

## Application Note

## TI の Sitara プロセッサ マルチプロトコル産業用通信の設計



Zekun Bai, Donna Xu

## 概要

産業用オートメーション システムは、確定的で低レイテンシのリアルタイム通信を実現するうえで、ますます重要な要件を課されています。テキサス インストルメンツ (TI) の Sitara プロセッサ シリーズは、業界をリードするプログラマブルリアルタイム ユニット産業用通信サブシステム (PRU-ICSS) を統合しており、EtherCAT、PROFINET、EtherNet/IP など複数のメインストリーム産業用イーサネットプロトコルをサポートする統合型ハードウェア プラットフォームを提供します。この資料では、産業用通信プロトコルの基本原理、市場開発動向、一般的なプロトコルの土台となる技術メカニズム、TI プロセッサのプロトコル サポート機能と性能指標について説明し、産業用機器のメーカー各社に包括的なマルチプロトコル設計のリファレンスを提供します。

## 目次

1 概要.....	2
2 産業用通信プロトコルの概要.....	3
2.1 産業用通信システムのコンポーネント.....	3
2.2 シリアル フィールドバスから産業用イーサネットへの進化.....	3
3 市場動向とマルチプロトコル要件.....	4
3.1 産業用イーサネットの市場規模.....	4
3.2 マルチプロトコル共存の現状.....	4
3.3 統合プラットフォームの必要性.....	4
3.4 TI のマルチプロトコル設計のコア バリュー.....	4
4 メインストリーム産業用プロトコルの技術的概要.....	5
4.1 EtherCAT (制御オートメーション技術用イーサネット).....	5
4.2 PROFINET RT/IRT (リアルタイム産業用イーサネット).....	7
4.3 EtherNet/IP (一般的な産業用プロトコル).....	7
5 TI プロセッサのマルチプロトコル サポート設計.....	8
5.1 主要技術: PRU-ICSS サブシステム.....	8
5.2 マルチプロトコル アーキテクチャのマルチプロトコル.....	8
5.3 プロセッサ選択マトリクス.....	9
5.4 産業用プロトコル サポート マトリクス.....	10
5.5 ソフトウェア開発契約モデル.....	10
6 まとめ.....	11
7 参考資料.....	12

## 商標

すべての商標は、それぞれの所有者に帰属します。

## 1 概要

産業用オートメーションシステムの中核は、さまざまなコンポーネント間で信頼性が高く効率的な通信を実現することです。産業環境 (PROFIBUS、CAN、Modbus など) で使用されている従来のシリアル フィールドバス プロトコルは技術的に成熟していますが、これらのプロトコルは帯域幅の制限、低スケーラビリティ、高レイテンシの影響を受けます。Industry 4.0 と知的生産システムの急速な発展に伴い、産業用イーサネット プロトコルが登場し、産業用オートメーション向けの標準的な通信インフラとなってきました。

マルチプロトコルの共存は、産業用システムで一般的な現象です。地域によってプロトコルに関する優先順位が異なるため、機器メーカーにとって、統合型ハードウェア プラットフォームを使用して複数のプロトコルをサポートする方法が課題になっています。TI では、PRU-ICSS サブシステムを Sitara プロセッサに統合し、柔軟で効率的なマルチプロトコル通信エンジンを実装するとともに、産業用機器メーカーに統合型の設計を提供することで、この課題に対処してきました。

## 2 産業用通信プロトコルの概要

### 2.1 産業用通信システムのコンポーネント

産業用オートメーションシステムは、次の4つの主要な要素で構成されています。

- PLCコントローラ: システムの頭脳であり、ロジック制御、モーション制御、プロセス制御の各機能を提供
- HMI パネル: オペレータのコマンド入力とフィードバック出力用のヒューマン マシン インターフェイス
- 産業用ドライブ: モーションおよびアクション コマンドを実行するモーター コントローラ
- センサ: システム ステータスのリアルタイム監視とフィードバック データの提供

