

3-4 究極の光資源の有効利用に向けて

Toward Future Agile and Bandwidth Abundant Photonic Networks
Based on Dynamic Control and Fine-granular Resource Assignment

長谷川 浩 釣谷剛宏 廣田悠介 古川英昭

Abstract

光資源の究極的な有効利用に向け、サービス条件やトラフィック需要等の変化に応じて使用する光資源を柔軟に制御する研究が進んでいる。光インタコネクトからデータセンターやコアネットワークに至る光レイヤの究極のフレキシビリティの在り方、エラスティックネットワークング、光交換、光信号処理等の技術の今後の進化の方向性、主な技術課題を議論する。

キーワード：フォトニックネットワーク、エラスティック光パス、光資源割当、トランスポート SDN (Software Defined Networking)、光スイッチング

1. はじめに

今から 20~30 年前、つまり本会の 75 周年記念論文が執筆された頃には、世間一般にとり身近なネットワークとは、ほぼ電話網に限られていたと言ってよいであろう。しかし、それから 25 年を経た現在、インターネットを通じ、動画像を用いたコミュニケーションが可能となり、商品の発注や銀行取引までもが自宅に居ながらに行えるようになった。言うまでもなく通信ネットワークの発展による恩恵である。通信ネットワークが社

会の基盤インフラとして広く利用されるようになった結果、その上を流れるトラフィックの量は指数的に増加し、この 15 年間で約 100 倍となった⁽¹⁾。しかし一般ユーザーが通話時間に応じて料金を支払っていた電話とは異なり、インターネットへの常時接続が当たり前のものとなった現在、その通信を実現するための各種コストや消費エネルギーが強く意識されることはまれであろう。

消費エネルギーの観点からすると、日本国内で総計 5 Tbit/s を超える (2016 年 11 月現在の推定総ダウンロード量⁽²⁾) 通信トラフィックを処理するため、最大手の通信キャリアによる消費電力だけでも国内主要電力会社 10 社の総発電量の 1% 程度 (2012 年度⁽³⁾) に達しており、既に無視できない量となっている。この傾向は他の先進国でも同様である⁽⁴⁾。今後も継続すると見込まれるトラフィック量の増加、及び使用可能なエネルギーが大幅に増える見込みが薄いこと⁽⁵⁾に鑑みれば、今後も通信セクタにおける消費電力の大幅な削減を実現しながら、ネットワークの飛躍的な大容量化により情報化社会の基幹インフラストラクチャとしての役割を全うするという相反する要求に役立てていかなくてはならない。

究極的には光ファイバ中の波長多重信号を波長ごとに直接経路制御し、電気信号への変換と経路の探索を省略することで消費電力の大幅な削減が可能である。このようなネットワークは「フォトニックネットワーク」と総

長谷川 浩 正員：シニア会員 名古屋大学大学院工学研究科情報通信工学専攻
E-mail hasegawa@nuee.nagoya-u.ac.jp
釣谷剛宏 正員：シニア会員 (株)KDDI 総合研究所光トランスポートネットワークグループ
E-mail tsuri@kddi-research.jp
廣田悠介 正員 大阪大学大学院情報科学研究科情報ネットワーク学専攻
E-mail hiroya.yusuke@ist.osaka-u.ac.jp
古川英昭 正員 国立研究開発法人情報通信研究機構ネットワークシステム研究所
E-mail furukawa@nict.go.jp
Hiroshi HASEGAWA, Senior Member (Graduate School of Engineering, Nagoya University, Nagoya-shi, 464-8603 Japan), Takehiro TSURITANI, Senior Member (Photonic Transport Network Laboratory, KDDI Research, Inc., Fujimino-shi, 356-8502 Japan), Yusuke HIROTA, Member (Graduate School of Information Science and Technology, Osaka University, Suita-shi, 565-0871 Japan), and Hideaki FURUKAWA, Member (Network System Research Institute, National Institute of Information and Communications Technology, Koganei-shi, 184-8795 Japan).
電子情報通信学会誌 Vol.100 No.8 pp.795-800 2017 年 8 月
©電子情報通信学会 2017

