

超高精細映像送受信を支える光通信ネットワークの実証実験

— ダイナミック光パス・ネットワーク映像配信実験 —

来見田 淳也*、並木 周

現在の通信ネットワークを構成する装置群の消費電力、通信容量等の限界を超えるために、産業技術総合研究所 (AIST) は、情報通信関連企業5社と共同で、情報通信研究機構 (NICT)、NHK放送技術研究所の協力のもと、高精細大容量映像時代を支える新しい光通信ネットワークの実証実験を実施した。この実験は研究開発テストベッド等による光ファイバー線路を用いて東京の秋葉原・大手町・小金井の3点を結び、AISTが中心に開発する「ダイナミック光パス・ネットワーク」を実際の環境下で動作させる試みである。異種間ネットワーク接続としてNICTの光パケット・光パス統合ネットワークと協調すると共に、NHKの超高精細映像の配信も合わせて行っている。この論文では開発された要素技術を用いて行った実証実験について、その目的や狙いととも、動作結果を得るまでの技術的構成と成果について述べる。

キーワード: ダイナミック光パス・ネットワーク、光パケット・光パス統合ネットワーク、JGN2plus、映像配信、スーパーハイビジョン (SHV)

Demonstration of optical communication network for ultra high-definition image transmission

- Proof-of-concept experiment of image distribution over the dynamic optical path network -

Junya KURUMIDA* and Shu NAMIKI

In order to overcome the limit of low-power-consumption and communication capacity of the equipment forming the present communication network, National Institute of Advanced Industrial Science and Technology (AIST) has carried out a demonstration of a new prototype optical path network to support the ultra high-definition large-capacity image contents era, in collaboration with five IT-related companies and with the support of National Institute of Information and Communications Technology (NICT) and Nippon Hoso Kyokai Science and Technology Research Laboratories (NHK/STRL). The experiment was a trial to demonstrate the performance of the dynamic optical path network developed mainly by AIST under practical conditions, using a network testbed of field optical fiber links connecting Akihabara, Otemachi and Koganei offices in Tokyo. The demonstration included the cross-border-connection with the optical packet and circuit integrated network realized by NICT and transmission of ultra high-definition video signals developed by NHK. In this paper, we describe the objectives, targets, technology syntheses based on the elemental technologies for the demonstration, and outcomes.

Keywords: Optical path network, optical packet and circuit integrated network, JGN2plus, distribution of high-quality images, super high vision (SHV)

1 はじめに

インターネットを中心とした通信需要の増加を背景に光通信の低エネルギー化が緊急の課題になりつつある。すなわち、どのようにネットワークを構成すれば通信装置群の消費電力を抑えながら、超高精細映像のような大容量情報を自宅で好きな時に入手/視聴することができるのか、ということが私達の研究開発の最重点課題となっている。要求があればすばやく光ファイバーの通信路が切り換わって自宅と情報源とをつなぎ、あらゆるサービスが手元に現れる。そのような自宅と情報源が光ファイバーのみで接続される(光トランスパアレント)ネットワークは、エネルギーの増大を伴わずに通信帯域がその理論的限界まで自由に使える

ため理想的であり、超高精細映像伝送を活用する教育・福祉・医療等、それを基にした応用技術/サービスはさまざまなものが考えられている。現代社会では通信技術を基盤としたさまざまなサービスが着実に大容量化しており、高速なデータ通信が不可欠となった。大容量データ通信を取り扱うことができるのは光ファイバー通信技術であり、それが昨今のインターネット、高度情報化社会を支えていることは疑いのない事実である。一方で、次章で述べるように、このような高度な通信サービスの持続的発展性に付随する大きな問題点がある。

私達は2010年8月に、産業技術総合研究所(AIST)が中心となり情報通信企業5社と共同で新しく開発され

産業技術総合研究所 ネットワークフォトンクス研究センター 〒305-8568 つくば市梅園1-1-1 中央第2
Network Photonics Research Center, AIST Tsukuba Central 2, 1-1-1 Umezono, Tsukuba 305-8568, Japan * E-mail: j.kurumida@aist.go.jp

Original manuscript received February 7, 2011, Revisions received March 31, 2011, Accepted April 6, 2011

た光通信向けの要素技術を組み合わせて、超高精細映像に代表される大容量情報を要求に応じて配信できるネットワークの実証実験を行った。これによって、現在のネットワークを構成する装置群の消費電力や通信容量等の限界を超える新しいネットワーク技術の一提案ができた。この論文では、個別要素技術を組み合わせてその動作結果を得るまでの技術的構成の検討過程について述べる。

2 光ネットワークに対する社会的要請

日本国内のインターネット上の通信トラフィックが年率3～4割の割合で増え続けていることはよく知られている。この傾向が仮に20年続くとするとトラフィックは現状の1,000倍程度になる。その場合にはもちろん電力効率もそれ相応の改善が望まれる。インターネットの国内利用者数は2009年末までの集計で9,400万人を上回り、人口普及率は78%となっている^[1]。通信機器や情報端末の高性能化に伴いアプリケーションも充実し、インターネットに接続されたコンピュータ上（もちろん移動端末等も含む）の1クリックが大量のデータの送受信を生成するようになったことが根底にある。映像情報サービスもインターネットを通して提供されるようになっており、通信トラフィックの増加に対し電力効率を考慮してどのようにネットワークを構成していくかが大変重要な課題となった。中でも大容量データ通信を支えることのできる光ファイバー通信技術からなる光ネットワークをどのように構成するかが重要視されるようになった。これには社会的背景を中心とした次のような理由がある。これまでインターネット上の通信トラフィックの増加には通信装置を並列に増設したり、通信速度が高速な装置に入れ替えたりすることで対応してきた。しかし、高速電気信号処理を中心とした従来型の通信装置の増設は通信速度の増加に伴い消費電力も線形に増加することが問題となった（電力問題）。また、光加入者回線接続技術も進歩し、光ファイバーが自宅まで届けられるようになったものの、多様化する広帯域サービスを効率的に通信ノード（基地局）へ収容していくことが難しいという現状が認識されるようになった（通信容量とネットワーク構成問題）。これらを解決していくためには光の通信回線をどのように真の光ネットワークへと発展させ構成していくか、という点が重要になる。

産業技術総合研究所（AIST）のネットワークフォトンクス研究センターでは、ユーザーとユーザーとの間を光のパスで直接結ぶ「光パス・ネットワーク」と名付けた新しいネットワークを提案し、上記の問題を解決するべく研究開発を推進している。特に大容量情報のリクエストに対し柔軟に光ネットワークをスイッチし、光パスを動的に確保するもの

を「ダイナミック光パス・ネットワーク」と呼んでいる。具体的には映像送受信、シリコン光パス・スイッチや分散補償等の技術開発を行い、各装置および装置群の適切な管理制御を基にして広帯域サービスを実現できる光ネットワークへと構成していくものである。図1がその概念図である。光スイッチをネットワークで活用するためには、アプリケーションに応じて光スイッチを制御する仕組みが必要である。すなわち、高精細映像サーバーやディスプレイを相互に接続、またビデオ会議システムを取り扱い、それらが光パスやストレージの情報を基に適切に管理制御される仕組みである。さらにシリコン光パス・スイッチや波長資源管理技術も導入し、デバイスからアプリケーションまで個別に開発される技術を集約して実現する垂直連携が欠かせない。このような取り組みにより、高速データ通信が多数の電気信号処理を介することなく実現され、大容量情報を低電力で扱うネットワークを構成することが可能となる。この論文ではこれらを構成する要素技術をどのようにシステムとして組み上げ、実証実験を実施したかを中心に述べる。