これらの要素は通信ネットワークを介して連携し、効率的な自動生産を実現します。

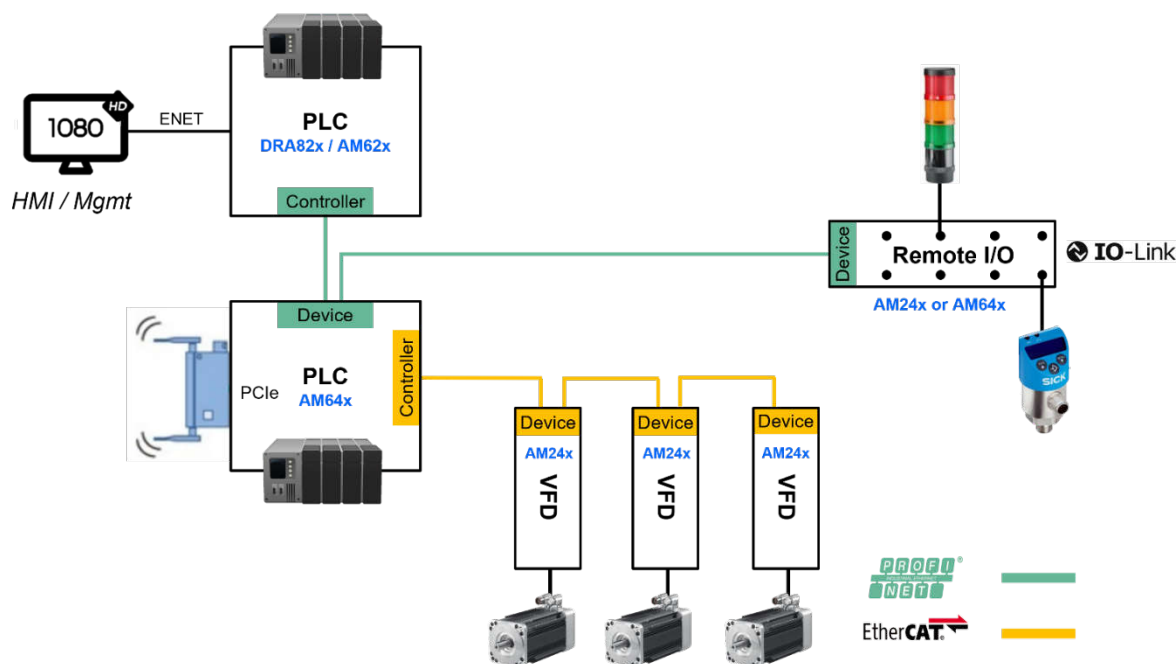


図 2-1. 産業用オートメーション システムのトポロジ ダイアグラム

### 2.2 シリアル フィールドバスから産業用イーサネットへの進化

従来の産業用通信プロトコルは、以下の表に記載されているプロトコルを含め、低速シリアル インターフェースをベースにしています

表 2-1. 従来の産業用通信プロトコルと主な特長

プロトコル	データレート	ノード数	主なアプリケーション
PROFIBUS	12Mbps	126 ノード	ファクトリ オートメーション
CAN	1Mbps	64 ~ 127 ノード	オートメーション システム
Modbus	115K ボー	247 ノード	汎用制御
CC-Link	10Mbps	64 ノード	アジアのアプリケーション

産業用イーサネットの急速な普及に伴い、IEEE 802.3 ベースの複数の産業用プロトコルが登場し、広帯域幅、低レイテンシ、スケーラビリティの向上、ネットワークのフレキシビリティ向上を実現しています。

## 3 市場動向とマルチプロトコル要件

### 3.1 産業用イーサネットの市場規模

PROFIBUS & PROFINET International (PI) 協会からのデータによると、2024 年には 962 万 5,000 個の新規 PROFINET ノードが追加されており、産業用イーサネットプロトコルが幅広く採用されている実態が浮き彫りになっています。世界の産業用通信市場 (PROFINET、EtherCAT、EtherNet/IP、その他プロトコルを含む) は PROFINET\_RT\_IRT\_Deepdive で合計 255 億ドルとなり、継続的な成長を示しています。

### 3.2 マルチプロトコル共存の現状

実用的な産業用アプリケーション:

