

*Application Note*

## 一部の容量結合電流センスアンプのエイリアシングとその防止



Guang Zhou

## 概要

多くの電流センスアンプ(CSA)は、チョッパアンプアーキテクチャに基づいています。静電容量結合型の電流センスアンプ(CCCSA)は、製品ラインアップに最近追加された製品です。CCCSAは、静止電流と入力バイアス電流の両方を最小限に抑える必要がある低消費電力アプリケーションを実現します。CCCSAはチョッピングと自動ゼロアルゴリズムを採用しています。このようなシステムでは、高周波の差動信号が信号帯域に折り返すことでオフセット電圧が増加するエイリアシングが発生する可能性があります。エイリアシングはローパスフィルタリングで低減できます。

## 目次

1はじめに.....	2
2チョッピング方式の電流センスアンプ.....	3
3CCCSAでのエイリアシング.....	3
4入力フィルタリング.....	5
5まとめ.....	6
6参考資料.....	6

## 図の一覧

図1-1. チョッパアンプの信号路.....	2
図1-2. 入力信号のチョッピング動作.....	2
図1-3. 入力オフセットのチョッピング動作.....	2
図2-1. CCCSAの入力段.....	3
図3-1. 800kHzの正弦波入力でのINA190の出力.....	4
図3-2. 790kHzの正弦波入力でのINA190の出力.....	4
図4-1. アンチエイリアシング用のローパスフィルタ.....	5
図4-2. ユニット2の入力フィルタリング.....	6

## 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

チョッピング技術を使用すると、DC およびドリフト性能を向上できます。その結果、入力オフセットに関連するパラメータが強化されます。変調とフィルタリングのプロセスでは、低周波ノイズも除去されます。チョッピング手法に基づく CSA では、 $V_{os}$ 、同相信号除去比、電源電圧変動除去比などのパラメータが優れていると期待されます。

チョッパアンプは通常、2 つの並列信号路（高ゲイン、低帯域幅のパス、および低ゲインの高速パス）で構成されます。[図 1-1](#) に、チョッピングアンプの簡略化されたブロック図を示します。上部の低帯域幅パスでチョッピングは行われ、下部の高速パスはフィードスルーで、高周波においてアンプのゲインロールオフを成形します。低周波では、低帯域幅のパスの影響が強くなり、必要な DC 精度が得られます。

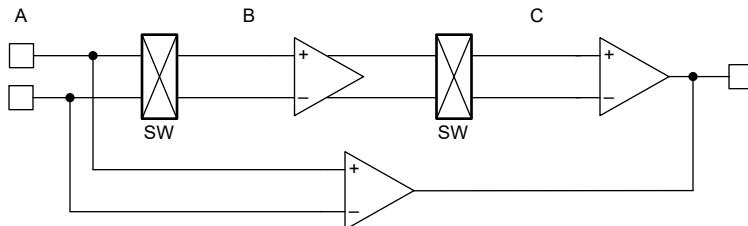


図 1-1. チョッパ アンプの信号路

マルチステージアンプの場合、入力オフセットは入力段のオフセットの影響を強く受けます。チョッピングアンプは信号路に 2 対の同期スイッチを採用することでオフセットを低減します。

周波数ドメインでの、入力信号の動作原理を [図 1-2](#) に示します。入力信号がチョッピング動作に入った時の A、B、C 位置のスペクトルがプロットで示されます。最初のスイッチは、入力信号をチョッピング周波数とその奇数次高調波に変調します。出力の 2 番目のスイッチは入力信号を再構成し、出力段に渡します。

