

IoTを支えるイーサネット規格 TSN技術

堀田善文* マンジン・クリストフ**
 谷口幸子*
 川手竜介*

Ethernet-based Time Sensitive Networking Technologies for IoT

Yoshifumi Hotta, Sachiko Taniguchi, Ryusuke Kawate, Christophe Mangin

要旨

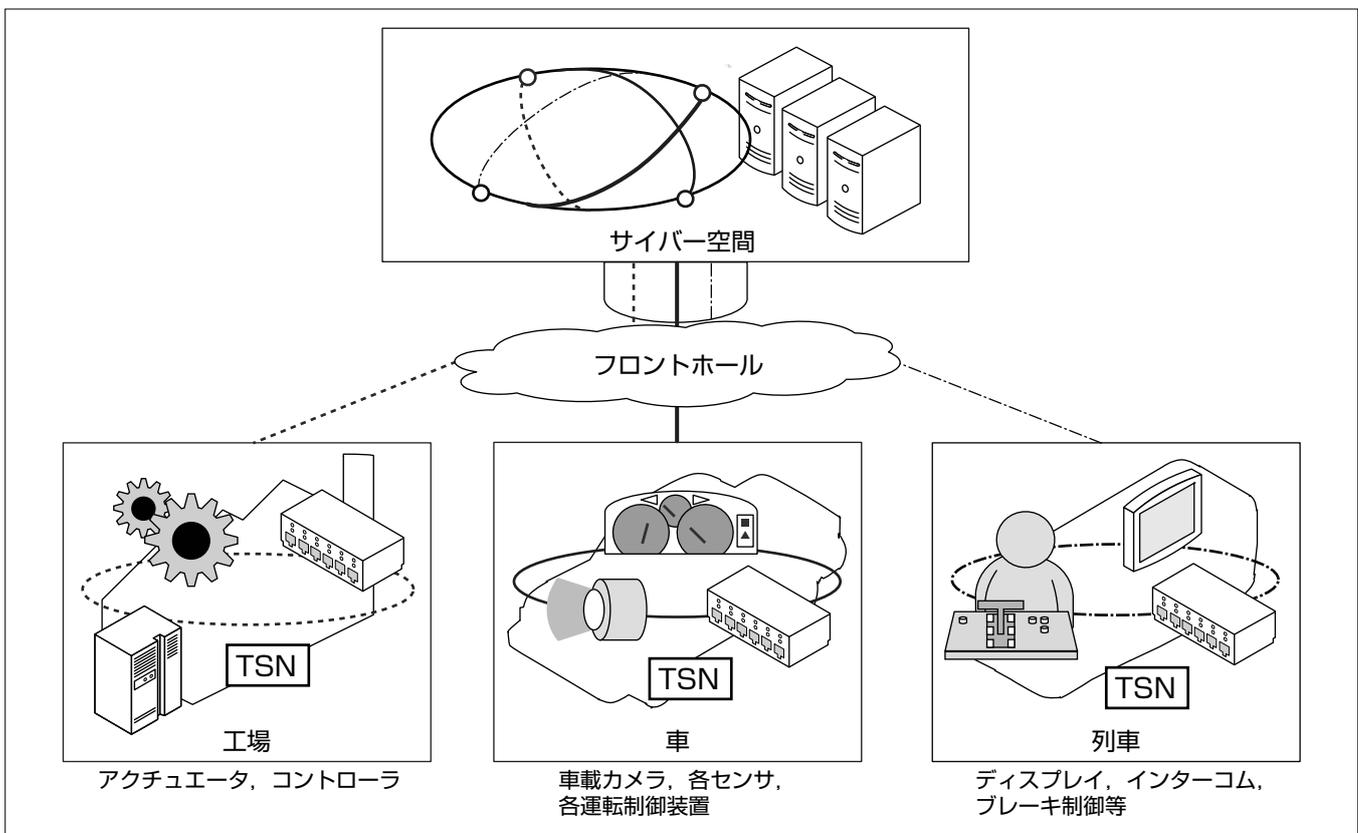
IoT(Internet of Things), M2M(Machine to Machine), CPS(Cyber Physical Systems)など、今までネットワーク化されてこなかったセンサ、アクチュエータ、コントローラがネットワーク化され、あらゆる情報をサイバー空間で収集・分析し、物理的な世界にフィードバックするための研究に世界中が取り組んでいる。これに伴い、従来それほど伝送遅延に配慮がいらぬWeb, Eメール, 音声, 映像伝送のために使用されてきたイーサネット(注1)を始めとするネットワーク技術にも、アプリケーションによっては、伝送装置1台当たりの遅延が数μs以下という遅延制約が求められる時代が到来しつつある。