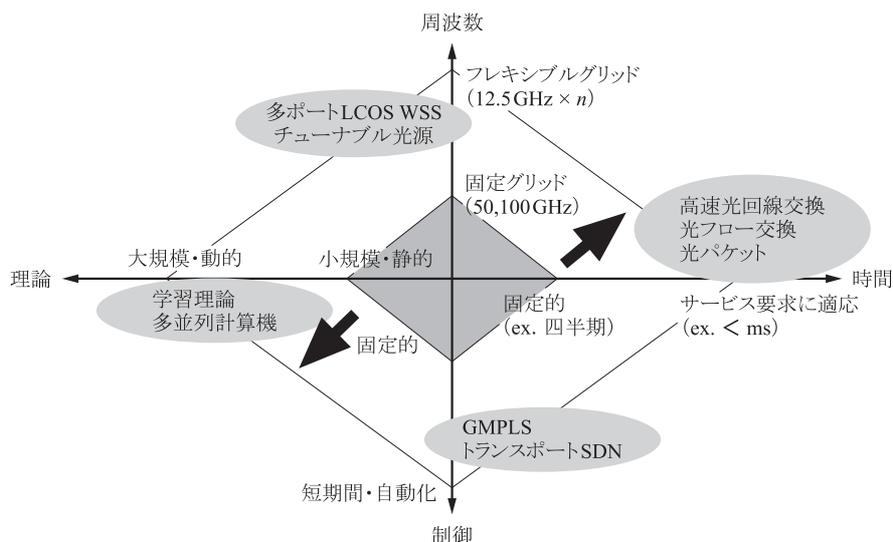


図1 フォトニックネットワークにおけるフレキシビリティの発展

称され、研究開発及び導入が進められている。

さて、今後は上述した低消費電力化及び大容量化双方の要求に応えるために、フォトニックネットワークが広範囲に導入され、基盤インフラとしての重要度が増すことになる。想定される通信トラフィックの発生要因として、センサネットワークからの微小なトラフィックから、巨大なトラフィックを発生させ得るデータセンター間でのライブマイグレーションや、8K/Ultra HDTV 無圧縮動画（最大ビットレートは120 f/s 時144 Gbit/sに達する⁶⁾）の配信、自動運転用環境データ（ダイナミックマップ）の更新まで多岐にわたり、時間帯・時期に応じた通信トラフィック総量の変動も大きくなると想定されている。超大容量サービスの要求帯域は波長多重信号の粒度（10~100 Gbit/s、将来的には400+ Gbit/s）に匹敵し、サービスが直接的に当該信号を占有する形態も想定される。基盤インフラとして一層の強じん性を有するためにも、設備量を抑制しつつ冗長性を高め、災害等による大規模障害への耐性を具備すること、コモディティ化した廉価である一方で信頼性に劣る機器/デバイスの効果的な利用、ネットワーク規模の拡大とそれに伴うネットワーク内の装置数の増加に見合うネットワーク最適化等の要件を満たしていかななくてはならない。

以上の要件において普遍的に求められるのが、様々な領域でのフレキシビリティである。ネットワークの実質的な容量を増やしていく上では、伝送距離やビットレートに応じ必要十分な周波数帯域を利用可能とするきめ細かな周波数資源の割り振りや、利用可能な周波数領域の拡大、ファイバケーブルやマルチコア光ファイバも含めた多数の光ファイバを同時かつ効果的に利用する上での枠組みが必要である。波長多重に加えて時間領域でも細かな粒度での割当を提供することで、フォトニックネッ

トワークでの容量割当のフレキシビリティが最大化され、多様なサービスに直接対応可能となる。また、通信トラフィックの分布の大きな変動に効果的に対応する、あるいは波長多重信号の直接利用を実現する上では、従来固定的に運用されていたネットワークを、より短期間で再構成し得る制御の枠組みが必要である。既にSDN（Software Defined Networking）の考え方をトランスポート層へ拡張する試みも行われている。

