

1.2.9 研究開発項目⑤「光電ハイブリッドスイッチシステム実証」

【成果の概要】

本章では、各研究項目で開発を行った光コアスイッチ、光波長送受信器、バースト多値プロセッサを集約して構築した実証システムを用いて、機能実証および性能評価を行った。その内容を以下に示す。

- 光経路切り替え実証実験
光波長送受信器間伝送速度 200Gbps において、物理的伝送経路の切り替え時間として 250 μ s 以下を達成した。
- TOS 値変更待ち時間
光経路切り替えを行う際に IP パケットレベルでの疎通を取るために必要となる TOS 値変更タイミングについて明らかにした。
- IP パケット疎通実証
電気経路から光経路へと切り替えを行った場合においてサーバ間での IP パケットが疎通可能であり、さらに TOS 値変更タイミングを適切に選ぶことにより、IP パケット損失をゼロにできることを実証した。
- 映像信号を用いたシステム機能実証
リアルタイム性が重視される 8K および 4K 非圧縮映像信号を用いて、光バースト受信機能と TOS 値変更による電気・光経路切り替え機能を確認した
- 400Gbps バースト受信機能実証
ライン側伝送速度 400Gbps の DP-16QAM 信号を用いてバースト多値プロセッサのバースト受信機能を実証した。

【最終目標】

各要素の連携動作を実現し、提案システムの機能実証を行うとともに、高電力効率の実現性と 1000 ポート級へのシステム拡張性を示す。システム機能実証においては、光 ToR スwitch間伝送速度 200Gbps における高速経路切り替えの実証に加え、伝送速度 400Gbps におけるバースト受信機能を確認する。

【成果】

<実証システムの構築>

システムとしての機能を実証するため 3 台の光 ToR スwitch、光コアスイッチから構成される実証用システムを構築した。光 ToR スwitch間の信号伝送速度は 200Gbps であり、変復調方式として DP-QPSK 方式を用いている。以下に、システム機能実証と性能評価結果について述べる。

図 1.2.9-1 に実証システムの構成を示す。

ここで、光 ToR スwitchは、以下から構成される。

- ① OpenFlow 機能を有する 100GbE Ethernet Switch
- ② 光波長送受信器
- ③ リンク維持送受信ボード

さらに、光波長送受信器は以下から構成される。

- ① 光波長送受信ボード

② バースト多値プロセッサ実装ボード

また、光コアスイッチ、光波長送受信ボードは EtherCAT スレーブ機能を有しており、EtherCAT マスタより Distributed Clocks (DC)モードにより制御される。さらに、100GbE および GbE インタフェースを有する Linux サーバ、100GbE 信号測定器（アンリツ MT1000）が接続され、これらはコントローラより Ethernet を介して送出する IP パケットの TOS 値の変更が可能である。

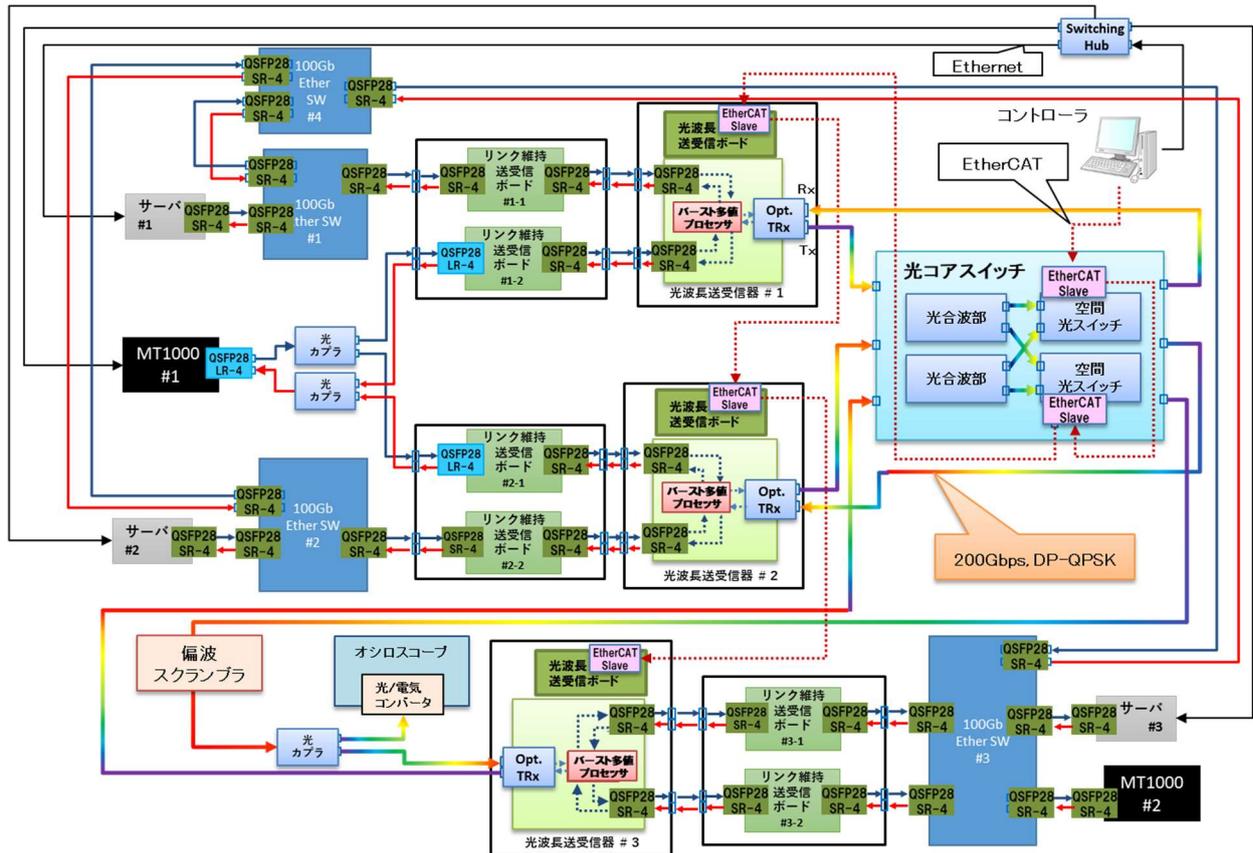


図 1.2.9-1 実証システム構成

<光経路切り替え実証実験>

実証システムにおいて経路切り替え時間の測定を行った。実証システムでは、電気経路のみを用いて IP パケットの通信を行っているとき、光波長送受信器および光コアスイッチは、光波長送受信器が送受自己折り返しとなるよう設定を行っている。したがって、電気経路から光経路に通信経路を切り替える場合も光コアスイッチと局発光波長の切り替えを行っている。

図 1.2.9-1 において、サーバ # 1 とサーバ # 3 を接続する光伝送経路を光経路 1、サーバ # 2 とサーバ # 3 を接続する光伝送経路を光経路 2 とする。光経路 1 を用いてサーバ # 1 とサーバ # 3 とが通信を行っている状態から、光経路 2 を用いてサーバ # 2 とサーバ # 3 が通信を行う状態へ切り替えを行う場合の制御シーケンスを以下に示す。

- ① EtherCAT マスタより光コアスイッチ、対向する光波長送受信ボードに対して光経路および局発光波長の切り替え指示を行う。
- ② 光コアスイッチが経路切り替えを行う。

- ③ 2台の光波長送受信ボードは、互いの信号を受信できるよう局発光波長を対向する光波長送受信器の送信波長へ切り替えを行う。また、バースト多値プロセッサに対して再同期トリガを発出する。
- ④ バースト多値プロセッサは再同期トリガによってライン側再同期を行う。

ここで、図 1.2.9-1 に示した実証システム構成において、オシロスコープで観測される光経路切り替え時の光波長送受信器 # 3 の動作モニタ波形の一例を図 1.2.9-2 に示す。

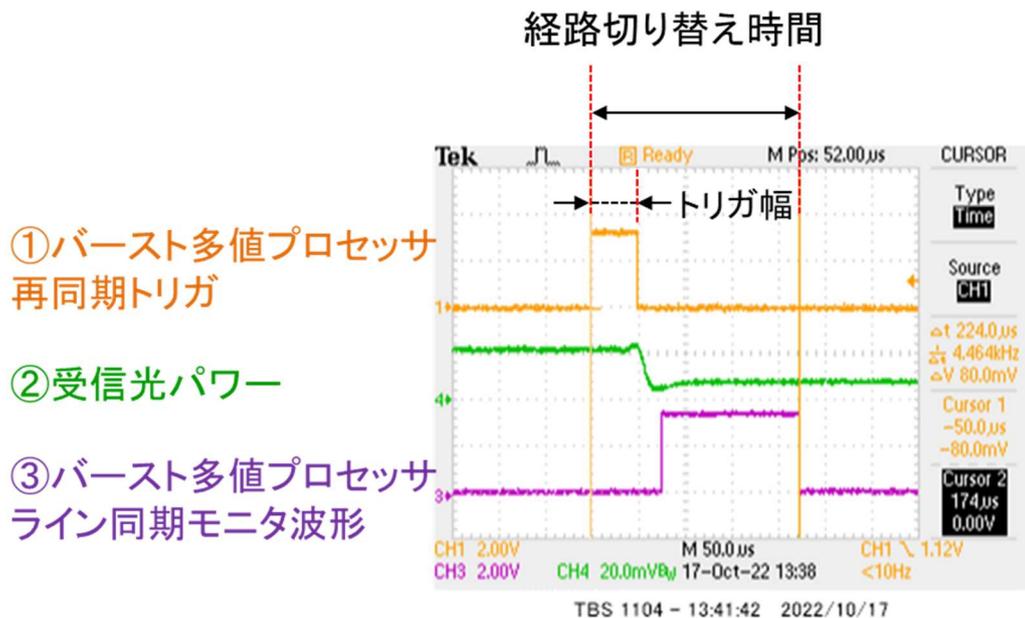


図 1.2.9-2 光経路切り替え時の光波長送受信器 # 3 動作モニタ波形

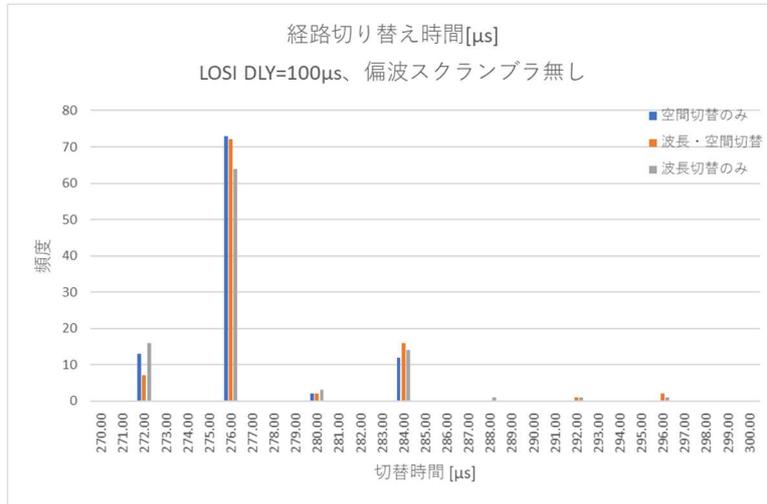
図 1.2.9-2 について説明する。光波長送受信ボードは EtherCAT マスタから波長切り替えコマンドを受け取ると①に示すようにバースト多値プロセッサ再同期信号を Low レベルから High レベルに変更する。また、光波長送受信器 # 3 の受信光パワーは光コアスイッチの切り替えによって②に示すように入力光パワーが変化する。さらに、バースト多値プロセッサはライン側入力信号の再同期処理を開始し、③に示す同期モニタ波形を出力する。このモニタ波形は、High レベルで非同期、Low レベルで同期状態を示しているが、光コアスイッチの切り替えによって光信号断を検知し、Low レベルから High レベルへと変化する。また、バースト多値プロセッサは①再同期トリガレベルが High レベルから Low レベルに変化することを契機として再同期処理を開始し、再同期処理が完了すると同期モニタ波形は Low レベルとなる。ただし、再同期モニタを High レベルにする場合には安易な警報発出を防ぐため一定の遅延が生じる設定を行っている。

