参考資料

Technical White Paper

統合型イーサネット バックボーン:シングル ペア イーサネット (T1L | T1S) でビル オートメーションの効率を向上

Vivaan Jaiswal *DCC-ENET*

1 概要

最新のビル オートメーション システム (BAS) では、インテリジェンスの進化に対して老朽化する物理インフラが追いつかず、その隔たりが拡大しています。最新の HVAC センサや防火センサは、高い周波数のデータ ストリーミングとミリ秒レベルの応答時間を必要としますが、このデータを転送するために使用されている従来のシリアル ネットワークは、帯域幅のボトルネック、高レイテンシ、複雑な多導体配線という問題を抱えています。このホワイトペーパーでは、こうした従来のアーキテクチャに付随する重大なリスクを明らかにし、シングル ペア イーサネット (T1L および T1S) を用いたスケーラブルな解決案を提示します。この資料では、長距離 HVAC 制御向けの T1L、決定論的な防火ループ向けの T1S の技術的利点を分析することで、最大 50% の配線コスト削減とネイティブ IP ベースの基盤を実現する方法を提示します。その結果、セキュアで、将来性を考慮した統合型ビル アーキテクチャが可能になり、イーサネットの長所を活かしてエネルギー パフォーマンスの向上と人命保護に関する安全基準の遵守を両立できます。

目次

1 概要 1
2 概要 2
3 ビルディング オートメーションにおける現在の状況 2
3.1 ビルにおけるインテリジェンスの進化 2
3.2 問題点 3
4 統合型イーサネット エコシステム 4
4.1 アーキテクチャ:コアからエッジへ 4
4.2 ギャップの解消:T1L と T1S 4
5 利点と結果 5
6 まとめ 6

商標

すべての商標は、それぞれの所有者に帰属します。

Copyright © 2026 Texas Instruments Incorporated

2 概要

ビルディング オートメーションで使用される従来のケーブル配線とプロトコルでは、高密度のセンサ データを必要とする最新の HVAC 最適化や、確定的な性能と信頼性が必要とされる重要な防火システムの要件に対応するのが難しく、コスト、複雑さ、リスクの増大につながるおそれがあります。

イーサネット テクノロジーを戦略的かつ階層的に導入することで、将来性を考慮した統合ネットワーク トポロジの基盤を構築できます。この基盤を構成するのは、バックボーンまたは高帯域幅のニーズに対応する標準イーサネット、コスト効率に優れたセンサ コネクティビティを提供するシングル ペア イーサネット (SPE)、拡張距離 PoDL アプリケーション向けの SPE 長距離イーサネット (T1L、IEEE 802.3cg)、および低コストのセンサ ネットワーク向けイーサネット シングル ペア マルチドロップ (T1S、IEEE 802.3ch) です。

このホワイトペーパーでは、T1L イーサネットや T1S イーサネットなどの新しいイーサネット テクノロジーを、一般的に使用されている標準的なイーサネット バックボーンと組み合わせることで、制約のあるサイロ化されたシステムの集合体から高帯域、高効率の統合型プラットフォームへとビル オートメーションを進化させ、高速で信頼性の高いデータの需要とシステム全体の効率要件を満たす方法について説明します。

3 ビルディング オートメーションにおける現在の状況

3.1 ビルにおけるインテリジェンスの進化

過去 50 年の間に、ビル オートメーションの考え方は「シンプルな自動化」から「インテリジェントなオーケストレーション」に移行してきました。しかし、HVAC システムと防火システムにおけるロジック機能とセンシング機能が急速に進化してきた一方、これらのシステムでデータを転送するために使用される物理インフラには、ほとんど進展が見られませんでした。

