

# 自動化システムに向けたタイム・センシティブ・ネットワーキング (TSN) の採用

## インテルが提供する TSN を用いた産業用システムの時間確定的動作を改良できる スケーラブルなソリューションを創造

### 著者

**Vikram Dadwal**  
プロダクト・マーケティング・エンジニア

### 共同作成者

**Anil Keshavamurthy**  
プリンシパル・エンジニア

**Ganesh Kondapuram**  
プラットフォーム・アーキテクト

### IoTとインダストリー4.0

IoT 技術の台頭により、製造業界のあらゆる分野でシステム・アーキテクチャーの再編成が起きています。これに伴い、第4次産業革命として知られるインダストリー4.0において、さまざまな変化が起きている。製造業者は、プロセスの最適化、新たな収入源の獲得、ビジネスモデルの拡張が可能になりました。一方、さまざまな製造業者（飲食料産業、石油・天然ガス産業、公益事業者など）や産業機器ベンダー（OEMおよびODM）は、リアルタイム・コンピューティング能力、時刻同期（タイムシンク）、さまざまなデバイス間で適時性の保証（タイムリーネス）を改善する必要があります。例えば、次世代オートメーション・コントローラーは、ビデオ・ストリーミングやさまざまなワークロードのトラフィックを制御し、かつ1つのマシンでディープラーニング機能を提供します。工場のネットワークで遅延なくほかのコントローラーと通信することが不可欠となります。

### インテルの TSN およびリアルタイム・コンピューティング

ロボットアームやモーション・コントローラーなどの産業用アプリケーションに関しタイムシンク（協調イベント）と適時性（適時イベント）の両方の課題に直面している場合、産業用システムの時間確定的動作の確保ならびにデバイス間の時刻同期を行うために、インテル® アーキテクチャーのリアルタイム機能と TSN を併用することで既存のリアルタイム・イーサネット・プロトコルと比べ、顧客企業はタイム・センシティブなサイクルを正確に制御できます。

IEEE 規格の集合である TSN は、タイム・センシティブなデータをイーサネット・ネットワーク経由で送信するためのプロトコルを規定します。TSN がシステム間でデータを最適に送信するための時刻同期や適時性に関するルールを規定するのに対し、キャッシュ・アロケーション・テクノロジー (CAT)、PCIe\* PTM (プレジジョン・タイム・マネジメント)、エンドツーエンドの仮想チャネルなどを含むインテル® アーキテクチャーのリアルタイム機能は、データパケット処理最適化をサポートし、これらをシステム内で提供します。

これらは相互に補完し合い、時刻同期（例えば音声と動画のフレームをそろえること、ロボットアームがユニゾンで動作）や適時性（時間確定的な予測可能な動作）を向上するために産業システムで必要なレベルの時間確定性を提供できます。

### 目次

IoTとインダストリー4.0.....	1
タイム・センシティブ・ ネットワーキング (TSN) .....	2
産業用 TSN システム・アーキテクチャー .....	6
TSN ユースケース.....	6
インテルの TSN 対応製品 .....	8
日立製作所 TSN テストベッド.....	10
TSN の採用.....	11
まとめ.....	11

## イーサネット経由のリアルタイム・アプリケーションのための業界規格

従来、産業用通信システムではCAN\*、Profibus\*、Modbus\*などのリアルタイム・プロトコルが活用されてきました。産業用の用途が変わり、高速化が必要となったため、過去20年では、イーサネットを基盤としたリアルタイム通信への移行が増加してきました。

しかし、イーサネットの標準仕様であるIEEE 802.3は、時間確定的ではありません。そのため、一定の時間確定性(ネットワーク内のデバイス/システム同士の時間概念の共有)を必要とするリアルタイムの用途には適切ではありません。リアルタイムの要素をイーサネットに組み込むニーズから、PROFINET\*、EtherCAT\*、Sercos\*、EtherNet/IP\*、CCLink-IE\*、Modbus TCP\*、Ethernet PowerLink\*などのさまざまな異なる産業用イーサネット規格が開発されました。

これらの規格の要件や市場セグメントは似通っていますが、実装形態やエコシステムは異なります。ほとんどの規格には所属する母体組織があり、市場の主要プレーヤー企業がそれぞれの母体組織の指導的立場で規格の開発を進めています。工場の担当者が(PROFINET\*規格に基づく)PLCを購入する場合、PROFINET\*のバス上にほかのPLCを必要とすることが多く、工場間は接続されますが、同時に工場の担当者はPROFINET\*をサポートしているパーツをベンダーから購入しなければなりません。その結果、メーカーはプロプライエタリなソリューションを持つことが多く、特定のテクノロジーに関しては合意を取るのが難しい場合もあります。また、エンドユーザーやデバイスメーカーは、複数のソリューションを評価する必要があります。これらの課題に対応するため、IEEE 802.1ワーキング・グループは、イーサネット経由で時間確定性のある通信を可能にするTSNを構築しました。

## タイム・センシティブ・ネットワーキング(TSN)

産業用ネットワーク間の時間確定性のある通信を規格化するために、TSNはタイム・センシティブなデータをイーサネット・ネットワーク経由で送信する方法について一連の規格を規定しています。従来、インフォメーション・テクノロジー(IT)は製造設備におけるコンピューターとデータ関連ネットワークのトラフィックの両方を制御してきたのに対し、オペレーションズ・テクノロジー(OT)は、産業制御システムの操作についてのネットワーク・トラフィックを管理してきました。OTとITは多くの場合異なる目的と要件を持った独立したネットワークです。OTは製造現場のフロアや生産環境などの物理面で、制御プロセスを確立・維持しますが、ITはデータの作成、送信、保存、安全確保を行います。

TSNはこれらのOTとITのインフラストラクチャーをネットワーク間で共有するために収束し、タイム・センシティブ型トラフィック(保証あり)を可能にし、ベストエフォート型トラフィック(保証なし)との共存を可能にしました。これらの要件を満たす現行ソリューションの多くは、複数のバスレイヤーが特定のタスクの要件を満たすために作成・最適化される制御階層をベースにしています。各レイヤーは異なるレベルのレイテンシー、帯域幅、サービス品質(QoS)を有するため、相互運用は難しく、データ接続の柔軟な変更はほぼ不可能です。産業用システム間の相互依存が高まる中、TSNは自動化コンポーネント間の正確な連携を可能にするという重要な役割を果たし、相互運用や拡張が可能なソリューションを提供します。例として、エンドカスタマーに最終的なソリューションを提供するまでに多くのベンダーが連携・協力することが多い航空業界が挙げられます。cockpitの設計ソリューションの異なる機能をさまざまな航空機専門電子機器メーカーにアウトソースする航空機メーカーのようなケースです。