ここで、経路切り替え時間をバースト多値プロセッサ再同期トリガ立ち上がりから同期モニタが Low レベルとなる時間までと定義する。

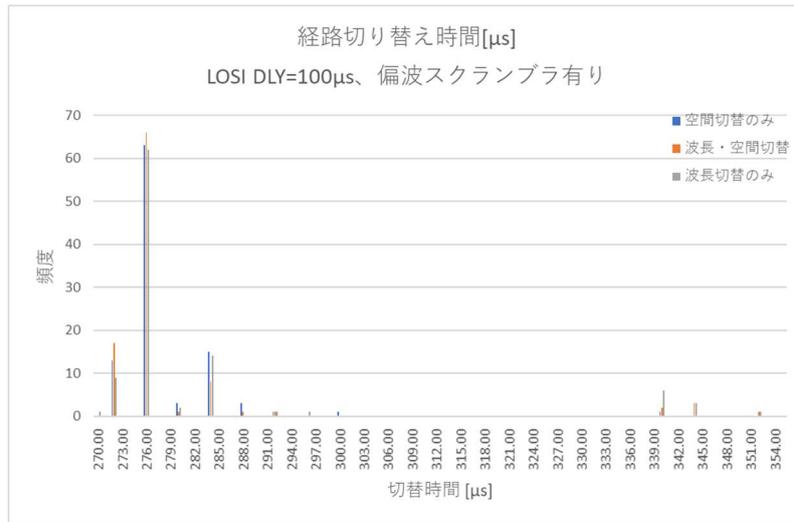
実証実験では、バースト多値プロセッサの再同期トリガ幅をパラメータとして偏波スクランブラがある場合とない場合について経路切り替え時間を測定した。結果を以下に示す。

(1) トリガ幅 (LOSI DLY) 100 μ s における切り替え時間

図 1.2.9-3 にトリガ幅が 100 μ s における経路切り替え時間のヒストグラムを示す。本測定では光経路 1 (光波長送受信器 # 1 ~ # 3 間) から光経路 2 (波長送受信器 # 2 ~ # 3)、経路 2 から経路 1 へそれぞれ 50 回の切り替えを行った。



(a) 偏波スクランブラ無し



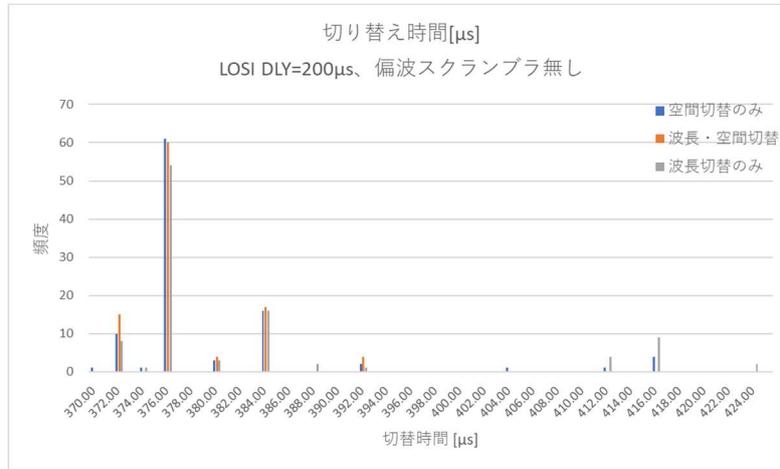
(b) 偏波スクランブラ有り

図 1.2.9-3 経路切り替え時間 (トリガ幅 100 μ s)

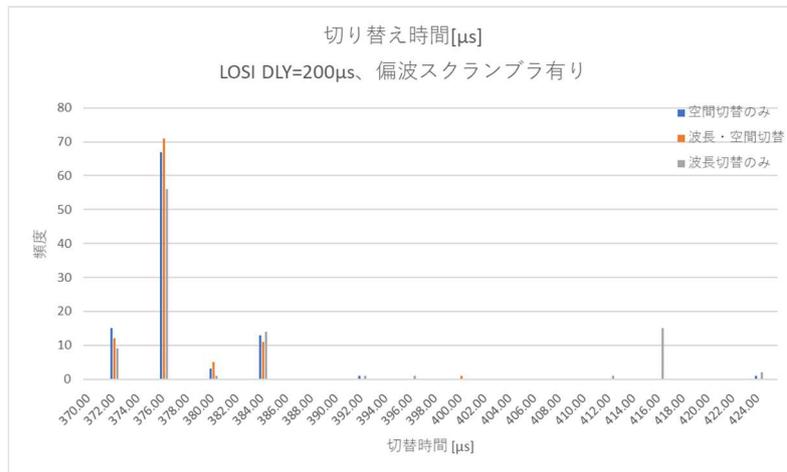
図 1.2.9-3 は、光経路 1 と光経路 2 を切り替えた際に光波長送受信器 # 3 における波長切り替え実施の有無と光コアスイッチにおける空間切り替え実施の有無の 3 つのケースについて測定を行っている。図 1.2.9-1 に示した実証システムに用いた光コアスイッチは、2 つの光合波部と 2 つの空間光スイッチが搭載されているが、「空間切替のみ」とは光経路 1 と光経路 2 とを切り替える際に、異なる「光合波部」からの信号を受信するが波長切り替えを行っていないことを意味し、「波長切替のみ」とは、同一の「光合波部」からの信号を受信しているが波長切り替えを行っている場合を意味している。

(2) トリガ幅 (LOSI DLY) 200 μ sにおける切り替え時間

図 1.2.9-4 にトリガ幅が 200 μ s における経路切り替え時間のヒストグラムを示す。



(a) 偏波スクランブラ無し

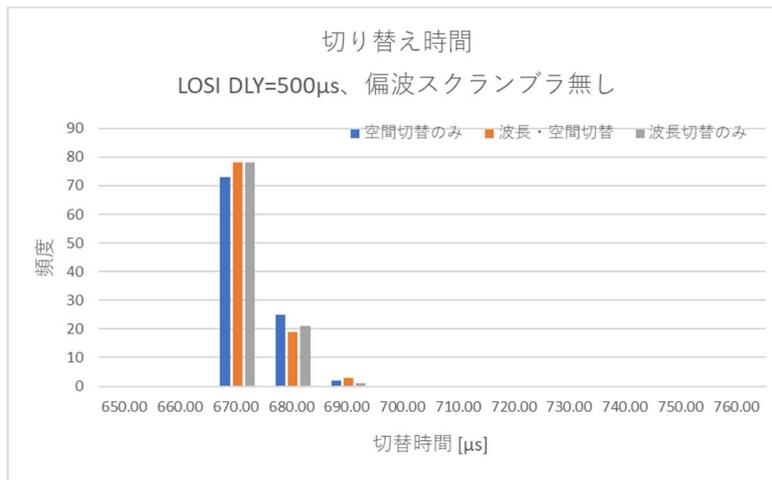


(b) 偏波スクランブラ有り

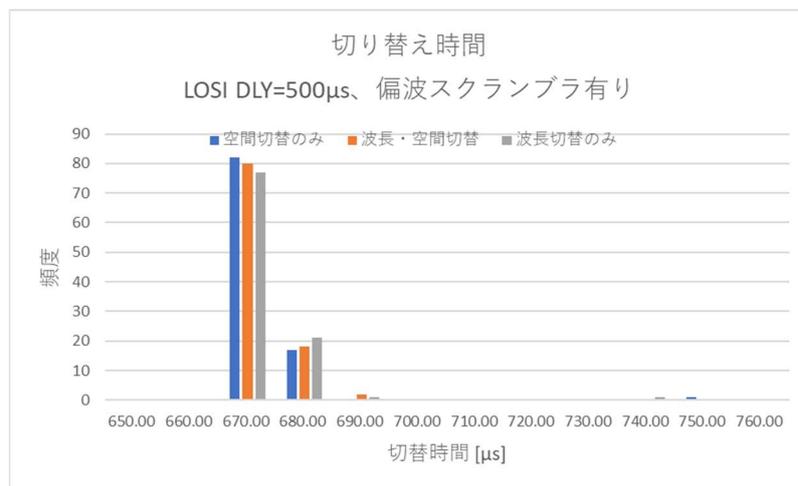
図 1.2.9-4 経路切り替え時間 (トリガ幅 200 μ s)

(3) トリガ幅 (LOSI DLY) 500 μ sにおける切り替え時間

図 1.2.9-5 にトリガ幅が 500 μ s における経路切り替え時間のヒストグラムを示す。



(a) 偏波スクランブラ無し

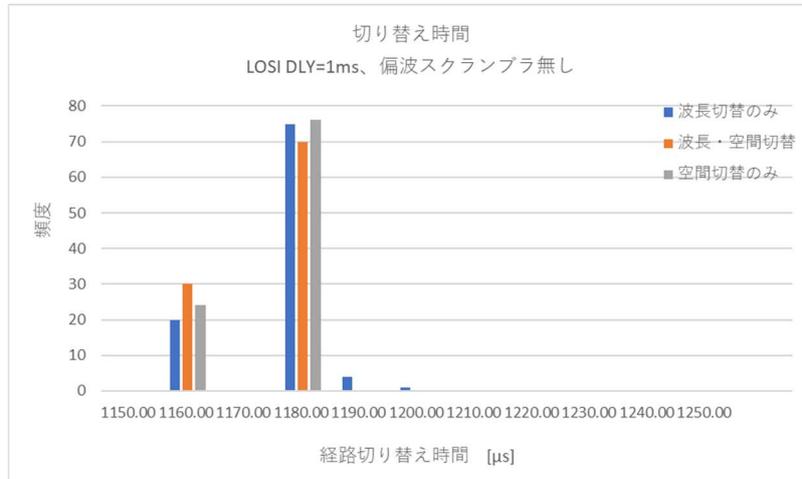


(b) 偏波スクランブラ有り

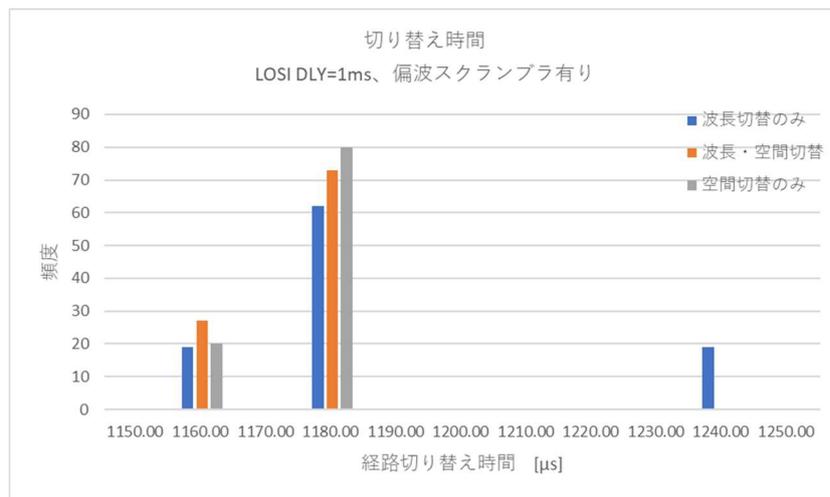
図 1.2.9-5 経路切り替え時間 (トリガ幅 500 μ s)

