

持続発展可能な大容量・低消費電力の 通信ネットワーク実現に向けて

— ダイナミック光パスネットワークのためのトポロジ検討 —

石井 紀代*、来見田 淳也、並木 周

映像関連アプリケーションの発展により、通信ネットワーク上の通信需要が増大し続けている。映像関連アプリケーションは将来、高臨場感双方向映像通信、遠隔診断医療、遠隔教育等への発展が期待されている。しかし、現状のネットワークは消費電力が通信量に依存して増加するため、消費電力増大が大容量通信ネットワーク実現のボトルネックとなることが懸念される。この論文では、持続発展可能な通信ネットワーク技術の確立に向け、通信量に対する依存が小さな消費電力特性を持つネットワークアーキテクチャ（ダイナミック光パスネットワーク）を提示する。トポロジとノード構成との詳細検討を通し、収容ユーザー数、通信帯域、および消費電力の観点からその有効性を明らかにする。

キーワード: 大容量低消費電力通信ネットワーク、光パスネットワーク、光スイッチ、超高精細映像通信

Towards large-capacity, energy-efficient, and sustainable communication networks

– Network topology research for dynamic optical paths –

Kiyo ISHII*, Junya KURUMIDA and Shu NAMIKI

Internet traffic continues to increase due to the growth of video-related communication services. Such video-related services are expected to support future advanced communication services such as tele-presence based on real-time high resolution bidirectional video communication, tele-diagnosis, and remote education. However, the risk of an energy crunch in communication networks is increasing with the increase in traffic since energy consumption of current IP router based networks depends on traffic volume. In this paper, we present a network architecture, called “dynamic optical path network (DOPN)”, whose energy scaling is much less dependent on traffic volume than that of the current networks. This paper demonstrates the validity of DOPN to realize greater bandwidth, national-scale, and energy-efficient network, by defining detailed network topologies and node architectures of DOPN.

Keywords: Large-capacity and low-energy-consumption communication network, optical path network, optical switch, super high vision video communication

1 はじめに

電話網やインターネット網に代表される通信インフラは、電気・水道・ガスに匹敵する重要なライフラインとなっている。通信インフラの拡充や映像関連アプリケーションの進展により、ネットワーク上を流れる通信量（トラフィック）の増大が世界的に続いている^[1]。日本に注目すれば、ブロードバンドサービス契約者数が年々増加を続けると同時に、DSL (Digital Subscriber Line) 契約者数が減少し FTTH (Fiber To The Home) 契約者数が増加するなど、より広帯域サービスへの移行も進み、契約者あたりのトラフィック量も年々増加を続けている。これらの動向を背景に、日本のネットワークでは年率 20 ~ 40 % での通信量増加が継

続している^{[2][3]}。今後も高精細映像等大容量コンテンツの更なる進展により、通信量の増加傾向が続くと予測されている。仮に、今後 20 ~ 30 年にわたって年率 20 ~ 40 % の通信量増加が継続すると、現在の 1000 倍を超える通信需要を収容するネットワークが必要となる。

通信量が増加するほど通信ネットワークの重要性は増し、ひとたび通信断が発生すれば甚大な影響を及ぼすことになる。現在、断線等の故障リスクに対し、通信拠点間に複数の経路（西回り経路・東回り経路等）を確保し、一方の経路に障害が発生しても他方の経路を使用することで、通信サービスを継続可能とする運用がなされている。しかし、2011 年東北地方太平洋沖地震のような大災害時には、

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: kiyo-ishii@aist.go.jp

Original manuscript received June 13, 2013, Revisions received August 22, 2013, Accepted September 2, 2013

故障発生が広範囲・多数箇所に及ぶため通常の運用では障害復旧が困難であり、より大幅で迅速なネットワーク再構成が必要であることが浮き彫りになった。さらに、災害時に生じる電力供給不安に影響されずに通信を継続するために、平時からの低消費電力なネットワーク運用の重要性も再認識されている。

通信ネットワークは、信号の伝送を行うリンク（伝送路）と、信号の宛先やアプリケーションに応じて処理を行う通信ノード（節点）とから成る。信号伝送は主に光ファイバリンクを用い、光信号により行われている。1本の光ファイバで複数の光信号を多重化して伝送することが可能であり（波長分割多重伝送、WDM：Wavelength Division Multiplexing）、学会では1ファイバ当たり100 Tbpsを超える容量の伝送実験も報告されている^[4]。一方、ノードでは主に光/電気変換と電気スイッチやIPルータを用いた電気領域での処理が行われている。光/電気変換や電気スイッチおよびIPルータの消費電力は、信号伝送レート、すなわち、取り扱う通信量に比例して増加するため、消費電力が大容量ネットワーク実現のボトルネックとなることが懸念されている^[5]。将来の通信インフラ技術確立に向けて、ネットワークの低消費電力化は先に述べた耐災害性の観点のみならず、大容量化の観点からも重要な課題である。

現在、低消費電力での大容量通信ネットワーク実現に向け、ノードでのトラフィック処理をより低消費電力な低レイヤで行うこと（IPトラフィックオフローディング）が検討されている^{[6][7]}。トラフィックオフローディング技術の一つに、ノードにおいて光/電気変換を行わず、光スイッチを用いて光信号の行き先を切り替える光カッター技術が検討され、ROADM（Reconfigurable Optical Add Drop Multiplexer）の技術と共に導入が進んでいる。しかし、

これらトラフィックオフローディング技術は現在のIPルータ網をベースとして検討されており、ネットワークの境界（エッジ）での信号処理が避けられず、ネットワーク全体の低消費電力化効果は20～30%程度と限定的である^{[8][9]}。通信容量3ケタ増大等の長期的展望においては、さらに抜本的な検討が必要である。

我々は、持続発展可能な将来の大容量通信ネットワークを目指し、これを実現するネットワークアーキテクチャを「ダイナミック光パスネットワーク（DOPN）」と名付け、取り組んでいる^{[10][11]}。DOPNは、将来のトラフィック量増大の主要因が高精細映像を主体とした大容量アプリケーションであることに着目し、ユーザー間にGbps以上の直通大容量パス回線をリクエストに応じて動的に提供する。大粒度通信要求を主眼とすることで、低消費電力な光スイッチや低レイヤ電気スイッチのみでネットワークを構成し、通信量への依存が小さい消費電力特性の実現を目指すものである。一方、小容量の通信要求を頻繁に発生するwebやメール等の既存通信サービスには、数十～数百kbit毎のパケット交換を行う現在のIPルータ網が適している。したがって、DOPNは既存IPルータ網を置き換えるものではなく、併存し相補関係をなすものとなる。DOPNの運用管理には、通信リクエストごとにネットワーク資源（帯域）からストレージ資源（コンテンツ）までを包括的に予約管理する新たな統合資源管理技術の導入が必要となる^[12]。従来サービスのwebやメールはIPルータ網を使用し、高精細VOD（Video On Demand）や遠隔会議等の大容量サービスではDOPNを使用するというように、アプリケーションに応じて使用する網を資源管理システムが自動的に選択し、必要に応じてパス回線の予約を行う（図1）。資源管理システムは、ユーザーがIP網とDOPNとの違いを意識すること

