



車載 Ethernet ネットワークにおける時刻同期

AUTOSAR、IEEE、TSN の中で、いかにバランスをとるか？

車両に搭載される数々のシステム機能には、ECU 間で基本となるタイムベースを高精度に同期する処理が必要です。車載への Ethernet の採用により、開発者やシステムアーキテクトは何らかの方法で時刻同期の対策を講じる必要が出てきました。既存の手法は Ethernet に使えないためです。さまざまな分野の専門家が委員会を設立し、Ethernet を高い時間精度が求められるタスクに応用するための取組みがなされています。本稿では、車載ネットワークで使用が検討されている時刻同期の手法について概要を紹介し、Ethernet ネットワークの現時点での限界点と、その改善に向けた将来のソリューションについて解説します。

自動車に搭載されるタイムクリティカルな Ethernet アプリケーションは多岐にわたります。カメラやセンサー（レーダー）を利用した先進運転支援システム（ADAS）、リアルタイムの音声/動画ストリーミング、各種物理ドメインとの同期用バックボーン（図 1）などのほか、オンボードのデータロギングもそのようなユースケースに数えられます。さらに、Ethernet でネットワーク接続されているデバイスでは、CAN や FlexRay といった他の物理システムとの同期が必要になることはいうまでもありません。

Ethernet はコンピュータネットワークやオフィス環境を前提として生まれた規格で、技術的なアプリケーションに求められるリアルタイム性能を持ちません。スイッチ接続による Ethernet トポロジーを用いれば、ネットワークアクセス中の不要なコリジョンは減りますが、それだけでは完全に決定論的な振る舞いは実現で

きません。特に、時刻同期という精密なタスクには、伝送経路上での伝搬時間やスイッチやゲートウェイに付随する遅延時間に関するあらゆる情報が必要です。

これらは Ethernet に接続されるシステムを制御する際には不可避の課題であり、各種の標準化団体が Ethernet に時刻同期のメカニズムをはじめとするリアルタイム性能を追加する作業に取り組んでいる理由でもあります。現在のところ、自動車業界で使用される時刻同期の主な方法は、AUTOSAR 4.2.2、IEEE 802.1AS、そして Audio/Video Bridging タスクグループ（現 TSN (Time Sensitive Networking) タスクグループ）の策定による、改訂版の IEEE 802.1AS-rev が基になっています。

AUTOSAR のグローバル時間のコンセプト

AUTOSAR 4.2.2 のコンセプトでは静的に定義された Global Time Master (GTM) が提供されており、この ECU が、ネットワーク全体で最も精度の高い時間をグローバルタイムドメインに配信します。これから派生するサブドメインは、各種の物理メディアを越えて拡張できます。Time Gateway は、ある 1 つのスレーブポートを始点として、1 つまたは複数のマスターポートを経由し、エンドポイント (Time Slave) か他の Time Gateway まで時間を伝達します (図 2)。同期する時間は、これらのゲートウェイの内部処理に要する遅延時間に応じて修正しなければなりません。これとは別の方法として、独立したタイムベースを別途設定し、現在の時間をそれぞれのゲートウェイからそれらに「注入」する方法も AUTOSAR では許可されています。

同期処理の詳細はネットワークのタイプによって決まります。CAN や Ethernet の場合であれば、Time Slave が送信側のタイムスタンプを自身の受信タイムスタンプと比較し、受信したグローバルタイムベースを補正します。FlexRay はサイクルタイムが固定され、厳格に事前定義された時間パターンに沿って動作する決定論的なシステムであるため、同期はこれより単純で、時間は FlexRay クロックによって暗黙的に提供されます。CAN ではタイムスタンプは常にソフトウェアで計算されますが、Ethernet

ではソフトウェアかハードウェアのいずれかで算出します。さらに、CAN と FlexRay では最大で 16 個の時間ドメインを実装できるのに対し、Ethernet は 1 つの時間ドメイン、すなわち「Global Time Domain」でのみ動作します。

