

Application Note

TI の車載スマート eFuse を使用した、低い出力電流での高精度電流センシング



Patrick Shalton

概要

テキサス インストルメンツ (TI) の車載用スマート eFuse、TPS2HCS08-Q1 などは非常に高い電流センス精度を備えており、高精度の I2T 保護、負荷診断、電力計算が可能です。ただし、電流検出の精度は負荷電流に比例して低下するため、ピーク電流検出精度が高いことだけでは負荷状態を区別するのに十分ではありません。たとえば、負荷回路が意図的にシャットオフされた場合対開放負荷フォルトによって負荷が切断された場合などです。低電流時の診断性能を強化するため、車載スマート eFuse デバイスは、オープン負荷スケーリングや ADC スケーリングなど、より低電流時の電流センスの精度を向上させる多数の機能を備えています。このアプリケーション ノートでは、これらの特長を紹介し、リファレンスに加え、テスト方法と、設計での使用方法を示す結果を掲載しています。

目次

1 はじめに.....	2
2 ハイサイド スイッチ電流センスと開放負荷検出.....	3
2.1 ハイサイド スイッチでの電流センス.....	3
2.2 ハイサイド スイッチの開放負荷検出.....	4
3 スマート eFuse 電流センスと開放負荷検出.....	5
3.1 eFuses における開放負荷検出.....	5
3.2 開放負荷電流検出のスケーリング.....	5
3.3 ADC 入力スケーリング.....	5
3.4 OL_ON と ADC 入力スケーリングのプログラミング手順.....	5
4 通常とオープン負荷スケーリングのテスト結果.....	7
5 設計上の考慮事項.....	8
6 まとめ.....	8
7 参考資料.....	8

図の一覧

図 1-1. ゾーン コントローラ アーキテクチャ.....	2
図 2-1. ハイサイド スイッチ電流センス アーキテクチャ.....	3
図 2-2. ハイサイド スイッチの開放負荷オフ検出アーキテクチャ.....	4
図 2-3. ハイサイド スイッチ電流検出範囲の分類.....	4
図 3-1. OL_ON イネーブル フローチャート.....	6

表の一覧

表 4-1. 電流センス ADC コード.....	7
表 4-2. 電流センス出力.....	7
表 4-3. 電流センスの精度.....	7

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

近年、性能、電力効率、高度な安全機能に対する需要の高まりにより、洗練された電子機器が現代の車両に搭載されるようになりました。この変化のうち重要な要素は、ゾーンコントローラの登場です。ゾーンコントローラは、自動車の電気システムをより小規模な領域やゾーンにセグメント化し、パワー ディストリビューションと消費電力に関するより精密な制御を実現するのに役立ちます。しかし、このように複雑さが増しているため、特に診断や故障検出の技術的課題も生まれています。

これらの要件に対応するため、車載用システムは、従来の機械式ヒューズ ボックスから、I2T 保護などの優れた配線およびシステム安全性方式を採用した eFuse を搭載したパワー ディストリビューション ボードへと切り替えつつあります。

eFuse の多様な拡張診断機能を使用することで、ゾーン コントローラまたはその他のサブシステム間の診断とフォルト状態が簡単になります。この例の一例は、シャットダウン モードのゾーン コントローラと実際の開放負荷フォルト状態を区別し、サービス技術者にとってより正確な診断出力や迅速なトラブル シューティングを可能にすることです。

代表的な高レベルゾーン コントローラ アーキテクチャを 図 1-1 に示します。この場合、パワー ディストリビューション 基板上の eFuse が各ゾーン コントローラに直接電力を供給します。