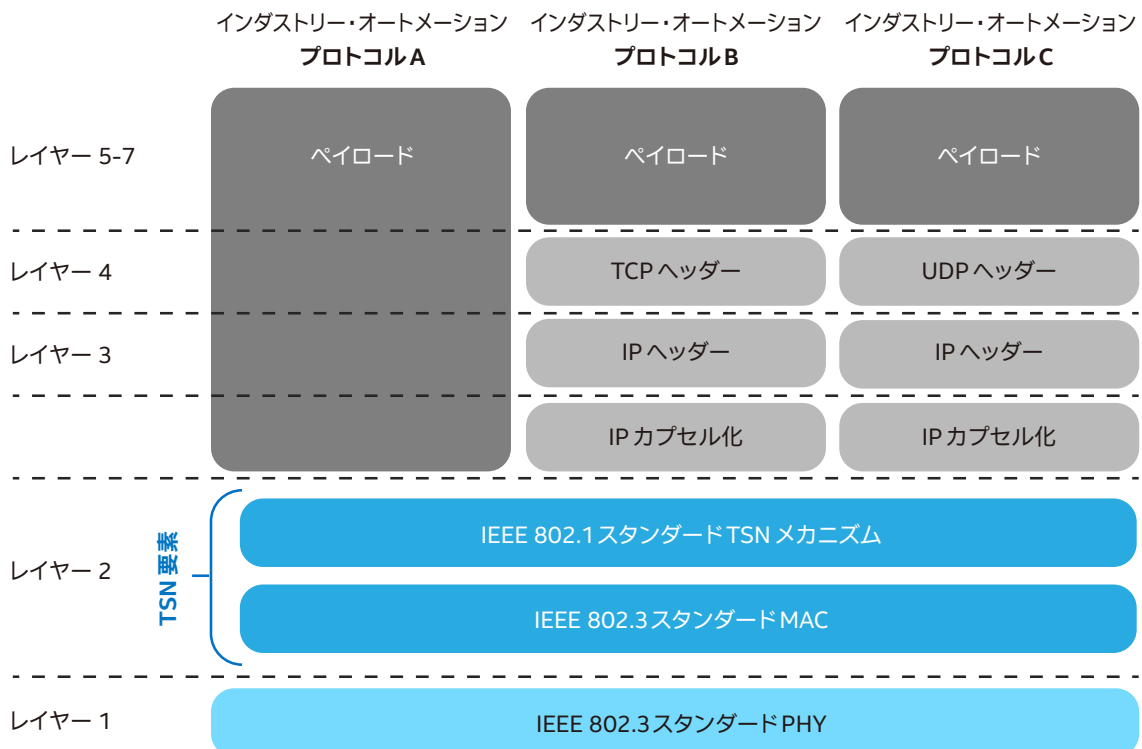


図1 OSIレイヤー

イーサネットをベースとした通信プロトコルへ移行することで、帯域幅を増やし、配線にかかる複雑性やコストを低減することができます。共通のネットワーク・レイヤーによりIoTイノベーションがよりオープンになります。図1にあるように、TSNの機能はオープン・システム・インターコネクション(OSI)モデルのデータリンク層(レイヤー2)で組み込まれています。TSNの機能をカプセル化するために、データリンク層はメカニズムを向上させ、送信エラーに対応、データのフローを規制し、明確に規定されたインターフェイスをネットワーク・レイヤーに提供しています。TSNは、OPC Unified Architecture(OPC UA)などの上位レベルが異なる産業プロトコルで使用されます。OPC UAは、OPC協議会が開発した産業用自動化マシン間の通信プロトコルです。図1ではまた、同じインフラストラクチャーを使用した異なる産業用自動化プロトコルのOSIモデルが示されています。

TSNは、信頼性、制限付き低遅延、時刻同期、リソース管理などさまざまなニーズに対応します。これらの機能はTSNの下位規格(例えば、IEEE 802.1AS、IEEE 802.1Qbvなど)を通して実現され、顧客企業はそれぞれのニーズに基づき、どの規格を導入するか決めることができます。

### TSNのコンポーネントと主なIEEE下位規格

図2に表されているのは、時刻同期、転送制御、システム設定というTSNの主なコンポーネントです。以下のセクションで、これらのコンポーネントと関連する主なTSN下位規格について説明します。

#### 時刻同期

##### IEEE 802.1ASrev

リアルタイムで相互に通信する産業用システムは、修正措置について合意し相互の状況を認識して協力するために、同じ時刻を認識/共有する必要があります。

例えば、複数のシステムで構成される高速のコンベヤー・アプリケーションでは、缶詰製品などが一定の速度でコンベヤーベルトにより運ばれます。このシステムは欠陥製品を適切に取り扱うため時刻同期を行っています。最初のシステムが各コンポーネントの存在を検知して欠陥の有無を分析し、2番目のシステムにそのコンポーネントの状態の最新情報を伝達します。この情報に基づいて、2番目のシステムはタイミングよく判断する(コンポーネントの合格/不合格を決定)ことができます。産業用システム数が増加するにつれ、同じ時刻を認識/共有するニーズはますます高まっています。

2002年にIEEE 1588-2002規格が作成され、ネットワーク全体で時刻を同期化するPrecision Time Protocol(高精度時刻プロトコル)(PTP)が規定されました。PTPデバイスは、クロックマスターの選択、ネゴシエーション・アルゴリズム、クロックレート的一致、調整メカニズムを規定することにより、イーサネットのメッセージを交換し、



図2 タイム・センシティブ・ネットワークのコンポーネント

ネットワーク・ノードを共通の時刻基準と同期化します。IEEE 802.1ASrevプロジェクトは、TSN向けIEEE 1588 PTP同期化プロトコルのプロファイルを作成するプロジェクトです。このプロファイルで、異なるTSNデバイス間のクロック同期の互換性を有効にします。802.1ASrevはまた、耐障害性と複数のアクティブなマスターにも対応します。

#### Linux\* 時刻同期ソフトウェアの例

Linux\* ピアツーピア(p2p)は、IEEE 1588規格に基づくPTPのソフトウェア実装です。p2pはLinux\* カーネルを使用することで企業は柔軟なLinux\* APIを活用できます。Linux\* p2pは、[Linux\\* PTP Project \(英語\)](#)で無料ダウンロードできます。

802.1AS同期の中核を成しているのがタイムスタンプングです。802.1AS対応MACからのp2pメッセージ交換の際、p2pイーサタイプは、ローカルのリアルタイム・カウンター値のサンプリングをトリガーして、すべてのp2pノードで時刻同期を行います。PTPプロトコル経由で接続されたシステムの例を図3で示します。PCIe\* PTM Engineering Change Notice (ECN) を使用して、[PCIe\\* デバイス \(英語\)](#)の時刻同期を向上させることができます。

#### トラフィック・スケジューリング

##### IEEE 802.1Qbv

トラフィック・スケジューリングにより、同一のネットワーク内で競合する、優先度の異なったトラフィック・クラスが共存できます。IEEE 802.1QbvとIEEE 802.1Qbuは協働して管理します。良い例が、力学的エネルギーを電気エネルギーに変換するタービンが複数ある水力発電所です。これらのタービンに接続されたセンサーは、速度や温度を監視し、これらのデータポイントを中央のシステムに送り、タービンの健全性をモニタリングします。中央のシステム内では、ITトラフィック(例えば、eメール、アプリケーション)だけでなくセンサーからも大量のデータが生成されます。この例では、IEEE 802.1QbvやIEEE 802.1Qbuは、異なるトラフィックのクラスに優先順位を付け、センサーからのタイム・センシティブなデータをネットワーク経由で中央システムに送り、事故につながるエラーを防ぎ、異なるモーター間の調整など適切なインサイトを導き出すことができます。

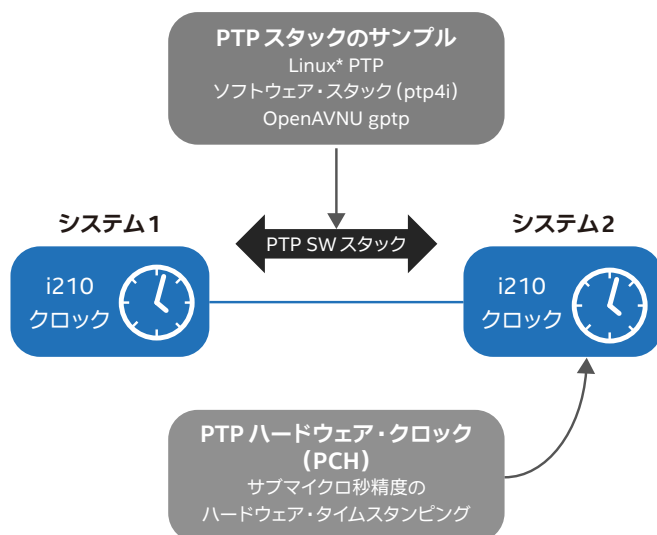


図3 システム間の時刻同期

IEEE 802.1Qbv規格に基づいたデバイス/システムは、スケジュールされたTSNイーサネット・フレームを優先し、その一方で、TSNイーサネット・フレームではないもの(ITトラフィック)をベスト・エフォートで送信します。802.1Qbv規格は、トラフィックの転送時に1つのポートに最大8つまでキューを定義できます。その際、各フレームはQoSの優先度に基づいてそれぞれのキューに割り当てられます。キューに割り当てられたトラフィックのフローをTSN対応スイッチから制御するため、タイムアウェア・シェーパ(TAS)メカニズムを定義しています。この仕組みはタイム・スケジュールに基づき、1つのポートを除いたすべてのポートをブロックし、スケジュールされている送信の遅延を防ぎます。言い換えれば、各キューの前にあるゲートは、標準的な(非TSN)イーサネット・パケットではなく、タイム・センシティブなトラフィックという特定の時点で遅延なく開きます。