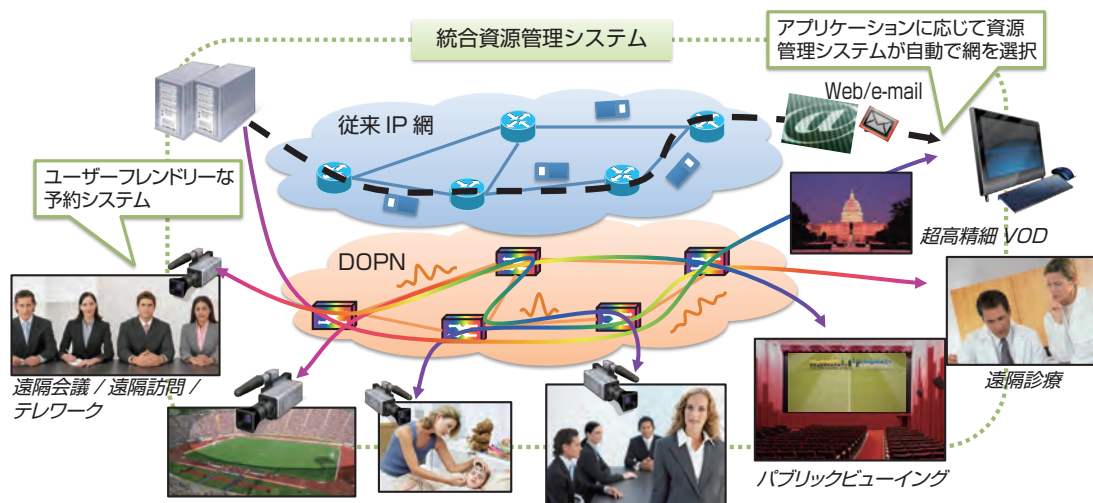


図1 IP網とDOPNとから構成される将来の情報通信ネットワークとサービスのイメージ

なくシームレスに使用することを可能にするもので、産総研情報技術研究部門と協働して検討を進めている。DOPNはこれまでのOSI7レイヤ^{用語1}の視点で言うと、光スイッチも含む物理レイヤの動的な切替の実施を意味するものであるため、その要素技術は、先に述べた災害等有事の際の物理レイヤをも含む大掛かりなネットワーク再構成の迅速な実施を可能とする技術への発展も期待できる。

DOPNにより安定した大容量パスをスムーズにユーザー間に提供できれば、あらゆる大容量通信サービス実現のプラットフォームとなる。DOPNがターゲットとする映像サービスとして、現在開発が進められているスーパーハイビジョン（SHV）があげられる。SHVはハイビジョン（HV）の16倍の高精細画像で、非圧縮伝送には72 Gbps以上の帯域が必要であり、現在の日本のインターネット網のピーク接続速度の40.5 Mbps^[13]と比較すると、3ケタ以上のギャップがある。DOPNを用いればSHVの非圧縮伝送に必要な帯域を安定して提供可能である。当然、映像圧縮技術も開発されているが、実際に対面しているのと遜色ない程の高臨場感を実現するためには、映像圧縮の利用には限界がある。高精細映像を用いた高臨場感双方向通信が実現できれば、意思決定を伴う会議や資格／就職試験面接等、重要場面における遠隔会議活用も現実的となる。超高精細映像を用いた遠隔会議・遠隔診断医療・遠隔教育等のアプリケーションが真に社会に普及すれば、地理的距離に制約されない共働が可能となり、ひいては、教育や医療等の地域格差をも激減させるなど、大きな社会的価値に繋がることが期待される。

この論文の目的は、将来の映像関連サービスを支える通

信インフラ実現の基盤技術として、DOPNの有効性を示すことである。将来の映像関連サービスを支える通信インフラへの要求として、1. 通信需要増大時の消費電力のボトルネック解消、2. 数千万人規模の収容ユーザー数、3. 遠隔共存（～100 Gbps）から高精細VOD（数Gbps）までさまざまな大容量映像サービスに対応可能、の3点がある。この論文ではDOPNのネットワークトポロジとノード構成について詳細に検討し、1～2.5 Gbpsのパス回線を使用するコンシューマーユーザーを5000万以上、40～100 Gbpsのパス回線を使用するエンタープライズユーザーを60万以上収容可能であり、現在のネットワークにくらべ2～3ケタ程度の消費電力効率改善の可能性を有することを示す。

2 ダイナミック光パスネットワーク（DOPN）～目標・課題・要素技術～

ダイナミック光パスネットワークは、低消費電力な光スイッチや電気スイッチを主要構成要素とすることで、持続発展可能な将来の大容量・低消費電力ネットワークを実現しようとするものである。図2にこの論文で扱うダイナミック光パスネットワークが達成すべき目標とそれを達成するために使用する要素技術の相関を示し、以下に詳細を説明する。

要素技術1：光スイッチ

光スイッチの注目すべき特徴として、消費電力が信号伝送レートに依存せずスイッチポート数に比例するという点がある。DOPNでは、光スイッチを主要構成要素とすることで、通信需要量への依存が小さな消費電力特性を目指す。しかし、光スイッチには大きな入出力ポート数の実現が困難であるという技術的問題がある。電話網で使用される交