以上で述べた要求と発展の方向性を図1に示す。発展の方向性を分類する上では座標軸の設定は一意ではないであろうが、本稿では周波数・時間・理論・制御の四つの軸を設定し、それぞれについて展望を述べる。

2. 周波数領域でのフレキシビリティの実現

フォトニックネットワークでは、各通信ノードで光信号を電気信号に変換することなく、波長/周波数をラベルとして個別に経路制御を行う。光信号はその始点ノードから終点ノードまでを接続する光パスとなる。

従来、光ファイバ内に光パスを収容する際には、全ての光パスに、ビットレートによらず同一幅の周波数帯域（例：50/100 GHz）を一律に割り当てる、固定グリッドと総称される配置を採っていた。しかしグリッド間隔に各ビットレートで必要となる帯域幅が必ずしも一致しないため、周波数帯域が有効に活用されない。卓近な例になぞらえれば、様々な大きさの荷物を運ぶにあたり、最大の荷物を上回るサイズの箱を一律に用意することに相当する。

荷物の大きさごとにタイトな箱を用意可能とするのがフレキシブルグリッドと呼ばれる配置⁷⁾である。フレキシブルグリッドでは、まず6.25 GHz 間隔の細かなグ

リッドを定義し、このグリッド上に中心を持つ、6.25 GHz の偶数倍となる周波数帯域を光パスへ割り当てる。すなわち周波数幅割当の単位は 12.5 GHz であり、次章で述べる資源割当設計においては、この割当単位はしばしば周波数スロットと呼ばれる。また、ビットレートや伝送距離に応じて周波数の割当幅を可変することも可能である^{(8),(9)}。この可塑性ゆえに、光パスは特にエラスティック光パスとも呼ばれる⁽¹⁰⁾。エラスティック光パスにより、小容量から超大容量まできめ細かなビットレート割当が享受できる日も近い。

3. 多数の通信を収容する光資源割当技術

フレキシブルグリッドなどの光通信関連技術の進展に伴い、1本の光ファイバで伝送可能な通信容量は 2 Pbit/s を超えることも可能となってきた⁽¹¹⁾。しかしながら、光通信を行う全端末を光ファイバでフルメッシュに接続することは非現実的であり、需要予測などに基づいて適切に設計された光ネットワークで多数のユーザを相互接続し、必要ときに低消費電力で所望の品質の通信を提供することが将来的に求められている。一方、光ファイバに多数のユーザの信号を多重して高効率にネットワークを運用するため、光ファイバ・デバイス技術だけでなく、交換処理を行うノードアーキテクチャや周波数資源を各要求に割り当てるアルゴリズムなどのネットワーク関連技術に関する研究が行われてきた。現在も、様々なデバイス技術の発展に追従して、全光で多数の通信（フロー）を高効率に収容するべく光資源の割当制御に関する様々な研究が活発に進められてきている。

各送受信間のデータ通信をどの周波数帯域でどのように伝送するのかは、ネットワーク全体のパフォーマンスに大きな影響を与えるため、リンク間通信だけでなくネットワークの観点からも長年研究が行われている。当初は Routing and Wavelength Assignment (RWA) 問題と呼ばれ、送信ノードから宛先ノードまで同一の波長を用いてデータ伝送をする必要があるという波長連続性制約を考慮した様々なアルゴリズムが提案された。近年では、前述のエラスティック光ネットワークを対象とし、Routing and Spectrum Assignment (RSA) 問題と呼ばれており、伝送経路上の連続性制約だけでなく周波数軸上の連続性制約も満たす必要があるため問題が複雑化している。後者の連続性制約とは、例えば 37.5 GHz の帯域を利用して偏波多重 16QAM 信号を伝送するために連続した 3 スロットを光パスに割り当てる必要があるという制約である。RSA 問題では、周波数断片化を抑制するために多くの工夫が進められている。

