

光パケット・光パス統合ネットワーク

原井洋明 和田尚也

サービス多様化、高速・エネルギー効率化が求められる新世代ネットワークの基幹部分への展開を目指し、我々は光パケット・光パス統合ネットワークの研究開発を行っている。開発した100Gbps 級光パケット・光パス統合ノード、ダークファイバを用いて構築し、インターネットへも接続した光ネットワークテストベッド、ネットワークシステムのSDN への対応等、得られた成果を紹介する。

1 まえがき

インターネットは今日重要な社会基盤の一部となり、今後もその重要性が増すことは周知のとおりである。しかし、インターネット技術拡張の複雑な過程を考察すると、今後出現するであろう様々な社会問題の解決に資するか、生活の質や生産性を向上させる新しい価値観を創造する基盤となるか疑問がある。そこで、我が国あるいは世界でインターネットに替わって問題を解決するための新世代ネットワーク（本稿ではITU-Tの「将来ネットワーク」を含める）の目標^{[1][2]}が掲げられ、本特集号で紹介されているような、インターネットに替わる新世代ネットワークの実現を目指した研究開発が実施されている。

我々はITU-T 勧告 Y.3001 に掲げられる新世代ネットワークの12の設計目標^[2]から、特に、多様なサービスへの対処、機能の柔軟性、エネルギー利用の効率化という目標に適合するネットワークの構築を目指して、特にその基幹部に適用する 光パケット・光パス

統合ネットワーク（以下「光統合ネットワーク」と併用、図1）とそれに資する光パケット・光パス統合ノード（以下「光統合ノード」と併用、図2）を研究開発している^{[3]-[5]}。光統合ネットワークは、ユーザ視点からは高速で安価なサービスと低遅延で低データ損失なサービスを単一光ネットワークで提供し、ネットワーク事業者視点からは、大量のデータ交換能力、省エネルギー、柔軟で効率的な資源利用を簡素な制御で実行するネットワークとなる。

本稿では、光パケット・光パス統合ネットワークの研究開発の概要及び我々が達成した以下の成果を紹介する。

- 光パケット・光パス統合ノードの開発
- ネットワークテストベッドの構築とインターネットアクセス利用
- ネットワークテストベッドの大容量化
- SDN (Software Defined Networking) 対応
- その他、光バッファ、宛先検索等要素技術の開発

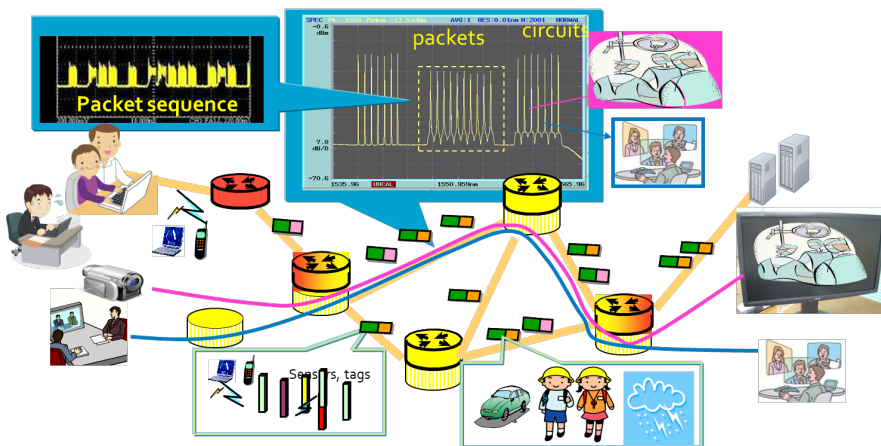


図1 光パケット・光パス統合ネットワーク



図2 光パケット・光パス統合ノード写真

2 多様なサービス収容への対処とエネルギー利用効率化

生活の質や生産性を向上する新しい価値観を創造する将来、人々の要求やそれに伴ってアプリケーションが多様化することはごく自然である。例えば、今はWeb アクセス (YouTube などの映像コンテンツダウンロードなど) や P2P (Peer-to-Peer) がある。21 世紀に入り有線は FTTH (Fiber To The Home) によりブロードバンド化が進み、コンテンツの充実と利便性の向上に伴って、家庭や法人からのトラフィックは増え続けている。近年では、WiMAX (Worldwide Interoperability for Microwave Access) や LTE (Long Term Evolution) など高速無線アクセスの普及によりモバイル端末によるデータの送受信も増え続けている。今後は超大量のセンサ・アクチュエータによるデータ送受信の出現など、単体としては少量だが発生源は増えていくだろう。これらは、ベストエフォート型サービスがメインとなろう。

一方、ベストエフォートでデータ通信をすると品質が不足するアプリケーション (高品質映像によるインタラクティブな会議、遠隔外科手術、e-Science 等) もある。今のインターネットでは、一部のユーザが大量のデータを送ると、他のユーザの転送品質に悪影響を及ぼすことがある。そこで、ほぼ一定レートでデータを送出し高品質なデータ転送サービスをネットワークに望むユーザには、送受信対地間のパスを提供してパケット交換ネットワークとのデータの分離を行い、ネットワーク利用者全員の満足度を高める。

新世代ネットワークでは、このような大量のコンテンツやセンサデータの配信と高品質なデータサービスを両立するために、パケット交換と回線交換を統合したパケット・パス統合ネットワークを構築し、多様なネットワークサービスを提供する。Web アクセスや、センサデータの転送にはパケット交換を用いる。ベストエフォートでデータ通信をすると品質が不足するアプリケーションの通信にはエンドツーエンドにパスを設定してデータを転送する。

トラフィック量が増加しても単純にネットワーク機器の消費電力が増えないよう、今以上にネットワーク全体でのエネルギーの効率利用が必須となる。パスを設定するとパケットごとの処理が必要なデータを削減できるため、パケット交換のみではパケット処理に比例する消費電力の低減に繋がる。電子回路は省電力化が進み、アクセス系ではスリープ機能も様々な通信機器にて導入・開発が進んでいる。しかし、データが集中する基幹におけるスリープ機能の導入は難しい。そこで、電子回路をなるべく減らし、光処理の導入によ

