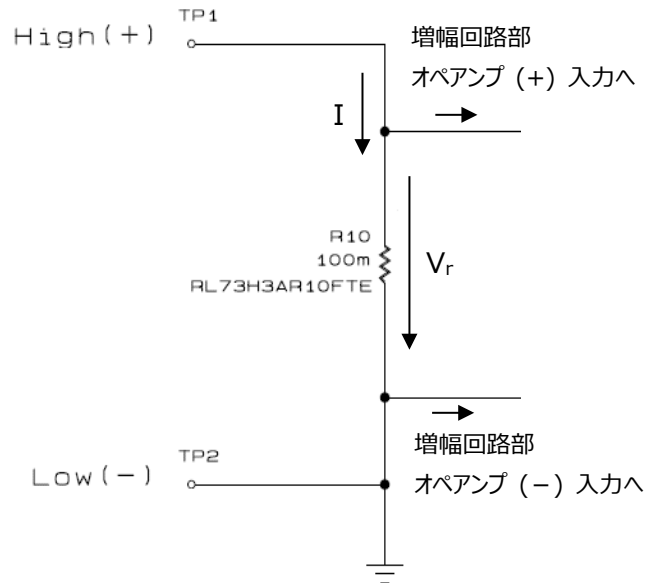


図 2.6 シャント抵抗部

シャント抵抗型電流センサーでは、シャント抵抗以外の電流経路の抵抗値による電圧ドロップに対する考慮、抵抗精度や発熱への留意が設計のポイントになります。シャント抵抗の値は大きくすれば電流の測定精度も高くなりますが、 I^2R に従って発熱も大きくなるほか、電圧降下が大きくなると測定電流に影響する可能性も高くなります。そのため、シャント抵抗の値はできるだけ小さく設定し、発生した電圧降下そのままではなく、増幅して測定する構成とします。

本センサーでは、図2.6のHigh (+) 端子からLow (-) 端子方向に流れる電流Iによってシャント抵抗R10で生じる電圧降下 V_r を後段のオペアンプで増幅してマイコンに出力しています。本センサーの最大測定電流は2 Aなので、シャント抵抗の値は100 mΩとし、最大電流が流れたときの電圧降下を0.2 Vに抑えました。

また、このときにシャント抵抗で消費される電力は0.4 Wとなりますので、倍程度の余裕をみてシャント抵抗は許容損失1 WのTE Connectivity製RL73H3AR10FTEとしました。

シャント抵抗R10の電圧降下 V_r は、検知電流をIとして下式2.1で計算されます。

$$V_r = I \times R10 \quad \dots (2.1)$$

R10: 100 mΩ

R10 で発生した電圧降下 V_r は、オペアンプに入力されます。図 2.7 はオペアンプに TC75S67TU を用いた本センサーの増幅回路と、増幅した信号をマイコンに出力するコネクタ部です。

