

産業オートメーション用 TSN



Pekka Varis

Chief Technologist, Catalog Processors

Thomas Leyrer

Distinguished Member of Technical Staff

Texas Instruments

はじめに

TSN (Time-sensitive networking : タイム・センシティブ・ネットワーキング) は、IEEE (Institute of Electrical and Electronic Engineers : 米国電気電子学会) が定義したイーサネットの拡張規格で、イーサネットをベースにしたネットワークが決定性のある挙動をするよう工夫されています。自動車、工業、パフォーマンス・オーディオなどの分野では、複数のネットワーク機器とのリアルタイム通信を行っており、TSN規格によるメリットがあります。

コンシューマ市場や企業でのイーサネットおよび無線イーサネット通信は、帯域追求型です。例えば、インターネット閲覧時に、ビデオ再生開始前の遅延時間が一定しなくても許容されるでしょう。すばやく応答してくれるのが望ましいのですが、100回クリックしたうちに1回、性能が1桁劣化したとしても、普通のユーザなら我慢するでしょう。しかし、ビデオ画質が悪かったり、ビデオが止まったりすればイライラします。

車両、生産ライン、コンサート・ホールなどで使用される制御系では、遅延発生 の頻度が少なくとも許容できません。このようなシステムでは、ネットワークを経由する制御データのレイテンシとジッタ (レイテンシの変動) が最も重要です。パケットがシステム内の宛先へ到達するまでに要する最大時間によって、ネットワークの通信サイクル、すなわち、制御の頻度が決まります。

表1に、あるアプリケーション例でのネットワーク・パラメータの概要を示します。ネットワークのサイズとトポロジは (あるアプリケーションに対して) 固定されている場合も、可変の場合もあります。インターネットは、パケットがネットワークを通過するノード数と経路という点からはワーストケースの事例です。インターネット上でパケットの転送を繰り返すと、レイテンシは秒の範囲になり、ジッタは極めて大きくなります。

それに対して、決定性のあるリアルタイム・イーサネット通信では、ネットワーク接続されるデバイス数を制限することが一般的です。組み込み製品の例として工作機械を考えると、制御ハードウェア1台にイーサネットで接続されているモーターは100個未満です。

モーターの新しい制御パラメータは250 μ s毎に伝送されます。このような固定用途向けにあらかじめ設計された装置では、短いサイクル・タイムで高精度にクロックを配信する、決定性のあるリアルタイム・イーサネットが必要です。

Network feature	Automotive radar	Machine tool	Professional audio	Consumer video
Scale	4 sensors	64 axes	20 speakers	1 screen
Bandwidth	1 Gb	100 Mb	100 Mb	100 Mb
Jitter	20 ns	100 ns	10 ns	100 ms
Latency	1 ms	100 μ s	10 μ s	1 s
Cycle time	10 ms	<1 ms	Stream	Burst
Time synchronized	Yes	Yes	Yes	No
Topology	Star	Line, ring	Star, line	Point to point

表 1. 各種アプリケーション例でのネットワーク・パラメータ

最新工場の生産システムでは、システム全体がリアルタイム・イーサネットに接続されています。図1に、生産セルの各種制御系を示します。TSNは、各種制御系をリアルタイムで接続するための重要なテクノロジーです。

制御系に対する要求は、規模、サイクル・タイム、精度の点でさまざまですが、同じ通信インターフェイスを使用して、決定性のあるデータ転送を行うことができます。制御系の中には、数多くのセンサやアクチュエータが使用されています。これらは、リアルタイム・イーサネットと直結されるか、リアルタイム・イーサネット・ネットワーク内のコンセントレータとシリアル・ポイント・ツー・ポイントで接続されます。決定性のあるネットワーク性能を持つTSNは、このような製造現場の「フィールド」レベルに適しています。

TSNの原理

IEEE 802イーサネットとIP (Internet Protocol: インターネットプロトコル) の組み合わせは、ハイテク産業の中では稀有な成功例です。この優位性を脅かすものは、ATM (Asynchronous transfer mode: 非同期転送モード)、トークン・リング、RapidIO®など、決定性とQoSの分野でさらに洗練されたテクノロジーしか存在しませんでした。TSNは大まかに言って12のIEEE 802規格からなり、相互運用性など、イーサネットの長所を損なうことなく、決定性とQoSに対処することを目指しています。