更に、Space Division Multiplexing (SDM) 技術の発展に伴い、マルチコアファイバや多モードファイバを想定した周波数資源割当アルゴリズムの開発も進められて

いる⁽¹²⁾。これらは、(1) データ交換粒度（光パス、光フロー、光パケットなど）、(2) 制御方式（集中管理、自律分散など）、(3) 光信号衝突回避デバイス（波長変換器、ファイバ遅延線光バッファなど）、(4) オフライン設計かオンラインの動的割当かなどの条件によって、工夫されるポイントは異なるが、本質的には負荷分散と周波数資源の無駄使いの抑制に集約される。

光資源割当技術として、Integer Linear Programming (ILP) などを用いて与えられた光パスをできるだけ少ない周波数資源利用で収容する最適設計に関する研究と、個々の光パス要求などに対して動的にその時点で利用可能な周波数資源の探索・割当を行い棄却率などを抑制することを目指す研究のように大きく二つのアプローチが取られている。前者に関して、エラスティック光ネットワークにおいては、10 ノード程度の規模であっても高性能な計算機なしでは最適解を算出することが困難なほど計算量は大きい。SDM 技術によりファイバ内空間多重に伴う新たな次元拡張により、周波数資源断片化の柔軟な回避が可能となり、周波数資源の極限利用に更に近付くと期待される。一方で、パスの保留時間は長いものが多いため、ある時点での最適解が後々の時間も含まれた上での最適解とはならない場合も多い。そのため、少ない計算量で最適あるいは準最適な解を得るためのアルゴリズムなどが研究されていくと予想される。トラフィック需要の予測やマクロな視点での粒度の粗い資源割当設計などに関しては、AI (Artificial Intelligence) の適用も十分に考えられる。

トラフィックの多様化に対するフォトニックネットワークの高度化の観点では、光パスと光パケットを同一のネットワーク統合的制御⁽¹³⁾、コア・メトロなどで一貫通貫にデータ伝送するフォトニックネットワークのフラット化⁽¹⁴⁾、次章で述べる光資源の仮想化と自動運用化により真にユーザの需要に合致した通信ネットワークを迅速に提供する制御関連技術などが現在活発に研究されている。また、コアやメトロエリアだけでなく、データセンター内/間や、チップ間/内のような近距離の光インタコネクションなど、本技術の適用先は今後広がると予想される。フォトニックネットワークが利用される様々な環境での高効率化を進める中心的な役割として、それぞれに適した光資源割当技術が開発されていくであろう。

4. 光資源の効率的利用を実現する制御管理技術

フォトニックネットワークでは、ROADM (Reconfigurable Optical Add-Drop Multiplexing) に代表される通信ノードが複数の拠点に配備され、光ファイバを介して距離・ホップ数の異なる拠点間を複数の光パスが設定されることにより光通信網が構成される。本章では光

パスの経路や光資源の割当を効率的に実行する制御・管理技術について歴史を俯瞰しながら将来を想像する。

2000 年前半から ROADM 技術・装置が出現し、波長／周波数を光資源として持つ光パスの制御・管理技術が進展した。特に、標準化機関 ITU-T や IETF (Internet Engineering Task Force) において、Automatically Switched Optical Network (ASON)⁽¹⁵⁾ や Generalized Multi-Protocol Label Switching (GMPLS)^{(16), (17)} などの自律分散制御プレーン技術の標準化が進展し、波長をラベルとする定義付けがなされた⁽¹⁸⁾。