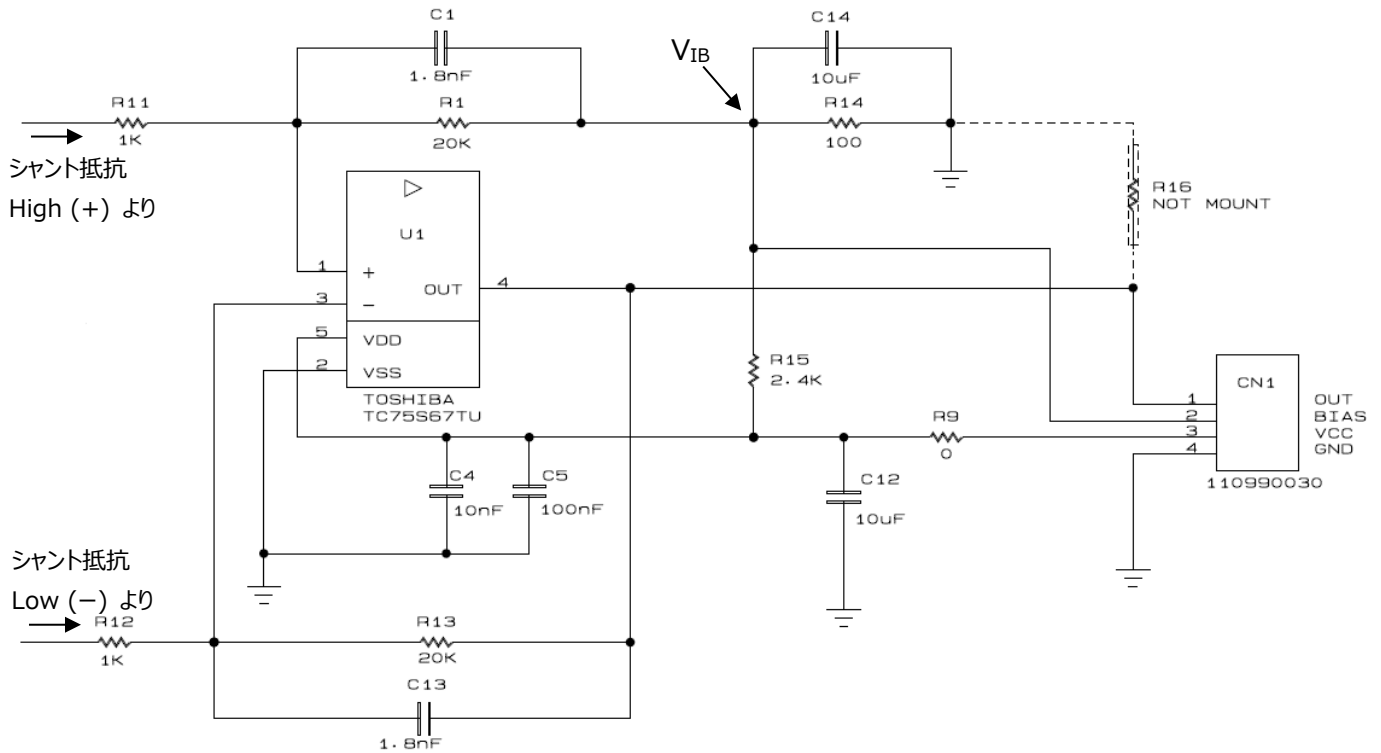


図 2.7 増幅回路およびコネクタ部

本センサーは、シャント抵抗の両端の電圧がオペアンプU1の非反転、反転入力端子に、それぞれR11、R12を介して入力される差動増幅回路となっています。ゲインは、最大測定電流時の出力振幅が出力のダイナミックレンジを超えないように設定します。本センサーの電源電圧は5 Vなので、余裕をみて最大測定電流2 Aが流れたとき（シャント抵抗に0.2 V発生）の出力振幅が4 Vになるよう、ゲインを20 倍（26 dB）とします。

ゲイン G_v は R11 と R1、R12 と R13 で下式 2.2 の通り決まります。

$$G_v = \frac{R1}{R11} = \frac{R13}{R12} = \frac{20 \times 10^3}{1 \times 10^3} = 20 \text{ 倍 (約 26 dB)} \quad \dots (2.2)$$

$$R1 = R13: 20 \text{ k}\Omega, R11 = R12: 1 \text{ k}\Omega$$

また、0 A 付近の電流検出精度の向上と GND センシングのため、U1 の非反転入力端子を R14 と R15 で V_{CC} を分圧した電圧でバイアスして直流電圧を底上げしています。この底上げ電圧 V_{IB} の設定は下式 2.3 の通りです。

$$V_{IB} = \frac{R14}{R14 + R15} \times V_{CC} = \frac{100}{100 + 2.4 \times 10^3} \times 5 = 200 \text{ (mV)} \quad \dots (2.3)$$

$$R14: 100 \ \Omega, R15: 2.4 \text{ k}\Omega, V_{CC}: 5 \text{ V}$$

U1 の出力にはこの電圧 V_{IB} が重畳されることとなりますが、 V_{IB} はコネクタ CN1 の BIAS 端子を通してモニターしており、結果を算出する時にこの分を差し引いています。