るエネルギーの効率利用も推し図るべきとなる。すなわち、パケット交換及び回線交換を光化し、データ転送能力の飛躍的な増加とエネルギー利用効率化を両立する。

さらに、パケット・パス統合ネットワークは、ネットワーク設備の簡素化と効率的な運用に資する。要求ごとに物理的に個別に構築されたネットワークは、インターネットに収められた。この歴史からわかるように、個々にネットワークを構築するのは、設備投資及び運用効率、ユーザ利便性の観点から不十分である。特殊なハードウェア機器が提供する機能をネットワーク資源仮想化 (NFV) 技術、すなわち、機能のソフトウェア化によって資源共用化を図る動きがあるように、資源共用化によるネットワーク内の資源効率化はネットワーク事業上必須であろう。さらに、その資源を簡単に制御できる SDN の仕組みを光ネットワークで利用することで、更に効率的な運用が期待できる。

まとめると、筆者らが目指す光パケット・光パス統合ネットワークは、冒頭で述べた以下の特長を持つ。ユーザ視点からみると、その時々利用シーンに合わせて、高速で安価なサービスと低遅延で低データ損失なサービスを単一ネットワークで提供する。一方、ネットワーク事業者視点からみると、大量のデータ交換能力を、省エネルギー、柔軟で効率的な資源利用を簡素な制御で実行するネットワークである。

3 光パケット・光パス統合ネットワーク

本ネットワークは、2 に述べたユーザ視点及び事業者視点からみた特長を持つネットワークである。光パケット交換とは光パケット通信の中継点において、データ部分を電気信号に変換することなく光交換する技術や方式である。筆者らは、特に、複数の光波長を用いて構成し波長数倍に高速とした光パケットを、内部のヘッダ情報にしたがって光スイッチで交換する技術を開発している。図3に10波長で構成する光パケットをイーサネットフレームのマッピングと対応づけて示す。1波長は光電あるいは電光変換が成熟している10 Gbps 程度であるが、技術的には10~100波を同時並列して、それぞれに偏波多重等を組み合わせて伝送し、単一スイッチで交換して、100 Gbps~12.8 Tbpsの光パケット交換を可能とする^{[3][6]}。一方、光パスは、エンドでサービス品質を保証するための媒体であり、一般にはDWDMの一波により提供される。10 Gbpsを超える要求帯域を持つアプリケーションは複数の光パスを用いることも可能である。

先述の図1にパケット・パス統合ネットワークの概略図を示す。ネットワークの基幹部にあたりデータが

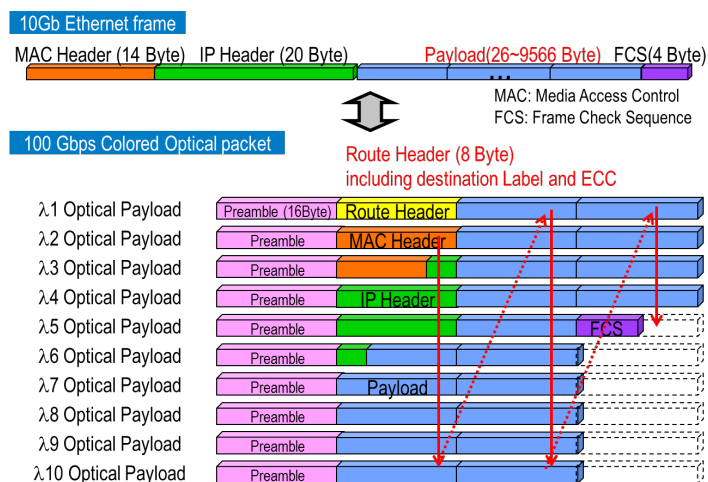


図3 光パケット構成

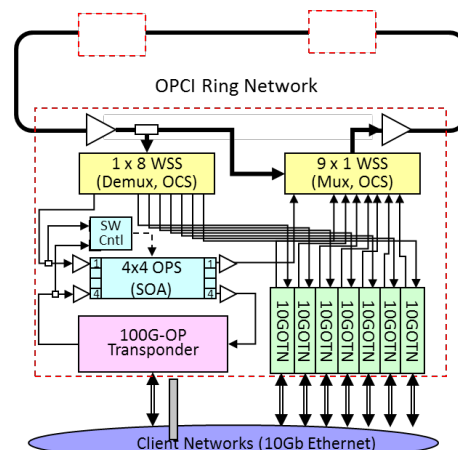


図4 光統合ノード構成

集中する部分ではノード内の交換処理を光化する。図中、黄色のパケットスイッチ(矢印付の円柱)は光パケット交換する機能、茶色は光信号を終端して電子処理にてパケットを交換する機能、黄茶2色の組からなっているものは、光パケットを送受する機能を有する。パケットスイッチと回線交換スイッチが重なっている部分がパケット・パス統合ノードである。

我々が開発した光パケット・光パス統合ノード(図2、4)^{[7][8]}を基に構築した光パケット・光パス統合ネットワークの要点を述べる。

- メッシュ構造をコンセプトとし、単一リングとマルチリング対応のノードを実装。
- パケット交換を光化し、かつ、各ノードでのパケットごとの処理をしない光回線交換も統合する。この2つにより、ネットワーク基幹部を省電力にする。すなわち、パケット交換のヘッダ処理を省電力化するため、1つの光パケットを各々10 Gbpの10波長から構成し、1波をヘッダとする。光電変換はこのヘッダ波長のみとし、光パケット自体は電気に変換せず1つの光スイッチで複数波長を一括して交換する。電気信号への変換をパケットの一部に留めることで、消費電力の大幅な低減に資する。また、品質を要求し、伝送速度が常時1 Gbpsを超えるユーザに対しては、パケット交換せず回線交換のみによって品質を担保するとともに、省エネ化を図る。
- Cバンド100 GHz間隔の40波長を用いる。10波長を1つの単位波長帯域とし、波長帯域ごとに光パケット交換に用いるか、光パス設定に用いるかを定める。光パケット・光パス統合ノードにて、WSSを用いて、光パケットと光パスを多重分離する。サービス量に応じて両交換方式に割り当てる帯域数を変更する。また、WSSで取出され