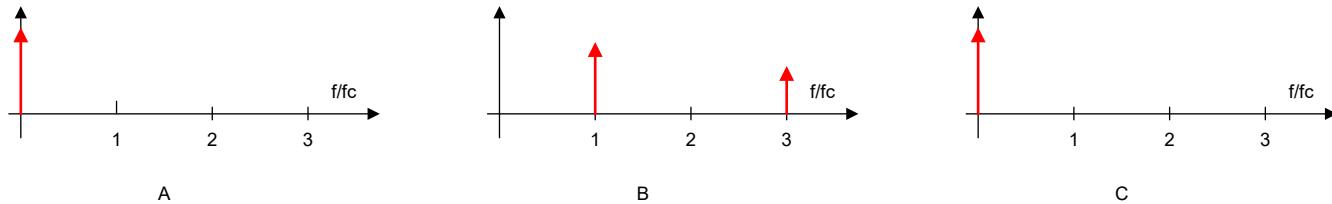


図 1-2. 入力信号のチョッピング動作

入力アンプのオフセット電圧は、再構成スイッチによって高周波に変調され、後続のローパスフィルタ（表示されていません）で取り除かれます。入力信号の場合とは対照的に、入力オフセットのチョッピング動作を、[図 1-3](#) に示します。オフセット電圧と  $1/f$  ノイズは効果的に除去されるので、チョッピングによって優れた DC 精度を実現できる可能性があります。

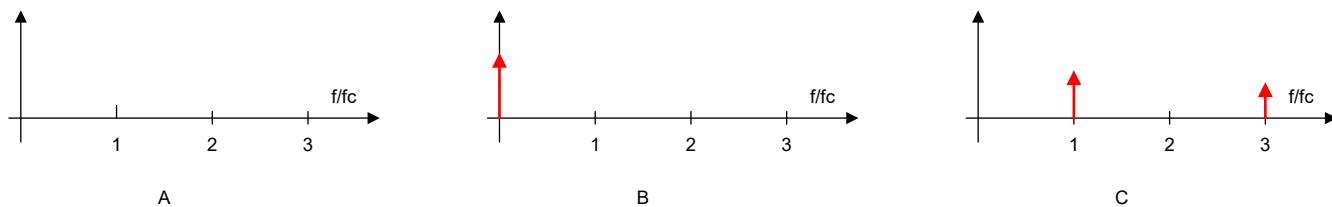


図 1-3. 入力オフセットのチョッピング動作

## 2 チョッピング方式の電流センス アンプ

チョッパベースの CSA は、チョッパ安定化オペアンプの周囲に高精度抵抗ゲイン回路を接続することで構成されます。CSA の独自要件の 1 つは、同相範囲が電源電圧を超える必要があることです。これを実現するために、入力同相電圧と電源電圧をデカップリングします。高い同相モードで、入力段は、同相電圧源、または CSA によって監視されるバス電圧源から電力が供給されます。その結果、CSA の電源がオフの場合でも、バス電圧源から供給する必要がある入力バイアス電流が増加します。

通常、有限な量の電流消費は問題になりません。ただし、低消費電力のアプリケーションや、断続的な監視のみが必要なアプリケーションの場合、電流消費ができる限り低減することが要件の 1 つです。

CCCSA の主な目標は、チョッピングアンプの利点を維持しながら入力バイアス電流を低減することです。[図 2-1](#) に、CCCSA の入力段を示します。V<sub>bus</sub> と CCCSA の入力の間に DC パスがないため、DC 入力バイアス電流は 0 です。このようなデバイスは、低消費電力のアプリケーションで電流検出要件を満たす実現可能なオプションになります。

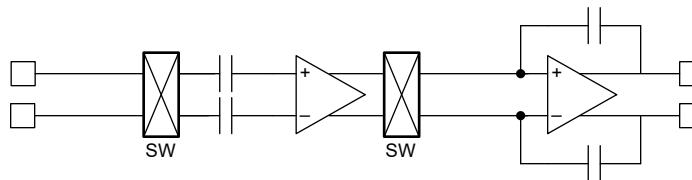


図 2-1. CCCSA の入力段

従来型の CSA の場合、入力バイアス電流（入力 + と入力 - の両方の合計）は最大  $100\mu\text{A}$  になります。同じ条件では、CCCSA の入力バイアス電流は数  $\text{nA}$  程度です。入力バイアス電流が非常に低いため、低消費電力アプリケーションが可能になるだけでなく、システム精度の劣化を引き起こさずに、便利な入力ローパスフィルタリングが可能になります。

