

フォトニックネットワーク技術の展望

佐藤 健一^{†a)}

Prospects of Future Photonic Networking Technologies

Ken-ichi SATO^{†a)}

あらまし インターネットのトラフィック量が増加するとともに、ハイパージャイアントコンテンツホルダの出現により、ネットワークのトラフィックの流れが大きく変わりつつある。一方、半導体の性能の進展速度が低下するとともに、消費電力のボトルネックが顕在化しつつある。将来の大容量トラフィックを扱うためには、スループット当りの消費電力が極めて小さい光ルーチング技術の重要性が増加する。しかしながら光の特性を最大限に生かしたネットワークの実現にはノード技術の革新が必要である。今後の光ネットワーク技術の開発方向を議論する。

キーワード フォトニックネットワーク、低消費電力、光クロスコネクタ、ROADM

1. ま え が き

ハイパージャイアントコンテンツホルダの出現やモバイルネットワークの進展により、また将来のSDN (Software Defined Network) の構築に向けてネットワーク技術は進化し続けている。本論文では、フォトニックネットワーク技術に焦点を当て、最近の進展と今後の重要な研究開発課題を展望する。2. ではインターネットのパラダイムの変革を概観し、データセンタ間を転送されるトラフィック量の増加などによるネットワークへの要求条件の変化を述べる。また、将来のネットワークに大きなインパクトを与える映像技術の進展とサービスに触れる。将来のネットワークを構築する上で、電気技術と光技術の動向と役割を理解することは重要である。3. では半導体技術のボトルネックを論じ、更に伝送機器とスーパーコンピュータの進歩の違いを分析する。4. では、今後重要性が拡大すると考えられる低位レイヤトランスポートによる経済化と低消費電力化、新しい技術として注目を集めているフレキシブルグリッドとエラスティック光パス技術を概観する。5. では、それまでの議論を踏まえ、将来のネットワークを構築する上で核となる光ノード技術に焦点

を当て、特に大規模光クロスコネクタ実現技術、フレキシブルノード実現技術を論じ、最先端の研究成果を紹介する。6. では、光技術のネットワーク的な利用として光ファーストサーキットスイッチング/フロースイッチングに触れる。7. は結論を述べる。

2. インターネットのパラダイムの進化

インターネットの構成はハイパージャイアントと呼ばれる大規模コンテンツホルダの進展 [1] により大きく変わりつつある。実際、グーグルのトラフィックはインターネットトラフィックの6%を超えたといわれている [2]。また、将来のサービスを考えた場合はビデオのインパクトが重要になる [3]。以下にこれらのポイントを述べる。

2.1 インターネットコアの進化

図1に最近の北米の大手ティア-1 キャリヤのバックボーントラフィックの内訳を示す [4]。プライベートラインレートサービス (波長貸し専用線等) のトラフィックがコアトラフィックのおよそ15%を占め、更に低速・高速の専用線サービスのトラフィックを加えると専用線のトラフィックは40%に達することが分かる。2008年の末には世界のプライベートネットワークのトラフィックの割合が20%に達したとの報告もある [1]。大規模データセンタ間のトラフィックの転送は主にポイント-ポイントでありファイバのリソースを有効に利用することが極めて重要になる [5]。一方、インターネット以外の企業専用線を含む様々なサービスを提供する大規模キャリ

[†] 名古屋大学電子情報システム専攻, 名古屋市

Faculty of Electrical and Engineering and Computer Science, Nagoya University, Furo-cho, Chikusa-ku, Nagoya-shi, 464-8603 Japan

a) E-mail: sato@nuee.nagoya-u.ac.jp

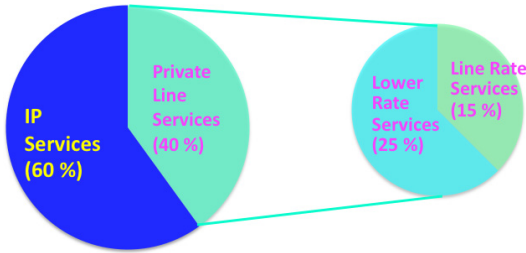


図 1 ISP バックボーンネットワークのトラフィックタイプの例
 Fig. 1 Example of traffic types in ISP backbone networks.

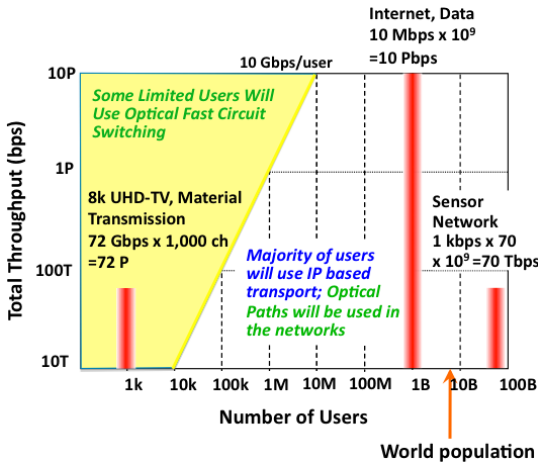


図 2 サービスとビットレート
 Fig. 2 Different bit-rate services and the bandwidth.

ヤでは途中のノードでの信号のアド/ドロップが効率的なネットワークを構築する上で必要な機能であり、光レベルでの ROADM による光信号のアド/ドロップ並びに電気クロスコネクタ機能 (LSP (Label Switched Path) スイッチ, VC-XC (Virtual Container Cross-Connect), ODU-XC (Optical channel Data Unit Cross-Connect)) によるグルーミングが重要となる。4. で述べる最近注目される技術の一つであるエラスティック光パス技術とフレキシブルで大規模光な XC/ROADM が低コストで実現できるようになると、光レベルでのグルーミングが可能となるが、それを実現するための技術的な課題は多い [6].

2.2 映像のインパクト

映像技術は着実に進展し、既に 4k (4096 × 2160 ピクセル) の解像度をもつテレビ受像機の発売も開始された。ビデオがトラフィック量へ与えるインパクトは極めて大きく、例えば 2025 年に実験放送 [7] が予定さ

れている超高精細テレビ (8k: 7680 × 4320 ピクセル) の素材伝送では例えば 1 チャンル当り 72 Gbit/s の容量を必要とする。一例として例えばセンサネットワークにおいて、全世界に存在するセンサ数を世界の人口の 10 倍 (700 億個) と仮定し、その各々が同時に 1 kbit/s のデータを発生したとするとそのトラフィック総量は約 70 Tbit/s となる。このトラフィック量は超高精細映像 1,000 チャンル分にしかすぎない (図 2 参照)。現行のテレビジョン信号中継網においては、チャンネル当り約 1.5 Gbit/s の高精細映像が配信されているが、その切換は年間 4 万回程度といわれており [8], 将来の 72 Gbit/s 級の信号の配信には、5. で述べる光のファーストサーキットスイッチング [9] あるいは光のフロースイッチングが重要になると考えられる。