- **ディスクリート制御の時代 (1970 年代 ～ 1980 年代):** 当時、ビル システムは主に機械式でした。HVAC は単純なサーモスタットとリレー間の接続で構成され、防火はハードワイヤで接続されたポイント ツー ポイント アラーム ループで構成されていました。データ要件はほぼ皆無で、「インテリジェンス」は局所的かつアナログ的でした。
- **デジタル フィールドバスの台頭 (1990 年代 ～ 2000 年代):** ビル管理システム (BMS) の登場に伴い、デジタル インテリジェンスが導入されました。可変風量 (VAV) コントローラ、快適な温度環境を保つための複雑な PID ループ、およびアドレス指定可能な煙探知器も加わりました。こうした追加機器を管理するために、低速のシリアル フィールドバス (RS-485、BACnet MS/TP、LonWorks) が採用されました。これらの追加機器は当時の限られたテレメトリでは問題なく機能しましたが、小さなデータ パケットを定期的に送信するために設計されており、連続ストリーム向けではありませんでした。
- **データ需要の高まりとセンサの急増 (2010 年代 ～ 現在):** いわゆる「データ必須」の時代です。最新の HVAC システムに搭載されているのは、温度管理機能だけではありません。HVAC システムは室内空気の質 (IAQ)、CO_2 レベル、湿度、在室人数、気流の乱れも管理します。防火機能は、シンプルな煙探知の枠を超え、複数指標のセンサ、火炎検出、ビデオベースの煙分析などにも対応しています。

HVAC、防火システムのいずれにおいても効率性は重要です。非効率的なシステムは運用コストの上昇と信頼性の低下につながります。その意味で、最新の HVAC システムは、全サブシステムにおよぶ多数の制御ループを管理し、パフォーマンス係数 (COP) を一定以上の水準に維持してシステムの効率をできるだけ高めるため、適切なタイミングでのデータ伝送に大きく依存しています。