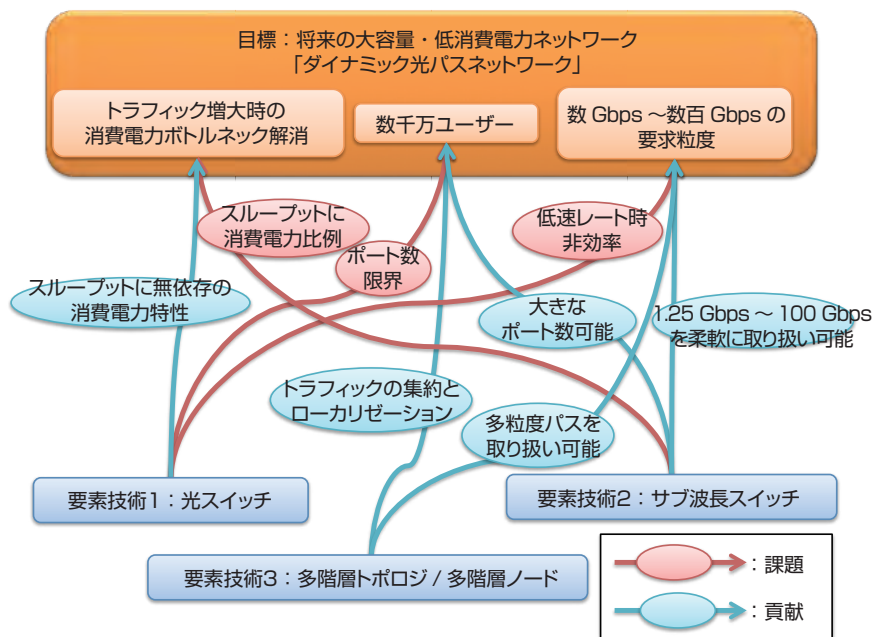


図2 目標・要素技術・課題の相関

換機が数万ポート数規模であるのに対し、現状の光スイッチ製品のポート数は8～200ポート程度である。光スイッチを主要構成要素としてネットワークを構成する際には、光スイッチポート数限界による収容可能ユーザー数の制限が問題となる。さらに、光スイッチにはファイバ単位で切り替えるもの（光マトリックススイッチ）と、波長単位で切り替えるもの（波長選択スイッチ、WSS: Wavelength Selective Switch^{用語2)}の2種類がある。光ファイバは1本あたり数Tbps以上、波長は数十～数百Gbpsの通信データレートであり、光スイッチのみでは数Gbps程度の小粒度の通信需要に対し非効率であるという課題がある。

要素技術2: サブ波長スイッチ

光スイッチを主要構成要素とする場合の課題の解決のため、サブ波長パスを導入する。サブ波長パスとは、波長パスより小粒度の電気パスのことで、具体的には同期デジタル通信方式を用いる。この論文ではサブ波長パスとしてODU (Optical Data Unit) パスの使用を想定する^[14]。ODUスイッチは電気パススイッチとして動作するため消費電力がスループットに依存するが、取り扱うデータの粒度が1.25 Gbps以上と大きいと、パケットルータと比べると消費電力は1/6以下である^[15]。ODUパスは1.25 Gbps～100 Gbpsまで1.25 Gbps刻みで扱うことが可能であり(ODUflex)、スループットTbps級・数千ポート規模のODUスイッチの開発が進められている。この論文のDOPNで取り扱うパス粒度のイメージを図3に示す。

要素技術3: 多階層トポロジ/多階層ノード

要素技術1と2とを効率的に組み合わせて使用するため、多階層トポロジ/多階層ノードを導入する。多階層ノードとは、さまざまな粒度のパスを効率的に扱うためのノード構成で、光スイッチやサブ波長スイッチ等の粒度が異なるスイッチを階層的に接続したものである。可能な限り大粒度のパス単位で切替を行うことにより、ネットワーク全体で必要となるハードウェア規模が低減される^{[16][17]}。多階層ト

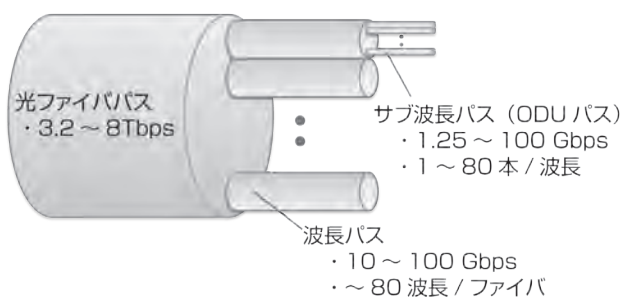


図3 この論文で取り扱う多粒度多階層パスの概念図
光ファイバパス容量については、現在商用化されている技術を基に1波長あたり最大100 Gbps・最大波長多重数を80として想定した。将来的には、この論文に書く通り1ファイバあたり100 Tbps超へも進展可能である。

ポロジとは、ユーザーサイドのアクセス網、トラフィックを集約するアグリゲーション網、長距離伝送を行うコア網等が階層的に接続されたネットワークトポロジである。近距離通信についてアグリゲーション網等で適宜トラフィックを折り返す(トラフィックのローカライズ)ことにより、大量のトラフィックが集結するコア網の負担を軽減し、数千万ユーザーへの拡張性をサポートする。また、多階層ネットワークトポロジは現状のネットワークの形状と親和性が高く、DOPN導入のマイグレーションにおいて設備共有等の観点からも有効である。

3 ネットワークトポロジとノード構成

本章では、ダイナミック光パスネットワークのトポロジとノード構成とを検討する。まず、日本のブロードバンド加入者数や想定アプリケーションを考慮し、DOPNの収容ユーザー数と帯域の数値目標を設定する。さらに、現状の光スイッチ技術等を考慮し、使用光デバイスとトポロジへの要求条件を設定する。具体的なトポロジと詳細なノード構成を示し、設定した要求条件の範囲内で数値目標を達成可能であることを示す。

3.1 目標と要求条件

DOPNが主眼とする将来の映像関連アプリケーションのユーザーとして、高精細VOD/テレビ電話等の数Gbps程度を主に使用するコンシューマーユーザーと、超高精細パブリックビューイングや大容量ファイル交換等の数十～100 Gbps程度を主に使用するエンタープライズユーザーとが想定される。現在の日本の世帯数が約5000万、数十人以上の規模の事業所数が約60万であることから^{[18][19]}、通信容量1 Gbps以上のコンシューマーユーザーを5000万以上、通信容量40～100 Gbpsのエンタープライズユーザーを60万以上収容することを目標とする。

光デバイスとトポロジ構成について、以下の4点を要求条件として仮定した。

1) 光マトリックススイッチポート数500以下: 光スイッチの多ポート化に向けた技術開発が進んでいるが、製品として現在リリースされている光マトリックススイッチのポート数は、MEMS (MicroElectroMechanical System) 技術によるもので200ポート程度、PLC (Planar Lightwave Circuit) 技術によるもので16ポート程度である。また、スイッチスピードや製造性の観点から期待されるSiフォトニクス技術を用いた32ポートのスイッチが開発中である。複数の32ポートスイッチをクロス^[20]の3段構成^[20]を用いて組み合わせれば、500ポートのスイッチを構成可能である。以上の技術動向から、この論文で使用する光マトリックススイッチポート数の最大値を500と仮定する。

2) 波長選択スイッチポート数 1×35 以下：現在、LCOS (Liquid Crystal On Silicon) や MEMS 技術による 1×9 や 1×4 のサイズの波長選択スイッチが複数のメーカーからリリースされている。波長選択スイッチも多ポート化に向けた技術開発が進んでおり、2011 年には 1×20 ポート製品の発売が発表されている^[21]。将来のさらなる多ポート化を考慮し、この論文で使用する波長選択スイッチポート数の最大値を 1×35 と仮定する。

3) 基本的なファイバトポロジをツリー・リング・メッシュとする：現在のネットワークで使用しているファイバ線路や基地局設備等を活用するため、ダイナミック光パスネットワークの地理的ファイバ配置を現在のネットワークで想定される地理的ファイバ配置と共通であるとした。すなわち、アクセスサイドでは PON (Passive Optical Network) のトポロジと互換性の高いツリー、メトロ領域ではリング、コア領域ではメッシュの地理的ファイバ配置とする。