3. 電気技術のボトルネック

スループットの拡大と消費電力の削減が将来の通信ネットワークにとって重要な課題である [10]~[12]. 現状のネットワークでは消費電力の大半はアクセス系で消費されているが、将来はバックボーンとアグリゲーション (トラフィック集約) におけるレイヤ 3/レイヤ 2 の転送機器 (IP ルータ/イーサネットスイッチ) による消費電力が大幅に増加することが予測されている [12]. ネットワークにおける消費電力の検討は各機関で行われており、メルボルン大学の J. Baliga らの試算によると、現状の技術を用いた場合にアクセス速度 10 Mbit/s で世界の人口の 1/3 がインターネットを利用するとその消費電力 (大半がルータ部分) は現在の世界の総発電量の約 6 割に達するとも見積もられている [13]. 図 3 にコアルータのスループットの増加の様子を示す。現行のコアルータのスループットは最大 2 Tbit/s (WAN カウント; シングルシャシー) 程度であり最近の伝送実験で達成されたファイバ当りの伝送容量 100 Tbit/s [14], [15] の 2% 程度にしかすぎない。ルータのスループットの進展で注目すべき点は、2005 年以前はその進展がほぼムーアの法則に近いもの (18 か月で 2 倍; 年率 60% 程度) であったが、それ以降、増加速度は大幅に低下し現在は 20% 程度である。一方、トラフィックは年率 30% 程度で増え続け [16], そのギャップが顕在化しつつある。C-MOS 技術の進展においては駆動電圧の低下が飽和傾向にあるとともにゲート長の細線化に伴う無効電力の増加により、シャシー当りの許容電力内 (15-20 kW) でのスループットの拡大が次第に困難になってきている。

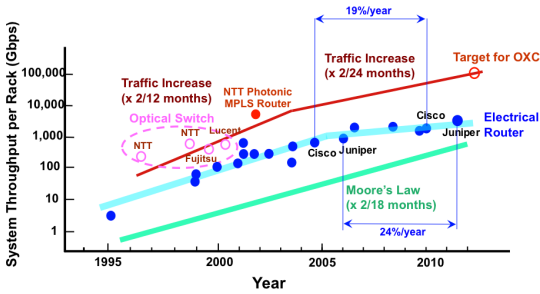


図3 コアラータのスループットの進展
Fig.3 Advances in core router throughput.

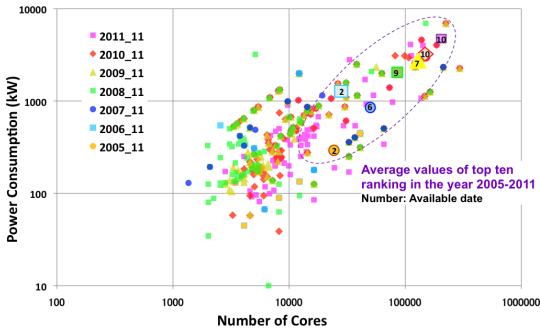


図4 トップ250 スーパーコンピュータ：コア数と消費電力
Fig.4 TOP 250 supercomputers: number of cores vs. power consumption.

一方、半導体技術に大きく依存するスーパーコンピュータにおいては、その計算能力 (Flops) の上昇は大きく、この20年以上にわたり継続して年率90%程度 [17] を維持していることは印象的である。しかし最近の Flops の進展はプロセッサコアの並列度の拡大に支えられており、現在 (2011年11月までのデータ。以下同じ) 最大のコア数は700,000を超えている。コア数の拡大に伴い、その消費電力は増加し続けている。図4にトップ250位までの中で、データが得られるものについてコア数と消費電力を2005年から2011年までにわたりプロットしたものを示す。図5に平均消費電力の推移を示す。消費電力はNo.1のスーパーコンピュータにおいては年率およそ60%、第10位、100位までの平均でそれぞれ約40%の増加を示している。もしNo.1スーパーコンピュータ (12.7MW [17]) において年率60%の増加を外挿すると2020年には消費電力が1,000MW (小形の原子炉1基の設備容量) に達する。すなわち、大きな技術革新がない限り、そう遠くない時期に消費電力ネックにより計算能力の進展が制限されることが予測される。

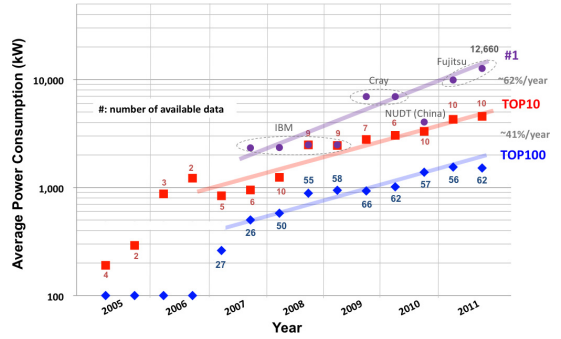


図5 トップ500 スーパーコンピュータの平均消費電力の推移
Fig.5 Top500 supercomputers: Average power consumption trends.

ルータのようにシェルフ当りの消費電力が制限されている状況においては前述のように、消費電力のボトルネックがより早い段階 (2005年ごろ) で顕在化している。以上述べたように、現状の半導体技術の延長では将来のネットワークにおいて予想される消費電力の課題を解決することは困難な状況にあり [12]、次章以下で論じるフォトニックネットワーク技術の開発が重要となる。

4. フォトニックネットワーク

4.1 低位レイヤトランスポートによる経済化と低消費電力化

前章に述べたルータの消費電力のボトルネックはルータで転送されるトラフィックを低位レイヤの転送でカットスルーすることにより避けられる。図6に各レイヤのトランスポートにおけるスイッチングの粒度 (グラニュラリティ) と転送における電力効率を示す [18]。任意の粒度での転送が可能なIPルータやラベルスイッチルータに比べ、レイヤ1のODU-XC (VC-XC) や光パスクロスコネクは粒度が粗いが、転送の際の消費電力は圧倒的に小さいことが分かる。自ノードを通過するトラフィックのうちどれだけ多くのトラフィックを低位レイヤのトランスポートで処理できるかで、低消費電力化の効果が決まる。一方粒度の粗さはファイバの使用効率を低下させる要因となる。ODU (Optical channel Data Unit) の標準化においては最近 ODUflex が定義され [19]、その粒度が1.25GHz単位となり、コアネットワークとして十分細かい粒度が実現されるようになった。また、光パスにおいても従来の固定容量の光パスを発展させた

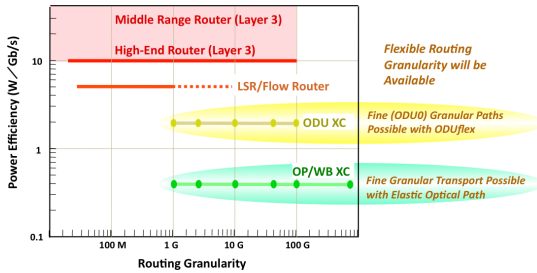


図6 各種ノード装置の転送粒度と転送電力効率
Fig. 6 Routing granularity and power efficiency of transport systems.

エラスティックな光パス [20], [21] が議論されており, 将来的には OTUflex (rate-flexible OTUs (Optical channel Transport Units) [22]) を用いたフレキシブルな光パスが実現される可能性がある.

消費電力の観点のみでなく, インタフェースコストの観点からも, 上記光レイヤ並びに電気の下位レイヤのパス (LSP, ODU など) をできるだけ利用してネットワークを構築していくことが重要な方向として認識されている [3], [12], [18]. その第一段階として ROADM に基づくネットワーク構築が近年大きく進展した. 一方, 現行の光パスの粒度ではファイバリソースの有効利用には限りがあり, そのギャップを埋めるグルーミングの手段として, 電気の下位レイヤのパス (LSP, ODU など) によるクロスコネク機能の導入が検討されている [23]. エラスティック光パスを用いた光レイヤでのグルーミングに関しては次節で言及する.