## 3 CCCSA でのエイリアシング

理論的には、チョッピングアンプは連続時間方式で動作します。入力と出力は常に接続されているため、エイリアシングは発生しません。実際には、設計上の制約はこれらの仮定に物理的な制限を課しています。適切な設計手法により、エイリアシングのリスクを最小限に抑えることができます。ただし、シリコン検証フェーズでは、依然としてエイリアシングがチェックされます。この目的に、時間ドメイン解析とスペクトル解析が使用できます。

CCCSA では、抵抗ゲイン回路がコンデンサに置き換えられています。電力と精度を最適化するため、CCCSA ではチョッピングと自動ゼロの組み合わせを利用しています。ゼロに設定されている間、入力は実質的に出力から切断されます。このサンプル / ホールド動作により、ナイキスト定理に従って入力信号周波数がチョッピング周波数の半分よりも高いとき、エイリアシングが発生する可能性があります。

良いアプリケーション例は、平均出力電流を測定するスイッチング電源です。エイリアシングが発生した場合、高周波のスイッチングリップルが信号帯域に折り返す可能性があります。その結果、出力は通常、オフセットの上昇、または低周波の発振を示します。出力波形に対して FFT を実行すると、不要なトーンも明らかになります。

デモのため、この実験では 2 個の INA190 を横に並べてテストしました。どちらのユニットも、スイッチングレギュレータの出力をシミュレートするために、DC 入力に乗せて同じ  $20\text{mVpp}$ 、 $800\text{kHz}$  の正弦波形で駆動しています。

2 個のユニットの応答を、[図 3-1](#) に示します。上半分は時間ドメインの応答（黄：ユニット 1、緑：ユニット 2）、下半分は周波数ドメインの応答（橙：ユニット 1、紫：ユニット 2）を示しています。