三菱電機では、低遅延アプリケーション向け通信規格で、IEEE 802.3及びIEEE 802.1ワーキンググループで標準

化されているTNS(Time Sensitive Networking)技術の1つでIEEE 802.3brに準拠したメディアアクセスコントロールを実装したイーサネット伝送装置の試作評価を行った。評価によって、多くの端末に使用され、イーサネット通信規格の中で最も汎用的な1 Gbpsの通信速度で、転送遅延を従来の22.90μsから3.52μsに抑えられることが分かった。

イーサネット規格TSN技術が世の中に普及することによって、従来技術では実現が難しかったIoT等を実現するための相互接続可能な汎用ネットワーク技術が確立され、2020年頃までに、産業機械、交通システム、自動車、通信インフラに普及していくものと考えられる。

(注1) イーサネットは、富士ゼロックス(株)の登録商標である。



多様なIoTサービスを集約する次世代ネットワーク

従来独自の低速なネットワークで接続されてきた工場内のデバイス、車載デバイス、列車内のコンポーネント類がインターネットにシームレスに接続されるようなネットワークが求められている。これらがネットワークに接続されることによって、多種多様なデータがサイバー空間に蓄積され、保守性や利便性、生産性向上に資する新たなサービスが生まれ出される。

1. ま え が き

工場・列車・自動車等の産業用ネットワークでは、これまで、接続される各機器の要求性能に応じた独自のネットワーク規格が混在している状況にあった⁽¹⁾。しかし近年、大容量化、経済化の観点から、産業用ネットワークのイーサネット化が進んでいる。

産業用ネットワークをイーサネット化すると、異なる遅延要求を持つ複数の機器やアプリケーションが同一ネットワーク内に収容され、低遅延転送が必要な制御系トラフィックと、比較的遅延を許容する情報系トラフィックが多重化される。しかし、イーサネットには産業用ネットワークで求められる低遅延性が不足しており、遅延要求の異なるデータを従来制御方式で多重化すると、制御系トラフィックの遅延時間が増大する場合があった。

本稿では、これらの課題を解決するために、近年検討が加速しているTSN技術の動向と試作評価の結果について述べる。

2. TSN技術の適用領域と課題

従来、イーサネットは大学や企業内の情報ネットワークに用いられており、工場・列車・自動車等の産業用ネットワークは、独自の閉鎖的なネットワークで単なる制御用途の機器のみを接続して運用されていた。近年これらのネットワークのイーサネット化が進んでいる。

例えば、工場の生産現場では、フィールドバス系の専用のネットワークに利用目的に合わせた独自のプロトコルを用いて制御するケースが多く、IEC61784やIEC61158などでCC-Link、PROFIBUS^(注2)、ControlNet^(注3)、INTERBUS^(注4)等、主に10Mbpsまでの多数のフィールドバス用オープン規格が存在していた。現在は、これらのフィールドバスがイーサネット化され、CC-Link IE、PROFINET^(注2)、EtherCAT^(注5)、EtherNet/IP^(注6)等、100M~1Gbpsの多数の異なるフィールドネットワークの規格化が進んでいる。

また、列車の制御や情報伝送には、これまで多数の引通し線を並列に用いて機器を個別に制御していた。海外ではIEC61375 TCN(Train Control Network)のWTB(Wire Train Bus)やMVB(Multifunction Vehicle Bus)、国内では独自のトークンパッシング方式のバス等、主に10Mbps以下の専用バスが用いられてきた。2014年にIEC61375で100Mbpsのイーサネット規格であるETB(Ethernet Train Bus)やECN(Ethernet Consist Network)等の規格化が完了し、現在国内外で適用しようとする動きが加速しつつある。

