

センサ信号増幅に最適な CMOS 低ノイズオペアンプ回路の提案

概要

本資料は IoT 機器に広く搭載される光センサ・超音波センサ・振動センサなど各種センサの微小な出力信号を増幅するために用いる低ノイズオペアンプの低雑音特性を活かした使用方法について、東芝 CMOS 低ノイズオペアンプ：TC75S67TU を例に解説します。

目次

概要.....	1
目次.....	2
1.はじめに.....	4
2.センサ及び微小なセンサ信号増幅回路の概要	5
3.センサ信号増幅回路に要求されるオペアンプ回路の要求性能	6
3.1 オペアンプのノイズと、ノイズのセンサ回路に与える影響.....	6
3.1.1 内部雑音とは.....	7
3.1.2 外部雑音とは.....	7
3.2 検出誤差低減のための低入力バイアス電流.....	8
4. センサ信号の増幅回路に最適なオペアンプ回路の提案.....	9
4.1 内部雑音の低いオペアンプの選択	9
4.2 外部雑音を低減させるための外付け抵抗の選定.....	10
4.3 センサ回路の高精度化に効果的な低入力バイアス電流 CMOS オペアンプ	10
5.まとめ	11
製品取り扱い上のお願い	12

1. はじめに

現在、IoTに代表されるようなさまざまなアプリケーションに周囲の情報収集を行うための各種センサが搭載されています。

各種センサの代表的なものとしては、人感センサや煙報知器に使用される焦電型赤外線センサ、距離の計測などに使用する超音波センサ・光センサ、セキュリティ機器やリモコンなどに用いられる赤外線センサ、ガス検知器などのガスセンサ、重さを検知するロードセル、振動を検出するショックセンサなどがあげられます。多くの場合センサからの微小信号をオペアンプを用いた回路で増幅し、この増幅した信号をアナログ-デジタルコンバータ(ADC)などで処理されます。

センサ出力は微小なアナログ信号であることが多いことから、アナログ信号を高精度に増幅するためオペアンプ回路へのノイズ低減が求められます。

本アプリケーションノートでは、微小信号を増幅するセンサ信号増幅用途向けに、低ノイズ特性を活かしたオペアンプの使用方法を、東芝低ノイズCMOSオペアンプTC75S67TUを例に解説します。

2. センサ及び微小なセンサ信号の増幅回路の概要

センサから出力される信号は非常に微小なため、高精度にセンサ信号を増幅するために低ノイズオペアンプが要求されます。図 2.1 にセンサ回路のブロック図の例を示します。

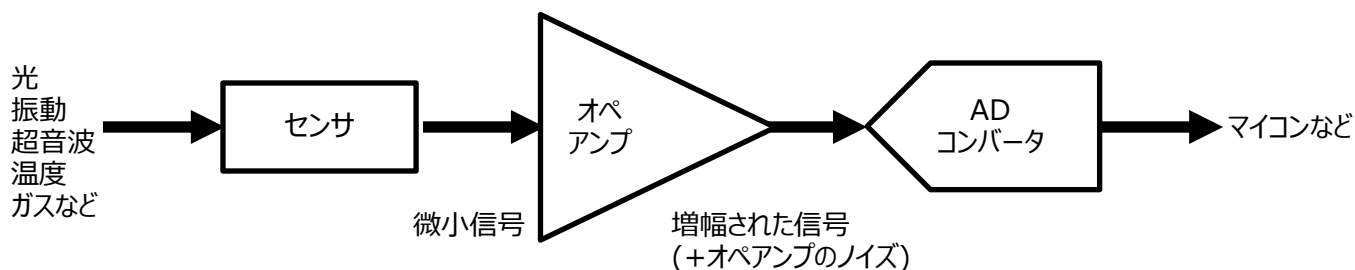


図 2.1 センサ回路ブロック図の例

また以下に代表的な各種センサ回路を例示します。

(1) 振動センサ回路

図 2.2 にオペアンプを使った振動(ショック)センサ回路(チャージアンプ回路)の例を示します。この回路はショックセンサで受けた振動の強さに応じた電荷の変化 Q_S を生じます。本回路は、ショックセンサ・センサ信号を増幅するオペアンプ・チャージアンプを構成するためのコンデンサ C_f から構成されます。

