

# ネットワークプロトコル「EPAP」

小堀 隆哉 (こほり たかや)

藤田 史彦 (ふじた ふみひこ)

岩本 正太郎 (いわもと しょうたろう)

## 1 まえがき

Ethernet<sup>〔注1〕</sup>および通信プロトコル TCP/IP (Transmission Control Protocol/Internet Protocol) は、従来から情報系 LAN の標準として使われてきた。さらに Windows 95<sup>〔注2〕</sup> 登場以降のパソコンの普及、インターネット、イントラネットの発展を背景に一層広く普及してきている。

これに伴って制御用ネットワークに対しても Ethernet の適用が要求されるようになってきた。Ethernet を使うメリットとしては以下が挙げられる。

### 〔1〕 パソコンによる制御

パソコンやワークステーションとの親和性が良いため、これらのうえにコントローラや管理ツールが容易に構成できる。これを用いて従来の専用のコントローラより安価にシステムを構築できる。またパソコンと直接接続が可能となることから、入出力機器の適用範囲が拡大する。

### 〔2〕 マルチベンダー対応

標準的な Ethernet を採用することで、他社の制御装置やパソコンなどの機器と容易に接続することができる。

### 〔3〕 低価格・安定供給

多くのベンダーが提供するネットワーク機器、管理ツールなどを利用することができ低価格化ができる。

### 〔4〕 将来性

現在、通信速度は 10 Mbps, 100 Mbps のものが普及しているが、近い将来の 1 Gbps 対応、さらなる高速化対応が期待できる。またその移行も容易である。

今回これらのメリットを十分に生かし、さらに制御システムとして要求される即時性、高信頼性を Ethernet 上で実現するネットワークプロトコル「EPAP (Ethernet Precision Access Protocol)」を開発した。本稿ではその設計思想および技術的ポイントを述べる。さらに、EPAP を適用したオープン化対応プロセス入出力装置 (以下、オープン PIO と略す) のバスインタフェースモジュールにお

ける EPAP 実装の工夫点などについて述べる。

## 2 フィールドネットワークとしての Ethernet

### 2.1 IO バスへの Ethernet 適用の要件

Ethernet は応答時間の保証が困難なネットワークであるため、分散形制御システム (DCS) などのコントローラレベルにおいてはトークン、時分割方式などの通信権制御方式を UDP (User Datagram Protocol) または TCP/IP 上に構築することによって Ethernet を制御分野に適用してきた。この代表的な例が富士電機でも製品化を行っている FL-net である。

DCS ではネットワークに接続される各ノードが自ら送信する仕組みが必要であるため、マルチマスタが実現可能なトークン方式を TCP/IP 上に構築する必要があった。しかし、この方式では、マスタノード間の送信機会の均等性や応答時間の保証は可能となるが、応答性そのものは低下する。このため応答性が重要視されるフィールドレベルのネットワークには適用が困難であった。

一方、フィールドレベルのネットワークに Ethernet のインタフェースを持つ制御機器が幾つかのメーカーにて開発されているがその多くはスイッチング技術を利用し、全二重通信を可能とした Fast Ethernet (伝送レート 100 Mbps) を適用したものである。この場合にはノード間の接続に HUB (ハブ) と呼ばれる装置が必須 (ひっす) となり、スター型のネットワークトポロジーとなる。共通部となる HUB の故障や HUB への給電の停止はシステム全体の停止に至るという弱点があり、高信頼システムとしては採用が難しい。