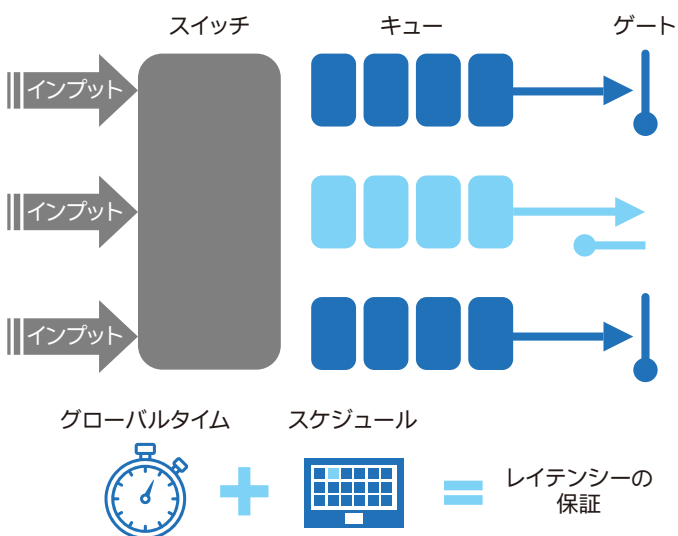


図4 IEEE 802.1Qbv

#### IEEE 802.1Qbu

IEEE 802.1QbuはIEEE 802.1Qbvと併用され、重要ではない長いフレームの送信を停止し、タイム・センシティブなトラフィックを優先して送信します。重要なメッセージを遅延なく送信するにあたり大きな課題は、同じネットワークを共有する個々のフレームが1,200バイト(1.2kB)になる、従来のトラフィックの存在です。回線を移動し始めたパケットは最後に到達するまで、ほかのパケットに対して回線をブロックしてしまいます。例えば、100Mbpsの帯域幅があるネットワークでパケットサイズが一般的な1.2kBである場合、およそ120ms(1.2kB/100Mbps)の間、ネットワークをブロックしてしまうことがあります。

この問題に対処するため、IEEEは2つの規格を策定しました。フレーム割り込みのための802.1Qbuとインターサパーシング・エクスプレス・トラフィック802.3brです。802.1QbvのTAS機能を基盤として構築されるこれらの規格により、デバイスが非TSNイーサネット・フレームの送信を中断し、優先度の高いフレームを先に送信することができます。一方、中断されたフレームの残りは後から送信されます。

#### IEEE 802.1CB

本セクションの冒頭にある水力発電所の例では、配線の切断やデバイスの故障によりパケットがドロップされてしまうというリスクがあり

ます。送信側でフレームを複製し、受信側でその複製を廃棄することで、IEEE 802.1CBはドロップされたイーサネット・フレーム、または切断された配線や故障したスイッチなどの障害からシステムの修復をサポートします。この規格では、同じメッセージの冗長コピーをネットワークの別々の経路に送信します。従来、これらの機能はトランスミッション・コントロール・プロトコル(TCP)やスパニング・ツリー・プロトコル(STP)によって提供されていましたが、いずれの方法も時間確定性を保証するものではありません。

#### IEEE 802.1Qci

802.1Qciは、ネットワークの障害を特定のリージョンに隔離することにより、欠陥または悪意のあるエンドポイントやスイッチから保護します。スイッチの受信ポート(転送エンジン)側で機能し、送信キューがフレームで一杯になるのを防ぎます。このプロセスではデータパケットがチェックされ、スイッチにより予約されたデータストリームに合致するか確認します。もし合致していなければ、パケットはフィルターにかけられ転送されません。これを活用して、OSIレイヤーモデルのレベル2に対する攻撃を防ぐことができます(図1参照)。

#### システム設定

IEEE 802.1QatおよびIEEE 802.1Qccは、TSNネットワーク<sup>1</sup>のシステム構成を規定する主な規格です。図5に示すTSNネットワークのシステム・アーキテクチャは、TSNのシステム構成要素を表しています。前述の水力発電所の例では、ネットワーク・コンポーネント(タービン、ブリッジ、コントローラーなど)全体で、IEEE 802.1Qatを使用して、トラフィック・クラスやデータレートなどのQoS要件を相互に伝えることが可能です。QoS関連のメッセージが伝わると、要件を満たすために、IEEE 802.1Qccがソフトウェア・モデルを提供し、これらのコンポーネントを構成します。

#### IEEE 802.1Qat

IEEE 802.1Qatは、ストリーム・リザベーションの構成を変更することで、プラグアンドプレイ・メカニズムを規定するストリーム・リザベーション・プロトコル(SRP)の機能を拡張します。ストリームは、トーカー(Talker)から1以上のリスナー(Listener)への一方方向のデータフローです。IEEE 802.1Qatは、より多くのストリームと強化されたストリーム特性へのサポート、ルーティングやリザベーションのためのユーザー・ネットワーク・インターフェイス(UNI)を追加することで、SRPを向上させます。

#### IEEE 802.1Qcc

プロフェッショナル・オーディオ/ビデオの分野だけでなく、インダストリアル・マーケットのニーズを満たすため、IEEE 802.1 TSNタスクグループは、新しい構成モデルを規定しています。その1つ目がIEEE 802.1Qccに規定されています。SRPは、ネットワーク全体にリクエストやレスポンスを行うことによりネットワーク帯域幅を確保する分散型構成を使用します。IEEE 802.1Qccは、トーカーとリスナーがセントライズド・ユーザー・コンフィグレーション(CUC)エンティティにストリーム要件を送信するモデルを追加します。

エンド・ステーション・ストリームのQoS要件情報を基に、CUCはこれらの要件をセントライズド・ネットワーク・コンフィグレーション(CNC)に伝えることができます。ネットワーク全体のストリーム要件の情報を基に、CNCはアプリケーションのストリームQoS要件がTSNネットワーク上で満たされるか、またはどのように満たすか計算をします。

要約すると、CUCはネットワークの「ユーザー」(トーカーとリスナー)を構成し、CNCはTSNに対応するネットワークを構成します。

#### IEEE 802.1Qch

この規格では、同期化した巡回エンキューイング、キュー・ドレーニング・プロシージャー、管理オブジェクトおよび既存プロトコルへの拡張が記載されています。ブリッジやエンド・ステーションはフレーム送同期化、混雑による損失をなくし時間確定性のあるレイテンシーを実現します。これにより、ネットワーク・トポロジーにかかわらず、時間確定性の遅延を容易に計算することができます。これは既存技法から改善されたもので、ブリッジ接続された時間確定を大幅に簡易化し、デリバリージッターを低減、時間確定性のあるサービス提供を簡素化します。IEEE 802.1Qchでは、パケットはトラフィック・クラスにしたがって収集され、1サイクルで転送されます。この巡回エンキューイングおよびキュー・ドレーニング・プロシージャーにより、レイテンシーに上限が設定され、802.1規格により、時間制御通信が可能になります。

#### IEEE 802.1Q

IEEE 802.1Qは、TSNの下位規格ではありませんが、ブリッジ・マネジメント・オブジェクトを規定しTSNブリッジの設定を可能にします。

これらのオブジェクトは管理情報ベース(MIB)やYANGなどの複数のデータモデリング言語(データ・フォーマット)を使って記述されています。この規格はまた、ブリッジにより管理されるオブジェクトを遠隔で構成するため、シンプル・ネットワーク・マネジメント・プロトコル(SNMP)、ネットワーク・コンフィギュレーション・プロトコル(NETCONF)、RESTCONFなどのネットワーク・マネジメント・プロトコルの使用を想定しています。NETCONFは、インターネット技術タスクフォース(IETF)が開発・規格化したもので、ネットワーク・デバイス構成のインストール、操作、削除のためのメカニズムを提供します。このプロトコルは、構成データやプロトコル・メッセージ向けにXMLベースのデータ符号化を使用します。

IETFは、ブリッジ・マネジメント・オブジェクトのためのYANGとNETCONFのような、YANGと互換性のあるネットワーク・マネジメント・プロトコル向けを推奨しています。

IEEE 下位規格	タイトル	内容
IEEE 802.1ASRev、 IEE 1588	時刻同期	イーサネットを使用して通信を行う自動システム向けに、正確にクロックを同期化するプロトコルを規定する。
IEEE 802.1Qbv	スケジュールされた 転送処理の拡張	非TSNフレームがベストエフォート・ベースで送信される(保証なし)ことを許可しつつ、TSNイーサネット・フレームがスケジュール通りに送信される(保証あり)ことを可能にする。各フレームはQoS優先度に基づき、キューが割り当てられる。
IEEE 802.1Qbu	フレーム割り込み	優先度の高いフレームのため長いフレームの送信を中断するフレーム割り込みを可能にする。
IEEE 802.1CB	フレーム・レプリケーション および信頼性の排除	送信元で複製フレームを挿入し、送信先で複製を破棄することで、TSNネットワーク内でドロップされたイーサネット・フレームまたは故障したスイッチから回復する機能を提供する。
IEEE 802.1Qcc	拡張および パフォーマンスの向上	より多くのストリームをサポートし、ストリームの性質を詳しく記述する。レイヤー3ストリーミングとルーティングや予約のためのUNI(ユーザー・ネットワーク・インターフェイス)のサポートも含む。
IEEE 802.1Qci	ストリームごとのフィルタリング およびポリシング	欠陥および/または悪意のあるエンドポイントやスイッチからの保護を提供する。データパケットをチェックし、もう一方の側の予約データストリームとの一致を確認する。
IEEE 802.1Qch	複数クラスのキューイング および転送	ネットワークのトポロジーやノード数に起因するパケットの遅延を除去する。各スイッチで、特定のトラフィック・クラスに基づき、固定パケット処理の遅延を強制する。

