

*Application Note*マルチプレクサアプリケーションでの **THD** と **THD +N** についての理解

Rami Mooti

概要

全高調波歪(THD)と全高調波歪 + ノイズ(THD + N)は、アナログシステムで信号忠実度を評価するための、重要な性能指標です。オーディオ、試験、計測、生体医療用計測のようなアプリケーションでは、わずかな歪みが、性能と信頼性を大幅に低下させる可能性があります。このアプリケーションノートでは、THD と THD +N の数学的基礎を説明し、マルチプレクサ(mux)の特性評価の標準的なテスト設定の概要を示し、オン抵抗(R_{ON})と R_{ON} 平坦性が歪み性能に及ぼす影響を明確にしています。TMUX4827 や TMUX7612 のような低 THD マルチプレクサを使用して、オーディオ切り替え、高精度測定、プログラマブルゲイン増幅ループ、生体医療センシングの各分野での性能を向上させる方法を示す実践的な例を提示します。マルチプレクサデバイスの THD の動作について理解し、最適化された R_{ON} 特性を持つ部品を選択することで、多様なアプリケーションで高精度の信号再現と堅牢なシステム性能を確実に実現することができます。

目次

1はじめに.....	2
2 THD とは.....	2
3 THD +N とは.....	2
4 マルチプレクサの THD (+N).....	2
4.1 マルチプレクサの THD (+N)についての理解.....	3
5 低 THD マルチプレクサアプリケーション.....	5
6 低 THD マルチプレクサデバイスの推奨事項.....	7
7 まとめ.....	8
8 参考資料.....	9

商標

すべての商標は、それぞれの所有者に帰属します。

1 はじめに

オーディオ機器、計測システム、通信機器においては、信号が可能な限り正確に再現されていることを確認することが重要です。ハイファイスピーカーの設計、敏感なラボ機器のキャリブレーション、クリアなデータ伝送などで、歪みやノイズが性能を低下させる可能性があります。ここで、全高調波歪 (THD) や全高調波歪 + ノイズ (THD + N) などの指標が登場します。THD は、元の信号には存在しなかった高調波成分をシステムがどの程度導入するかを測定します。THD + N にはこの歪みとノイズ増加の両方が含まれるため、より広範な性能指標となり、実際の性能をより正確に示すことができます。

THD レベルが高くなるほど、出力の歪みや劣化が大きくなり、オーディオアプリケーションにおいて、マフラー音や雑音など、望ましくないアーティファクトの原因になる可能性があります。低 THD は、性能を低下させる可能性のある干渉を発生させずに、システムに元の信号を正確に再現させることができます。医療機器やテスト、計測用 DAC や ADC などの重要なアプリケーションでは、わずかな歪みが必要な精密測定に大きな悪影響を与える可能性があります。デバイスの THD 性能は、コンポーネントの評価と比較を行い、システム内のクリーンで信頼性の高い信号出力を確実に実現するのに役立ちます。

2 THD とは

具体的には、THD は、デバイスの非線性により、出力において高調波の形で入力信号に生じる歪みの測定値です。固定周波数入力の場合、THD は、すべての高調波振幅の 2 乗平均平方根 (RMS) 合計と基本入力信号の RMS 振幅の比として計算され、パーセンテージまたはデシベル比で表すことができます。

$$\text{THD}(\%) = \frac{\sqrt{\sum_{i=2}^{\infty} V_i^2}}{V_1} \times 100\% \quad \text{THD}(dB) = 20 \times \log_{10} \frac{\sqrt{\sum_{i=2}^{\infty} V_i^2}}{V_1} \quad (1)$$

ここで、 V_1 は基本波、 V_i は i 番目の高調波です。各振幅は、 V_{RMS} で示されます。

3 THD +N とは

THD + N は THD に似ており、低ノイズ環境では、THD と類似の値に見えることがあります。ただし、システムノイズが増加するにつれて、THD + N 指標は THD 単独に比べて精度が高くなります。システムレベルのノイズ源には、高周波干渉、チャネル間またはデバイス間のクロストーク、60Hz 基本波または高調波 (120Hz, 240Hz など) での電源ラインのグランドループ結合、相互変調歪みなどがあります。これらの影響のいくつかは、適切なシールド、PCB トレース間隔、グランディング、フィルタリング技術で制御できますが、完全に除去することは困難です。さらに、(マルチプレクサを含む) 半導体デバイスは、熱ノイズ、フリッカーノイズ、ショットノイズに寄与し、ベースライン THD + N ノイズに影響を与える可能性があります。