(4) トリガ幅 (LOSI DLY) 1ms における切り替え時間

図 1.2.9-6 にトリガ幅が 1ms における経路切り替え時間のヒストグラムを示す。



(a) 偏波スクランブラ無し



(b) 偏波スクランブラ有り

図 1.2.9-6 経路切り替え時間 (トリガ幅 1ms)

(5) 経路切り替え時間のトリガ幅依存性について

経路切り替え時間のトリガ幅依存性を表 1.2.9-1、表 1.2.9-2、図 1.2.9-7、図 1.2.9-8 に示す。

表 1.2.9-1 経路切り替え時間（偏波スクランブラ無し）

トリガ幅 [μs]	最頻値 [μs]	平均値 [μs]	最大値 [μs]
50	224	226	244
100	276	277.4	296
200	376	380.17	424
500	670	672.3	690
1000	1180	1175	1200

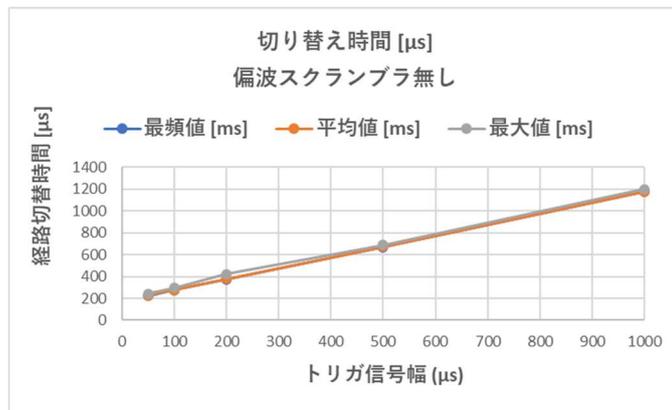


図 1.2.9-7 経路切り替え時間のトリガ幅依存性（偏波スクランブラ無し）

表 1.2.2-2 経路切り替え時間（偏波スクランブラ有り）

トリガ幅 [μs]	最頻値 [μs]	平均値 [μs]	最大値 [μs]
100	276	280.78	352
200	376	379.51	424
500	670	672.57	750
1000	1180	1179.4	1240

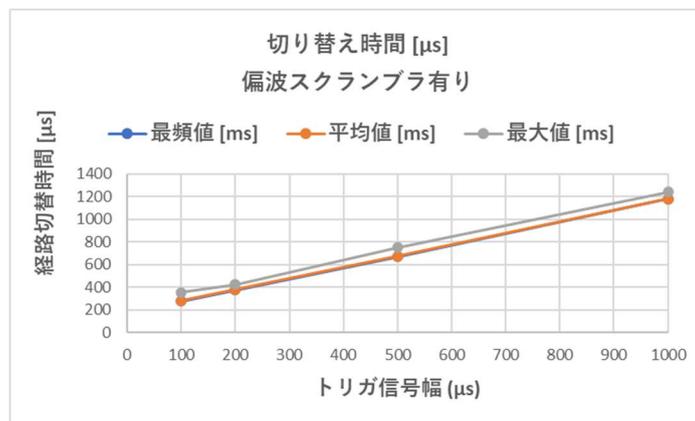


図 1.2.9-8 経路切り替え時間のトリガ幅依存性（偏波スクランブラ有り）

これらの結果より以下のことがわかる。

- ・経路切り替え時間はトリガ幅に $180\mu\text{s}$ あまりを加えたものとなる。トリガ幅 $50\mu\text{s}$ 、偏波スクランブラ無しの場合の平均値は $226\mu\text{s}$ であり、 $245\mu\text{s}$ 以下の経路切り替え時間となる。
- ・偏波スクランブラを用いることで切り替え時間の平均値および最大値は増大する。また、トリガ幅を広くすることにより経路切り替え時間は増大し、トリガ幅 $100\mu\text{s}$ において $400\mu\text{s}$ 以下となる。

また、本実証システムに用いた光コアスイッチは 1000 ポートのうち 16 チャンネル分のみを実装しているが、光合波部と空間光スイッチを順次増設していくことにより 1000 ポート規模への拡張が容易に行うことができるスイッチ構成となっている。

光コアスイッチのポート拡張性については、1.2.7 で述べる。

<TOS 値変更待ち時間>

図 1.2.2-5、図 1.2.2-7 に示したように、光伝送経路への切り替え時には光コアスイッチおよび光波長送受信器のライン側再同期時間に加えて、クライアント信号に関わる処理時間が存在し IP パケットの送受信が可能となるまで一定時間を要する。パケットロスをなくすには、この通信再開までの間は電気経路を用いて IP パケットを送受信すればよい。したがって、光コアスイッチ切り替え指示後、この通信再開時間分だけ遅らせて IP パケットの TOS 値の変更を行う必要がある。

実証システムを用いて TOS 値変更待ち時間の測定を行った。図 1.2.9-9 に測定系を示す。

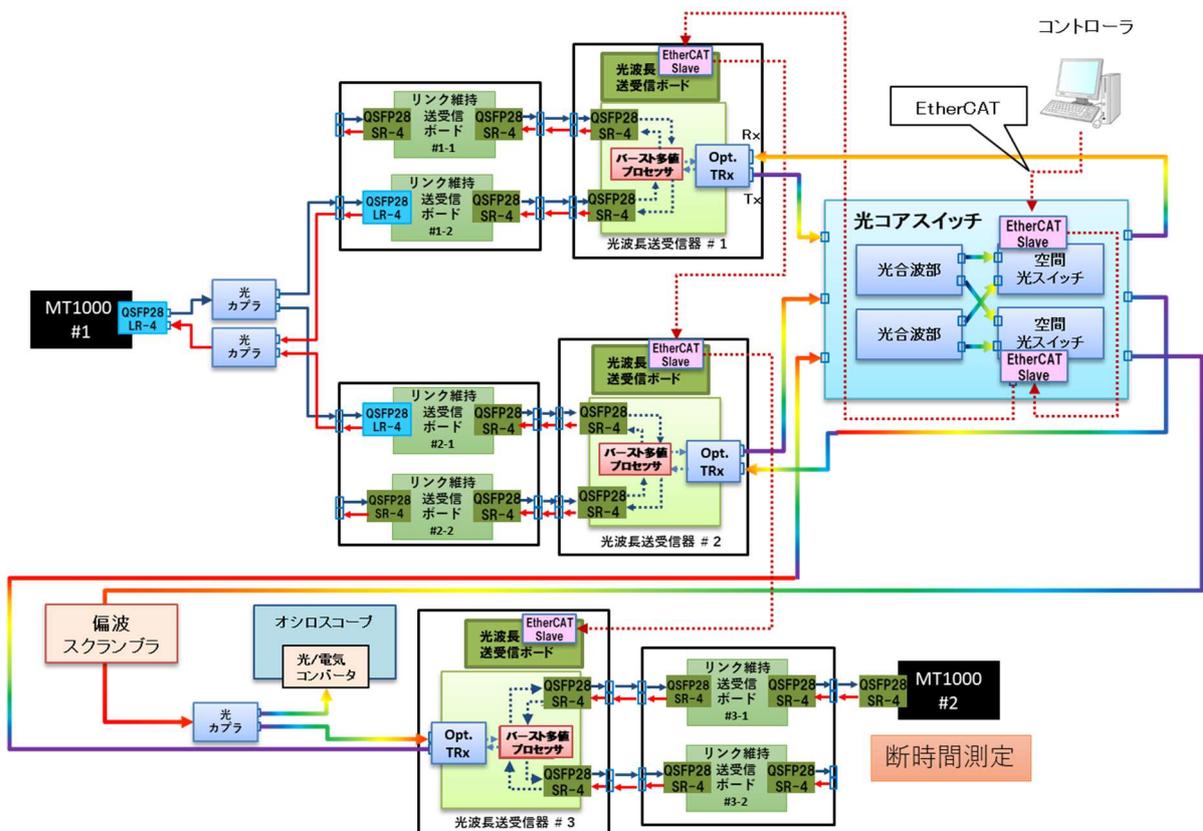


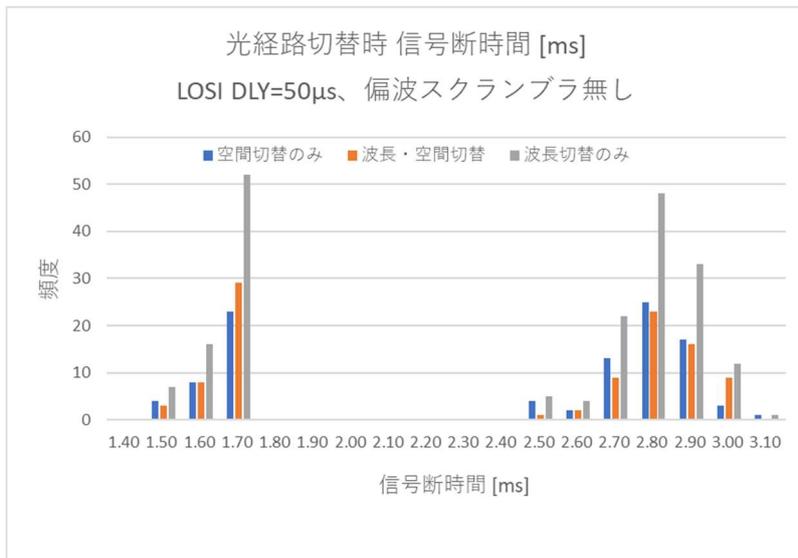
図 1.2.9-9 TOS 値変更待ち時間測定系構成

本測定では、本図左側の信号解析装置（アンリツ MT1000#1）より 100GbE 信号を発生させ、右下

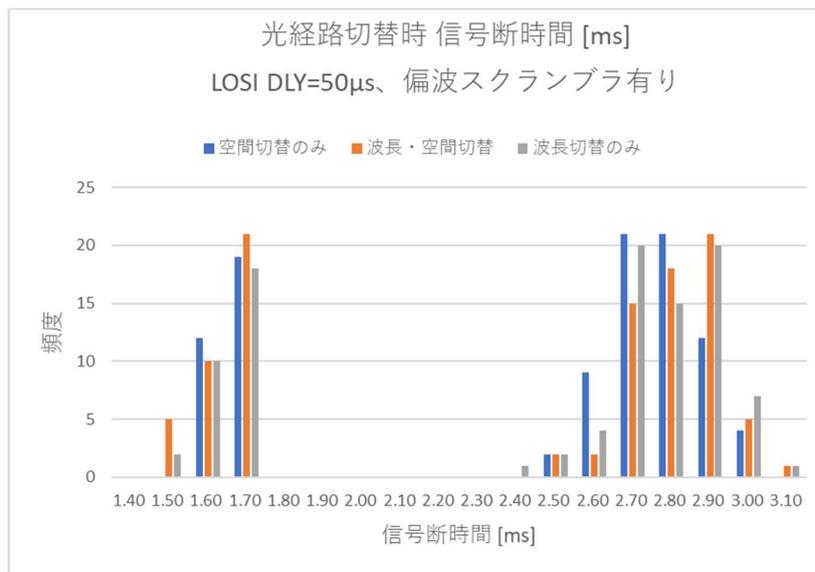
の信号解析装置（アンリツ MT1000#2）で信号を受信する。コントローラより EtherCAT を用いて光経路 1（光波長送受信器 # 1～光波長送受信器 # 3）と光経路 2（光波長送受信器 # 2～光波長送受信器 # 3）を切り替え、MT1000#2 で信号断時間を測定する。信号断時間は送信される Ethernet フレームサイズと受信できなかったフレーム数より求められる。信号断時間は偏波スクランブラが有る場合と無い場合について、再同期トリガ信号幅 50 μ s、100 μ s、200 μ s、500 μ s、1ms に対して行った。