表1 主なIEEE TSN規格

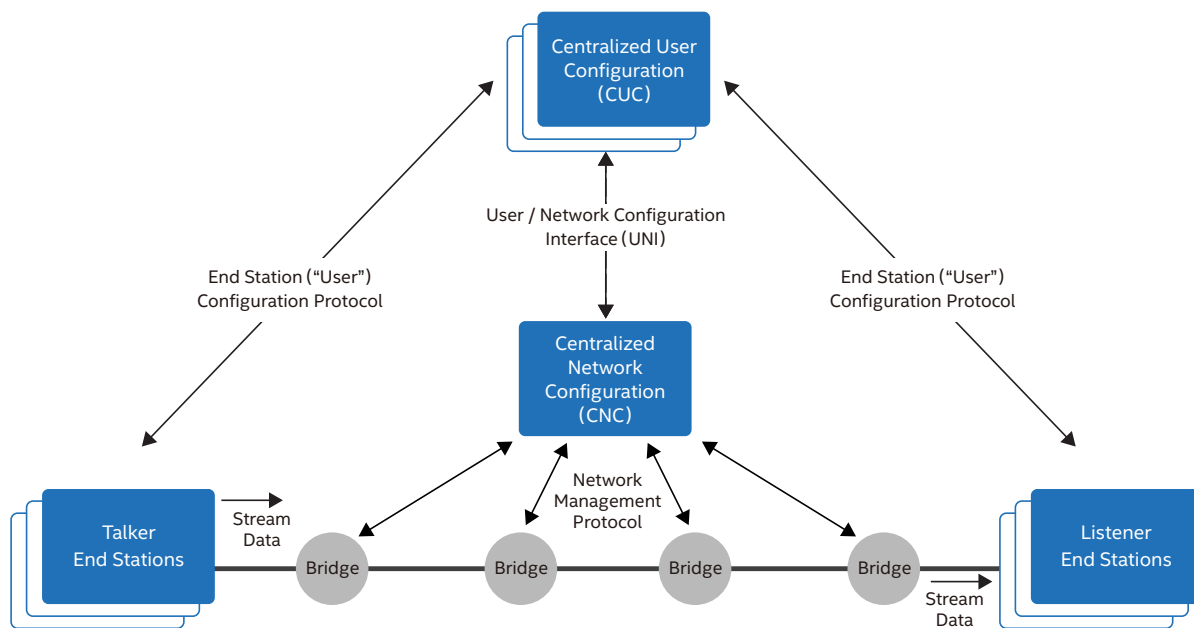


図5 TSNシステム・アーキテクチャー

## 産業用 TSN システム・アーキテクチャー

TSN ネットワークは、ネットワークの複雑性に応じて複数のコンポーネントを持つことができます。TSN ソリューションの大半が、エンドデバイス、ブリッジ、CNC、CUC という4つの主なコンポーネントから構成されています。図5は典型的な TSN システム・アーキテクチャーです。

### エンドデバイス

エンドデバイスは、トーカーやリスナーとしても知られるソースや destinations のコンポーネントで、時間確定性のある通信を必要とするアプリケーションを実行します。

### ブリッジ

ブリッジは、TSN 規格に準拠したイーサネット・フレームをスケジューリングし、送信するネットワーク・スイッチです。

### CNC

CNC は、TSN アプリケーション (ユーザー) の代わりにネットワーク・リソースを構成する一元化されたコンポーネントです。ネットワーク・スケジュールを計算し、パラメータをこのインフラストラクチャーのコンポーネント (イーサネット・スイッチ) に設定します。CNC アプリケーションは TSN ブリッジのベンダーにより提供されています。

### CUC

CUC は、エンド・ステーションでアプリケーション (ユーザー) リソースを見つけ、構成します。エンド・ステーションに代わって TSN 機能を構成するために CNC と情報を交換します。

## TSN ユースケース

TSN 規格は、この技術によって使用される時刻同期や適時性機能がメリットをもたらすインダストリー・セグメントで多数の IoT ユース

ケースを推進しています。TSN は、密接につながったスマートデバイスや製造機械のインフラストラクチャー、交通システム、配電網において、センシング、プロセッシング、制御、分析という機能が組み込まれたシステム構築が可能になります。以下では、TSN 導入が価値を生み出すであろう産業市場の主なセグメントを紹介します。

### インダストリー・オートメーション

モーション・コントロール、マシンツーマシン (M2M) 通信、ロボティクスなどのインダストリー・オートメーション・アプリケーションは TSN を使用してタイム・センシティブなプロセスを改善します。例えば、再生可能エネルギー産業で電圧 / 電流調整などの高速動作プロセスの制御に TSN を利用できます。その他の製造業の例としては消費財、電子部品などがあり、これらの製造において、IEEE 802.1AS Rev などの規格が、サプライチェーンの作業場全体でパーツを動かす際に、ロボットの相互同期化をサポートできます。

TSN は、品質管理、予知保全、生産フロー監視など、工場機能の改善をサポートします。これらの規格を導入するメーカーは、インダストリー・オートメーション・アプリケーションが遅延なく生データを処理、レイテンシーを低減させ、データが柔軟に制御システムのレイヤー間で共有される高度な製造向け基盤を提供できるようにしています。

下記のサブセクションでは、モーション・コントロール、ロボティクス、M2M 通信などのインダストリー・オートメーションにおける課題の解決に TSN を適用できるユースケースを取り上げています。

### モーション・コントロール

モーション・コントロール・アプリケーションは遅延に関する厳格な要件があり、リアルタイムのデータ送信がワークロードの要求を確実にサポートできるようになっています。モーション・コントロールはインダストリー市場のさまざまなセグメント (ディスクリート製造、プロセス製造、電力産業など) にまたがり、PLC コントローラーなどの専用アプリケーションをサポートしています。その他、油圧ポンプ、

リニア・アクチュエーター、電動機など機械装置の速度や位置制御といったユースケースもあります。自動化を進める産業が作業を一元化する方向にある中、モーション・コントロールがより多くのワークロードを処理するニーズが発生しています。その結果、工場のさまざまなレベルで帯域幅の拡大や情報の透明性が求められるようになりました。

例えば、次世代PLCマシンのレスポンス時間はマイクロ秒という低いレンジ(32.5μsから125μsの間)です。TSNは、このような変化に対応するために開発されました。これは、規格化され信頼できる産業通信技術の進化が次の段階に入ったことを表しています。802.1QbvなどのTSN規格は、タイム・センシティブなトラフィックがネットワークを効率的に移動できるようなQoSの仕様を可能にします。MarketsandMarkets社のリサーチによると、モーション・コントロールの市場は、2022年までに228.4億米ドルに達すると予測されています。<sup>2</sup>生産の増加に伴いスピードと精度の向上を模索している金属製品や機械製造業が、これを積極的に採用するセグメントとなるでしょう。

### ロボティクス

産業用ロボットとは、人間に代わり危険な作業や反復作業を正確に行うために使用される、プログラム可能な機械装置です。産業用ロボットは、運用環境によって固定型(ロボティック・アーム)、モバイル型(無人搬送車)、協調型(ピック・アンド・ブレース・ロボット)に分類されます。標準的な通信プロトコルが存在していないことが、ロボティクスでの主な課題となっています。ロボットメーカーは、カスタマイズされたプロトコルを多数使用するため、システム・インテグレーションの時間や費用の増大につながっています。最新のロボティクスは人工知能(AI)、マシンビジョン、予知保全を1つのシステムに統合するので、センサーやアクチュエーターは高帯域幅のデータをリアルタイムでストリーミングする必要があります。EtherCAT\*やPROFINET\*などのリアルタイム制御向けには特定のチャンネルを使用し、高帯域幅の通信(TCP/UDP)には別のチャンネルを使用するのが一般的なソリューションです。高帯域幅のトラフィック(100MB/sから1GB/s)を生成するアプリケーションに、2つの別個の通信チャンネルを使用するのは非効率的です。TSNは高帯域幅のトラフィックとリアルタイム・コントロール・トラフィックのための共有通信チャンネルを提供します。