全高調波歪み + ノイズ (THD + N) は、測定にノイズを含めることで THD の定義を拡張します。

$$\text{THD} + N(\%) = \frac{\sqrt{\sum_{i=2}^{\infty} V_i^2 + V_N^2}}{V_1} \times 100\% \quad \text{THD} + N(dB) = 20 \times \log_{10} \frac{\sqrt{\sum_{i=2}^{\infty} V_i^2 + V_N^2}}{V_1} \quad (2)$$

ここで、 V_1 は基本波、 V_i は i 番目の高調波、および V_N ノイズを表します。各振幅は、 V_{RMS} で示されます。

4 マルチプレクサの THD (+N)

図 4-1 に、マルチプレクサ (MUX) デバイスの THD + N テスト設定の回路図を示します。低歪み正弦波源、 V_{in} は、テスト対象となる S_1 から D のマルチプレクサチャンネルに適用されます。この測定は V_{in} 周波数の範囲 (たとえば、オーディオアプリケーションの場合、掃引は 20Hz ~ 20kHz) で行われ、その結果が組み合わされて周波数全体にわたる THD + N のプロットが形成されます。

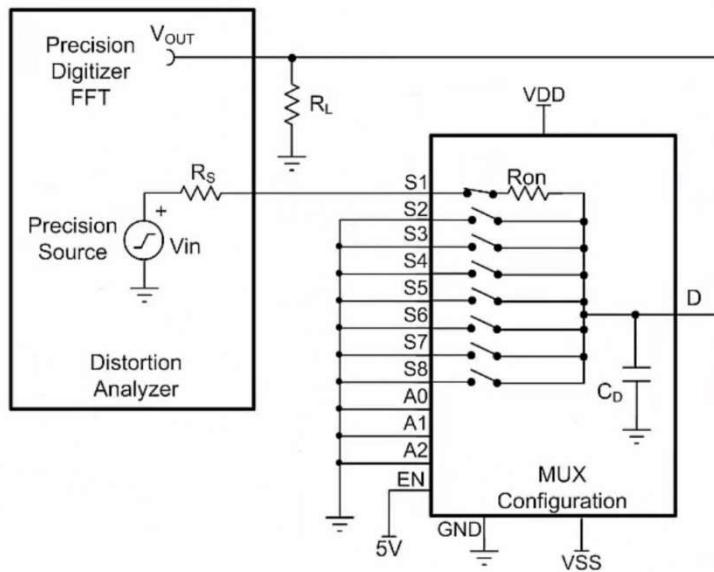


図 4-1. マルチプレクサ THD + N を測定するためのテスト設定の回路図

4.1 マルチプレクサの THD(+N)についての理解

マルチプレクサシステムで観測される THD(+N) 性能は、デバイスのオン抵抗 (R_{ON})、 R_{ON} 平坦性(適用された信号範囲全体でのマルチプレクサチャネル R_{ON} の変動)、および負荷抵抗 R_L の関数です。 R_L/R_{ON} の比率が増加するにつれて、THD+N 性能が向上します。これは、図 4-2 で示されるように、 R_{on} と R_L の組み合わせにより振幅依存の分圧器が形成されることによるものです。これにより、非反転増幅器の高インピーダンス入力など、 R_L が大きい場合に、観測されるマルチプレクサ出力での高調波歪みが最小限に抑制されます。