(2) 超音波センサ回路

図 2.3 にオペアンプを使った超音波センサ回路(反転増幅回路)の例を示します。この回路では超音波を超音波センサで受信し、電圧信号に変換します。センサ以外に、AC 結合用のコンデンサ C_C ・入力抵抗 R_S ・帰還抵抗 R_f で構成されます。

(3) 光センサ回路

図 2.4 にオペアンプを使った光センサ回路(電流-電圧変換回路)の例を示します。この回路では光センサ(PD: フォトダイオード)で受ける入射光強度に応じた微小電流 I_S が流れます。本回路は、光センサ・センサ信号を増幅するオペアンプ・電流-電圧変換用の抵抗 R_f ・発振防止用のコンデンサ C_f から構成されます。

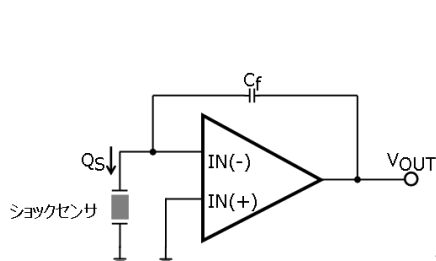


図 2.2 代表的な振動(ショック)センサ回路(チャージアンプ回路)の例

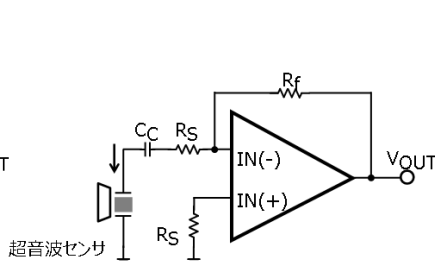


図 2.3 代表的な超音波センサ回路(反転増幅回路)の例

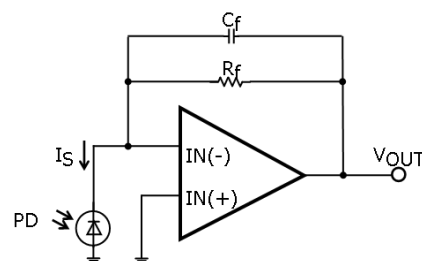


図 2.4 代表的な光センサ回路(電流-電圧変換回路)の例

次章では、上述した代表的なセンサ回路に使用されるオペアンプに要求される性能を検討します。

3. センサ信号増幅回路に要求されるオペアンプ回路の要求性能

3.1 オペアンプ回路のノイズとセンシング精度に与える影響



図 3.1.1 オペアンプ回路のセンシング精度に与える影響

図 3.1.1 にオペアンプ回路のセンシング精度に与える影響を示します。ノイズの大きなオペアンプを用いると、センサの微小信号を増幅した際にオペアンプのノイズが重畳し、精度が悪い回路となってしまいます。他に、回路を構成する抵抗もノイズに影響します。

オペアンプ回路のノイズは外部雑音と内部雑音の 2 種類に分けることができます(図 3.1.2)。内部雑音はオペアンプに起因する雑音で、外部雑音は回路の帰還抵抗に使われている抵抗などに起因する雑音です。図 3.1.2 にオペアンプ回路の雑音の発生個所と種類を示します。

また、図 3.1.3 にオペアンプ回路のノイズ周波数特性を示します。低周波域に分布する $1/f$ 雑音、低周波から高周波まで広く分布する白色雑音があります(表 1)。