Copyright © 2026 Texas Instruments Incorporated

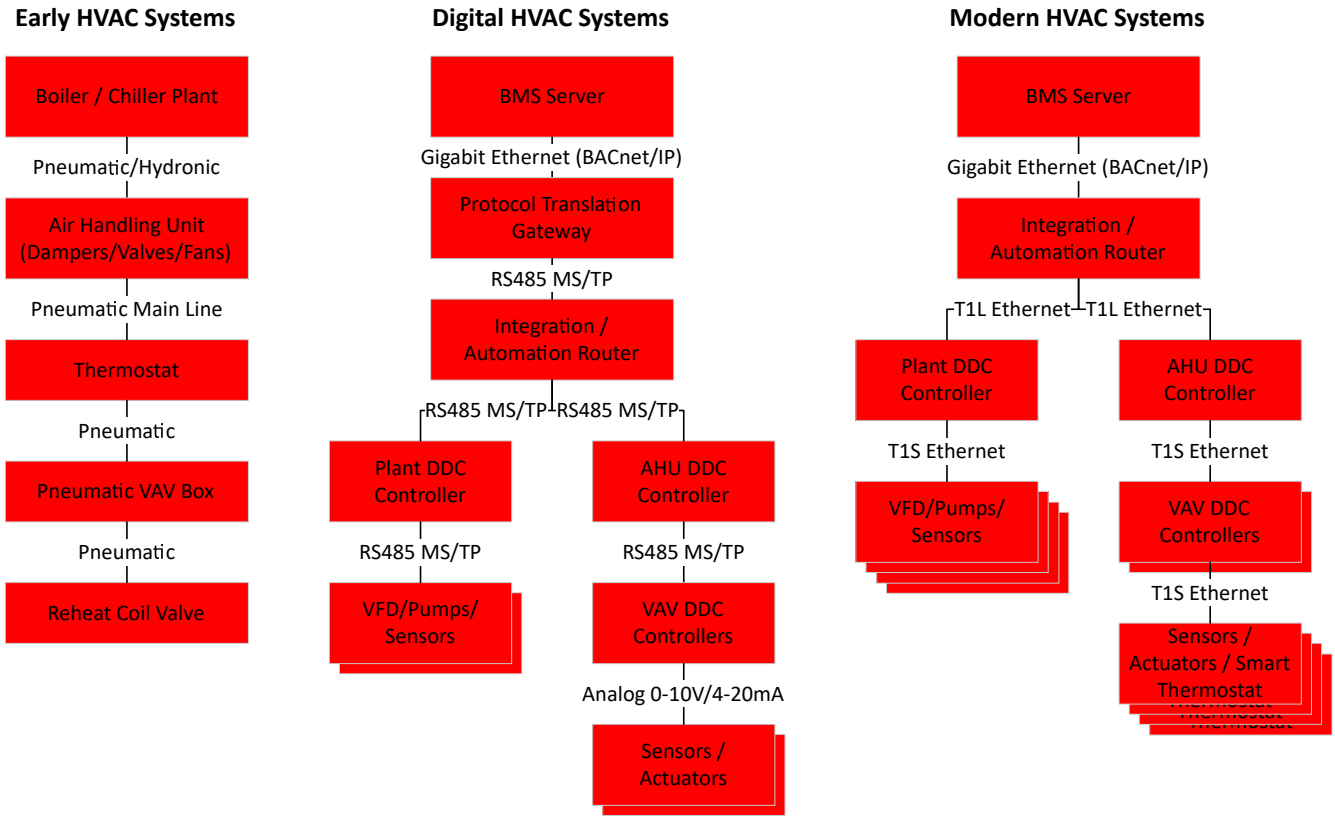

図 3-1. HVAC システムの進化

3.2 問題点

データ ポイントが急増し、リアルタイム応答が求められる中、エッジのインテリジェンスと配線キャパシティの間に根本的なミスマッチが生じています。こうしたミスマッチが、次の 3 つの重大なリスクを招いています。

- **帯域幅のボトルネック (データ ボトルネック)**: 従来のシリアル ネットワークは、一般的に、現代的なデータ フローの「ボトルネック」と呼ばれています。エネルギー監査と予防保守のために高分解能センサを追加すると、低帯域幅のフィールドバスに高いレイテンシやパケット衝突が発生してしまいます。HVAC の場合、こうしたボトルネックは制御ループの遅延につながります。防火システムの場合、ボトルネックによって重要な警報信号が遅延するリスクが発生します。
- **複雑さとコストの問題**: インテリジェンスを向上させるには、電力と信号の伝送用に大がかりで高価な多導体ケーブル バンドルを使わざるを得ないのが一般的です。その結果、人件費、資材費、配線の物理的な設置面積が増加し、既存ビルの改修に法外なコストが発生してしまいます。
- **インテリジェンスの断片化 (サイロ問題)**: 従来のフィールドバスは IP とネイティブに「通信」することができないため、すべてのサブシステム (HVAC、防火、照明) に個別の専用ゲートウェイが必要となります。その結果、データ サイロが発生し、防火システムと HVAC システム間のスムーズな通信が阻害され、煙除去の換気モードがトリガされなくなるため、人命保護に向けたシステム間の統合的な対応が不十分になります。

業界は今、大きな岐路に立たされています。老朽化した低速シリアル ネットワークを継ぎはぎしながら使い続けるのか、それともビルの「神経系」ともいえるネットワーク基盤を根本的に刷新するのか、という選択に迫られているのです。シングル ペア イーサネット (T1L と T1S) を採用することにより、増大するリスクを低減するための手段が得られます。完全にイーサネットベースの物理層に移行することで、システムは断片化された低速アーキテクチャから、高帯域幅で決定論的な統合型なエコシステムに移行します。この移行によって配線の問題が解決するだけでなく、従来のシステムではまず不可能な、真の閉ループ インテリジェンスや統合型の人命保護安全機能も実装できるようになります。

Copyright © 2026 Texas Instruments Incorporated

4 統合型イーサネット エコシステム

4.1 アーキテクチャ:コアからエッジへ

データ需要の増大とインフラの老朽化がもたらす課題を解消するために、ビル オートメーションではパラダイム シフトが求められています。すなわち、断片化したシリアル フィールドバスから、IP ベースの統合型シングルペア イーサネット (SPE) アーキテクチャへの移行です。解決策として提案されているのは、特定のネットワーク機器の入れ替えではなく、ネットワークの到達範囲の拡張です。将来性に優れた最新のビルでは、以下のような階層型のイーサネット アーキテクチャが採用されています。