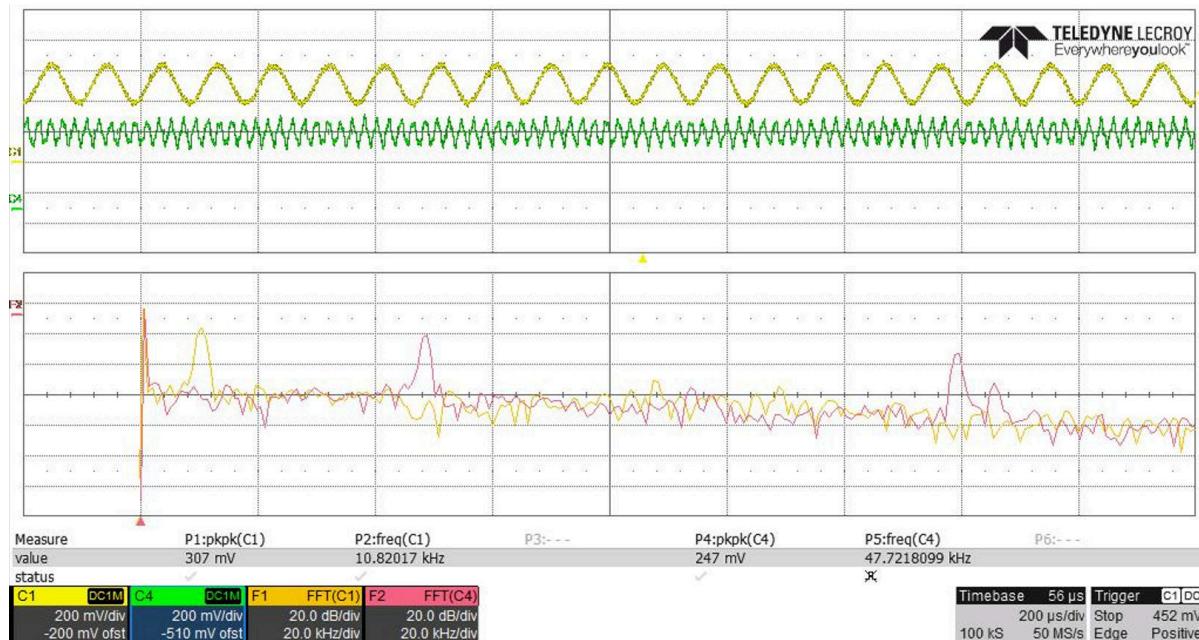


図 3-1. 800kHz の正弦波入力での INA190 の出力

高調波の周波数は、チョッピング周波数と入力信号周波数の両方の関数です。高調波は、チョッピング周波数とその倍数の周囲に対称的に出現します。この特性から、チョッピング周波数を推定できます。デバイスのバラツキにより、高調波の周波数はそれに応じて変化します。このため、入力が同じでもユニット 1 とユニット 2 の応答は大きく異なります。このようなバラツキを考慮すると、温度ドリフトをいつ考慮するかを見積もることが難しくなります。

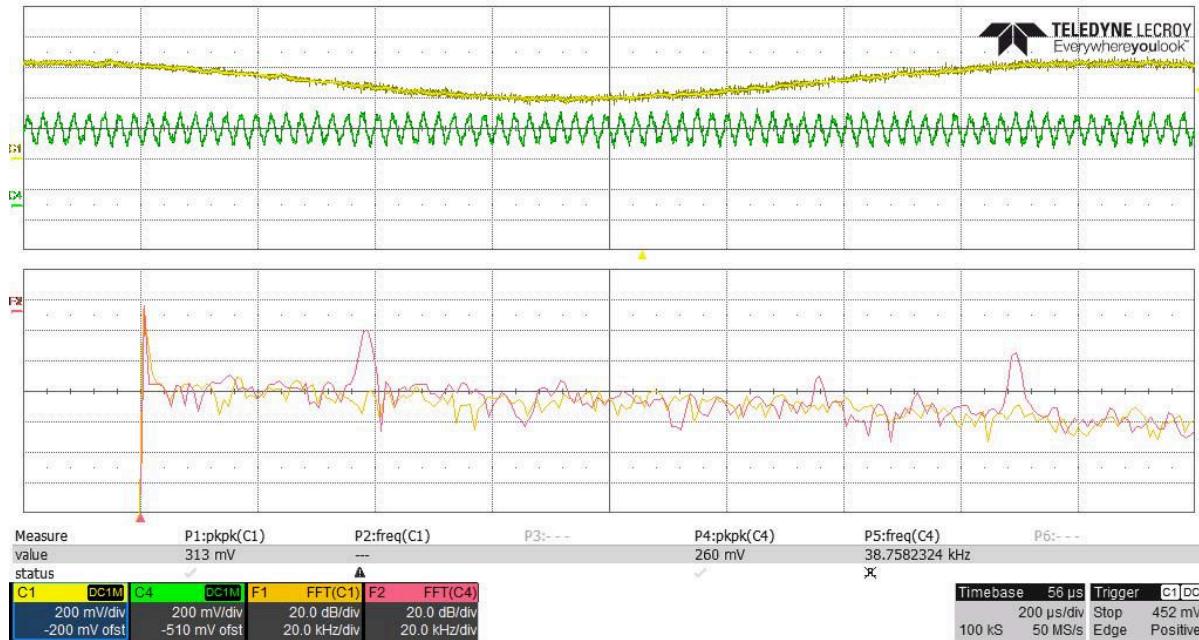


図 3-2. 790kHz の正弦波入力での INA190 の出力

図 3-2 に同じセットアップを示しますが、唯一の違いは、入力信号周波数を 790kHz に下げたことです。トーンは 10kHz ずつシフトしました。ユニット 1 では、シフトにより DC 出力が増加しました。このような増加は真の DC 出力と区別できません。

