

Application Note

バッテリー マネジメント システムにおける **BQ769x2** ファミリを用いた電流検出の設計に関する考慮事項



Kian Lin, Terry Sculley

概要

バッテリー マネジメント システム (BMS) においては、大電流検出の高精度化が重要であり、これによりバッテリーの充電状態 (SoC) の精度向上やシステム全体の信頼性向上が期待できます。この記事では、電流検出に関する設計上の考慮事項を紹介し、バッテリー モニタ デバイス BQ76972 を用いて高精度かつ高信頼な電流測定を実現する方法を解説します。

目次

1はじめに.....	2
2 BQ769x2 クーロン カウンタ電流誤差の算出.....	2
3 センス抵抗の設計に関する考慮事項.....	3
4 電流検出回路の診断.....	4
5 クーロン カウンタの蓄積された電荷測定.....	4
6 システム実装.....	5
7 まとめ.....	6
8 参考資料.....	7
9 改訂履歴.....	8

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

エネルギー貯蔵システム、掃除機、電動工具、電動自転車、電動キックボードなど、バッテリー駆動製品の需要はますます高まっています。重量制限や長時間駆動のニーズにより、バッテリー セルの化学構成は鉛蓄電池からリチウムイオン、リチウムポリマー、またはリン酸鉄リチウム (LiFePO₄) へと移行しています。ここでは、常に良好な測定精度が求められ、特にセル電圧、パック電流、セル温度は重要です。正確な保護機能とバッテリ パックの充電状態 (SoC) 計算を実現するには、高い精度が必須です。LiFePO₄ バッテリ パック アプリケーションでは電圧がフラットなため、特にこのことが当てはまります。

この記事では、リチウム系バッテリー向けの電流検出について、誤差の計算や適切なシステム構成を含めて詳しく解説します。リチウムイオン、リチウムポリマー、またはリン酸鉄リチウムセルを使用するアプリケーション向けに特化して設計された高精度バッテリー モニタおよび保護デバイスである BQ76972 を例として取り上げています。

2 BQ769x2 クーロン カウンタ電流誤差の算出

電流測定誤差は、BQ76972 のクーロン カウンタによる誤差と、センス抵抗による誤差で構成されます。この記事では、BQ769x2 のクーロン カウンタにおける電流測定範囲全体におけるワーストケース誤差の算出方法を紹介しており、個別のワーストケースのオフセット誤差、ゲイン誤差、DNL 誤差、INL 誤差を合算することで求めることができます。なお、ノイズの影響は測定結果としては考慮されていません。

「[BQ76972 3 シリーズ～16 シリーズ対応の高精度バッテリー モニタおよび保護デバイス \(Li-Ion, Li-Polymer, LiFePO₄ バッテリー パック向け\) データシート](#)」は、表 2-1 に示されています。

表 2-1. BQ76972 クーロン カウンタ仕様

パラメータ	テスト条件	最小値	標準値	最大値	単位	
V _(CC_IN)	V _{SRP} - V _{SRN}	-0.2	0.2	0.2	V	
V _(CC_IN)	V _{SRP} , V _{SRN}	-0.2	0.2	0.2	V	
V _(CC_IN_EXTENDED)	V _{SRP} - V _{SRN} は、測定値が平坦になる範囲を特定するためにスイープ測定が行われています。	-1	1	1	V	
B _(CC_INL)	積分非直線性	16 ビット、入力電圧範囲内で最適な適合を実現し、0V の共通モード電圧を使用しています。	±5.2	±22.3	LSB	
B _(CC_DNL)	微分非直線性	16 ビット、ミッシング コードなし	±0.1	±0.1	LSB	
V _(CC_OFF)	オフセット エラー	16 ビット、キャリブレーションなし	-1	1	LSB	
V _(CC_OFF_DRIFT)	オフセット誤差のドリフト	16 ビット、ポスト キャリブレーション	-0.03	0.03	LSB/°C	
B _(CC_GAIN)	ゲイン	16 ビット、入力電圧範囲に対して過剰設計されています。	130845	131454	132335	LSB/V
R _(CC_IN)	実効入力抵抗		2	2	MΩ	

一般的に、熱性能を考慮すると、±0.2V の入力範囲は完全には活用されません。例えば、連続 100A の放電電流を検出する場合、電力損失を 5W 未満に抑えるために、0.5mΩ 未満のセンス抵抗が選定されます。50mV の入力範囲に対するワーストケース誤差は、各個別誤差を ADC 分解能 (LSB) 単位で規定し、それに基づいて算出されます。総合誤差は、次の式により計算することができます。

$$\text{Error}_{\text{total}} = \text{Error}_{\text{Offset}} + \text{Error}_{\text{Gain}} + \text{Error}_{\text{DNL}} + \text{Error}_{\text{INL}} \quad (1)$$