オープン PIO の IO バスとしては、共通部を持たず信頼性が高いバス型 (10 Mbps, 10 BASE2) の適用を前提とした通信方式の検討を行った。

### 2.2 IO バスへの Ethernet の適用

リモート IO システムでは、制御を実行するコントローラがマスタ、コントローラにより制御される複数のノード

〔注1〕 Ethernet : 米国 Xerox Corp. の登録商標

〔注2〕 Windows : 米国 Microsoft Corp. の登録商標



小堀 隆哉

制御用ネットワークシステムの開発・設計に従事。現在、事業開発室ネットワークソリューション部主任。



藤田 史彦

制御用ネットワークシステムの開発・設計に従事。現在、事業開発室ネットワークソリューション部主任。



岩本 正太郎

情報機器、制御用ネットワークコンポーネントの開発、設計に従事。現在、富士アイティ(株)コンポーネントソリューション統括部。

がスレーブとして動作すればよい。マスタノードが一つであれば、送信要求が発生した任意タイミングで自由にコマンドを送信し、コマンドを受信したノードは処理完了後、直ちに応答を返送するコマンド/レスポンス方式が最も応答性が高い。ただしマスタノードが複数になった場合、Ethernetの媒体アクセス方式CSMA/CD(Carrier Sense Multiple Access / Collision Detection)により生じる衝突により通信効率が低下する。

オープンPIOシステムでは、モデルシステムとして複数のノードを制御するコントローラ1台、監視などを行う機器(コンフィグレータ)1台の計2台がマスタノードとなるシステムを想定した。これを図1に示す。

データ交換はコントローラとノード間で行われ、ノード間で直接のデータ交換は行われない。また、必要に応じコンフィグレータとノード間でデータ交換が行われる。1台のマスタ(コントローラ)が256バイトまたは1,500バイト長のフレームを伝送媒体の使用率10%で使用していることを想定し、これとは非同期に別の通信(コンフィグレータ)が10%の使用率でアクセスした場合についてシミュレーションした結果を図2に示す。同図は相手の送信完了待ちおよび衝突発生後のバックオフ待ち時間により生じる送信要求発生から実際に回線に信号が送出されるまでの遅

図1 モデルシステム

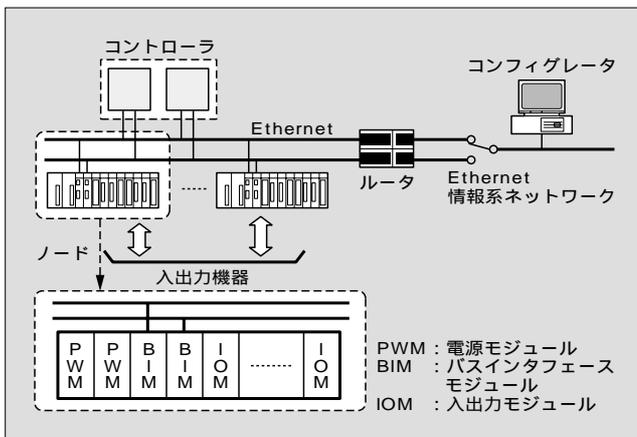
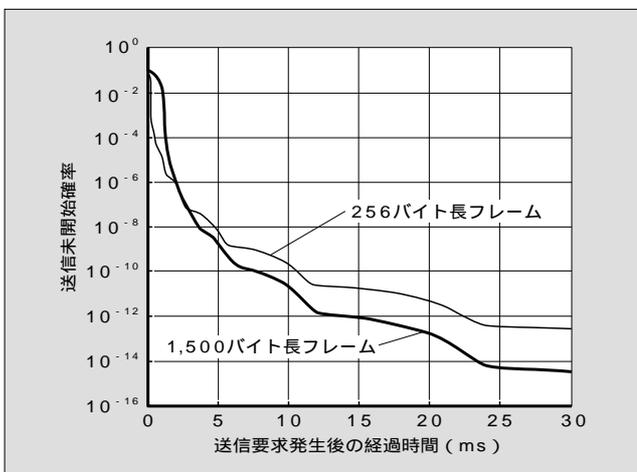


図2 2マスタシステムにおける送信遅延発生確率



延時間とその発生確率を示す。

この結果によれば、マスタ数が2台までであれば衝突による送信遅延あるいは送信中止の発生確率は通信エラー発生の一般的確率と比較しても小さい。ノイズなどによる外乱の影響を想定して備える無応答監視、再送機能により救済され、コマンド/レスポンス方式の適用が可能であることが分かる。