Ethernet ECU の同期の基盤：IEEE 802.1AS

AUTOSAR 4.2.1 より、「Synchronized Time Base Manager (StbM)」が使用可能になりました。これは FlexRay、CAN、Ethernet の各バス固有のタイムベースジェネレーター (Bus Time Sync Provider Module) をランタイム環境に対して抽象化し、アプリケーションでの「プレゼンテーションタイム」の利用を可能にするものです。個々の物理バスで使用される個別のプロトコルは TimeSync モジュールに実装され、Ethernet の Bus Provider は IEEE 802.1 に基づく「generalized Precision Time Protocol (gPTP)」を使用します (図 3)。これを自動車での一般的なユースケースに適合させるためには、AUTOSAR のスコープでのさまざまな変更や追加、時には制限が必要でした。

Ethernet と CAN や FlexRay との違いを紹介するにあたって、まず、CAN と FlexRay の同期における基本的な特性から大まかに説明しましょう。両者には 16 個の同期タイムベースと、オプションで最大 16 個までの静的に接続されたオフセットタイ

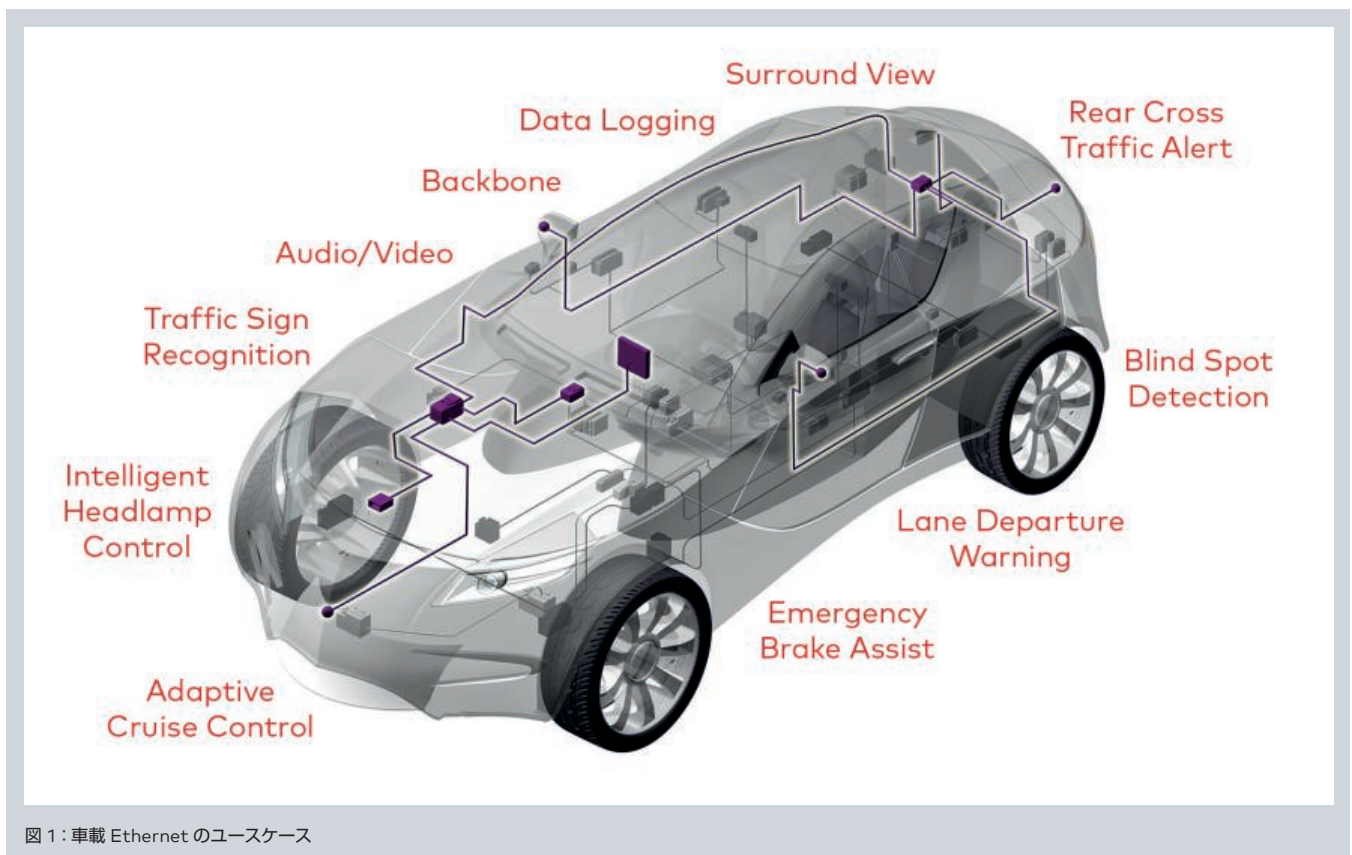


図 1：車載 Ethernet のユースケース

ムベースがあります。CAN では時間の情報は 2 つのメッセージで伝送されます。最初のメッセージには秒の情報、2 番目のメッセージにはナノ秒の情報が含まれています。そのため、ナノ秒の範囲で発生しうるオーバーフローの検知を目的として、2 番目のメッセージにはオーバーフロー検出が含まれています。「Time Gateway Synchronization Status」は、アプリケーションがサブドメインと Global Time Master のどちらと同期しているかを検出するために使用されます。また、Sequence Counter と Cyclic Redundancy Check (CRC) も利用されています。