また、不要な高周波成分を除去するため、R1 と C1、および R13 と C13 では LPF を構成しており、カットオフ周波数 f_c は下式 2.4 で求められます。

$$f_c = \frac{1}{2 \times \pi \times R1 \times C1} = \frac{1}{2 \times \pi \times R13 \times C13} = \frac{1}{2 \times \pi \times 20 \times 10^3 \times 1800 \times 10^{-12}}$$

$$\cong 4.42 \text{ (kHz)} \quad \dots (2.4)$$

$$R1=R13: 20 \text{ k}\Omega, C1=C13: 1800 \text{ pF}$$

U1の電源端子に接続されるバイパスコンデンサーはC4=10 nFとC5=100 nFの2種類のコンデンサーを並列としています。これは、小さい10 nFのコンデンサーで1 MHz以上の高い周波数領域の、大きい100 nFのコンデンサーでそれ以下の低い周波数領域の、それぞれインピーダンスを下げて広い周波数範囲の電源ノイズを効果的に除去するためです。

最後に、本電流センサーの測定分解能について説明します。

測定結果の分解能は、本センサーの出力を受ける後続マイコンの入力A/Dコンバーターのbit数で決まります。Arduinoの場合、入力A/Dコンバーターのbit数は10、電源電圧は5 Vなので、LSB (最下位ビット: Least significant bit) 1カウントあたりの電圧値 V_{LSB} は下式2.5のとおり、約4.9 mVになります。

$$V_{LSB} = \frac{V_{CC}}{2^{10}-1} = \frac{5}{1023} \cong 0.0049 = 4.9 \text{ (mV)} \quad \dots (2.5)$$

$$(2^{10} = 1024)$$

これより、オペアンプの出力電圧が約4.9 mVとなる電流の値が本センサーの分解能となります。

U1のゲイン $G_V=20$ 倍、シャント抵抗 $R10=100 \text{ m}\Omega$ なので、 V_{LSB} をこれらで割って下式2.6の通り、本センサーの分解能は約2.4 mAとなります。

$$\frac{V_{LSB}}{G_V \times R10} = \frac{4.9 \times 10^{-3}}{20 \times 100 \times 10^{-3}} = 0.0024 = 2.4 \text{ (mA)} \quad \dots (2.6)$$

なお、TC75S67TUは入力換算で0.5 mV (標準) のオフセット電圧を持つので、出力にはこれをゲイン倍した電圧が発生します。本センサーのオペアンプのゲインは20倍に設定しており、出力で V_{LSB} を超えるオフセット電圧が発生して零点ずれや電流の測定誤差になる可能性があります。これはマイコンのソフトウェアで補正することができます。

補正方法の詳細については、リファレンスガイドを参照してください。

3. 基板設計

3.1. 基板パターン例

本基板は表裏の両面 2 層基板を用いています。図 3.1 に表面、図 3.2 に裏面のパターン例を示します。図上吹き出しで示す各項目については 3.2 項で詳述します。