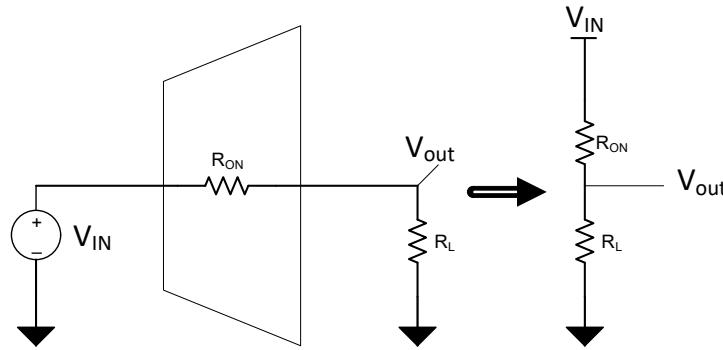


図 4-2. MUX R_{ON} と R_L により形成される分圧器

通常、THD が重要なアプリケーションでは、動作時のピークツーピーク電圧範囲は、マルチプレクサが対応可能な全電圧スイングよりも小さい範囲にすることができます。このため、デバイスの動作電圧がマルチプレクサの R_{ON} が大きく変化する領域に落ちないことを確認することが重要です。一部の R_{on} 曲線は領域全体にわたって平坦ですが、特定の入力電圧領域全体で性能を最適化できるものもあります。図 4-3 は、動作時のピークツーピーク (V_{pp}) 電圧が異なる場合、同じデバイスでも THD 性能が異なる場合があることを示しています。

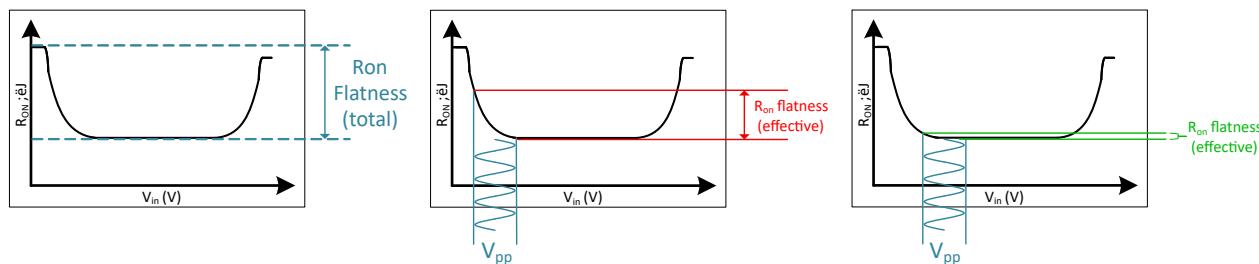


図 4-3. 最適化された(緑) V_{pp} 領域での R_{ON} 曲線と、最適化されていない(赤) V_{pp} 領域との関係

THD の性能を最適化するため、最も平坦なマルチプレクサの R_{ON} 領域を使用することが推奨されます。図 4-4 は、アナログマルチプレクサの R_{ON} 曲線の共通部分に対する最適化された THD 領域を示しています。図 4-5 は、超平坦な R_{ON} が TMUX4827 の THD 性能を最適化する方法を示しています。

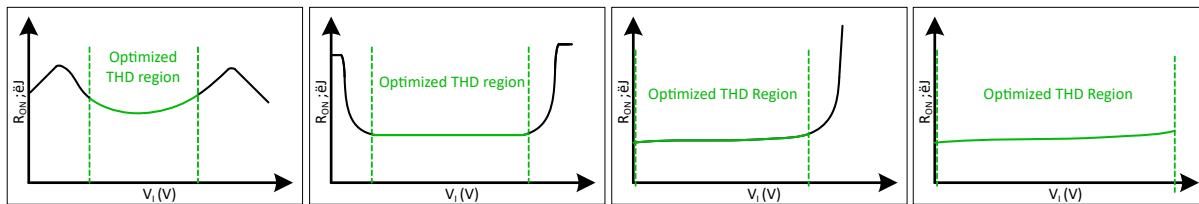


図 4-4. 最適化された THD 性能を得るための V_{IN} 最適領域(緑)