車載ネットワークでは、LIN(Local Interconnect Network)やCAN(Controller Area Network)、MOST(Media Oriented System Transport)等、20k~150Mbpsまでの

ネットワークが主流であり、近年インフォテイメント系で大容量の画像転送等に100M~1Gbpsのイーサネットが使われ始めている。

先に述べたように様々な産業分野でイーサネット化が進んでいる理由は、IoTの時代に向けて、情報系から制御機器レベルまであらゆるものがつながり、シームレスなアクセスを可能にし、生産性・安全性・保守性・品質の向上や、省エネルギー化、低コスト化といったシステム全体の自動化及び最適化が期待されていることが挙げられる。したがって、画像や様々なセンサ情報等を大量に収集し、その情報を基に機器を分析・制御するためには、ネットワークを従来の10Mbps程度より大容量化することが求められる。イーサネットは既に10M~100Gbpsまでの規格化が完了し、400Gbpsが規格化中と、伝送速度のラインアップがそろっている。また、100Mbpsや1Gbpsのイーサネットポートを持つ端末が増え、スイッチ等の通信機器の流通量も多く、経済的であることもイーサネット化が進んでいる理由の1つであろう。

これらのイーサネット化が進み、制御系機器と情報系機器を1つのネットワークに収容することが可能になった場合、現場機器やセンサ、コントローラ等で扱われる遅延に厳しい制御系トラフィックと、WebアクセスやEメール等の比較的遅延を許容する情報系トラフィックが混在することになる。しかし、これらを従来のイーサネットスイッチで一般的なストア&フォワードで転送すると、同じ伝送路で転送が競合した場合、リアルタイム性が求められる制御系トラフィックの遅延が大きくなってしまう場合がある。例えば、一般的なイーサネットスイッチでは一旦ストアするため、入力した制御系フレーム長に依存した遅延が生じる。更に出力側で一般的な優先制御方法であるSP(Strict Priority)で転送すると、情報系フレームの転送中に制御系フレームが転送可能になっても、図1のように情報系フレームの転送を完了するまで制御系フレームの転送を開始できない。情報系フレームは比較的容量が大きく、例えば2,000バイトの情報系フレームの転送開始直後に制御系フ

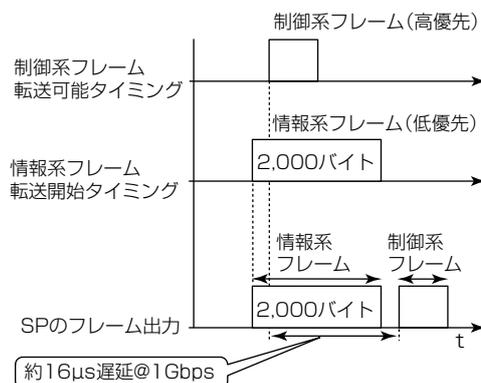


図1. SP方式

フレームの転送要求が発生した場合、制御系フレームの遅延時間は、1 Gbpsの転送速度で約16μsとなる。

しかし、例えば工場内の作業ロボットの生産性を高めるために、制御系フレームのスイッチ1段の転送遅延を数μs以内に抑えたいという厳しい遅延要求を持つものもある。このように、制御系と情報系のトラフィックを同一ネットワークに収容するとき、従来転送方式では制御系トラフィックの遅延時間が増加し、その遅延要求を満足できないという課題がある。近年、これらの課題を解決するために、産業用のリアルタイム性が要求されるネットワークに必要なTSN技術の検討が加速している。3章では、これらのTSN技術の標準化動向について述べる。

- (注2) PROFIBUSとPROFINETは、プロフィバス協会の登録商標である。
- (注3) ControlNetは、ControlNet Internationalの登録商標である。
- (注4) INTERBUSは、フェニックスコンタクト(株)の登録商標である。
- (注5) EtherCATは、Beckhoff Automation GmbHの登録商標である。
- (注6) EtherNet/IPは、ODVAの登録商標である。