ネットワークに顕在化している問題が段階的にも解決された暁には社会的・経済的にもとても大きな利点を生み出す。自動車やロボット（遠隔手術等も含む）への情報提供や、テレビ会議やリモートセンシング等、あらゆるサービスへの通信基盤となるからである。これら新しい通信基盤はアプリケーションを中心に新しい社会的価値観を生み出す。例えば3次元映像を共有しながらのテレビ会議は出張といった人間の移動を減らすであろうし、高精細で臨場感あふれる映像サービスは現地へ実際に向く必要性を減らすであろう。高速大容量通信基盤はテレプレゼンス（遠隔存在感）、テレレゼンス（遠隔臨場感、コミュニケーション）、テレマージョン（臨場感通信）のいずれもの現実化を支える基本技術となることができる。

3 実証実験のシナリオ

一般に通信ネットワークは電気やガス・水道と同様の社会基盤（インフラ）であると言うことができ、既設のネットワークがない場所を除いて新しい光ファイバーネットワーク

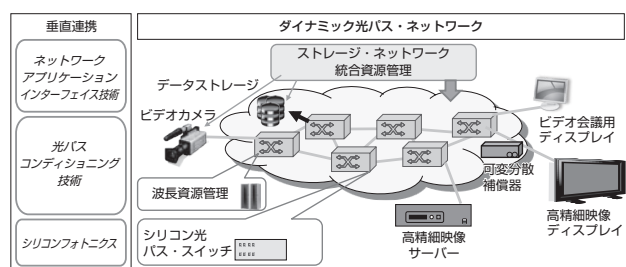


図1 ダイナミック光パス・ネットワークの概念図

を一から街中へ引き直すという形には通常ならない。したがって、既存の技術と新しい技術とを組み合わせながら段階的に新しいネットワークを実現していくことになる。将来を見据えて、超高精細映像をネットワークの中いかに組み入れていけばよいかを考える必要がある。そこで三つの観点から考える。A. 超高精細映像配信を実証実験に組み入れるために、研究開発段階にある超高精細映像配信技術（ビットレート < 43 Gb/s）と実際の通信サービスとして市場に立ち上がっている 1 Gb/s、10 Gb/s といった通信要素技術を共存させネットワークを構成することを考える。これには二つ理由がある。一つ目は超高精細映像配信技術を中心にさまざまな通信レートを同時にネットワークで取り扱うことができることを実際に示すためである。二つ目はそれらをネットワーク上で管理し、リクエストに応じたサービスを判断し、実際のネットワークを切り換えて配信できることを示すためである。次に、B. 実際に敷設された光ファイバーを使って構成することを考える。これにも二つ理由がある。敷設されている光ファイバーからくるあらゆる非線形応答を補償し、通信が成立することを確認することと、異なる要素で構成された別のネットワークとも相互に接続が確立することを確認するためである。さらに全体としてこれらに工夫を加え、C. 低消費電力で実現することが目的となる。

上記が実証実験へ向けたシナリオの骨格である。これを基にしてダイナミック光パス・ネットワークを実現していく。はたして前述の事柄を集約し、組み合わせることだけで近未来に思い描く高速大容量通信基盤を具現化できるのかどうか一つのポイントとなる。前述の視点はハードウェアに主に着目したものであり、それだけではやはり正しく構成されない。ハードウェアに合わせてソフトウェア・ファームウェアを設計開発する必要がある。図2にデモ実験の構成要素を示す。構成要素には実際に敷設された光ファイバーを活用すること、私達が開発した通信要素技術を活用すること、これらにリソース管理制御を加えること、という制約条件がある。さらにそれらにはソフトウェアとハードウェアの2面性があり、デモ実験をより効果的に行うためには、総合的な構成検討が必要となる。

要素技術については次章で詳しく述べるが、実際にデモ

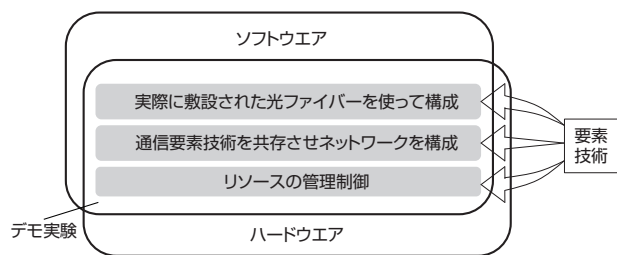


図2 デモ実験の構成

表1 実証実験構成要素

構成要素	技術名称	協働組織名	文献	注
資源管理	(a) 光パス・ネットワーク	NTT / AIST	[2][3]	
	(b) 光バケット・光パス統合ネットワーク	NICT	[4]	
通信線路	(c) 研究開発テストベッドネットワーク	JGN2plus (NICT)	[5]	
	(d) 商用光ファイバー回線(秋葉原-大手町)	—		
ノード装置	(e) PLC型光スイッチ	—		市販
および デバイス	(f) シリコンフォトニクス・スイッチ	AIST	[6]	
	(g) 電流注入型シリコン高速光スイッチ	富士通研究所	[7]	
	(h) 省電力型次世代ROADM	NEC	[8]	
	(i) 高速波長可変レーザー	トリマティス		
	(j) 光増幅器 (EDFA)	—		市販
	(k) パラメトリック任意光波長変換器	古河電工/AIST	[10]	
	(l) 高速自律制御型光可変分散補償器	古河電工/AIST	[11]-[13]	
端末装置	(m) スーパーハイビジョン送受信装置	NHK	[14]	
	(n) コンテンツ集積サーバー	—		汎用
	配信サーバー	—		汎用
	ディスプレイ (モニタ)	—		市販
コンテンツ	(o) スーパーハイビジョン映像	NHK		
	(p) ハイビジョン映像	AIST		

を遂行するにあたっては、余分なシナリオ検討等も行った。具体的にはデモでは使用しないが、それぞれの要素技術にネットワークの機能拡張性 (Extendability) を設け、最悪の事態を想定した予備 (Backup) を準備した。このような準備はデモ実験に限ったことではなく、実際の通信システムにおいても考慮される事柄である。実システムにおいても、問題の実態に合わせて再構成可能 (Reconfigurable) にしたり、代替機能 (Alternative) をもたせたりすることができる機能が実装されている。以上を考慮し、ビットレート混在、異種ネット相互接続、高精細映像をリクエストに応じてサービスすることを実際に示すシナリオを組んだ。

4 要素技術

光ネットワーク実証実験の構成要素は五つに分けて考えることができる。ネットワーク資源管理、情報が伝送される媒体としての通信線路、それらの端に配置されるノード装置およびデバイス、配信または受信先となる端末装置、線路や装置に流れる実際の情報 (コンテンツ) である。それらを具体的にまとめたものを表1に示す。この章では構成要素技術について表1に沿って述べるとともにそれらを選択した理由を明確にする。