る光パスは波長ごとにWSSの異なるポートに振り分けられる。光パケットの10波長はWSSの1つのポートに一括して出力される。

- 光統合ノードでは、ヘッダを含む波長のみを電気信号に変換し、宛先検索等のヘッダ処理を施す。光パケットスイッチは4×4構成をとっており、うち、1ポートが、外部イーサネット信号を100 Gbps光パケットに変換する光パケットトランスポンダと接続される。4×4のスイッチテーブル及び宛先IPアドレスと宛先光ノードアドレスの変換テーブルは外部よりコマンドを介して設定する。
- 光パスはシグナリングによってコマンドを介してWSSを操作することで設定解放される。例えば、OSPF-TE/RSVP-TEをベースとした分散制御管理システムを作り、コマンドで装置の設定をすることで、光パスを設定・開放できる^{[9][10]}。同様に、SDNコントローラによる一元管理制御も可能である。

4 研究開発成果

4.1 光パケット・光パケット統合ノードの開発

我々は、図2、4に示した光パケット・光パス統合ノードを世界で初めて装置化した。19インチ2ラック構成であり、7個の10 Gbps OTN (OTU2e)の光バストランスポンダと、1つの100 Gbps光パケットトランスポンダを備える。いずれもクライアント側は10 Gbpsイーサネット(10GBASE-LR)である。機能概要は3で述べたとおりである。光パケットの信号はバースト性を有し、また、光パスも複数波が瞬時に設定または解放されれば、光信号強度の急激な変動を招く。光信号の急激な強度変動に対応できるバースト

表 1 光統合ネットワークのパケット誤り率性能

Route (via OPS link)	Frame Error Rate (FL:64 Byte, PR:1%)	Frame Error Rate (FL:1518 Byte, PR:1%)	Frame Error Rate (FL:9000 Byte, PR:1%)	Frame Error Rate (FL:64 Byte, PR:10%)	Frame Error Rate (FL:1518 Byte, PR:10%)	Frame Error Rate (FL:9000 Byte, PR:10%)
Tester 1 → Node 1 → Node 2 → Tester 4	< 5.26E-10	< 3.84E-9	< 2.12E-8	< 2.50E-11	< 7.78E-10	< 2.00E-9
Tester 3 → Node 2 → Node 1 → Tester 2	< 5.26E-10	< 3.84E-9	< 2.22E-8	< 2.50E-11	< 7.87E-10	< 2.00E-9
Tester 2 → Node 1 → Node 2 → Node 1 → Tester 1	1.55E-6	4.53E-7	2.37E-5	2.50E-11	4.65E-9	4.00E-9
Tester 4 → Node 2 → Node 1 → Node 2 → Tester 3	1.67E-5	1.85E-6	7.58E-5	2.50E-11	7.82E-10	4.44E-6

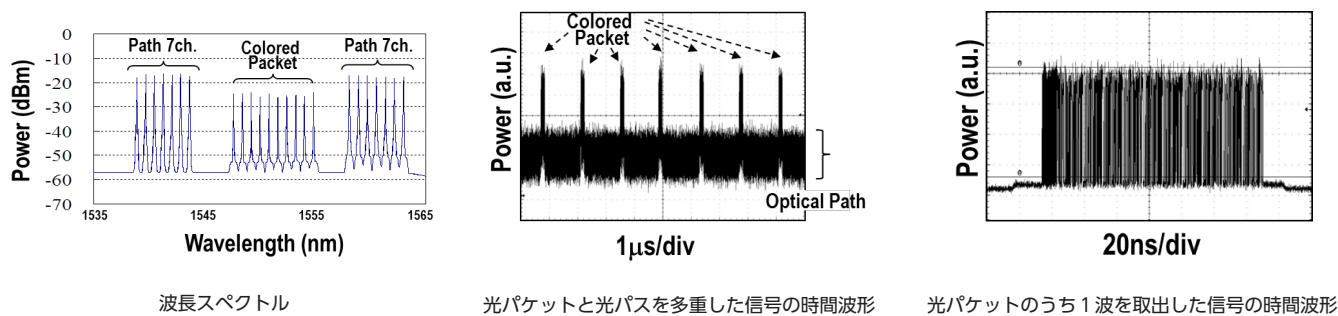


図 5 光パケットと光パスの信号波形

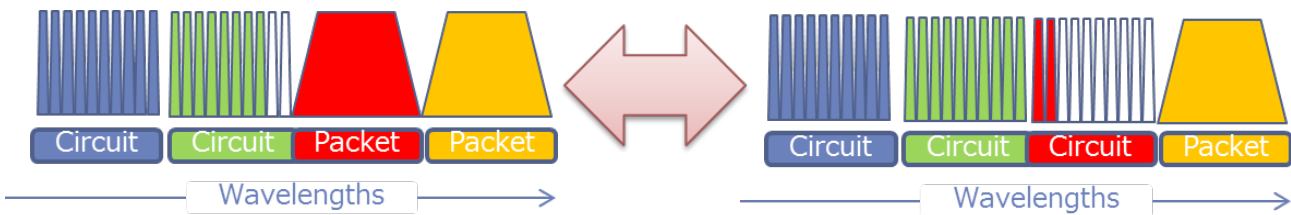


図 6 光パケットと光パスの波長資源の動的調整

信号対応の光増幅器^[11]や、クロック再生できる光バースト受信器等を光ノード装置に組み込むことで、光信号の受信品質を向上した。表 1 に、フレーム長 64、1518、9000 バイトのイーサネットフレームを光統合ネットワークに送信し、光ノードを 2 または 3 回経由した光パケットのパケット誤り率性能を示す。光パケットの誤り率が ITU-T 勧告 Y.1541 で高品質のネットワークで規定されている 10^{-4} 以下となり、非常に良好な性能を得た。図 5 には観測した光パケット及び光パスの信号波形を示す。

