

10BASE-T1Lで、 フィールド・デバイスの イーサネット接続をシームレスに実現

著者：Maurice O'Brien、戦略的マーケティング・マネージャ
 Volker Goller、システム・アプリケーション・エンジニア

10BASE-T1Lは、イーサネット向けの新たな物理層（PHY）の規格です。IEEE 802.3cg-2019として、2019年11月7日にIEEEの承認を得ました。この規格の目的は、センサーやアクチュエータといったフィールド・レベルのデバイス（以下、フィールド・デバイス）をイーサネットによってシームレスに接続できるようにすることです。その結果、工場の稼働効率が大幅に向上し、プロセス・オートメーション業界に劇的な変化がもたらされると考えられています。プロセス・オートメーションの分野では、フィールドでイーサネットを利用するのが難しい状況にありました。電力、帯域幅、配線、距離、データ・アイランドといった様々な課題が存在していたからです。また、危険区域（ゾーン0）において本質安全（Intrinsically Safe）を達成した状態でアプリケーションを運用できるようにすることも課題の1つでした。10BASE-T1Lでは、ブラウンフィールドのアップグレードとグリーンフィールドの新規敷設の両方を対象として、そうした課題の解決を図ります。プロセス変数、2次パラメータ、アセットの状態といった情報を制御層やクラウドにシームレスに伝送できるようにすることにより、新たな知見が得られるようにします。そうした知見により、フィールドからクラウドまでのコンバージド・イーサネット・ネットワークを利用したデータの分析、運用に関する知見の取得、生産性の向上といった新たな可能性が生み出されます（図1）。

プロセス・オートメーションにおいて、4～20mAの電流ループやフィールド・バス通信（FOUNDATION FieldbusやPROFIBUS® PA）をイーサネットに置き換えるには、どうすればよいのでしょうか。そのためには、1本のシールド付きツイスト・ペア・ケーブルにより、センサーやアクチュエータに電力とデータを供給できるようにしなければなりません。ツイスト・ペア・ケーブルは、より複雑な配線と比べてコストが低く、サイズが小さく、敷設しやすいという特徴を備えています。プロセス・オートメーションの構成要素であるフィールド・デバイスについて、既存の産業用イーサネットのPHY技術では、デバイス間の距離が100mまでに制限されています。このことが大きな課題になっていました。プロセス・オートメーションでは、最長1kmの距離に

対応する必要があるからです。また、ゾーン0のアプリケーションでは、非常に消費電力が少なく堅牢なフィールド・デバイスが求められます。こうしたことから、プロセス・オートメーションの分野では、イーサネットに対応する新たなPHY技術が求められていました。その結果、策定されたのが10BASE-T1Lです。

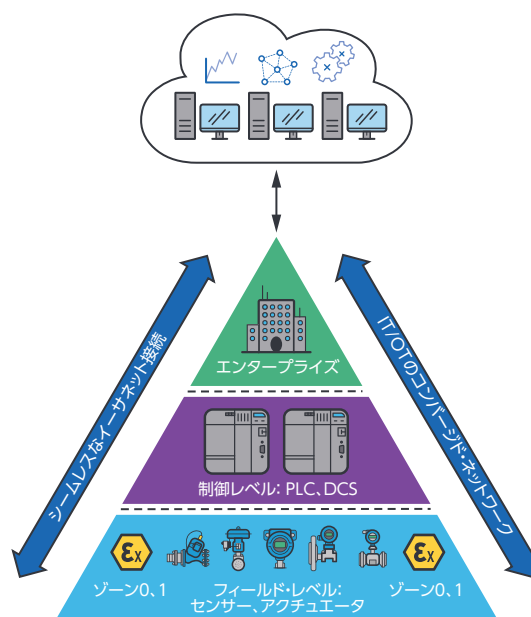


図1. プロセス・オートメーションにおけるイーサネットの活用。
 センサーやアクチュエータといったフィールド・デバイスまでの
 シームレスな接続を実現する必要があります。