4.1 資源管理

4.1.1 光パス・ネットワーク (NTT/AIST)

AISTのネットワークフォトニクス研究センターでは、これまで光パス・ネットワークの研究開発を推進してきており、各種光スイッチによって通信路が切り替えられてもそれに影響を受けないよう通信路の分散量や光強度を最適化する技術を開発している^[2]。このデモにおいては主にノードにPLC型光スイッチ^{用語1} (表1(e))を用い、その間を

数十メートルの光ファイバパッチコードでつなぎ光パス・ネットワークを形成することとした。

光パス・ネットワークにおけるネットワークおよびストレージ資源管理は NTT と AIST 情報技術研究部門との協働により実現される。性能保証されたストレージの予約状況を管理する資源管理装置と光パスを管理するネットワーク資源管理装置を配置し、視聴者からの映像視聴要求に対して最適なサーバーの選択および光パスを提供する^[3]。視聴者から予約が入り予約時刻になると光パスを開通させ視聴者へのコンテンツ配信を開始、1 Gb/s、10 Gb/s、43 Gb/s を含むマルチビットレート信号を扱うことができるように設計されている。光パスの予約状況を示すソフトウェアも開発され、ユーザーインターフェイスも同時に提供されることとなった。

4.1.2 光パケット・光パス統合ネットワーク(情報通信研究機構(NICT))への相互接続

異種ネットワークの相互乗り入れを広範囲で行えることを実証するために、NICT の光パケット・光パス統合ネットワークと共同でデモを実施する運びとなった。この相互接続は NICT の協力を得て、制御信号の受け渡しを取り決め、コンテンツおよびサービス情報を接続ノードで交換することで実現する。光パケット・光パス統合ネットワークにより遅延やデータ損失のない高品質なサービスが提供される^[4]。

4.2 通信線路

実際に敷設されている光ファイバ(フィールドファイバ)を使わずにネットワークを構成することも当然可能ではあるが、それでは実証実験の意図(シナリオ)から外れるので、フィールドファイバを使うことが必要であった。ところが長距離にわたり商用光ファイバを借りると、経済的にも負担が大きいため研究開発テストベッドネットワーク(JGN2plus)^[5]を借用し実験系に組み入れることで、実際に近い形の通信距離を得るに至った。このようにして実際上起こり得る通信不安定要因、制限要因を含めて実験することが可能となった。このテストベッドの地理的要件や利便性を考慮すると JGN2plus の利用はデモ実験に適したものであった。その内容は次章の 5.1 節で実験会場と共に述べる。

4.3 ノード装置およびデバイス

4.3.1 シリコンフォトニクス・スイッチ(AIST)

低電力・集積化可能な光デバイスはネットワーク機器への搭載に向けた研究が注目を集めており、AIST ではシリコンフォトニクス技術によるクロスバスイッチ^[用註2]の開発に着手している^[6]。このスイッチを実際にネットワークノードに取り込み初めて映像データを流せるように構成した。いくつかの通信ノードのスイッチには一般に使用されている

PLC 型光スイッチを採用しているが、このシリコンフォトニクス・スイッチは低電力化、高集積多ポート化が実証できるため組み入れられた。

4.3.2 電流注入型シリコン高速光スイッチ((株)富士通研究所)

(株)富士通研究所では将来のダイナミック光パス・ネットワークの実現にむけて、小型で電子回路との混載集積が可能なシリコンベース光スイッチの開発が進められている。ナノ細線リブ導波路横方向 p-i-n ダイオード構造を採用した、断面積が小さいと同時に光閉じ込め効率の高い高効率動作デバイスが実現されている。世界最小のスイッチング電力でスイッチング速度数 ns を実現しており^[7]、このスイッチもまた実際のデモ実験用ネットワークノードに組み込んだ。

4.3.3 省電力型次世代ROADM(日本電気(株)(NEC))

光ネットワークノードに組み込む再構成可能型光分岐挿入多重装置は ROADM (reconfigurable optical add/drop multiplexer) と呼ばれており、波長多重方式とパス管理の技術を組み合わせて超高速・大容量の光伝送ネットワークを効率よく運用するための装置である。現在、ROADM が採用されているネットワークのノード装置においては光パスの設定に自由度が十分でないという問題がある。ノードに収容されているトランスポンダ^[用註3]を任意の波長、任意の方路に切り替えすることができる装置が重要になる。NEC ではトランスポンダアグリゲータ^[用註4]を開発し光パス設定の自由度を向上させており、これは最終的にトランスポンダの利用効率を改善することとなる^[8]。

4.3.4 高速波長可変レーザー((株)トリマトイス)

今後の光ネットワークではダイナミックに光の波長を切り替えて運用していく必要があるため、波長切り替えの高速性が鍵となる。トリマトイスではミリ秒以下の波長切り替えが実現できる波長可変レーザーダイオード(T-LD)を基にした波長変換用光源装置の開発を行っている。これは単体の T-LD を高速かつ安定に波長可変させる技術であり、C バンド^[用註5]を 5 GHz ステップで波長(周波数)可変可能な装置が実現されている。これを NEC の ROADM 装置の一部入力側へ搭載し、光の波長の切り替えを想定した構成とした。

4.3.5 光増幅器

光増幅器(エルビウム添加光ファイバ増幅器:EDFA^[用註6])は光ファイバ通信線路の損失を補うために用いる必要がある、欠かすことができない。これをネットワークのどこに配置するかが要点になるが、距離に対応した光ファイバの損失情報より配置を決める。また、光パス・ネットワークでは波長がダイナミックに切り替えられるため、過渡応答に

追従できる EDFA^[9] である必要があり、この技術が採用されているものを選択している。

4.3.6 パラメトリック任意光波長変換器（古河電気工業（株）/AIST）

将来の光パス・ネットワークで光波長資源を有効活用するためには、波長変換技術は欠かすことのできない技術となっている。高非線形ファイバー（HNLF）を利用したコヒーレントな波長変換は変換後の光の位相の状態を保持することができるため、原理的にデータ変調フォーマットや変調速度に依存しない^[10]。波長変換技術には高非線形ファイバー以外にも半導体光増幅器を利用したもの等が存在するが、高非線形ファイバーにおいては変調フォーマット無依存性が将来的に有用であるため採用された。デモでは C バンドから L バンド^{用語5}への波長変換が組み込まれている。

4.3.7 高速自律制御型光可変分散補償器（古河電気工業（株）/AIST）

古河電気工業（株）と AIST では、光パラメトリック可変分散補償（P-TDC）と呼ばれる、パラメトリック過程による波長変換と波長依存の分散媒質を組み合わせた可変分散補償方式を提案・実証している^[11]。位相保持型波長変換の原理に低分散スロープを有する高非線形光ファイバー（HNLF）^[12]の 4 光波混合（FWM）を用いることにより、これまでの可変分散補償技術では実現困難である 1 THz を超えるグリッドレスな広帯域動作を実現する。また、今後の光ネットワークにおいて光パスがダイナミックに切り替えられることを想定し、マイクロ秒オーダーの高速可変応答を実現している^[13]。この技術をスーパーハイビジョン信号が流れる 43 Gb/s、105 km ラインのフィールドファイバーに適用し伝送実験を行うこととした。