3. 標準化動向

2006年頃から規格化が開始されたEthernet AVB(IEEE 802.1AVB: Audio/Video Bridging)と呼ばれるEthernet経由で映像や音楽を伝送するための規格が策定され、主にEthernetの時刻同期(IEEE 802.1AS)とストリーム帯域予約(IEEE 802.1Qat)に関する規定がなされているが、一部の玄人向けのオーディオ・ビデオ配信のための規格であったため、広く普及していなかった。そこで、この規格の普及を推進するため、相互運用性を確保する適合試験を策定するAVnu Allianceを、Cisco社やIntel社が中心となり2009年に立ち上げた。これを2012年頃から産業界や自動車業界が着目し、産業用や車載用途に必要なリアルタイム性やフェイルセーフに関する議論が進められたことで、IEEE 802.1TSNの標準化が進められるようになった。そのため、TSNは当初Ethernet AVB Gen2と呼ばれていた。

図2にIoTに向けた産業用イーサネットに関する規格化団体を示す。まず、日本では2004年に設立されたJASPAR(Japan Automotive Software Platform and Architecture)で、車載電子制御システムの高度化や複雑化に対し、特に車載

機器のソフトウェア化による開発費の増大が課題となっており、ソフトウェアやネットワークの標準化推進団体(AVnu AllianceやIEEE など)への車載要件の提案を中心に活動を行っている。

一方、イーサネットのリアルタイム性やフェイルセーフの向上とは関係はないが、車載のワイヤハーネスが乗用車1台で30kg前後にもなるとのことで、100Mbps又は1 Gbpsのイーサネットのシールドなし2線メタル伝送の物理層について、OPEN(One Pair Ethernet) Alliance SIGではIEEE 802.3bw(100BASE-T1)を推進し、RTPGE(Reduced Twisted Pair Gigabit Ethernet) Study Groupを得てIEEE 802.3bp(1000BASE-T1)の規格化が行われ、製品化が進められている。

また、工場等の産業界ではOPC-UA(OPC Unified Architecture)という異なるベンダーのオートメーション環境間の橋渡しをする標準化が進められており、そこではリアルタイム性を持たせるため、IEEE 802.1 TSNをレイヤ2以下の足回りの規格として利用する方向で議論が進められており、その状況は見逃せない。

以上を踏まえ、改めて表1に現在のIEEE 802.1TSNの規格化状況をまとめる。前述したように2012年頃から標準化が開始されており、4年目となる2016年には規格化完了が続々と進む状況となっているが、最近追加されたIEEE 802.1CMのように2019年5月に完了予定の規格もある。このIEEE 802.1CMはモバイルフロントホール向けにTSN技術を適用することで、低遅延の環境を提供することを目的に開始され、第5世代携帯基地局収容に向けて注目が集まっている。2016年に規格化完了予定のMAC層