自動車固有の gPTP の実装

スイッチで接続された Ethernet ネットワークで時刻を同期するための標準的な方法は IEEE 802.1AS に規定されています。これは同期時間の配信 (Sync/Follow_Up)、メッセージの伝搬遅延時間の測定 (Pdelay)、ベストマスタークロックアルゴリズム (BMCA) の 3 つの中核的な手続きから構成され、実際の同期を担当するのは、Sync メッセージと Follow_Up メッセージからなる 2 段階の手続きです。Pdelay は 2 つのポート間でメッ

セージの伝搬遅延時間を測定するための専用のプロトコルですが、それだけでなく、ECU は Pdelay を利用して、自身が「Time Aware System」、すなわち時刻同期機能を持つネットワークに属しているかを検出できます。ベストマスタークロックアルゴリズムにより、ネットワークノード、可能であれば動的な構成のネットワークに含まれるノードが最良のシステム時間を供給する ECU を判定し、それをグランドマスターに設定します。

ただし、自動車への実装はかなりの点で IEEE の標準規格と異なります。IEEE ではネットワークポロジや BMCA (グランドマスターの選択) などの動的な設定が許されているのに対し、自動車ではその多くは静的に事前定義されます。これは一意のシステム記述を作成し、通信マトリックスを最適化するのに必要であるためです。その他にも、ソフトウェア／ハードウェアでのタイムスタンプのサポートや、ペイロードデータの有無とその内容、セキュリティ上の理由から車両に VLAN を装備する必要があるなどの点が異なります。