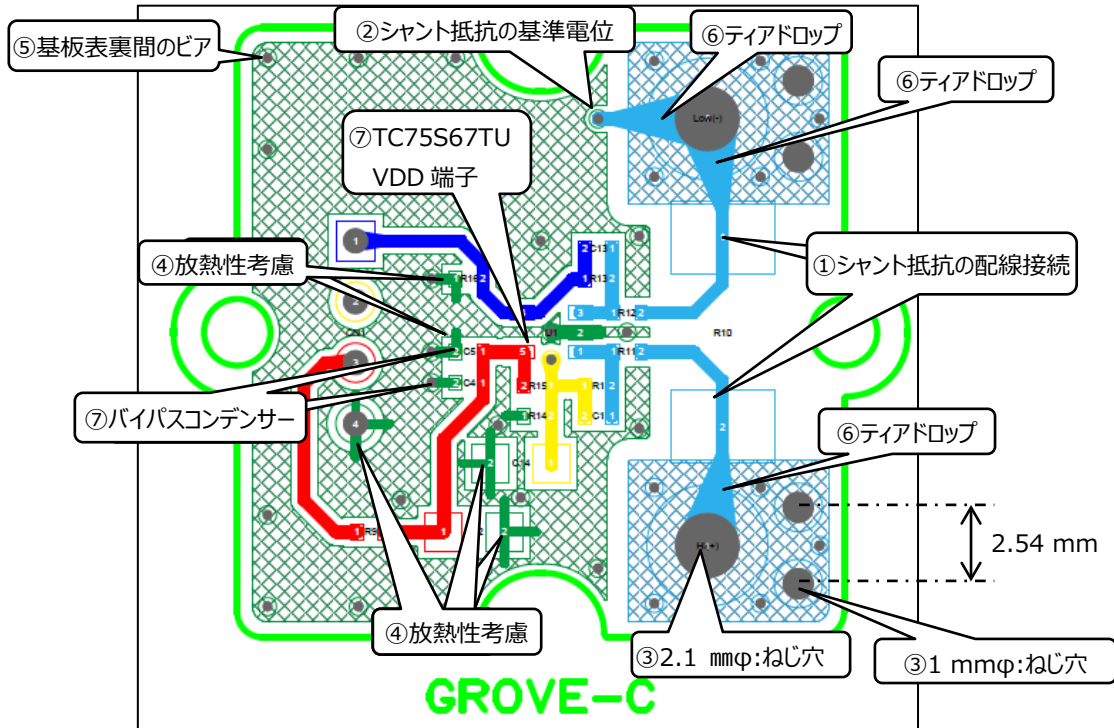


図 3.1 基板表面パターン

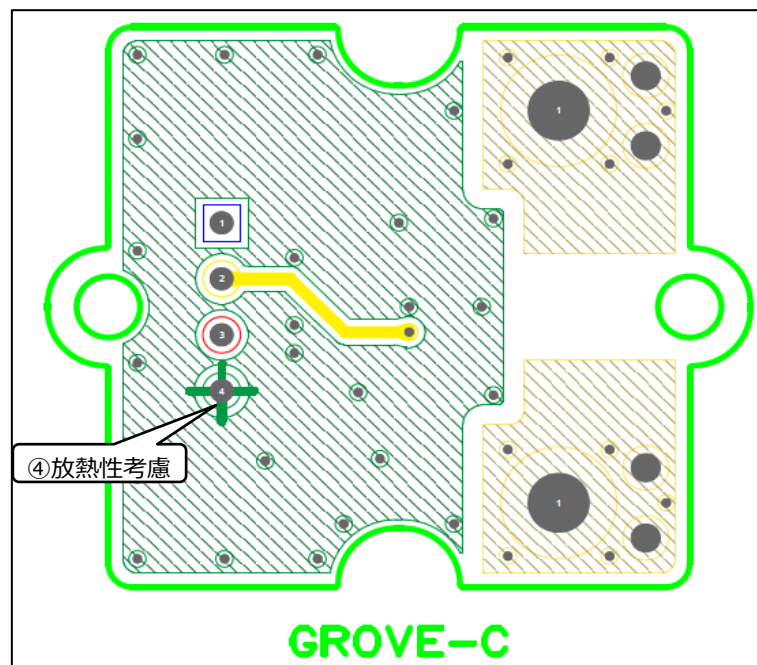


図 3.2 基板裏面パターン

3.2. 基板設計上の注意点

本基板の注意点を記載いたします。

- ① シャント抵抗の配線接続 (図 3.1 参照)
シャント抵抗では電流を電圧降下として検出していますが、検出電圧を誤差なくオペアンプに入力するため、オペアンプへの配線はシャント抵抗の根元で電流が流れる配線と分離し、最短距離になるようにしてください。このような接続をケルビン接続といい、電流検知用のシャント抵抗では一般的に使用される方法です。本パターン例ではシャント抵抗のパッドの内側を通して最短距離でオペアンプの入力端子に配線を通してあります。
- ② シャント抵抗の基準電位 (図 3.1 参照)
電流センサー回路の GND とシャント抵抗の基準側は同電位に一致させるようにしてください。パターン例では、シャント抵抗の Low 側をセンサー回路の GND と同電位にレイアウトしています (図 3.1 の基準電位部分)。
- ③ ねじ穴の設置 (図 3.1 参照)
シャント抵抗のパッド末端部分には、ターミナルなどを接続できるようにねじ穴を設けてください。
- ④ サーマル処理 (図 3.1、図 3.2 参照)
パターン例で“放熱性考慮”と書いた箇所は、リフロー・ハンダ付けの際に熱が逃げないよう、各 PAD から GND への配線はベタパターンとせず、十字、あるいは T 字などで引いています。これは、パターンを通じて熱が逃げてハンダ付け作業性が悪化し、作業時間がかかってしまうことにより部品が過熱し、破損することを防ぐためのものです。通常、十字・T 字のレイアウト部分は、ハンダ付け後にはハンダに埋もれて目視できなくなります。
- ⑤ インピーダンス低減 (図 3.1 参照)
2 層基板の場合は、基板表裏間にはできるだけ多くのビアを設けてください。GND 全体のインピーダンスを下げ、基準となるベタ GND を強化して領域内に電位差が生じるのを防ぎ、かつ、ノイズが広がることを防ぎます。
- ⑥ ティアドロップ形状 (図 3.1 参照)
パターン例では、ランドやパッドと配線の接続部分の配線パターンを広げて、ティアドロップ (tear drop) 形状としています。これには、パッド部分での電流の特異点の発生を防ぐ、パッドと配線の接続強度を上げるといった目的があります。
