

高性能な統合型パワートレイン・ソリューション： EVに適用するための要件



Nagarajan Sridhar

マーケティング・マネージャ

高電圧電源および電力ドライバ担当

テキサス・インスツルメンツ

TI POWER

このホワイト・ペーパーは、統合型パワートレイン・ソリューションを使用して、電気自動車 (EV) にパワー・エレクトロニクスを迅速に導入する利点について説明しています。ワイド・バンドギャップ半導体スイッチと絶縁型ゲート・ドライバを実装するとパワートレイン統合の価値を高めることができます。

概要

電気自動車 (EV) を一般市場で普及させるには、パワートレインの統合が重要です。



1 性能の向上: 電力密度の向上

先進的な診断機能と保護機能を搭載した絶縁型ゲート・ドライバは、統合とコスト低減を実現できます。



2 ワイド・バンドギャップ半導体デバイス: 自動車市場における革新的なテクノロジー

各種パワー・スイッチで SiC (シリコン・カーバイド) と GaN (窒化ガリウム) を採用すると、電気自動車 (EV) で効率向上を実現できます。



3 システム・レベルでの統合型パワートレイン・ソリューション

パワートレイン・システムを1つのユニットに封止し、コスト低減とボード面積の最大活用を達成できます。

自動車業界は、より多くのハイブリッド車 (HV) や電気自動車 (EV) を新規に市場投入し、自動車のパワートレインの電動化を進めています。二酸化炭素排出力を抑制しようという世界的なトレンドにより、これらの自動車の売上高は毎年 20% ~ 25% の増加を示し [1]、2030 年に販売される自動車のうち 20% がこれらに該当するという予測があります [2]。さらに、消費者が HV/EV を受け入れるようになった結果、エネルギー効率、信頼性、小型化に関するいっそうの要望に加えて、性能の向上と航続距離の長距離化も求められています。

この分野での非常に大きな懸案事項の 1 つは、一般向け市場

での採用率を高めて行くために HV/EV をより手ごろな価格で購入できるようにはどうか、という課題や、自動車メーカーの利益率が現状でそれほど高くないという課題に取り組むことです。現在、小型から中型の EV の平均価格は、内燃機関 (ガソリンやディーゼルを燃焼させるエンジン) を採用する類似の自動車に比べておよそ 12,000 ドル高くなっています [3]。

まず、価格差の原因をバッテリー・コスト単体に帰すことが考えられます。一方で、将来へ向かって、バッテリー・コストが大幅に低下する可能性もあります。ただし、複数の詳細なビジネス・モデルによって最近明らかになったのは、コスト削減 [3] と開発期間の短縮を通じて、HV/EV の販売に伴う自動車メーカー (OEM) の利益率を向上させる他のオプションが複数存在する、という事実です。1 つのオプションは、設計の想定コスト (Design To Cost, DTC) です。この考え方は、複数のパワー・エレクトロニクス部品を互いに近接した場所に配置するパワートレインの統合を重視しており、その場合、部品の数を減らし、封止に使用するボックスの数も減らして統合を進めることができます。

このホワイト・ペーパーでは、DTC という考え方をパワー・エレクトロニクスに適用すると、OEM (自動車メーカー) がどのような方法で一般市場での採用を進めることができるかを検討します。最初に、パワー・エレクトロニクスの進展に伴って、消費者が抱く「航続距離に関する不安」をどのように軽減してきたか、また同時に、DTC (設計の想定コスト) という考え方をどのように発展させてきたかを説明します。ほかに、統合型のパワートレイン・ソリューションをシステム・レベルの設計に組み込む形で DTC に取り組むとともに、最適化済みの半導体 IC およびパワー・デバイスという内容品に特に注目します。

航続距離に関する不安の解決

航続距離に関する不安は、HV/EV を購入しようとするときに消費者が最も意識する懸案事項です。2020 年に、複数の EV は

航続距離に関する期待値が 200 マイル (322km) を上回る、という形で発売されました [4]。自動車メーカーが異なっても、これらの EV モデルの間に共通しているのは、基礎からパワートレイン・プラットフォームの設計まで、航続距離の延長を重視してバッテリーの積層とパッケージ化を最適化していることです。バッテリーの積層数が多くなると、高電圧化や大出力化につながります。