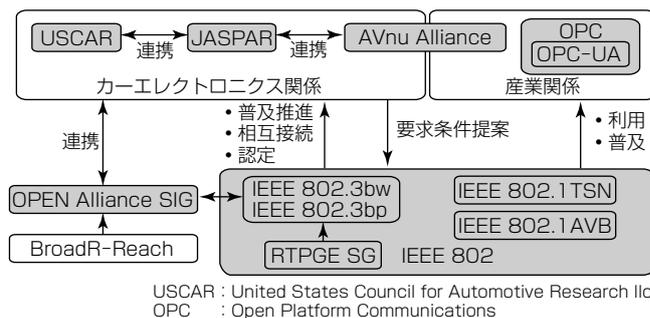


図2. 産業用イーサネット規格化団体の関係

表1. IEEE802.1TSN規格化状況

TSN規格群	内容	状況	完了予定
IEEE 802.1AS-Rev	Timing and Synchronization for Time-Sensitive Applications(時刻同期)	Draft 2.0	2017/2
IEEE 802.1Qbv	Enhancements for Scheduled Traffic(時分割スケジューリング)	Draft 3.1	2016/10
IEEE 802.1Qbu	Frame Preemption(割り込み優先転送)	Draft 3.1	2016/10
IEEE 802.1CB	Frame Replication and Elimination for Reliability(Seamless Redundancy)(冗長化)	Draft 2.1	2017/2
IEEE 802.1Qcc	Stream Reservation Protocol(SRP) Enhancements and Performance Improvement(ストリームリソース予約プロトコル)	Draft 0.5	2017/10
IEEE 802.1Qch	Cyclic Queuing and Forwarding(複数クラスのキューイングと転送)	-	2017/8
IEEE 802.1Qci	Per-Stream Filtering and Policing(フィルタリング及びポリシング)	Draft 1.0	2017/8 ?
IEEE 802.1CM	Time-Sensitive Networking for Fronthaul(モバイルフロントホール向けTSN)	Draft 0.1	2019/5
IEEE 802.3br	Interspersing Express Traffic(割り込み優先転送: 802.1QbuのMAC層規定)	Draft 2.4	2016/5

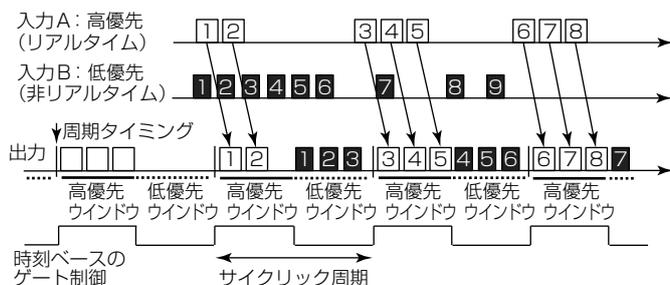


図3. IEEE 802.1Qbv

に近いところであるIEEE 802.1QbuやIEEE 802.1Qbvは、特に低遅延転送を実現する規格となっている。

リアルタイム性を実現する規格であるIEEE 802.1Qbvを図3に示す。規格の目的は、リアルタイムと非リアルタイムのトラフィックの混在収容とともに、周期的なリアルタイムトラフィックの伝送遅延を保証することにある。そのため、全てのノードや伝送装置との間で高精度な時刻同期を行い、サイクリック周期で、リアルタイムと非リアルタイムのトラフィックを時分割スケジューリングすることによって実現される。例えば入力Aのリアルタイムトラフィックは時刻を把握したノードから規定の時間で出力され、待つことなく高優先ウインドウで転送されるが、入力Bの非リアルタイムトラフィックは低優先ウインドウの時間まで待ってから出力されることとなる。

次にTSNで高信頼化を実現する規格であるIEEE 802.1CB (Seamless Redundancy)を図4に示す。他のTSNの規格より複雑であるため、少々遅れ気味であるが、目的を簡単に言うと、切替え時間を0sにすることであり、重要な制御フレームをロスさせないように複数経路にシーケンス番号とともにコピーして転送することで、途中で障害が発生しても他の経路の packets で目的のノードへ転送することができるという規格である。

最後にMACコントロール層の802.1Qbuから一部MAC層の部分であるとしてIEEE 802.3に変更されたIEEE 802.3br (IET: Interspersing Express Traffic)について述べる。この報告で試作検証した結果を後述するが、今までパケット単位での転送しか規定されていなかったが、パケットを分割して割り込ませる処理で高優先パケットの低遅延転送を可能とする。FP(Frame Preemption)方式とも呼ばれるこの方式は、低遅延転送を必要としない情報系フレームの転送中に低遅延転送が必要な制御系フレームの転送要求が発生した場合、図5に示すように、情報系フレームの転送を中断して分割し、制御系フレームを割り込み転送して、制御系フレームの遅延時間を低減する。IETでは、FPによって割り込むトラフィックの遅延時間を、1 Gbpsの転送速度でスイッチ1段で3 μs以内に抑えることとしている⁽²⁾。割り込み転送によって分割(フラグメント化)された情報系フレームの未転送部分は、制御系フレーム転送完