TSNは、LAN (ローカル・エリア・ネットワーク) レベルのソリューションであり、非TSNイーサネットと一緒に動作することもできますが、適時性はTSN LANの内部でしか保証されません。TSN規格は、時刻の共通認識、最大レイテンシ保証、バックグラウンドまたは他トラフィックとの共存など、規格が解決するユースケースに基づいてグループ分けすることが可能です。

普及した他の規格と同様に、TSN規格の技術的内容は進化を続けています。中には802.1AS-Revision (Rev) のように、まだ承認されていない個々の規格があり、別の新しいシェーパも登場しています。このように進化し続けているため、ソリューションを選択する際には、新規または変更された規格に対応するためにソリューションをアップグレードできるかどうかを考慮することが重要です。

次ページの図2に示すように、TSN機能を含むIEEE 802イーサネットは、レイヤ2つまりデータリンク層のテクノロジーです。アプリケーションでは、TSN上にUDP/IPやPROFINETなどの上位レイヤ・プロトコルが必要です (6ページの図4)。

802.1AS-Revision : 時間的制約のあるアプリケーション用の 時刻情報と同期

パケット転送に決定性を要求するネットワークでは、全デバイスに時刻の共通認識が必要です。BMCA (Best Master Clock Algorithm) が稼働するネットワークでは、1つまたは複数のクロック・マスタが全デバイスに対し、イーサネット・パケット上で時刻を配信します。

Industry 4.0 | Production Cell

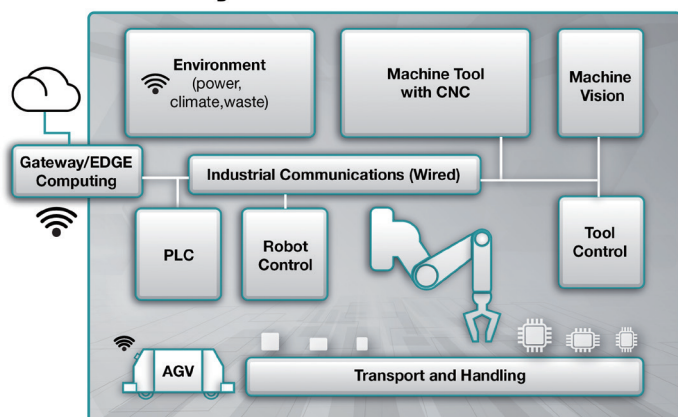


図1. TSNをバックボーンとするインダストリー4.0の生産セル

産業用制御系の多数接続されたセンサやアクチュエータは、TSNネットワーク構成における重要課題の1つです。TSNでは、ネットワーク経由で決定性のある配信を行うために、ストリームを分類し、それらをタグ付けします。理想的な場合、コンバージド・ネットワークは、1つのTSNドメイン内で異なるストリーム・クラスに対応可能です。ネットワーク技術の疑問に答える前に、まずTSNの基本機能を理解しましょう。

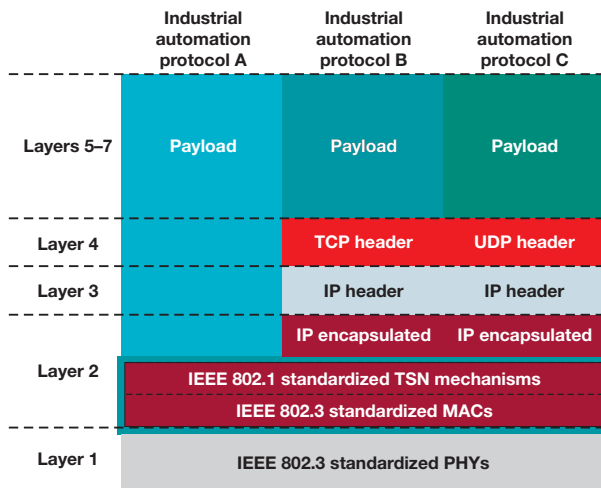


図 2. IEEE TSN と通信スタック

802.1AS-Revは、パケット上の高精度時刻情報である1588v2の厳密に定義されたサブセット、つまりプロファイルです。802.1ASへの802.1AS-Revの追加により、複数の時間ドメインへの対応、および2ステップに加えて1ステップの対応が加わります。これを支えるハードウェアは、できるだけワイヤの近くで送受信パケットをタイムスタンプする必要があります。1ステップ遅延報告に対しては、ハードウェアもパケットにタイムスタンプを挿入できる必要があります。2ステップ遅延報告では、送信タイムスタンプがフォローアップ・パケットに含まれるため、パケット上の時刻同期によるパケットの負荷が軽減される場合があります。