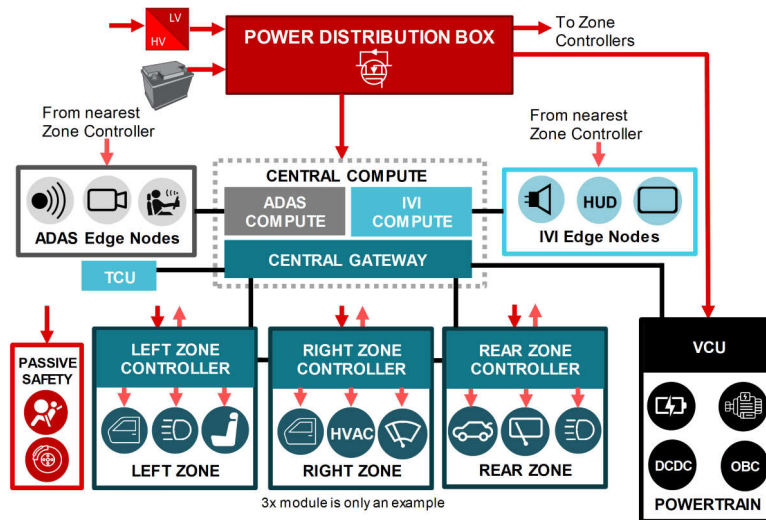


図 1-1. ゾーン コントローラ アーキテクチャ

2 ハイサイドスイッチ電流センスと開放負荷検出

2.1 ハイサイドスイッチでの電流センス

負荷を駆動する際、特に各種の負荷タイプを下流に接続または有効にしている可能性のある負荷を駆動する際には、負荷電流の大きさに関するリアルタイム診断フィードバックを持つことが役に立ちます。ディスクリートシステムで使用される外部電流センシングの実装には、価格、消費電流、基板面積の点でコストがかかります。TI のハイサイドスイッチは、専用の電流センス出力を搭載してこの機能を統合しています。この出力は、負荷電流をスケール化し、外部抵抗の両端間をアナログ電圧として読み取ることができます。TI のハイサイドスイッチと高精度の電流検出の詳細については、『スマートハイサイドスイッチの高精度電流センシング』アプリケーション ノートを参照してください。