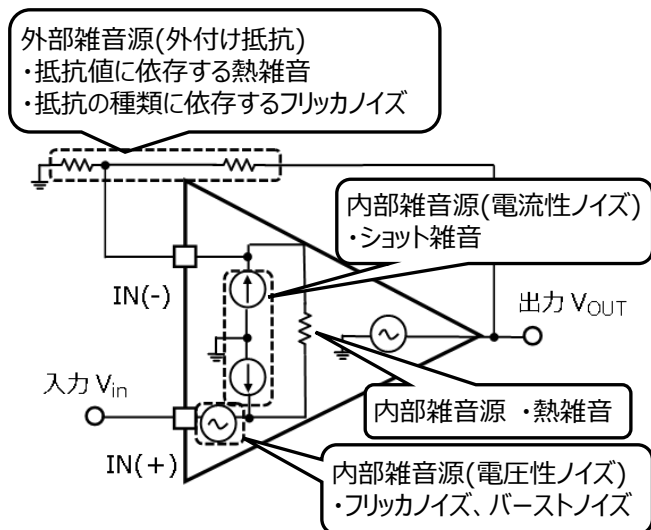


図 3.1.2 オペアンプ回路のノイズモデル

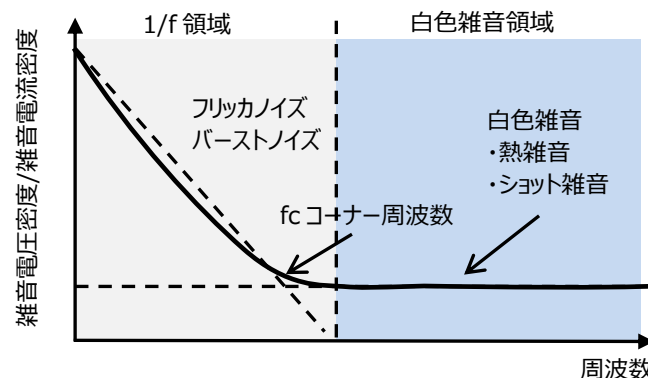


図 3.1.3 オペアンプ回路から発生する雑音の周波数特性

表 1 雑音の周波数特性

雑音の種類	雑音の周波数領域	支配的な雑音	雑音の原因
内部雑音	$1/f$ 領域 (低周波)	フリッカノイズ・バーストノイズ	半導体内部の格子欠陥などの影響
外部雑音		フリッカノイズ	抵抗から発生する
内部雑音	白色雑音領域 (低周波から高周波まで)	ショット雑音	半導体内部で電流が PN 接合を通過する際に生じる
内部雑音 外部雑音		熱雑音	オペアンプ内部や周辺の抵抗から発生し、抵抗値の大きさに依存する

3.1.1 内部雑音とは

内部雑音はオペアンプ回路内部で生じる雑音で、主に熱雑音・フリッカノイズ・バーストノイズ・ショット雑音の 4 つの雑音があげられます。

(1) 熱雑音

オペアンプ内部回路を構成する抵抗や MOSFET 素子などから発生します。電子は抵抗の中で熱により励起され不規則に運動しており、このため抵抗に電流が流れていないときでも抵抗の両端に雑音電圧が発生します。熱雑音 V_{NT} は次式で計算できます

$$V_{NT} = \sqrt{4kTB}$$

ただし、k:ボルツマン定数 (1.38×10^{-23}) [J/K], T:絶対温度[K], R:抵抗値[Ω], B:周波数帯域[Hz]

つまり、抵抗値が大きいと発生する熱雑音の値も大きくなります。

(2) フリッカノイズ・バーストノイズ

フリッカノイズ・バーストノイズは CMOS オペアンプ内部の MOSFET 素子などから発生します。

(3) ショット雑音

ショット雑音はオペアンプ内部半導体素子の、PN 接合電位障壁を超えて流れる電流に関係した雑音です。

内部雑音が影響する例として、振動(ショック)センサ回路をあげます。

図 2.2 の振動(ショック)センサ回路は、チャージアンプ回路で構成されています。ショックセンサの出力電荷を Q_S クーロン、帰還コンデンサを C_f とすると、オペアンプの出力電圧は $V_{OUT} = \frac{Q_S}{C_f}$ と示すことができます。ここで、この回路のノイズゲイン G_N は、ショックセンサの静電容量を C_j とすると $G_N = \frac{C_j}{C_f}$ と示すことができ、オペアンプの入力換算雑音電圧が G_N 倍されてセンサ誤差となって生じます。このため、この回路では低雑音のオペアンプの選択が必要となります。