ワーストケースのオフセット誤差を算出する際には、温度ドリフトも考慮する必要があります。この計算では、最大の温度変化として 25°C から -40°C への変動を想定しています。ワーストケースのオフセット誤差は、次の式で計算することができます。

$$\text{Error}_{\text{Offset}} = 1 + 0.03 \times (25 - (-40)) = 2.95 \text{ LSB} \quad (2)$$

ゲイン誤差とは、特定のゲイン範囲における典型的なゲイン値とワーストケースのゲイン係数との誤差を指します。50mV の入力範囲を用いた場合、ワースト ケースのゲイン誤差は次の式で算出できます。

$$\text{Error}_{\text{Gain}} = 0.05 \times (132335 - 131454) = 44.05 \text{ LSB} \quad (3)$$

データシートでは、典型値として 0.1 LSB のみが規定されています。この計算では、ワーストケースの DNL 誤差を 1 LSB と仮定しています。ワーストケースの INL 誤差は、およそ 200mV の入力電圧付近でのみ発生します。50mV の入力範囲に対しては、5.2 LSB を用いて計算が行われます。

総合誤差は、次の式により計算することができます。

$$\text{Error}_{\text{total}} = \text{Error}_{\text{Offset}} + \text{Error}_{\text{Gain}} + \text{Error}_{\text{DNL}} + \text{Error}_{\text{INL}} = 53.2 \text{ LSB} \quad (4)$$

対応する電圧として、53.2 LSB は次の値になります。

$$V_{\text{error_total}} = 53.2 \times 7.6 \mu V = 0.404 mV \quad (5)$$

最終的に、クーロン カウンタは 50mV の入力範囲において、ワーストケースで 0.81% の誤差を示します。この計算は、すべてのワーストケース誤差要因を単純に加算し、デジタル フィルタやキャリブレーションを一切行わない前提で行われています。実際のアプリケーションにおいては、この誤差がここまで大きくなる可能性は低いと考えられます。

オフセット誤差およびゲイン誤差のキャリブレーションは、「[BQ769x2 キャリブレーションおよびOTP プログラミング ガイド](#)」のキャリブレーションセクションに従うことで実施します。現実的には、キャリブレーション後の総電圧誤差は次のようになります。

$$V_{\text{error_total}} = (1.95 + 1 + 5.2) \times 7.6 \mu V = 0.062 mV \quad (6)$$

50mV の入力範囲において、デジタル フィルタを使用しない場合でも、誤差はわずか 0.12% に抑えられます。

3 センス抵抗の設計に関する考慮事項

バッテリー マネジメントシステムにおいて、シャント抵抗はその高精度、低コスト、シンプルさから、充電および放電電流の測定に一般的に使用されます。ただし、適切な設計およびキャリブレーションが行われない場合、シャント抵抗による誤差が電流測定誤差の主因となる可能性があります。

抵抗器の許容誤差および温度係数は、抵抗の精度を示す重要な仕様です。シャントの許容誤差は、室温でのキャリブレーションによって補正可能ですが、温度変化に伴うドリフト誤差は温度に依存して変化するため、補正が困難です。特に BMS アプリケーションにおいては、低電圧バッテリー パックの多くが自然空冷であるため、温度係数の小さい抵抗を使用することで電流検出精度の向上が期待できます。

熱起電力 (EMF) もゼーベック効果により精度に影響を与えます。熱起電力は、数十～数百マイクロボルトに達する可能性があり、フルスケール範囲が非常に小さい場合には許容できない誤差となります。そのため、シャント抵抗を選定する際には、温度上昇を最小限に抑えることが重要となります。

温度上昇の影響を最小限に抑えるためには、高い定格電力および低い温度係数を持つシャント抵抗を選定することが推奨されます。また、熱特性を向上させるために PCB レイアウトも慎重に設計する必要があります、電流の流れる方向によってシャントの温度係数が影響を受けないように配慮する必要があります。

この問題に対処するための別の手法として、図 3-1 に示すようにケルビン接続を採用することが必要です。差動電圧を測定するために、2 本の独立した配線が使用されます。このような構成により、配線抵抗やシャントの銅電極による温度ドリフトに起因する誤差を排除することができます。