802.1AS-Revにはピア・ツー・ピアのライン遅延測定とブリッジ遅延の計算が含まれています。タイムスタンプ以外の802.1AS-Revの機能は、通常、専用のコアで実行されるソフトウェアまたはファームウェアとして実装されます。テキサス・インスツルメンツ (TI) のSitara™ プロセッサのTSN実装では、802.1ASに対応しています。802.1AS-Revおよび1ステップ遅延レポートは、今後のプロセッサ SDK リリースでサポートされます。

802.1Qbv: スケジュールされたトラフィックの拡張

タイム・アウェア・シェーパ (TAS) は、スイッチがリアルタイム・トラフィックのサイクル・タイムを認識するようにします。出口ポート毎のパケット・スケジューラにより、トラフィックの干渉が起こらない期間 (ウィンドウ) が周期的に設定されます。

TIのSitara プロセッサ用 TSN実装は、TASに対応していません。TASは大部分がハードウェア機能で、各ブリッジ・ポートとトーカーのハードウェア・シェーパを構成するソフトウェア・スタックがあります。

802.1Qbu: フレーム割り込み、802.3br: インタースパーシング・エクスプレス・トラフィック

イーサネットはストア・アンド・フォワード型ネットワークです。回線上で1つのパケットの送信が始まると、そのパケットの終端が届けられるまで、他のパケットを回線からブロックします。例えば、100Mbpsのネットワークで、MTU (最大転送単位) パケット・サイズが一般的な1.5kBである場合、約120ms (1.5kB/100Mbps) の間、ヘッド・オブ・ラインがブロックされます。リンク速度が上がれば、それに応じてブロック時間も減少しますが、1Gbpsのネットワークでもジッタは数十マイクロ秒になります。

ヘッド・オブ・ラインのブロック問題を軽減するため、IEEEではフレーム割り込み (802.1Qbu) と関連物理層規格であるインタースパーシング・エクスプレス・トラフィック (802.3br) を決めました。エクスプレス・トラフィックだけが割り込み可能で、エクスプレス・トラフィックに対してレイテンシが保証されます。

カットスルー・スイッチングは、TASおよびフレーム割り込みとともに、長いデジタイズ・チェーン・トポロジで接続されたネットワークなど、ワーストケースでのレイテンシを減少させるための基本テクノロジーです。TIのSitara プロセッサ用 TSN実装では、カットスルー・スイッチング、フレーム割り込み、インタースパーシング・トラフィックに対応しています。

802.1Qch: サイクリック・キューイングと転送

サイクリック・キューイングと転送により、全ストリームに対して完全に決定性のある遅延が定義されます。TIのSitara プロセッサ用の TSN実装は、最初の段階では802.1Qchに対応していません。代替として、802.1Qbv (TAS) とフル・マネージド・ネットワークを利用した干渉トラフィックの排除を推奨します。

802.1CB: 信頼性のためのフレーム複製と削除

通常、イーサネット・ネットワークは、欠落したイーサネット・フレームを回復するTCP (Transmission Control Protocol) 再送、ネットワーク経路の新たな経路を構築するSTP (スパンニング・ツリー・プロトコル) などの上位レベル・プロトコルに依存しています。これらはいずれも、フレームを配送するために、確定できない長さの時間を犠牲にしています。

TSNは、冗長性を用いて、ケーブル切断、スイッチ故障などの単一障害点があった場合でもレイテンシを保証します。複数経路があるLANトポロジ内部で、フレーム配送を予防的に保証するため、802.1CBでは送信者がフレームを選択的に複製し、宛先で複製を廃棄することにより、冗長性を確保します。

802.1CBは、HSR (High-Availability Seamless Redundancy: 高可用性シームレス冗長性) やPRP (Parallel Redundancy Protocol: 並列冗長プロトコル) などの初期の冗長性プロトコルで単一障害点によるレイテンシの影響を防いでいた、既存の産業用ネットワークと互換性があります。TIのSitaraプロセッサは、プログラマブルリアルタイム・ユニット・サブシステムおよび産業用通信サブシステム (PRU-ICSS) 上で、HSRとPRPに対応しています。802.1CBは、プロセッサSDKの今後のリリースで使用可能になります。