さらに、光統合ノード装置を用いて、光パケット用資源量と光パス用資源量を動的に変更する機能を実証した。すなわち、光ファイバの波長を全サービスで共用し、図 6 に示すような動的資源変更により、パケットとパスの両交換方式を柔軟に使い分ける。光パスの使用状況に応じて、光パケットと光パスの波長資源を動的調整する自律分散型制御ソフトウェアを開発し、従来技術の光パス設定または解放のシグナリングとほぼ同じ時間 500 ミリ秒で、波長資源の変更ができるこ

とを確認し^[9]、その後、光統合ネットワークへソフトウェアを移植した^[10]。さらに、自律分散型境界制御を光統合ノードシステムに組み込み、使用中パス数に応じて自動で各リンクの境界を制御し光パケット資源量及び光パス資源量の変更が行われることを、光スイッチ等の光ハードウェアの再構成も含め実証した^[12]。

4.2 ネットワークテストベッドの構築とインターネットアクセス利用

光統合ノードを用い、5 ホップ、シングルモード光ファイバ (SMF) 総長 244 km の光パケット交換・伝送を 10^{-4} 以下のパケット誤り率で安定的にできるようなシステムを改良し^[8]、その後、光統合ノードと JGN-X の大手町-小金井間のダークファイバを用いて、光パケット・光パス統合ネットワークテストベッドを構築した^[13]。図 7 にその概要図と計測したトラフィックを示す。その際、複数リングを光統合ノードで繋ぐ複数光リング構成による光統合ネットワークを構築し、2 つのリングを繋ぐ光統合ノードには光バッファを備え

た。なお、ダークファイバ長が 44 km であったので、テストベッドを用いた 5 ホップ時の総長は 210 km になっている。

さらに、光統合ノードの安定動作を示しつつ、改善を通じて安定化に寄与するために、インターネットへ接続するアクセス回線と実験室ネットワークの間へ光統合ネットワークを敷設し^[4]、実験室の端末と外部サーバ等の通信時に光パケットによりデータを運ぶ実験を継続的に行っている。なお、図 8 は、その後、**4.3**に述べる装置^[14]を組み込んで構築したインターネットへ通じる実験ネットワークである。光パスの設定状態やパス上の設備機能不全の可視化、通過した光パケッ

ト数をカウントするなどの管理機能を含めたネットワーク管理システムも産業界との連携を通じて開発した^[15]。

4.3 ネットワークテストベッドの大容量化

上述した光統合ノードのクライアント収容装置は、クライアント側に 10 Gbps のイーサネットポートを 1 つのみ備えていた^[7]。そこで、光ネットワークに多くのトラフィックを収容するために、クライアント収容装置を大容量化し、12 ポートの 10 ギガイーサネットインターフェイスを収容した^[14]。表 2 にその諸元、図 9 に開発した装置の写真を示す。

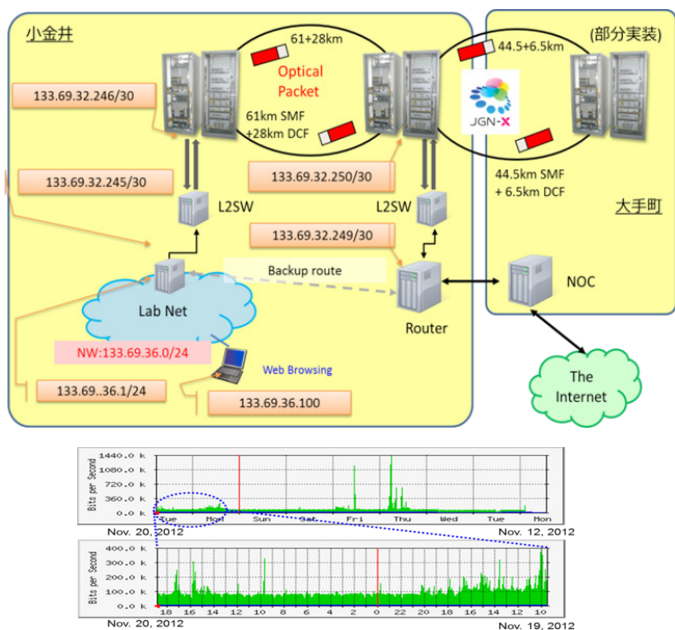


図 7 実験室と JGN-X を用いて構築した光ネットワークテストベッド

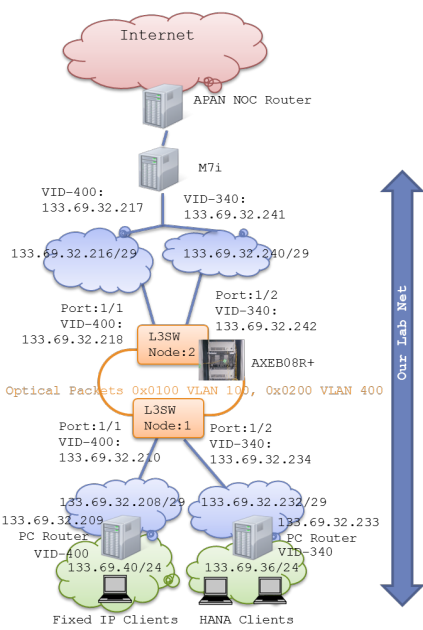


図 8 12 ポート 10GbE インターフェイスを持つ光パケットスイッチを用いたテストベッドの向上

表 2 100Gbps 光パケット対応レイヤ 3 スwitch の諸元

Items		Remarks
Port	10 GBASE-LR	12 ポート
	100 Gbps 光パケット	1 ポート
IP	IPv4, IPv6	ユニキャスト転送
	経路制御	スタティックのみ
	表サイズ	12,000 エントリ
	検索	最長一致検索
ARP (Ethernet I/F のみ)	ARP	可能
	ND	Solicitation, advertisement
	テーブルサイズ	4,000 エントリ
	エージング	N/A
	静的 ARP	可能
ICMP	ICMP/ICMPv6	Echo Request への Echo Reply エラーには非対応
VLAN	保持機能	挿入、削除、置換
クライアント IP 数	IPv4, IPv6 とともに 4	ポートごと、VLAN ごと
光アドレス数	4,000	
取得統計情報	パケット数、バイト量、廃棄パケット数	