- **地域差:** 北米の地域では EtherNet/IP が選択される傾向があります。欧州の地域では PROFINET と EtherCAT が支持されています。アジアの地域では複数のプロトコルが共存しています。
- **業界の特徴:** モーションコントロールアプリケーションは EtherCAT または PROFINET IRT を選択する傾向があります。汎用 I/O アプリケーションは複数のプロトコルから選択できます。
- **サプライチェーンの要件:** OEM またはティア 1 のサプライヤは、グローバル サプライチェーンに対応するためにマルチプロトコル サポートが必要になることがよくあります。

### 3.3 統合プラットフォームの必要性

マルチプロトコルの要件に対処するため、産業用機器メーカーは以下の事項を必要とします。

1. 複数のプロトコルをサポートする**単一のハードウェア設計**
2. **ファームウェア スイッチング**または**ブートパラメータによるプロトコル選択**
3. 一式のソフトウェアスタック、ドライバ、および開発ツール
4. **単一ベンダーの技術サポート**

これにより、製品開発コストが削減され、市場投入までの期間が短縮され、グローバル サポートの複雑さが軽減されます。

### 3.4 TI のマルチプロトコル設計のコアバリュー

#### 拡張性と再利用性

- イーサネットベースのすべてのプロトコルをサポートする統合型のハードウェアプラットフォーム。
- 同じ開発ツールチェーンと SDK が異なるプロトコルに適用可能。
- ベンダーサポートのワンストップ対応。

#### 開発効率

- 事前認証済みのプロトコルスタックを使うことで、迅速なアプリケーション開発が可能。
- 包括的なサンプルコードとリファレンスデザインにより、開発サイクルを短縮。
- 通常、カスタマイズされたアプリケーションの開発を開始するために変更が必要なファイルは 1 つのみ。

#### 将来の保護

- 新しい SOC を必要とせずに、新しい低レベル機能をサポートする ICSS + PRU アーキテクチャ。
- プロトコル標準の進化をサポートする、フレキシブルなファームウェア更新メカニズム。
- 製品ライフサイクルの安定性を検証する、長期的なサポートポリシー。

## 4 メインストリーム産業用プロトコルの技術的概要

### 4.1 EtherCAT (制御オートメーション技術用イーサネット)

#### 動作原理

EtherCAT では、逐次処理メカニズムが採用されています。

- **マスター転送:** EtherCAT マスターは、1 つまたは複数のデータグラムを含むテレグラムを生成し、単一のイーサネットフレーム経由で送信します。
- **スレーブ処理:** フレームは各スレーブを通過すると、フレーム用のデータをハードウェア形式で読み取り、コマンドを実行して、リターン データをフレームに書き戻して、CRC を更新します。
- **フレーム転送:** スレーブはフレーム全体を 2 番目のイーサネット ポート経由で転送します。