4.4 端末装置

4.4.1 スーパーハイビジョン送受信装置（NHK）

非圧縮スーパーハイビジョンを 24 Gb/s デュアルグリーン方式で 43 Gb/s 光信号より送受信できる装置が NHK を中心にして開発されており^[14]、これを用い 105 km のフィールドファイバーを経由するようにネットワークを構成する。そのため 4.3.7 節で述べた高速自律制御型光可変分散補償技術を用い、長距離伝送を実現することとした。

4.4.2 コンテンツ集積サーバー、配信サーバー、ディスプレイ

コンテンツ集積サーバーは文字どおり映像コンテンツを保存しているコンピュータであり、光パス・ネットワークのネットワーク・ストレージ資源管理装置からの命令（4.1.1 節）でこれらの集積 / 配信サーバーが作動する。ディスプレイはスーパーハイビジョン用モニターを除いて、一般に入手可能である機器で構成される。

4.5 コンテンツ

コンテンツにはスーパーハイビジョン映像（NHK）とハイビジョン映像を用意した。前者は 3,300 万画素 / フレームをもつ超高解像度映像を指しており、ハイビジョン映像を縦横 4 倍にした画素数相当をもつ映像である。NHK の協力により二つのスーパーハイビジョン映像が送出できるようにデモの実験系にセットされた。

ハイビジョン（HD）については一般の HD ビデオカメラを購入し自作コンテンツを準備した。映像は配信サーバーへセットされる。

5 実証実験

通信技術の実証実験は、基本的に切り替え技術を含めて情報を A 点から B 点へ届けることが可能なことを実際に示すことである。それには送信端・受信端が存在する会場、計画を基にした実験系の構築、それから実際に映像情報を送出 / 切替を行うといったことが実験のための重要要素となる。これらのことを考慮した結果、実証実験構成を図 3 のようにした。4 章で述べた要素技術が図中に取り込まれている。この章では前章の要素技術をどのように取り込み、実験を成立させたかを述べる。

図 3 では主に二つのネットワークが相互に接続されている構成がわかる。左側の青いエリアが NICT の光パス・パケット統合ネットワークであり、右側の緑のエリアが AIST の光パス・ネットワークとなっている。その中央部には NHK のスーパーハイビジョン送受信技術がセットされる。これは相互接続点を協議した結果のトポロジー^{用語7}である。図中の青い接続線は光ファイバーを示している。また、相互のネットワークのスウィッチングのリクエスト方式はあらかじめ定めた。同図右の黒い鎖線部のネットワークはすべて秋葉原に置かれ、NICT の光パケット・光パス統合ネットワークへはその左端 NICT-EAST、NICT-WEST の装置を接点に大手町、小金井、大手町と経由する。これによりネットワークの制御環境が整い、映像配信実験（5.2 節）へ移行する。

5.1 実験会場と実験系の構築

実証実験はどこでも可能なように思えるが、利用可能な敷設光ファイバーを絞り込んでいくことを同時に行いながら会場を決めた。4.2 節で述べた研究開発テストベッドネットワーク（JGN2plus）を使う必要があるため、適切な端局を考える。JGN2plus の東端は東京都千代田区大手町にあり、それと産総研秋葉原事業所（東京都千代田区外神田）までを一般商用光ファイバーで接続することで、比較的容易にネットワークにできる結論に達した。産総研の主たる事業所、茨城県つくば市まで接続することも不可能ではな

かったが、この時、研究開発テストベッドネットワークのつくば市までの延伸がなかったことと、デモ実験とシンポジウムの併設が決定されていたので、利便性の高い産総研秋葉原事業所が選ばれた。大手町～秋葉原間は見通し1～2 kmであるが、利用した光ファイバーは9.8 kmの距離がある。これは利用できる敷設光ファイバーがビルの特定のフロアに上っていたり、そこから地下の共同坑に取り込まれたりしているためである。大手町～秋葉原間の光ファイバー線路が確保されたので、あとはJGN2plus 西端がNICT（小金井）に存在することからそのままNICTへ接続し、その範囲を実際のネットワークに仕立てた。この間の距離は約42.7 kmあり、往復で105 kmの距離を秋葉原から利用できる。したがって、実験会場はNICT（小金井）とAIST（秋葉原）の2カ所となった。この距離間隔は一つの都市間を繋いでいるネットワークのモデルとして適度なものとなった。大きな課題は、この実験で用いる最も高速な43 Gb/s 光変調信号による通信を成立させることであった。そのために私達が開発した高速自立制御型可変分散補償器によって105 kmの光ファイバーから受ける波長分散による波形劣化の影響を完全に補償することを計画した。ところが、光ファイバーの0.2 dB/km以上の伝送損失および光コネクタ・部品による損失が事前に明らかでなかったため、

受信器に合う光S/N比に入るかどうか不確定であった。そのためトポロジーを簡略化し、伝送の難易度を下げようようなバックアッププランを映像配信実験用に用意して臨んだ。

デモ実験の場所は産総研秋葉原事業所のフロアの一部に図4のように設定された。ハードウェアはおおよそ要素技術別に配置されている。図3との対応をとっているが、実際はこの図4が先に設計を完了している。限られたスペースにおいて装置の大きさや接続の利便性が優先していった結果、レイアウトが不都合のない形で定まった。図4のように実際のハードウェアが準備されたところで、機能ブロックごとにデバイス・装置を接続していく。実験系の構築においてはこの接続のプロセスが最も重要でミス接続や巨大な通信線路損失は許されない。スイッチのポートテーブルを用いて正確にかつ適正な信号レベルで行う。

5.2 映像配信実験

このデモ実験のハイライトの一つは、最も高速な光変調信号でかつ105 kmの伝送距離のある43 Gb/s バスの通信が成立するかであった。図3中の赤線で示した通信パスである。このパスをビットエラーレートテストで試験すると、光信号強度を上げてもエラー無し状態にならず、スーパーハイビジョン映像に乱れや瞬断が起こる懸念があった。し