## 4 入力フィルタリング

出力フィルタは、変調されたトーンと目的の信号の間に十分な周波数間隔がある場合、効果的になります。それ以外の場合、出力フィルタはありません。

デバイスのバラツキ、入力信号の変動、温度効果などの要因のために、変調されたトーンがいかなる周波数にも現れると仮定しても良いでしょう。このため、入力フィルタを採用することで、エイリアシングのリスクを最小限に抑えることができます。図 4-1 に、INA190 データシートで推奨されているような、アンチ エイリアシング用のローパスフィルタを示します。このフィルタは、2 つの抵抗  $R_F$  と 1 つのコンデンサ  $C_F$  で実装されています。アプリケーションで必要な場合は、このフィルタリング方式を INA186 と INA191 に採用できます。これらのデバイスは、同じ容量結合チョッピング アーキテクチャに基づいています。

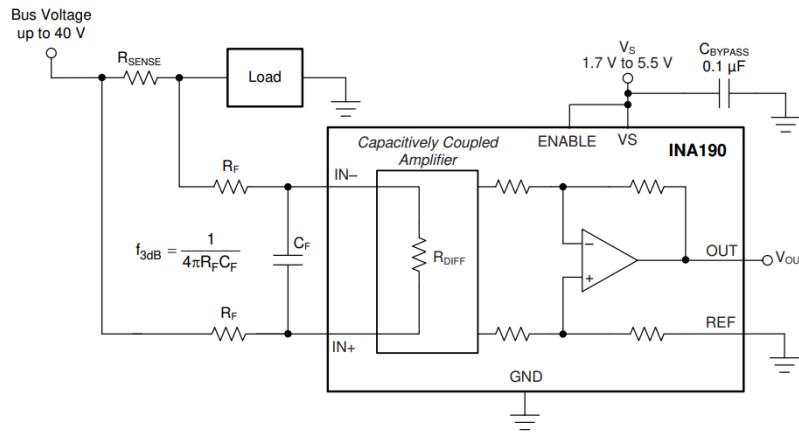


図 4-1. アンチ エイリアシング用のローパスフィルタ

図 4-2 に、このような入力フィルタの影響を示します。この実験では、ユニット 2 の入力にのみ、 $R_F = 100\Omega$  と  $C_F = 0.1\mu F$  のフィルタを追加しています。

フィルタのコーナー周波数は約 8kHz であり、800kHz の入力ノイズに対して十分な減衰量を実現しています。一般的に、コーナー周波数は、測定速度要件で許容される最も低いものとして選択されます。また、ナイキスト定理によると、コーナー周波数はチョッピング周波数の半分未満にする必要があります。INA190 とそのファミリーの場合、規定の信号帯域幅はチョッピング周波数より大幅に低くなっています。

図 4-2 に示すように、アンチ エイリアシング フィルタを設置した場合、ユニット 2 の出力は非常にきれいになります。FFT により、高調波が効果的に除去されていることが確認できます。