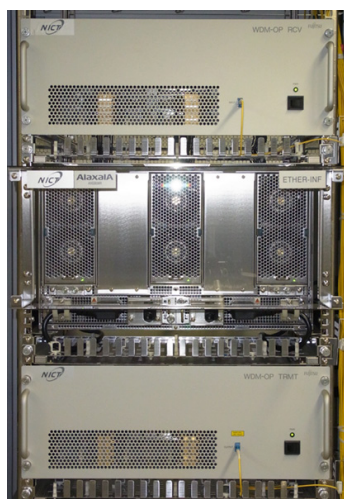


図9 12ポート10GbE光パケットスイッチ

Burst optical
signal
receiver

Electronic layer 3
switching and
100 Gbps packet
(de) composition

Burst optical
signal
transmitter

4.4 SDN (Software Defined Networking) 対応

光統合ネットワークのSDN拡張の1つとして、データセンタと光統合ネットワークとのSDNによる相互接続のためのフレームワークを設計実装した。SDNコントローラが機器にフロー設定を施しデータセンタ間のデータパスを構築する。途中、データセンターエッジにあるOpenFlowスイッチ(OFS)のフローテーブルと光パケットの経路または、光パスの経路がマップされていなければ、SDNコントローラの命令にしたがってOFSに必要なフローテーブルの設定を行う。さらに光パスが無い場合にはSDNコントローラが光統合ネットワークのコントローラに光パス設定を要求する。こうして、SDNコントローラが光統合ネットワークの制御システムと連携動作することでエンドツーエンドのデータパスを設定できる。

図10にその動作実験の概要を示す。JGN-Xが提供するOFS、VM、光ダークファイバ、VLANを用い、我々は、TremaベースのOpenFlowコントローラ(OFC)と光統合ノードを用意した。VM(図中計算機)とOFSとで2箇所のデータセンタを模擬し、光統合ノードと光ダークファイバ、VLANのL2リンクとで光統合ネットワークを構築した^[6]。

以下、OpenFlowと光パス設定の相互動作に関する実験報告を述べる^[6]。前述のとおり、OFCがデータセンタに設置されているOFSのフローテーブルを設定する時、かつ、光統合ネットワークに適当な光パスが無い場合には、OFCがOFS間に光パスを設定する要求を光統合ネットワークへ送る。こうして、エンドツーエンドのデータパスを作ることができる。図10にはエンドツーエンドのデータ到達に関するVM間のICMP echo request/replyによる往復伝搬遅延RTTの測定結果を示す。光統合ネットワーク内の経路がすでに用意されているが、OFSに適切な

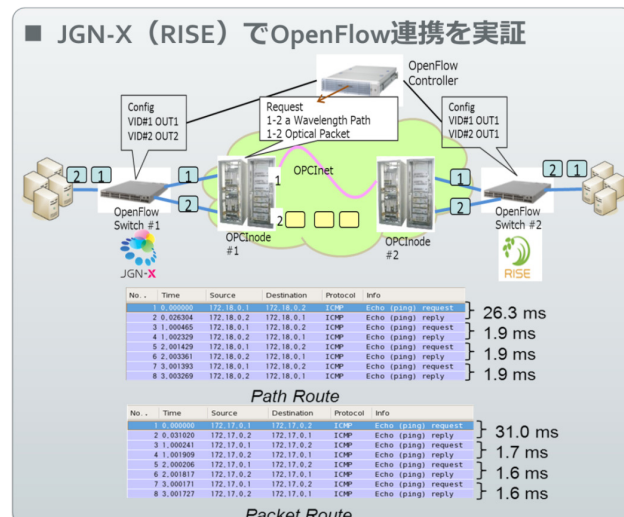


図10 RISEのOpenFlowスイッチと光統合ノードを用いて構成したネットワーク及びその導通(ping)結果。最初のパケットの往復遅延が長いのは、スイッチのフローテーブルに新規にフローが設定されるため。

フロー設定が無い場合を初期状態とする。それぞれ、最初のechoのRTTは30ミリ秒前後で、それ以降のechoのRTTは2ミリ秒程度となっている。すなわち、最初のパケットがOFSに到達した際に、適切なフローテーブル処理が行われ、かつ、その後はそのフローテーブルを参照し、パケット転送が行われていることがわかる。

上記の実験では、宛先IPアドレスとそれに対応する光パスの波長や光パケットのIDの関係を整理した対応表をSDNコントローラがあらかじめ保持し、必要に応じてOFSの設定をしたり、光統合ネットワークへ要求をしたりすることでデータパスを構築した。より汎用性を高めるには、データセンタ間で必要な帯域と実際に確保している帯域をSDNコントローラで管理し、また、サービスのQoS要求に対し、ネットワークの負荷から提供品質を計算し、適切な経路を求める経路計算エンジンを組み込み、新たな回線が必要な場合には新規に光パスを要求し、そうでない場合には、既設の光パスや光パケットの回線にデータを流すという処理をダイナミックに行う必要があり、そのシステム開発も実施した^[7]。