10BASE-T1Lの中核を成すのは、PAM 3という変調方式、7.5MBdのシンボル・レート、4B3Tの符号化方式です。これらにより、全二重、DC平衡、ポイントtoポイントの通信が実現されます。振幅については、2種類のモードに対応しています。1つは、最大ケーブル長が1000mでピークtoピーク振幅が2.4Vのモードです。もう1つは、ケーブル長はそれよりも短距離でピークtoピーク振幅が1.0Vのモードです。ピークtoピーク振幅が1.0Vのモードが用意されているということは、10BASE-T1Lは防爆システムの環境内でも使用可能であり、最大エネルギーに関する厳しい制限を満たすということを意味しています。

10BASE-T1Lでは、電力とデータの両方を1本のツイスト・ペア・ケーブルで伝送します。シングルペア・イーサネット（SPE：Single Pair Ethernet）メディアの1つであり、2線式の技術によって長距離の伝送が実現されます。

10BASE-T1Lを採用すれば、従来よりも格段に多くの電力をフィールド・デバイスに供給できるようになります。4～20mAによる通信で供給可能な電力は約36mWでした。それに対し、10BASE-T1Lでは、ゾーン0のアプリケーション向けに最大500mWの電力を供給することができます。それ以外のアプリケーションに対しては、使用するケーブルにもよりますが、最大60Wの電力を供給可能です。このように、ネットワークのエッジにおいて、従来よりもはるかに多くの電力を利用できるようになります。言い換えると、4～20mAやフィールド・バスが抱えていた電力に関する制限が取り払われるということです。その結果、より高度な機能を備える新たなフィールド・デバイスを利用できるようになります。例えば、より高精度の測定や、エッジにおけるより高度なデータ処理が行えるようになるといった具合です。そうすると、プロセス変数に関する貴重な知見が得られるようになります。また、フィールド・デバイス（フィールド・アセット）上でウェブ・サーバを稼働させ、それを介してそのデバイスにアクセスすることが可能になります。こうしたことにより、プロセス・フローやアセット管理の改善／最適化が促進されます。

では、そうした貴重な知見を含む豊富なデータセットを利用するには、何が必要になるのでしょうか。そのためには、広帯域幅の通信リンクが必要になります。なぜなら、知見を抽出する処理を実行するために、プロセス施設の全体に分散配備されているフィールド・デバイスからのデータセットを工場のレベルのインフラやクラウドまで伝送しなければならないからです。10BASE-T1Lを導入すれば、複雑で消費電力の多いゲートウェイが不要になります。また、イーサネットをベースとし、情報技術（IT）と運用技術（OT）の両方のネットワークにまたがるコンバージド・ネットワークを構築できます。そうすれば、配備の簡素化、デバイス交換の容易化が図れます。加えて、ネットワークの迅速なコミッショニング／構成が可能になります。更に、フィールド・デバイスにおけるソフトウェアのアップデートが迅速に行えるようになり、根本原因の分析やメンテナンスの作業が簡素化されます。

イーサネット・ソリューションがもたらす
メリット

プロセス・オートメーションに10BASE-T1Lを適用し、エンタープライズ、制御、フィールドの各レベルにわたる通信手段をイー

サネットに統合したとします。そうすると、複雑で消費電力の多いゲートウェイが不要になります。加えて、フィールド・バスをベースとするインフラからの移行も可能になります。その種のインフラは分断化が激しく、データ・アイランドが形成されてしまっていることが少なくありません。つまり、フィールド・デバイス内のデータへのアクセスが制限されるということです。ゲートウェイを排除することにより、そうした既存の設備のコストと複雑さが大きく軽減されます。併せて、形成されていたデータ・アイランドも排除されます。

従来、プロセス・オートメーションでは、表1に示すような旧式の通信規格が使われていました。10BASE-T1Lでは、各規格によって生じていた複数の制約が解消されています。プロセス・オートメーションには、ナレッジ・ベースに関する課題も存在します。技術者の定年退職が進むことに伴い、4～20mAのHART[®]やフィールド・バスをベースとするシステムの配備、デバッグ、保守に必要な知識を持った人がどんどん減っていくということです。最近大学を卒業したばかりの若年技術者は、そうした古い技術について理解しているとは限りません。しかし、イーサネットに関連する技術には精通している人が多いでしょう。そのため、イーサネットをベースとするネットワーク・ソリューションであれば、迅速に構築することができます。