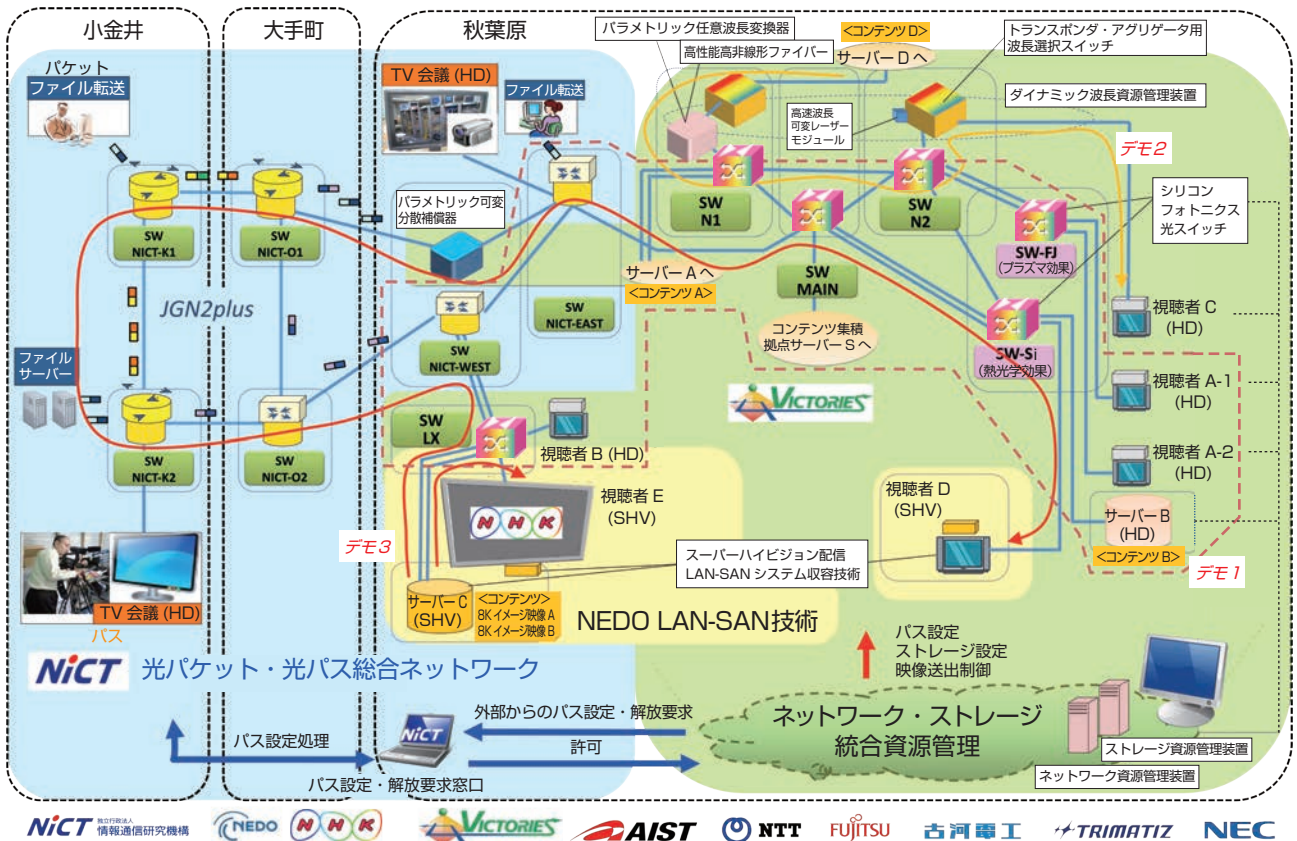


図3 光ネットワーク合同接続実験概要図

かし適切な光パワーで実際の受信装置に接続すると、その装置の信号誤り訂正機能により通信が成立した。信号誤り訂正機能は特別なものではないが、構築した伝送距離 105 km の 43 Gb/s パスが誤り訂正可能範囲内に入ることは実験によってのみしか確認できず、映像配信実験の一つの大きなポイントとなった。

長距離・高速の通信パスが確認された後は、公開デモ実験として見ていただくシーンをどのように作り込むかといったことがむしろ課題であった。この点はネットワーク・ストレージ資源管理技術を扱う NTT と入念に話し合われた。これをデモシナリオと呼んだが、大規模な実証実験ネットワークを組みながらすべての要素技術が実際に機能するようにデモシナリオを組まなければ、要素技術の存在の意味が薄れるからである。実行したデモシナリオはストレージ管理装置を含めた映像の予約とその制御、ノード装置の映像を含めたプロテクション動作、NICT 光パケット・光パス統合ネットワークとの協調、スーパーハイビジョンの予約配信である。

デモ実験は 2010 年 8 月 25 日に開催された第 3 回「光ネットワーク超低エネルギー化技術拠点」シンポジウムの中で実施された。表 2 が当日のデモシナリオの流れである。約 30 分間ですべての要素技術が連携し網羅されるように構成している。デモシナリオと図 3 とを合わせて見ると、デモ 1 によりネットワーク・ストレージ総合資源管理をベースに視聴者 A-1、A-2 からのコンテンツリクエストに対応し、コンテンツが保存されているサーバーと視聴者を結ぶ光パスとを最適化し HD 映像が送信されることが示された。デモ 2 では、ダイナミック波長資源管理装置を経由して視聴

表2 デモシナリオと要素技術

	デモシナリオ	要素技術
約30分	デモ1：ストレージ管理装置を含めた映像の予約とその制御	(a), (e), (j), (n), (p)
	デモ2：プロテクション(次世代ROADM技術)	(e), (h), (i), (l)
	NICTデモ：光パケット・光パス統合ネットワーク	(b), (c), (d)
	デモ3：予約によるスーパーハイビジョンの映像配信(NHK)および異種ネット間接続、シリコン光スイッチ、可変分散補償	(b), (c), (d), (e), (f), (g), (j), (k), (l), (m), (o)

者 C のリクエストであるサーバー D 中のコンテンツ D を配信する形式に加えて、トランスポンダ故障時のプロテクション動作も行われた。デモ 3 では、視聴者 B、D からのスーパーハイビジョン映像リクエストを想定して、長距離伝送とシリコンフォトニクス・スイッチを含めた光パスを設定し、高精細映像情報が異種ネットワークを問題なく通過することも確認された。図 5 に公開デモ実験の様子を示す。中央に見える 3 台の小モニターが左から視聴者 C、A-1、A-2 と対応する。3 台の小モニターの右の大画面がネットワーク・ストレージ総合資源管理画面である。

6 結果の評価と将来への展開

5.2 節のデモシナリオを使ってすべての要素技術が連携することが実験で確認された。そして 3 章で述べた三つのポイント、A. さまざまな通信レートを同時にネットワークで取り扱いそれらをネットワーク上で管理し、リクエストに応じたサービスの判断によって実際のネットワークを切り換えて配信できること、B. 実際に敷設された光ファイバーで生じる非線形応答を補償し、通信が成立することおよび異なる要素で構成された別のネットワークとも相互に接続が確立すること、C. 低消費電力で実現すること、が示された。

また、動作状態において特定のネットワークノードの消費電力計測を行い、結果を予測値と共にまとめたものが図 6 である。コアラータを使ってデモ実験で使用した機器と同等数のスイッチポートとノードを組み上げると仮定すると、光増幅器を含めて 13.4 kW 程度となることが予測される。デモ実験におけるサーバー等を除いた電力は Tb/s への拡張性を残して 1.5 kW であった。計測の電源回路から分別