### ③ EPAPの概要

#### 3.1 EPAPの特長

EPAPは即時性以外にもIOバスに要求される以下の特長を持つ。

- 1) 入出力データだけでなく、入出力機器の高機能化に対応可能な、設定情報のダウンロード/アップロードなどの複雑なデータ構造や大きいサイズのデータを扱える仕組みを有する。
- 2) 比較的サイズの小さい入出力データを効率よく通信できる。
- 3) システムの状態監視、異常検出が容易に行える。

#### 3.2 プロトコル階層構成

TCP/IPプロトコル群にはトランスポート層としてTCPとUDPとがある。TCPはコネクション型で確認応答、誤り再送などの機能を有し信頼性が高いが、その反面、即時性は低い。一方のUDPはコネクションレス型で、コネクションの開設の手続きが不要だけでなく、ソフトウェア規模が小さく高速な処理が可能である。したがって、即時性が必要なEPAPはUDP上のアプリケーション層に構築され、EPAPフレームはUDPフレームのアプリケーションデータと位置づけられる。その階層構成とデータ構造を図3に示す。また、TCPやUDP上のほかのアプリケーションとの共存が可能ないようにTCP、UDPでアプリケーションを識別する識別子であるポート番号をEPAPでは専用に二つ使用する。一つは高速型、もう一つは中速型と定義し、それぞれ最大のデータサイズは1,500バイト、4,000バイトである。

#### 3.3 フレーム構成

EPAPフレームにはマスタからスレーブに送信されるコ

図3 通信プロトコルの階層構成と通信データ構造

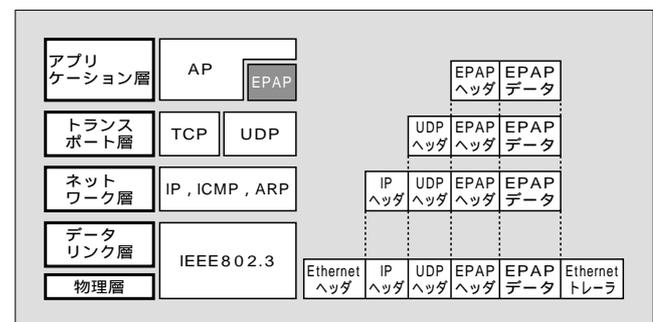
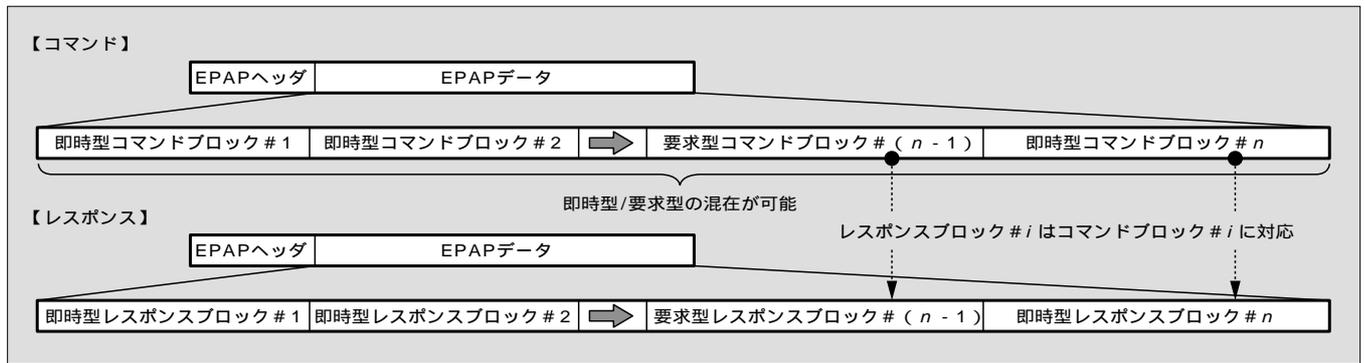