最新の各種 EV は通常、バッテリー電圧が 400V 付近に達していますが、より大きい出力を実現するには、バッテリー電圧を 800V に高める必要が生じます。特に、ハイエンド EV の場合です。電流の大きさが等しい場合、電圧の上昇は、大出力化につながります。バッテリーの積層とパッケージ化を最適化すると、スペースのコンパクト化と DTC の低減につながります。

また、電力量が同じ場合、電圧を高くすると、効率も上昇します。オームの法則電力 $P = IV$ に従い、大電流を使用しなくなるので、消費電力 $P = RI^2$ の I が小さくなり、熱という形で消費される電力が小さくなるからです。ケーブルの直径小型化と重量軽減も DTC の低減につながります。

性能の向上： 電力密度の向上

パワートレイン・システムの電力効率とサイズによって、HV/ EV の性能が決まります。全体サイズに対する電力効率の比率、つまり電力密度は、パワー・マネジメント分野の重要な性能指標です。目標は、最高クラスの電力密度を達成することです。EV 業界は統合を通じて、パワートレイン・システムにとってこの目標をより高い値に書き換えています。具体的には、最もコンパクトなスペースで、最高の効率を達成しようとしています。この場合、「コンパクトなスペース」とは、プリント基板

(PCB) の面積とケースの材質を小型化する方法で DTC に好影響を及ぼそうとすることを意味します。

パワー・エレクトロニクス・レベルで、パワートレイン・サブシステムが使用しているトポロジーやアーキテクチャ、また統合型 IC ソリューションや半導体パワー・スイッチに大きな変化が生じてきました。オンボード・チャージャ (OBC)、DC/DC コンバータ (高電圧から低電圧への変換)、トラクション・インバータもこれらに該当します。図 1 に、HV/ EV が採用しているパワー・トレインの代表的なブロック図を示します。

ここでは、半導体パワー・スイッチの変化に伴う影響と、効率的なパワー・エレクトロニクス・アーキテクチャを IC で実現するために必要な機能の統合方法について説明します。これは、システム・レベルで統合型パワートレイン・ソリューションを実現するための基礎です。

ワイド・バンドギャップ半導体デバイス：自動車市場における革新的なテクノロジー

パワー・エレクトロニクスは、電力密度に関する厳しい要件を満たそうとするうえで重要な役割を果たします。パワー・エレクトロニクスの内部にある各種電力半導体デバイスは、以下の属性を達成する必要があります。