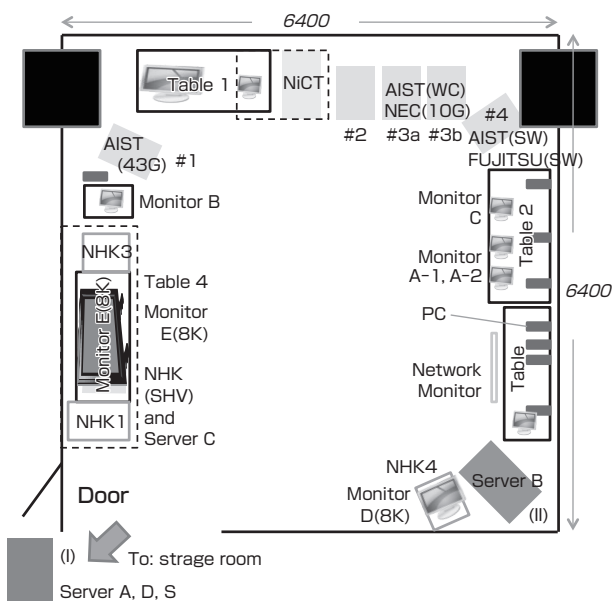


図4 秋葉原会場レイアウト



図5 公開デモ実験の様子

することのできないオフィス機器の電力が一部含まれたために装置群の定格を積み上げた値より若干大きな数値になったが、基本的に電力の値は大容量通信データを詰め込んでいけばいくほど省エネルギー効果が顕著に得られることがわかった。具体的にはシリコンフォトニクス光スイッチが実現されポート当たりの伝送レートが 100 Gb/s となれば現状と比べると 1,000 倍の電力効率が得られる見通しである。今後予測される高精細映像情報のような通信需要増に対しても、電力の伸びを抑えられる点で適度な低電力化が達成されたと考える。光パス・ネットワークにより通信ネットワークの低消費電力化に貢献可能である。

光パス・ネットワーク構築をスタートさせて初めて明らかになることが複数あった。ネットワーク接続の基本となる OSI モデル^{用語8} からみると、レイヤ間連携が複雑になったということが第一にあげられる。これは物理層がスイッチで切り換わることに始まり、ブラウザのキャッシュがある程度の映像を貯めながら表示させるといったところまで、複雑に絡み合う。メディアコンバータ^{用語9}を使用している回線ではそれ自身に対向するリンク連動機能が働いて資源管理装置からの命令と異なる動きとなる等、一つ一つの光パスの通信確立に時間を割いた。デモ実験においてはレイヤ間連携に関連する問題を一つ一つ解決し動作状態としたが、よりスムーズに光パス・ネットワークを構築しその特徴を最大限に発揮させるには接続標準化を含めたより具体的なデモ実験・相互接続のような機会が必要になると考えられる。このような知見はデバイスからアプリケーションまでの技術を持ち寄って実施する「垂直連携」がなければ得ることができなかった。

今後光パス・ネットワークにおいては、レイヤ間連携や送受信機の光の波長や性能の違いを補償していくことが必要になる。この点については、光パスコンディショニング技術として AIST ネットワークフォトニクス研究センターにて研究開発を進めている。

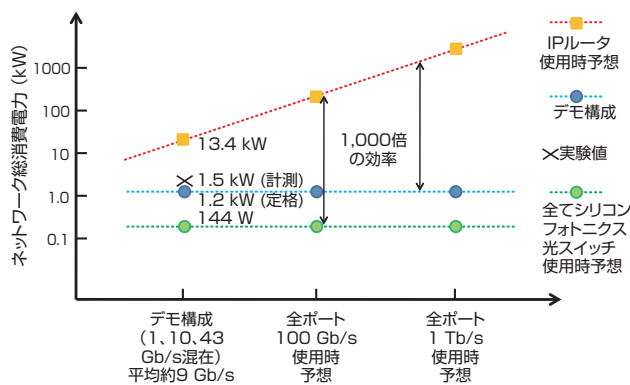


図6 デモ構成における通信容量と消費電力(含予想値)

7 おわりに—この実証実験の意義

産業技術総合研究所、情報通信関連企業 5 社、情報通信研究機構、NHK 放送技術研究所の共同で高精細大容量映像時代を支える新しい光通信ネットワークの実証実験を成功させた。各組織をまたがる垂直連携により、現在のネットワークを構成する装置群の消費電力、通信容量等の限界を超える新しいネットワークの可能性を示せたことは有意義であった。新しく開発された光通信向けの要素技術を取り込んで、新しい映像情報サービスの一面を現実のものにできたことは光通信技術進化の一つの重要なステップであったと信じたい。

謝辞

デモ実験を進めるにあたり NICT および NHK の両機関には多大なる貢献をいただいております、ここに感謝の意を表したい。各社協働企業の皆さま方のご尽力によりデモ実験が成功に導かれたことにお礼を申し上げます。デモ設置・立上に関して多大なる実働をいただいた、AIST 情報技術研究部門工藤知宏グループ長をはじめとする、各要素技術を担当した AIST 研究者各位に感謝する。最後に、AIST 一村信吾理事および石川浩センター長の指導・支援がなければこのデモ実験が実現しなかったことを付記したい。

用語説明

- 用語1: PLC (Planar Lightwave Circuit) 型光スイッチ: 平面光回路型の光スイッチ。PLCは石英系平面光導波路を指すことが多い。
- 用語2: クロスバススイッチ: 2入力、2出力の接続ポートを考えた時、バー状態とクロス状態の二つのスイッチングステートをもつスイッチを指す。デジタルスイッチングが普及する以前に電話交換機等で利用されていた電気スイッチ方式からきている。近年では装置内部のCPUやメモリ間でデータをやり取りする時に経路を動的に選択する内部スイッチ素子を指すことが多い。
- 用語3: トランスポンダ: クライアント信号を收容し基幹系伝送路に適したフレームフォーマット (OTN等) に変換し、任意の波長で通信を行う光送受信装置。
- 用語4: トランスポンダアグリゲータ: これまでROADMが抱えていた光経路設定における波長制約および方路制約を解消し、伝送路と光送受信装置 (トランスポンダ) の間における光経路の再構成自由度を提供する装置。波長選択性のある光導波路と光マトリクススイッチにより構成され、任意のトランスポンダが任意の波長で任意の光ファイバー伝送路と接続する光経路設定を可能にする。
- 用語5: Cバンド/Lバンド: 光通信で使用される光の波長帯。Cバンド (Conventional-band) は1530-1565 nmの波長帯、L

バンド (Long-band) は1565-1625 nmの波長帯である。

用語6: エルビウム添加光ファイバー増幅器：希土類元素エルビウムを添加したファイバーに特定波長の励起光を与えると、特定範囲の光信号が増幅される原理を用い、電気信号への変換を介さずに光信号をファイバー中で直接増幅する装置。

用語7: トポロジー：位置・接続的関係を示す用語で、一般的にコンピュータネットワークの接続形態を指す。スター型、リング型等のネットワークトポロジーが代表的である。

用語8: OSI (Open Systems Interconnection)：開放型システム間相互接続。通信プロトコルを機能ごとに7つの階層構造に分け規定・整理したもの。OSI参照モデルとして知られる。