図4 EPAPのフレーム構造



マンドとコマンドを受信したスレーブがマスタに送信するレスポンスがあり、どちらもヘッダ部とデータ部から構成される。フレーム構造を図4に示す。

3.3.1 EPAP ヘッダ部

EPAPのマスタとスレーブ間のデータの交信に使用され、以下の情報が含まれる。

- 1) コード：EPAP フレーム種別（コマンド/レスポンス）。
- 2) シーケンス番号：フレーム喪失チェック用の管理番号。
- 3) レングス：EPAP データ部の長さ。
- 4) EPAP チェックサム：UDP データ部（EPAP ヘッダ部 + EPAP データ部）と IP アドレスを対象としたチェックサム。
- 5) ステータス情報：電源モジュール、バスインタフェースモジュールなどのステータス。

3.3.2 EPAP データ部

ノード内で EPAP スレーブと入出力モジュールとの間で転送されるデータである。データ部は複数のブロックから構成され、ブロックは即時型と要求型の2種類のデータタイプが規定される。即時型および要求型アクセスの概念図を図5に示す。

1) 即時型

入出力モジュールの共有メモリ上のデータをリード/ライトする。入出力データのリフレッシュなどに使用する。

2) 要求型

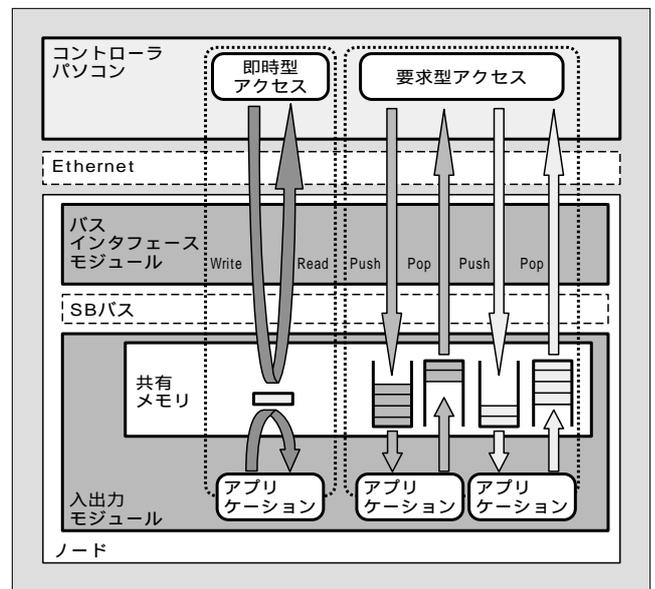
入出力モジュールの共有メモリ上の仮想 FIFO (First-In First-Out) にデータの PUSH/POP (押し込み/引き抜き) を行い、マスタと入出力モジュール間のデータ交信を行う。大きいデータを分割して受け渡すことができる。限られたチャンネル数の仮想 FIFO を使用するためアプリケーション間で排他が取れるようコネクション方式を採っている。すなわち、PUSH/POP を行う前に入出力モジュールの仮想 FIFO とコネクションを確立し、使用後にはコネクション解除の手続きを行う必要がある。

3.4 高信頼性への対応

1) シーケンス番号によるコマンドとレスポンスの対応

EPAP マスタはコマンド送信からレスポンス受信までの時間監視を行い、フレームの喪失が発生した場合、再送を行うことができる。EPAP ヘッダに備えるシーケンス番号

図5 EPAPのアクセス形式



をマスタが管理することで複数のコマンドとレスポンスとの対応を確認できる。

2) ステータス情報の通知

EPAP ヘッダに含まれるステータス情報を監視することでノードの異常発生を検知できる。

3) 統合的チェックサムの採用

EPAP チェックサムにより、UDP がオプションとして規定する UDP チェックサムでは検出不可能であった IP アドレス部破壊により他のノードが受信、誤動作をするといった不具合を排除できる。

3.5 即時性への対応

1) IP 層でのフラグメンテーション処理の省略

高速型 EPAP フレームは Ethernet フレームの最大長である 1,500 バイト以下と規定されている。したがって、IP 層でのフレームの分割/組立が不要なため IP 層での処理を簡略化、高速化できる。一方、中速型 EPAP は通常の IP 層の処理を経て送受信され、即時性は高くないが最大 4,000 バイトの大きいデータを扱うことができる。