### マシンツーマシン(M2M)通信

M2M通信とは、人間とのやり取りを介さずに2つのマシンが通信することです。優れた運用効率を推進するために、制御や分析の異なるアプリケーション間でデータを共有・有効化することで、製造業を再編成しています。TSNは、当初接続されていなかった専用コントローラーを接続することにより、M2M通信を向上させます。これはTSNに対応するスイッチを経由して接続されているTSNマシン(TSNに準拠したエンドポイント)のネットワークを経由することで可能になります。

M2M通信は、セルラー・ポイントツーポイント接続を通して機器/デバイス操作の遠隔管理を可能にします。図6は、4つの異なるTSNマシン全体で、通信を連携させる監視PLCがある生産セルを表しています。中央の構成メカニズムを通して、IEEE 802.1Qccは異なるコンポーネントの管理を許可し、コンポーネント同士の通信に向けた標準的なUNIを規定します。M2M通信のもう1つの例として、ほかのコントローラー、コンベヤーベルト、(同じネットワーク・レイヤーにある)ほかの制御機器と通信して、製品の製造を制御または監視するPLCが挙げられます。

### 電力およびエネルギー

通信ネットワークは、生産プラントでの電力やエネルギーのアプリケーション情報やデータの交換において重要な役割を果たします。変電所はネットワークの主要コンポーネントです。変電所の多くは、電力システム内において従属局の1つとなっており、送配電の制御と監視、データの記録、電力設備の監視保護など、多くの機能があります。最新の変電所は、変電所の通信標準であるIEC\* 61850経由で通信します。並列冗長性プロトコルや高可用シームレス冗長性などの冗長化による対策を導入することで、タイム・センシティブなトラフィック・データの損失を防ぐことができます。しかし、冗長化による対策がデータの納期順守を保証するわけではありません。IEC\* 61850ネットワーク上でさえ、変電所内の単一のイベントやデータ転送によりネットワーク・トラフィックの量が大幅に増加してしまうことがあります。

変電所内で同時に行われる膨大な通信量を考える際、帯域幅の可用性は非常に重要な問題となります。アリゾナのSalt River Project\*など、公共事業にとっての課題は、ネットワークが混雑した場合の重要なデータストリーム用のネットワーク可用性を確保することです。TSNは、ネットワーク・レイヤーで時間確定性のある、安全かつ信頼性の高い通信を提供することで、この問題に取り組んでいます。そして、管理レイヤーで上位レイヤーのさまざまなプロトコル(OPC-UA、PROFINET\*、EtherCAT\*など)を許可します。パフォーマンスや生産コストを最適化するためTSNは、システムユーザーが発電所のタービンなどからリアルタイム・データにアクセス可能なクラウドベースのサービスを提供することもできます。

### 石油およびガス

産業用イーサネットは、石油探査や生産に使用されるシステムを監視するための通信規格として使用されています。イーサネットは、石油生産の上流、中流、下流の各段階で必要不可欠です。TSNは、油田生産施設に関連するプロセスや制御ネットワーク向けに時間確定性のある通信を提供することで、石油・ガス産業におけるリアルタイム・アプリケーションの実現に重要な役割を果たしています。石油およびガスの施設は、非常に厳しい環境条件で、かつ地理的にも幅広い地域で運用できる、信頼性が高く、堅固で、大容量な通信ネットワークを必要とします。

図7には、TSNで閉ループを制御するソフトウェアを使用している業界の取り組み、ユニバーサル・ウェルパッド・コントローラー(UWC)が示されています。インテルは、TSNに対応した既製品のハードウェアを、複数のベンダーからのオープンソース・ソフトウェアと併用し、オンショア生産の油井と油田生産施設の監視および制御を確実に行えるようにしています。

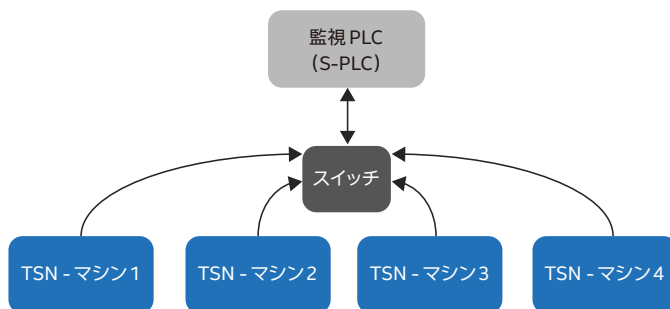


図6 生産セル

## インテルの TSN 対応製品

インテルはディスクリート型および統合型イーサネット・コントローラーと FPGA を含む TSN 製品のポートフォリオを提供しています。インテルは IEEE 802.1Qbv などの TSN 下位規格の実装を紹介するため、さまざまなサイトで (インテル® イーサネット・コントローラー I210 およびインテル® FPGA を使用して) テストベッドを構築しました。インテルはまた、Avnu Alliance\*、インダストリアル・インターネット・コンソーシアム (IIC)\*、国際電気標準会議 (IEC)\* などのオープン・アライアンスによって管理されるエコシステムとも連携し、産業エコシステムの課題に対応するため、これらの規格の策定を行っています。

### インテル® イーサネット・コントローラー I210

インテル® イーサネット・コントローラー I210 は、TSN 対応エンドポイントとして使用するディスクリート型のネットワーク・アダプターです。<sup>3</sup> これは (TSN リファレンス・ソフトウェアを使用して) 産業用アプリケーション向けの IEEE 802.1AS および IEEE 802.1Qbv などの TSN 規格をサポートしています。TSN リファレンス・ソフトウェアは、「tc」ユーティリティを使った TSN の構成方法を実証する C ベースのアプリケーションです (図9を参照)。

このネットワーク・アダプターは、最大 1Gb/s の速度までサポートし、イーサネット・フレームを (特定の送信時刻より前に) システムメモリー (DRAM) から事前に読み込み、送信バッファー内でこのデータを保存します。ネットワーク・アダプターはまた、ローンチタイムをサポートします。すなわち、時間確定性をもってフレームを送信するため「時系列に」トラフィックを形成するアルゴリズムを使用するイーサネット・パケットを取り扱います。開発者が、「タイムアウェアな優先度」のスケジューリング・アルゴリズムを実装したローンチタイムと VLAN タグパケットを組み合わせた場合、イーサネット・フレームを送信する際の不規則性を低減することができます。TSN ソリューションの検証に関心のあるメーカー各社は、ベースボードにこのハードウェアを追加し、自社の工場に TSN が適しているかどうかの評価を開始することができます。

## オープンソースの取り組み

インテルは、スケジュールされたタイムリーなパケット送信 (Tx) を必要とするアプリケーション向けのカーネル・インターフェイスを開発することで、Linux\* プロジェクトに貢献しています。これらのカーネル・インターフェイスは、「SO\_TXTIME」API、earliest txtime first (ETF) スケジューラー (qdisc)、タイム・アウェア・プライオリティ・シェーパ (TAPRIO) スケジューラーの3つの新しいコンポーネントで構成されています。さらにインテルは、リアルタイムのアプリケーションの基本要件である PREEMPT-RT パッチもサポートしています。

「SO\_TXTIME」API は、ソケットが時間ベース Tx のために使用されることを可能にし、コントロール・メッセージのパラメーターを構成します。ETF は時間ベースのアドミッション制御と「earliest deadline first」デキューモードを提供し、TAPRIO はあらかじめ定められたスケジュールを実行することができます。

**PREEMPT-RT:** Linux の場合、標準のカーネルはリアルタイム性能を提供しません。しかし、リアルタイムのプリエンブション・パッチ (PREEMPT-RT) により、リアルタイムのコンピューティング機能の実現が可能になります。PREEMPT-RT パッチは、ノンプリエンブタブル (協調的) なカーネルコードの量を最小限に抑えるよう試みます。<sup>4</sup> 主なメリットとしては、特定のリアルタイムの API を必要とせずに、標準の Linux\* ツールやライブラリーが使えることです。Linux は広く利用され、さらに新しい技術や機能で OS をアップデートすることも可能です。ただし、リソースに制限がある小規模のプロジェクトでは必ずしも可能ではありません。