- 電力損失の低減
- 高周波動作
- 高い接合部温度
- 高電圧動作
- 放熱の強化

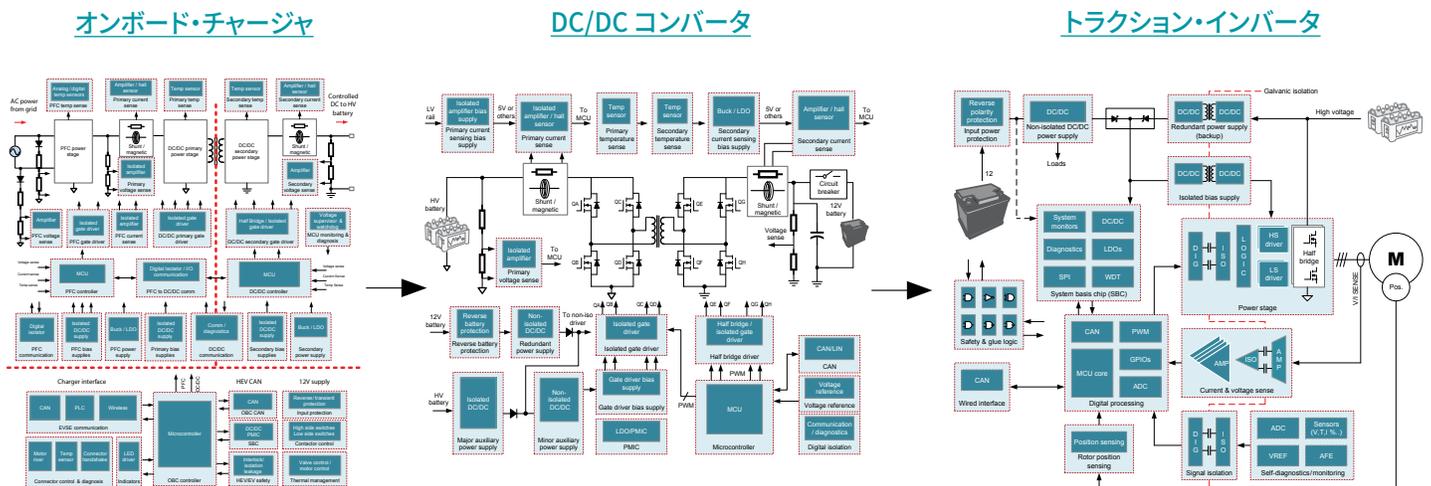


図 1 HV/ EV が採用しているパワー・トレインのブロック図

各種パワー・スイッチで SiC (シリコン・カーバイド) と GaN (窒化ガリウム) を使用するワイド・バンドギャップ半導体のような先進的な高電圧デバイスを採用すると、シリコン使用のパワー MOSFET (metal-oxide semiconductor field-effect transistors) や IGBT (絶縁型ゲート・バイポーラ・トランジスタ) のようなシリコン・ベースの従来型パワー・スイッチより高い効率を EV/HV で実現できます。

電力レベルが上昇すると、シリコン使用のパワー MOSFET または IGBT の熱管理が課題になります。これらのデバイスの最大動作温度には制限があるからです。この値を、許容可能接合部温度と呼びます。この制限が原因で、水冷ジャケットを取り付けた大型の銅製ブロックのような冷却部品をパワートレインに追加する必要が生じます。特に、電力レベルが 100kW を上回るトラクション・インバータを使用する場合です。冷却部品を追加すると、自動車のサイズ、重量、コストに影響を及ぼすこととなります。代わりに、SiC の許容可能接合部温度はかなり高い値になっています。さらに、SiC の熱伝導性は、シリコンの 3 倍以上に達しています [4]。SiC の高い接合部温度と高い熱伝導性という組み合わせを通じて、SiC はパワートレイン・システムにとって魅力的な選択肢になっています。大型の銅製ブロックと水冷ジャケットが不要になるからです。OBC と DC/DC コンバータで GaN を使用する場合も、磁気素子やコンデンサのような各種受動部品を大幅に小型化することができます。GaN は数百 kHz から数 MHz の範囲でスイッチングを実施できるからです。

複数の自動車メーカーはすでにワイド・バンドギャップ・ソリューションを自社の HV/EV のパワートレイン設計に採用しており、大出力化と高効率化、さらにバッテリー電圧の上昇を達成しています。加えて、ワイド・バンドギャップ・ソリューションを採用すると、熱管理の改善およびサイズ縮小という利点を通じて、DTC を低減することができます。現時点で各種ワイド・バンドギャップ・スイッチは割高ですが、時間の経過に伴ってこのコストは低下する見込みです。システム・レベルで観察すると、冷却目的の機械式ブロックや、受動部品とケースに費やす材質の量を排除または低減できる場合、DTC の低減を実現できます。

複数のパワー・スイッチを動作させる絶縁ゲート・ドライバ IC

パワートレイン・システムのアーキテクチャは、絶縁型ゲート・ドライバが複数のパワー・スイッチを効率よく駆動することを必要とします。絶縁型ゲート・ドライバは、コントローラから受け

取った PWM (パルス幅変調) 信号を変換し、複数のパワー・スイッチのオンとオフをスイッチングするためのゲート・パルスを生成します。バッテリーに高電圧が関連付けられているので、コントローラ (1 次側) とパワー・スイッチ (2 次側) の間にガルバニック絶縁が必要です。

ガルバニック絶縁は、電気システム内で複数の機能セクションを区分するための手法であり、これらのセクションの間で電流 (DC 電流) が直接流れる事態や、制御されていない過渡電流が流れる事態を防止します。代わりに、データやエネルギーがこれらのセクション間で行き来するには、このガルバニック絶縁バリアを通過する必要があります。静電容量式絶縁は重要な絶縁テクノロジーであり、流入した信号が絶縁バリアを通過できるようにエンコードとデコードを実施する複数のデジタル回路を搭載しています [5, 6]。