(1) トリガ幅 (LOSI DLY) 50 μ s における信号断時間

図 1.2.9-10 にトリガ幅 50 μ s とした場合の信号断時間測定結果を示す。



(a) 偏波スクランブラ無し

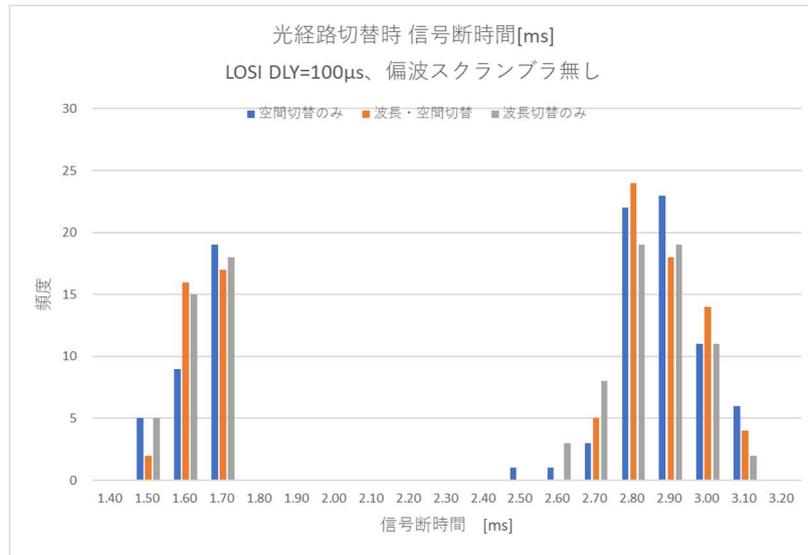


(b) 偏波スクランブラ有り

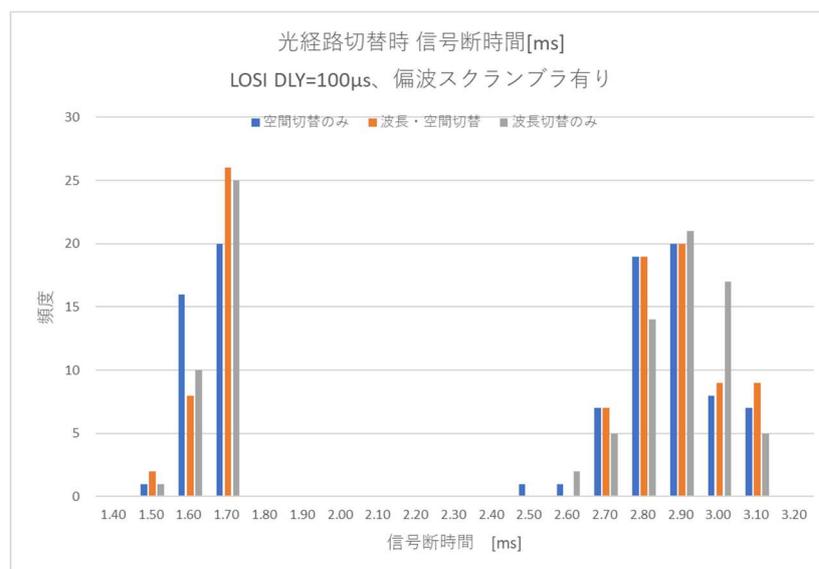
図 1.2.9-10 信号断時間 (トリガ幅 50 μ s)

(2) トリガ幅 (LOSI DLY) 100 μ sにおける信号断時間

図 1.2.9-11 にトリガ幅 100 μ s とした場合の信号断時間測定結果を示す。



(a) 偏波スクランブラ無し

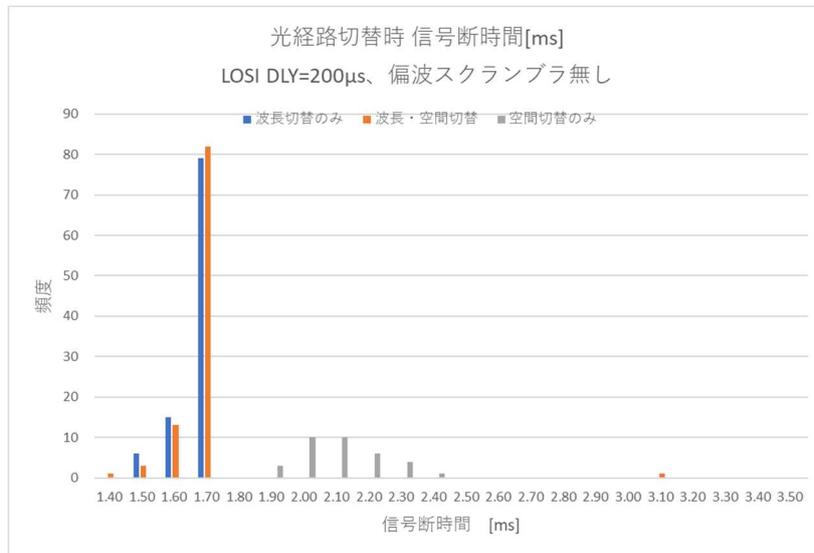


(b) 偏波スクランブラ有り

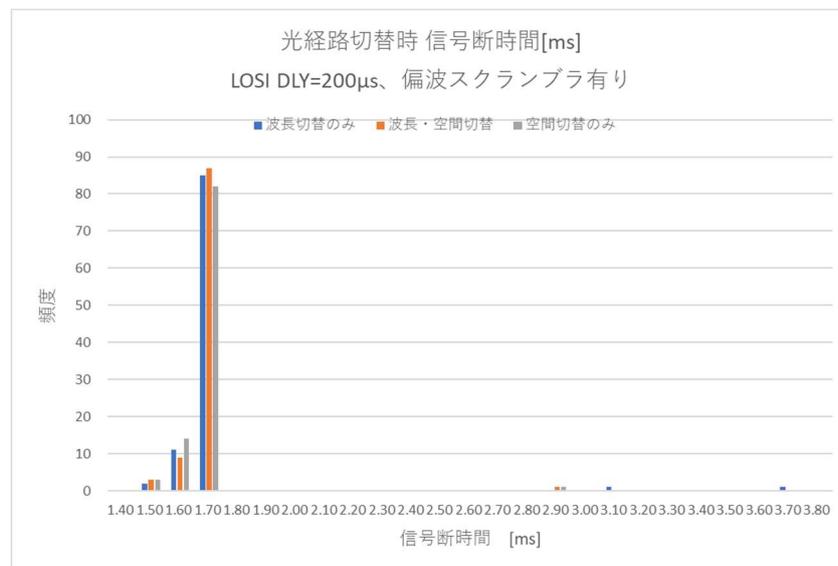
図 1.2.9-11 信号断時間 (トリガ幅 100 μ s)

(3) トリガ幅 (LOSI DLY) 200 μ sにおける信号断時間

図 1.2.9-12 に信号断時間測定結果を示す。



(a) 偏波スクランブラ無し

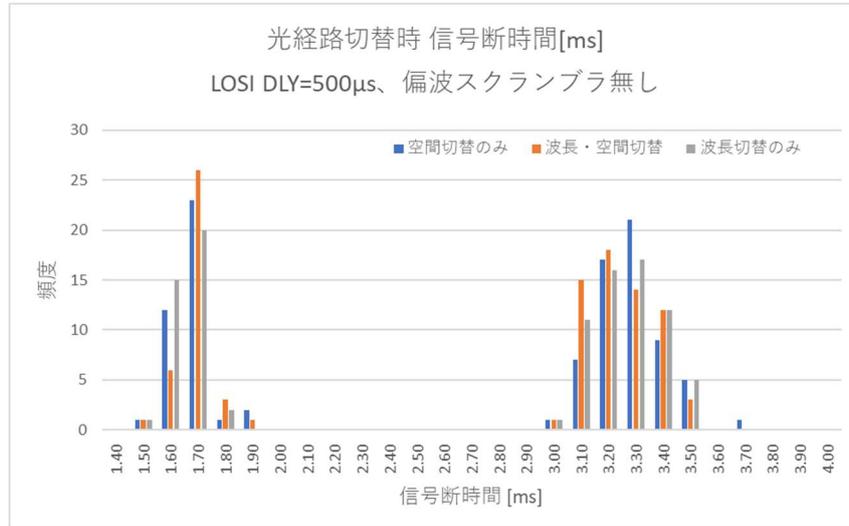


(b) 偏波スクランブラ有り

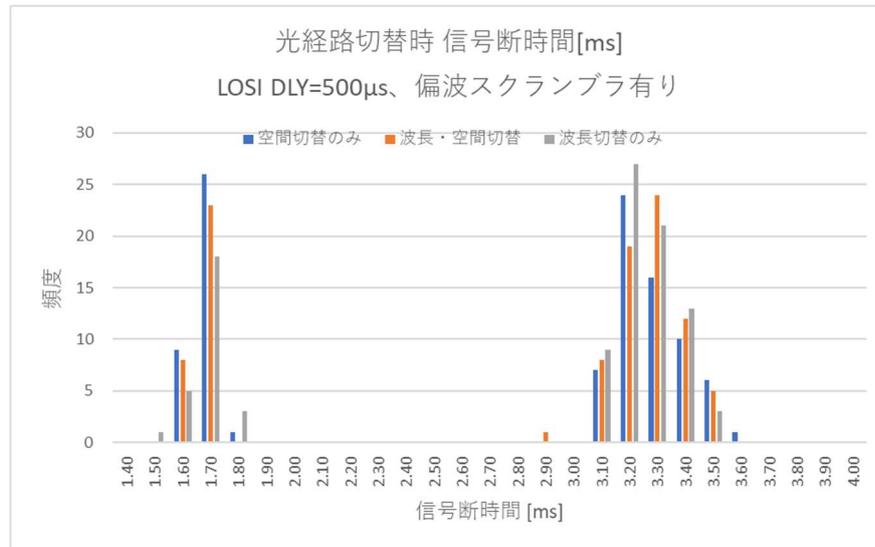
図 1.2.9-12 信号断時間 (トリガ幅 200 μ s)