2010 年代に入ると、Liquid Crystal On Silicon (LCOS) を用いた帯域可変 Wavelength Selective Switched (WSS)⁽¹⁹⁾ やコヒーレント光伝送技術を用いた帯域可変 (QAM 利用) トランスポンダ⁽²⁰⁾ が出現し、これまでの固定的な光資源の利用から、より柔軟でかつ適応的に光資源を利用可能なハードウェア技術が進展し、その流れとあいまって、制御・管理・最適化技術が進化した⁽²¹⁾。更に、制御プレーンとデータプレーンを分離するアーキテクチャ SDN が新たなパラダイムとして出現し、フォトニックネットワークへの適用検討が進んだ⁽²²⁾。フォトニックネットワークの制御は元来 Network Management System (NMS) や Element Management System (EMS) 等、制御管理装置から通信ノードを集中的に制御する SDN に近いアーキテクチャであったが、これまでベンダ独自の制御プロトコルやデータモデルが使用されてきた。そこでトランスポート SDN では“Flow”という概念をタイムスロット⁽²³⁾や周波数⁽²⁴⁾などの“光資源”に拡張し、統一的でオープンな制御インタフェース (拡張されたモデルやプロトコル (OpenFlow, Yang モデル⁽²⁵⁾, Netconf⁽²⁶⁾等))として、光ネットワークへの適用検討が進んでいる。

このように、広く制御インタフェースのオープン化やネットワークオーケストレーションが進み、光資源も統一的に抽象化・モデル化され、今後フォトニックネットワークを含めたネットワーク全体がよりサービスやその品質とひも付いたきめ細やかな管理制御が進展していくだろう。加えて、将来光ネットワークの更なる大容量

化や多様なニーズへの対応化が進み、これまでは光資源として「光周波数」や「時間」を扱ってきたが、新たに「空間」や「光パケット」などもフルに活用した超並列トランスポート技術が進展することが想定される。そのため、種々の“光資源”が混在する中で、個々の品質をモニタリングし、学習・推定等を通して複数の資源の最適割当や多重化、そして分離化を最適制御・管理していくことが重要になるだろう。

究極的には、障害特定やプロビジョニングなどが自動化されネットワーク制御管理のオートメーション化が進むことが期待される。最後に、社会インフラとしてその根幹を支える光ネットワークは、安全安心で、かつ持続的に発展し続けることが必要であり、今後枯渇していきであろう光資源を究極的に効率良く利用可能なアーキテクチャや最適制御技術が進展することを期待したい。

5. 時間領域の柔軟な運用を実現する 光スイッチング技術

近年、光信号変調方式の高度化に伴い、デジタル信号処理を含めた光電変換のコストや消費電力は無視できないものになっている。そのため、フォトニックネットワークでは、中継ノードで光信号のまま経路切換を行う光スイッチング技術が重要になってくる。また、将来の自動運転や遠隔医療などのリアルタイムサービスに向けて、低遅延性はこれまで以上に要求されるようになっており、遅延の大きい電子ルータではなく、光スイッチングによる低遅延の実現が期待される。現在、コアやメトロの光ネットワークでは、ROADM や光クロスコネクタなどの装置によって、光回線交換方式による光パスが多数提供されている。これらの光パスは通信トラフィックの事前の需要予測を元に設定され、ほぼ固定的に運用されている。しかし、今後の通信トラフィックの動向と光資源の有効利用の観点から考えると、将来、時間的な柔軟性を持った光パスの運用が求められてくるであろう。