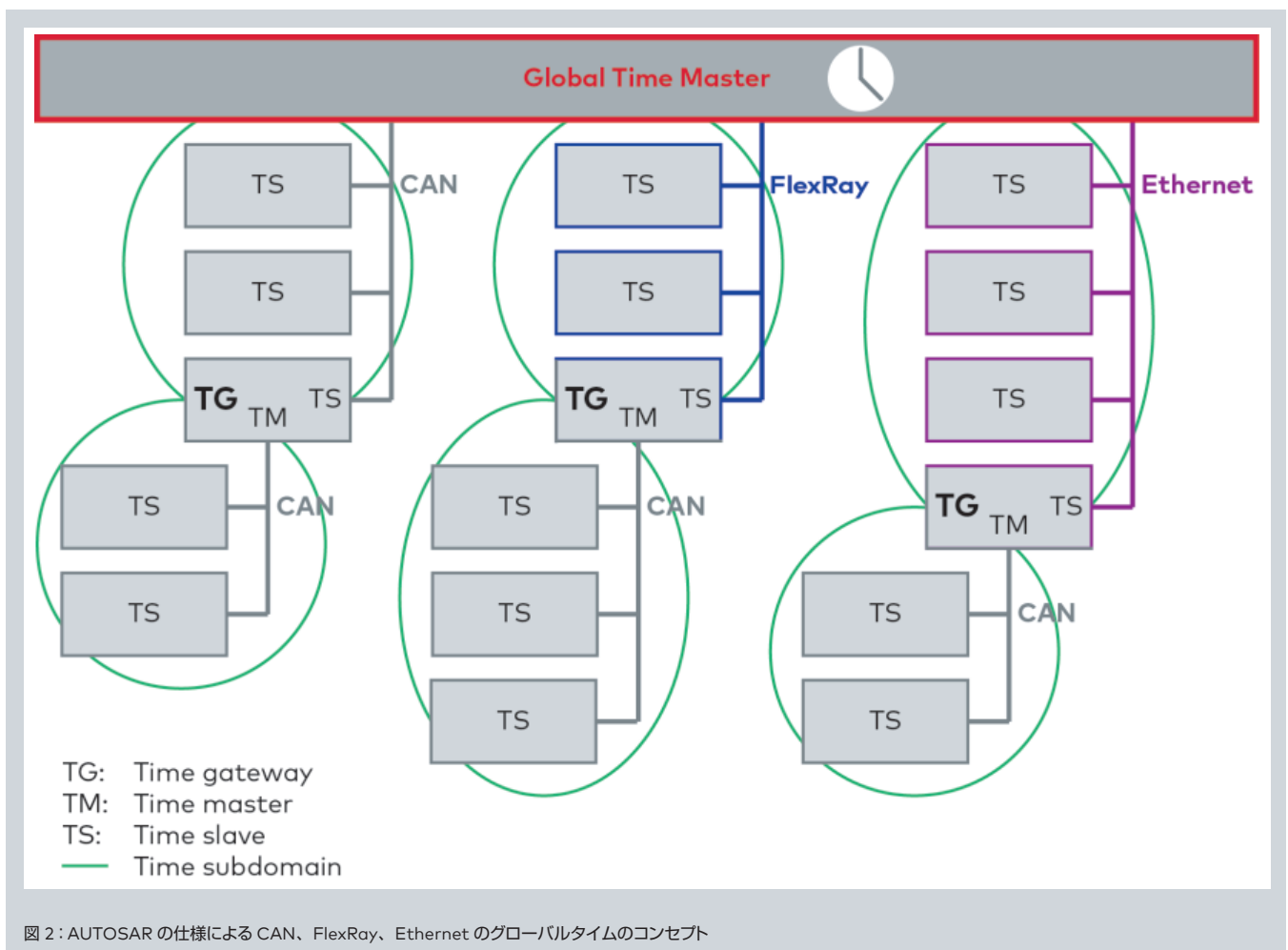
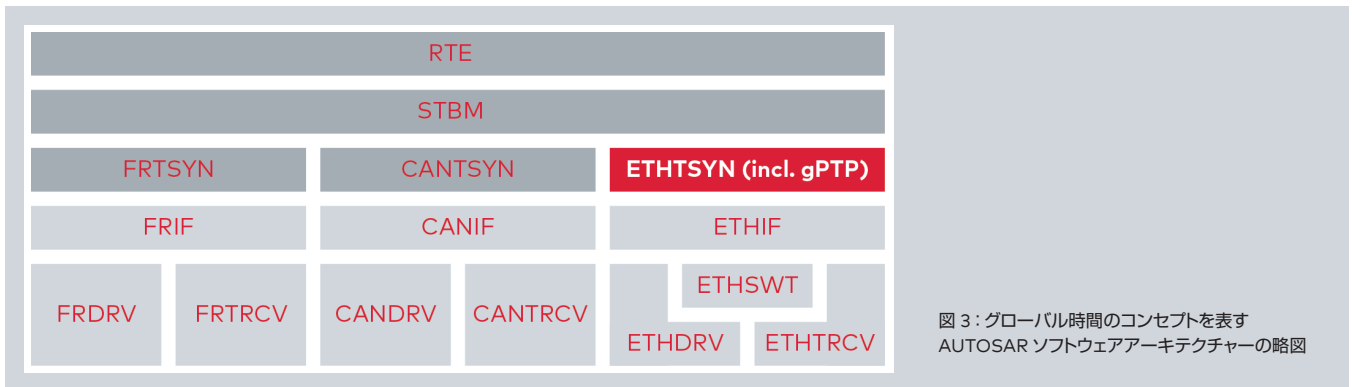