(4) トリガ幅 (LOSI DLY) 500 μ s における信号断時間

図 1.2.9-13 に信号断時間測定結果を示す。



(a) 偏波スクランブラ無し

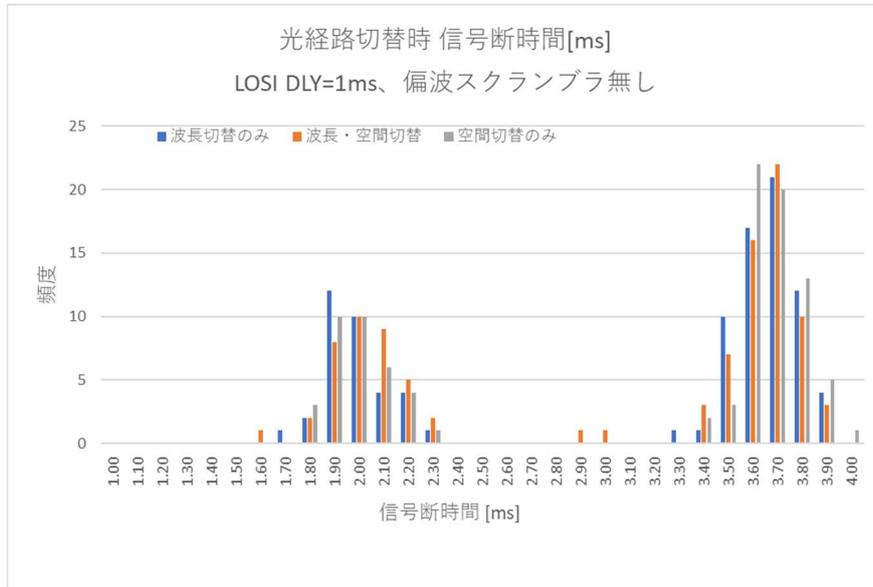


(b) 偏波スクランブラ有り

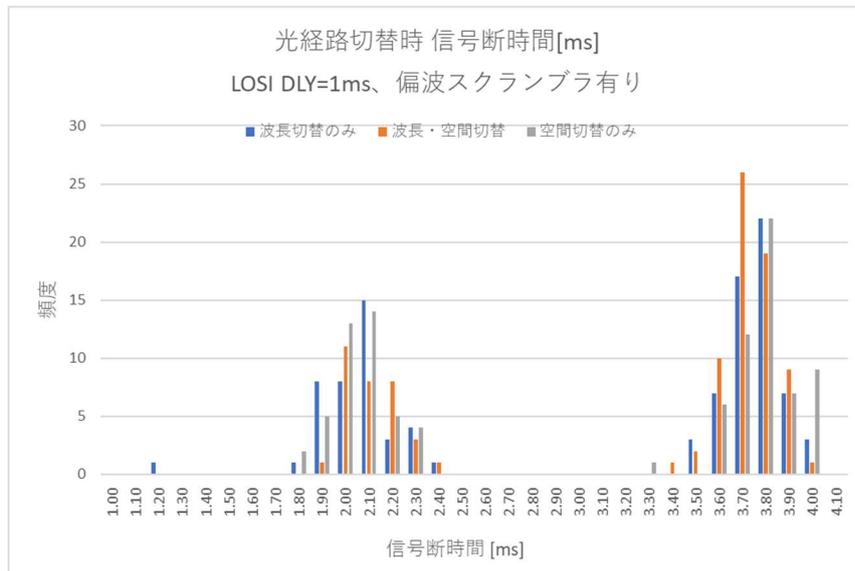
図 1.2.9-13 信号断時間 (トリガ幅 500 μ s)

(5) トリガ幅 (LOSI DLY) 1ms における信号断時間

図 1.2.9-14 に信号断時間測定結果を示す。



(a) 偏波スクランブラ無し



(b) 偏波スクランブラ有り

図 1.2.9-14 信号断時間 (トリガ幅 1ms)

(6) 信号断時間のトリガ幅依存性について

信号断時間のトリガ幅依存性を表 1.2.9-3、表 1.2.9-4、および図 1.2.9-15、図 1.2.9-16 に示す。

表 1.2.9-3 信号断時間 (偏波スクランブラなし)

トリガ幅 [μs]	最頻値 [ms]	平均値 [ms]	最大値 [ms]
50	1.68	2.36	3.07
100	1.68	2.38	3.09
200	1.68	1.65	3.00
500	1.68	2.67	3.68
1000	3.70	3.13	4.01

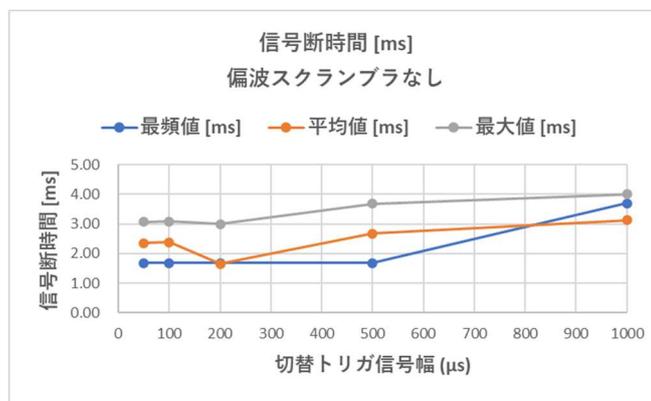


図 1.2.9-15 信号断時間のトリガ幅依存性 (偏波スクランブラなし)

表 1.2.9-4 信号断時間 (偏波スクランブラあり)

トリガ幅 [μs]	最頻値 [ms]	平均値 [ms]	最大値 [ms]
50	1.68	2.37	3.03
100	1.68	2.39	3.08
200	1.68	1.67	3.68
500	1.68	2.72	3.57
1000	3.70	3.06	4.00

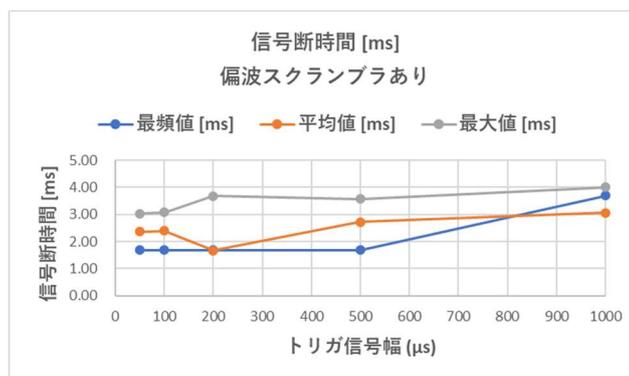


図 1.2.9-16 経路切り替え時間のトリガ幅依存性 (偏波スクランブラあり)

測定結果より、TOS 値変更待ち時間はトリガ信号幅への依存性は小さく、最低でも 4ms 程度が必要となることがわかる。また、いずれのトリガ幅においても信号断時間の頻度分布は主に 2 つに分かれており、その間の頻度分布がゼロとなる時間は 1ms 程度となっている。これは、バースト多値プロセッサへの入力信号と再同期トリガとの位相関係によって光波長送受信器でのクライアント信号出力が可能となるまでの処理時間に違いが生じるためと考えられる。