- ⑦ バイパスコンデンサーの位置 (図 3.1 参照)
電源電圧ラインに重畳しているノイズの除去のため、オペアンプのバイパスコンデンサー 2 個 (C4 および C5) は該当デバイスの電源電圧端子のできるだけ近くで、かつ電源電圧ライン側に接続してください。
なお、コンデンサーは ESR ができるだけ小さいものを選択してください。ESR=1 Ω 以下のものを推奨します。
- ⑧ ガードリング
本ガイドのパターン例には入れておりませんが、オペアンプの入力へのノイズの飛び込みが気になる場合は、微小信号を扱う領域の周囲にガードリングを設けることを推奨します。ガードリングにより、線間容量や浮遊容量によって他の配線から入力端子に雑音などが入ることや、電位が発生してリーク電流が流れ込むことを防ぐことができます。
なお、ガードリングに関しては、ループアンテナとなってノイズが飛び込むことを防ぐため、途中で切れ目を入れる場合もありますが、切れ目の有無は実際の基板での実験などで判断してください。切れ目を入れない場合は、囲む面積をできるだけ小さくしてループを通過する磁束を減らすようにしてください。

4. 製品概要

4.1. TC75S67TU 製品概要

- 低入力換算雑音電圧:
 $V_{NI}=16 \text{ nV}/\sqrt{\text{Hz}}$ (typ.) @ $f=10 \text{ Hz}$, $R_S=100 \ \Omega$, $R_f=10 \text{ k}\Omega$, $V_{DD}=2.5 \text{ V}$, $V_{SS}=\text{GND}$, $G_V=40 \text{ dB}$
 $V_{NI}=6 \text{ nV}/\sqrt{\text{Hz}}$ (typ.) @ $f=1 \text{ kHz}$, $R_S=100 \ \Omega$, $R_f=10 \text{ k}\Omega$, $V_{DD}=2.5 \text{ V}$, $V_{SS}=\text{GND}$, $G_V=40 \text{ dB}$
- 低入力バイアス電流 : $I_I=1 \text{ pA}$ (typ.)
- 低電源電流: $I_{DD}=430 \ \mu\text{A}$ (typ.) @ $V_{DD}=2.5 \text{ V}$, $V_{SS}=\text{GND}$
- 低電源電圧駆動: V_{DD} , $V_{SS}=2.2 \sim 5.5 \text{ V}$