表1. プロセス・オートメーション向けの通信規格

規格	4～20mAのHART	フィールド・バス	10BASE-T1L
データ帯域幅	1.2kbps	31.25kbps	10Mbps
高レベルのイーサネット接続	複雑なゲートウェイ	複雑なゲートウェイ	ゲートウェイは不要、シームレスな接続
デバイスへの給電能力	40mW未満	制限あり	IS：500mW 非IS：最大60W（ケーブルによる）
知識／専門技術	知識／専門技術は衰退傾向	知識／専門技術は衰退傾向	イーサネットに精通している大卒技術者が多い

10BASE-T1Lでは、高位の全プロトコル層が10BASE-T/100BASE-TX/1000BASE-Tと全く同じように動作することが保証されています。そのため、複雑なゲートウェイが不要になります。

IEEE 802.3では、イーサネット（10BASE-T1L）向けに、OSIの7層モデルにおいてPHY層に当たる部分のあらゆる事柄について定義しています（図2）。つまり、IEEE 802.3に対応するデバイスでは、PROFINET[®]、EtherNet[™]/IP、HART/IP、OPC UA[™]、Modbus[®]/TCPを利用可能であり、MQTT（Message Queuing Telemetry Transport）などのIoT（Internet of Things）プロトコルをサポートします。MQTTは、フィールド・デバイスをクラウドに接続するためのシンプルかつ強力な手段です。イーサネットにより、中央で管理されたソフトウェアのアップデート版を末端のノード（エンド・ノード）まで簡単に配布できるようになります。その結果、ネットワークのより迅速なコミッショニングが可能になります。

層	タイプ	OSIモデル	TCP/IPモデル	策定者
7	データ	アプリケーション層	アプリケーション層	RFC、IETF、業界団体など
6	データ	プレゼンテーション層		
5	データ	セッション層		
4	セグメント	トランスポート層	TCP/UDP	
3	パケット	ネットワーク層	IP	IEEE 802.1
2	フレーム	データ・リンク層	イーサネットデータ・リンク	
1	ビット	物理（PHY）層	イーサネット10BASE-T1L	IEEE 802.3

図2. OSIの7層モデルにおける10BASE-T1Lの位置づけ

10BASE-T1Lに対応するデバイスと通信するには、MAC（Medium Access Control）を搭載するホスト・プロセッサ、パッシブ・メディア・コンバータ、または10BASE-T1Lに対応するポートを備えたスイッチが必要です。追加のソフトウェア、カスタマイズされたTCP/IPスタック、特殊なドライバは必要ありません（図3）。このような特徴から、10BASE-T1Lに対応するデバイスを採用すれば、以下に示すような顕著なメリットを得ることができます。

- ▶ 10BASE-T1Lによる接続にはメディア・コンバータが必要です。ただ、それによって変換するのは、物理的なエンコーディングだけであり、イーサネットのパケットの中身を変換するわけではありません。つまり、ソフトウェアと通信プロトコルの観点からは、メディア・コンバータの存在は無視できます。
- ▶ イーサネットによって接続する場合、センサーの構成は、それが机の上に置いてあるのか製造工場内に設置されているのかにかかわらず、ノート型PCや携帯端末を使って行うことができます。例えば、従来の温度トランスミッタには、（USBなどの形態の）インターフェースが追加で設けられており、それを使ってコンバータの構成が行えるようになっています。メーカーによっては、100種を優に超える調整用のオプションを提供しています。このようなパラメータに、4～20mAによってアクセスすることはできません。HARTであればアクセス可能ですが、コスト上の理由から、アクセス機能が提供されていないことがよくあります。4～20mAを使用する場合、机上で行った設定にミスがあったとしたら、センサーの設置場所に出向いて再設定しなければなりません。それに対し、10BASE-T1Lを使って接続しているセンサーには、ネットワークを介してアクセスすることが可能です。そのため、いつでもどこからでもアップデート作業を実施できます。
- ▶ 4～20mAに対応するデバイスは、1つのプロセス値しか転送できません。イーサネットであれば、プロセス値だけでなく、アセット管理、ライフ・サイクル管理、予知保全、構成、パラメータ表示などに関するあらゆるデバイス・パラメータに直接アクセスできます。
- ▶ センサーはますます複雑になっており、ソフトウェアをアップデートする頻度も高まっています。高速なイーサネットを使えば、いつでもどこからでも現実的な時間内でソフトウェアをアップデートすることが可能です。
- ▶ イーサネットでは高度なネットワーク診断ツールを使用することができます。そのため、問題が発生した際の根本的な原因の分析作業を簡素化することが可能です。