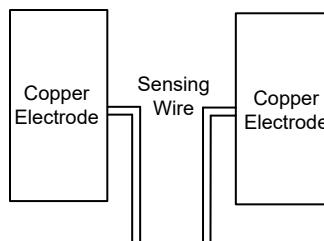


図 3-1. ケルビン接続

4 電流検出回路の診断

シャントは、フィルタ回路を介して BQ76972 の SRP および SRN ピンに直接接続されます。BQ76972 は、電流検出回路におけるオープンワイヤや短絡の異常を判別することができません。機能安全の観点から、これらの異常イベントおよび BQ76972 の電流検出機能の動作状態を診断するために、図 4-1 に示すような簡易な外付け回路が必要となります。

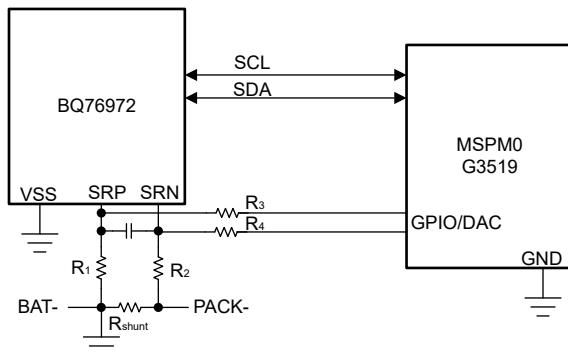


図 4-1. 電流検出回路の診断

R_3 および R_4 は、BQ76972 の SRN/SRP ピンとマイコンの GPIO または DAC の間に直列に追加されます。 R_3 と R_4 は、フィルタ抵抗である R_1 および R_2 と接地との間で分圧回路を構成します。通常動作時には、マイコンのピンは高インピーダンス状態にあり、リーク電流が十分に小さいため、通常の電流検出精度には影響を与えません。診断動作時には、マイコンがピンを High に駆動することで、SRP と SRN 間に分圧電圧を発生させることができ、BQ76972 の電流測定値を読み取ることで、SRP/SRN ピンが短絡していないこと、または VSS に接続されていないことをマイコンが判別できます。また、この手法は BQ76972 の SCD、OCC、OCD 機能の診断にも利用可能です。直列抵抗の値を調整することで、電流関連の保護アラートまたはフォルトを意図的にトリガーさせることができます。

電流測定は差動方式で行われるため、マイコンのピンからのリーク電流の影響は無視できます。 R_3 または R_4 のみを追加する場合、マイコンのピンからのリーク電流が電流検出精度に影響を与えないよう、十分に小さく保つ必要があります。クーロン カウンタの分解能は $7.6\mu V$ であるため、 R_1 または R_2 による電圧降下が LSB の誤差を引き起こさないようにするためには、リーク電流を $70nA$ 未満に抑えることが推奨されます。

5 クーロン カウンタの蓄積された電荷測定

BQ769x2 のクーロン カウンタは、シリアル通信インターフェースを介して読み出すために複数の電流値を提供しており、ハードウェア デジタル フィルタを用いた CC1 および CC2、ならびにファームウェア フィルタである CC3 が含まれます。

SOC を算出するためには、CC1 フィルタを用いて 16 ビットの電流測定値を生成することができ、NORMAL モードで動作中は 250ms ごとに出力が生成されます。CC1 の電流データは、*0x0075* の *DASTATUS5()* サブコマンドから取得可能です。

積分通過電荷は、*0x0076 DASTATUS6()* サブコマンドから 64 ビット値として取得可能で、この値には、userAh 単位で積算された電荷の上位 32 ビット、蓄積された電荷の小数部分の下位 32 ビット、および電荷が積算された時間を示す秒単位の 32 ビット積算時間が含まれます。蓄積された電荷およびタイマーは、*0x0082 RESET_PASSQ()* サブコマンドを使用してリセットすることができます。デバイスが部分リセットを受けた場合や *RST_SHUT* ピンを用いてリセットされた場合は、蓄積された電荷が正しく初期化されるように、*0x0082 RESET_PASSQ()* を送信する必要があります。

蓄積された電荷は、整数部分と小数部分の直接の合計に等しくなります。例えば、*0xFFFFFFFFFD* は測定値の整数部分であり、2 の補数形式では 10 進数で -3 を表します。また、*0x7FFFFFFF* は読み出された小数部分であり、常に 0 以上 2^{32} 未満の正の値で、これは 10 進数で 0.5 を表します。この合計は、 $-2.5mAh$ の蓄積された電荷を測定していることになります。