このメカニズムでは、マスターが各スレーブと個別に通信を行う必要がある従来のイーサネットに特有の非効率性を排除しています。

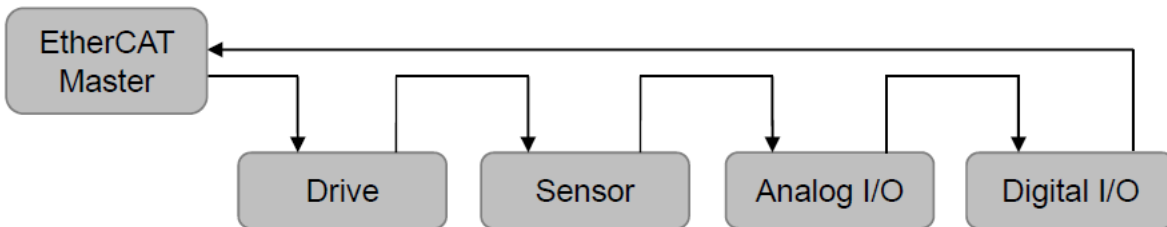


図 4-1. EtherCAT ネットワークの例

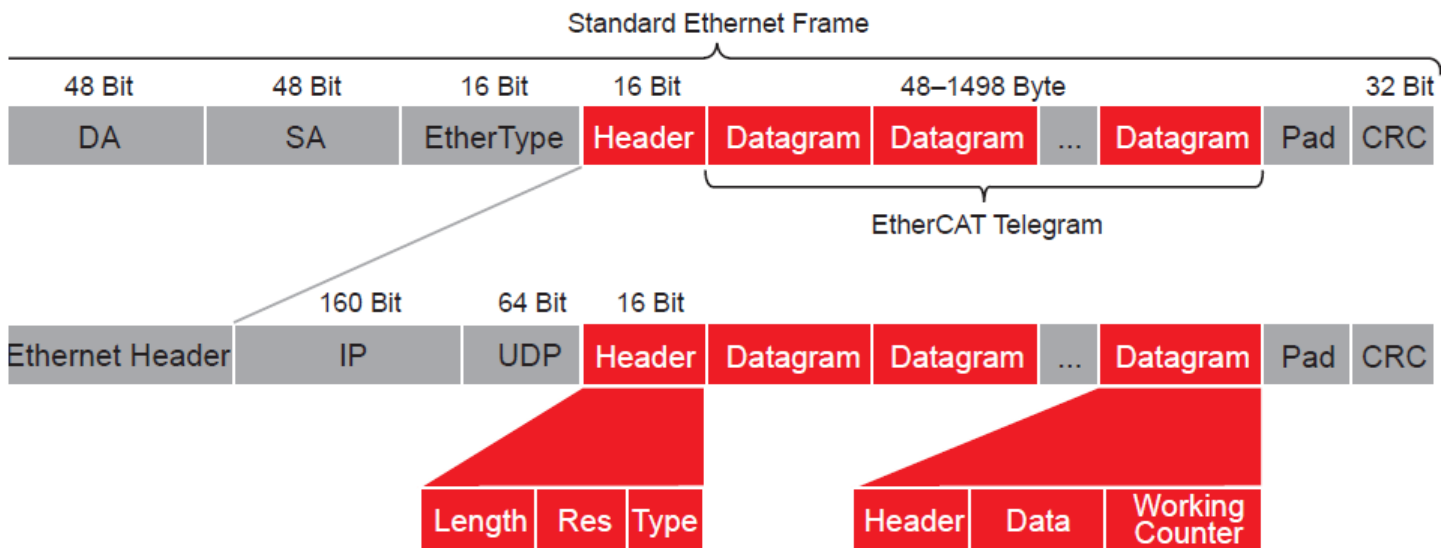


図 4-2. EtherCAT テレグラム

#### 主要な性能指標

- **実効帯域幅使用率:** 100Mbps ネットワークで 90% 超 (従来のイーサネットではわずか 5%)。
- **通信レイテンシ:** エンド ツー エンドのレイテンシが 700 ナノ秒 (ns) 未満。
- **最大スレーブ数:** 65,536 ノード。
- **アドレス空間:** 4GB の論理アドレス空間。
- **サイクル時間:** 31.25 マイクロ秒からのサイクル時間に対応。

#### プロトコルの特徴

- **分散クロック:** すべてのスレーブ クロックは 1 マイクロ秒以内に同期。

- **柔軟なアドレッシング モード:** 物理アドレッシング、論理アドレッシング、マルチキャスト、およびブロードキャスト。
- **フィールドバス メモリ管理ユニット (FMMU):** EtherCAT では、さまざまなスレーブ デバイスを統合された 4GB のメモリ空間にマッピング可能。
- **ネットワークトポロジ:** ライン、スター、ツリー構成など、任意のトポロジをサポート。