PREEMPT\_RT Linux\* パッチが提供する主な機能は以下の通りです:

- **スピンドック:** コードの所定のセクションに複数の競合するプロセスがアクセスすると、プロセス同士がお互いに待機しなければならない問題が生じます。スピンドックはこの問題の解決に使用されるロッキングの仕組みです。PREEMPT\_RT は、プリエンブションが許可されている場合にスリープ状態のスピンドックを有効化します。

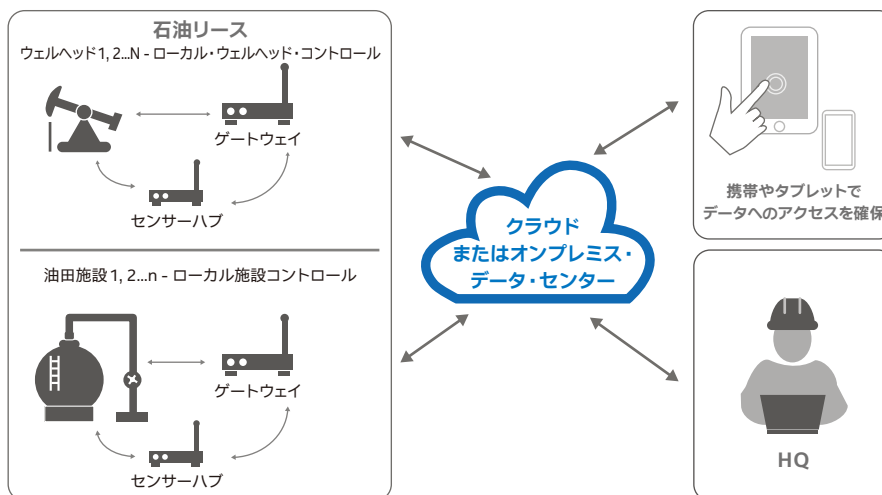


図7 ユニバーサル・ウェルパッド・コントローラー



- **rt\_mutex:** 相互排他オブジェクト (mutex) は、ファイルアクセスなど、複数プログラムの共有リソースへのアクセスを管理するプログラム・オブジェクトです。リアルタイム mutex (rt\_mutex) は、優先順位の逆転を回避するため優先度継承を実装し、高優先度タスクによる共有リソースのブロックを短くします。優先度継承は、綿密に設計されたアプリケーションが時間確定性を失うことなく、高優先度スレッドの重要な部分でユーザー空間ロックの使用を許可します。
- **高分解能タイマー:** 正確な時刻のスケジューリングを可能にし、タイマーの周期的スケジューラー・ティックへの依存性を除去します。

**SO\_TXTIME:** この API は、setsockopt () システムコールにより有効化され、アプリケーションによる時間ベースの送信リクエストを許可します。指定時刻に作動する送信用のパケットは、type SCM\_TXTIME のコントロール・メッセージ・ヘッダーを付けて、sendmsg () を使用して送信します。

**ETF:** このアルゴリズムは、送信キューあたりの時間ベースのスケジューリングを提供します。これは、トラフィック制御レイヤーのキューからパケットを取り出し、netdevice に入れる瞬間をアプリケーションが制御することを許可します。ETF qdisc は、時間に依存したソケットの動作を構成するため各パケットフィールドの「SO\_TXTIME」API と「SCM\_TXTIME」コントロール・メッセージ・ヘッダーの両方に依存し、txtime の値が過去の時点になっているパケットやパケットの送信時間が切れてしまったパケットをドロップします。このスケジューリングでは、TSN アプリケーション向けのトラフィックを形成することを可能にする「ローンチタイム」(または「タイム・ベースド・スケジューリング」)として知られる機能を提供しています。ETF は複数のソケットからのパケットを送信時間の早い順からソートし、ネットワーク・インターフェイス・コントローラー (NIC) に送信します。これはまた、(NIC がサポートする場合は) パケットのハードウェアへのオフロードより、さらに正確な時間で送信が可能になります。

**TAPRIO:** このアルゴリズムは、あらかじめ生成されたタイムシーケンスにより、トラフィック・クラスをスケジューリングします。TAPRIO qdisc は、ゲートステートのシーケンスを設定します。各ゲートステートが、トラフィックの送信を許可し、ネットワーク管理者がトラフィック・クラス向けのスケジュール設定を可能にします。

### インテル® FPGA

TSN に対応したシステムの市場投入までの時間を短縮するため、インテルは、FPGA ベースの TSN エンドポイントおよびスイッチも推進しています。OEM、ODM、産業機器メーカーはインテル® FPGA を使用して、市場に一番乗りすることができます。それにより、投下資本利益率も改善し、自社製品も産業用 IoT に適したものになります。新しい TSN 規格が承認された場合や既存の規格が変更された場合、デバイスが常に最新の TSN 機能をサポートするよう、開発者は迅速にインテル® FPGA を再構成します。

産業用システムでの使用に向け、インテル® FPGA で TSN を実装すべき理由は以下の通りです<sup>5</sup>：

- **FPGA ベースの設計は再プログラムが可能:** FPGA は、規格の変更に応じた再プログラムが可能で、顧客企業は効率性を向上し、現行ソリューションの機能を拡大することができます。

- **ワークロードの一元化および加速:** ネットワーク・トラフィックの増加により、データパケットの転送や拡張において課題が生じ、システムのコンピューティング機能を一新する必要が出てきました。システム性能を加速するために開発者は、CPU の作業をインテル® FPGA にオフロードさせて、システムを最適化することができます。
- **フレキシブル I/O:** インテル® FPGA で、TSN とその他の産業用イーサネット・プロトコルを 1 つのデバイス上に実装することが可能になります。
- **機能上の安全性とセキュリティの実現:** TSN は未接続のシステムを接続するため、機能上の安全性とセキュリティが考慮事項となります。インテル® FPGA、ツール、IP は IEC\*61508 安全規格の認証を取得しています。

### TSN に準拠した次世代のインテル製品

インテルは、転送制御向けネットワーキング機能やパケットフローのシェーピングや優先順位付けを有効化するため、TSN のサポートを組み込んだ製品開発をしていく予定です。

これらの製品の開発計画は以下の通りです：

- エンドツーエンド仮想チャネル向けの機能、L2 および LLC キャッシュ向けの CAT 技術、PCIe\* PTM サポート、キャッシュ管理最適化の指示を提供することで、シリコンでのリアルタイム・コンピューティングの向上

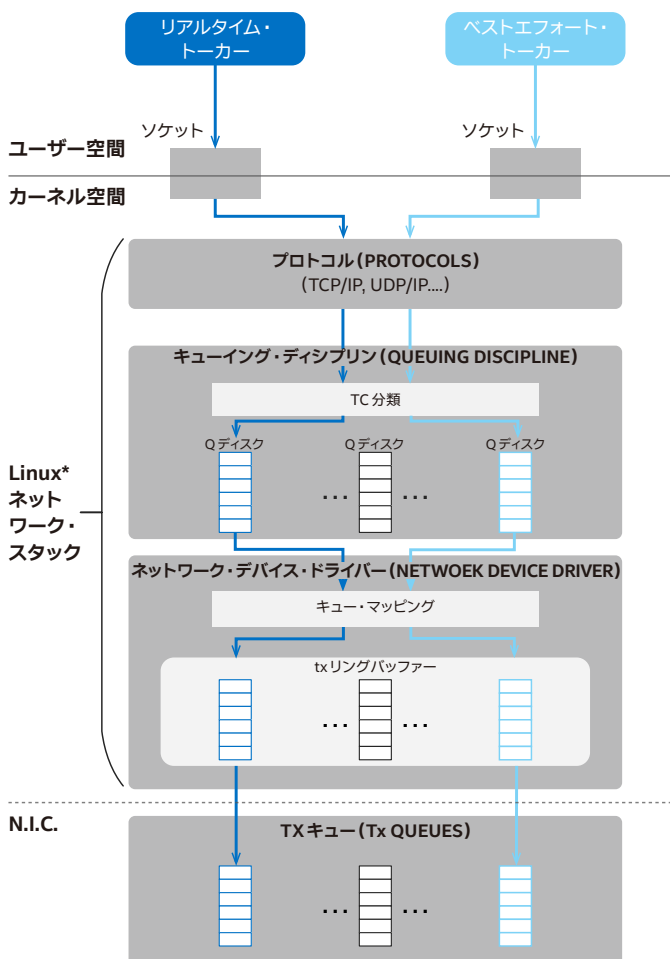


図 8 Linux\* ネットワーキング・スタック

- オープンソース・リファレンス・スタックの提供により(仕様に新規導入されたPub/Sub 拡張機能を使用して TSN にマッピングするため) OPC-UA などの通信モジュールウェアを実証
- ネットワーク構成デリバリー・メカニズムを規定する IEEE/IEC\* などの規格化団体との連携