3.1.2 外部雑音とは

外部雑音は、オペアンプ回路の外付け抵抗から発生する雑音です。

(1) フリッカノイズ

抵抗からは $1/f$ 雑音が発生します。

(2) 熱雑音

オペアンプ回路の外付け抵抗からは、前述した抵抗値と周囲温度に影響を受ける熱雑音 V_{NT} が発生します。

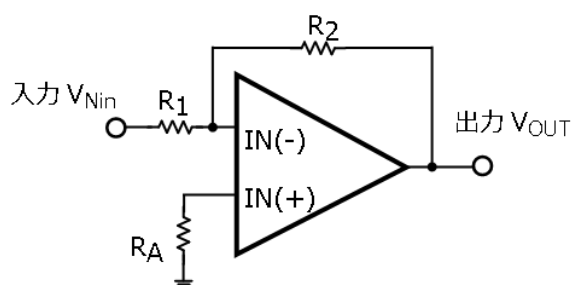


図 3.1.4(a) 反転増幅回路の例

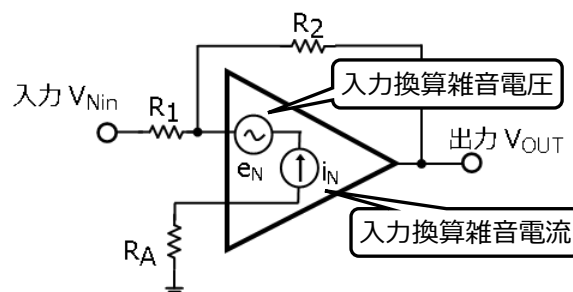


図 3.1.4(b) 反転増幅回路の例(ノイズモデル)

図 3.1.4(b)の反転増幅回路では、回路の入力換算雑音電圧 V_{Nin} を次の通り計算することができます。

・抵抗による出力熱雑音電圧密度 V_{RN} [Vrms/ $\sqrt{\text{Hz}}$]

$$V_{RN} = \sqrt{\left\{ \left(-\frac{R_2}{R_1} \right) \sqrt{4kTR_1} \right\}^2 + \left\{ \sqrt{4kTR_A} \left(1 + \frac{R_2}{R_1} \right) \right\}^2 + 4kTR_2}$$

・出力電圧性雑音電圧 V_{eN} [Vrms/ $\sqrt{\text{Hz}}$]

$$V_{eN} = e_N \left(1 + \frac{R_2}{R_1} \right), \text{ ただし } e_N \text{ はオペアンプの入力換算雑音電圧密度 を示します。}$$

・出力電流性雑音電圧密度 V_{iN} [Vrms/ $\sqrt{\text{Hz}}$]

$$V_{iN} = \sqrt{\{i_N + R_A \left(1 + \frac{R_2}{R_1} \right)\}^2 + (i_N - R_2)^2}, \text{ ただし } i_N \text{ はオペアンプの入力換算雑音電流密度 を示します。}$$

これをトータルした出力雑音電圧密度 V_{NOUT} [Vrms/ $\sqrt{\text{Hz}}$]は次の通りとなります。

$$V_{NOUT} = \sqrt{V_{RN}^2 + V_{eN}^2 + V_{iN}^2}$$

よって、この回路の入力換算雑音電圧 V_{Nin} [Vrms/ $\sqrt{\text{Hz}}$]は次の通り

$$V_{Nin} = \frac{V_{NOUT}}{\left| -\frac{R_2}{R_1} \right|} \text{ となります。}$$

内部雑音と外部雑音が影響する例として、超音波センサ回路をあげます。

図 2.3 の超音波センサ回路は、反転増幅回路で構成されています。超音波センサの出力電圧を V_C 、入力抵抗を R_S 、帰還抵抗を R_f とすると、オペアンプの出力電圧は $V_{OUT} = -\frac{R_f}{R_S} \cdot V_C$ と示すことができます。本回路ではオペアンプの内部雑音と共に、回路を構成する抵抗が発生する雑音が影響してきます。

このため、この回路ではオペアンプの内部雑音とともに、外部雑音の低減が必要となります。

3.2 検出誤差低減のための低入力バイアス電流

図 2.4 の光センサ回路は、電流-電圧変換回路で構成されています。センサの出力電流を I_S 、帰還抵抗を R_f とすると、オペアンプの出力電圧は $V_{OUT} = I_S \cdot R_f$ と示すことができます。フォトダイオードの出力電流は入射光の強さに応じて流れますが、数 nA から数 μA 程度の微小電流です。光を検出したときのフォトダイオードの出力電流が小さいことから、オペアンプの入力バイアス電流 I_B が大きい場合、 $V_{OUT} = I_B \cdot R_f$ の電圧が発生しセンサ誤差となって生じます。この回路では、入力バイアス電流ができる限り小さいオペアンプの選択が必要です。