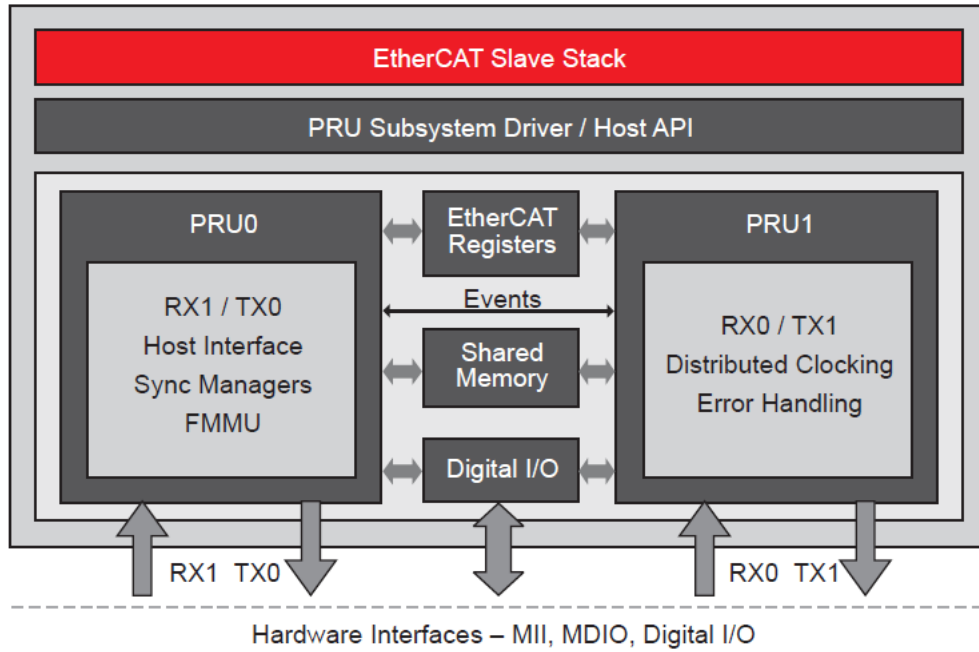


図 4-3. ハードウェア インターフェイス: MII、MDIO、デジタル I/O

## 4.2 PROFINET RT/IRT (リアルタイム産業用イーサネット)

### 通信クラス

PROFINET は、さまざまなリアルタイム要件を満たす複数の通信クラスを定義しています。

#### CC-A (リアルタイム通信)

- サイクル時間: 約 100ms
- アプリケーション: パラメータ データ、周期的 I/O
- 代表的な使用事例: インフラストラクチャとビルディング オートメーション

#### CC-B RT (リアルタイム)

- サイクル時間: 約 10ms
- ソフトウェア ベースのリアルタイム アプローチ
- 代表的な使用事例: ファクトリ オートメーション、プロセス オートメーション

#### CC-C IRT (アイソクロナスリアルタイム)

- サイクル時間: 31.25µs ~ 4ms
- 専用のハードウェア サポートとスイッチング デバイスが必要
- 代表的な使用事例: 多軸モーション コントロール、ロボット

#### CC-D TSN (タイム センシティブ ネットワーキング、開発中)

- PROFINET と TSN 規格の組み合わせ
- 超低レイテンシと超低ジッタをサポート
- ITトラフィックと OTトラフィックの確定的な収束が可能

### 更新時間

- PROFINET デバイスの更新時間は、同じプラント内で異なる可能性があり、その結果、デバイスごとに**サイクル時間**が異なります。
- すべての PROFINET デバイスが少なくとも 1 回データを受信または送信できることが保証される**転送サイクル**の長さは、更新時間が最も遅いデバイスによって決定され、最も低速なデバイスに対応するようネットワークのペースが効果的に調整されます。
- **フェーズ時間**は **sendClock** と呼ばれ、すべての I/O デバイスのコントローラによって定義されます。
- **PROFINET ベース クロック** = 31.25µs
- **SendClock** = SendClockFactor \* 31.25µs
- **更新時間** = ReductionRatio \* SendClock = ReductionRatio \* SendClockFactor \* 31.25µs

IRT モードでは、各送信クロック期間はいくつかのフェーズに分割されます。

- **赤色フェーズ**: RTC3 と時間制約の厳しい管理専用予約されています
- **緑色フェーズ**: その他のフレーム (通常のスイッチ操作のように動作します)
- **黄色フェーズ**: 送信バッファのクリア

## 4.3 EtherNet/IP (一般的な産業用プロトコル)

### アーキテクチャの特徴

- **アプリケーション層プロトコル**: 一般的な産業用プロトコル (CIP) を使用する TCP/IP 上のアプリケーション層プロトコル
- **標準的なイーサネット スタック**: 標準イーサネットの物理層、データリンク層、ネットワーク層、トランスポート層を再利用
- **統合型マルチプロトコル**: 同じ CIP を異なる物理メディア間で動作させることが可能 (CAN 経路で動作する CIP を DeviceNet、専用ネットワーク経路で動作する CIP を ControlNet、イーサネット経路で動作する CIP を EtherNet/IP と呼びます)