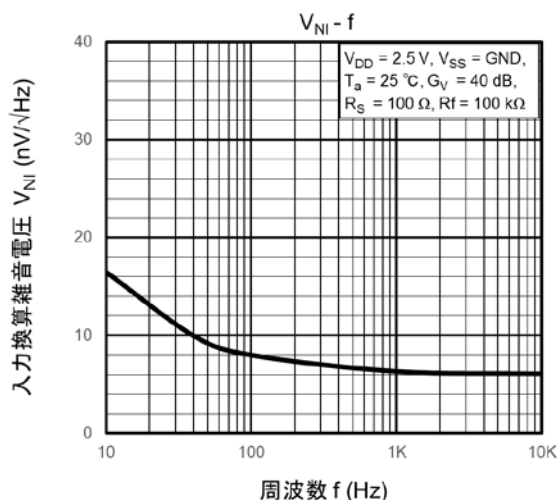


図 4.1 入力換算雑音電圧特性

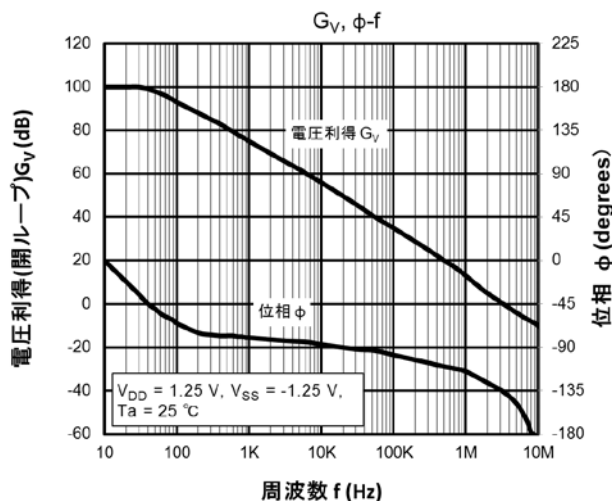


図 4.2 位相余裕 vs ゲイン特性

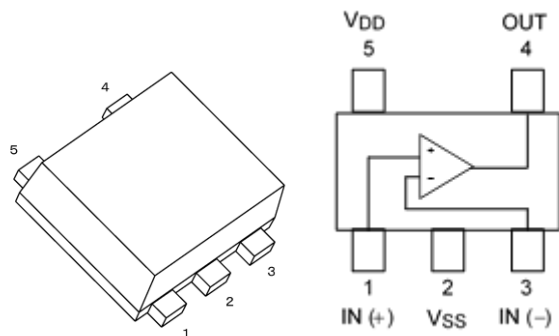


図 4.3 外観と端子配置

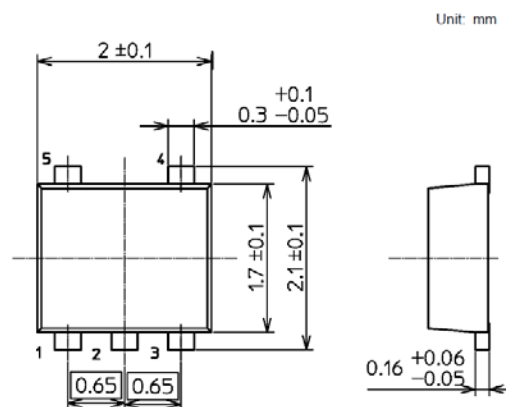


図 4.4 外形寸法

各特性詳細につきましては、データシートをご参照ください

TC75S67TU のデータシートダウンロードはこちらから →

[Click Here](#)