802.1Qcc: ストリーム予約プロトコルの強化と性能

TSNでは、識別ラベルとして、ストリームID、ストリーム宛先アドレス、トラフィック・クラスの3つを使用します。

- ストリームIDは、16ビットのハンドルと連結したMAC (Media Access Control: メディア・アクセス制御) ソース・アドレスです。

- ストリーム宛先アドレスは、バーチャルLAN (VLAN) ID (802.1Q - VLANサポート) と連結したMAC宛先アドレスです。通常は、ローカルで管理されるアドレスか、マルチキャスト・アドレスです。
- VLANプライオリティ・ビットは、通常、1つまたは2つのクラスだけを使用して、トラフィック・クラスを決定します。

ストリームIDは、リソース管理で使用するユニークな識別子です。ストリーム宛先アドレスとトラフィック・クラスは、通過するデータ・パスを識別します。

802.1Qccは、図3に示すように、CUC (Centralized User Configuration: 集中ユーザ構成) を用いた集中構成モデルに対応します。CNC (Centralized Network Configuration: 集中ネットワーク構成) は、リソース割り当てと可用性を計算し、ブリッジを構成します。

CNCと直接やり取りするトーカーとリスナー、あるいは完全分散型アーキテクチャなど、別のアーキテクチャも可能です。RESTCONFやNETCONFのような、集中アーキテクチャとYANG (IETFで開発され、RFC7950で定義されたネットワーク構成用のデータ・モデリング言語) をベースにしたネットワーク管理プロトコルを、TLS (Transport Layer Security) のようなセキュア標準ネットワークング・スタック上で使用することもあります。

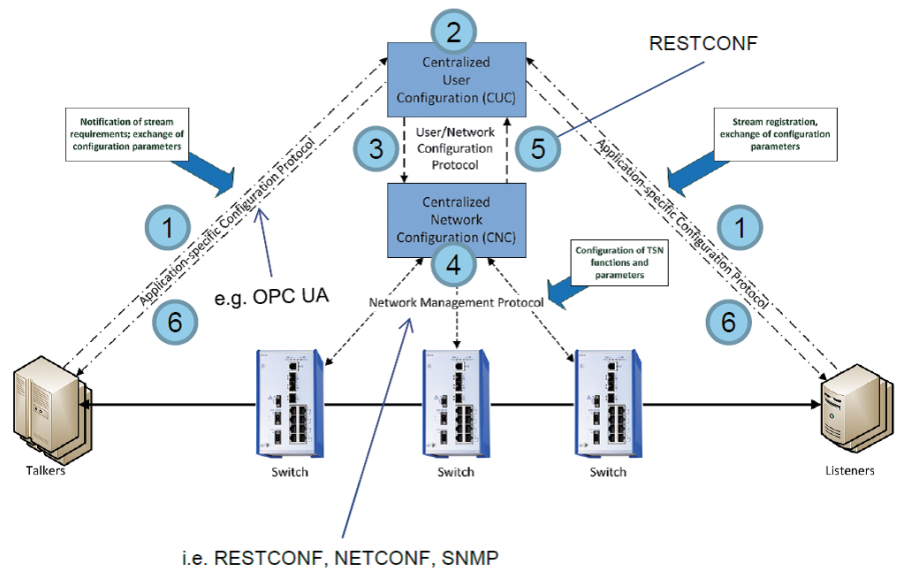


図 3. TSN の構成 (出典: <https://www.belden.com/blog/industrial-ethernet/what-does-tsnconfiguration-look-like-today-and-in-the-future>)

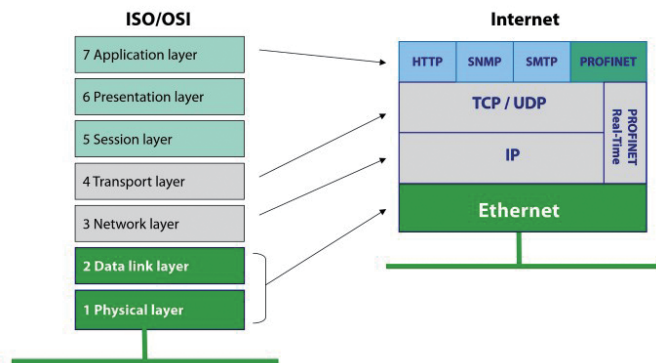


図 4. 産業用イーサネット・プロトコルとイーサネット。
 (出典：<http://profinews.com/2017/07/profinet-and-tsn/>)