用語9: メディアコンバータ：異なる伝送媒体間を接続し、相互に信号を変換する装置を指している。LANケーブル（銅線）を光ファイバーへ変換するものが代表的である。

参考文献

- [1] Ministry of Internal Affairs and Communications, 2010 White Paper on Information and Communications in Japan, (*White paper*), (2010).
- [2] S. Namiki, T. Kurosu, K. Tanizawa, J. Kurumida, T. Hasama, H. Ishikawa, T. Nakatogawa, M. Nakamura and K. Oyamada: Ultrahigh-definition video transmission and extremely green optical networks for future, *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 17 (2), 446-457 (2011).
- [3] K. Yamada, Y. Tsukishima, K. Matsuda, M. Jinno, Y. Tanimura, T. Kudoh, A. Takefusa, R. Takano and T. Shimizu: Joint storage-network resource management for super high-definition video delivery service, *Optical Fiber Communication (OFC) 2011, Conference on, JWA1*, (2011).
- [4] H. Harai: Report of proof-of-concept experimental and live demonstration of optical packet & circuit integrated network over JGN2plus optical-fiber testbed, *IEICE technical report*, 110, 7-12 (2010).
- [5] NICT, Advanced Testbed Network for R&D, <http://www.jgn.nict.go.jp/>.
- [6] Y. Shoji, K. Kintaka, S. Suda, H. Kawashima, T. Hasama and H. Ishikawa: Low-crosstalk 2 x 2 thermo-optic switch with silicon wire waveguides, *Optics Express*, 18, 9071-9075 (2010).
- [7] S. Sekiguchi, T. Kurahashi, K. Kawaguchi and K. Morito: Current-injection-type silicon-based optical switch with silicon germanium waveguide, *IEEE Photonics Society 23rd Annual Meeting, WW3* (2010).
- [8] M. Sakauchi, I. Nishioka, S. Nakamura, T. Chu and Y. Urino: Demonstration of fast optical protection in ROADM system with one-chip color/direction-independent add/drop multiplexer employing silicon photonic circuit, *Optical Fiber Communication (OFC) 2009, Conference on, JThA51* (2009).
- [9] Y. Oikawa, Y. Horiuchi, Y. Tanaka, M. Shiga, N. Shiga, and H. Nagaeda: Super-fast AGC-EDFA for the burst-mode systems without gain excursion in 20-ns and 21-dB ramped input, *2008 Conference on Optical Fiber Communication/National Fiber Optic Engineers Conference*, 1-3 (2008).
- [10] S. Petit, T. Kurosu, S. Namiki, M. Takahashi and T. Yagi: Truly arbitrary wavelength conversion by cascaded four-wave mixing in low dispersion slope sbs suppressed highly nonlinear fibers, *2010 IEEE Photonics Society Winter Topicals Meeting Series*, 115-116 (2010).
- [11] S. Namiki: Wide-band and -range tunable dispersion compensation through parametric wavelength conversion and dispersive optical fibers, *Journal of Lightwave Technology*, 26, 28-35 (2008).
- [12] M. Takahashi, R. Sugizaki, J. Hiroishi, M. Tadakuma, Y. Taniguchi, and T. Yagi: Low-loss and low-dispersion-slope highly nonlinear fibers, *Journal of Lightwave Technology*, 23, 3615-3624 (2005).
- [13] K. Tanizawa, J. Kurumida, H. Ishida, Y. Oikawa, N. Shiga, M. Takahashi, T. Yagi and S. Namiki: Microsecond switching of parametric tunable dispersion compensator, *Optics Letters*, 35, 3039-3041 (2010).
- [14] F. Sugino, T. Ikeda and K. Shogen: Wireless and fibre-optic live contribution link for uncompressed super hi-vision signals, *The Best of IET and IBC, IET Journals*, 2, 31-36 (2010).

執筆者略歴

来見田 淳也 (くるみだ じゅんや)

独立行政法人産業技術総合研究所ネットワークフォトニクスセンター光信号処理システム研究チーム、研究員。1998年大阪電気通信大学大学院工学研究科修士課程修了。2007年東京工業大学大学院総合理工学研究科博士課程修了。博士(工学)。富士通株式会社、独立行政法人産業技術総合研究所光技術研究部門、カリフォルニア大学デイビス校を経て2009年より現職。光ファイバー通信技術分野におけるデバイスから装置システムにわたる研究開発に従事。並木と議論しながら、デモ実験全体の統括を担当し方針管理を実施、この論文ではすべての章を執筆した。



並木 周 (なみき しゅう)

独立行政法人産業技術総合研究所ネットワークフォトニクスセンター光信号処理システム研究チーム、研究チーム長。1988年早稲田大学大学院理工学研究科修士課程修了。同年古河電気工業(株)入社。以来、半導体光デバイス、モード同期レーザー、光増幅器、非線形ファイバー光学、光伝送等の研究および製品開発に従事。1994-1997年米国MIT客員研究員。2005年より産総研。現在、同ネットワークフォトニクス研究センター研究チーム長。これまでに、200件以上の出版物を共著し、多くの国際会議プログラム委員や、IEC国際標準化委員を務める。2005年から電子情報通信学会英文誌B編集副委員長とOSA Optics Express誌のAssociate Editorを務め、現在、Optics ExpressのAdvisory Editor、電子情報通信学会通信ソサイエティ副編集長。理学博士。アメリカ光学会(OSA)フェロー。この論文では、デモ実験の方向性と組み合わせる要素技術の概要を検討した。



査読者との議論

議論1 論文の背景

コメント (小林直人：早稲田大学研究戦略センター)

この論文は、ダイナミック光パス・ネットワーク実現のための実証実験を行ったことが主なテーマですが、そもそもダイナミッ

ク光パス・ネットワークとは何なのか、それを行うことによってなぜ低消費電力の光通信が実現できるのか（なぜパケット通信では駄目なのかも含めて）、という説明が不足していると思われます。これらを記述して、専門外の読者の理解をも促すことを期待します。

回答（来見田 淳也）

重要な説明ポイントのご指摘ありがとうございます。光パス・ネットワークを明確にするために、第2章第2段落に次の文を加えました。「光パス・ネットワーク」と名付けた新しいネットワークを提案し、これらの問題を解決するべく研究開発を推進している。特に大容量情報のリクエストに対し柔軟に光ネットワークをスイッチし、光パスを動的に確保するネットワークを「ダイナミック光パス・ネットワーク」と呼んでいる。」また、第2章中に「このような取り組みにより、高速データ通信が多数の電気信号処理を介することなく実現され、大容量情報を低電力で扱うネットワークを構成することが可能となる。」を入れ、低消費電力光通信実現性の理由について触れました。

また、多くの読者の方々に明確になるよう、第1章に「一方で、このような高度な通信サービスの持続的発展性に付随する次章で述べるような大きな問題点がある。」という文を挿入し、問題点を次章で説明することを述べました。

コメント（立石 裕：新エネルギー・産業技術総合開発機構）

この論文のポイントは、大容量ネットワークの全光化による省電力化、異種光ネットワークのシームレスな相互接続技術、これらをベースにした大容量コンテンツの配信実装、を一つのデモで実証した、ということだと理解しますが、どこにブレークスルーポイントがあるのか、それをどのように解決したのか読み取れません。まず、研究の背景と概要を、もっと整理してわかりやすく提示して下さい。産総研 HP の当該実験に関するプレスリリース^{*}の方がより明快です。そのあとで、研究開発としての視点から、重要なポイントを記述してください。現状では何をやったかは細かく書かれていますが、「なぜそれをやらなければならないのか」「実際に何が問題となり、それをどのように解決したのか」はあまり記述されていません。第三者に理解してもらおうというスタンスでご検討ください。