10BASE-T1L

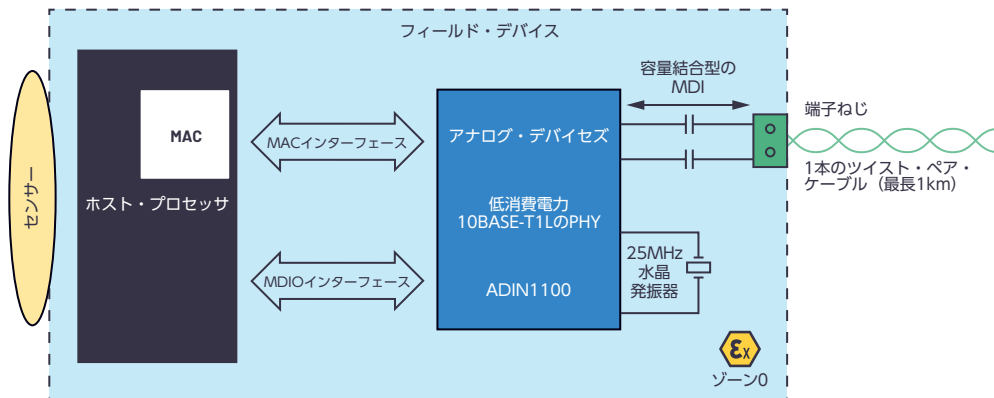


図3. フィールド・デバイスの接続。
10BASE-T1Lに対応するPHYデバイスを使用して実現しています。

プロセス・オートメーションにおける ケーブルの配線、ネットワークの敷設

プロセス・オートメーションでは、センサーやアクチュエータ（フロー、レベル、圧力、温度に対応）がコントローラの近くに配置されるとは限りません。この点が、マシンやファクトリ・オートメーション・システムを構築する場合とは異なります。プロセス・オートメーションでは、センサーとI/Oの間が200m離れているといったケースは珍しくありません。そこからフィールド・スイッチまでの距離が1000mに達することもあります。プロセス・オートメーションでは、既にPROFIBUS PAやFOUNDATION Fieldbusで使われているという理由で、Type Aのフィールド・バス・ケーブルが使用されます。

10BASE-T1Lの規格では、伝送媒体（ケーブル）については明確に定義されていません。その代わりに、チャンネル・モデル（反射損失と挿入損失の要件）が定義されています。そのモデルはType Aのフィールド・バス・ケーブルとの適合性が高いので、4～20mA用の敷設済みケーブルの一部を10BASE-T1Lで再利用できる可能性があります。このことは、プロセス・オートメーションの設備ではブラウンフィールド・アップグレードを実現できる可能性が高いということを意味します。

10BASE-T1Lでは、最長200mほどの伝送線上で信号振幅電圧を1Vに抑えることができます。そのため、防爆システムの環境内にも導入可能です。危険区域では最大エネルギーが厳しく制限されますが、それを満たしつつ最大500mWの電力を供給できます。

10BASE-T1Lでは、4～20mAの約36mWと比べて格段に多い500mWの電力を供給できます。そのため、4～20mAでは電力面の制約から外部電源が必要になる4線式デバイスを、2線式のデバイスに置き換えることが可能です。外部電源が不要になることから、新規デバイスの設置に関する柔軟性が大きく向上します。