図9では、Linux\* TSN コントローラー・スタック向けのリファレンス・アーキテクチャーが示されています。OPC UA スタック、「tc」ユーティリティ、Linuxptp\*、OpenAVNU スタック、IOTG TSN Ref SW を含むすべてのユーザー空間スタックは、ソケット・インターフェイスを経由して Linux\* カーネルと通信します。TSN Ref SW には、「tc」ユーティリティを使用して TSN を構成し、ソケット・インターフェイス経由でハードウェアにトラフィックを送信する方法を紹介するスクリプトが含まれています。具体的に述べると、I210でのローンチタイム機能および TSN Ref SW サンプルアプリには、ソケット・インターフェイスの使用法と、ソケット制御メッセージの SO\_TXTIME フィールドに、パケットごとの送信時間の設定方法を示すコードが含まれています。

オープンソース・コミュニティへの参加やオープンソース・インフラストラクチャー(スケジューラー、ソケット)の構築への投資を通じ、インテルは顧客企業の柔軟で拡張可能なソリューション構築をサポートします。TSN 向けのインフラストラクチャーがあれば、顧客企業はアプリケーションを容易に移植することができ、総所有コストを削減できます。パケットが異なるレイヤーを横断する際のレイテンシーを低減するため、インテルはデータと構成パスを規格化し、遅延のないパケットの処理能力を高めています。カーネルとそのネットワーク・スタックは、下位のハードウェア・プラットフォームと TSN

コントローラーのためのハードウェア抽象化レイヤーを形成します。この抽象化レイヤーで顧客企業は、下位レベルのデバイスドライバーを管理するためのリソースを使う必要なく、開発やイノベーションを継続できます。

さらに、アプリケーション・レベルの抽象化レイヤーのおかげで、顧客企業はハードウェアを調整する必要なくソリューションを刷新し、価値を付加することができます。インテルは、I210コントローラー向けの IEEE 802.1Qbv に倣う TSN リファレンス・ソフトウェアを通して、この機能を提供しています。

## 日立製作所 TSN テストベッド

TSNの実用化という側面を考えてみます。インテルは現在日立製作所と提携して、日立製作所の次世代製品への TSN 技術の活用に取り組んでいます。インテルと日立製作所は、リアルタイムのコンピューティングや分析ワークロードなどの日立製作所の技術要件をサポートするため、TSN テストベッドの共同開発を行っています。TSN テストベッドは、TSN 機能やベンダーの相互運用性を実証するために相互通信する、2つの自動化コントローラーの基本的なプロトタイプです。

図10は、TSN テストベッド設定の簡略図です。ここでは、リアルタイム通信を実証するため、インテル® イーサネット・コントローラー I210 搭載の TSN に対応する2つのエンドポイントが Cyclone® V FPGA を通じて接続されることが示されています。テストベッドには、TSN 拡張用のリアルタイム Linux パッチやインテルのテクニカルサポートを含むリファレンス・ソフトウェアなどのコンポーネントが含まれます。

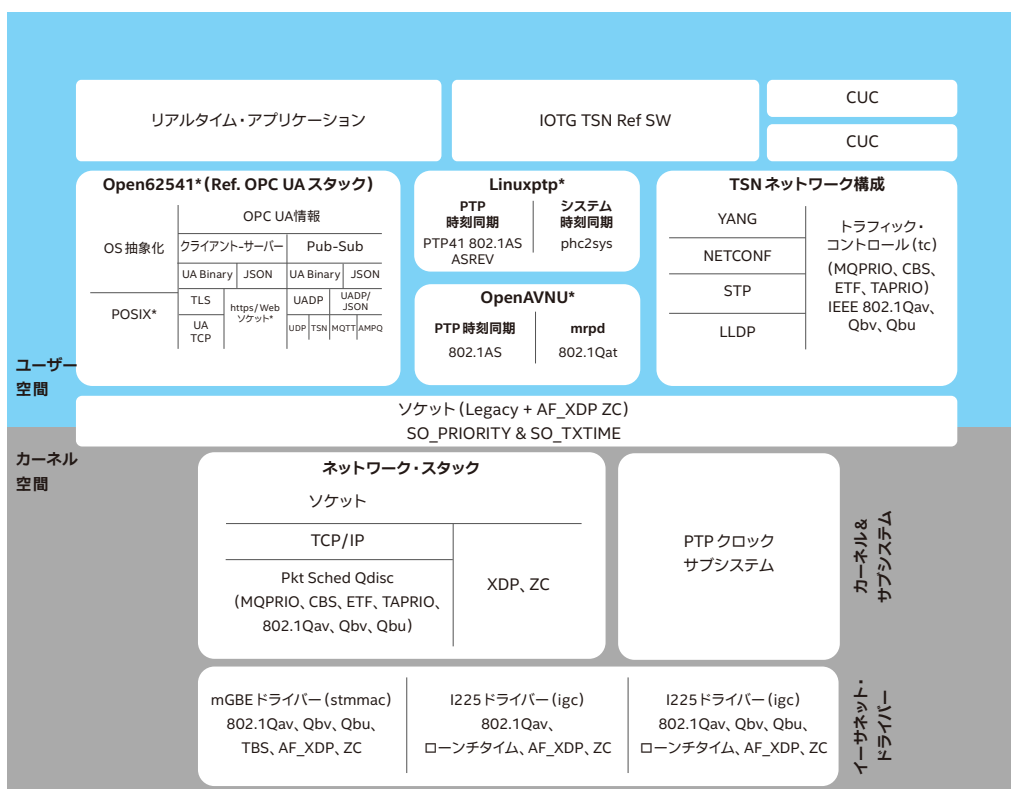


図9 Linux\* TSN コントローラー・ソフトウェア・アーキテクチャー (参照のみ)

## TSNの採用

工場におけるインフラストラクチャーの更新は複雑でコストがかかることが多いため、TSNの採用は緩やかなプロセスになります。インテルは顧客企業のTSNの採用をサポートするため(ネットワーク・アダプター、FPGA、次世代製品などの)製品スイートを提供しています。TSN導入の決定は、プロジェクトがグリーンフィールドであるかブラウンフィールドであるかに左右されます。

「ブラウンフィールド」とは、既存のインフラストラクチャーを利用したプロジェクトのことです。このような場合、エンドデバイスがIEEE 802.1AS規格に準拠するように、インテル® イーサネット・コントローラーI210を顧客企業のベース・ボード・デザインに差し込むことができます。こうすることにより、顧客企業はコスト効率よくTSNを評価することができます。さらに、顧客企業はIEEE 802.1Qbv規格を有効化するトラフィック制御インターフェイス・モジュールを使用可能です。図9のTSNネットワーク構成ブロックを参照してください。ネットワーク内でTSN規格に準拠したデバイスを接続するために、顧客企業はインテル® FPGAのブリッジ(スイッチ)機能を使用可能です。顧客企業はまた、TSNネットワークを非TSNネットワークに接続するプロキシ機能を開発したベンダーと連携して、ブラウンフィールド・プロジェクト向けのTSNを評価することもできます。このプロキシ機能は、当初の製造インフラストラクチャーやアプリケーションを引き続き保持しようと考えている顧客企業(例えばPROFINET\*ユーザー)には便利かもしれませんが、運用コストの面では間接費の増加につながる可能性もあります。ブラウンフィールド・プロジェクトは、工場における技術導入のビジネスチャンスという面ではグリーンフィールド・プロジェクトとは大きく異なります。「グリーンフィールド」とは顧客企業が新規インフラストラクチャーを開発するプロジェクトのことです。

このようなビジネスチャンス向けにインテルの次世代製品は、TSN機能を提供するだけでなく、機能上の安全性、リアルタイムのコンピューティング機能、インバンドECCなどの機能も提供します。次世代製品の使用により、顧客企業はより低いBOMコストでより多くの機能が得られ、また、その製品を複数のアプリケーションに使用することができます。例えば、ロボティクスのアプリケーションはリアルタイム機能を必要としますが、人間とのインタラクションができるコボット(協働ロボット)など、特定のタイプのロボットには機能上の安全性が極めて重要になります。