- **IP バックボーン (コア)**:高速なマルチペア ギガビット イーサネットは、ビル内のデータを運ぶ堅牢な「高速道路」として機能し、ビル管理システム (BMS)、クラウド サーバー、フロアレベルのディストリビューション スイッチをつなぎ合わせる役割を担います。
- **SPE 拡張 (エッジ)**:T1L および T1S イーサネットは、このネットワーク アーキテクチャから末端のデバイスに直接伸びる「毛細血管」のような働きをします。IP を低速なシリアル プロトコルに変換するゲートウェイを経由する方式とは異なり、データは標準イーサネット パケットとしてセンサからコア (およびコアからセンサ) へスムーズに流れます。

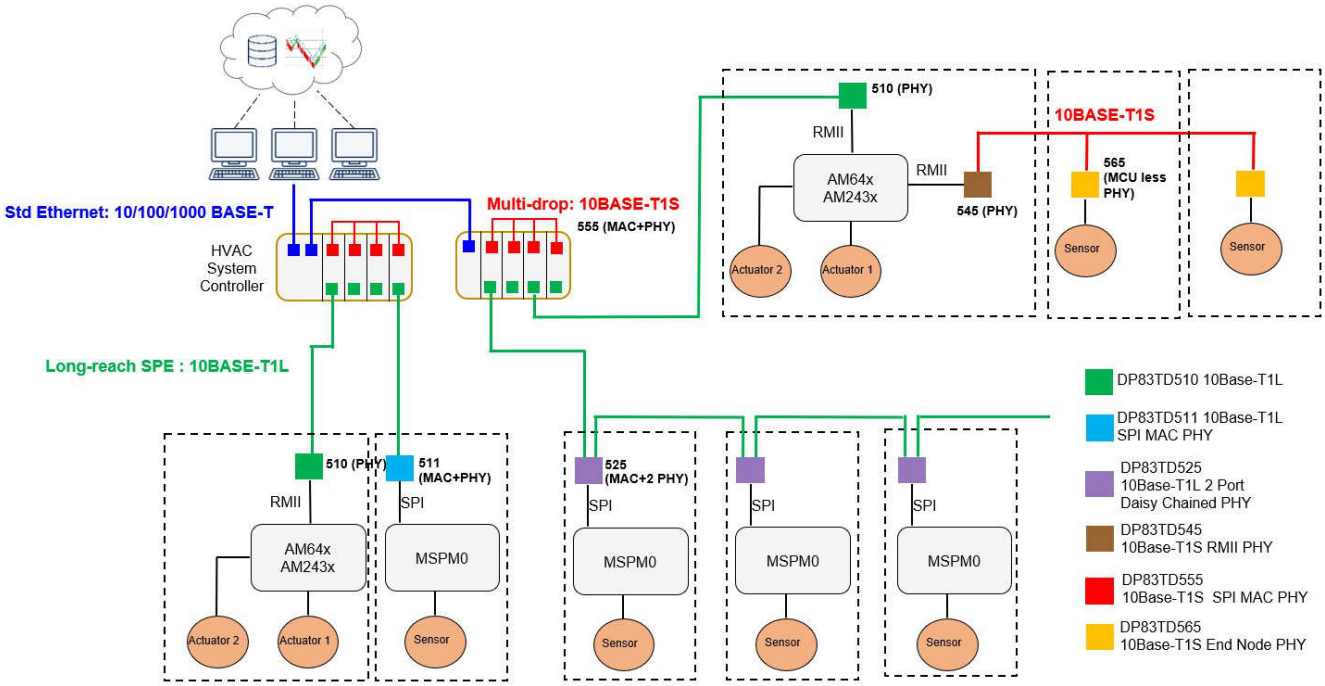

図 4-1. 提案されているシステム アーキテクチャ

4.2 ギャップの解消:T1L と T1S

シングル ペア イーサネットを実装することで、従来のシステムが残した以下の具体的な技術的課題に対応できます。

- **長距離インテリジェンス層 (10BASE-T1L)**:T1L は、RS-485 や M-Bus などの低速の長距離用シリアル リンクを置き換えるように設計されています。一般的に従来の HVAC システムでは、大規模なペイロード転送、ファームウェアの更新、高いレイテンシ、接地ループといった点で問題を抱えており、通信障害につながる可能性があります。最大 2km の通信距離と 10Mbps のスループットを実現する T1L イーサネットは、こうした帯域幅の制約を解消するため、コントローラから離れた場所にあるデバイス (VAV ボックス、屋外環境センサ、リモート HVAC ダンパーなど) に最適です。アナログ フロント エンドに絶縁機能を追加することにより、接地ループが完全に遮断され、電気的干渉に対する通信の堅牢性が向上します。さらに、追加された PoDL サポートを活用できるため、個別の電源ラインが不要になります。T1L PHY が提供する一連のケーブル診断拡張機能により、リアルタイムのケーブル監視、ケーブルの健全性予測、リモート故障検出機能による簡単なデバッグも可能になります。終端が調整可能なため、既存のケーブル インフラストラクチャを通信や電力に使用することもできます。