産業用イーサネットへのTSNのインパクト

TSNは、かつては専用の産業用フィールド・バス（産業用イーサネットとも呼ばれる）でしか利用できなかったリアルタイム機能を標準IEEEイーサネットに追加します。TSNはイーサネット上で使用されるプロトコルを不要にしたり、置き換えるものではありません。ソフトウェアへのインターフェイスが良い例です。TCP/IP（Transmission Control Protocol/Internet Protocol）では、BSD（Berkeley Software Distribution）ソケットはTCP/IPおよびネットワーク一般に対する標準インターフェイスとなっており、広範なアプリケーションでポータブルかつスケーラブルであることが実証されています。

HTTP（Hypertext Transfer Protocol）アプリケーションは、ローカル・ファイルでもインターネット経由の読み込みでもアプリケーションに変更を加えることなく動作します。しかし、プロトコルの優先事項がワーストケースのレイテンシの解決であったり、アプリケーションへの経路全体で時刻の概念を共有することであったりする場合には、これらのソケットは必ずしも適切なインターフェイスであるとは言えません。例えば、産業用イーサネット・プロトコルであるPROFINETでは、単にこのプロトコルを実行するための1つのデータリンク層として、TSN対応のイーサネットを要求します。

IEEE TSNでは、時刻概念を含め、レイヤ2機能とLANレベルのスイッチングを定義しています。IEEE TSNが定義していないものは、このようなハードウェア機能を構成するためのソフトウェア・インターフェイスです。つまり、ベンダA製のスイッチの管理ソフトウェアでは、あるAPI（アプリケーション・プログラミング・インターフェイス）を使用する一方、ベンダB製では別のAPIが必要であることを意味します。

IEEE仕様の範囲外にある第2の（おそらく、より独自性の強い）領域は、データパス・ソフトウェア内のレイテンシの概念とレイテンシの変動つまりジッタに焦点を合わせています。先に述べたように、初期のソケットは素晴らしいものですが、リアルタイムやレイテンシには対応しようとすらしていません。

TSNネットワークのデータパス周辺のAPIやソフトウェア・アーキテクチャは、徐々に進化してゆくでしょう。PRU-ICSSをベースにしたプログラマブルTSNソリューションでは、レイテンシのソフトウェア・スタック部分と構成管理の両方に段階的に取り組みます。このTSNソリューションは、主要なLinux® ネットワーキングをサポートしながら、リアルタイム用の非常に特殊なバッファリング・メカニズムを要するソフトウェア・アーキテクチャに適応することができます。そして、Linuxがより多くのリアルタイム機能を活用できるようになれば、プログラマブルなソリューションによって新しいソフトウェア・アーキテクチャに適応できます。TIは、Linaroグループでの活動を通じて、TSNハードウェアの決定性の向上、およびオープンソースの構成APIの提供を進めています。

PROFINET® やEtherNet/IP™などの産業用イーサネット・プロトコルは、IEEEイーサネットのラーニング・ブリッジを基本のスイッチング・テクノロジーとして既に想定しています。このようなプロトコルでは、産業用イーサネットでTSN標準ハードウェアを使用するために、TAS拡張とフレーム割り込みに対応できるようになっています。EtherNet/IPはデータ交換にUDP（User Datagram Protocol）パケットを使用しますが、PROFINETはコンシューマ/プロバイダのデータ用にレイヤ2バッファ・モデルを直接サポートします。PROFINETとEtherNet/IPはともにTSNスイッチング・レイヤとの互換性があり、リアルタイム強化によるメリットがあります。

冗長性プロトコルのIEEE規格化はまだ完了していません。802.1CBがMRP（Media Redundancy Protocol）やDLR（Device Level Ring）といったPROFINETやEtherNet/IPの冗長性プロトコルの代わりとなるかどうかは、現時点ではわかりません。既存の産業用通信プロトコルから新しい標準への移行には、通常、長い年月を要します。この移行段階では、新旧プロトコルが生産システム内で同時に使われます。