図 2: AUTOSAR の仕様による CAN、FlexRay、Ethernet のグローバルタイムのコンセプト



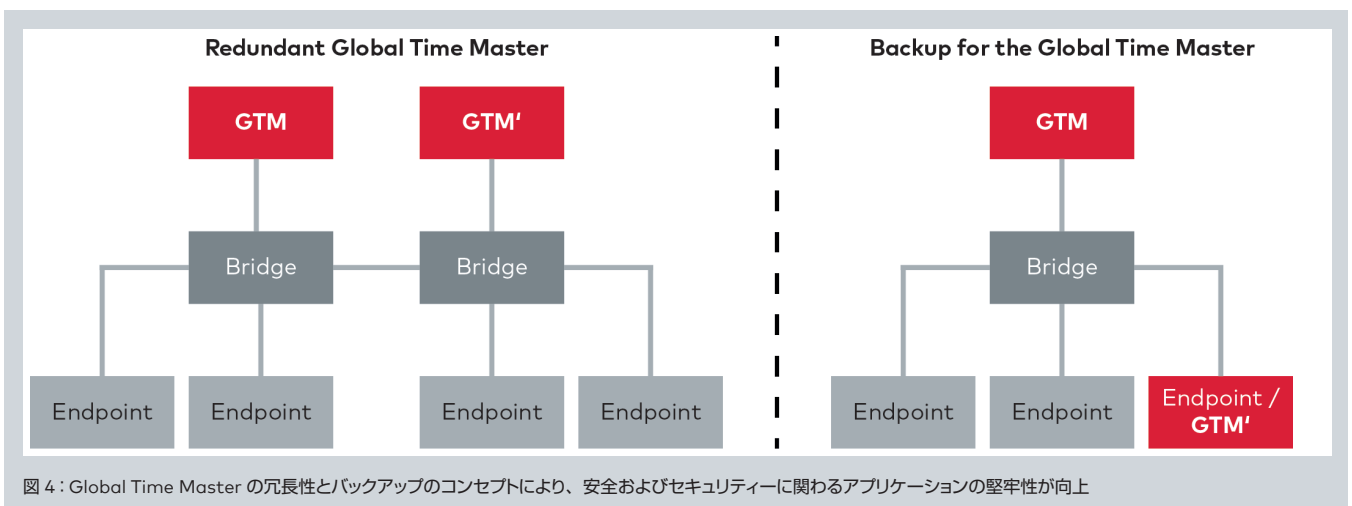
スイッチドライバーの拡張によるポート情報の提供

Ethernet 上での正確な時刻同期を妨げている重大な課題の 1 つが、Ethernet のスイッチ機能の対応に AUTOSAR バージョン 4.2.2 の時点では制限があることです。すなわち、スイッチドライバーが、今受信したメッセージのポート番号を上位レイヤーに転送できないのです。その結果、Sync および Follow_Up メッセージのポート固有の送信が困難になり、スイッチでの Pdelay メカニズムは実質的に使用不能となります。Pdelay メカニズムでは、送信される Pdelay リクエストによって複数のレスポンス (Pdelay_Resp/Pdelay_Resp_Follow_Up) がトリガーされるため、個々の通信ポートにそれらを割り振ることができません。したがって、Pdelay では有益な情報は提供されません。さらに、現行の仕様では、スイッチがポート固有のタイムスタンプを個別に設定することが許可されていません。スイッチ内の遅延は決定できず、正確な時間修正も不可能です。AUTOSAR 4.3 ではこの状況が改善され、サポートされる IEEE-802.1AS の機能が増える見込みです。具体的には、ポート固有のスイッチ情報がスイッチドライバーおよび Ethernet ドライバーからベシックスフ

トウェアコンポーネントに至る全体で一貫してサポートされ、今にも必要な入出力のスタンプが使用できるようになるはずで

ペイロードデータ：欠かせない要素

車両に IEEE 802.1AS を使用するにあたっては、その他の部分への対策もいくつか必要になります。これに関係するのが、「(自動車メーカー固有の) ペイロードデータ」、複数の時間ドメインのサポート、冗長性やバックアップ戦略などの問題です。ペイロードデータは Follow_Up メッセージ内の追加情報で、この標準規格ではカバーされていません。しかし、特殊なアプリケーションや機能には欠かせないもので、たとえばデバッグ情報や追加のステータス情報などがこれに当たります。これへの対策としては、必要な追加情報を gPTP メッセージに含まれる AUTOSAR 固有の Type Length Value (TLV) フィールドに格納し、Time Slave が設定に応じてそのフィールドを評価または無視する方法が取られています。