2) マルチデータブロック構成

図4のフレーム構造に示すとおり、一つの EPAP フレーム

ムデータ部には複数のブロックを格納することができ、一つのフレームで同一ノード内の複数の入出力モジュールにアクセスが可能である。また、即時型、要求型を任意に混在させることができる。このことにより、伝送路の負荷を上げずに効率のよい通信が可能となる。

(3) データブロック制御情報のハードウェア親和性

EPAP データ部の各ブロックはノード内に実装される入出力モジュールへの1回のアクセスに対応している。コマンドブロックには入出力モジュールの実装位置、モジュール内アドレスなどのデータ転送用の情報を含むが、EPAP スレーブでは特に解釈を行う必要がなく、そのままノードのバックプレーンバス上の転送が可能なフォーマットとなっている。

④ バスインタフェースモジュールへの実装

EPAP により通信を行うすべてのマスタ、スレーブは EPAP を実装する必要がある。コストや物理的な実装スペースなどの面でスレーブはマスタに比べて厳しい制約を受ける。ここでは、スレーブであるバスインタフェースモジュールへの EPAP の実装例を説明する。

4.1 バスインタフェースモジュールの通信動作

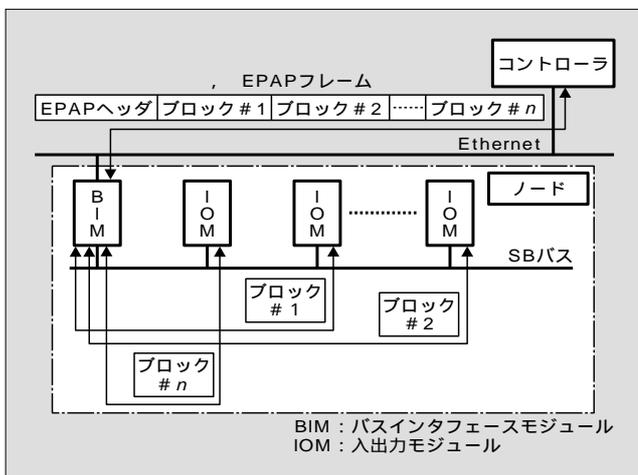
バスインタフェースモジュールはオープン PIO のノードに実装される。バスインタフェースモジュールの動作とデータの流れを図6を基に以下に説明する。

コントローラ、コンフィグレータなどのマスタ装置からの EPAP コマンドフレームを受信、ヘッダ部を解析する。

、 、 : EPAP データ部のコマンドブロックを先頭から順次 (# 1, # 2, ..., # n の順)、バックプレーンバス [SBバス (Serial Back-Plane Bus)] を介してノード内の入出力モジュールに転送する。

: ~ の転送結果に EPAP ヘッダ部を付加し、EPAP レスポンスフレームを送信元のマスタ装置に返送する。通信速度は 10 Mbps (10BASE2), 100 Mbps (100BASE-T)

図6 バスインタフェースモジュールの動作とデータの流れ



BIM : バスインタフェースモジュール  
IOM : 入出力モジュール

SE-T) の2種が用意されている。その外形を図7に、ファームウェアの構成を図8にそれぞれ示す。

EPAP コマンド解析処理部は EPAP に関する処置を実行する中心部分である。受信時 UDP 層から EPAP フレームを受け取り、処理結果を応答として UDP 層に渡す。定周期処理は EPAP レスポンスフレームのヘッダ部に格納されるバスインタフェースモジュール自身のステータス、電源モジュールのステータスなどを生成する。中継処理部は EPAP コマンドブロックの内容を解析し SB バス上の各入出力モジュール単位の転送を行う。EPAP サーバ処理部はバスインタフェースモジュール向けのコマンドブロックの処理を実行する。RS-232C 送受信処理部はメンテナンス用に備えられた RS-232C インタフェースの送受信を実行し、EPAP コマンド解析処理との連携により EPAP 形式のデータを処理することができる。