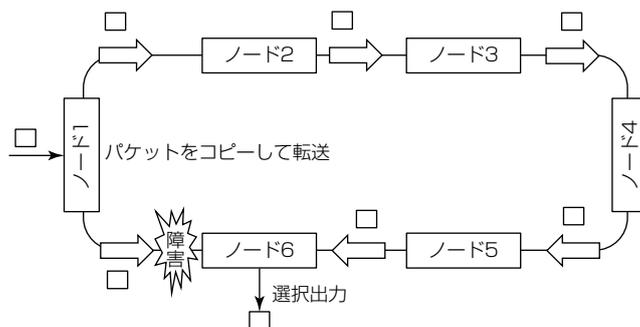


図4. IEEE 802.1CB

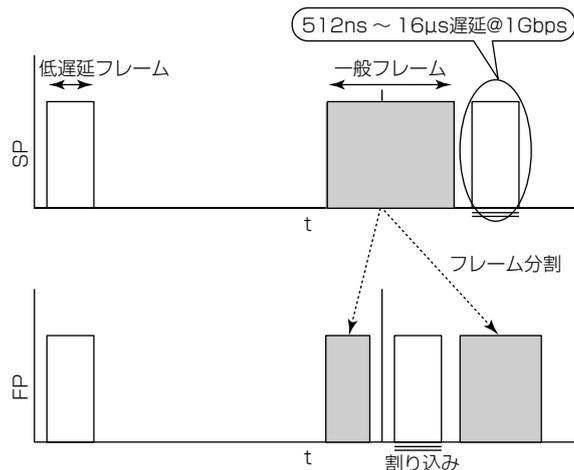


図5. IEEE 802.1br

了後に転送し、受信側のスイッチで結合して分割前のフレームに復元する。このため、フレームの再送・廃棄が発生せず、帯域を有効活用することができる⁽³⁾⁽⁴⁾。

以降、制御系で遅延要求の厳しいフレームをExpressフレーム、情報系で比較的遅延要求の厳しくないフレームをNormalフレームという。

4. 試作評価

試作では、IEEE 802.3brで標準化中のFP機能を備えたレイヤ2スイッチの基本機能を持つ1 Gbps × 4ポートの低遅延イーサネットスイッチをFPGA(Field Programmable Gate Array)評価基板上に実装し、図6に示すスイッチ2段の評価系を構成し、Expressフレームの遅延時間の評価を行った。評価は、遅延時間の比較のため、図7のようにExpressフレームを高優先、Normalフレームを低優先とし、転送制御にFP方式を用いた場合と、従来のイーサネットでは一般的な優先制御方式であるSP方式を用いた場合の2通りで行った。

評価系ではイーサネットアナライザから出力されたExpress及びNormalフレームは、スイッチ#1のポート3及びポート4に入力され、スイッチで入力されたフレームが多重化されてポート1から出力される。次に、この多重トラフィックをスイッチ#2のポート1に入力させ、ス

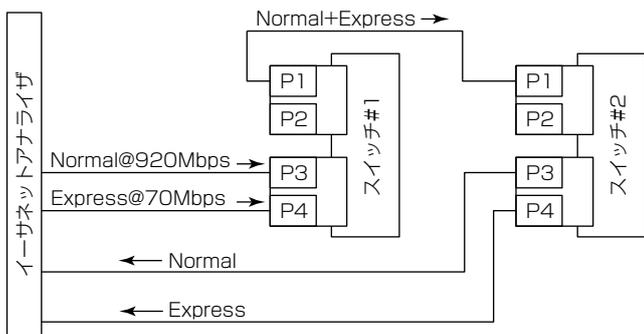


図6. 試作評価の構成

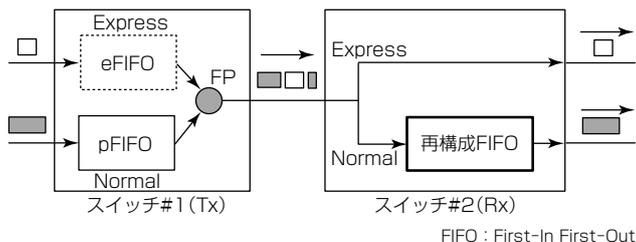


図7. FPによる割り込み転送

表2. データレート及びフレーム長

データ種別	データレート (Mbps)	フレーム長(バイト)
Express	70	128
Normal	920	64, 128, 256, 512, 1,024, 1,500, 2,000