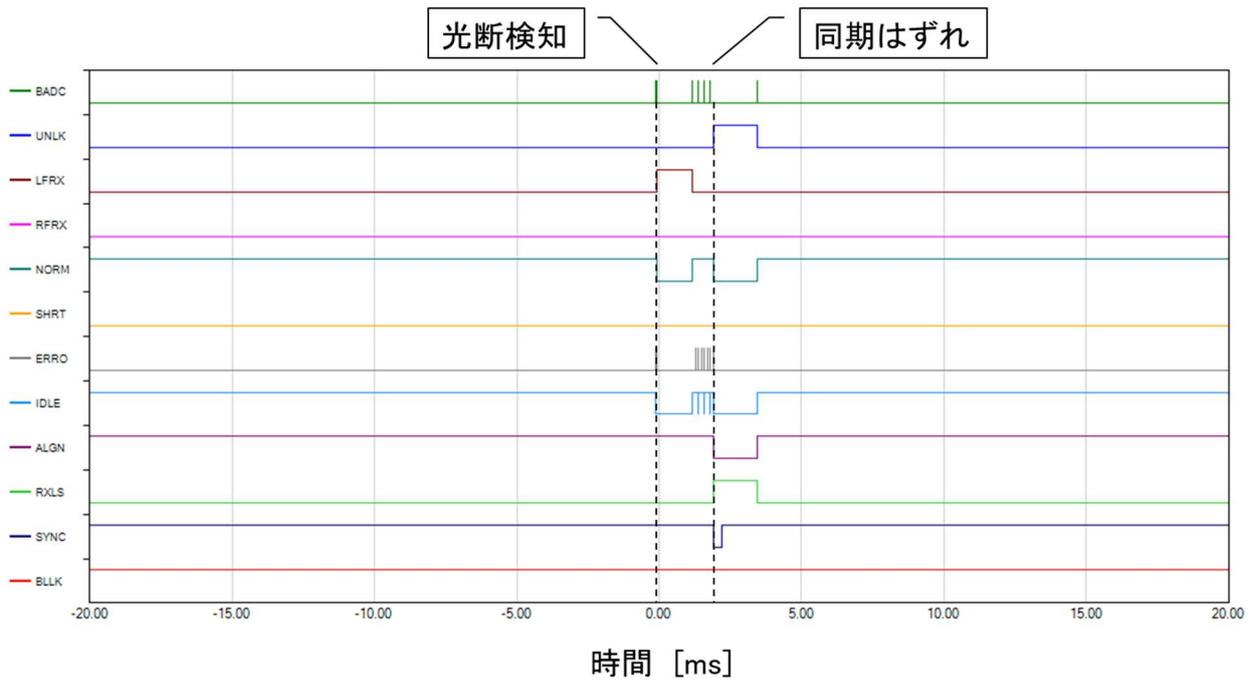
(7) 光経路切り替え時のバースト多値プロセッサ出力信号状態について

図 1.2.9-9 に示した測定系で用いた 100GbE リンク維持回路は、入力信号のモニタ機能を有している。モニタ可能な項目を表 1.2.9-5 に示す。

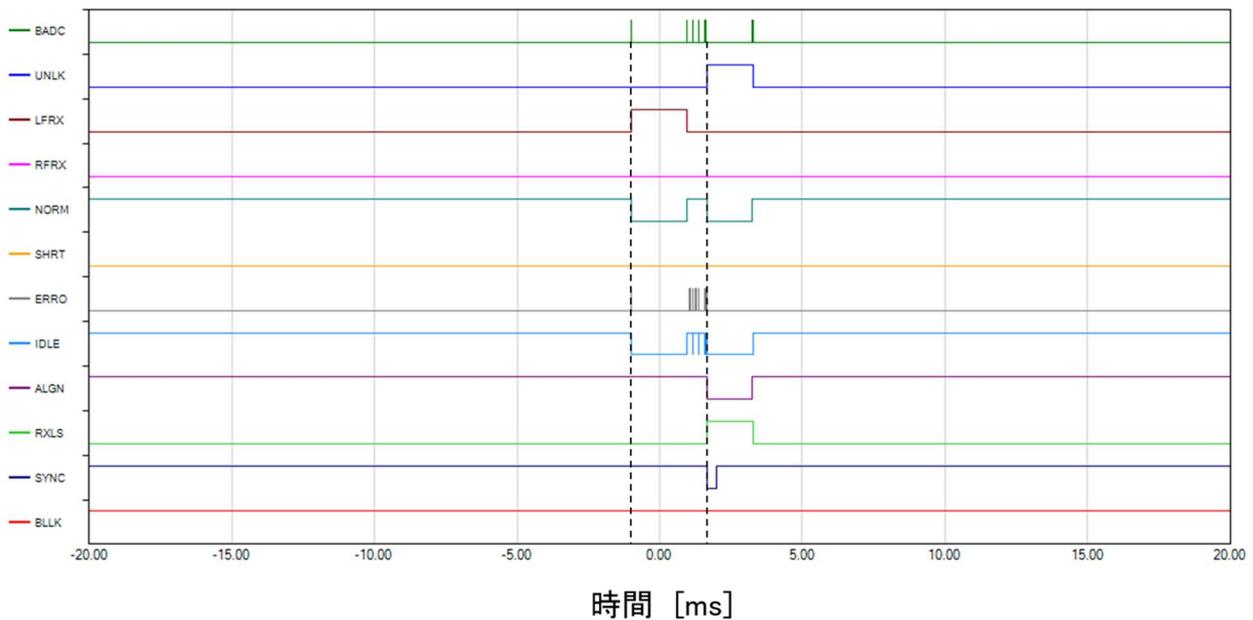
表 1.2.9-5 100GbE リンク維持回路の信号モニタ項目

項番	表示	内容	表示方法
1	BADC	64B/66B 同期ヘッダ誤り発生	‘1’誤り発生
2	UNLK	受信系同期外れ	‘1’で同期外れ検知
3	LFRX	Local Fault(LF)信号を受信	‘1’で LF 信号受信
4	RFRX	Remote Fault(RF)信号を受信	‘1’で RF 信号受信
5	NORM	通常の Ethernet フレームを受信	‘1’で受信
6	SHRT	64byte 未満のショート Ethernet フレームを受信	‘1’で受信
7	ERROR	FCS エラーの Ethernet フレームを受信	‘1’で受信
8	IDLE	IDLE 信号を受信	‘1’で受信
9	ALGN	レーンアライメント確立状態	‘1’で確立
10	RXLS	受信障害（リンク断など）を検知	‘1’で検知
11	SYNC	レーン同期確立状態	‘1’で確立
12	BLLK	64B/66B 同期確立状態	‘1’で確立

図 1.2.9-17 に経路切り替えを行った際の光波長送受信器の出力信号モニタ結果を示す。代表的なモニタ結果として、トリガ幅 100 μ s と 1ms のときに、空間切り替えと波長切り替えを伴う経路切り替えを行い、受信側に偏波スクランブラを挿入した場合について示している。表示可能な範囲は再同期トリガ信号レベルが High から Low となったときを起点として -20ms から +20ms の範囲である。



(a) トリガ幅 100 μ s



(d) トリガ幅 1ms

図 1.2.9-17 経路切り替え時の波長送受信器の出力信号モニタ結果
(波長切り替えあり、空間切り替えあり、偏波スクランブラあり)

図 1.2.9-17 より、光コアスイッチ切り替えによる光信号断を検知して Local Fault(LF)信号が発出され、その後光波長送受信ボードから再同期トリガによって UNLK で示される同期はずれが発生する。その後、クライアント側のプラグブルトランシーバ（市販品）の再同期処理が完了して、通常の

Ethernet フレーム (NOLM) の受信が再開されていることがわかる。

<IP パケット疎通実証>

(1) 電気経路⇔光経路切り替え

これまで述べた経路切り替えシーケンスを用いて、本実証システムを用いて電気経路と光経路の切り替え条件下において IP パケットの疎通実証実験を行った。実験系の構成を図 1.2.9-18 に示す。

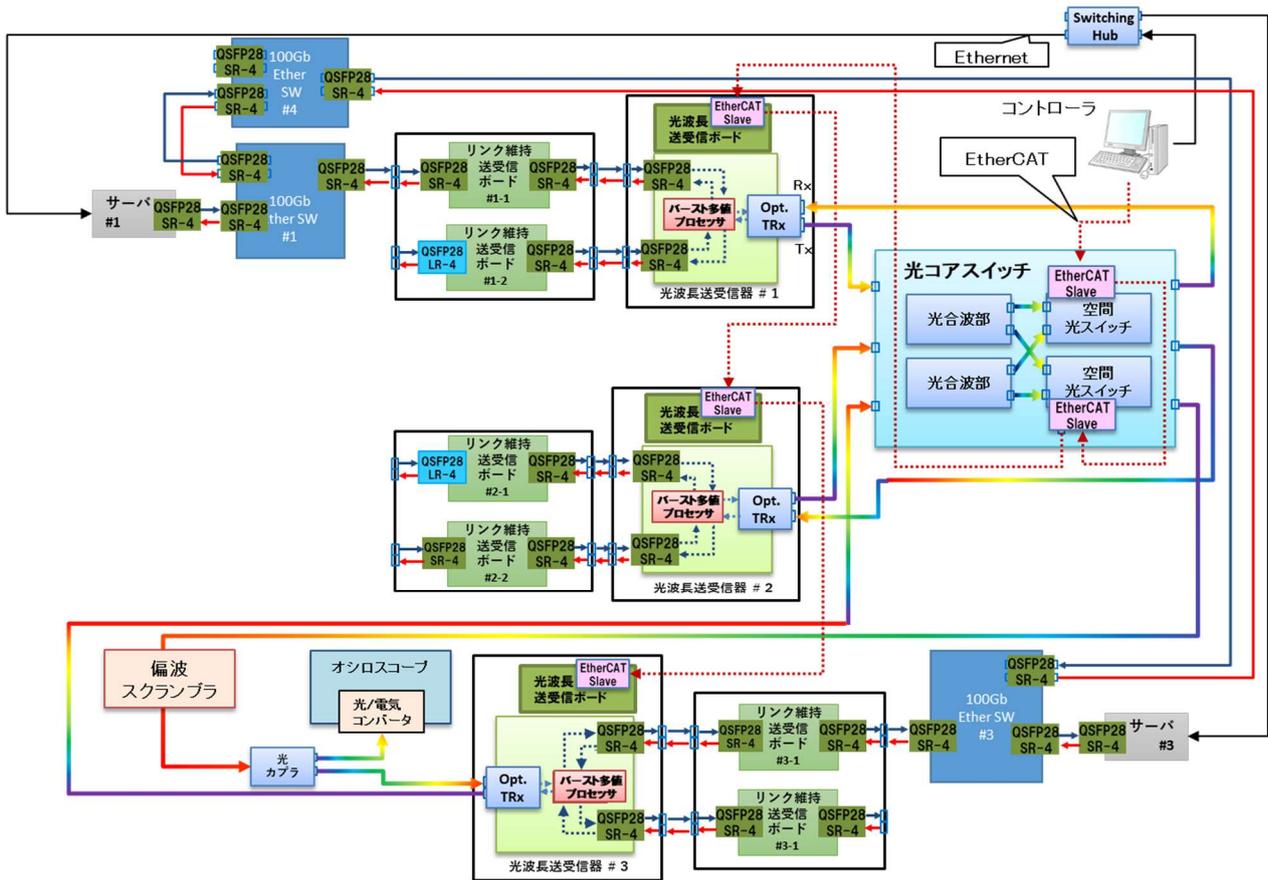


図 1.2.9-18 IP パケット疎通実験系構成 (電気経路⇔光経路)

IP パケットは、サーバ # 1 から送信し、サーバ # 3 で受信する。両サーバ間の伝送経路としては以下の 2 経路が存在する。

電気経路 : Ethernet Switch # 1—Ethernet Switch # 4—Ethernet Switch # 3

光経路 : Ethernet Switch # 1—リンク維持送受信ボード # 1—1—光波長送受信器 # 1—
光コアスイッチ—光波長送受信器 # 3—リンク維持送受信ボード # 3—1—
Ethernet Switch # 3

バースト多値プロセッサの同期トリガ幅は 500μs とした。IP パケットの送受信には TCP/IP の通信方式を用いた iperf3 を使い、伝送経路切り替え設定後 TOS 値変更待ち時間を確保した後に iperf3 起動を指示し、また伝送経路を切り替える際には iperf3 によるパケット送信を先に停止してから切り替えを行った。

表 1.2.2-6 にシステム制御シーケンスと IP パケット疎通可否を示す。実証実験においては、TOS 値

変更待ち時間を 0ms としても IP パケットの疎通が可能であった。この原因は用いたサーバにおいて ipef3 起動に遅延時間が生じているためと考えられる。実際のシステムでは様々な機器が接続されるため、用いるネットワーク機器の送信開始時間に合わせて一定量の待ち時間が必要となると考えられる。

表 1.2.9-6 制御コマンドと IP パケット疎通可否 (電気⇄光)

順序	伝送経路	制御コマンド内容	経路切り替えを起点とした待ち時間[ms]			
1	電気経路切り替え (光自己折り返し) 指示					
2	電気	IP パケット受信側サーバ # 3 に受信準備指示	5	1	0	0
3		IP パケット送信側サーバ # 1 に IP パケット送信を指示. TOS 値は電気経路用を設定	6	2	1	0
4		サーバ # 1 にパケット送信停止を指示	4900			
5		サーバ # 3 にパケット受信停止を指示	5000			
6		光経路切り替え指示				
7	光	IP パケット受信側サーバ # 3 に受信準備指示	5	1	0	0
8		IP パケット送信側サーバ # 1 に IP パケット送信を指示. TOS 値を光経路用に設定変更	6	2	1	0
9		サーバ # 1 にパケット送信停止を指示	4900			
10		サーバ # 3 にパケット受信停止を指示	5000			
11		1 へ戻る				
IP パケット疎通可否			可	可	可	可

(2) パケットロスゼロの実証

図 1.2.2-4 および図 1.2.2-5 に示した電気経路と光経路との間での切り替えシーケンスの妥当性を確認するため、電気経路から光経路、さらには光経路から電気経路への切り替えを行った場合にパケットロスが発生しないことを確認した。実験系を図 1.2.9-19 に示す。電気経路と光経路構成は (1) の実験と同様である。

本実験では、IP パケットの送信機と受信機としてサーバに変わって 100GbE 信号測定器 (アンリツ MT1000) を用いている。送信 Ethernet フレームサイズ 1500 バイト、回線負荷率 99% に設定し、連続的に 100GbE 信号を送信しながら、電気経路から光経路へあるいは光経路から電気経路へ切り替えをそれぞれ 50 回行い、その際の信号断時間の最大値を測定した。