4.2 フレキシブルグリッド

1990 年代の中ごろに ITU-T で標準化されてから 15 年以上にわたって利用されてきた固定グリッドに加え, 2012 年にフレキシブルグリッドが新たに標準化された [24]. 本方式では 12.5 GHz を単位とする可変スロット幅の概念を追加し, 中心周波数を 6.25 GHz 間隔で設定可能となった. すなわち, 中心周波数は従来のアンカー周波数 193.1 THz に対して, $193.1 + n \times 0.0625$ THz で規定される. フレキシブルグリッドを利用することにより, 送信信号のビットレートと変調形式に適切して中心周波数とスロット幅を設定できるため, 例えば, 将来の 400 Gbit/s のスロット幅として必要と考えられている 75 GHz (DP-16QAM) あるいは 125 GHz (DP-QPSK) を効率良く配置することができる. また, 1 本のファイバに (異なるスロット幅を必要とする) 異なる速度の信号, すなわちミックスド

ラインレートの信号を効率良く収容できるようになる.

4.3 エラスティックオプティカルパス

上記方式を更に拡張し, 従来の OTN で規定されていた粗い粒度の光パスに加え, より細かい粒度のパス帯域幅, 例えば 12.5 GHz あるいはそれ以下の粒度をもつパスを実現することにより, ネットワーク上でサービスに合わせた最適の光パスのバンド幅が利用できるようになる. すなわち従来は電気レイヤで行っていたグルーミングを光レイヤで行うことにより, 電気レイヤに頼らずにファイバリソースの利用率の向上が図れる [6], [25]. 電気レイヤと光レイヤのグルーミングを図 7 に説明する (注: 図 7 の全てのレイヤが必要ではなく実際は選択的に利用される). 例えば, 光レイヤでのグルーミングを行うことにより, 現在導入されつつある ODU-XC などによる電気レイヤでのグルーミングを省略できる可能性もある. エラスティックオプティカルパスはこのように様々なレベルでの利用法が考えられる. これを整理したものを図 8 に示す. 図 8 は横軸にポイント-ポイントの伝送における適用か, ネットワークレベルの適用かを, 縦軸にはスタティックな利用かダイナミックな利用かで領域を分けてある. すなわち適用領域的に [I]~[IV] の四つの領域に分類してある [25]. 第 I の領域は最もシンプルで, ポイント-ポイント伝送における光ファイバ帯域の有効利用が比較的容易に達成される. 例えば 2. で述べたようなデータセンタ間の長距離伝送において, ファイバ資源が少ない場合に有効性が大きい. フレキシブルグリッド/エラスティック光パス技術が最も早く導入される領域と考えられる. 一方, 大規模キャリアにおいて各種のサービス提供を行い, 途中のノードでのアド/ドロップが必要な場合は, フレキシブルな帯域をクロスコネクできる OXC/ROADM が必要となるだけでなく, これまでの波長衝突を考慮した RWA (Routing and Wavelength Assignment) 問題に加えて異なる帯域幅の波長スロットを効率良く収容するための新たなネットワーク設計アルゴリズムを開発する必要がある. 更にそのダイナミックな運用を考えると (領域 III), 周波数配置が初期設計の最適値からずれ, すなわちフラグメンテーションが発生し, ファイバの利用効率が低下する要因となる. これに関してもフラグメンテーションの緩和技術の確立が必要となる [26], [27]. フレキシブルな OXC/ROADM は LCOS (Liquid Crystal on Silicon) ベースの WSS で実現できる. また, エラスティック光パスに適応した

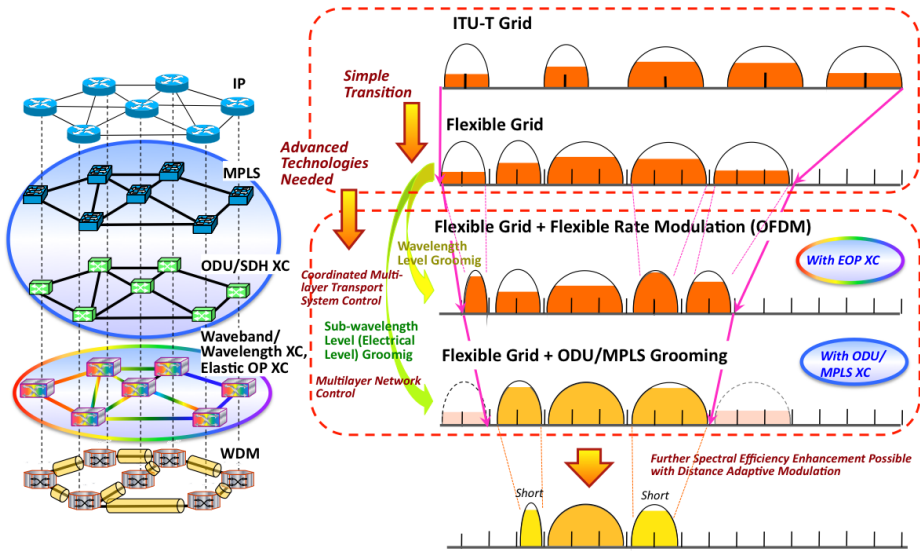


図 7 フレキシブルグリッドとエラスティック光パスにおける周波数利用効率
 Fig.7 Frequency usage improvement in flexible grid and elastic optical path.

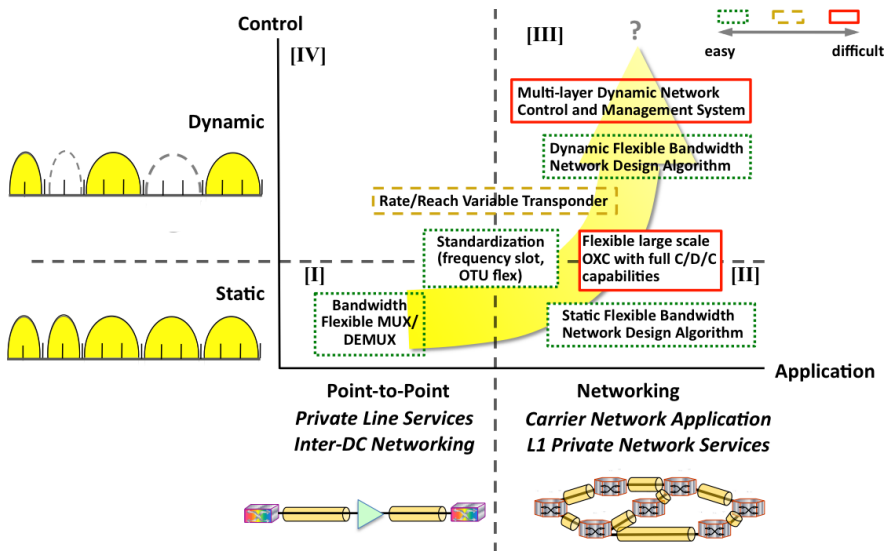


図 8 エラスティック光パスの適用領域とキー技術
 Fig. 8 Different application areas of elastic optical paths and the technologies.

ネットワーク設計アルゴリズムも一度確立してしまえば解決する課題である（すなわち、他と比べて容易な課題：図 8 の点線の箱の技術）。一方、光レイヤでのルーティングやダイナミックなサービスを行う場合（領域 III）には、電気レイヤを含んだマルチレイヤのネットワークコントロール、ダイナミックな運用に適した、かつ大規模な OXC/ROADM が必要になる。これらは困難性の高い課題といえる（図 8 の実線の箱の技

術）。また、信号速度や到達距離に応じて変調形式を変えることができる可変のトランスポンダ技術も重要である（図 8 の鎖線の箱の技術）[28], [29]。

図 9 にフレキシブルグリッドあるいはエラスティック光パスに関する設備/オペレーションコストと収益の関係を示す。本技術により得られる効果は光ファイバの周波数利用効率を改善することにより得られる効果であることに注意しなければならない。例えばメ

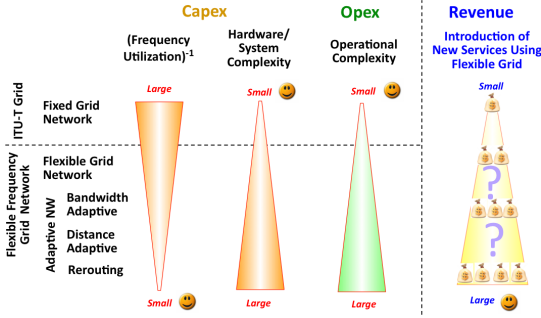


図9 フレキシブルグリッド・エラスティック光パスの設備/オペレーションコストと収益の関係

Fig. 9 Effect of flexible grid or elastic optical paths on Capex/Opex/Revenue.