### 性能の特徴

- **ノード数の制限**: 無制限で、スイッチおよび施設全体にわたる導入をサポート
- **通信モード**: 効率的なピア ツー ピア スレーブ通信をサポートする完全な生産者対消費者アーキテクチャ

- **互換性:** 標準的なインターネットおよびイーサネット プロトコル スタックと互換

## 5 TI プロセッサのマルチプロトコル サポート設計

### 5.1 主要技術: PRU-ICSS サブシステム

TI Sitara プロセッサのマルチプロトコル サポートコアは、統合型のプログラマブル リアルタイム ユニット産業用通信サブシステム (PRU-ICSS) です

**PRU-ICSS の利点:**

- **ハードウェア サポート:** 専用の通信プロトコルのハードウェア実装をサポートする、低レベルの MII インターフェイス アクセスを提供
- **確定的処理:** 2 つの独立したリアルタイム コアが、予測可能なレイテンシでデータグラムを処理
- **ファームウェアのプログラマビリティ:** EtherCAT MAC レイヤのすべての機能をファームウェアで実装することで、柔軟性が向上
- **コスト効率:** FPGA や ASIC 設計に比べて、コストが低減し、電力効率が改善

### 5.2 マルチプロトコル アーキテクチャのマルチプロトコル

TI のマルチプロトコルの実装は統合ハードウェア設計を使用し、さまざまなファームウェア イメージによってさまざまなプロトコルをサポートします。

**プロトコル選択メカニズム**

- **ブート時の選択:** ハードウェア スイッチまたはソフトウェア パラメータを使用して、ブート時にプロトコルを決定
- **自動検出:** デバイスは自動的にネットワークで待機し、受信したフレームタイプに基づいてプロトコルを選択
- **ファームウェアの独立性:** さまざまなプロトコルが、干渉なしで独立したファームウェア イメージを使用

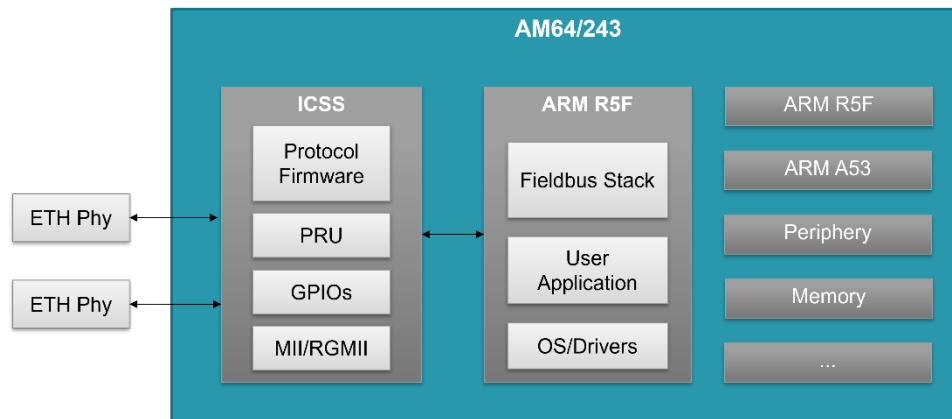


図 5-1. AM64/AM243 でのマルチプロトコル アプローチ

**プロトコル スタック構造 (AM335 上の EtherCAT 例)**

TI の EtherCAT ソフトウェア スタックは、3 つの主要なレイヤで構成されます。

1. レイヤ 2 (データリンク層): PRU ファームウェア
  - – PRU コアは、EtherCAT テレグラムを送受信を処理します
  - – FMMU および Sync Manager を実装します
  - – 分散クロック処理を行います
2. レイヤ 7 (アプリケーション層): EtherCAT スレーブ プロトコル スタック
  - – Arm コアで動作します
  - – Beckhoff のネイティブ スタックまたはサードパーティ スタックをサポートします
  - – 割り込みにより PRU と通信します
3. アプリケーション層: ユーザーの産業用アプリケーション
  - – デバイス固有のロジック (I/O 処理、センサドライバなど) を実装します