4) ネットワーク全体でフレキシブルグリッドに対応：現在のネットワークでは、波長チャネルの伝送データレートによらず一定の周波数帯域 (100 GHz 間隔または 50 GHz 間隔の ITU-T グリッド^[22]) が使用されている。周波数利用効率を向上するため、周波数帯域のより柔軟な利用を可能とするフレキシブルグリッド技術の研究・開発が進められ、25 ~ 50 % 程度の効率向上が試算されている^[23]。効率的な大容量通信網を実現するため、アクセス網も含め end to end でのフレキシブルグリッド接続対応可能とする。

3.2 トポロジ

3.1 節で示した要求事項を満足するダイナミック光パスネットワークのトポロジを探究する。一番の課題は、数百ポートのスイッチを主要構成要素として、数千万ユーザーの相互接続を実現することである。2 章の要素技術 3 にて述べた通り、光スイッチのポート数制限とトラフィック集約の点から、フラットなネットワーク構成での実現は不可能であり、ユーザー端末をグルーピングして階層的に接続する多階層トポロジが必須である。多階層トポロジでは、少ない階層のシンプルな構成が望ましい。トラフィック集約階層(最下層)と長距離パス設立階層(最上層)の 2 階層以外に、どのような役割で何階層のネットワークが必要になるかがポイントである。トラフィック集約について、ユーザーのパス粒度に応じ、サブ波長パスを波長パスへ、波長パスをファイバへと順次集約する。集約を 2 段階に分けるのは、ユーザーに近い位置でサブ波長パスから波長パスに集約することによる伝送路使用効率向上のためと、ファイバ容量への集約時に必要となるサブ波長パススイッチのポート数削減のためである。ターゲットとするユーザー数とユーザーあたりの帯域を考慮すると、最上層ネットワークに集約されるト

ラフィック容量は膨大となる。最上層ネットワークでは、波長スイッチより大きなポート数を想定可能で、より大容量を収容可能な光ファイバスイッチの使用が必須となる。すなわち、ファイバ単位で切り替えられるほどに波長パス・サブ波長パスが整理 (グルーミング^[24]) された状態で、最上層ネットワークに接続する必要がある。集約ネットワークの通信ノード構成を定量的に検討した結果、波長パスの多重化に使用する光カプラ分岐数と損失の点で、ファイバ単位で切り替え可能とするほどのトラフィック集約を行うことは困難なことが分かった。すなわち、最上層ネットワークに接続する前に、グルーミングを行うネットワーク層の追加が必要になった。このような検討過程により、図 4 に示す 4 階層のネットワークに行き着いた。詳細な数値検討を行ったところ、光スイッチポート数や収容人数の要求条件を満足可能なが分かった。次項からトポロジの詳細と具体的な数値検討を述べる。

3.2.1 各ネットワークの役割

ここで検討するネットワークトポロジは 4 階層で構成されている。すなわち、複数のユーザー端末からなるグループネットワーク (NW)、複数のグループ NW を集約するカテゴリネットワーク、複数のカテゴリ NW を集約するカテゴリコアネットワーク、複数のカテゴリコア NW を接続するコアネットワークから構成されている。グループ NW が第一段階のトラフィック集約を、カテゴリ NW が第二段階のトラフィック集約を行い、カテゴリ NW ではグルーミングを、コア NW では長距離パス設立を行う。

グループ NW 部はコンシューマーユーザーとなるサブ波長パス端末、エンタープライズユーザーとなる波長パス端末、および、サブ波長パス端末を波長パス粒度に多重化するサブ波長パス集約ノードとから構成される。これらの端末およびノードと上流のカテゴリ NW のノードとは、ツリートポロジで接続される。これは、現在の PON と互換のトポロジである。なお、ネットワーク全体でブロッキングを最小とする柔軟な波長割当を実現するため、波長パス端末のアップリンク側に波長可変光送受信器を仮定している。

カテゴリ NW 部では、複数のグループ NW から送られてくる複数の波長パスをファイバパス粒度に多重化し、宛先に応じて上流 (カテゴリコア NW) へ接続、または同一カテゴリ NW 内のグループへ折り返し接続する。カテゴリ NW の地理的ファイバ配置はリングであるが、ノード間のファイバ接続としては、カテゴリ NW 内ではフルメッシュ接続、上流のカテゴリコア NW との接続はスター接続とした。すなわち、図 5 に模式図で示す通り、リングトポロジ上で隣接しないノード間について、途中のノード設備箇所まで直接ファイバ接続される。フルメッシュ接続およびスター接続

を用いることにより、カテゴリ NW のノードは自ノードが接続するグループ NW から送受信されるトラフィックのみを扱えばよく、他グループ NW を始終点とするようなトランジットトラフィックを扱わないため、ノード構成が簡易化され、必要となる光スイッチのポート数を抑制できる。

カテゴリコア NW 部では、カテゴリ NW から接続されるパスをコア NW へ接続する。この際、コア NW において可能な限りファイバ単位での切替が可能となるように、パスの整理を行う。すなわち、コア NW 上で同じ宛先の波長パスを同じファイバに集約する（波長パスグルーミング）、および、同じ宛先のサブ波長パスを同じ波長パスに集約する（サブ波長パスグルーミング）。カテゴリコア NW の地理的ファイバ配置はリングであるが、ファイバ接続としては上

流のコア NW とスター接続している。なお、ノード構成簡易化と必要光スイッチポート数抑制のため、カテゴリコア NW での折り返しは行わないこととした。

コア NW では、集約されてきたトラフィックについて、宛先に応じた長距離パスを設立する。

3.2.2 ネットワークのボトルネック

ネットワーク容量の設計において、全ユーザーが全時刻にわたって接続要求を出し続けるという仮定は現実的ではない。ネットワークの利用効率を上げるため、多くのユーザーで共有されるコア NW とカテゴリコア NW において、カテゴリ NW からの接続容量を制限する。これをオーバーサブスクリプションと言う。容量設計の例を図 6 に示す。図 6 ではオーバーサブスクリプションを 10 とし、各グルー