トロ領域のようにファイバが比較的潤沢に敷設された領域では、ネットワークコストはノードコストとオペレーションコストが主要な部分を占める。すなわち、そのような領域でファイバコストを下げて伴うハードコスト並びにオペレーションコストの増加を相殺することは一般に困難である。ファイバの周波数利用効率が少し低くても、簡易なシステムが望まれる。更に一步進んで、それまで電気レベルで行っていたグルーミングを光レベルで行い、設置されていた電気クロスコネクタを削減することも可能であるが、上で述べた運用の困難性に基づくコスト増をファイバのコスト減が補えるかどうかポイントとなる。なお、将来的に（ダイナミックな）エラスティック光パスによる新しいサービスが導入されれば、それによる収益増が期待される。ただし、固定帯域の光パスサービスではなく、より細かい粒度のエラスティック光パスサービスの提供によって加算される収益分が、エラスティック光パス導入に関する判断に寄与する分である。

以上、エラスティック光パス技術に関連して光レイヤでのグルーミング並びにダイナミックなパス運用を述べたが、現状は固定グリッドの光パスでありその運用は静的にとどまっている。また、固定かフレキシブルかにかかわらず、光ノードに関しては将来に向けて解決すべき技術的課題が多数存在する。これに関しては次章で述べる。

5. OXC/ROADMの展開

5.1 OXC/ROADMの課題

現在導入されているROADMのポート数は8程度であり小規模である。また、光信号のアド/ドロップ

は静的に行われている。1.で述べたようにインターネットトラフィックの増加が年率30%で推移するとトラフィック量は9年で10倍、17年で100倍となる。光ファイバ当りの伝送容量も拡大しているが、いずれフレキシブルで大規模なOXC/ROADMが必要となる[30],[31]。図10にフレキシブルで大規模なクロスコネクタの課題と技術を説明する。更に、光パスのダイナミックな運用[32]を行うためには、光源の波長選択性と設定時間、光スイッチの切換時間、光ファイバアンプの高速応答性、シグナリング時間の高速化技術などの開発が必要となる。本章では、最も基本となるフレキシブルで大規模なOXC技術(図10参照)に関する将来展望を述べる。

5.2 大規模OXC技術

現在の多くのROADM/OXCは 1×9 程度のWSSをベースとしている。大規模なOXCを構築するにはポート数の大きなWSSが必要になるが、現在利用できる最大ポート数は20+程度である。将来的に更なる大規模化も検討されているが、その構造上低コストでこれを実現することは容易ではないと考えられる。もちろん小規模WSSをカスケードにすることにより大規模WSSを実現することは可能であるが、コストと損失が増加する。更に、現状のOXC構成の多くは、broadcast-&-selectアーキテクチャ、すなわちスターカプラ(入力ファイバ側)+WSS(出力ファイバ側)の構成を取っているが、ファイバ数が増大するとスターカプラのロスが問題となるため、route-&-selectアーキテクチャ、すなわち入出力側ともにWSSを利用する、WSS+WSS構成が必要となり、必要なWSS数が倍増する。これを解決するためにこれまでいくつかの手法が提案されている。そのポイントを以下に述べる。

5.2.1 階層化光クロスコネクタ構成[33]~[39]

デジタルの電気スイッチとは異なり、光スイッチの多くは光信号の帯域、ビットレートに無依存でスイッチ可能である。この特性を最大限に生かし、光パスをグループ単位で切り換えることにより、例えばOXCで必要となるマトリックススイッチのサイズを大幅に削減可能となる[38],[40]。一例として波長群/波長パスを用いた階層化OXCにおいて、波長パスのグルーミング率(波長群をほどいて波長パスレベルでクロスコネクタする割合)を0.2程度とすると、スイッチ規模(マトリックススイッチの叉点数)を70%程度削減できる[41]。また3D MEMS(Micro Electro Mechan-

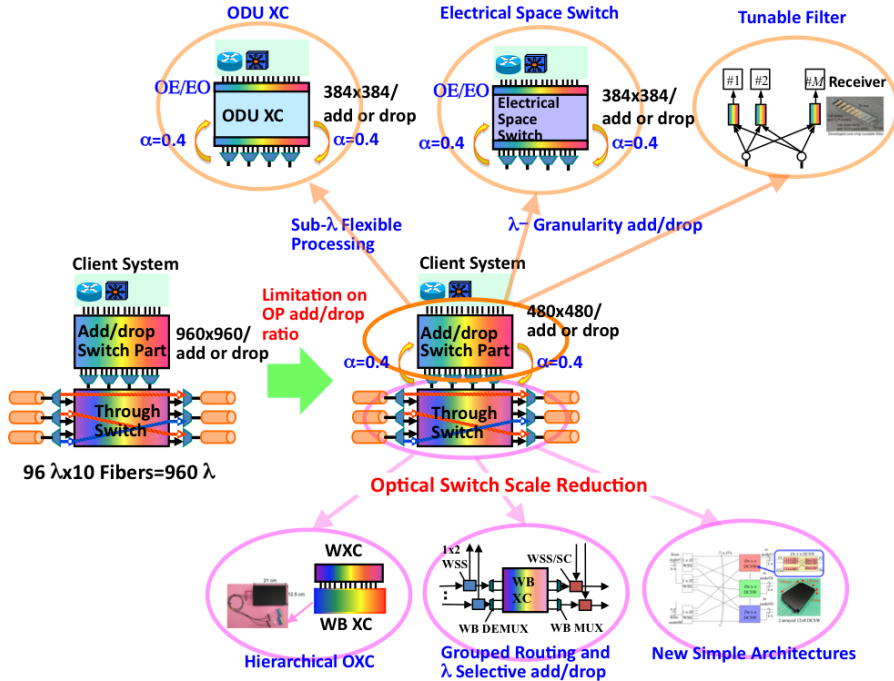


図 10 フレキシブルグリッド・エラスティック光パスの設備/オペレーションコストと収益の関係

Fig. 10 Effect of flexible grid or elastic optical paths on Capex/Opex/Revenue.

ical Systems) を用いた WSS/WBSS (Wavelength/WaveBand Selective Switch) においてはミラー数を 48%程度削減可能 [40] であることが確認されている。一方, WSS として LCOS 技術を用いた場合は状況が異なる。LCOS ベースの WSS においては, WBSS 機能としても通常の WSS と比較してハードウェアの簡素化はほとんど期待できない。しかし, 他の技術で実現した効率的な WBSS を適用することにより, 階層化光クロスコネクットのメリットを生かすことが可能となる。一例を図 11 に示す。この例では WSS/WBSS アーキテクチャにおいて, グルーミングを行う WSS 部は 1 階層の OXC に比べて例えば 20%で良い。WBSS 部分は PLC (Planar Lightwave Circuit) 技術を用い, 一つの WBSS 機能が 1 チップ (34 × 64 mm²) で実現されている [42]。そのため, 5 × 5 の WBXC (Waveband Cross-connect) が極めてコンパクト (135 × 220 × 100 mm³) に実現されている [43]。PLC による WBSS は可動部分がなく高信頼であり, WSS で必要となる光ビームの初期調整が不要でかつ上記のように小形化が可能である。本例に示すように, 適切な技術を選択することにより, 階層

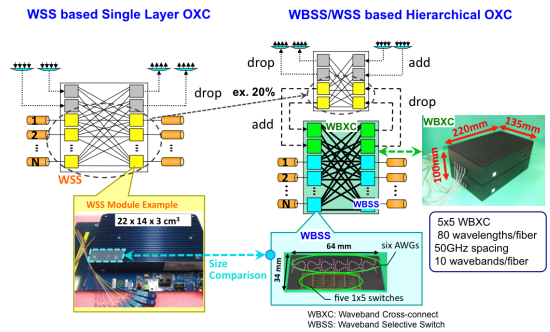


図 11 WSS/WBSS ベース光クロスコネクット
Fig. 11 WSS/WBSS based hierarchical OXC.