図4は、プロセス業界に対して提案する際によく用いられるネットワーク構成を示したものです。これは幹線／支線型ネットワーク・トポロジと呼ばれています。幹線ケーブルは最長1km、PHY層のピークtoピーク振幅は2.4Vであり、ゾーン1のディビジョン2に該当します。一方、支線ケーブルは最長200m、物理層のピークtoピーク振幅は1.0Vです。これはゾーン0のディビジョン1に該当します。電源スイッチは制御レベルに存在します。同スイッチは、イーサネット・スイッチの役割を果たしつつ、ケーブルに（データ線を介して）電力を供給します。フィールド・スイッチは、危険区域内のフィールド・レベルに存在します。同スイッチにはケーブルから電力を供給します。また、同スイッチは、支線上のフィールド・デバイスを幹線に接続するイーサネット・スイッチの役割を果たすと共に、フィールド・デバイスに電力を伝送します。複数のフィールド・スイッチを幹線ケーブルに接続することにより、多数のフィールド・デバイスをネットワークに接続することができます。

フィールド・スイッチをリング・トポロジで接続すれば、冗長性を持たせることができます。エッジにおける速度は最高10Mbpsです。このことは、従来30kbps未満にデータ・レートが制限されていた多くのアプリケーションにとって、大きなメリットになります。フィールド・レベルにおいて、エンド・ノードのデバイスがイーサネットによって接続されることにより、ITとOTがシームレスなイーサネット・ネットワーク上に適切に統合されることになります。その結果、任意のエンド・ノードに存在するデバイスを、世界中のどこからでもIPアドレスで指定できるようになります。

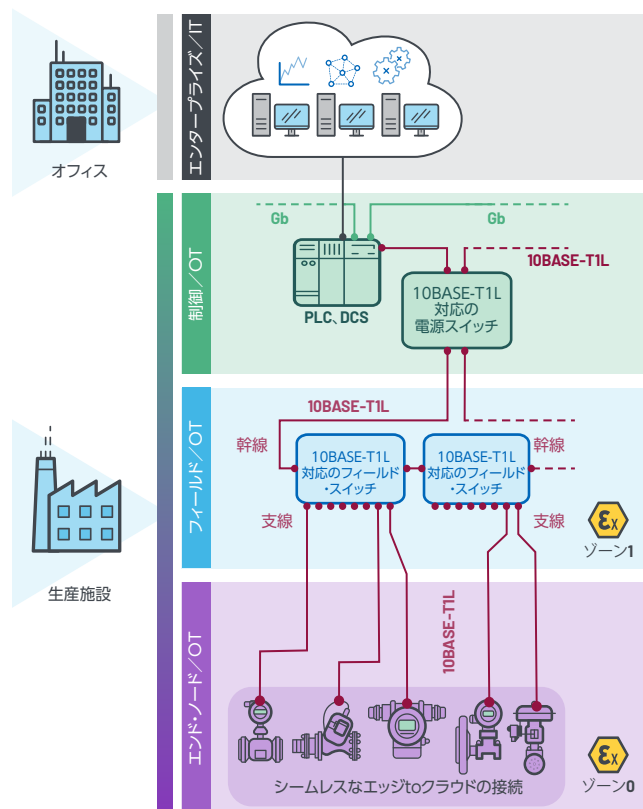


図4. 10BASE-T1Lを採用したネットワーク・トポロジ。
プロセス業界には、この構成がよく提示されます。

10BASE-T1Lに基づく Ethernet-APL

Ethernet-APL (Advanced Physical Layer) はプロセス業界を対象とした規格であり、IEC (International Electrotechnical Commission) の下で公開される予定です。この規格では、センサーやアクチュエータにイーサネット通信を適用する上での細かい事柄が規定されます。イーサネット・ベースのPHY規格である10BASE-T1Lに基づき、危険な場所で使用できるようにするための実装方法や防爆方法が規定されます。PROFIBUS and PROFINET International (PI)、ODVA、FieldComm Group®の下、プロセス・オートメーションに携わる主要な企業が連携し、Ethernet-APLをあらゆる産業用イーサネット・プロトコルに対応させてその展開を加速しようと努めています。