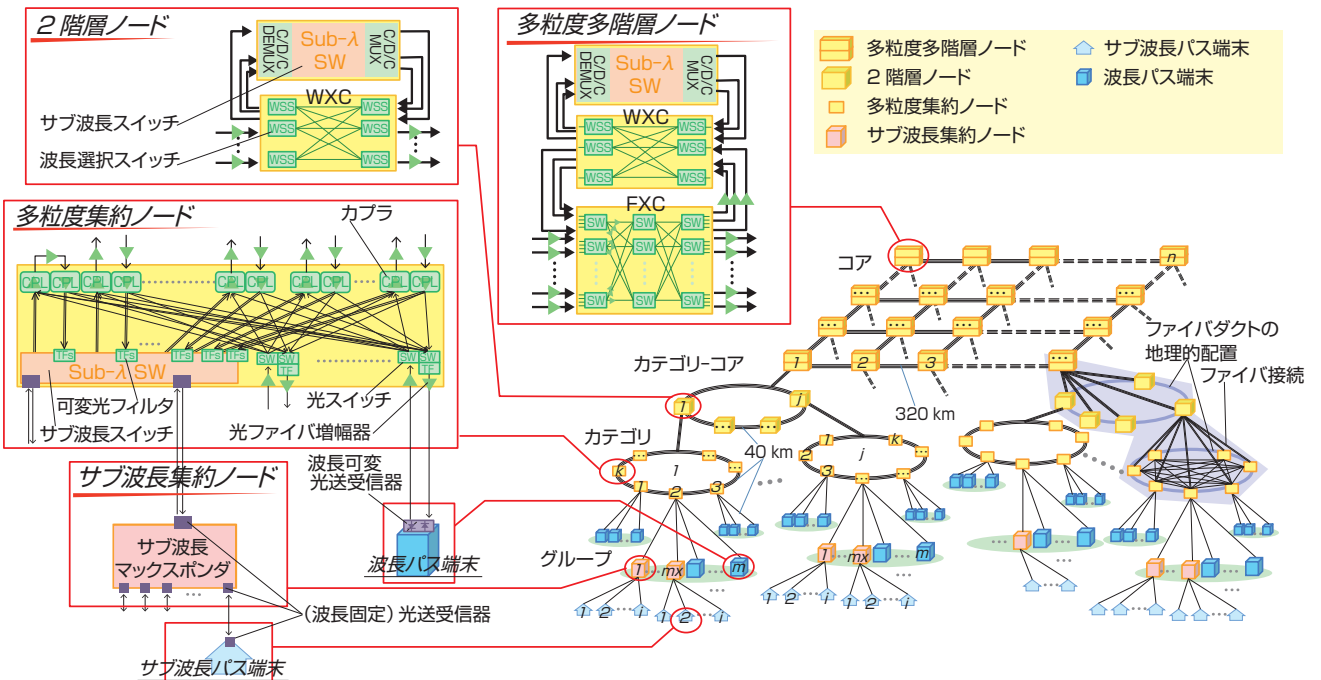


図4 ダイナミック光パスネットワークのトポロジとノード構成

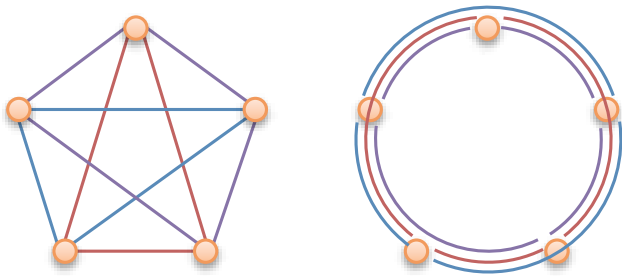


図5 カテゴリネットワーク部のノード間ファイバ接続（左）と地理的ファイバ配置（右）の例

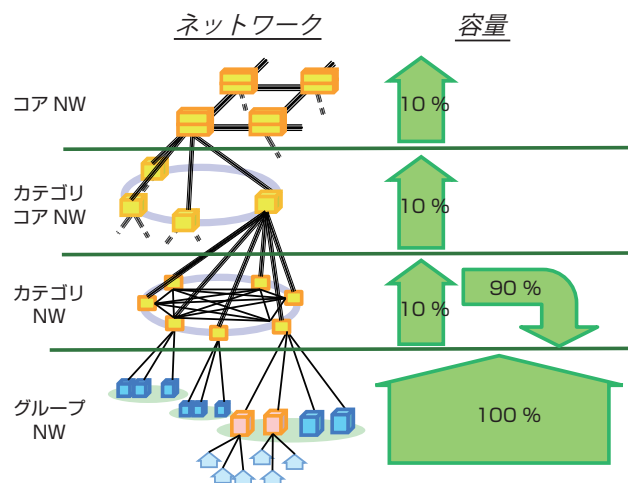


図6 ネットワーク容量設計の一例

プ NW からのトラフィックのうち 10 % をカテゴリ NW を通じてカテゴリコア NW と接続可能としている。残りの 90 % については、各カテゴリ NW 内での折り返し接続を可能としている。この折り返し接続により、同一カテゴリ NW 内接続要求に対し低ブロッキング率での接続が可能となる。一方、遠距離間接続要求はコア NW を通る必要があるため、オーバーサブスクリプションの影響を受けることとなる。

オーバーサブスクリプションの最適値は、トラフィックパターンやサービス形態に強く依存するため現状では詳細な検討が困難である。典型例として高精細テレビ会議アプリケーションを考慮すると、事前予約制のサービス形態が想定される。効率的な予約アルゴリズムや利用時間帯に応じたメリハリのある料金体系により、数十 % 程度の比較的高いブロッキング率、すなわち大きなオーバーサブスクリプションでも意味のあるサービス運用が可能であると想定される。

ダウンロード型サービスについては、コンテンツサーバを適切に配置することにより、ブロッキング率の低減が可能である。例えば、カテゴリ NW 毎にコンテンツサーバを配置すれば、同一カテゴリ NW 内での低ブロッキング率特性を活用できる。サーバ間接続については、多数のユーザーからのリクエストが集約され大容量の需要が発生するため、大容量パスを扱う DOPN で効率的に収容可能である。一方で、コンテンツサーバ設置によるブロッキング率低減と、消費電力およびコスト増大の間にはトレードオフの関係がある。低ブロッキング率かつ低消費電力なダウンロード型サービスのためのコンテンツサーバ最適配置は、サーバ性能やサービス形態に強く依存する問題であり、今後詳細な検討が必要である。ダウンロード型サービスの効率の検討には、ファイル転送にかかる時間（パス / サービス保持時間）とパス切替時間も重要なファクターである。すなわち、効率的な運用のためには、パス保持時間に対しパス切替にかかる時間が十分短い必要がある。光スイッチの切替時間は実現技術に依存するが、MEMS のファイバスイッチでは数十ミリ秒オーダー、Si フォトニクススイッチではマイクロ秒からサブミリ秒オーダー、LCOS の WSS では数十ミリ秒オーダーである。パス切替に要する時間が数百ミリ秒オーダーであると想定すると、数分以上の保持時間（ファイルサイズ約 40 GByte 以上）をもつサービスが DOPN の対象サービスとして適していることになる。もし、パス切替に要する時間がサブミリ秒オーダーになれば、100 MByte 程度のファイル転送（パス保持時間が数秒）も DOPN のサービス対象となり得る。

3.2.3 ネットワーク規模

ネットワーク全体で収容されるユーザー数は、各ネットワークが幾つのノードまたは端末から構成されるかによ

表1 ネットワークトポロジパラメータ一覧と収容ユーザー数5184万時の数値例

	表記法	数値例
コアネットワークのノード数	n	25
カテゴリコアネットワークのノード数	j	10
カテゴリネットワークのノード数	k	10
各カテゴリネットワークから上流のカテゴリコアネットワークに接続するファイバ数	k_c	1
グループ中の波長バス端末数	$m(1-x)$	256 ($m=768, x=2/3$)
グループ中のサブ波長バス集約ノード数	mx	512 ($m=768, x=2/3$)
サブ波長バス集約ノードあたりサブ波長バス端末数	i	40
ファイバ当たりの波長数	w	80
波長バスユーザーの伝送レート	B_w	40 Gbps
サブ波長バスユーザーの伝送レート	B_s	1 Gbps
サブ波長バス端末総数	$ijkmnx$	
波長バス端末総数	$jkmn(1-x)$	