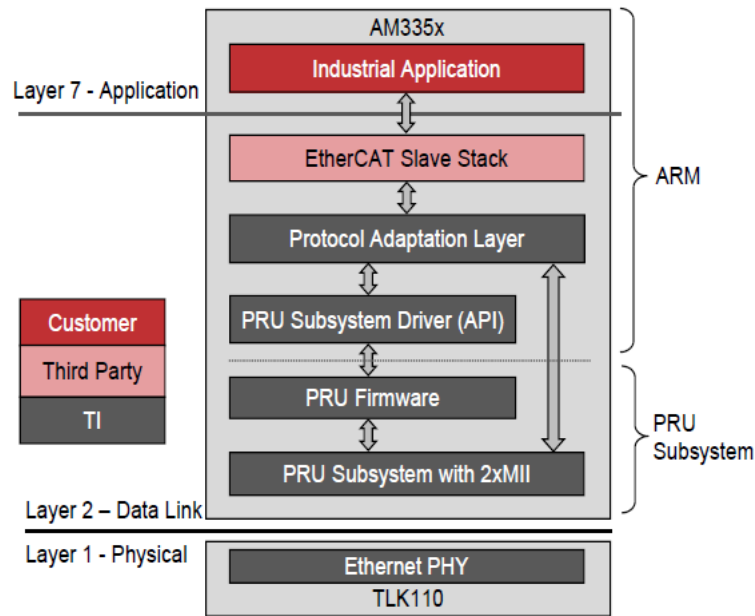


図 5-2. EtherCAT スレーブのソフトウェア アーキテクチャ

### 単一ハードウェア プラットフォームの利点

- 複数の開発ボードやリファレンス デザインが不要
- 同じ回路図と PCB レイアウト
- 共通の電源と EMI 設計
- BOM コストと市場投入までの時間の大幅な削減

### 5.3 プロセッサ選択マトリクス

TI は、産業用通信をサポートする複数のプロセッサを提供しています

表 5-1. TI プロセッサの産業用通信サポートの比較

特長	AM243x	AM62x	AM64x	DRA821	DRA829
最速サイクル時間	約 100µs	約 250µs	200µs 超	約 100µs	約 100µs
R5F/A コア	4x R5F	4x A53	4x R5F + 2x A53	2x A72	2x A72
処理能力	6.4k DMIPS	21k DMIPS	12.4k DMIPS	25k DMIPS	25k DMIPS
コントローラ サポート	あり	あり	あり	あり	あり
スレーブ サポート	あり	なし*	あり	なし*	なし*
マルチプロトコル サポート	あり	なし	あり	なし	なし
ギガビット イーサネット ポート	最大 5	2	最大 5	最大 5	最大 9
ICSS 点数	2x	標準 ETH	2x	複数	複数
PCIe/USB3.0	1 レーン / USB3	USB2	1 レーン / USB3	4 レーン / USB3	8 レーン / USB3

## 5.4 産業用プロトコル サポート マトリクス

**表 5-2. 産業用プロトコルの主な特長の比較**

特長	PROFINET	EtherCAT	EtherNet/IP	IO-Link
認証規格	Spec 2.45	Beckhoff SSC + TI スタック	ODVA CT21	V1.1.4
サイクル時間	250µs IRT	50µs DC	標準イーサネット	400µs (最大 8 ポート)
主な特長	分散クロック、共有デバイス / 入力	分散クロック、CoE オブジェクト ディクショナリ	標準オブジェクト、DHCP/BOOTP	すべてのフレームタイプとポーレート
信頼性	システム冗長性 S2、MRP	フレキシブルなトポロジ	ネットワーク冗長性 DLR、ACD	低 CPU 負荷

## 5.5 ソフトウェア開発契約モデル

TI は、お客様のさまざまなニーズに対応できるように、フレキシブルなソフトウェア開発契約モデルを提供しています。

### TI から直接ご購入

- TI が直接提供する包括的なスタック設計
- TI のチームが提供するスタック サポート
- ライセンスはデバイスに包含
- 事前認証取得済みのソリューション
- TI が提供しているすべてのプロトコル スタックをサポートする単一ライセンス