測定結果は 87.7ms であった。その結果から、コントローラ指示から TOS 値が変更されたパケットが実際に信号測定器から送出されるまで、87.7ms 程度の時間を要すると推定した。

一方、光コアスイッチおよび光波長送受信器に起因した信号断時間は表 1.2.9-4 に示されるように 4ms と短いことがわかる。

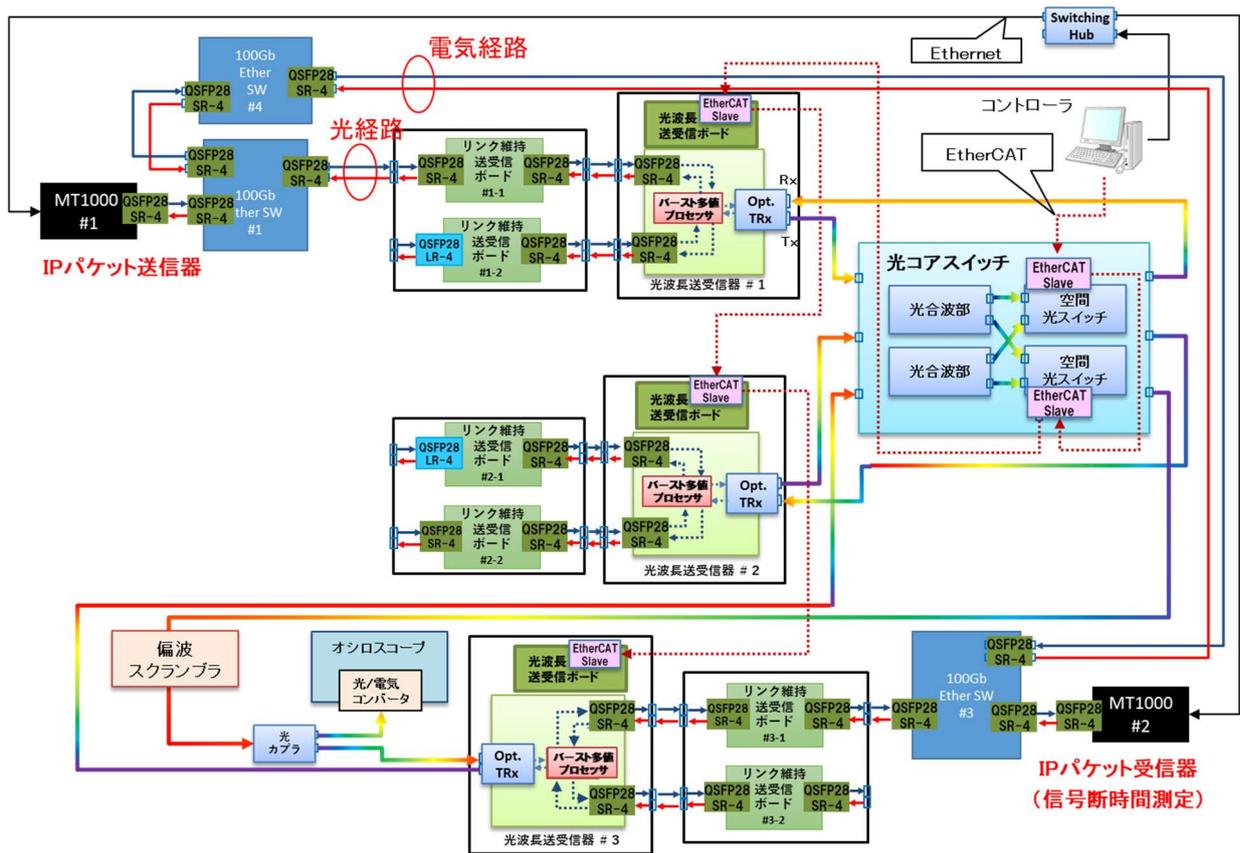


図 1.2.9-19 電気・光経路切り替え時のパケットロス評価実験系

したがって、信号測定器を用いた本実験において、光経路から電気経路へ切り替えを行う場合は、光経路を断とする時間から 100ms まえに TOS 値の変更を行って IP パケットの通信経路をあらかじめ光経路から電気経路に切り替えおき、その後で光経路を断とするよう設定を行った。その結果、電気経路から光経路切り替え時に信号断時間がゼロとなり、パケットロスが発生しないことを確認した。

なお、電気経路から光経路に切り替える場合は、コントローラから TOS 値変更の指示を受けて信号測定器から光経路を通過する IP パケットが送出されるまでに要する時間 (87.7ms) が光コアスイッチおよび光波長送受信器の切り替え処理時間 (4ms) より十分に大きく、また電気経路は常に疎通可能な状態にあるため、電気経路から光経路へ切り替えを行う際は、TOS 値の事前変更指示は不要であった。

以上より、光電ハイブリッドスイッチシステムでは接続されるネットワーク機器が TOS 値変更に必要な時間を考慮して、TOS 値変更のタイミングを適切に選ぶことによって経路切り替えを行ってもパケットロスがなくなることを実証できたものとする。

(3) 光経路⇄光経路切り替え時の TOS 値変更待ち時間

つづいて、本実証システムを用いて光経路どうしの切り替えを行う場合の IP パケットの疎通実証実験を行った。実験系の構成を図 1.2.9-20 に示す。

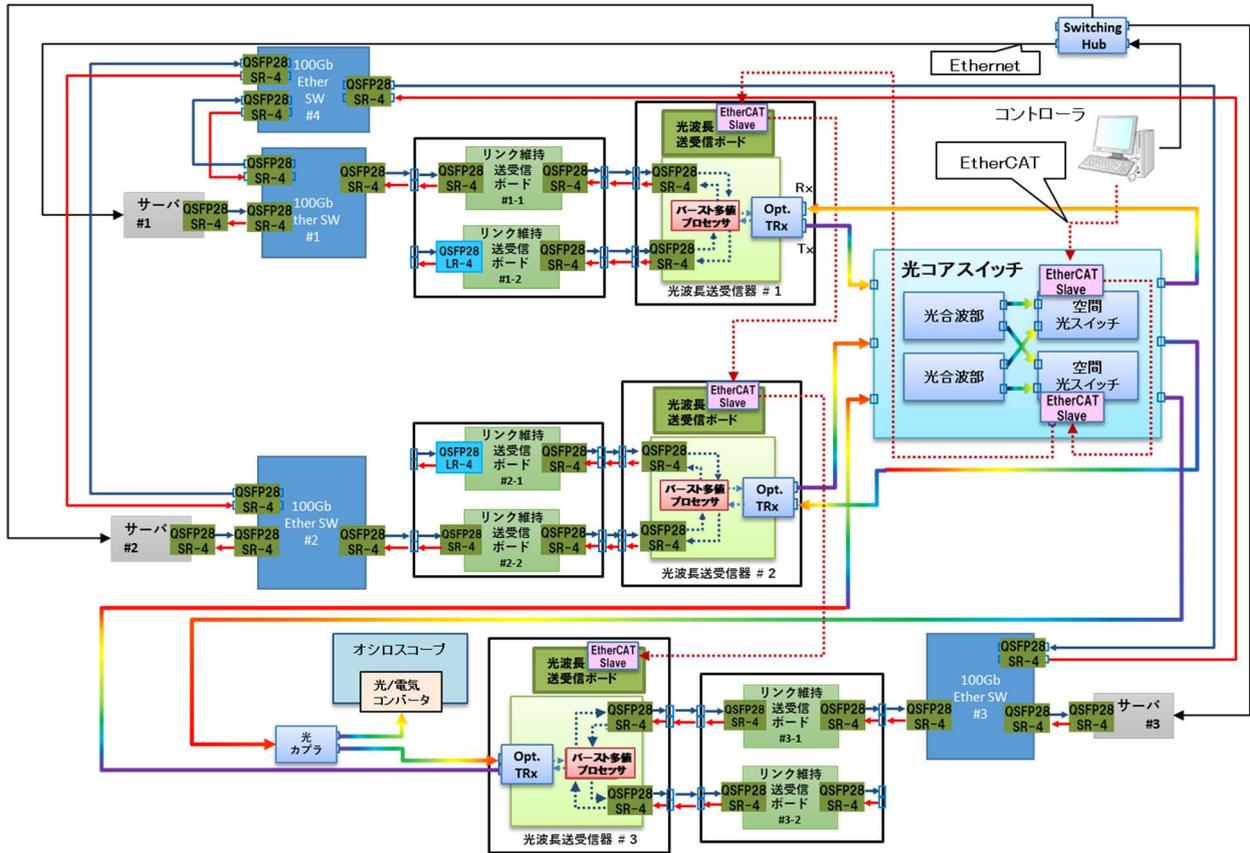


図 1.2.9-20 IP パケット疎通実験系構成 (光経路⇔光経路)

本実験では、2つの光経路（光経路1、光経路2）の切り替えを繰り返し行った。光経路1ではサーバ#1とサーバ#3が通信を行い、光経路2ではサーバ#2とサーバ#3が通信を行う。また、IPパケットを受信するサーバ#3が接続された光波長送受信器#3において、波長切り替え無し・空間切り替え有りとなる光経路設定とした。IPパケットの送受信には、サーバ内のiperf3を用いている。

表 1.2.9-7 制御コマンドと IP パケット疎通可否 (光⇔光)

順序	伝送経路	制御コマンド内容	経路切り替えを起点とした待ち時間[ms]			
1		光経路1切り替え				
2	経路1	IPパケット受信側サーバ#3に受信準備指示	5	2	1	0
3		IPパケット送信側サーバ#1にIPパケット送信を指示.	6	3	2	1
4		サーバ#1にパケット送信停止を指示	4900			
5		サーバ#3にパケット受信停止を指示	5000			
6		光経路2切り替え				
7	経路2	IPパケット受信側サーバ#3に受信準備指示	5	2	1	0
8		IPパケット送信側サーバ#2にIPパケット送信を指示.	6	3	2	1
9		サーバ#1にパケット送信停止を指示	4900			
10		サーバ#3にパケット受信停止を指示	5000			
11			1へ戻る			
IPパケット疎通可否			可	可	不可	不可

表 1.2.2-7 にシステム制御シーケンスと TOS 値変更待ち時間に対する IP パケット疎通可否を示す。表 1.2.2-7 に示すように、光経路どうしの切り替え条件下では、IP パケットの疎通を確実にを行うには TOS 値変更待ち時間を 3ms 以上とすることが必要であった。疎通可となる TOS 値変更待ち時間の設定値が表 1.2.9-4 に示したトリガ幅 500 μ s における信号断時間 3.57ms より小さい値であるのは、サーバでのパケット送出遅延のため、結果的に光経路リンクアップ後に IP パケット送出が行われるためと考えられる。

<映像を用いたシステム機能実証>

光経路切り替え条件下での IP パケット受信機能の実証を行うため、映像を用いた実証実験系を構築した。映像を用いることで、IP パケットに対する伝送品質の確認が目視で容易に行える。