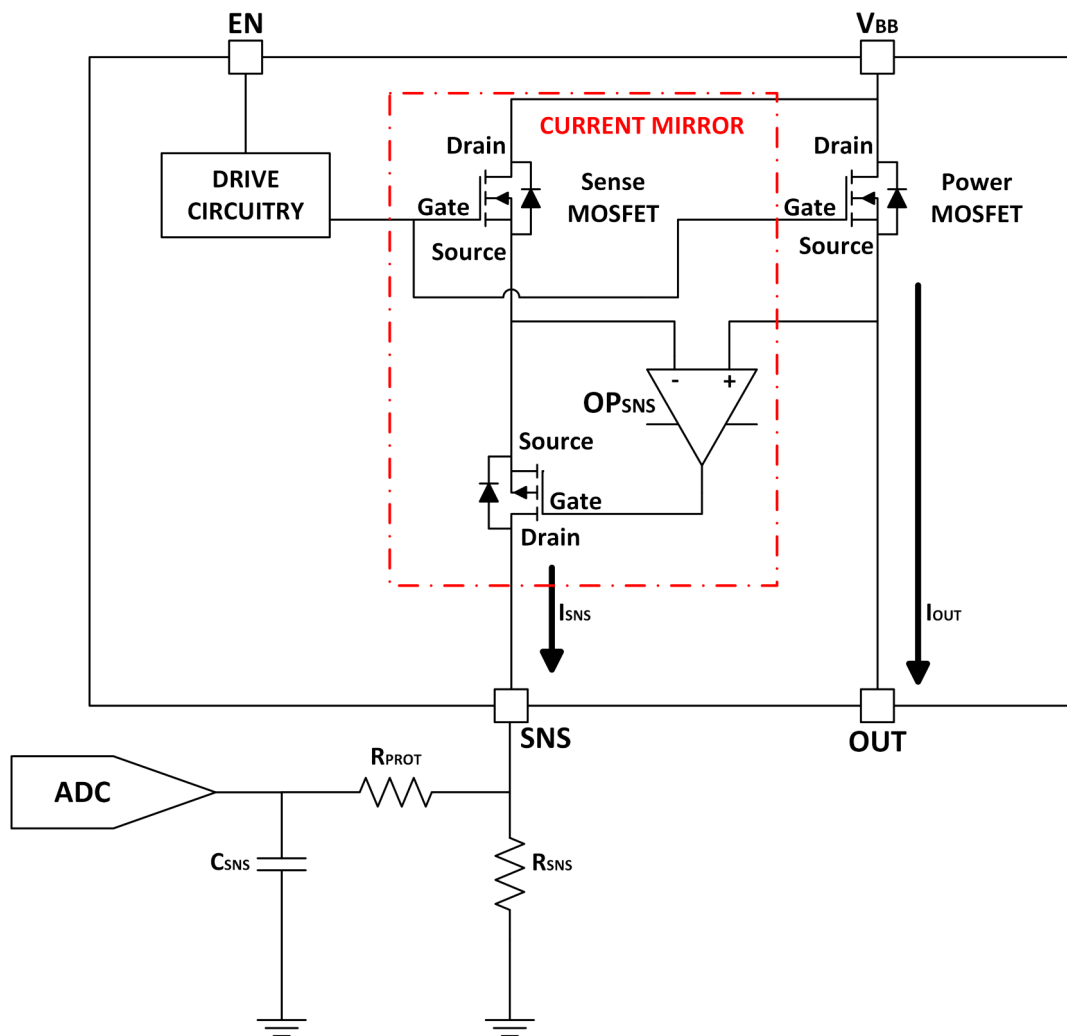


図 2-1. ハイサイドスイッチ電流センス アーキテクチャ

TI のスマート eFuse はこの機能をさらに 1 歩進めたもので、統合型 ADC を活用して、シリアル ペリフェラル インターフェイス (SPI) を使用して電流の診断情報を読み取ることができ、入出力電圧、FET 接合部温度とともに使用できます。この追加の統合により、外付けのマイクロコントローラ (MCU) やディスクリート ADC が不要になり、高精度かつ低消費電力の I2T 保護を実現できるため、システムのコストと複雑さを大幅に低減できます。

2.2 ハイサイド スイッチの開放負荷検出

設計者が有用であるもう 1 つの機能は、ハイサイド スイッチ出力での開放負荷や断線を検出できることです。デバイスが無効になっているときにこれを行うのは簡単です。VBB から VOUT への弱いプルアップを配置し、内蔵コンパレータを使用してプルアップ上の電圧降下を測定します。この電圧降下が 2V 未満 (すなわち、 $V_{BB} - V_{OUT} < 2V$) の場合、デバイスは開放負荷フォルトが発生していると判断します。TI のすべてのハイサイド スイッチと eFuse は、上記の方式を使用した開放負荷検出機能を内蔵しています。

ただし、デバイスがイネーブルのときに開放負荷を測定しようとする、この作業はより困難になります。デバイスがイネーブルのとき、VOUT は常に VBB の近くにある必要があるため、オフ状態の開放負荷検出と同じ回路を使用することはできません。代わりに、負荷電流を測定でき、これが特定のスレッショルドを下回ると、デバイスは開放負荷フォルトを通知できます。TI のハイサイド スイッチを使用する場合、この方法が採用されていますが、ここでは 2 つの問題が発生します。第 1 に、開放負荷とみなされる電流はアプリケーションによって決定されます。代表的なアプリケーションでは、公称負荷電流は 1A より大きく、 $< 20mA$ の出力電流は開放負荷と見なされます。ただし、公称負荷電流が 20mA 未満の場合、デバイスは常に開放負荷フォルトを報告しており、許容できません。第 2 に、低電流を正確に測定することは、FET のオン抵抗が減少するにつれて、指数関数的に困難になります。したがって、デバイスがイネーブルのときに開放負荷検出の場合、電流センス機能を使用して、設計者は開放負荷電流スレッショルドを決定し、デバイスの電流センスフィードバックに応じてフォルトを認識できます。