トラフィックの総容量が年々増加する一方で、1日のトラフィック変動幅の増加や、災害・興業などの大規模イベ

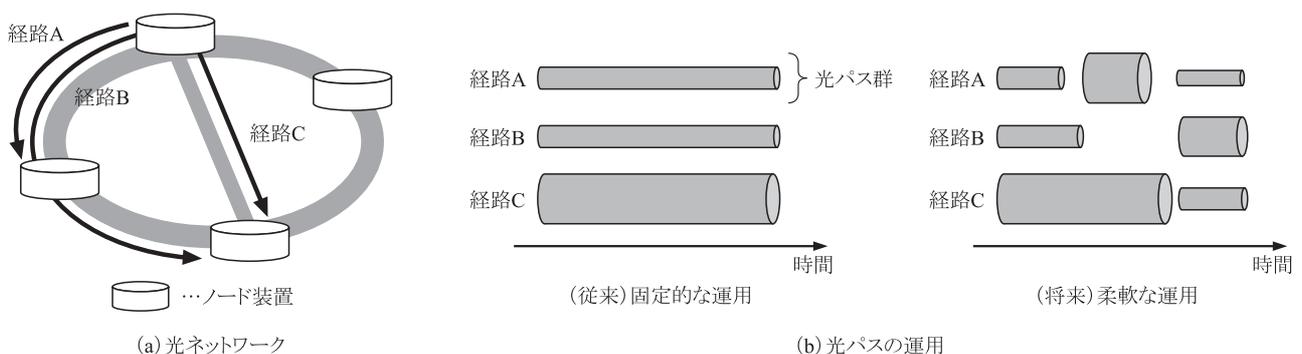


図2 フォトニックネットワークにおけるトラフィック変動に対応した柔軟な光パス運用

ント時のトラフィックの急激な増減など、トラフィックのダイナミクス性も高まっている⁽²⁷⁾。将来の光ネットワークでは、このような時間単位・分単位のトラフィックの変動に合わせて、適切な容量の光パス群を必要な時間だけ提供することが光資源の有効利用や消費電力の抑制につながり、理想的な運用となる(図2)。また、光パス1本当りの容量に匹敵する通信サービスが登場することにより、光パスの更なる高速な提供が求められる。例えば、ビットレートが約144 Gbit/sの8K/Ultra HDTV無圧縮動画像伝送サービスを想定した場合、100 Gbit/s光パス2本を提供する必要がある。また、光ネットワーク技術は、内部だけで大量のデータをやり取りするデータセンターやスーパーコンピュータ、チップの光インタコネクタとして利用されていくが、コネクション数が多いため、よりダイナミックな光パス制御が求められるであろう。

適切な容量の光パス群を必要な時間だけ提供するためには、特に光ネットワーク装置のハードウェアの時間的な可制御性を高めることが必要となる。例えば、膨大な数の光パスを複数方路に速やかに接続するためには、高速で大規模な光スイッチの開発が大きな課題である。低コスト・高集積性が期待されるシリコンフォトニクス技術による光スイッチは有力な候補であり、現在32×32などの光スイッチ⁽²⁸⁾が実現されているが、更なるポート数の大規模化や、温度や偏波の無依存化などの課題に対する今後の進展が期待される。また、光パスの経路切替やオンオフ制御時は、光信号レベルで観測すると、光信号がバースト的に発生・消滅することになる。頻繁な光パス切替やまとまった光パス群の一括制御が行われると、バースト光信号が多数発生するため、現在の光ネットワーク装置では安定運用が困難になる。そのため、バースト光信号に対応可能な、各種の高速な光信号処理や光デバイス(例えばバーストモード光増幅器⁽²⁹⁾、高速光強度制御器、バーストモード光送受信機)の開発が求められる。

光パス上では、宛先などで集約された多数のパケットが伝送されているが、パケットが伝送されていない時間も存在する。よって、究極的にはパケット単位で光資源を提供することが時間的に最大の有効利用方法となる。これまでに、事前予約なしにパケットごとの経路切替を可能にする光パケット交換方式が提案されている。光パケット交換方式は、高速な光スイッチや光バッファの開発などの課題があるが⁽³⁰⁾、光資源利用の自由度は格段に向上するため、その実現が期待される。

6. ま と め

本稿では将来のフォトニックネットワークにおいて活用されるべき各種フレキシビリティを中心に現状及び展

望を述べた。これらフレキシビリティの具備により、フォトニックネットワークでの効率性・信頼性・スケラビリティを実現して、情報通信インフラストラクチャとしての要求を充足すると予想される。また、無線等の通信ネットワーク、ネットワークを前提としたクラウド等のサービスなどとの連携を深め、効率的かつ効果的に社会に貢献していくことが今後一層重要になるであろう。