機能実証項目は以下の 2 つである。

- (1) 高速バースト受信機能
- (2) TOS 変更による電気経路と光経路振り分け機能

実験系構成を図 1.2.9-21 に示す。

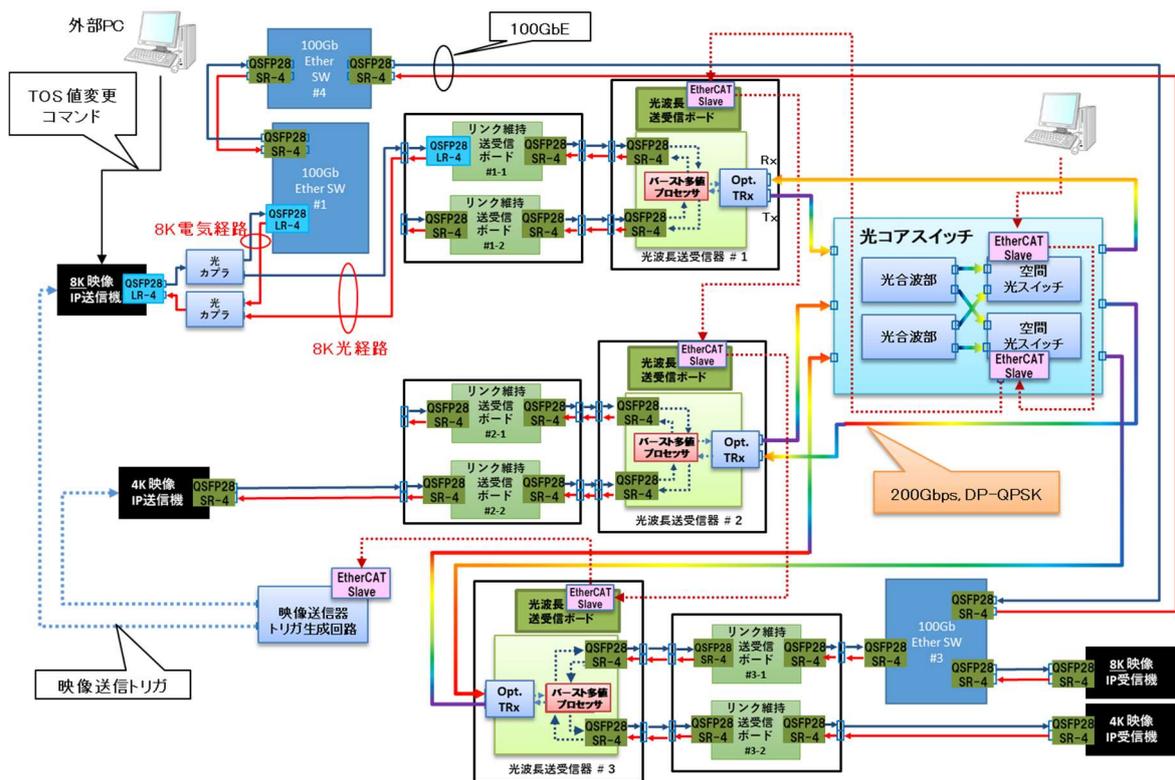


図 1.2.9-21 バースト送受信機能デモンストレーション実験系

8K 映像信号は光カプラによって電気経路と光経路に分岐される。それぞれの接続経路は以下のようになる。

- ① 8K 映像送信機電気経路⇒Ethernet Switch#1⇒Ethernet Switch#4⇒Ethernet Switch#3⇒8K 映像送信機

- ② 8K 映像送信機光経路⇒リンク維持送受信ボード# 1 - 1 ⇒光波長送受信器# 1 ⇒光コアスイッチ⇒光波長送受信器# 3 ⇒リンク維持送受信ボード# 3 - 1 ⇒Ethernet Switch#3⇒8K 映像受信機
また、4K 映像信号の接続経路は以下ようになる。
- ③ 4K 映像送信機⇒リンク維持送受信ボード# 2 - 2 ⇒光波長送受信器# 2 ⇒光コアスイッチ⇒光波長送受信器# 3 ⇒リンク維持送受信ボード# 3 - 2 ⇒4K 映像受信機

(1) バースト受信機能

映像送受信器は 8K の非圧縮映像信号(送信速度 24Gbps)と 4K の非圧縮映像信号(送信伝送 6Gbps)を IP パケットに収容し、それぞれ、48Gbps、12Gbps の伝送容量信号に変換しさらに 100GbE に収容して送信する。映像信号は外部からのトリガによって送信が開始される。映像送信機は FPGA によって実現されており、トリガ入力後 10 μ s 以下の低遅延で送信開始が可能であり、外部 PC よりトリガ入力後映像送信開始までの待ち時間、映像送信継続時間、さらには IP パケットの TOS 値の設定が可能である。また、映像受信機は FPGA によって実現され、内部メモリに受信映像信号をバッファリングし連続再生することが可能である。

本実験では、EtherCAT スレーブ機能を有する映像送信器トリガ回路より映像送信トリガを発生し、光コアスイッチによる光経路切り替えのタイミング合わせて時分割で 8K 映像と 4K 映像を交互に送信し、映像受信機で連続再生した。本実験では、映像受信機に用いられている FPGA のメモリ容量の制約から、光経路切り替え周期 350ms、送信待ち時間 50ms とした。

その結果、問題なくスムーズに受信映像が連続再生されることを確認し、バースト受信機能を実証した。

(2) TOS 値変更による電気経路と光経路切り替え機能

TOS 値による伝送経路切り替えを行うため、8K 映像送信機が接続される Ethernet Switch#1 に対して、TOS 値の値によって出力ポートが異なるよう OpenFlow Table を設定し、さらに電気経路にあたる Ethernet Switch#4 に接続されたポートの伝送帯域を 90Gbps に制限した。このような設定を行った後、外部 PC より 8K 映像送信機に対して出力する IP パケットの TOS 値の変更を行った。電気経路接続ポートよりパケットが出力するよう設定した後の再生映像では、帯域制限に起因すると考えられる映像とびが発生し、一方、光経路接続ポートよりパケットが出力するよう設定した後の再生映像では映像とびのないスムーズな連続再生が行われることを確認した。以上より TOS 値の変更によって伝送経路の切り替えが行われていることを確認した。

<400Gbps バースト受信機能実証>

最後に、バースト多値プロセッサのライン側伝送速度 400Gbps におけるバースト受信機能の評価を行った結果について示す。用いた変復調方式は DP-16QAM である。図 1.2.9-22 に実験系の構成を示す。

クライアント信号は信号測定器 (アンリツ MT1040) で発生した 200GbE 信号を用いている。フレームサイズは 1500 バイト、回線負荷率は 99.8%とした。実験では、2つの 200GbE 信号送受信モジュールを対向させてビットエラーレートを測定した。

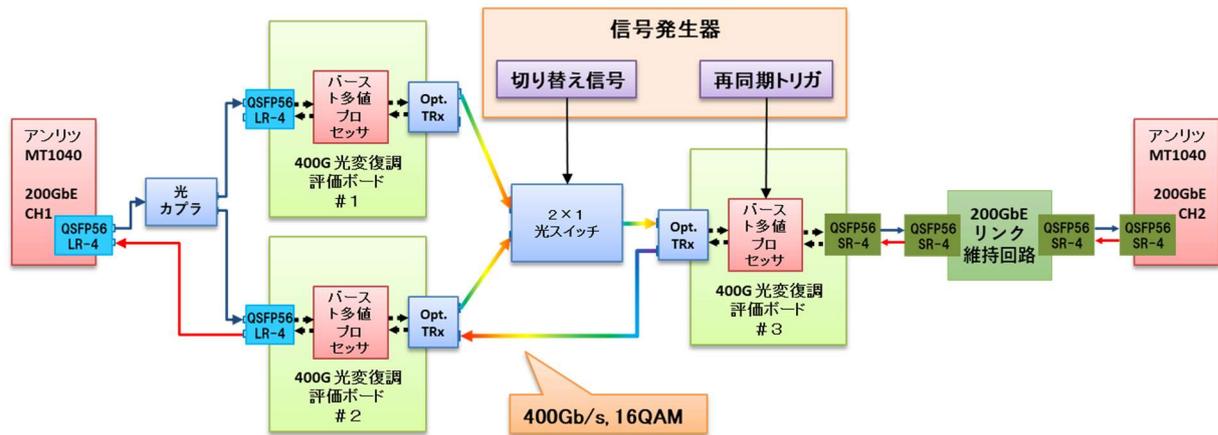


図 1.2.9-22 400Gbps バースト受信機能評価実験系

図 1.2.9-22 において右端に位置する信号測定器モジュール 2 (CH2) から送信された 200GbE 信号は 200GbE リンク維持回路を介して 400G 光変復調評価ボード # 3 のクライアントインタフェースに接続され、さらに本評価ボードのライン側より 400Gbps DP-16QAM に変換されて同評価ボード # 2 に送信される。そして最終的にはモジュール 1 (CH1) で受信される。この経路の光信号は 2×1 光スイッチを介していないため連続光となる。CH1 での受信信号ではビットエラーが観測されずバースト多値プロセッサの 400Gbps の連続光に対する送受信機能を確認した。

一方、図 1.2.9-22 左端に位置する信号測定器モジュール 1 (CH1) から送信される 200GbE は光カプラによって 2 分岐され、400G 光変復調評価ボード # 1 と同評価ボード # 2 のクライアントインタフェースに入力され、両ボードのライン側から 400Gbps 光 DP-16QAM として出力される。続いて 2 つの 400Gbps 信号は 2×1 光スイッチによって切り替えられ、どちらか一方が 400G 光変復調評価ボード # 3 で受信され、200GbE リンク維持回路を介してモジュール 2 (CH2) で受信される。同評価ボード # 3 に入力する光信号は、2×1 スイッチが切り替わることで光バースト信号となる。そして光信号の再入力に合わせて、400G 光変復調評価ボード # 3 に実装されたバースト多値プロセッサの再同期を行う。本実験において再同期直後にビットエラーレートがゼロとなることを確認した。つづいて、2 秒ごとに光スイッチを自動で切り替えている状態でビットエラーレートを測定した。その結果、ビット誤り率として 5.8×10^{-3} の値を得た。この値より計算される経路切り替え時に発生する信号断時間は 11.6ms となった。この時間は実験に用いられている QSFP-56 プラガブルトランシーバ (市販品) の信号断時間からの回復時間によると考えられる。本実験結果から、バースト多値プロセッサの 400Gbps 信号に対するバースト受信機能は実証できたものとする。

<まとめ>

各分室で開発を行った光コアスイッチ、光波長送受信器、バースト多値プロセッサを集約して実証用システムを構築し、ライン側伝送速度 200Gbps の DP-QPSK を用いて機能実証を行った。コントローラから各装置の連携制御には EtherCAT を用いることで伝送経路切り替え時間として 250μs 以下を達成した。また、実証システムにおいて制御シーケンスの妥当性を実証し、経路切り替え時も IP パケット損失をゼロにできることを示した。さらに 8K および 4K 非圧縮映像信号を IP パケットに收容し、バースト受信機能と TOS 値変更による経路切り替え機能を確認した。さらに、ライン側伝送速度 400Gbps の DP-16QAM 信号を用いてバースト多値プロセッサのバースト受信機能を確認した。