4.2. 端子説明

表 4.1 TC75S67TU の端子説明

ピン番号	ピン名称	機能
1	IN (+)	非反転入力端子
2	V _{SS}	負電源端子 単電源で使用する場合は GND に接続してください
3	IN (-)	反転入力端子
4	OUT	出力端子
5	V _{DD}	正電源端子 単電源で使用する場合の最大定格は 6 V です。安定動作のためバイパスコンデンサーとして 0.1 μ F、および 0.01 μ F 以上 (ESR=1 Ω 以下) のコンデンサーの使用を推奨します。

ご利用規約

本規約は、お客様と東芝デバイス&ストレージ株式会社（以下「当社」といいます）との間で、当社半導体製品を搭載した機器を設計する際に参考となるドキュメント及びデータ（以下「本リファレンスデザイン」といいます）の使用に関する条件を定めるものです。お客様は本規約を遵守しなければなりません。本リファレンスデザインをダウンロードすることをもって、お客様は本規約に同意したものとみなされます。なお、本規約は変更される場合があります。当社は、理由の如何を問わずいつでも本規約を解除することができます。本規約が解除された場合は、お客様は、本リファレンスデザインを破棄しなければなりません。またお客様が本規約に違反した場合は、お客様は、本リファレンスデザインを破棄し、その破棄したことを証する書面を当社に提出しなければなりません。

第1条 禁止事項

お客様の禁止事項は、以下の通りです。

1. 本リファレンスデザインは、機器設計の参考データとして使用されることを意図しています。信頼性検証など、それ以外の目的には使用しないでください。
2. 本リファレンスデザインを販売、譲渡、貸与等しないでください。
3. 本リファレンスデザインは、高温・多湿・強電磁界などの対環境評価には使用できません。
4. 本リファレンスデザインを、国内外の法令、規則及び命令により、製造、使用、販売を禁止されている製品に使用しないでください。

第2条 保証制限等

1. 本リファレンスデザインは、技術の進歩などにより予告なしに変更されることがあります。
2. 本リファレンスデザインは参考用のデータです。当社は、データおよび情報の正確性、完全性に関して一切の保証をいたしません。
3. 半導体素子は誤作動したり故障したりすることがあります。本リファレンスデザインを参考に機器設計を行う場合は、誤作動や故障により生命・身体・財産が侵害されることのないように、お客様の責任において、お客様のハードウェア・ソフトウェア・システムに必要な安全設計を行うことをお願いします。また、使用されている半導体素子に関する最新の情報（半導体信頼性ハンドブック、仕様書、データシート、アプリケーションノートなど）をご確認の上、これに従ってください。
4. 本リファレンスデザインを参考に機器設計を行う場合は、システム全体で十分に評価し、お客様の責任において適用可否を判断して下さい。当社は、適用可否に対する責任を負いません。
5. 本リファレンスデザインは、その使用に際して当社及び第三者の知的財産権その他の権利に対する保証または実施権の許諾を行うものではありません。
6. 当社は、本リファレンスデザインに関して、明示的にも黙示的にも一切の保証（機能動作の保証、商品性の保証、特定目的への合致の保証、情報の正確性の保証、第三者の権利の非侵害保証を含むがこれに限らない。）をせず、また当社は、本リファレンスデザインに関する一切の損害（間接損害、結果的損害、特別損害、付随的損害、逸失利益、機会損失、休業損、データ喪失等を含むがこれに限らない。）につき一切の責任を負いません。

第3条 輸出管理

お客様は本リファレンスデザインを、大量破壊兵器の開発等の目的、軍事利用の目的、あるいはその他軍事用途の目的で使用してはなりません。また、お客様は「外国為替及び外国貿易法」、「米国輸出管理規則」等、適用ある輸出関連法令を遵守しなければなりません。

第4条 準拠法

本規約の準拠法は日本法とします。