### サード パーティからご購入

- サード パーティのライセンサーから提供されるプロトコル スタック
- サード パーティが提供するスタック サポート
- フレキシブルなライセンス モード (買取、プロジェクトごと、ファミリごと)
- 事前認証取得済みの設計
- プロトコルごとに個別のライセンスが必要

### サード パーティ ソリューション サポート

- デバイス スタック: EtherCAT、EtherNet/IP、PROFIBUS、PROFINET、Powerlink、CC-Link IE TSN、OPC UA TSN、Modbus TCP
- コントローラ スタック: EtherCAT、EtherNet/IP、PROFINET
- 安全プロファイル: FSoE、CIP Safety、PROFIsafe
- ドライブ プロファイル: PROFIdrive、CIP Motion、CiA402

## 6 まとめ

TI Sitara プロセッサ シリーズは、内蔵の PRU-ICSS サブシステムにより、メインストリームの産業用イーサネット プロトコルをサポートする統合ハードウェア プラットフォームを提供します。マルチプロトコル ソリューションには、次のような利点があります。

### コア バリュー

1. **シングル チップ設計:**ファームウェアのスイッチングを通じて実現できるプロトコル選択によって、複数のプロトコルをサポート
2. **業界をリードする性能:**EtherCAT は 700ns 未満のエンド ツー エンド レイテンシを実現し、PROFINET は 31.25µs のサイクル時間をサポート
3. **総合的なエコシステム:**チップから、ソフトウェア スタック、開発ツール、技術サポートに至るまでの統合型ソリューション
4. **コスト効率:**FPGA や ASIC の設計に比べて、**30%** を超えるコスト削減
5. **長期サポート:**安定した製品ライフサイクルと長寿命を確保

### 解決された問題点

#### 拡張性と再利用性

- 必要なコンポーネント (PHY、パワー マネージメントなど) をすべて利用できるフレキシブルな製品ラインアップ
- 事前認証済みのプロトコル スタックによって、カスタマイズ済みアプリケーションへの迅速な移行が可能
- SoC から全プロトコル設計までのワン ストップ対応

#### 開発効率

- イーサネット ベースのすべてのプロトコルをサポートする単一のハードウェア プラットフォーム
- すべてのプロトコルで同じツールと開発フレームワークを使用可能
- 通常、ユーザー アプリケーション開発のために変更を必要とするファイルは 1 つだけ

#### 将来の保護とサポート

- ICSS + PRU アーキテクチャは、新しい SOC を必要とせずに、新しい低レベル機能の追加をサポート
- 長期的なサポート ポリシーにより、製品ライフサイクルの安定性を確保
- フレキシブルなハードウェアおよびソフトウェアのアーキテクチャが、プロトコル標準の進化をサポート

#### アプリケーションの可能性

Industry 4.0 と知的生産システムの進歩に伴い、産業用イーサネット通信は今後も進化と収束を続けるでしょう。将来のトレンドには以下のようなものがあります。

- **TSN 統合:**タイム センシティブ ネットワーキング (TSN) と産業用プロトコルの統合
- **信頼性の向上:**統合セキュリティとネットワーク冗長性のサポート
- **ユニバーサル プラットフォーム:**新規プロトコルと従来のプロトコルの互換性をサポートするプログラマブル ハードウェア プラットフォーム

TI の PRU-ICSS アーキテクチャが、これらのトレンドを取り入れるための強固な基盤を提供することで、グローバルな産業用機器メーカー各社は、フレキシブルで将来を見据えた産業用通信ソリューションを実現できるようになります。

## 7 参考資料

1. テキサス インスツルメンツ、『[マルチプロトコル産業用通信: 次世代の産業用オートメーションを可能にする](#)』、ウェビナー。
2. テキサス インスツルメンツ、『[Sitara™ プロセッサ上での EtherCAT®](#)』、マーケティング ホワイトペーパー。
3. テキサス インスツルメンツ、『[AM64x Sitara™ プロセッサ](#)』、データシート。
4. テキサス インスツルメンツ、『[AM243x Sitara™ マイコン](#)』、データシート。
5. テキサス インスツルメンツ、『[CPU \(PLC コントローラ\) の設計リソース](#)』、製品ページ。

## 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 © 2026, Texas Instruments Incorporated

最終更新日 : 2025 年 10 月