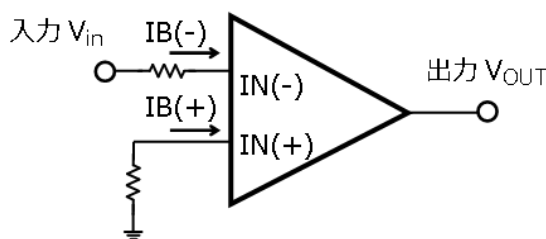


図 3.1.5 入力バイアス電流

次章ではこれらの要求性能に対する解決策について、東芝製 TC75S67TU を例に提案します。

4. センサ信号の増幅回路に最適なオペアンプ回路の提案

4.1 内部雑音の低いオペアンプの選択

TC75S67TU は当社既存の CMOS オペアンプから半導体プロセス技術と回路を改善したことにより、 $1/f$ 領域の入力換算雑音が $16\text{nV}/\sqrt{\text{Hz}}$ (標準値@ $f=10\text{Hz}$)、白色雑音領域の入力換算雑音が $6\text{nV}/\sqrt{\text{Hz}}$ (標準値@ $f=1\text{kHz}$) と非常にノイズ性能が優れております。このため、低周波から高周波までの広い周波数帯域のセンサ信号を高精度にセンシングすることができる最適なオペアンプです。また、入力換算雑音電圧 V_{NI} は電源電圧 V_{DD} に対して依存性を持ちます。この特性カーブを図 4.2 に示します。

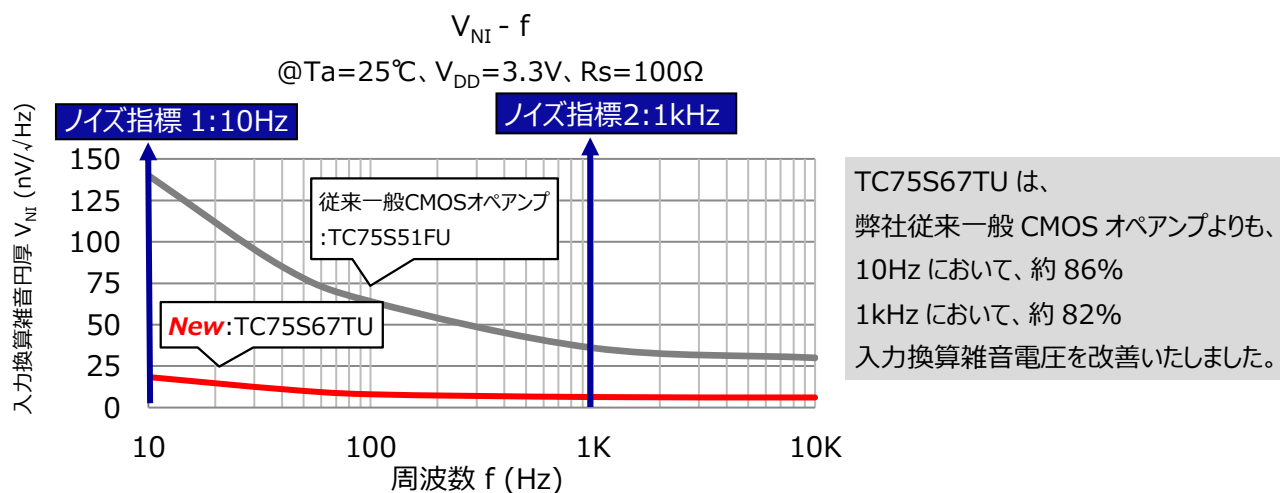


図 4.1 TC75S67TU の入力換算雑音電圧の周波数特性 (標準カーブ)