化光クロスコネクット構成は大規模なクロスコネクットの実現に有効な手段を与えることが分かる。波長群の導入によるノードの簡素化を論じる上で, グルーミング率が重要なパラメータである。これまでの検討により, 適切なネットワーク設計アルゴリズムを開発することにより [44], [45], グルーミング率の制約が例えば 0.25 以上であればグルーミング率に制約のないネットワークと比較してコスト増がほとんどないことが知られている。もちろん, トラフィック量が増えれば増える

ほどグルーミング率は小さくて済む。大規模 OXC が必要となる領域、すなわちトラフィックが十分大きい領域では粒度の大きなルーチング（波長群によるルーチング）に補助的に波長レベルのグルーミングを付加することにより、効率的なネットワークを構築することが可能となる [45].

5.2.2 グループドルーチングと波長選択アド/ドロップ

上記の大規模ネットワークにおけるルーチングノードの特性を利用し、ノードでのルーチングは粗い粒度（波長群）で行い（波長レベルのグルーミングは行わない）、波長のアド/ドロップは波長レベルで行う方式の検討がなされている [46]. この方式では、ノードで波長群の終端を行わないため、ITU-T で規定される“パス”の機能を波長群にもたせるのではなく（波長群パスとして扱わない）、単にルーチングを波長の束で行うために利用していることに注意する必要がある。本方式においては、ルーチングのエンティティとしての波長の束はグループドルーチングエンティティ (GRE) と呼ばれている [46]. GRE パイプは始終端点のないループを形成することも可能である。その一方、ノードにおけるアド/ドロップは波長ごとに行い、柔軟性を確保している。一例として 7×7 のレギュラー格子網において、1 ファイバ当りの波長数を 80、GRE パイプの太さを 10 波とした場合、ノード間の平均トラフィック量（一様分布を仮定）が 6 を超えると単一レイヤのネットワークと比較して 10% 以下のファイバ増により、ノードのポートカウント（マトリックススイッチのポート数/3D MEMS スwitch のポート数）を 88% 程度低減することが可能となる [46].

5.2.3 WSS と $1 \times n$ スwitch の組合せ

実際のネットワークポロジリーにおいてノードディグリーは一般に小さな値に限られている（例えば最大 6 程度 [47]）、また、その値はほとんど固定である。ここでノードディグリーとは隣接するノード数を意味する。一方、隣接するノード間には複数の並行ファイバがあり、この本数はトラフィックにより増大する。このような状況では一つのファイバからノードに入力され、隣接ノードに行く複数の波長を、隣接ノード間に設定された複数のファイバ間で分散的に収容することは必ずしも必要ではない。言い換えれば、ノードにおける 1 本の入力ファイバからの光波長に関して、隣接ノードへのファイバの選択に関して若干の制約を導入し、すなわち 1 入力ファイバからの隣接ノードへのトラフィックは並行

ファイバのうちの限られた 1 本あるいは少数のファイバに接続する機能に絞ることにより、ノードの構成は単純化される。この考えに基づき、新しい構成の OXC アーキテクチャが提案されている [48]. このアーキテクチャでは 2 ステージのルーチングを利用する。すなわち、(i) 初段の WSS において、波長パスレベルで適切なグルーピングを行う、(ii) 次段の $1 \times n$ スwitch においてグループごとに隣接並行ファイバを選択する構成である。この構成により、WSS のポート数を最大 $1/n$ (n : 隣接ノード間の並行ファイバ数) に削減できることが示されている [48]. 一例としてノード数 26 のパンユーロピアンネットワークモデル COST266 [49] において、ノード間平均トラフィック量が 20 において必要なファイバ数（ファイバ当り 80 波）は 6% 程度増加するが、必要な WSS 数 (1×20 WSS を仮定) の削減率は 63% と大幅に削減できることが示されている [48]. また、ノードディグリー 6、並行ファイバ数 8（光クロスコネクタとして 48×48) のノードに関してプロトタイプが試作され、良好な伝送特性が確認されている [48].

5.2.4 小規模 OXC サブシステムの利用

大規模 OXC は小規模の OXC サブシステムを組み合わせて構成することが可能である。ただし、サブシステム間を接続するファイバにおいてノード内コンテンションが発生する。ノード内コンテンションを考慮したネットワーク設計アルゴリズムを適用することにより、ノード内コンテンションによるブロッキングを最少化することが可能となる。上記の COST266 ネットワークモデルを用いた、ダイナミックな光パス設定環境において、ブロッキング率 0.001 における収容トラフィック量が従来の構成に比べて 2% 程度低下するものの、ネットワーク内で必要となる 1×9 WSS の個数の削減が約 65% と極めて大きな効果が得られることが確認されている [50], [51].

5.3 C/D/C (Colorless/Directionless/Contentionless) 技術

ノードでの光信号のアド/ドロップはフレキシブルに行えることが望ましい。すなわち、任意の入力ファイバからの任意の波長が、落ちのスイッチで競合することなく自由にドロップできることが望ましい（アドに関しても同じ）。この性能を C/D/C (Colorless/Directionless/Contentionless) と呼ぶ。これは特にダイナミックな光パスを運用する場合に必須の機能である。これを実現するためには大規模なマトリックススイッチ [52], [53] やチューナブルフィルタが必要

であり、これまでの ROADM では実現されていなかった。この C/D/C 用のスイッチ規模を削減する研究が精力的に行われている。以下にその概要を紹介する。

5.3.1 C/D/C 機能に関する制約

Contentionless 機能を緩和し C/D 機能 (C/N ととも記される。N: non-directional) でチューナブルフィルタ機能 (コヒーレント検波, WSS の利用など) と組み合わせたもの [54], あるいはクライアントサイドに大規模なファイバクロスコネクタ (C-FXC: Client side Fiber Cross-connect) を導入した構成 [55], [56] などが検討されている。また、大規模な C-FXC ではなく、それを分割することにより、モジュラ的に導入できるアーキテクチャも検討されている [57]。更に、ダイナミックな光パス設定において、ノード内ブロッキングを考慮したルーチングアルゴリズムを適用することにより、ある条件下で、C/D と分割型 C-FXC を組み合わせた構成でブロッキング率が C/D/C と比べてほとんど低下しないことが示されている [57]。しかし、ノード内ブロッキングを考慮するには、全てのノードの詳細な設備状況 (ノードのファイバ数, チャネルバンクの分割数, 各チャネルバンクの実装数, C-FXC の分割数等) 並びに各ノードの状況変化のたびにデータベースの更新が必要となり、ネットワーク運用に際して大きな負荷となる可能性がある。