表3. FP方式のExpressフレーム遅延測定結果

Normalフレーム長 (バイト)	Expressフレームの遅延時間(μs)			
	最大	最小	平均	揺らぎ
2,000	3.40	2.79	2.96	0.61
1,500	3.50	2.80	2.97	0.70
1,024	3.40	2.79	2.97	0.61
512	3.52	2.80	2.99	0.72
256	3.52	2.79	3.04	0.73
128	3.52	2.79	3.14	0.73
64	3.50	2.79	3.12	0.71

表4. SP方式のExpressフレーム遅延測定結果

Normalフレーム長 (バイト)	Expressフレームの遅延時間(μs)			
	最大	最小	平均	揺らぎ
2,000	22.90	6.52	14.26	16.38
1,500	18.51	5.66	12.07	12.85
1,024	14.32	5.69	9.87	8.63
512	9.82	5.26	7.52	4.57
256	7.57	5.22	6.36	2.35
128	6.44	5.22	5.79	1.22
64	5.89	5.22	5.51	0.67

スイッチ#2の内部で分離して、ポート3からExpressフレーム、ポート4から結合したNormalフレームを出力する。

Expressフレームの遅延測定は、アナライザから出力されたExpressフレームがスイッチ#1と#2を経由して、アナライザに戻るまでの遅延で行う。測定は、Normalフレームとの干渉による遅延の影響を検証するために、FP制御とSP制御のそれぞれの方式で、Normalフレーム長を

変化させながら、Expressフレームを10,000フレームずつ入力して行った。

表2は、測定におけるフレーム入力条件を示しており、Expressフレーム長は128バイトの固定で、データレートは70Mbpsである。一方、Expressフレームと競合するNormalフレーム長は、試行ごとに64バイトから2,000バイトの間で変化させ、データレートは920Mbpsとした。FP方式のスイッチとSP方式のスイッチをそれぞれ2段階ずつ通過したExpressフレームの遅延時間及び遅延揺らぎを表3、表4に示す。これらの結果から、このスイッチでFPを用いた場合の最大遅延時間は、Normalフレーム長によらず2段で3.52μsであり、SP方式の場合は、Normalフレーム長が長くなるのに従って、最大22.90μsから大幅に改善し、Expressフレームの遅延揺らぎも低減されることが分かった。

5. むすび

IoT技術への関心の高まりによって注目されつつあるTSN技術の適用領域、課題、標準化動向について触れ、TSN規格群の1つでIEEE 802.3br IET Task Forceで標準化された転送方式を実装したイーサネットスイッチの低遅延転送性能の評価結果について述べた。

本稿で述べたTSN技術は、今後、工場内機器、列車、自動車等の産業用ネットワークの統一規格として普及する可能性があり、これらの標準技術を用いることで、従来技術では難しかった、アクチュエータ、センサ、コントローラ等で扱われる遅延に厳しい制御系トラフィックと、WebアクセスやEメール等の比較的遅延を許容する情報系トラフィックを同一伝送路上で多重化できるようになる。

参考文献

- (1) Navet, N., et al.: Trends in automotive communication systems, Proc. of IEEE, **93**, No.6, 1204~1223 (2005)
- (2) Winkel, L.: Distinguished Minimum Latency Traffic, Joint IEEE -SA and ITU Workshop on Ethernet (2013)
http://www.IEEE802.org/3/DMLT/public/Jul13/ITU_IEEE_workshop_DMLT_Winkel_r0.pdf
- (3) IEEE 802.3br Interspersing express traffic Task Force (2015)
<http://www.IEEE802.org/3/br/index.html>
- (4) IEEE 802.3br Interspersing express traffic (IET) Task Force (TF) Baseline, ver1.0, rev.4 (2015)
http://www.IEEE802.org/3/br/Baseline/8023-IET-TF-1405_Winkel-iet-Baseline-r4.pdf