文 献

- (1) Cisco VNI, <http://www.cisco.com/c/en/us/solutions/service-provider/visual-networking-index-vni/index.html> (2017年3月9日閲覧)
- (2) 総務省, “我が国のインターネットにおけるトラフィックの集計結果(平成27年11月分),” http://www.soumu.go.jp/main_content/000402062.pdf (2017年2月7日閲覧)
- (3) NTT, Green of ICT グループ全体の取り組み, <http://www.ntt.co.jp/csr/2012report/ecology/activity01.html> (2017年2月7日閲覧)
- (4) C. Lange, D. Kosiankowski, R. Weidmann, and A. Gladisch, “Energy consumption of telecommunication networks and related improvement options,” *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.*, vol. 17, no. 2, pp. 285-295, March-April 2011.
- (5) JST, “研究開発の俯瞰報告書 環境・エネルギー分野(2015年),” <http://www.jst.go.jp/crds/pdf/2015/FR/CRDS-FY2015-FR-02.pdf> (2017年2月7日閲覧)
- (6) ITU-R, “BT. 2020-2 (10/2015),” <https://www.itu.int/rec/R-REC-BT.2020/en> (2017年2月7日閲覧)
- (7) ITU-T G694.1 (02/12), <https://www.itu.int/rec/T-REC-G.694.1/en> (2017年3月9日閲覧)
- (8) 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, 2010.
- (9) K. Christodoulopoulos, I. Tomkos, and E. Varvarigos, “Spectrally/bitrate flexible optical network planning,” *Proc. ECOC2010*, pp. 1-3, Torino, 2010.
- (10) M. Jinno, H. Takara, B. Kozicki, Y. Tsukishima, Y. Sone, and S. Matsuoka, “Spectrum-efficient and scalable elastic optical network: Architecture, benefits, and enabling technologies,” *IEEE Commun. Mag.*, vol. 47, no. 11, pp. 66-73, 2009.
- (11) B.J. Puttnam, R.S. Luis, W. Klaus, J. Sakaguchi, J.M. Delgado Mendinueta, Y. Awaji, N. Wada, Y. Tamura, T. Hayashi, M. Hirano, and J. Marcianite, “2.15 Pb/s transmission using a 22 core homogeneous singlemode multi-core fiber and wideband optical comb,” *Proc. ECOC 2015*, no. PDP.3.1, Valencia, Spain, Sept. 2015.
- (12) H. Tode and Y. Hirota, “Routing, spectrum, and core and/or mode assignment on space-division multiplexing optical networks,” *IEEE/OSA JOCN*, vol. 9, no. 1, pp. A99-A113, Jan. 2017.
- (13) T. Miyazawa, H. Furukawa, K. Fujikawa, N. Wada, and H. Harai, “Development of an autonomous distributed control system for optical packet and circuit integrated networks,” *IEEE/OSA JOCN*, vol. 4, no. 1, pp. 25-37, Jan. 2012.
- (14) 廣田悠介, 戸出英樹, 渡辺 尚, “パス及びパケットを収容する光フラットネットワークのための周波数資源割当に関する一検討,” 2015 信学総大, no. B-12-17, March 2015.
- (15) G. 8080/Y. 1304, “Architecture for the automatically switched optical network (ASON),” Nov. 2001.
- (16) IETF RFC 3945, “Generalized multi-protocol label switching (GMPLS) architecture,” Oct. 2004.
- (17) 山中直明, 青山友紀, “MPLS とフォトニック GMPLS—ブロードバンドを支えるバックボーンネットワーク技術,” 電気通信協会, Dec. 2003.
- (18) IETF RFC 6205, “Generalized labels for lambda-switch-capable (LSC) label switching routers,” March 2011.
- (19) G. Baxter, S. Frisken, D. Abakoumov, H. Zhou, I. Clarke, A. Bartos,

and S. Poole, "Highly programmable wavelength selective switch based on liquid crystal on silicon switching elements," Proc. OFC/NFOEC 2006, no. OTuF2, March 2006.