5.3.2 add/drop 率に関する制約

C/D/C の実現に必要な光スイッチ規模を削減するためには、add/drop 率に制約を設けることが有効である [58]~[60]。ここで add/drop 率とはノードで終端する光パス数と全入力ファイバから入力される光パス数との比で定義される。もちろん、この add/drop 率をあまり低く設定すると、ネットワークの端に位置する通過トラヒックが少ないノードでは、スルースイッチ等に無駄が生じるため、適切な値を選択する必要がある。add/drop 率に関する制約はネットワークで一律の値を与える方式が最もシンプルである。これにより、add/drop 部が簡略化される。またネットワークの設計/動的な光パスの設定にあたっては、個々のノードの諸条件を一切考慮することなく上記の制約値のみを考慮した RWA を用いればよく、運用もシンプルである。また、他のメリットとして、ノードの最適化 (アンプのゲイン, 用いるスターカプラのポート数あるいは損失の最適化) が図れる点でも有効性が高い。なお、add/drop 率に制約を与える方法としては、グループによる制約 (ルーチングのための波長群とは

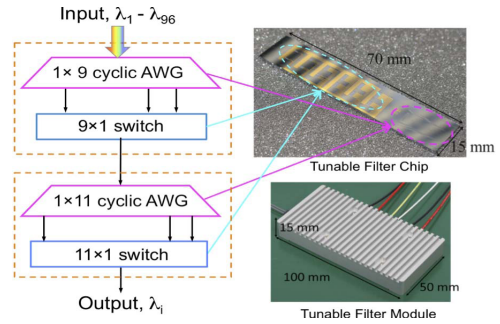


図 12 2 段階選択型チューナブルフィルタ
Fig. 12 2-stage wavelength tunable filter for selection from 96 wavelengths.

直接リンクしない [60]) を与える方式や、各波長レベルで制約を与える方式があり [58], [59], その各々に関して、全ての波長パスに関する制約, ファイバごとの制約, 波長インデックスごとの制約など, 各種の制約の与え方とその効果が評価されている。

5.3.3 チューナブルフィルタ

C/D/C を実現する方式として各種の方式を述べたが、効率的なチューナブルフィルタが実現できればこの課題は解決する。将来的にコヒーレント受信 [61] が全てで利用されれば、チューナブルフィルタ機能が自動的に実現されるが、全ての領域でコヒーレント伝送が適用されることは想定できない。固定グリッドで簡単にチューナブルフィルタを実現する方法は、例えば $1 \times L$ (L : ファイバ内の波長数) の AWG と $L \times 1$ の光スイッチを組み合わせれば可能である。しかし、 L は例えば 96 と大きな値であり、スイッチ規模が大きくなる。最近、複数段の波長選択を利用することにより、スイッチ規模を大きく削減する方法が提案された [62], [63]。例えば N 段の選択を用いることにより達成されるスイッチ数の下限は $N \times (L - 1)^{1/N}$ となる。2 段の選択によるチューナブルフィルタの試作例を図 12 に示す [62]。この例では、 1×9 と 1×11 のサイクリック AWG 並びに 1×9 , 1×11 のスイッチを組み合わせたものであり、PLC チップ ($15 \times 70 \text{ mm}^2$) 上にコンパクトに集積化されている。1 段構成と比較してスイッチ規模は約 80% 削減されている。

6. 光ファーストサーキットスイッチング/ 光フロースイッチング

1. で述べた超高精細映像技術の進展, 2. で述べた電気技術のボトルネックを踏まえ, 将来的な超広帯域

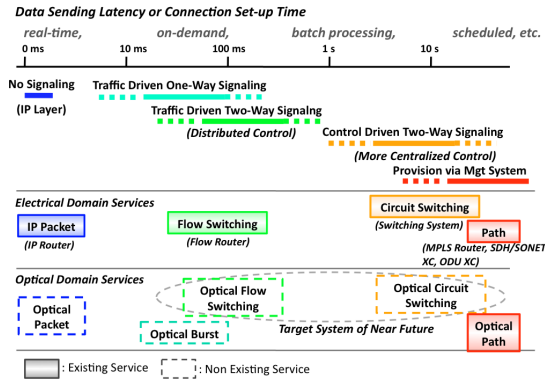


図 13 コネクション設定時間と電気/光領域のサービス
Fig. 13 Connection set-up time, and electrical and optical domain services.

映像伝送やダイナミックな超高速サービスの実現に向け、光ファーストサーキットスイッチング/光フロースイッチングの開発が重要である [9], [38]。これまで電気並びに光技術の領域で利用されている転送方式を図 13 に示す。図 13 はデータの送信の遅延時間あるいはコネクション設定時間と必要なシグナリングの関係、電気領域と光領域で現在用いられている転送方式をまとめたものである。実線の箱が現在用いられている方式であり、鎖線は今後の可能性を示す。光の領域で現在用いられているものは、マネージメントベースのコントロールによる静的な光パスの運用であるが、光ファーストサーキットスイッチング/光フロースイッチングの開発が将来技術として重要である。ここで、光ファーストサーキットスイッチング/光フロースイッチングはサーキット/フローの設定トリガがコントロールドリブンか、トラヒックドリブンかで分類してある [9]。

7. む す び

ネットワークを構築する際には、伝送コスト、ノードコスト、オペレーションコストの和の最適化（もちろんサービス品質なども重要な要素であるが）を達成できる方式を、その時々技術レベルを考慮して採用してきた。光伝送技術は伝送コストを大幅に低下させ、また、光の OXC/ROADM はノードコストの削減を達成してきた。しかしながら将来にわたり継続するトラヒック増に効率的に対応するためには絶え間ない技術革新が必要である。本論文では将来のフォトニックネットワークの構築に向け、いくつかの重要なポイントを述べた。現在顕在化しつつある半導体技術

のボトルネックを解消する技術としての光ルーチング技術のインパクトは大きく、継続的に発展可能なネットワークを構築する上で必須であるが、その前提となるノードの大規模化、フレキシビリティの向上に関しては今後多くの革新が必要である。一方、大容量トラヒックを想定した場合の光ノード機能は、その条件を生かしたルーチング機能の簡略化が有効であり、ハードウェアの困難性を一部ソフトウェア（ネットワーク設計手法など）で補うことにより、効率的に目的を達成できる可能性 [64] を示した。また、最近注目されている技術にフレキシブルグリッド/エラスティック光パス技術があるが、その有効性はポイント-ポイント伝送への適用か、ネットワーキング技術としての適用か、あるいはファイバコストが大きな割合を占めるコアネットワークへの適用かノードコストが重要なメトロへの適用かで、その有効性並びに技術の困難性は大きく異なる。技術の発展とともに、コストメリットが得られた領域から選択的に適用されていくと考えている。現在 IP ネットワーク上の様々な問題点に対して、“throwing bandwidth at the problem” で解決を図る場合がほとんどであるが、ファイバの伝送容量が枯渇する状態では周波数の利用効率の最大化の意義が大きくなる。最後に、新しいトランスポートモードとしての光ファーストサーキットスイッチング/光フロースイッチングの重要性を述べた。

謝辞 日ごろ議論頂く名古屋大学、長谷川浩准教授並びに研究室の諸君に感謝します。本研究の一部は、NICT (λ -Reach Project) 並びに科研費 (23246072) の支援を受けた。

文 献

- [1] C.F. Lam, L. Hong, B. Koley, Z. Xiaoxue, V. Kamalov, and V. Gill, “Fiber optic communication technologies: What’s needed for datacenter network operations,” *IEEE Commun. Mag.*, vol.48, no.1, pp.32–39, July 2010.
- [2] C. Labovitz, “Google sets new Internet traffic record,” <http://ddos.arbornetworks.com/2010/10/google-breaks-traffic-record/>
- [3] K. Sato, “Optical technologies that enable Green networks,” 12th International Conference on Transparent Optical Networks, ICTON 2010, Mo.A.2, Munich, June–July 2010.
- [4] A. Gerber and R. Doverspike, “Traffic types and growth in backbone networks,” *OFC/NFOEC 2011, OTuR1*, Los Angeles, March 2011.
- [5] C. Lam and H. Liu, “Data center networking,” Short Course, *OFC/NFOEC 2011*, Los Angeles, March 2011.