IEEE 標準規格における時間ドメインの不足

IEEE 802.1AS では現時点で 1 つの時間ドメインしか提供されません。しかし、自動車へのアプリケーションでは、UTC 時間、GPS 時間、センサー固有のシグナルの評価といった目的で、さらに多くの時間ドメインが必要になります。そのため、gPTP メッセージヘッダーに含まれる既存のドメイン番号で、0 より大きい数が使用できるようにしなければなりません。IEEE 802.1AS では、許可されているドメイン番号は今のところ「0」しかなく、それ以外の数値はノードによって無視されます。現行の TSN 仕様 (IEEE 802.1AS-ref) には、IEEE 802.1AS に追加する形で、少なくとも 1 つの時間ドメインが新たに含まれています。しかし、これでは自動車の要求を満たすには不十分です。これを解決するために、AUTOSAR では追加の時間ドメインの定義が可能になっています。

バックアップマスターを用いた耐障害性のある同期の実現

これからの車両アーキテクチャーと AUTOSAR のバージョンでは、安全とセキュリティに対する配慮がますます重視されます。それに伴い、静的に定義された唯一のタイムジェネレーター (Global Time Master) で障害が発生した場合に備えて、バックアップマスター、一般的には冗長性のコンセプトをどうするかの問題が急浮上しています (図 4)。このためには、バックアップマスターとして継続して動作するタイムジェネレーターが少なくとも、もう 1 つ必要です。現状のベストマスタークロックアルゴリズムでは、この解決策にはなりません。BMCA はスピードが比較的遅いうえ、タイムアウト検出に基づいて動作するため、ECU は本来なら回避したいはずの同期タイムアウトの状態にすでに入っているのです。マスターはそのような形ではなく、互いに相手に代わって動作することによって同期タイムアウトの発生を未然に防がなければなりません。標準規格の策定委員会では、これらをはじめとする膨大な数の問題が引き続き議論されていくことでしょう。

結論

IEEE 802.1AS は Ethernet で時刻同期を実現するための適切な参考資料であり、これに即した実装によって、IEEE 標準規格に準拠した gPTP プロトコルをインフォテインメント分野に使用する可能性が開かれます。今後の TSN 標準規格には、自動車に関する要求がさらに多く取り入れられることは明らかですが、それがどの程度包括的なものになるかは未知数です。いずれにせよ、IEEE と AUTOSAR は互いに補い合いながら発展を続けています。ただし、それらのリリースサイクルの違いから、その完成にはまだ時間がかかることでしょう。

大切なのは、システムアーキテクト、開発者、サプライヤーが Ethernet のプロジェクトを効率的かつ経済的に進められることです。これには、ベクターの ECU およびネットワークのテストツール「CANoe」や AUTOSAR ベーシックソフトウェアの「MICROSAR」など、特定の Ethernet ハードウェアにも対応可能なベクターの開発ツールが大いに役立ちます。これらの製品は、AUTOSAR 準拠の gPTP と IEEE 準拠の gPTP のいずれかによる時刻同期をサポートします。また、同期時刻を音声/動画ストリーミングなどに使用するための機能やソフトウェアソリューションも用意されています。

執筆者:



Bernd Jesse (Dipl. Ing. (FH))

Vector Informatik GmbH の組込ソフトウェアの上級プロダクトマネージャーとして Ethernet AVB/TSN ソリューションを担当。また AUTOSAR のグローバル時間のコンセプトを積極的に主導。

本稿は、ドイツで発行された自動車技術誌『Automobil Elektronik, issue July/August 2016』に掲載された記事内容を和訳したものです。

画像提供元:

見出し画像および図 1、3、4: Vector Informatik GmbH
図 2: 「AUTOSAR Specification of Synchronized Time-Base Manager, Release 4.2.1」(11 ページ、セクション 2.2.7) に基づき、Vector Informatik GmbH が編集

■ 本件に関するお問い合わせ先

ベクター・ジャパン株式会社 営業部
(東京) TEL: 03-5769-6980 FAX: 03-5769-6975
(名古屋) TEL: 052-238-5020 FAX: 052-238-5077
E-Mail: sales@jp.vector.com