る。ネットワークトポロジの設定に必要なパラメータの一覧および収容ユーザー数の数値目標を達成する数値例を表 1 に示す。本数値例では、1 グループ NW につき約 2 万ユーザー端末、1 カテゴリ NW につき約 20 万ユーザー端末が収容される。

3.2.4 各ネットワークノードの詳細

前述のとおり、各ネットワークは役割や集約されるトラフィック量が異なるため、ネットワーク毎に適した取り扱いパス粒度 / ノード構成を採用する必要がある。各ネットワークで使用されるノードについて詳細を述べる。

グループ NW におけるサブ波長バス集約ノードは、 i 個のサブ波長バスを 1 本の波長バスに集約 / 多重化する機能を持つノードで、ここでは ODU 信号多重化機能（マックスポンダ）の使用を想定している。また、 $B_w \geq iB_s$ とすることで、グループ NW でのオーバーサブスクリプションを回避する。

カテゴリ NW のノードは図 4 中に示す多粒度集約ノードである。本ノードのダウンリンク側は、 m 個の波長バスポートを有し、一つのグループ NW を収容する。アップリンク側は $k + k_c$ 個のファイバポートを有する。このうち k ポートは自カテゴリ NW 内折り返し用ポートであり、上流ネットワークへの接続ファイバ数は k_c 本である。すなわち、オーバーサブスクリプションは m/wk_c で表され、表 1 の数値例では 9.6 となる。本ノードは、 $m \times 1$ 光カプラ、 $(k + k_c) \times 1$ 光スイッチ、スルーポート $imxB_s$ のサブ波長バススイッチ、波長可変光フィルタ (TF: Tunable optical Filter)^{用語 4} から構成される。波長バス粒度からファイババス粒度への多重化を、ポート・波長・帯域に無依存な光カプラを用いて行うことで、フレキシブルグリッド接続に対応する。

カテゴリコア NW におけるノードは、波長クロスコネク

とサブ波長クロスコネクタから構成される2階層ノードである(図4)。各ノードにはカテゴリNWから平均的に $(1-x)wkk_c$ 本の波長パス、 iw_xkk_c 本のサブ波長パスが接続される。これをすべて波長パスグルーミング/サブ波長パスグルーミングするには、波長パススイッチ部のポート数として $kk_c + \lceil xkk_c \rceil$ ポート、サブ波長パススイッチ部のスルーポートとして $iw_xkk_c B_s$ が必要となる。

コアNWにおけるノードはファイバスイッチ、波長スイッチ、サブ波長スイッチから構成される多粒度多階層ノードである(図4)。コアNWではトラフィックはすでに十分集約され、またカテゴリコアNWにおけるグルーミング処理により宛先ごとに可能な限りまとまっていると考えられ、主な切替はファイバパス単位で行われると想定できる。グルーミングが十分でなかった場合には、波長パスおよびサブ波長パスのスイッチを用いたグルーミングをコアNWでも行う。各多粒度多階層ノードに必要なスイッチのポート数について、3.3節で検討する。

3.2.5 ネットワークトポロジのバリエーション

図4に示すネットワークトポロジのバリエーションとして、地理的条件に応じコアNWについて $N \times N$ の格子型でなく、 $N \times M$ のラダー型やその他の非対称なトポロジを用いる等の変更が考えられる。あるいは、3.2.2項で触れたコンテンツサーバ配置に応じたバリエーションも考えられる。コンテンツサーバ配置方法に応じ、カテゴリNWおよびカテゴリコアNWの部分的な変更やノード構成の細かな調整が必要になる。しかし、ネットワークの階層数の増減を伴うような抜本的な変更は困難である。すなわち、層を減らすことはスイッチポート数の観点から困難であり、層を増やすことはノード数の増加、ひいては機器コストと消費電力増加につながり賢明ではない。図4に示すネットワークトポロジと抜本的に異なる構造でDOPNを実現するには、収容ユーザー数や通信容量についての目標変更、あるいは光スイッチポート数拡大等、デバイス技術の飛躍的な向上等の要求条件の変化が必要である。例えば、数百ポート規模の波長選択スイッチが実現されれば、波長パスグルーミングが容易になり、グルーミング処理のためのカテゴリコアNW層の簡略化、あるいはコアNWとカテゴリコアNWとの統合が可能になり、ネットワークの階層を削減できる可能性がある。

3.3 コアNWの光スイッチポート数とサブスライバ数

カテゴリNWおよびカテゴリコアNWは、ファイバ接続が単純なツリーおよびスター構成のためパスの経路が一意に決まり、また、自ノードに属する端末のトラフィックのみを扱えばよい構成である。このため、各ノードで必要となるスイッチのポート数はトラフィック分布によらず、各ノード

に収容/集約されるサブスライバ数とオーバーサブスクリプション率にのみ依存して決定される。一方でコアNWはメッシュトポロジのため、パスの経路候補が複数存在する。さらに、自ノードに属さない端末のトラフィック(トランジットトラフィック)も扱う必要があるため必要となるスイッチのポート数はトラフィックパターンに依存し、確定的に決めることが不可能である。

コアNWで必要となるスイッチポート数を次のように試算した。トラフィックパターンとしては一様分布を仮定し、グルーミング操作については全デマンドがファイバ単位で切替可能という理想的状況を仮定する。この条件下で、必要スイッチポート数を最小化する最適経路割り当ての結果を図7に示す。グラフ上方の横軸は、 n 以外のパラメータについて表1の数値例を用いた場合のユーザー収容数である。パラメータ n については $9(3 \times 3$ トポロジ)から $64(8 \times 8$ トポロジ)までの値を用いて計算を行っている。

この論文で検討しているDOPNトポロジのコアNWでの必要収容ファイバパス数は jnk_c で、表3の数値例では2500本である。グラフでは2500本のファイバパスを収容するのに、 5×5 トポロジで450ポートのスイッチが必要となっている。500ポートを最大とすると、残り500ポートをグルーミング操作に、すなわち、波長パススイッチ部との接続に使用可能となる。さらに多くのグルーミング操作が必要な場合には、ファイバパススイッチポート数を増加させる、すなわち、スイッチの多段構成を拡張する必要が生じる。グルーミング操作に必要なポート数はトラフィックパターンとパス収容アルゴリズムに強く依存し、これらの検討は今後の課題である。しかし、消費電力の観点では、後述の通りコアNWが占める消費電力の割合は少なく、コアNWで光ファイバスイッチ使用数が増加しても総消費電力には大きく影響しない。