- [6] K. Sato, "The path to fully flexible optical network," Proc. SPIE, vol.8309, pp.83091Q-83091Q-6, 2011.
- [7] K. Kubota, "Beyond HDTV-ultra high-definition television system," 2nd Multimedia Conference 2006, London, Nov. 2006.
- [8] I. Fukuda and Y. Kamite, "Application of MPLS/P2MP-TE to video distribution service," Presented at MPLS Japan 2008 (in Japanese).
- [9] T. Ogawa, H. Hasegawa, and K. Sato, "Optical fast circuit switching networks employing dynamic waveband tunnel," IEICE Trans. Commun., vol.E95-B, no.10, pp.3139-3148, Oct. 2012.
- [10] R. Tucker, "Optical packet-switched WDM networks: A cost and energy perspective," OFC/NFOEC 2008, OMG1.
- [11] ITU Symposia on ICTs and climate change, Kyoto, Japan, April 2008.
- [12] 佐藤健一, "持続的発展可能な情報通信ネットワークと光ネットワーク技術の役割," 信学誌, vol.93, no.8, pp.654-658, Aug. 2010.
- [13] J. Baliga, K. Hinton, and R.S. Tucker, "Energy consumption of the Internet," COIN-AOTF 2007, WeA1-1, Melbourne, Australia, June 2007.
- [14] D. Qian, M. Huang, E. Ip, Y. Huang, Y. Shao, J. Hu, and T. Wang, "107.1-Tb/s (370x294-Gb/s) PDM-128QAM-OFDM transmission over 3x55-km SSMF using pilot-based phase noise mitigation," OFC/NFOEC 2011, PDPB5, Los Angeles, March 2011.
- [15] A. Sano, T. Kobayashi, S. Yamanaka, A. Matsuura, H. Kawakami, Y. Miyamoto, K. Ishihara, and H. Masuda, "102.3-Tb/s (224 x 548-Gb/s) C- and extended L-band all-Raman transmission over 240 km using PDM-64QAM single carrier FDM with digital pilot tone," OFC/NFOEC 2012, PDP5C, Los Angeles, March 2012.
- [16] CISCO White Paper, "Cisco Visual Networking Index: Forecast and Methodology, 2011-2016," May 2012.
- [17] Top 500 Supercomputer Sites, <http://www.top500.org/>
- [18] K. Sato, "Next generation transport network architecture," OFC/NFOEC 2010, invited, OWR1, San Diego, March 2010.
- [19] ITU-T Recommendation G.709/Y.1331 (12/2009), Interfaces for the Optical Transport Network (OTN).
- [20] M. Jinno, H. Takara, B. Kozicki, Y. Tsukishima, Y. Sone, and S. Matsuoka, "Spectrum-efficient and scalable elastic optical path network: Architecture, benefits, and enabling technologies," IEEE Commun. Mag., vol.47, no.11, pp.66-73, Nov. 2009.
- [21] M. Jinno, B. Kozicki, H. Takara, A. Watanabe, Y. Sone, T. Tanaka, and A. Hirano, "Distance-adaptive spectrum resource allocation in spectrum-sliced elastic optical path network," IEEE Commun. Mag., vol.48, no.8, pp.138-145, Aug. 2010.
- [22] M. Jinno, T. Ohara, Y. Sone, A. Hirano, O. Ishida, and M. Tomizawa, "Elastic and adaptive optical networks: Possible adoption scenarios and future standardization aspects," IEEE Commun. Mag., vol.49, no.10, pp.164-172, Oct. 2011.
- [23] V. Hutcheon, "OTN to enable flexible networks," OFC/NFOEC 2011, NMC1, Los Angeles, March 2011.
- [24] ITU-T Recommendation G.694.1 (02/2102), Spectral grids for WDM applications: DWDM frequency grid.
- [25] K. Sato, "Recent developments in and challenges of elastic optical path networking," ECOC 2011, Mo.2.K.1, Geneva, Sept. 2011.
- [26] T. Takagi, H. Hasegawa, K. Sato, Y. Sone, A. Hirano, and M. Jinno, "Disruption minimized spectrum defragmentation in elastic optical path networks that adopt distance adaptive modulation," ECOC 2011, Mo.2.K.3, Geneva, Sept. 2011.
- [27] A. Kadohata, A. Hirano, Y. Sone, and O. Ishida, "Wavelength path reconfiguration to reduce fragmentation and number of operations in WDM mesh networks," ECOC 2011, Mo.2.K.6, Geneva, Sept. 2011.
- [28] H. Takara, B. Kozicki, Y. Sone, T. Tanaka, A. Watanabe, A. Hirano, K. Yonenaga, and M. Jinno, "Distance-adaptive super-wavelength routing in elastic optical path network (SLICE) with optical OFDM," Proc. ECOC, We.8.D.2, Sept. 2010.
- [29] M. Jinno, K. Yonenaga, H. Takara, K. Shibahara, S. Yamanaka, T. Ono, T. Kawai, M. Tomizawa, and Y. Miyamoto, "Demonstration of translucent elastic optical network based on virtualized elastic regenerator," OFC/NFOEC 2012, PDP5B, Los Angeles, March 2012.
- [30] P. Pagnan and M. Schiano, "A lambda switched photonic network for the new transport backbone of Telecom Italia," Int. Conf. on Photonics in Switching 2009, ThII2-1, Pisa, Italy, Sept. 2009.
- [31] S. Woodward, "Balancing costs & benefits in a flexible grid network," Presented at OFC/NFOEC 2012 WS: What is the value of the flexible grid network?, Los Angeles, March 2012.
- [32] A.L. Chiu, G. Choudhury, G. Clapp, R. Doverspike, M. Feuer, J.W. Gannett, J. Jackel, G.T. Kim, J.G. Klinecicz, T.J. Kwon, G. Li, P. Magill, J.M. Simmons, R.A. Skoog, J. Strand, A.V. Lehmen, B.J. Wilson, S.L. Woodward, and D. Xu, "Architectures and protocols for capacity efficient, highly dynamic and highly resilient core networks," J. Opt. Commun. Network, vol.4, no.1, pp.1-14, Jan. 2012.
- [33] K. Harada, K. Shimizu, T. Kudou, and T. Ozeki, "Hierarchical optical path cross-connect systems for large scale WDM networks," OFC/NFOEC 1999, pp.356-358, Feb. 1999.
- [34] X. Cao, V. Anand, Y. Xiong, and C. Qiao, "A study of waveband switching with multilayer multigranular optical cross-connects," IEEE J. Sel. Areas Com-