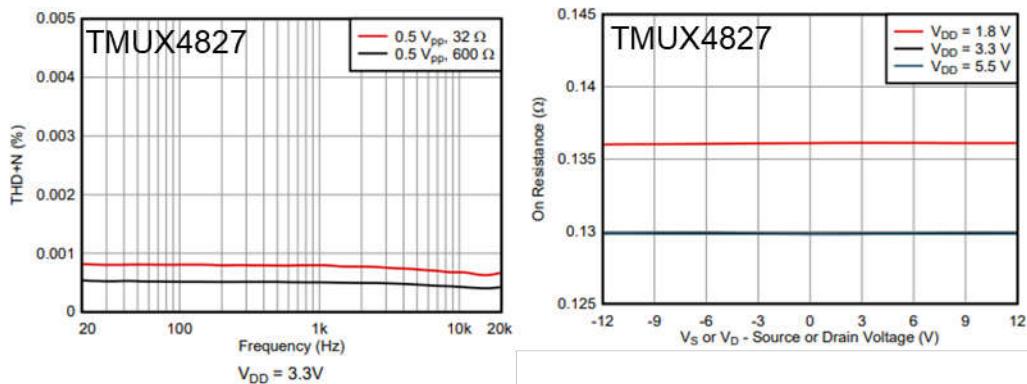


図 4-5. TMUX4827 は、超平坦な R_{ON} を介して最適化された THD 性能を実現します

5 低 THD マルチプレクサアプリケーション

信号の忠実度と精度が重要なアプリケーションでは、低 THD マルチプレクサが不可欠です。明瞭で正確なサウンドの再現が非常に重要なオーディオシステムにおいて、低 THD マルチプレクサは、リスニング体験に悪影響を及ぼす可能性のある歪みを生じさせず、信号の完全性を確実に維持します。これは、わずかな歪みでも目立つハイファイオーディオ機器や専門的なオーディオ設定で特に重要です。図 5-1 に、0.001% THD +N と $1\text{m}\Omega R_{\text{ON}}$ 平坦度を備えた TMUX4827 をオーディオシステムで使用して、内蔵スピーカーと外部スピーカー、または異なるオーディオソースを切り替える方法を示します。

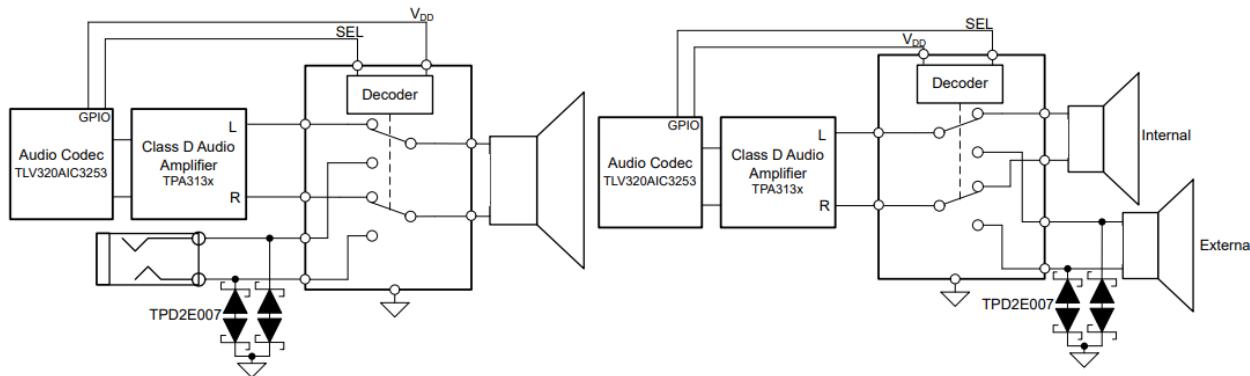


Figure 8-1. Audio Amplifier Switching

図 5-1. オーディオアンプ切り替えに低 THD マルチプレクサを使用

特に ADC や DAC を使用してテストや測定を行う場合、アナログ・デジタル間での変換プロセスの精度を維持し、正確な分析と診断のための高精度の信号表現を確保するために、低 THD マルチプレクサが必要です。さらに、PGA フィードバックループで使用されるマルチプレクサは、ノイズの増幅を最小限に抑えるために高い信号対ノイズ比 (SNR) を維持する低 THD が必要です。図 5-2 に、TMUX7612 を使用して PGA のフィードバック抵抗を切り替え、入力信号の増幅を変更する方法を示します。