回答（来見田 淳也）

重要なお指摘ありがとうございます。まず概要に「現在の通信ネットワークを構成する装置群の消費電力、通信容量等の限界を超える新しい光ネットワークの実証のために、」という文章を加え、1. はじめにの文頭に「インターネットを中心とした通信需要の増加を背景に光通信の低エネルギー化が緊急の課題になりつつある。」という文を付加し、研究の背景と概要を明確にいたしました。

また、研究開発からの視点を充実させるべく、5.2 映像配信実験の節にこのデモ実験のハイライトの一つである、最も高速な光変調信号でかつ 105 km の伝送距離のある 43 Gb/s パスの通信を成立させる、という内容を追記するとともに、第3章で触れました、三つのシナリオの観点を A. B. C. とし、第6章と対応付けることで整理しました。

※http://www.aist.go.jp/aist_j/press_release/pr2010/pr20100824_2/pr20100824_2.html

議論2 実証実験システムとその意義

コメント（小林 直人）

要素技術はよく書かれていると思いますが、実証実験システム実現の部分とその成功によるこの研究の意義についての表現が弱く、せつかくの大きな仕事の意義が読者によく伝わらない可能性があります。そこで、

- (1) 第3章に示されたシナリオが、実際の実証実験でどう実現されたのか、を第3章に示された内容、「(1) Gb/s、10 Gb/s といった通信要素技術を共存させたネットワークを構成すること、(2) 実際に敷設された光ファイバーを使って構成すること、(3) さらに全体としてはこれらに工夫をし、低消費電力で実現すること」の結果として明瞭に示すのがよいと思います。
- (2) 要素技術を統合して一つのシステムに組み上げたことは極めて意義深いことなので、そこでの統合の困難さ、それを克服できた理由等をもう少し詳しく記述するとよいと思います。

コメント（立石 裕）

5.1 節で、中間の光ファイバーの距離が細かく記述されていますが、それが実験にとってどのような意味があるのか説明がないので、どのように理解すればよいのか分かりません。実用的にはこのくらいの距離で実装できれば十分ということを言いたいのでしょうか、それとも単に結果的にそうなってしまったのであって技術的には特段の意味がないのでしょうか？いずれにせよ具体的な数字を見ると、読者としてはその意味が気になります。

回答（来見田 淳也）

論文をよりよくできるポイントのご指摘ありがとうございます。

(1) 第3章で触れた、三つの視点を「そこで三つの観点から考える。」という前置きの文とともに、A. B. C. として明確にし、第6章と対応付けを行いました。

(2) 5.1 節に光ファイバー線路の具体的な距離を説明しましたので、距離に対する高速通信の難しさに関連するストーリーを次のように加えました。「この距離間隔は一つの都市間を繋いでいるネットワークのモデルとして適度なものとなった。大きな課題は、この実験で用いる最も高速な 43 Gb/s 光変調信号による通信を成立させることであった。そのために私達が開発した高速自立制御型可変分散補償器によって 105 km の光ファイバーから受ける波長分散による波形劣化の影響を完全に補償することを計画した。ところが、光ファイバーの 0.2 dB/km 以上の伝送損失および光コネクタ・部品による損失が事前に明らかでなかったため、受信器に合う光 S/N 比に入るかどうか不確定であった。そのためトポロジーを簡略化し、伝送の難易度を下げるようなバックアッププランを映像配信実験用に用意して臨んだ。」

また、上記に対応すべく、このデモ実験で克服できた重要なポイントを 5.2 節に次のように明記いたしました。「このデモ実験のハイライトの一つは、最も高速な光変調信号でかつ 105 km の伝送距離がある 43 Gb/s パスの通信が成立する点であった。図 3 中の赤線で示した通信パスである。このパスをビットエラーレートテストで試験すると、光信号強度を上げてもエラー無し状態にならず、スーパーハイビジョン映像に乱れや瞬断が起こる懸念があった。しかし適切な光パワーで実際の受信装置に接続すると、その装置の信号誤り訂正機能により通信が成立した。信号誤り訂正機能は特別なものではないが、構築した伝送距離 105 km の 43 Gb/s パスが誤り訂正可能範囲内に入ることは実験によってのみしか確認できず、映像配信実験の一つの大きなポイントとなった。」

議論3 垂直連携とその概念

コメント（小林 直人）

「垂直連携」はこの仕事の最も価値のある点の一つだと思いますので、図とともに簡単な説明を入れた方がよいと思います。

回答（来見田 淳也）

ご指摘ありがとうございます。図 1 を挿入してそれに対する説明を次のように加えました。「図 1 がその概念図である。光スイッチをネットワークで活用するためには、アプリケーションに応じて光スイッチを制御するしくみが必要である。すなわち、高精細映像サーバーやディスプレイを相互に接続、またビデオ会議シス

テムを取り扱い、それらが光バスやストレージの情報を基に適切に管理制御される仕組みである。さらにシリコン光バス・スイッチや波長資源管理技術も導入し、デバイスからアプリケーションまで個別に開発される技術を集約し実現する垂直連携が欠かせない。」

議論4 結果の評価

コメント（立石 裕）

第6章ですが、シンセシオロジーとしては重要なポイントであるにもかかわらず、記述が不十分です。実験で発生した具体的な課題の意味とそれをどのように解決したのか、さらにはそれが今後の展開においてどのような意義を持つのか等々。現状では、「実験してみたらいろいろと想定していなかった問題が発生したが、すべてその場で解決でき問題はなかった。」という、読者にとっては何の情報もない、単なる結果報告になっています。

また、「消費電力 1.5 kW」の評価がありません。図6を見れば電気信号処理に比べて大幅に削減可能なことは理解できますが、「どこまで減らせば実用上問題ないのか」「それに対して今回の結果は十分なのか、それとも不十分なのか」等々の記述が必要でしょう。

回答（来見田 淳也）

5.2節の映像配信実験の最初に、実験で発生した具体的な問題とその解決のプロセスに関する文章を追加いたしました。このデモ実験において最も高速な光変調信号でかつ 105 km の伝送距離がある 43 Gb/s バスの通信が成立する過程を記しました。

また第2章のはじめに、通信トラフィックと電力について次のように詳しく触れました。「この傾向が仮に20年続くとするとトラフィックは現状の1,000倍程度になる。その場合にはもちろん電力効率もそれ相応の改善が望まれる。」これを軸にして、第6章で消費電力の評価を行うために次の文章を追加いたしました。

「コアルータを使ってデモ実験で使用した機器と同等数のスイッチポートとノードを組み上げると仮定すると、光増幅器を含めて 13.4 kW 程度となることが予測される。デモ実験におけるサーバ等を除いた電力は Tb/s への拡張性を残して 1.5 kW であった。」

「具体的にはシリコンフォトニクス光スイッチが実現されポート当たりの伝送レートが 100 Gb/s となれば現状と比べると 1,000 倍の電力効率が得られる見通しである。今後予測される高精細映像情報のような通信需要増に対しても、電力の伸びを抑えられる点で適度な低電力化が達成されたと考える。」