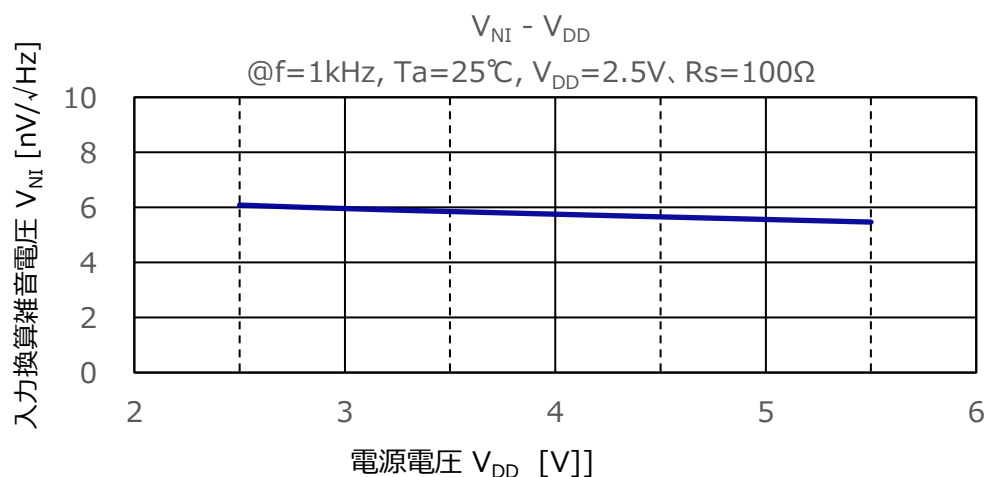


図 4.2 TC75S67TU の入力換算雑音電圧 vs 電源電圧特性 (標準カーブ)

4.2 外部雑音を低減させるための外付け抵抗の選定

オペアンプの外部雑音には、主に次の 2 つが影響します。

(1) 外付け抵抗の種類の選定

抵抗からはフリッカノイズに起因する $1/f$ 雑音が発生しますが、この雑音を小さくするためには炭素皮膜抵抗や厚膜チップ抵抗と比較して、フリッカノイズが小さい薄膜チップ抵抗や金属皮膜抵抗を使用することで、雑音を低減することができます。

(2) 熱雑音の低減

前述の反転増幅回路の式から、 R_2/R_1 の比率を変えずに、 R_1 と R_2 の値をオペアンプの出力電流値に合わせて、適切に小さくすることで雑音の値を小さくすることができる事がわかります。また、この反転増幅回路の入力換算雑音電圧は R_A に入力換算雑音電流が流れることにより発生する雑音が $(1+R_2/R_1)$ 倍で出力されます。一般的なバイポーラオペアンプの場合、抵抗 R_A は $I_{N(+)}$ 、 $I_{N(-)}$ 入力端子のバイアス電流による入力オフセット電圧の発生を小さくする効果が有りますが、TC75S67TU は入力バイアス電流が約 1pA と小さいため、このメリットはほとんどありません。このため R_A を接続しないことで雑音を低減することができます。参考に、 R_A を信号源抵抗とした時の入力換算雑音電圧 V_{NI} と R_A の特性カーブを図 4.3 に示します(測定回路: 図 3.1.4)。

また抵抗の熱雑音 V_{NT} は 3.1.1 で述べたように温度と周波数帯域の影響を受けるため、熱雑音低減のためには抵抗値を小さくする・周波数帯域を必要最小限にする・回路の動作温度を下げるの 3 つの手法で改善することができます。

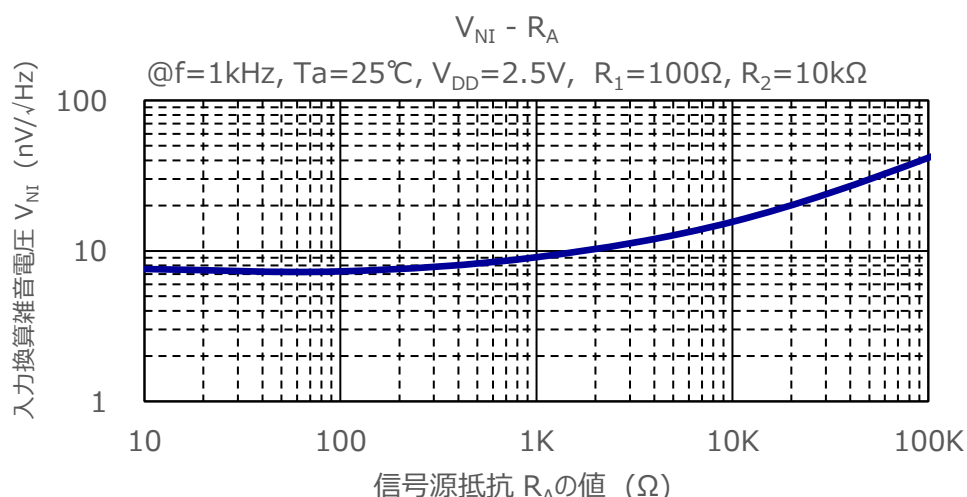


図 4.3 TC75S67TU の入力換算雑音電圧 vs 信号源抵抗値カーブ (標準カーブ)