クーロン カウンタの LSB サイズは $7.6\mu V$ ですが、 LSB/R_{sense} 未満の電流も検出可能です。クーロン カウンタは、システムの電流が低い場合でも、内部回路がサンプル間の量子化を維持できるように設計されています。BQ769x2 は、センス抵抗に発生する電圧が $7.6\mu V$ をはるかに下回るような電流でも検出し、電荷を蓄積することができます。

図 5-1 は、 $0.3\text{m}\Omega$ のセンス抵抗を用いた小電流放電測定の試験結果を示しています。LSB/R_{sense} - 25mA 未満の電流も蓄積可能です。BQ769x2 は室温下で $3\sim4\mu\text{V}$ のオフセット電圧を持つため、放電電流がゼロであっても正の蓄積された電荷が観測されることがあります。放電電流がおよそ 1.5mA になると、蓄積された電荷はゼロになります。

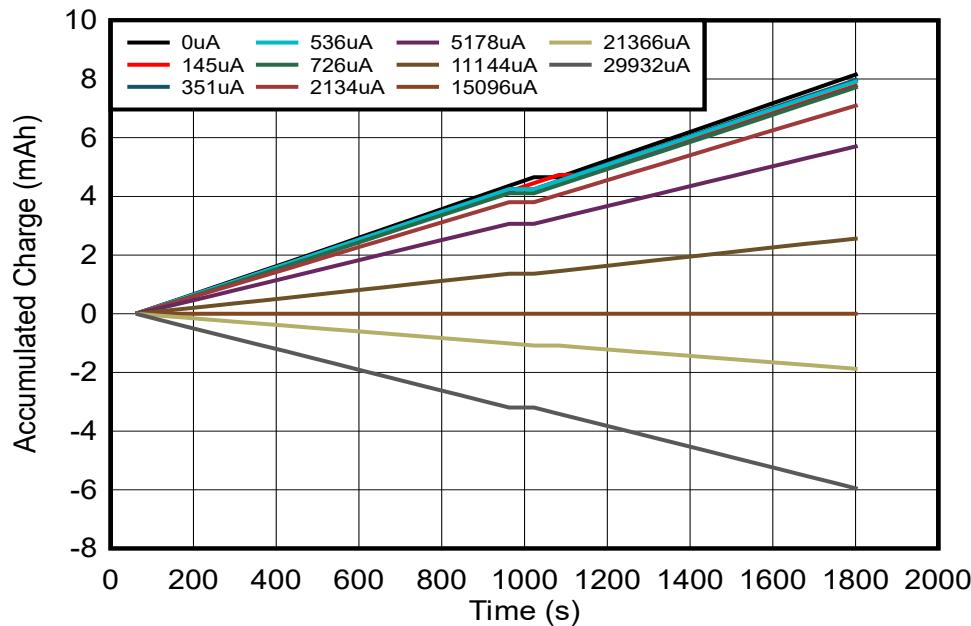


図 5-1. 蓄積された電荷の結果

なお、BQ769x2 は SOC 算出のために、電圧と電流の同期測定にも対応しています。**0x0071 DASTATUS1()**、**0x0072 DASTATUS2()**、**0x0073 DASTATUS3()**、**0x0074 DASTATUS4()** サブコマンドは、セル電圧測定の生の ADC カウント値を 32 ビット形式で提供するとともに、それぞれのセル電圧測定と同時に取得された同期電流測定値も提供します。データコンバータにより生成される値は 24 ビット形式ですが、32 ビット形式で出力されます。24 ビットのデータは 32 ビットデータの下位 3 バイトに格納されており、上位バイトは符号拡張によって生成されます。同期電圧および電流測定を用いることで、ユーザーは CC1 電流使用時の 16 ビットへの量子化を避けつつ、独自のフィルタリング アルゴリズムによってデータをフィルタ処理および解析することが可能です。

6 システム実装

この計算は電流測定におけるワーストケース誤差を示すものであり、実際の誤差を評価するには物理ボードでの実測も必要です。BQ769x2 の接地は、バッテリーの負端子に接続することが推奨されます。SRN および SRP ピンの推奨電圧範囲は $-0.2\text{V}\sim0.75\text{V}$ であるため、バッテリーの負端子とシャント抵抗間の配線はできる限り短くすることが推奨されます。そうでない場合、大きな過渡電流が発生した際にピン電圧が推奨範囲を超える可能性があります。