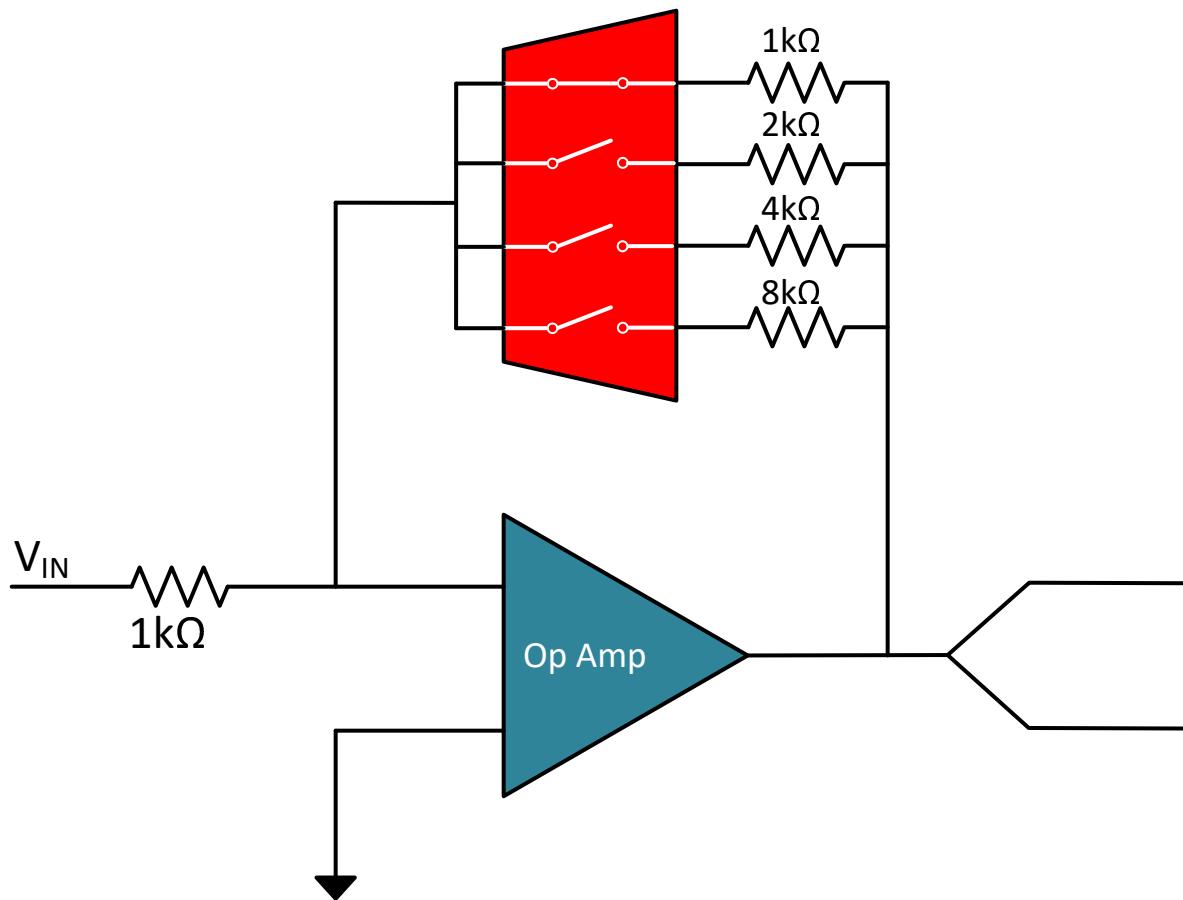


図 5-2. ゲイン増幅を変化させるために、PGA フィードバックループで使用される TMUX7612

同様に、生体医療アプリケーションでは、生理学的信号の歪みを最小限に抑えてキャプチャおよび分析するために、低 THD が重要です。心拍(ECG)、脳(EEG)、筋肉活動(EMG)のいずれを検出する場合でも、これらの敏感な測定のわずかな歪みであっても、不正確な診断や研究成果の低下につながる可能性があります。低 THD マルチプレクサは、生体医療用データの品質と信頼性を維持するために不可欠な要素です。マルチプレクサを使用して、ECG 設定で複数のセンサーを切り替えることができます。低 THD の性能により、生体医療用信号を正確に検出できます。