- **マルチドロップ インテリジェンス層 (10BASE-T1S)**:T1S は、CAN や LIN などの局所的な短距離フィールドバスを置き換えるように設計されています。T1L と同様に、T1S イーサネットは帯域幅の拡大、堅牢性の大幅な強化、PoDL サ

Copyright © 2026 Texas Instruments Incorporated

ポートを実現しており、マルチドロップ イーサネットのオプションも加わっています。従来のマルチドロップ システムは、コントローラからターゲットへのポーリングまたは CSMA/CD トークン パッシングを使用しており、どちらもトラフィックが高い状況では大きく劣化します。複数のスマート コントローラが同時に通信しようとする場合、データ衝突、不確定なタイミング、トークン タイムアウト ループが往々にして発生します。T1S では物理層衝突回避 (PLCA) が導入されており、ラウンドロビン方式を使用してバス上の各ノードに一意の ID と送信機会を割り当てることで、データ衝突を完全に排除します。これにより、ネットワーク輻輳に関係なく、各ノードが決定論的なレイテンシと均等な通信機会を提供します。

T1L と T1S は連携し、高速イーサネット バックボーンと低速エッジ デバイス間のブリッジとして機能します。この統合の付随的なメリットとして、バックボーンからエッジまでのネットワーク アーキテクチャ全体がネイティブ IP をサポートしているため、ゲートウェイ、変換、障害点を少なくすることができます。それぞれのセンサやデバイスをすべて特定の IP アドレスにプログラムすることができるため、ネットワーク上のすべてのデバイスへのアクセスが非常に簡単になります。

5 利点と結果

断片化された従来のフィールドバス アーキテクチャ (RS-485、CAN、LonWorks など) から統合イーサネット バックボーンへの移行は、単なるケーブル接続のアップグレードではなく、ビル インフラストラクチャの経済性、機能性、将来への対応力を根本的に変えるという意味を持ちます。従来のシリアル バスでは、データ レート、距離、確定性に関して物理的に厳格な制約があります。最新のビル分析や人命救助安全システムでは、こうした制約は許容されません。