さらに、共同研究で、光統合ノードの光パケットの経路表をSDNコントローラから設定できるようにした^[8]。我々は、Webを介して光パケットやレイヤ2スイッチを設定できるユーザインターフェイスを開発しており^[9]、その際に作成したコマンド群をSDNコントローラから呼び出すようにした。さらに、図11に述べるように、産学連携により、光統合ノードを用いたネットワークを光メトロポリタンネットワークとし、100 Gbps級WDM伝送装置を用いた光コアネッ

トワーク、エラスティック性を有する光アクセスネットワークをSDNコントローラにより統合管理し、その両端にある2つのセンタ間に必要なパスをオンデマンドに設定し、コア・メトロ・アクセスにまたがる光ネットワーク内に仮想ネットワークを構築するトランスポート光SDNネットワークの相互接続実証実験に成功した^{[20][21]}。

4.5 その他、光バッファ、検索等要素技術の開発

光統合ノードが解決しなければならない高速制御技術に関して、光パケットバッファ及び光パケットヘッ

ダ処理の研究を推進した。光パケットバッファの開発は、進行型という特徴を持つ光信号における最も困難なハードルの1つである。我々は、SOA光スイッチ群と長さの異なる光ファイバ群を用いて、最大4種類^[4]または8種類^[22]の光遅延を持ち、パケットを先着順に処理する光パケットバッファを開発し、光統合ノードに組み込んだ。図12に、8種類の遅延を持つ光パケットバッファにおいて、30%程度の入力トラフィックがある場合にパケット棄却率が 10^{-5} 程度であることを実験的に確認した結果を示す^[22]。

光パケットバッファの多段化は信号の劣化を伴う。そこで、並行して、光パケットバッファに加え、電子パケットバッファを補助的に用いる光・電子混合バッファの研究を進め、提光パケットバッファのみと比べ約1.7倍の転送速度でも、電子パケットバッファのみと比較し消費電力を最大約30%削減できる方式開発を実施した^[23]。

光パケット交換では、光信号の高速性を活かすために、光电変換を極力減らしていることは先に述べた。一方、光パケットのヘッダ処理は電子処理で行うため、電子処理の速度及び消費電力のボトルネックを解決する必要がある。そこで、我々は、共同研究により、TCAM (Ternary Content Addressable Memory) 互換で同規模の消費電力を5%に減らせる検索エンジンを用い、100 Gbpsの光パケット信号を最長一致検

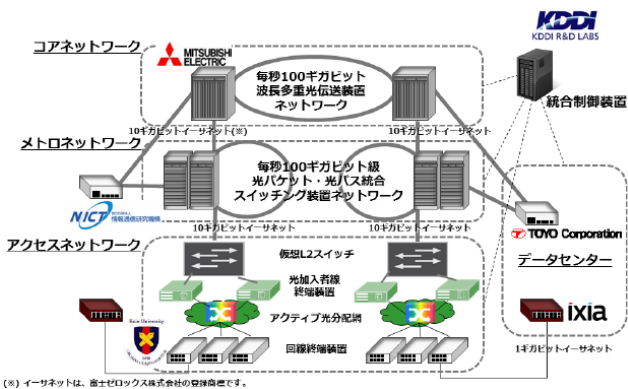
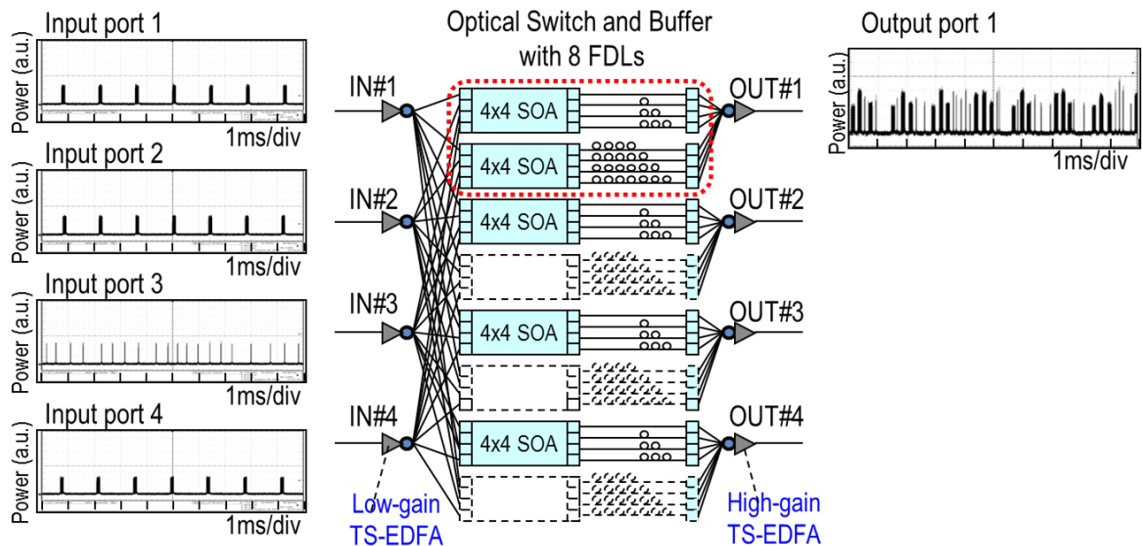


図 11 光コア、光メトロ、光アクセスネットワーク及びデータセンタをSDNで統合管理する光トランスポートネットワークの構成例。国際会議 iPOP2014 で動態展示した。報道発表資料^[20]より。



8-FDL	IN#1 (Gbps)	IN#2 (Gbps)	IN#3 (Gbps)	IN#4 (Gbps)	Total IN#1 ~#4 (Gbps)	Packet Loss Rate
#1	4.59 (500 B)	5.74 (1518 B)	1.73 (64 B)	—	12.06	0
#2	8.59 (1518 B)	8.69 (1518 B)	1.09 (64 B)	8.66 (1518 B)	27.03	7.6 E-6
#3	8.59 (1518 B)	8.69 (1518 B)	8.54 (1518 B)	8.66 (1518 B)	34.48	1.2 E-5