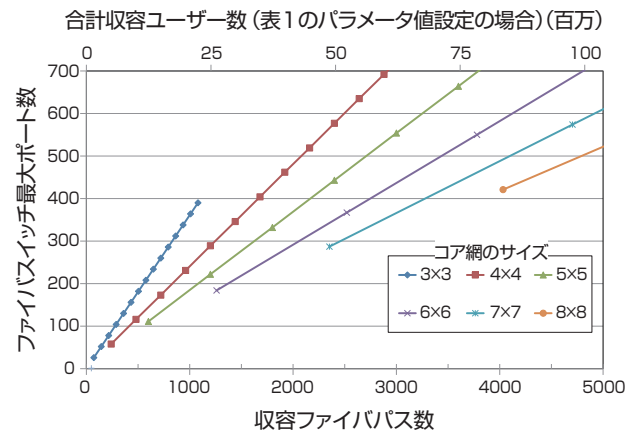


図7 最適経路割り当てによるコアNWで必要となる光スイッチポート数の試算結果

4 光信号伝送距離の検討

光信号は、光ファイバや光スイッチ等、各光デバイス通過時にパワーの減衰が生じる。この減衰を補償するため、一定の伝送距離毎、あるいは一定の光信号パワー減衰量毎に光増幅器を配置する必要がある。長距離通信に主に使用されている1.55 μm帯の光信号の増幅には、一般にエルビウム添加光ファイバ増幅器(EDFA)が使用されている。EDFAを通過した光信号は、光信号パワーが増幅されると同時に、EDFAから発生する自然放出光が付加され信号にとっての雑音となる。何段もEDFAを経由する際にはこの雑音が累積し、信号対雑音比が低下する。適切に信号を受信するためには、信号対雑音比が一定以内のうちに信号再生中継を行う必要がある。ここで必要となる信号再生の頻度、すなわち、EDFA通過による雑音の累積具合は、EDFAの雑音特性や利得、入力光パワーに依存する。一般に、利得が大きなEDFAを低頻度で使用すると累積雑音は大きくなり、利得が小さなEDFAを高頻度で使用すると累積雑音は小さく抑えられる。

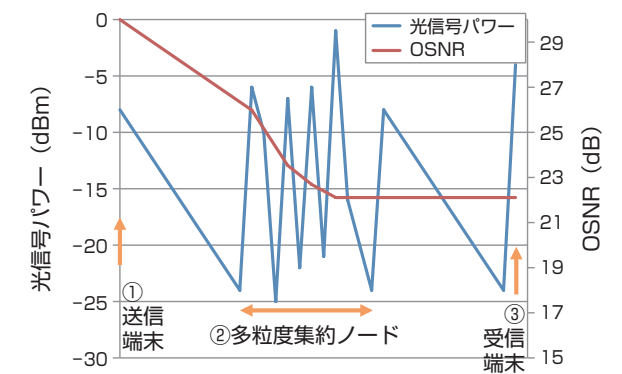
ダイナミック光パスネットワークにおいて必要となる信号再生器および光ファイバ増幅器の数と配置箇所について、

表2 各光デバイスの損失想定値

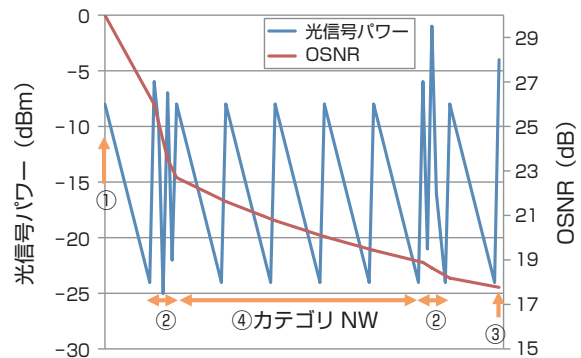
項目	損失	
光ファイバ	0.4 dB/km	
多粒度集約ノード	1×10 スイッチ	4 dB
	1×768 光カプラ	30 dB(※-15 dB 毎に増幅)
	波長可変光フィルタ	4 dB
2階層ノード	1×17 波長選択スイッチ	6.5 dB
多粒度多階層ノード	3-stage 500×500 マトリクススイッチ	24 dB(※stageの間に増幅)
	1×35 波長選択スイッチ	6.5 dB

光信号対雑音比(OSNR)を試算し検討した。試算に用いた光デバイスの典型的損失値を表2に示す。なお、使用するEDFAのノイズフィギュアは6 dB、雑音帯域は12.5 GHzとし、各ネットワーク部におけるファイバ長は図4に示す値とした。

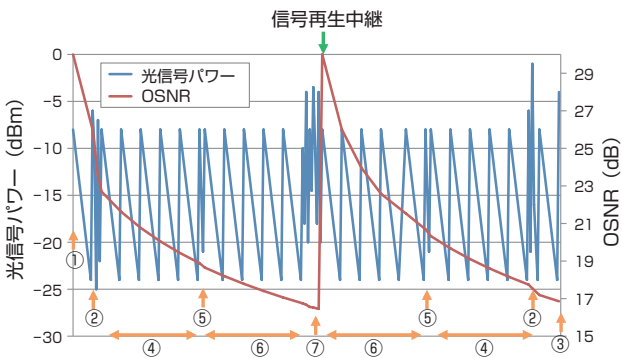
試算結果を図8に示す。レベルダイアグラムは、各箇所配置したEDFAへの入力光信号パワーと利得を示している。多粒度集約ノードでは、分岐数の大きなカプラ(CPL)を用いるため、大きなロスが生じる。ここでのOSNR劣化を低減するため、分岐の途中にEDFAを配置している。



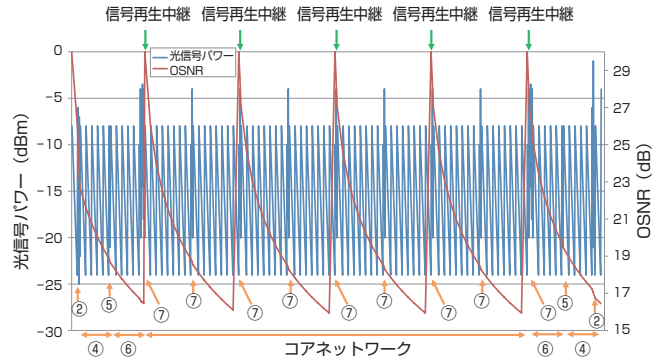
(a) 同一グループ内パス



(b) 同一カテゴリ内・他グループ間パス



(c) 他カテゴリ間・同一コアノード内パス



(d) 他コアノード間パス

図8 典型パス経路のレベルダイアとOSNR試算結果

グラフ中の番号は次と対応：①送信端末②多粒度集約ノード③受信端末④カテゴリNW⑤2階層ノード⑥カテゴリコアNW⑦多粒度多階層ノード

また、クロス の 3 段スイッチ構成を想定した多粒度多階層ノードのファイバパススイッチ部においても、OSNR 劣化を防ぐため 3 段スイッチ構成の途中に EDFA を配置している。検討結果から、信号再生器はコア NW のノードに配置する必要があり、光信号がコア網へ入る時、コア網から出る時、コア網伝送中には 2 ノード経由毎に 1 度、信号再生中継をすればよいことがわかった。なお、OSNR 閾値は最近実用化が進んでいるデジタルコヒーレント送受信技術を適用した 100 Gbps DP-QPSK (Dual Polarization Quadrature Phase Shift Keying、偏波多重四位相偏移変調)^{用語 5} の使用を想定し、15 dB とした^{[24][25]}。