表 5-1. 従来のプロトコルとイーサネット IP の比較

機能	従来のアーキテクチャ	統合イーサネット アーキテクチャ	結果
帯域幅 | テレメトリの粒度	• 速度は数 Kbps ～ 数 Mbps で、数十のデバイスで共有 • ポーリング間隔は通常大きく、最新の値だけを送信	• 速度は 10Mbps (T1L/T1S) からギガビット (Gbps 以上) の範囲 • 10Hz ～ 100Hz でテレメトリをストリーミング • 完全な波形キャプチャ (振動、圧力、過渡など)	• 収集データの粒度が高いため、VAV ダンパーや AHU ファンなどの重要なシステムの予防保守が可能。 • スループットが高いため、環境の変化に迅速に対応でき、省エネを実現
確定性と制御レイテンシ	• コントローラからターゲットへのポーリングは大きなレイテンシをもたらし、CSMA/CR はノード数が多いと信頼性が低くなり、場合によっては転送が無制限に遅延することがある	• 時間依存型ネットワークにより、最小ジッタで確定的なレイテンシを実現 • PLCA を使用して、割り当てられた時間内でマルチノード システムにおいてパケットを送信	• 高い信頼性と耐障害性を備え、時間要件にも対応した PID ループ ネットワークを実現 • すべてのセンサやノードに、重要なデータの送信機会がある
ネットワーク トポロジ	• シングル ポイント障害が発生すると、デイジーチェーン トポロジ内のネットワークが中断され、すべてのダウンストリーム デバイスが絶縁される	• 複数の種類のトポロジ (スター型、リング型、バス型) や、プロトコル (HSR、MRP など) を使用可能 • シングル ポイント障害に対する冗長性を提供	• 防火ループなど、人命救助に重要なシステムの故障が発生した場合の信頼性が向上
プロトコル相互運用性	• システムは、BACnet MS/TP、Modbus RTU、LonTalk、独自プロトコルなどのサイロ化されたスタックで構成 • IT/OT 統合のため、複数のポイントでゲートウェイが必要	• BACnet IP、Modbus TCP、MQTT などを使用して、ネイティブ IP スタックをエッジに移行 • ゲートウェイが不要 • クラウドから VAV Box などのエッジ デバイスに直接通信	• システムのネットワーク アーキテクチャを統合することで、「インテリジェンス」をエッジにもたらし、将来を見据えたシステムを構築可能 • 複数のサブシステム間での「変換」が不要

Copyright © 2026 Texas Instruments Incorporated

表 5-1. 従来のプロトコルとイーサネット IP の比較 (続き)

機能	従来のアーキテクチャ	統合イーサネット アーキテクチャ	結果
ケーブルと配線	• 複数導体バンドルを使用して、電力とデータを個別に送信 • ケーブルとコネクタが標準化されていない	• ケーブルとコネクタが標準化されている • PoDL を使用して、同じケーブルを介して電力とデータを送信	• ケーブルの重量と配線の複雑さが大幅に低減 • 終端が調節可能なため、既存のケーブル インフラストラクチャを通信や電力に使用することもできます。

6 まとめ

T1L (分散型インテリジェンス用)、T1S (決定論的なローカル マルチドロップ ネットワークおよび防火ループ用)、および標準イーサネット (バックボーンまたはクラウド接続用) を採用することにより、最終的にはビル管理システムにおける断片化を解消することを目標とします。

従来のシステムでは、HVAC と防火システムは別々のバスで動作します。それぞれのシステムでプロトコル変換用のゲートウェイが複数必要となり、データがそこで滞留してしまいます。こうした環境の場合、リアルタイムで分析とデバッグを実行するのはほぼ不可能です。すべてがイーサネットで構成されているアーキテクチャを使用すれば、電力とデータの伝送を 1 本のケーブルに集約し、クラウドからエッジまで同一の通信プロトコルで接続できます。こうした環境の場合、クラウドから IP をベースとする単一のダッシュボードを通じてすべてのエッジ デバイスにアクセスできます。これにより、単にネットワークを変更するだけでなく、自律的な自己最適化型のビル オートメーション システム向けアーキテクチャを実現できます。すなわち、サブシステムが優先順位を競い合う必要がない、同一のインテリジェント ネットワーク基盤に統合されたシステムです。

Copyright © 2026 Texas Instruments Incorporated

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 、 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