既存と新規のプロトコル間をブリッジするゲートウェイ機能があれば、産業用通信へのTSNハードウェアの導入が促進されます。ゲートウェイ・アプリケーションとしては、以下のものが考えられます。

- 従来のフィールド・バス (DeviceNet™、PROFIBUS®) と新しいイーサネット・プロトコル (TSNのEtherNet/IP、TSNのPROFINET) 間
- 同一ネットワーク内でTSNと共存できない産業用イーサネット (EtherCAT®、SERCOS® III)
- フィールド・レベル (コントローラ) と制御レベル (デバイス) 間のゲートウェイ
- TSN ネットワークへのIO-Link マスタ・ゲートウェイ
- 標準的な有線/無線イーサネットを使用したTSN-クラウド間インターフェイス上のOPC UA (OLE for Process Control Unified Architecture)
- フィールド/制御レベルのプロトコルとクラウドへのアップリンクの組み合わせ

Sitara AM57xプロセッサは、このリストにあるゲートウェイ機能をすべて実現可能です。産業用通信サブシステム (PRU-ICSS) 2セット、追加のギガビット・スイッチ1つ、そしてWi-Fi® モジュールへのインターフェイス機能により、AM57xプロセッサは1つのデバイスから最大7つの通信チャンネルをサポートできます。各PRU-ICSSは、コントローラ側またはデバイス側の産業用イーサネット・プロトコルを実装できます。Sitara AM65xプロセッサは、このサポートを最大3セットのPRU-ICSSでギガビット・データ・レートへと拡張します。

図5は、生産システム内の異なるレベルで展開できるゲートウェイ・オプションの可能性を示しています。AM65x産業用開発キットは、リアルタイム・ギガビット・イーサネット6ポート、追加のギガビット・イーサネット1ポート、およびPCIe (Peripheral Component Interface Express) Gen 3インター

フェイスをサポートし、4つの仮想チャンネルでのQoSに対応しています。

Production System

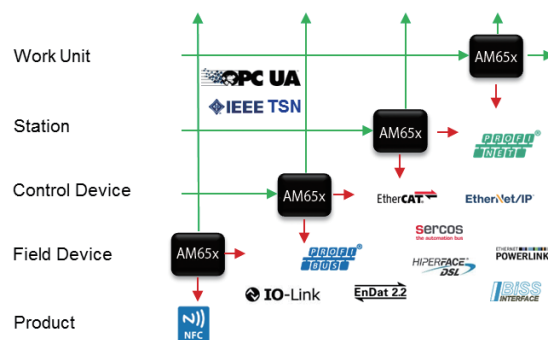


図5. インダストリー 4.0 ゲートウェイ

結論

TSNは、順調に進化しており、大規模な産業用ネットワーク上でレイテンシを保証してパケットを流すための豊富な機能を提供します。産業用イーサネットの主要企業は、TSNテクノロジーを採用し、既存のエンジニアリング・システムやアプリケーション・プロファイルへの統合を進めています。

上位レイヤの制御系や工場外のその他アプリケーションも、アプリケーションに依存しないCNC (Central Network Configuration) ツールと連携する可能性があります。TSNは100Mbの転送レートに制限されず、高帯域のギガビット・イーサネットにも対応します。Sitara AM57xおよびAM65x製品を統合型TSNハードウェア・スイッチとともに使用することで、産業用イーサネットの100Mbから1Gbへの移行を促進できます。

関連リソース

[TI.comのインダストリー 4.0ページ](#)

[TSN 概要資料](#)

S-0107

ご注意:

本資料に記載された製品・サービスにつきましては予告なしにご提供の中止または仕様の変更をする場合がありますので、本資料に記載された情報が最新のものであることをご確認の上ご注文下さいようお願い致します。

TIは製品の使用用途に関する援助、お客様の製品もしくはその設計、ソフトウェアの性能、または特許侵害に対して責任を負うものではありません。また、他社の製品・サービスに関する情報を記載していても、TIがその他社製品を承認あるいは保証することにはなりません。



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 の販売条件 (www.tij.co.jp/ja-jp/legal/termsofsale.html)、または 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。

Copyright © 2018, Texas Instruments Incorporated
日本語版 日本テキサス・インスツルメンツ株式会社