- (20) K. Roberts, "Flexible transceivers," Proc. CLEO-PR & OECC/PS2013, no. SWD1-8, Kyoto, Japan, July 2013.
- (21) IETF RFC 7698, "Framework and requirements for GMPLS-based control of flexi-grid dense wavelength division multiplexing (DWDM) networks," Nov. 2015.
- (22) S. Das, G. Parulkar, N. McKeown, P. Singh, D. Getachew, and L. Ong, "Packet and circuit network convergence with OpenFlow," Proc. OFC2010, no. OTuG1, San Diego, USA, March 2010.
- (23) ONF TR-511, "SDN architecture for transport networks," March 2016.
- (24) L. Liu, R. Muñoz, R. Casellas, T. Tsuritani, R. Martínez, and I. Morita, "OpenSlice: An OpenFlow-based control plane for spectrum sliced elastic optical path networks," OSA Opt. Express, vol. 21, no. 4, pp. 4194-4204, Feb. 2013.
- (25) IETF CCAMP WG draft, draft-ietf-ccamp-wson-yang-04.txt, Jan. 2017.
- (26) IETF RFC 6241, "Network configuration protocol (NETCONF)," June 2011.
- (27) 吉田友哉, "現在のインターネット運用動向," D3 IP Meeting 2013, Internet Week 2013, 2013, <https://www.nic.ad.jp/ja/materials/iw/2013/proceedings/d3/d3-yoshida.pdf> (2017年3月9日閲覧)
- (28) K. Tanizawa, K. Suzuki, M. Toyama, M. Ohtsuka, N. Yokoyama, K. Matsumaro, M. Seki, K. Koshino, T. Sugaya, S. Suda, G. Cong, T. Kimura, K. Ikeda, S. Namiki, and H. Kawashima, "Ultra-compact 32×32 strictly-non-blocking Si-wire optical switch with fan-out LGA interposer," OSA Opt. Express, vol. 23, no. 13, pp. 17599-17606, 2015.
- (29) 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," Proc. of Conf. on Lasers and Electro-Optics, no. JTuA133, Baltimore, USA, May 2007.
- (30) M. Ohta, "Optical switching of many wavelength packets: A conservative approach for an energy efficient exascale interconnection network," Proc. of IEEE 17th International Conference on High Performance Switching and Routing (HPSR), Yokohama, Japan, June 2016.

(平成 29 年 3 月 13 日受付 平成 29 年 4 月 3 日最終受付)



はせがわ ひろし
長谷川 浩 (正員: シニア会員)

平 7 東工大・工・電気電子卒. 平 9, 12 同大学院理工学研究科博士前期課程及び後期課程了. 東工大助手を経て平 17 から名大大学院工学研究科准教授, 現在に至る. フォトニックネットワークアーキテクチャ, ネットワーク最適化に関する研究に従事. 博士 (工学). IEEE 会員.



つりたに たけひろ
釣谷 剛宏 (正員: シニア会員)

平 6 東北大・工・電子卒. 平 9 同大学院博士前期課程了. 平 18 同大学院博士後期課程了. 平 9 国際電信電話株式会社 (現 KDDI 株式会社) に入社. 平 23 から (株) KDDI 総合研究所光トランスポートネットワークグループ・グループリーダー, 現在に至る. 長距離大容量光伝送, 光ネットワーク制御管理技術に関する研究開発に従事. 博士 (工学). IEEE 会員.



ひろた ゆうすけ
廣田 悠介 (正員)

平 16 阪大・工・情報システム卒. 平 18 同大学院博士前期課程了. 平 20 同大学院博士後期課程了. 平 20 から同大学院・情報科学・情報ネットワーク学・助教, 現在に至る. 光ネットワークを対象としたルーチング制御, 交換処理, 自律分散システム制御, 並びに, コンテンツ配信技術に関する研究に従事. 博士 (情報科学). IEEE, OSA 各会員.



ふるかわ ひであき
古川 英昭 (正員)

平 12 阪大・工・応用自然卒. 平 14, 17 同大学院工学研究科博士前期課程及び博士後期課程了. 同年, 独立行政法人情報通信研究機構入所. 以来, フォトニックネットワーク, 光情報処理に関わる研究に従事. 平 25~26 総務省情報通信国際戦略局課長補佐. 博士 (工学). IEEE 会員.