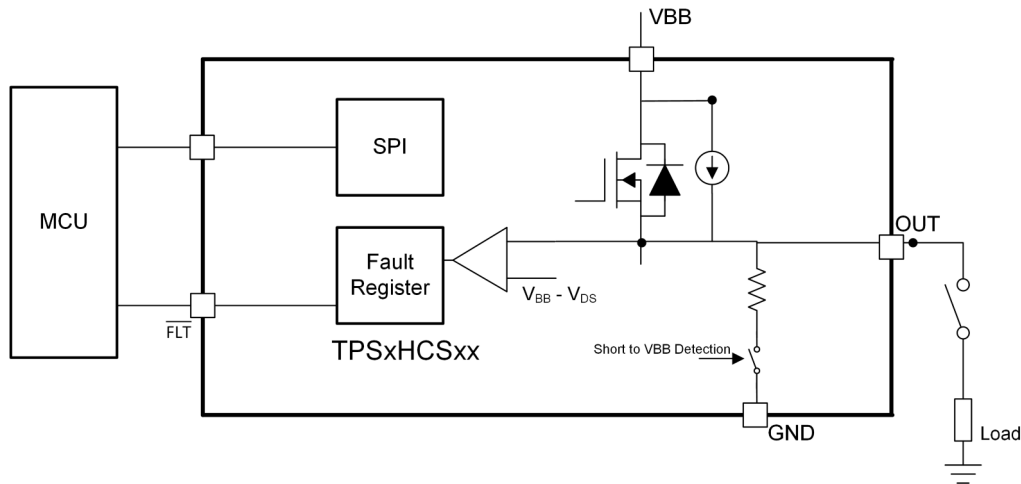


図 2-2. ハイサイド スイッチの開放負荷オフ検出アーキテクチャ

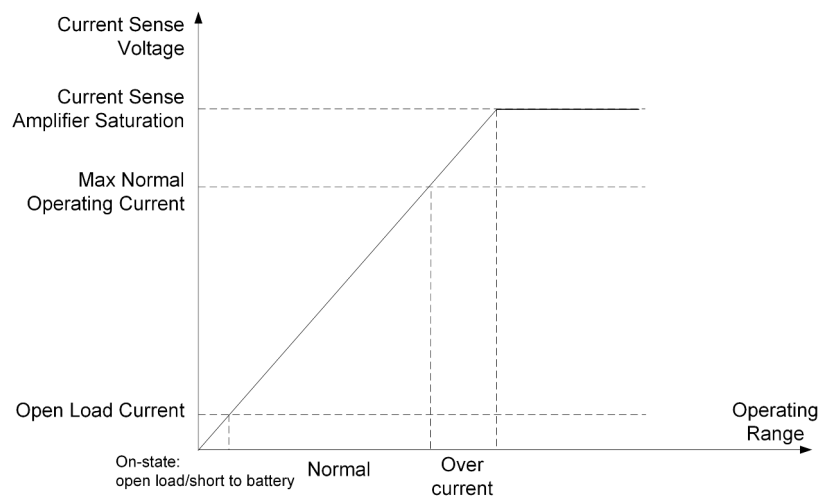


図 2-3. ハイサイド スイッチ電流検出範囲の分類

3 スマート eFuse 電流センスと開放負荷検出

3.1 eFuses における開放負荷検出

単一の負荷を駆動するために標準的なハイサイド スイッチが通常使用されるのに対し、スマート eFuse は通常、ゾーンコントローラや、複数のプログラマブル負荷を含む他のシステムに電力を分配するために使用されます。この安全性の確保が重要となるタスクを前提として、スマート eFuse は開路を含め、システム内で発生する故障状態の詳細な配列を検出する必要があります。上記で示した開放負荷有効化方式は、ある程度機能します。ただし、eFuse のオン抵抗は非常に低く、モジュールがディスエーブル時の消費電力が最小限であるため、ゾーンコントローラがディスエーブルされているかどうかと真の開放負荷フォルトが発生しているかどうかを区別するのは困難な場合があります。この状況に対処するために、TI のスマート eFuse は低電流動作状態を区別するために、開放負荷電流センスのスケールリングと ADC 入力スケールリングという 2 つの柔軟性を導入します。

3.2 開放負荷電流検出のスケールリング

たとえば、TPS2HCS08-Q1 のデフォルトの電流検出のスケールリング係数は $K_{SNS} = 5000A/A$ です。すなわち、 $I_{SNS} = I_{OUT}/5000$ です。負荷電流が 10A を超える場合、この K_{SNS1} 精度は $\pm 4\%$ で非常に優れています。しかし、負荷電流が減少するにつれて、回路の性質から精度は低下し、100mA での K_{SNS1} 精度は $\pm 18\%$ です。電流が小さい場合、この精度は指数関数的に悪化します。