インテルはまた、標準カーネルTSN API向けのサポートとともに、PREEMPT-RTカーネルパッチを搭載したLinux\* Yoctoなどの開発者向けツールの提供も予定しています。さらに、OPC-UA(Client/Server, PubSub)、Linuxptp\*(802.1AS, 1588)、デモ・アプリケーションなどのTSNミドルウェア・スタック向けリファレンス・ソフトウェアの提供も予定しています。その他、顧客企業が下位プラットフォームの詳細を知らなくても、リアルタイムのワークロード向けプラットフォームを構成できるソフトウェア・ツール・キットも提供する予定です。このような機能により、顧客企業は幅広い機能を利用でき、グリーンフィールドのプロジェクトを設計し、開発所要時間や市場投入までの時間を短縮することができます。

インテル® FPGAはさらに、柔軟性を提供し、グリーンフィールド・プロジェクトにおけるエンドポイントやスイッチとしても使用されます。また、FPGAを基盤としたさまざまな既製品(インテルのパートナー企業から入手可能)によって、スピード、TSN規格の実装、ネットワーク・ソフトウェア・パッケージに関する多様な選択肢が提供されています。これらの規格の変更に合わせ、インテル® FPGAは迅速に再構成することができるため、最新のTSN機能がデバイス上でサポートされ、顧客企業はTSN機能のメリットを十分に享受することができます。

## まとめ

さまざまな市場調査によると、TSNによる設備稼働の効率化が進むにつれ、今後10年で、リアルタイム接続向けのテクノロジー市場ではTSNの導入がますます加速されます。TSNは、100Mb/sで規定されている従来の産業用イーサネット・ネットワークと比べ大きく優位性をもつ1Gb/sや5Gb/sの高速送信をサポートします。

開発者はリアルタイム性を必要とするアプリケーションを提供するために、インテルが開発したカーネル・インターフェイス(SO\_TXTIME、ETF、TAPRIO)を試すことが可能です。図10では、インテルが顧客企業へ提供予定の抽象レイヤーの一部であるソケットAPIが示されています。OEM/ODMのプロダクト・マネージャーは、OPC-UAなどのハイレベルな抽象化レイヤーやTSNを使用した製品の設計を開始し、インダストリー4.0パラダイムのニーズに対応するTSNを順守した製品を設計することが奨励されています。製造業界は、マシンの製造者や機器提供者(OEMやODM)に、TSNに準拠した製品の供給を促すことにより、工場でのTSN採用がより容易になります。

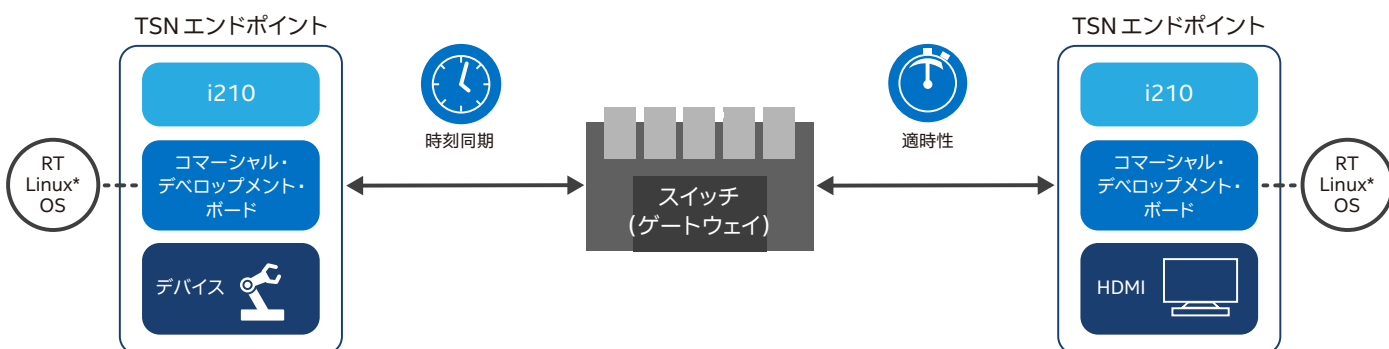


図10 テストベッド設定サンプル

メーカーは、これらのTSN準拠製品を使用して現行のアプリケーションやソフトウェア・スタックを評価、インフラストラクチャーのアップグレード方法を決定することができます。

インテルは、さまざまなサイトでTSNテストベッドの構築を開始し、顧客企業がTSNやそのメリットについて学べるようにしています。規格の開発が進むにつれ、これらのテストベッドにより、顧客企業がTSN技術を理解し、それを特定の技術要件に適用する理想的な環境が整ってきています。さらに、これらの規格の策定や開発に影響を与えることも可能です。

インテル®アーキテクチャー上でTSN規格とリアルタイム機能を組み合わせることで、顧客企業に柔軟で拡張可能なコンピューティングを提供し、産業用アプリケーションを幅広くサポートできます。次世代製品でTSNの導入を考えている顧客企業は、インテルのアカウント・マネージャーに相談して、ソリューションを検討してください。

## 詳細情報

- インテルのTSNリファレンス・ソフトウェアの詳細については [GitHub\\* IOTG TSN Reference Software \(英語\)](#) を参照してください。
- インテル製品での設計には [Resource Design Center \(英語\)](#) を参照してください。



1 [https://avnu.org/knowledgebase/theory-of-operation/ \(英語\)](https://avnu.org/knowledgebase/theory-of-operation/)

2 [https://www.marketsandmarkets.com/PressReleases/motion-control.asp \(英語\)](https://www.marketsandmarkets.com/PressReleases/motion-control.asp (英語))

3 [https://www.intel.com/content/dam/www/public/us/en/documents/datasheets/i210-ethernet-controller-datasheet.pdf \(英語\)](https://www.intel.com/content/dam/www/public/us/en/documents/datasheets/i210-ethernet-controller-datasheet.pdf (英語))

4 [https://wiki.linuxfoundation.org/realtime/documentation/technical\\_details/start/ \(英語\)](https://wiki.linuxfoundation.org/realtime/documentation/technical_details/start/ (英語))

5 産業用オートメーション: <https://www.intel.co.jp/content/www/jp/ja/industrial-automation/products/programmable/applications/automation.html>

6 [https://www.marketsandmarkets.com/PressReleases/time-sensitive-networking.asp \(英語\)](https://www.marketsandmarkets.com/PressReleases/time-sensitive-networking.asp (英語))

本資料に記載されているインテル製品に関する侵害行為または法的調査に関連して、本資料を使用または使用を促すことはできません。本資料を使用することにより、お客様は、インテルに対し、本資料で開示された内容を含む特許クレームで、その後作成したものについて、非独占的かつロイヤルティー無料の実施権を許諾することに同意することになります。

本資料は、(明示されているか否かにかかわらず、また禁反言によるものとよらずにかかわらず)いかなる知的財産権のライセンスも許諾するものではありません。

ここに記載されているすべての情報は、予告なく変更されることがあります。インテルの最新の製品仕様およびロードマップをご希望の方は、インテルの担当者までお問い合わせください。

本書で説明されている製品には、エラッタと呼ばれる設計上の不具合が含まれている可能性があり、公表されている仕様とは異なる動作をする場合があります。そのようなエラッタは、インテルの保証範囲外です。現在確認済みのエラッタについては、インテルまでお問い合わせください。

本書で紹介されている注文番号付きのドキュメントや、インテルのその他の資料を入手するには、1-800-548-4725 (アメリカ合衆国)までご連絡いただくか、[http://www.intel.com/design/literature.html \(英語\)](http://www.intel.com/design/literature.html (英語)) を参照してください。

インテル®テクノロジーの機能と利点はシステム構成によって異なり、対応するハードウェアやソフトウェア、またはサービスの有効化が必要となる場合があります。実際の性能はシステム構成によって異なります。絶対的なセキュリティを提供できるコンピューター・システムはありません。詳細については、各システムメーカーまたは販売店にお問い合わせいただくか、<http://www.intel.co.jp/> を参照してください。

絶対的なセキュリティを提供できるコンピューター・システムはありません。

Intel、インテル、Intelロゴは、アメリカ合衆国および/またはその他の国におけるIntel Corporationまたはその子会社の商標です。

\*その他の社名、製品名などは、一般に各社の表示、商標または登録商標です。

インテル株式会社

〒100-0005 東京都千代田区丸の内3-1-1

<http://www.intel.co.jp/>

©2019 Intel Corporation. 無断での引用、転載を禁じます。

2019年9月

341209-001JP  
JPN/1909/TAG/MKTG/YY