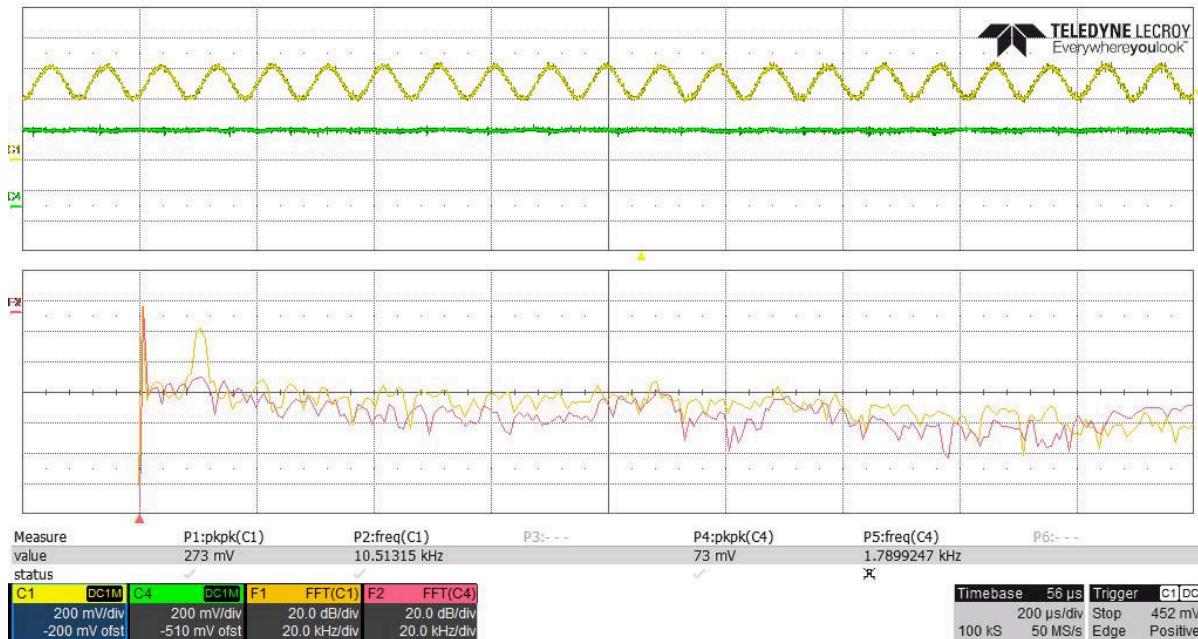


図 4-2. ユニット 2 の入力フィルタリング

デジタル電力モニタは、同じ静電容量結合チョッピング手法を使用する場合には、同様のエイリアシング効果が生じる可能性があります。同等のアナログ出力と同様に、この現象にはオフセットの上昇、またはランダムノイズらしくないゆっくり変化するオフセットが含まれます。同じ入力フィルタリング方式をアンチエイリアシングの目的で採用できます。たとえば、INA236 のデータシートには、入力フィルタリング専用のセクションがあります。エイリアシング効果は本質的なデバイスのノイズとは区別され、入力フィルタリングに影響されることを追記しておきます。

## 5 まとめ

静電容量結合型電流センスアンプは、チョッピングアンプとスイッチトコンデンサ回路の利点を組み合わせ、高性能と低消費電力を実現します。ただし、このようなCCCSAは、特に信号路にサンプル／ホールドアルゴリズムが関与している場合、エイリアシングの影響を受けやすくなります。このようなデバイスをノイズの多い環境で使用する場合、アンチエイリアシング用に入力ローパスフィルタを推奨します。ローパスフィルタ内の抵抗はかなり大きくすることができるため、入力フィルタの設計を柔軟に行えます。コーナー周波数は、実効ノイズ減衰のため、デバイスの3dB帯域幅以下に設定できます。

## 6 参考資料

- テキサスインスツルメンツ [INA190 双方向、低消費電力、ゼロドリフト、広いダイナミックレンジ、高精度の電流センスアンプ、イネーブル付き](#)、データシート。
- テキサスインスツルメンツ [INA236 48V、16ビット、超高精度、電流・電圧・電力モニタ、I<sup>2</sup>C インターフェイス搭載](#)、データシート。
- R. Burt および J. Zhang、『A Micropower Chopper-Stabilized Operational Amplifier Using a SC Notch Filter With Synchronous Integration Inside the Continuous-Time Signal Path』、IEEE Journal of Solid-State Circuits、Vol.41、No.12、2006年12月。

## 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、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 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