低電流時の精度を向上させるために、TI スマート eFuse には OL_ON モードが実装されています。このモードでは、TPS2HCS08-Q1 を例として、 K_{SNS} 値が 5000A/A から 1400A/A (K_{SNS2}) に低下し、FET のオン抵抗が 8.7mΩ から 27mΩ に増加することで、低電流時の電流センス精度をはるかに向上できます。この場合、100mA での K_{SNS2} の精度は $\pm 10\%$ であり、電流は SPI 経由で 10mA まで確実に読み取ることができます。

3.3 ADC 入力スケールリング

また、TI の eFuse では、ADC に見られる電流センス電圧を 8 倍に増幅するオプションもあります。これにより、より高い入力電圧で動作することで ADC の精度を向上させ、 I_{SNS} 値を 8 倍にスケールリングできます。これを OL_ON モードと組み合わせることで、最大の合計電流検出精度を実現できます。

3.4 OL_ON と ADC 入力スケールリングのプログラミング手順

OL_ON モードは、それぞれの CHx_CONFIG レジスタの関連する OL_ON_EN_CHx ビットを high に設定することで有効にできます。デバイスがこのコマンドを受け入れて OL_ON モードに入るには、出力電流が $I_{ENTRY_OL_ON}$ スレッショルドを下回る必要があります。出力電流がそうでない場合、デバイスは OL_ON モードに移行せず、OL_ON_EN_CHx は low のままです。出力電流が $I_{ENTRY_OL_ON}$ を下回り、OL_ON_EN_CHx が high に設定されている場合、OL_ON_EN_CHx が low に設定されるか、または出力電流が $I_{EXIT_OL_ON}$ を超えるまで、 K_{SNS} が減少し、上記の仕様どおり FET オン抵抗が増加します。

8x ADC 入力スケールリングをイネーブルにするには、ISNS_SCALE_CHx ビットとそれぞれの CHx_CONFIG レジスタを high に設定します。ADC 入力スケールリングを有効化する他の要件はありません。

OL_ON モードおよび ADC 入力スケールリング動作中は、MCU が定期的に OL_ON_EN_CHx をチェックし、デバイスがまだ OL_ON モードであることを確認することを推奨します。それぞれのチャネル電流センスを読み出すとき、ADC_RESULT_CHx | 電流センス結果レジスタに ISNS_SCALE_EFF_CHx ビットが含まれ、電流センス結果を読み取るために使用する乗算器を MCU に通知します。このビットは、1x と 8x のどちらの ADC スケールリング係数を使用するかを直接示しています。

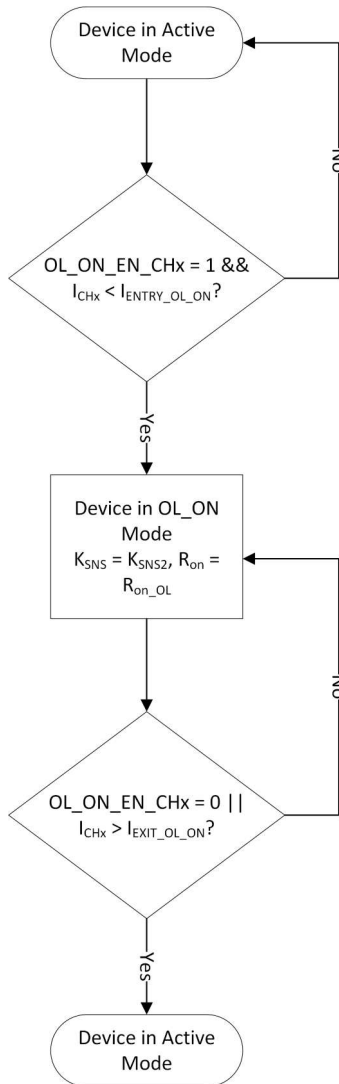


図 3-1. OL_ON イネーブル フローチャート

4 通常とオープン負荷スケージングのテスト結果

以下に、複数の出力レールと低消費電力モードを備えたゾーンコントローラなど、TPS2HCS08-Q1 が可変負荷に電力を供給するシステムの例を示します。公称のフルパワー電流検出精度を記録し、 K_{SNS2} および K_{SNS2} を 8 倍 ADC スケージングとともに使用して、デフォルトの電流検出精度と電流検出精度をそれぞれ比較します。