精度試験を実施する前に、シャントの許容誤差、クーロン カウンタのオフセットおよびゲイン誤差を補正するための電流キャリブレーションを実施する必要があります。ボード オフセットのキャリブレーションは、[BQ769x2 キャリブレーションおよび OTP プログラミング ガイド](#)のキャリブレーションセクションのガイダンスを参照して実施されました。その後、固定電流を用いたキャリブレーションおよび本アプリケーションノートに従った手順により、ゲイン誤差およびシャント抵抗の許容誤差をキャリブレーションすることができます。

[MSPM0 ソフトウェア開発キット \(SDK\)](#) は、リファレンス デザイン「[48~1500V エネルギー貯蔵システム向け高精度バッテリー マネジメント ユニット](#)」に基づいたキャリブレーション デモ コードを提供しています。MSPM0 SDK と CCS をインストールした後、MSPM0 SDK のソースコードを次の場所から入手してください。

```
<install_location>\ti<SDK_version>\examples\nortos\LP_MSPM0G3519\demos\bq769x2_TIDA010247
```

図 6-1 は、TIDA-010247 のパック電流精度データを室温下で示しています。CC3 電流は、デフォルトで 80 サンプルの CC3 測定値を使用して測定されます。最大電流誤差は、放電電流が 5A 未満のとき 20mA 未満、放電電流が 5A を超えるときは 0.2% です。

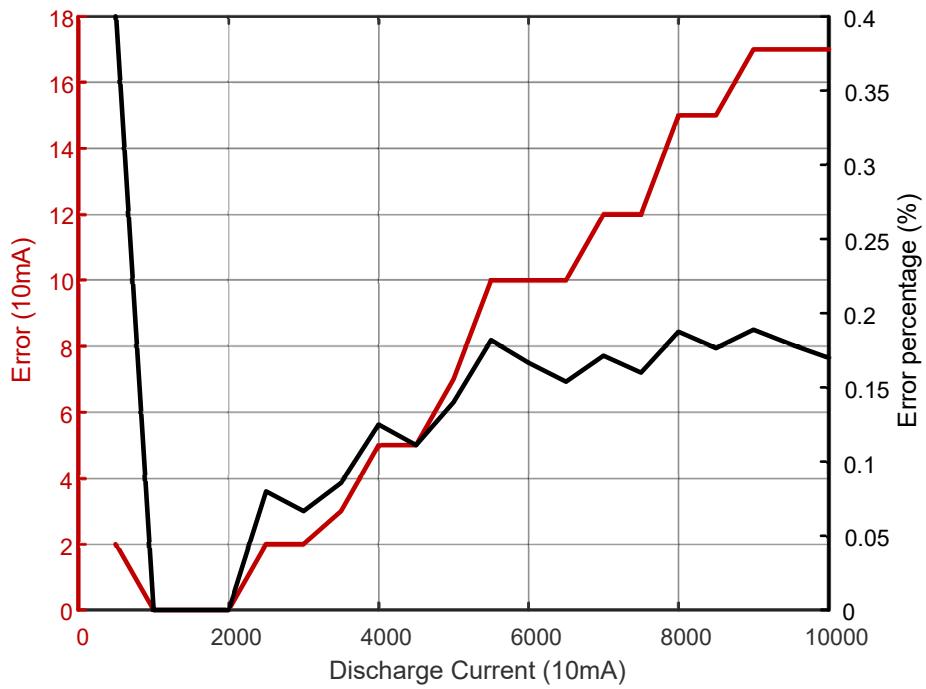


図 6-1. パック電流精度

7 まとめ

この記事では、BQ769x2 における電流検出の設計に関する考慮事項を提供します。電流精度は、設計を開始する前に計算することができ、この記事の推奨事項に従うことでさらに向上させることができます。電流検出回路に診断機能が求められる場合には、診断回路の提案もあわせて推奨されます。この記事では、SOC の算出やその他の判断用途に使用可能な積分電荷の読み出し例も紹介しています。

8 参考資料

- テキサス インスツルメンツ、[\[FAQ\] BQ76952:BQ769x2 におけるクーロン カウンタの電流誤差を計算する方法とは？](#)
- テキサス・インスツルメンツ、『[BQ769x2 キャリブレーションおよび OTP プログラミング ガイド](#)』
- テキサス インスツルメンツ、[BQ769x2 テクニカル リファレンス マニュアル](#)

9 改訂履歴

Changes from Revision * (June 2025) to Revision A (August 2025)	Page
• ドキュメント全体にわたって表、図、相互参照の採番方法を更新.....	1
• 「バック電流精度」の画像の mA を 10mA に変更.....	5

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

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