4.2 高速化のための工夫

バスインタフェースモジュールでは高速化のため以下のような工夫をしている。

(1) EPAP 専用の IP ルート

EPAP 専用の UDP ポート番号により、EPAP とその他のプロトコルを LAN コントローラから受信フレームを引

図7 バスインタフェースモジュールの外形

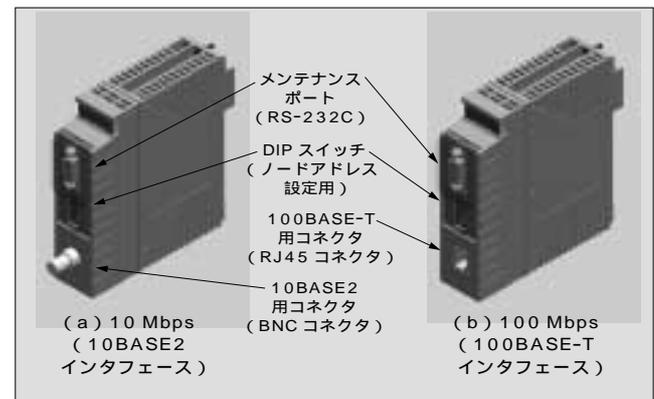
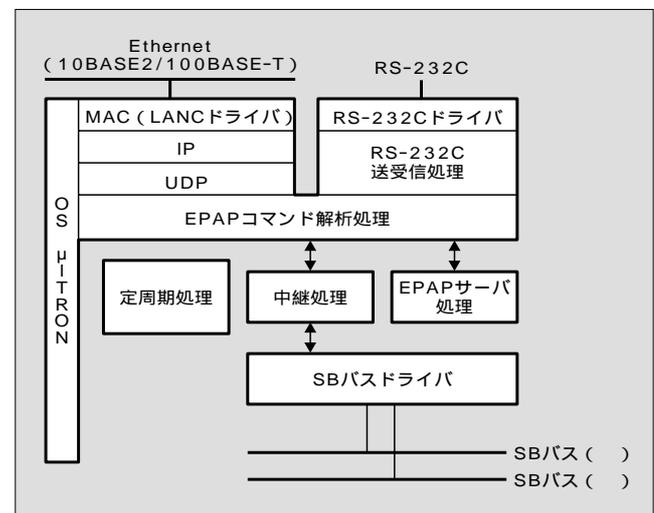


図8 バスインタフェースモジュールのファームウェア構成



き出す時点で判別することが可能である。通信階層の低いレイヤーで EPAP 専用処理ルーチンに分岐することにより、通常の UDP または TCP/IP の処理に影響を与えることなく高速な入出力データの交換を可能にしている。

(2) ARP キャッシュ参照の省略

ARP キャッシュとは ARP (Address Resolution Protocol) によって生成される論理アドレス (IP アドレス) と物理アドレス (MAC アドレス) の対応を示すテーブルである。IP 層では、送信時に論理アドレスにより指定された送信先の物理アドレスを得るために参照する。ARP キャッシュに目的の物理アドレスが存在しない場合、ARP メッセージを発行し物理アドレスを取得する処理が必要となる。しかし、バスインタフェースモジュールは EPAP のスレーブ動作を行うためコマンドフレームの送信元へ応答を送り返せばよく、ARP キャッシュを参照せず、受信フレームの内容からマスタの物理アドレスを直接得ることで処理の高速化を行っている。

(3) 高速型処理の優先

高速型のアクセスと中速型のアクセスが競合した場合、高速型を優先的に処理する。

例えばコンフィグレータからの中速型によるコマンド処理中に、コントローラからの高速型によるコマンドを受信すると、高速型処理を優先し、中速型処理を中断、追い越して処理する。これによって高速型アクセスの即時性を確保している。

4.3 高信頼性化のための工夫

(1) SB バスアクセスリトライ

EPAP データの入出力モジュールへの転送の際に SB バス転送が失敗した場合、自動的に二重化された SB バスの他方を使用しリトライを行う。また、二重化された SB バスの健全性のチェックは、通信を実施していない時間帯に実施し通信性能に影響を与えない。