このテストでは、データシート — 推奨 R_{SNS} 値 698Ω を使用しています。結果の ADC コードから出力電流を計算する式は、次のとおりです。

$$I_{OUT} = [K_{SNS} * V_{ADCREFH} / [1023 * R_{SNS} * I_{SNS_SCALE}]] * ADC_RESULT \quad (\text{Equation 1}) \quad (1)$$

この場合:

K_{SNS1} の場合は $K_{SNS} = 5000$ 、 K_{SNS2} の場合は 1400

ADC スケージングがない場合、 $I_{SNS_SCALE} = 1$ 、ADC スケージングの場合は 8

$V_{ADCREFH} = 2.81V$ 標準値

$R_{SNS} = 698\Omega$

各 K_{SNS} および ADC スケージング係数が適用された、10A、100mA、10mA、0mA における電流センスの精度を、表 4-1 からまでに表 4-3 示します。表 4-1 に、ADC コード、表 4-2 計算された出力電流、表 4-3 および精度に関する結果を示します。

表 4-1. 電流センス ADC コード

	K_{SNS1}	K_{SNS2}	K_{SNS2} と ADC スケージング
10A	506	該当なし	該当なし
100mA	4	11	8E
10mA	0	1	9
0mA	0	0	6

表 4-2. 電流センス出力

	K_{SNS1}	K_{SNS2}	K_{SNS2} と ADC スケージング
10A	9.956A	該当なし	該当なし
100mA	78.8mA	93.7mA	97.8mA
10mA	0mA	0.689mA	6.2mA
0mA	0mA	0mA	4.1mA

表 4-3. 電流センスの精度

	K_{SNS1}	K_{SNS2}	K_{SNS2} と ADC スケージング
10A	0.44%	該当なし	該当なし
100mA	21.2%	6.3%	2.2%
10mA	該当なし	93.11%	38%
0mA	0%	0%	該当なし

全体として、OL_ON モードと ADC スケージングの使用が必要な 2 つの主なトレンドがあります。1 つ目は、これら 2 つの特長を使用することで、電流が小さい場合の精度が大幅に向上することです。2 つ目は 100mA 以下では、 K_{SNS1} を使用した 10 ビット ADC の分解能が 19.7mA であることです。ただし、8 倍の ADC スケージングで K_{SNS2} を使用すると、ADC の分解能は 0.688mA になるため、低電流間の差異化がはるかに小さくなります。

5 設計上の考慮事項

TI の eFuse を使用して設計する場合、特にパワー ディストリビューション システムでは、最小解析と最大解析を使用して必要な動作電流範囲を離散することで、ダウン ストリームのシステムの通常動作、シャットダウン モード、障害状態、開放負荷状態を区別できます。次に、各動作領域に対応する必要がある eFuse 電流センス スレッシュホールド、および OL_ON モードと ADC 入力スケールリングを使用するタイミングを決定します。

OL_ON モードと ADC 入力スケールリングは、それぞれのチャンネル (I2T_EN_CHx = 0) で I2T がディセーブルの場合にのみ使用することを推奨しています。これらの設定は、ADC の入力電圧を直接変更し、それぞれの I2T スレッシュホールドをそれに応じて低減するためです。

6 まとめ

自動車アーキテクチャが複雑化するにつれて、詳細な診断と保護の要求も高まり、システム ステータスに関するリアルタイム フィードバックや、制御と抽象化のより詳細なレベルが求められています。TI のスマート eFuse は、高精度でプログラム可能でスケラブルな電流センス アーキテクチャを使用した高精度の開路検出などの将来性を考慮した診断機能を提供することで、さまざまな下流負荷状態や障害モードを検出できるよう、システムを支援します。

7 参考資料

1. テキサス インスツルメンツ、『[TPS2HCS08-Q1 8.9mΩ、車載用デュアル チャンネルの SPI 制御ハイサイド スイッチ、I2T ワイヤ保護および低消費電力モード搭載](#)』、データシート
2. テキサス インスツルメンツ、『[スマートハイサイド スイッチの高精度電流検出](#)』、アプリケーション レポート

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黙示保証、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、明示的または黙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](https://www.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黙示保証、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、明示的または黙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す。(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、

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