将来のシームレスなイーサネット接続への移行

プロセス・オートメーションの分野では、4～20mAのHART通信機能が長年にわたり適切に配備されてきました。実証済みの堅牢なソリューションなので、4～20mAのHART通信機能が即座に使われなくなることはありません。しかも、HARTに対応するデバイスを使用する大規模な設備は、既に数えきれないほど存在しています。そこで、アナログ・デバイスでは、ソフトウェアによって構成が可能なI/Oの開発に力を注ぐことにしました。任意のピンを使って任意の産業用I/O機能にアクセスできるようにすることで、既存デバイスの設置に関する柔軟性を高め、リモートI/Oアプリケーションによっていつでもチャンネルを構成できるようにするというアプローチです。それにより、デバイスを設置する際、直ちにカスタマイズを施すことが可能になります。また、より少ない設計リソースで、複数のプロジェクトや顧客を対象として広く活用できる汎用的な製品を開発し、迅速に市場投入できるようになります。ソフトウェアで構成が可能なI/O製品の例としては、「[AD74413](#)」や「[AD4110-1](#)」が挙げられます。

図5に示したのは、4～20mAに接続された既存のデバイスからブラウンフィールドのイーサネットへ移行した場合のシステム構成です。ご覧のように、10BASE-T1Lに対応する新たなデバイスと4～20mAに対応する既存のデバイスが共存しています。既存のデバイスは、ソフトウェアで構成可能なI/Oによって接続されます。また、リモートI/Oにより、PLC（Programmable Logic Controller）に対する10Mbイーサネットのアップリンクへの集約ポイントが提供されます。

10BASE-T1Lにより、プロセス・オートメーションにおけるシームレスなエッジtoクラウドの接続が実現されます。10BASE-T1Lを導入することで、ゲートウェイとI/Oが不要になり、フィールド・デバイスから制御レベル、そして最終的にはクラウドまで達するイーサネット・ベースのネットワークを構築できます。フィールド・デバイスも網羅することで、高度な分析を行うための豊富なデータセットが得られるようになります。