図 12 8 遅延線を持つ光バッファ構成とパケット入出力例及びパケット損失率性能

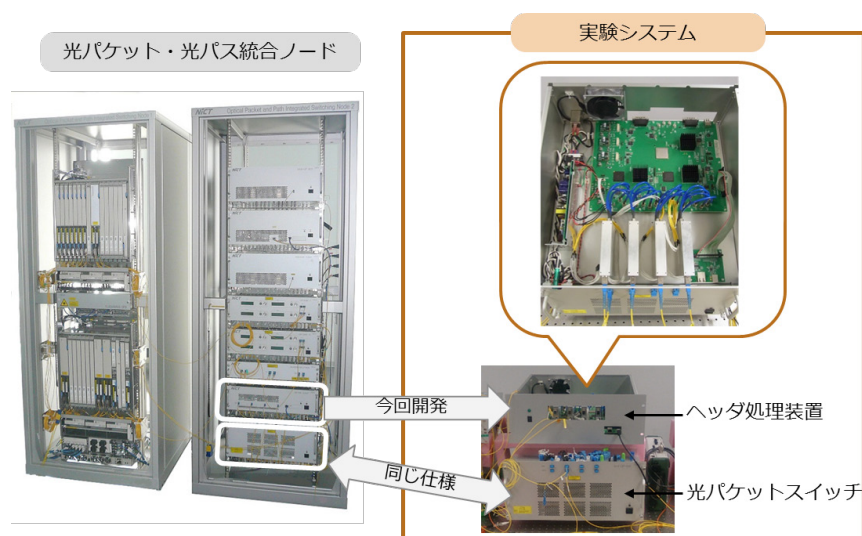


図 13 最長一致宛先検索できるヘッダ処理装置とそれが制御する光スイッチ。光ノード装置に組み込んだ。

索するヘッダ処理装置を開発した^{[24][25]}。さらに、光パケットの転送実験に成功した^[26]。図 13 にその開発したヘッダ処理装置と実験系に用いた装置を示す。なお、光パケットの到着からスイッチ完了までの遅延は 506 ns であった。現在は本ヘッダ処理装置を光ノードに組み込み、161 MHz で動作し、32 ビット最長一致宛先検索とその光パケット交換が可能である。つまり、IPv4 アドレスをそのまま宛先検索でき、アクセスのネットワークと同じアドレス体系でネットワークを制御することが可能となった。図 14 は、32 ビットの宛先アドレスを含むパケット列が入力され(青色)、最長一致検索により、光パケットが 2 つの出力ポートに適切にスイッチされた結果(赤色と緑色)を表示したものである。

5 まとめ

サービス多様化、高速・エネルギー効率化が求められる新世代ネットワークの基幹部分への展開を目指し、我々は光パケット・光パス統合ネットワークの研究開発を行っている。開発した 100 Gbps 級光パケット・光パス統合ノード、ダークファイバを用いて構築し、インターネットへも接続した光ネットワークテストベッド、ネットワークシステムの SDN への対応等、得られた成果を紹介した。今後、本ノード装置をネットワークテストベッドのインフラとして実用する予定である。

謝辞

本研究は、品田 聡主任研究員(現在総務省)、



(a) 25%:75%



(b) 75%:25%

図 14 32 ビット最長一致宛先検索結果に基づく光スイッチの結果例(最上段：入力ポート、中段下段：出力ポート)

古川 英昭 主任研究員、宮澤 高也 主任研究員、平山孝弘研究員、藤川賢治主任研究員、任 衛平技術員、三上 亮技術員、上村尚久技術員、牧野 健技術員、三輪賢一郎技術員、戸室知二技術員、小針康永技術員らと実施した。また、研究開発にご協力いただいた関係各位に感謝する。

【参考文献】

- 1 Nozomu Nishinaga, "NICT new-generation network vision and five network targets," IEICE Transactions on Communications, Vol.E93-B, No.3, pp.446-449, March 2010.
- 2 Future Networks: Objectives and Design Goals, Recommendation ITU-T Y.3001, 2011.
- 3 Hiroaki Harai, "Optical Packet & Circuit Integrated Network for Future Networks," IEICE Transactions on Communications, Vol.E95-B, No.3, pp.714-722, March 2012. (invited paper)
- 4 Hiroaki Harai, Hideaki Furukawa, Kenji Fujikawa, Takaya Miyazawa, and Naoya Wada, "Optical Packet and Circuit Integrated Networks and Software Defined Networking Extension," IEEE/OSA Journal of Lightwave Technology, Vol.32, No.16, pp.2751-2759, Aug. 2014. (invited paper)
- 5 NICT 報道発表, "[光パケット・光パス統合ネットワーク]の実用化に向けて大きく前進," <http://www.nict.go.jp/>, June 14, 2011.
- 6 S. Shinada, J. D. Mendinueta, R. Luis, and N. Wada, "Operation of a 12.8 Tbit/s DWDM Polarization Division Multiplexing 16-QAM Optical Packet Switching Node after 50-km of Fiber Transmission," ECOC 2014 Technical Digest (We.3.5.4), Sept. 2014.
- 7 Hideaki Furukawa, Hiroaki Harai, Takaya Miyazawa, Satoshi Shinada, Wataru Kawasaki, and Naoya Wada, "Development of optical packet and circuit integrated ring network testbed," Optics Express, Vol.19, No.26, pp.B242-B250, Dec. 2011.
- 8 H. Furukawa, S. Shinada, T. Miyazawa, H. Harai, W. Kawasaki, T. Saito, K. Matsunaga, T. Toyozumi, and Y. Wada, "A Multi-Ring Optical Packet and Circuit Integrated Network with Optical Buffering," Optics Express, Vol.20, No.27, pp.28764-28771, Dec. 2012.
- 9 Takaya Miyazawa, Hideaki Furukawa, Kenji Fujikawa, Naoya Wada, and Hiroaki Harai, "Development of an Autonomous Distributed Control System for Optical Packet and Circuit Integrated Networks," IEEE/OSA Journal of Optical Communications and Networking (JOCN), Vol.4, No.1, pp.25-37, Jan. 2012.
- 10 Takaya Miyazawa, Hideaki Furukawa, Naoya Wada, and Hiroaki Harai, "Experimental Demonstration of an Optical Packet and Circuit Integrated Ring Network Interoperated with WSON," IEICE Transactions on