静電容量式絶縁は、絶縁型ゲート・ドライバ内に絶縁バリアを実装するための望ましい選択肢です。データ・レートが高く、ノイズ耐性 (同相過渡耐性 [CMTI] とも呼ぶ特性で、150V/ns を上回る) も高いので、ワイド・バンドギャップ・ソリューションの潜在的なスイッチング能力を具体化するのに役立つからです。パワートレインでは、高い水準のノイズと振動が発生します。したがって、CMTI 特性を達成しているゲート・ドライバの採用は望ましいことです。加えて、絶縁型ゲート・ドライバは複数のパルス・トランスや外部ディスクリット・アイソレータの排除を通じて、PCB 面積の節減や、自動車のコストと重量の削減にも貢献します。

絶縁型ゲート・ドライバの統合: システム・レベルの機能安全と DTC の低減にとって重要な要素

システム・レベルでパワートレインを 1 個のブラック・ボックスとして観察すると、パワートレイン・システムに対応する 3 個の半導体部品が存在しています。デジタル・コントローラ (マイコン)、絶縁型ゲート・ドライバ、および電力半導体です。

高効率システムに対応する重要な機能に加えて、最近では絶縁型ゲート・ドライバが主なコンポーネントになっています。パワートレイン・システムの診断機能と保護機能を、最高の機能安全レベルで開発する必要性が高まっているからです。監視機能と保護機能をインテリジェントな方法で動作させる必要が生じており、これらの機能をゲート・ドライバに統合することが一般的なソリューションになりつつあります。

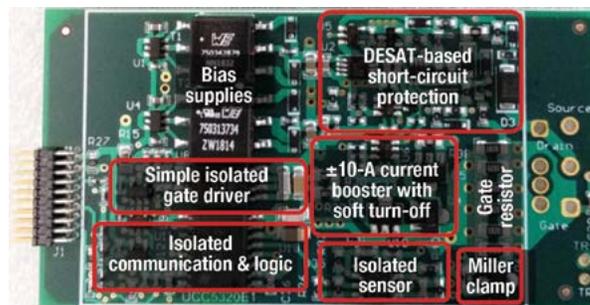
FIT (failure in time、故障率) レートは、自動車で最高のセーフティー・インテグリティ・レベルを実現するための重要な指標

と考えられます。たとえば、ASIL D 準拠システムを実現するには、FIT レートが 10 を下回る必要があります。このような ASIL 水準は、トラクション・インバータでは非常に一般的です。トラクション・インバータはモーターを回転させ、次いでモーターは自動車のホイールを回転させます。他の類似した ASIL 要件 (通常は ASIL B または ASIL C) が現時点で必須の要件になりつつあるのは、OBC (オンボード・チャージャ) と DC/DC コンバータです。

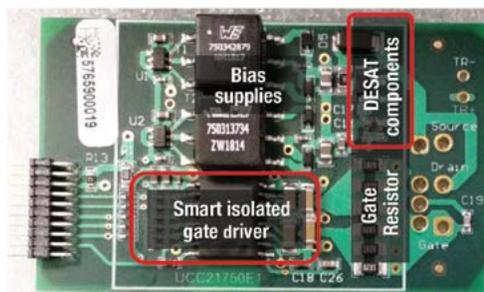
実現可能な最小の FIT レートを達成するために、診断と保護に適したすべての機能を従来はシステム内にディスクリート形式で配置してきましたが、**図2** に示すように、現在はこれらを絶縁型ゲート・ドライバに統合する動きが進みつつあります。このような動きは DTC の低減に直接つながります。部品数と PCB 面積が大幅に減ることになるからです。TI は最近、UCC5870-Q1 を発表しました。この製品は、高度な水準の診断機能と保護機能を搭載しています。このデバイスは、部品数の減少に大きな利点をもたらし、DTC の低減に貢献するほか、**図3** に示すように、トラクション・インバータ・システムで望ましい水準の ASIL を実現する能力があります。

別の考え方に関係するのは、DTC の大幅な低減に貢献するトランス内蔵バイアス電源 IC を開発することです。この考え方を適用できるのは、トラクション・インバータ、OBC (オンボード・チャージャ)、DC/DC コンバータです。