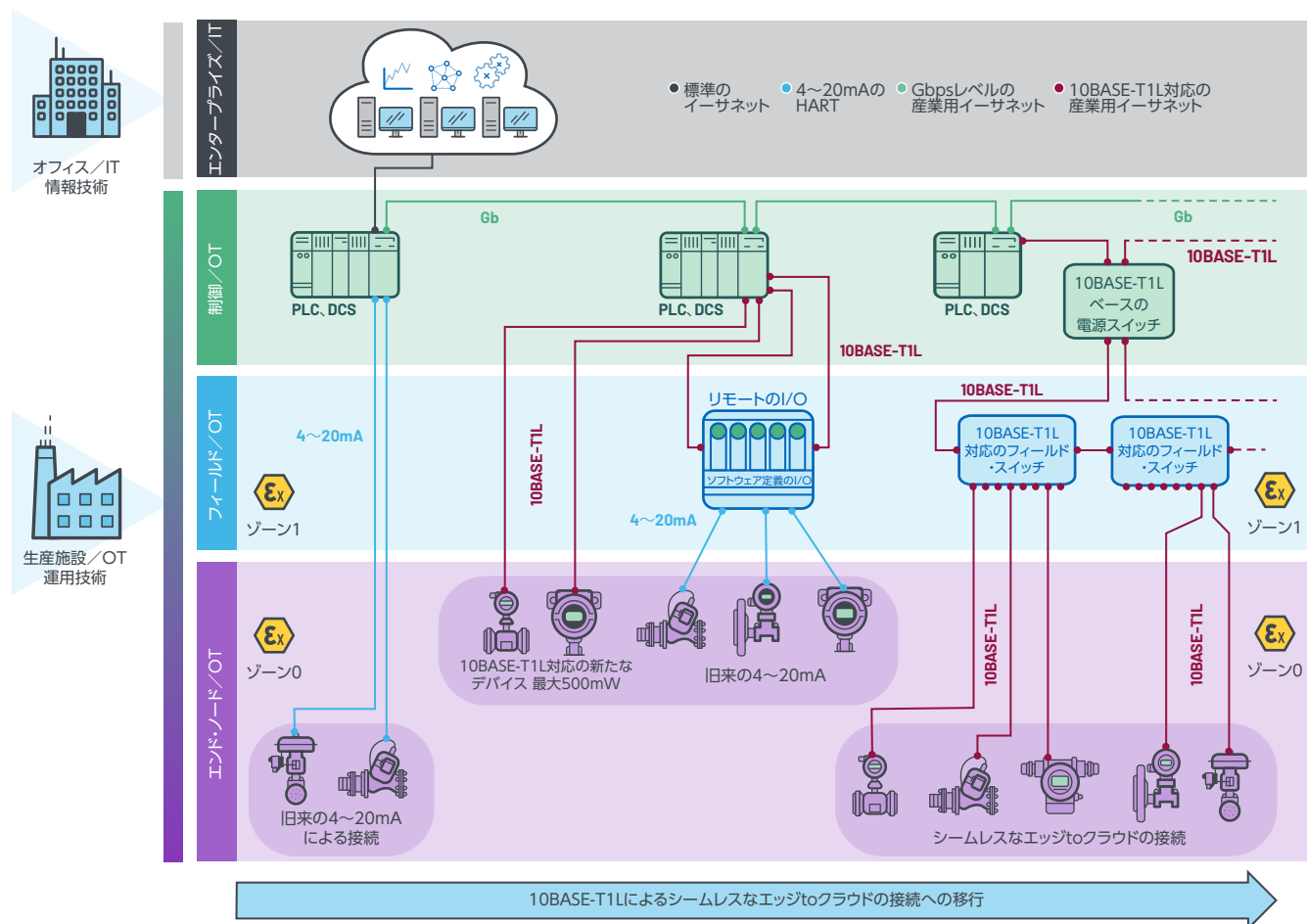


図5. ブラウンフィールドのイーサネットへの移行。
従来の離散的な配線から、すべてのセンサーとアクチュエータを接続する
スマートなイーサネット・ネットワークへと段階的に移行が進みます。

他分野のアプリケーションでも活きる
10BASE-T1L

現在、10BASE-T1Lは、プロセス・オートメーション以外の分野でも大いに注目を集めています。例えば、ビル・オートメーション、ファクトリ・オートメーション、エネルギーの供給、監視、水道設備や廃水処理のオートメーション、エレベータなどです。これらのアプリケーションに共通する要件は、1本のツイスト・ペア・ケーブルにより電力とデータの両方に対応し、センサーまでの広帯域幅でシームレスな（ゲートウェイなしの）イーサネット接続を実現することです。表2は、現在使われている有線技術と10BASE-T1Lを比較したものです。ビル・オートメーションに用いられるRS-485や、ファクトリ・オートメーションに用いられるI/Oリンクなどのアプリケーションを例にとっています。

10BASE-T1L対応デバイスにより、プロセスの
最適化を促進する実利用が可能な知見を創出

アナログ・デバイスでは、産業用イーサネット向けソリューションのポートフォリオとして、ADI Chronous™を提供しています。このポートフォリオには、10BASE-T1Lに対応するPHY製品も追加されています。それらを利用することにより、食品や飲料、製

薬、石油／ガスといった業界において、危険な場所を含め、フィールドからクラウドまでをイーサネットで接続したプロセス・オートメーション設備を実現することが可能になります。10BASE-T1Lに対応するトランシーバー製品「ADIN1100」は、イーサネットに接続された工場から多くのメリットを得るためのPHYインターフェースを提供します。10BASE-T1Lを導入することで、イーサネットのパケットがフィールド・レベルから制御レベル、そして最終的にはクラウドまで伝送されます。ゲートウェイは不要であり、インダストリ4.0におけるIT/OTネットワークの統合という目標を達成することができます。また、MAC PHYデバイスである「ADIN1110」を採用すれば、利用可能な電力が格段に増えるので、より高度な機能を備える新たなフィールド・デバイスを実現することが可能になります。各フィールド・デバイスをどこからでもIPアドレスで指定できるので、10BASE-T1Lに接続されたデバイスの設置、構成、保守が劇的に簡素化されます。10BASE-T1Lは、新たなフィールド・デバイス、クラウド・コンピューティング用の豊富なデータセット、高度なデータ分析を生み出すための基盤になり得ます。各種のプロセスから、実利用が可能な知見にアクセスすることで、工場の稼働効率が向上し、将来のより複雑なプロセス・オートメーション設備の配備が加速されます。