- Communications, Vol.E97-B, No.7, pp.1325–1333, July 2014.
- 11 Y. Awaji, H. Furukawa, N. Wada, P. Chan, and R. Man, "Mitigation of Transient Response of Erbium-Doped Fiber Amplifier for Traffic of High Speed Optical Packets," CLEO 2007, No.JTuA133, 2007.
 - 12 Hideaki Furukawa, Takaya Miyazawa, Naoya Wada, and Hiroaki Harai, "Moving the Boundary between Wavelength Resources in Optical Packet and Circuit Integrated Ring Network," Optics Express, Vol.22, No.1, pp.47–54, Jan. 2014.
 - 13 Hiroaki Harai, "Optical Packet and Circuit Integrated Networks," ONDM 2013 (17th International Conference on Optical Network Design and Modeling), pp.76–81, April 2013 (invited talk).
 - 14 Kenji Fujikawa, Hideaki Furukawa, Kazuo Sugai, Takayuki Muranaka, and Hiroaki Harai, "Developing Layer 3 Switch with 100 Gbps Optical Packet Interface," HPSR 2015, July 2015.
 - 15 Takaya Miyazawa, Hideaki Furukawa, Tatsuya Torita, Masaru Sugawara, Manabu Kinugasa, Emiko Yashima, and Hiroaki Harai, "Management Architecture against Hardware Failures in an Optical Packet and Circuit Integrated Network," IFIP/IEEE Integrated Network Management Symposium (IM 2015), pp.665–671, May 2015.
 - 16 T. Miyazawa, H. Furukawa, N. Wada, H. Harai, H. Otsuki, and E. Kawai, "Experimental Demonstrations of Interworking between an Optical Packet and Circuit Integrated Network and OpenFlow-based Networks," IEEE GLOBECOM 2013 Workshop on Software-Defined Networking (SDN) on Optics, Dec 2013.
 - 17 Takaya Miyazawa, Takahiro Hirayama, and Hiroaki Harai, "OpenFlow-based Automatic Wavelength Selection for an Optical Packet and Circuit Integrated Network," to be presented at IEEE Globecom 2015.
 - 18 Xiaoyuan Cao, Noboru Yoshikane, Takehiro Tsuritani, Itsuro Morita, Masatoshi Suzuki, Takaya Miyazawa, Masaki Shiraiwa, and Naoya Wada, "Dynamic Openflow-controlled Optical Packet Switching Network", IEEE/OSA Journal of Lightwave Technology, Vol.33, No.8, pp.1500–1507, April 2015.
 - 19 Hiroaki Harai, "Optical Packet and Circuit Integrated Networks and SDN Extension," ECOC 2013 (39th European Conference on Optical Communication), Mo.4.E.1, Sept. 2013 (invited talk).
 - 20 NICT 報道発表ほか, "100 ギガビット級コア・メトロ・アクセス光ネットワークの Software Defined Transport Network 技術による相互接続に成功," 2015 年
 - 21 KDDI R&D Labs, Mitsubishi Electric, NICT, Keio University, Ixia Communications, and TOYO Corporation, "Successful interoperability among 100Gbit-class core, metro and access optical networks with Software Defined Transport Network technology," iPOP 2014 White Paper, May 2014.
 - 22 Hideaki Furukawa, Satoshi Shinada, Takaya Miyazawa, Takahiro Hirayama, Naoya Wada, and Hiroaki Harai, "Demonstration and Network Scalability Analysis of 8-Fiber-Delay-Line SOA-Based Optical Buffer Embedded Optical Packet Switching," OFC 2014 (W2A.19), March 2014.
 - 23 Takahiro Hirayama, Takaya Miyazawa, and Hiroaki Harai, "Design of Optical and Electronic Combined Buffer Architecture for Optical Packet Switches," IEEE GLOBECOM 2014, pp.2089–2094, Dec. 2014.
 - 24 Hideaki Furukawa, Takaya Miyazawa, Hiroaki Harai, Yasuto Kuroda, Shoji Koyama, Shin'ichi Arakawa, and Masayuki Murata, "Development of Onboard LPM-Based Header Processing and Reactive Link Selection for Optical Packet and Circuit Integrated Networks," IEEE ICC 2014, pp.3283–3288, June 2014.
 - 25 Hiroaki Harai, "Optical Packet and Circuit Integrated Network: Development and Deployment," Networks 2014 (16th International Telecommunications Network Strategy and Planning Symposium), Sept. 2014 (invited).
 - 26 Hideaki Furukawa, Hiroaki Harai, Yasuto Kuroda, and Shoji Koyama, "Demonstrating 100 Gbps Optical Packet Switching using 16-bit Longest Prefix Matching Forwarding Engine," ONDM 2015, May 2015.



原井洋明 (はらい ひろあき)

光ネットワーク研究所ネットワークアーキテクチャ研究室室長／ネットワーク研究本部ネットワークシステム総合研究室研究マネージャー
博士(工学)
ネットワークアーキテクチャ、光ネットワーク



和田尚也 (わだ なおや)

光ネットワーク研究所フォトニックネットワークシステム研究室室長／ネットワーク研究本部ネットワークシステム総合研究室研究マネージャー
博士(工学)
フォトニックネットワーク

国立研究開発法人情報通信研究機構発行の技術情報誌「情報通信研究機構研究報告」Vol.61 No.2 2015年11月発行の記事を、筆者及び情報通信研究機構の承諾を得て掲載しています。体裁、内容を一部加筆修正しています。