(2) 二重化

バスインタフェースモジュールはまったく二重化を意識しない。二重化はすべてマスタ側の管理により、バスインタフェースモジュールはマスタからのコマンドにตอบสนองのみである。二重化のため同一シェルフにバスインタフェースモジュールを 2 台実装したときに、マスタが相互の監視を実施可能なようバスインタフェースモジュールの共有メモリ上にハンドシェイク用の領域を提供している。

⑤ 性能

EPAP を実装した 10 Mbps (10BASE2) のバスインタフェースモジュールの応答時間の測定を実施した。測定方法は上位コントローラの性能に影響を受けないコマンドフレーム受信開始からレスポンスフレーム送信完了までの時間を伝送ケーブル上の信号波形にて測定した。測定例を図 9 に示す。データ量を変化させて測定した結果得られた、データ量と応答時間との関係を図 10 に示す。

図 9 性能測定実施例

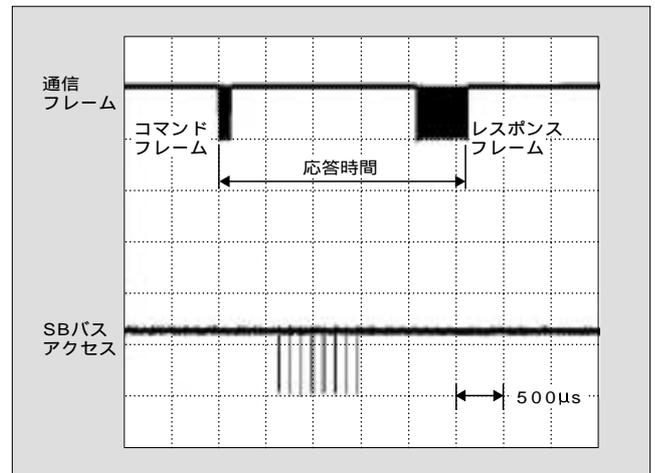
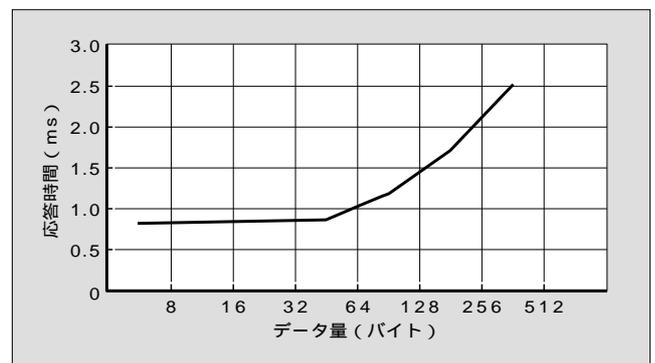


図 10 バスインタフェースモジュール (10 Mbps) の応答時間



オープン PIO システムで標準的なデータ量 (アナログ 80 点, デジタル 192 点) を持つ 1 ノードに対するアクセス時間は約 2.8 ms となり、コントローラの処理時間を 3 ms とすると 8 ノードの入出力のリフレッシュ時間として  $(2.8 + 3) \times 8 = 46.4$  ms となり、1 スキャン 50 ms 以内のシステム性能が期待できる。

⑥ あとがき

オープン PIO のネットワークプロトコル EPAP について紹介した。Ethernet は、従来の情報系に限らず制御向けのオープンネットワークとしての地位を確保し、さらに高速化、大容量化の面で進化しつつある。富士電機はオープン PIO の開発で得た技術を基に、Ethernet のオープン性を最大限に生かしつつ、IO バスとしてもメリットのある製品を提供していく所存である。本稿がオープン PIO の特長を引き出し、幅広い適用分野の拡大への一助となれば幸いである。

参考文献

1) Hayashi, S. et al.: Secure and Simple Real-time Control Protocol over Ethernet. ISA TECH1999 (1999)  
 2) Stevens, W. R.: 詳解 TCP/IP, ソフトバンク, p.1-11, p.161-164 (1997)