- mun., vol.21, no.7, pp.1081–1094, Sept. 2003.
- [35] P.-H. Ho, H.T. Mouftah, and J. Wu, “A scalable design of multigranularity optical cross-connects for the next-generation optical internet,” *IEEE J. Sel. Areas Commun.*, vol.21, no.7, pp.1133–1142, Sept. 2003.
- [36] K. Sato and H. Hasegawa, “Prospects and challenges of multi-layer optical networks,” *IEICE Trans. Commun.*, vol.E90-B, no.8, pp.1890–1902, Aug. 2007.
- [37] I. Yagyu, H. Hasegawa, and K. Sato, “An efficient hierarchical optical path network design algorithm based on a traffic demand expression in a cartesian product space,” *IEEE J. Sel. Areas Commun.*, vol.26, no.6, pp.22–31, Aug. 2008.
- [38] K. Sato and H. Hasegawa, “Optical networking technologies that will create future bandwidth abundant networks,” *J. Optical Communications and Networking*, vol.1, no.2, pp.A81–A93, July 2009.
- [39] Y. Yamada, H. Hasegawa, and K. Sato, “Hierarchical optical path network design algorithm considering waveband protection,” *J. Lightwave Technol.*, vol.27, no.24, pp.5736–5748, Dec. 2009.
- [40] S. Kakehashi, H. Hasegawa, K. Sato, O. Moriwaki, and S. Kamei, “Optical cross-connect switch architectures for hierarchical optical path networks,” *IEICE Trans. Commun.*, vol.E91-B, no.10, pp.3174–3184, Oct. 2008.
- [41] S. Mitsui, H. Hasegawa, and K. Sato, “Hierarchical optical path cross-connect node architecture using WSS/WBSS,” *Photonics Switching 2008*, S-04-1, Hokkaido, Japan, Aug. 2008.
- [42] K. Ishii, H. Hasegawa, K. Sato, S. Kamei, H. Takahashi, and M. Okuno, “Monolithically integrated waveband selective switch using cyclic AWGs,” *ECOC 2008*, Mo.4.C.5, Brussels, Sept. 2008.
- [43] T. Ban, K. Ishii, H. Hasegawa, K. Sato, H. Takahashi, and M. Okuno, “Development of large capacity ultra-compact waveband cross-connect,” *16th Opto-Electronics and Communications Conference, OECC 2011*, 6A1-2, Kaohsiung, Taiwan, July 2011.
- [44] L.H. Chau, H. Hasegawa, and K. Sato, “Hierarchical optical path network design algorithm considering waveband add/drop ratio constraint,” *IEEE/OSA Journal of Optical Communications and Networking*, *JOCN*, vol.2, no.10, pp.872–882, Oct. 2010.
- [45] Y. Yamada, H. Hasegawa, and K. Sato, “Coarse granular routing in optical path networks and impact of supplemental intermediate grooming,” *ECOC 2010*, Th.10.F.1, Torino, Sept. 2010.
- [46] Y. Taniguti, Y. Yamada, H. Hasegawa, and K. Sato, “A novel optical networking scheme utilizing coarse granular optical routing and fine granular add/drop,” *OFC/NFOEC 2012*, JW2A.2, Los Angeles, March 2012.
- [47] T. Zami, B. Lavigne, M. Lefrançois, and A. Morea, “Transparent Nodes. Yes, but to what extent?” *ECOC 2009*, 5.3.3, Vienna, Austria, Sept. 2009.
- [48] T. Ban, H. Hasegawa, and K. Sato, “A novel large-scale OXC architecture that employs wavelength path switching and fiber selection,” *ECOC 2012*, We.3.D.1, Amsterdam, Sept. 2012.
- [49] R. Inkret, A. Kuchar, and B. Mikac, “Advanced infrastructure for photonic networks — Extended final report of COST 266 action,” 2003.
- [50] Y. Iwai, H. Hasegawa, and K. Sato, “Large-scale photonic node architecture that utilizes interconnected small scale optical cross-connect subsystems,” *ECOC 2012*, We.3.D.3, Amsterdam, Sept. 2012.
- [51] Y. Iwai, H. Hasegawa, and K. Sato, “OXC hardware scale reduction attained by using interconnected subsystem architecture,” *OFC/NFOEC 2013*, NW1J.2, Anaheim, 2013.
- [52] R. Jensen, A. Lord, and N. Parsons, “Colourless, directionless, contentionless ROADM architecture using low-loss optical matrix switches,” *ECOC 2010*, Mo.2.D.2, Torino, Sept. 2010.
- [53] R.A. Jensen, “Optical switch architecture for emerging colorless/directionless/contentionless ROADM networks,” *OFC/NFOEC 2011*, OThR3, March 2011.
- [54] S.L. Woodward, M.D. Feuer, J.L. Jackel, and A. Agarwal, “Massively-scaleable highly-dynamic optical node design,” *OFC/NFOEC 2010*, JThA18, San Diego, March 2010.
- [55] S.L. Woodward, M.D. Feuer, P. Palacharla, X. Wang, I. Kim, and D. Bihon, “Intra-node contention in a dynamic, colorless, non-directional ROADM,” *OFC/NFOEC 2010*, PDPC8, San Diego, March 2010.
- [56] P. Palacharla, X. Wang, I. Kim, D. Bihon, M.D. Feuer, and S.L. Woodward, “Blocking performance in dynamic optical network based on colorless, non-directional ROADMs,” *OFC/NFOEC 2011*, JWAS, March 2011.
- [57] I. Kim, P. Palacharla, X. Wang, D. Bihon, M.D. Feuer, and S.L. Woodward, “Performance of colorless, non-directional ROADMs with modular client-side fiber cross-connects,” *OFC/NFOEC 2012*, NM3F.7, Los Angeles, March 2012.
- [58] F. Naruse, Y. Yamada, H. Hasegawa, and K. Sato, “Optical network design algorithms that consider optical path add/drop ratio restrictions for OXC hardware scale reduction,” *OFC/NFOEC 2011*, NThC3, March 2011.
- [59] F. Naruse, Y. Yamada, H. Hasegawa, and K. Sato, “Evaluations of different optical path add/drop ratio restriction schemes on OXC hardware scale and network resource requirement,” *OFC/NFOEC 2012*, OTh1A.5, Los Angeles, March 2012.
- [60] Y. Yamada, R. Hirako, H. Hasegawa, and K. Sato, “Colorless/Directionless/Contentionless optical add/drop architecture applying waveband

- technologies and colorless MUX/DEMUX,” OFC/NFOEC 2012, JTh2A.44, Los Angeles, March 2012.
- [61] L.E. Nelson, S. Woodward, P. Magill, S. Foo, M. Moyer, and M. O’Sullivan, “Real-time detection of a 40 gbps intradyne channel in the presence of multiple received WDM channels,” OFC/NFOEC 2010, OMJ1, San Diego, March 2010.
- [62] T. Niwa, R. Hirako, H. Hasegawa, K. Sato, M. Okuno, and T. Watanabe, “Compact wavelength tunable filter fabricated on a plc chip that realizes colorless/directionless/contentionless drop function in optical cross-connect,” OFC/NFOEC 2012, OTh3D.6, Los Angeles, March 2012.
- [63] T. Niwa, H. Hasegawa, and K. Sato, “Novel wavelength tunable filter applying multi-stage selection for colorless, directionless, and contentionless ROADMs,” IEICE Electronics Express, vol.9, no.16, pp.1297–1303, Aug. 2012.
- [64] K. Sato, “Optical transport network architecture; the future transport node technologies,” Photonics in Switching 2012 (PS 2012), Th-S33-I04, Corsica, Sept. 2012.

(平成 24 年 6 月 25 日受付, 10 月 8 日再受付)



佐藤 健一 (正員：フェロー)

1976 東大・工・電子卒, 1978 同大大学院修士課程了. 同年 NTT 横須賀電気通信研究所入社. 以降, 光ファイバ伝送システム, ATM 伝達方式, フォトニックネットワーク等の研究開発に従事. 2004 年 4 月より名古屋大学大学院教授. この間 ATM パーチャルバスの提案, オプティカルバスの提案, OADM/OXC/フォトニック MPLS ルータの研究開発を推進. 本会論文賞, 同業績賞, 同功績賞, 同通信ソサイエティ論文賞 (2 回), 文部科学大臣賞等を受賞. IEEE フェロー, NTT R&D フェロー, 工博.