シンプルな絶縁型ゲート・ドライバを使用している電力段



スマート絶縁型ゲート・ドライバを使用している電力段



スマート絶縁型ゲート・ドライバの統合機能の特長:

- システム・コストの大幅な削減
- PCB 面積を 1/2 に縮小

図 2 統合の利点

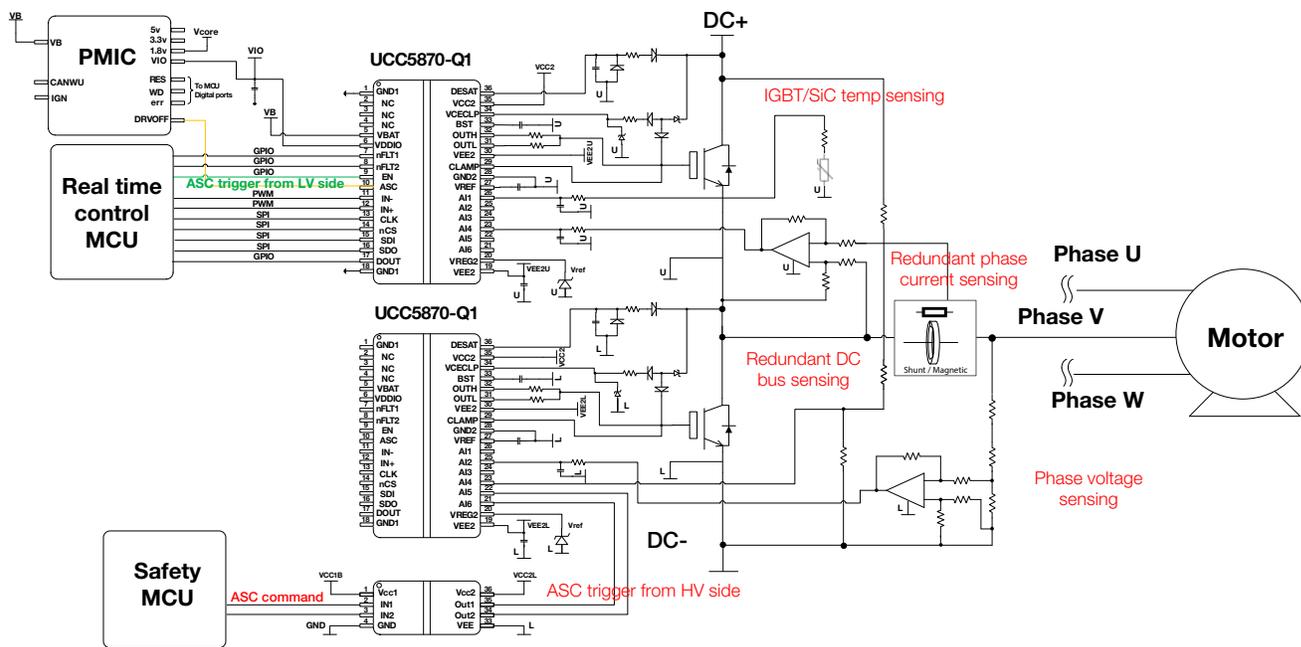


図 3 UCC5870-Q1 の利点

システム・レベルでの統合型パワートレイン・ソリューション

長年にわたって重視されてきたのは、パワートレイン内にある個別サブシステムの統合、DTC の低減、電力密度の改善です。OEM (自動車メーカー) はこれらを次の水準に引き上げて、パワートレイン・システム全体を 1 つのユニットに統合する、つまり IC 業界のシステム・オン・チップ (SoC) に似た概念を採用して、さらにコストを削減しようとしています。これまでに実施されてきた最初のステップは、OBC (オンボード・チャージャ) と DC/DC サブシステムを 1 つのボックス内で組み合わせること、またはトラクション・インバータと DC/DC サブシステムを 1 つのボックス内で組み合わせることです。新しいプラットフォームは、これら 3 つのサブシステムをすべて 1 つのボックスに組み合わせようとしています。どの構成を採用する場合でも、統合型のパワートレインという概念は、パワートレイン・システム全体の重量の大幅な低減や、パワー/ウェイト・レシオの向上、サブシステム周辺での配線の除去、DTC の目標達成に向かいます。研究やプロトタイプ開発を通じて、最大 15% のコスト削減を実現してきました [7]。半導体部品レベルでのゲート・ドライバの統合に加えて、これらのサブシステム間で複数のマイコンを共有すると、パワートレイン・システム全体のコストをさらに削減できます。