4.3 センサ回路の高精度化に効果的な低入力バイアス電流 CMOS オペアンプ

ここまで述べたように、センサ回路では入力バイアス電流がセンサ回路の誤差に大きく影響する場合があります。TC75S67TU は CMOS プロセスを用いたオペアンプのため、一般的なバイポーラオペアンプ(入力バイアス電流: 数 nA 程度)と比較して入力バイアス電流が 1pA(標準@ $T_a=25^\circ\text{C}$)と非常に小さく優れております。このためセンサ回路の精度に与える影響が非常に小さく、センサ回路の高精度化に最適なオペアンプと言えます。

5.まとめ

IoT 機器に代表されるように各種センサの需要は今後も伸長が見込まれます。またセンサ回路を搭載するアプリケーションの高性能化のために、センサ回路のさらなる高精度な性能が求められています。東芝 CMOS 低ノイズオペアンプ TC75S67TU は、低ノイズ特性と低入力バイアス電流を実現し、各種センサの微小信号を高精度に増幅することができるよう開発いたしました。TC75S67TU はさまざまなセンサ信号増幅回路に最適なソリューションを提案可能なオペアンプです。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。

低ノイズ特性のオペアンプ製品

TC75S67TU のデータシートダウンロードはこちらから →

[Click Here](#)

この他オペアンプ回路の設計については、アプリケーションノート“オペアンプ・コンパレータの基本回路”をご覧ください。

オペアンプ・コンパレータの基本回路はこちらから →

[Click Here](#)

その他オペアンプ製品ラインナップはこちらから →

[Click Here](#)

製品取り扱い上のお願ひ

株式会社東芝およびその子会社ならびに関係会社を以下「当社」といいます。

本資料に掲載されているハードウェア、ソフトウェアおよびシステムを以下「本製品」といいます。

- 本製品に関する情報等、本資料の掲載内容は、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。
- 文書による当社の事前の承諾なしに本資料の転載複製を禁じます。また、文書による当社の事前の承諾を得て本資料を転載複製する場合でも、記載内容に一切変更を加えたり、削除したりしないでください。
- 当社は品質、信頼性の向上に努めていますが、半導体・ストレージ製品は一般に誤作動または故障する場合があります。本製品をご使用頂く場合は、本製品の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。なお、設計および使用に際しては、本製品に関する最新の情報（本資料、仕様書、データシート、アプリケーションノート、半導体信頼性ハンドブックなど）および本製品が使用される機器の取扱説明書、操作説明書などをご確認の上、これに従ってください。また、上記資料などに記載の製品データ、図、表などに示す技術的な内容、プログラム、アルゴリズムその他応用回路例などの情報を使用する場合は、お客様の製品単独および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ください。
- 本製品は、特別に高い品質・信頼性が要求され、またはその故障や誤作動が生命・身体に危害を及ぼす恐れ、膨大な財産損害を引き起こす恐れ、もしくは社会に深刻な影響を及ぼす恐れのある機器（以下“特定用途”という）に使用されることは意図されていませんし、保証もされていません。特定用途には原子力関連機器、航空・宇宙機器、医療機器、車載・輸送機器、列車・船舶機器、交通信号機器、燃焼・爆発制御機器、各種安全関連機器、昇降機器、電力機器、金融関連機器などが含まれますが、本資料に個別に記載する用途は除きます。特定用途に使用された場合には、当社は一切の責任を負いません。なお、詳細は当社営業窓口までお問い合わせください。
- 本製品を分解、解析、リバースエンジニアリング、改造、改変、翻案、複製等しないでください。
- 本製品を、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することはできません。
- 本資料に掲載してある技術情報は、製品の代表的動作・応用を説明するためのもので、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。
- 別途、書面による契約またはお客様と当社が合意した仕様書がない限り、当社は、本製品および技術情報に関して、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。）をしておりません。
- 本製品、または本資料に掲載されている技術情報を、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사용途の目的で使用しないでください。また、輸出に際しては、「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、それらの定めるところにより必要な手続を行ってください。
- 本製品の RoHS 適合性など、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い合わせください。本製品のご使用に際しては、特定の物質の含有・使用を規制する RoHS 指令等、適用ある環境関連法令を十分調査の上、かかる法令に適合するようご使用ください。お客様が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、当社は一切の責任を負いかねます。