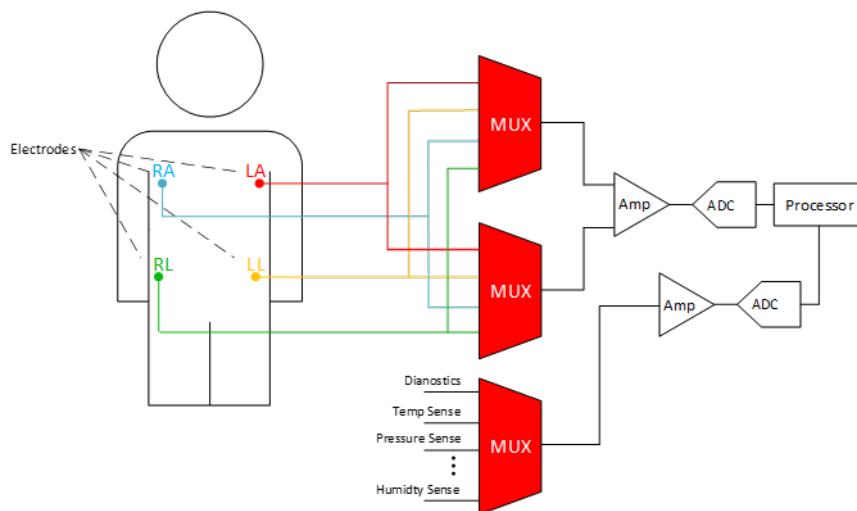


図 5-3. ECG 信号の多重化には、信号精度を維持するために低 THD マルチプレクサが必要です

6 低 THD マルチプレクサデバイスの推奨事項

表 6-1. 低 THD アナログマルチプレクサの推奨事項

デバイス	構成	I/O 電圧(最大)	電源電圧	R _{on} (typ)	R _{on} 平坦性	THD
TMUX4827	2:1、2 チャネル	-12V ~ +12V	1.8V ~ 5.5V	0.13Ω	0.001Ω	0.0006%
TMUX2889	2:1、2 チャネル	-5.5V ~ +5.5V	1.8V ~ 5.5V	0.15Ω	0.001Ω	0.0006%
TS5A12301E	2:1、1 チャネル	0V ~ 5.5V	2.25V ~ 5.5V	0.5Ω	0.1Ω	0.003%
TS5A3159	2:1、1 チャネル	1.65V ~ 5.5V	1.65V ~ 5.5V	0.75Ω	0.15Ω	0.01%
TS5A22364	2:1、2 チャネル	-3.2V ~ 5.5V	2.3V ~ 5.5V	0.65Ω	0.18Ω	0.01%
TS5A22362	2:1、2 チャネル	-3.2V ~ 5.5V	2.3V ~ 5.5V	0.65Ω	0.18Ω	0.01%
TS5USBA224	2:1、2 チャネル	-2.2V ~ 3.3V	3.3V	4Ω	1.5Ω	0.05%
TMUX7612	1:1、4 チャネル	4.5V (±4.5V) ~ 50V (±25V)	4.5V (±4.5V) ~ 50V (±25V)	1Ω	0.0003Ω	0.0006%
TMUXS7614D	1:1、8 チャネル	4.5V (±4.5V) ~ 50V (±25V)	4.5V (±4.5V) ~ 50V (±25V)	1Ω	0.0003Ω	0.0006%
TMUX5412	1:1、4 チャネル	4.5V (±4.5V) ~ 50V (±25V)	4.5V (±4.5V) ~ 50V (±25V)	21Ω	0.005Ω	0.001%

7 まとめ

全高調波歪(**THD**)と **THD + N** は、特にオーディオシステムと高精度アナログシステムにおいて、信号忠実度を向上するための重要な指標です。マルチプレクサは、オン抵抗特性に応じて歪みが発生する可能性があり、特定の動作領域で性能が最適化されています。測定設定、 R_{ON} 曲線、実際のアプリケーション事例を検討することで、設計者は **THD** 性能を考慮するタイミングと、その影響を最小限に抑える方法をより深く理解することができます。

8 参考資料

1. Texas Instruments、[TMUX4827](#)、製品フォルダ
2. Texas Instruments、[TMUX2889](#)、製品フォルダ
3. Texas Instruments、[TS5A12301E](#)、製品フォルダ
4. Texas Instruments、[TS5A3159](#)、製品フォルダ
5. Texas Instruments、[TS5A22364](#)、製品フォルダ
6. Texas Instruments、[TS5A22362](#)、製品フォルダ
7. Texas Instruments、[TS5USBA224](#)、製品フォルダ
8. Texas Instruments、[TMUX7612](#)、製品フォルダ
9. Texas Instruments、[TMUXS7614D](#)、製品フォルダ
10. Texas Instruments、[TMUX5412](#)、製品フォルダ