パワートレインの統合を通じて、アSEMBリ (組み立て) コストや製造コストの削減、また検証に要する期間を短くできるので、総所有コストの削減と、OEM (自動車メーカー) にとっての開発期間短縮につながります。ただし、1 つのトレードオフが存在します。ODM (他社ブランドの下での設計と製造) の供給元として行動する際に、フレキシビリティが低下することです。

まとめ

HV/EV の市場は急速に拡大中であり、航続距離の延長と高性能化の実現を通じて、顧客が当初抱いていた疑念は解消に向かっています。この市場の将来の拡大に影響を及ぼす要因は、HV/EV が消費者にとって手ごろな価格になるかどうか、また OEM (自動車メーカー) が利益を確保できるかどうか、という点です。

DTC モデルには、パワートレイン・サブシステムのパワー・エレクトロニクスでコストを削減しようとする努力が関係して

います。SiC や GaN のようなワイド・バンドギャップ・パワー・スイッチに加えて、絶縁型ゲート・ドライバが重要な部品になりつつあり、OEM (自動車メーカー) は部品の統合を通じたコスト削減と高い水準の機能安全の実現を進めています。UCC5870-Q1 は、TI が新しくリリースしたゲート・ドライバであり、解決策の実現に貢献します。

この統合型コンセプトを採用して次のレベルへ引き上げると、OBC (オンボード・チャージャ)、DC/DC コンバータ、トラクション・インバータを組み合わせると、コストの削減と、パワー/ウェイト・レシオの向上を両方とも達成することができます。

その他の技術資料

1. Anwar, Asif「[HEV-EV Semiconductor Technology Outlook: What Role will SiC and GaN Play?](#)」(英語) 2019年7月17日の戦略的分析による予測と展望
2. Erriquez, Mauro, Morel, Thomas, Moulriere, Pierre-Yves, Schafer, Philip「[Trends in electric-vehicle design](#)」(英語) McKinsey & Co., McKinsey Center for Future Mobility, 2017年10月25日
3. Baik, Yeon, Hensley, Russell, Hertzke, Patrick, Knupfer, Stefan「[Making electric vehicles profitable](#)」(英語) McKinsey & Co., McKinsey Center for Future Mobility, 2019年3月8日
4. Sridhar, Nagarajan「[Silicon carbide gate drivers – a disruptive technology in power electronics](#)」(英語) Texas Instruments のホワイト・ペーパー SLYY139A、2019年
5. Bonifield, Tom「[Enabling high voltage signal isolation quality and reliability](#)」(英語) Texas Instruments のホワイト・ペーパー SSZY028, 2017年
6. Sridhar, Nagarajan「[Impact of an isolated gate driver](#)」(英語) Texas Instruments のホワイト・ペーパー SLYY140A, 2019年
7. Muhlberg, Gunter, Dr. Hackmann, Wilhelm, Buzziol Kai「[Highly Integrated Electric Powertrain](#)」(英語) 2017年4月 ATZ elektronik worldwide

重要なお知らせ:ここに記載されているテキサス・インスツルメンツ社および子会社の製品およびサービスの購入には、TI の販売に関する標準の使用許諾契約への同意が必要です。お客様には、ご注文の前に、TI 製品とサービスに関する完全な最新情報のご入手をお勧め致します。TI は、アプリケーションに対する援助、お客様のアプリケーションまたは製品の設計、ソフトウェアのパフォーマンス、または特許の侵害に対して一切責任を負いません。ここに記載されている他の会社の製品またはサービスに関する情報は、TI による同意、保証、または承認を意図するものではありません。

すべての商標は、それぞれの所有者に帰属します。

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が適用される各種規格や、その他のあらゆる安全性、セキュリティ、またはその他の要件を満たしていることを確実にする責任を、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 の販売約款 (<https://www.tij.co.jp/ja-jp/legal/terms-of-sale.html>)、または [ti.com](https://www.ti.com) やかかる TI 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。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。

日本語版 日本テキサス・インスツルメンツ合同会社
Copyright © 2021, Texas Instruments Incorporated