表 2. 旧来の通信規格と 10BASE-T1L の比較

プロトコル	パケットのフォーマット	ケーブル長	ビット・レート	データ用のケーブルによる電力供給	コネクタ	本質安全への対応
PROFIBUS PA	UART/PROFIBUS	1200m	31.25kbps、バス、半二重	可	M12、端子ねじ	可
Modbus RTUやその他のRS-485プロトコル	UART/Modbus	1200m (最高で約185kbps、375kbで300m、500kbで200m)	標準で19.2kbps、バス、半二重	不可	DB9、M12	非該当
I/Oリンク	I/Oリンク	20m	最高230.4kbps、半二重	不可	M12	不可
4～20mA	アナログ・インターフェース	10km以上	-/-	可、36mW	ねじ	可
HART	4～20mAベースのデジタル変調	1500m以上	1200bps、バス、半二重	可、36mW	ねじ	可
10BASE-T1L	Ethernet IEEE 802.3	1000m (2.4V)、最大10ジョイント(端子ボックス) 200m以上 (1.0V)	10Mビット、全二重	可、最大60W ゾーン0の防爆構造：最大500mW	端子ねじ、またはIDCコネクタ、オプションでシングルペア・イーサネット・コネクタ	可

提供中のソリューション

アナログ・デバイセズは、新製品を開発することにより、ADI Chronousのポートフォリオを拡張しました。その目的は、堅牢性が高く長距離への対応が可能な10BASE-T1Lベースのイーサネット接続を、プロセス・オートメーションやビル・オートメーションといったアプリケーションで利用できるようにすることです。10BASE-T1Lに対応する新製品としては、MAC PHYデバイスのADIN1110とPHYデバイスのADIN1100という2つの選択肢を用意しました。ADIN1110を採用すれば、フィールドの計測器、センサー、アクチュエータのイーサネット接続を簡素化することができます。しかも、それまでに投資を行って開発したソフトウェアやプロセッサ技術を活用しつつ、業界トップクラスの低消費電力化を実現したシステムを設計することができます。アナログ・デバイセズ独自のMAC PHY技術により、MAC層を備えていない超低消費電力のプロセッサに対してSPI (Serial Peripheral Interface) が提供され、システム全体の消費電力が削減されます。一方のADIN1100は、標準的なイーサネットに対応するインターフェースを備えています。フィールド・スイッチを開発する場合など、複雑な設計に適用することが可能です。ADIN1110/ADIN1100を使用すれば、1本のツイストペア・ケーブルにより1.7kmにわたる長距離のデータ伝送が行えます。しかも、それぞれの製品を使用する場合の消費電力はわずか43mW、39mWに抑えられます。更に、SPoE (Single-pair Power over Ethernet) などの高度なパワー・ソリューションを組み合わせれば、電力とデータの両方を1本のツイストペア・ケーブルによって伝送することが可能になります。

産業用イーサネット・ソリューションで構成されるADI Chronousの詳細や、同ポートフォリオが産業用イーサネット・ネットワークへの移行をどのように加速させるのかについては、analog.com/jp/Chronousをご覧ください。

著者について

Maurice O'Brien (maurice.obrien@analog.com) は、アナログ・デバイセズの戦略的マーケティング・マネージャです。産業用イーサネット向けのソリューションに関するサポート戦略を担当しています。現職に就く前は、電源管理部門で15年にわたってアプリケーション／マーケティングに関する業務に携わっていました。アイルランドのリムリック大学で電子工学の学士号を取得しています。

Volker E. Goller (volker.goller@analog.com) は、アナログ・デバイセズのシステム・アプリケーション・エンジニアです。複雑なモーション・コントロールや、組み込みセンサーからTSNまでの技術を使用する産業用アプリケーションの分野に30年以上携わってきました。ソフトウェア開発者として、無線／有線の通信アプリケーション向けに様々な通信プロトコルやスタックを開発した実績を持ちます。同時に、主要な業界団体にかかわることによって、新たな通信規格のフィールディングに積極的に携わってきました。

EngineerZone®

オンライン・サポート・コミュニティ

アナログ・デバイセズのオンライン・サポート・コミュニティに参加すれば、各種の分野を専門とする技術者との連携を図ることができます。難易度の高い設計上の問題について問い合わせを行ったり、FAQを参照したり、ディスカッションに参加したりすることが可能です。



Visit ez.analog.com

*英語版技術記事は[こちら](#)よりご覧いただけます。