重要なお知らせと免責事項

テキサス・インスツルメンツは、技術データと信頼性データ(データシートを含みます)、設計リソース(リファレンス デザインを含みます)、アプリケーションや設計に関する各種アドバイス、Web ツール、安全性情報、その他のリソースを、欠陥が存在する可能性のある「現状のまま」提供しており、商品性および特定目的に対する適合性の默示保証、第三者の知的財産権の非侵害保証を含むいかなる保証も、明示的または默示的にかかわらず拒否します。

これらのリソースは、テキサス・インスツルメンツ製品を使用する設計の経験を積んだ開発者への提供を意図したものです。(1) お客様のアプリケーションに適したテキサス・インスツルメンツ製品の選定、(2) お客様のアプリケーションの設計、検証、試験、(3) お客様のアプリケーションに該当する各種規格や、その他のあらゆる安全性、セキュリティ、規制、または他の要件への確実な適合に関する責任を、お客様のみが単独で負うものとします。

上記の各種リソースは、予告なく変更される可能性があります。これらのリソースは、リソースで説明されているテキサス・インスツルメンツ製品を使用するアプリケーションの開発の目的でのみ、テキサス・インスツルメンツはその使用をお客様に許諾します。これらのリソースに関して、他の目的で複製することや掲載することは禁止されています。テキサス・インスツルメンツや第三者の知的財産権のライセンスが付与されている訳ではありません。お客様は、これらのリソースを自身で使用した結果発生するあらゆる申し立て、損害、費用、損失、責任について、テキサス・インスツルメンツおよびその代理人を完全に補償するものとし、テキサス・インスツルメンツは一切の責任を拒否します。

テキサス・インスツルメンツの製品は、[テキサス・インスツルメンツの販売条件](#)、または ti.com やかかるテキサス・インスツルメンツ製品の関連資料などのいずれかを通じて提供する適用可能な条項の下で提供されています。テキサス・インスツルメンツがこれらのリソースを提供することは、適用されるテキサス・インスツルメンツの保証または他の保証の放棄の拡大や変更を意味するものではありません。

お客様がいかなる追加条項または代替条項を提案した場合でも、テキサス・インスツルメンツはそれらに異議を唱え、拒否します。

郵送先住所: Texas Instruments, Post Office Box 655303, Dallas, Texas 75265

Copyright © 2025, Texas Instruments Incorporated

重要なお知らせと免責事項

TI は、技術データと信頼性データ (データシートを含みます)、設計リソース (リファレンス デザインを含みます)、アプリケーションや設計に関する各種アドバイス、Web ツール、安全性情報、その他のリソースを、欠陥が存在する可能性のある「現状のまま」提供しており、商品性および特定目的に対する適合性の默示保証、第三者の知的財産権の非侵害保証を含むいかなる保証も、明示的または默示的にかかわらず拒否します。

これらのリソースは、TI 製品を使用する設計の経験を積んだ開発者への提供を意図したもので、(1) お客様のアプリケーションに適した TI 製品の選定、(2) お客様のアプリケーションの設計、検証、試験、(3) お客様のアプリケーションに該当する各種規格や、他のあらゆる安全性、セキュリティ、規制、または他の要件への確実な適合に関する責任を、お客様のみが単独で負うものとします。

上記の各種リソースは、予告なく変更される可能性があります。これらのリソースは、リソースで説明されている TI 製品を使用するアプリケーションの開発の目的でのみ、TI はその使用をお客様に許諾します。これらのリソースに関して、他の目的で複製することや掲載することは禁止されています。TI や第三者の知的財産権のライセンスが付与されている訳ではありません。お客様は、これらのリソースを自身で使用した結果発生するあらゆる申し立て、損害、費用、損失、責任について、TI およびその代理人を完全に補償するものとし、TI は一切の責任を拒否します。

TI の製品は、[TI の販売条件](#)、[TI の総合的な品質ガイドライン](#)、[ti.com](#) または TI 製品などに関連して提供される他の適用条件に従い提供されます。TI がこれらのリソースを提供することは、適用される TI の保証または他の保証の放棄の拡大や変更を意味するものではありません。TI がカスタム、またはカスタマー仕様として明示的に指定していない限り、TI の製品は標準的なカタログに掲載される汎用機器です。

お客様がいかなる追加条項または代替条項を提案する場合も、TI はそれらに異議を唱え、拒否します。

Copyright © 2025, Texas Instruments Incorporated

最終更新日：2025 年 10 月