5 消費電力試算

3 章・4 章の検討により、ダイナミック光パスネットワークのトポロジにおいて、光スイッチ等パス切替デバイスから信号再生中継器までの主要構成機器の配置箇所と必要個数とが明確化された。各機器の消費電力を総計することにより、DOPN で必要となる総消費電力が試算される。各機器の消費電力について、カタログ等に記載されている値に基づき表 3 に示す値と仮定し、ネットワーク全体の消費電力を試算した結果を図 9 に示す。

試算結果より、DOPN の消費電力は、グループ NW、すなわち、通信端末が支配的であることが示されている。端末速度が一定の場合、総消費電力はサブスライバ数に比例して増加する。サブスライバ数一定として端末速度を増加させた場合、全体のトラフィック量増加に相関し総消費電力も増加する。これは、DOPN がスループットに無依存な光スイッチのみでなく、サブ波長パススイッチや波長パス端末装置 / 信号再生中継器等スループット依存の消費電力特性を持つ機器も使用するためである。

現在の日本のネットワークにおいて、総トラフィック量が 1.9

表 3 消費電力試算における各機器の消費電力想定値

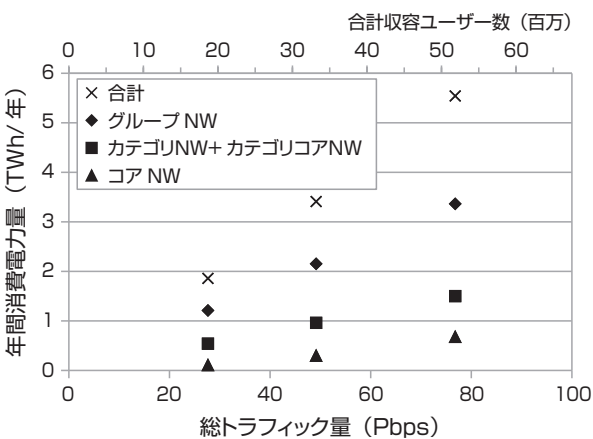
ネットワーク装置	消費電力	備考
単一波長用光ファイバ増幅器	2 [W/span/fiber]	1 スパン 40 km を想定
WDM 対応光ファイバ増幅器	20 [W/span/fiber]	1 スパン 40 km を想定
サブ波長クロスコネク	1 [W/Gbps]	
波長パス端末	1 [W/Gbps]	40 Gbps 以上を想定
サブ波長パス端末	5 [W/device]	5 Gbps 未満を想定
光マトリックススイッチ	0.05 [W/port]	Siフォトニクススイッチを想定
波長選択スイッチ	20 [W/device]	
波長可変光フィルタ	5 [W/device]	

Tbps、総消費電力が ~10 TWh/year とされている^{[3][26]}。DOPN では、消費電力を同程度のみで、4 ~ 5 ケタ以上多くのトラフィックを収容している。本試算には、制御に係る消費電力やネットワーク使用率が考慮されていないが、これらのオーバーヘッドにより 1 ~ 2 ケタの効率低下を見込んだとしても、3 ケタ以上の電力効率改善が可能である。

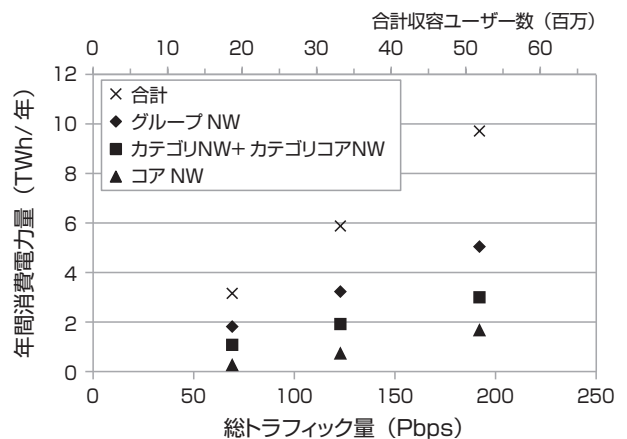
DOPN のさらなる低消費電力化に向けて、通信端末のトランシーバへのスリープ機能導入が挙げられる。各ユーザーの DOPN 平均使用時間を 5 時間 / 日と仮定し、未使用時には端末電力を完全にオフできると想定すると、図 9 の試算に対し 22 ~ 37 % の消費電力削減が見込まれる。通信端末のトランシーバは、複数ユーザーでシェアされる網内のトランシーバに比べ、スリープ機能の導入が容易であると想定される。また、光スイッチおよび WSS の挿入損失改善も重要である。光デバイスの挿入損失が低減されれば、網中で必要となる EDFA 数および信号再生中継器が削減され、特にコア NW の低消費電力化が見込まれる。

6 おわりに

この論文では、ダイナミック光パスネットワークについて、



(a) 波長端点 40 Gbps、サブ波長パス端点 1 Gbps の場合



(b) 波長端点 100 Gbps、サブ波長パス端点 2.5 Gbps の場合

図9 消費電力試算結果

詳細なトポロジとノード構成とを示し、収容ユーザー数、通信帯域、および消費電力の観点から将来の通信インフラ実現の基盤技術としての DOPN の有効性を明らかにした。DOPN 実現に向けては、低損失・コンパクトな光スイッチの開発や、効率的な統合資源管理技術等、さまざまな要素技術の一層の研究開発が必要である。DOPN が対象とするのは、現在通信ネットワークに流れているアプリケーションではなく、将来登場・発展が期待される遠隔診断医療・遠隔教育等を含む高臨場感映像アプリケーションである。真に DOPN が社会に資するためには、先に挙げたネットワークに係る要素技術のみならず、実際に対面するのと遜色ないほどの高臨場感を実現する映像 / 音声技術およびディスプレイ技術から、新サービスを実現するビジネスモデルまで、DOPN を活用する周辺技術への展開も必要不可欠である。以上を踏まえ、今後もデバイスからアプリケーションまでを視野に入れ、将来の通信インフラ基盤技術確立に向けた研究開発を進めていく予定である。

謝辞

この研究は文部科学省イノベーションシステム整備事業先端融合領域イノベーション創出拠点形成プログラムにおける、光ネットワーク超低エネルギー化技術拠点の一環として実施された。本検討において、産総研情報技術研究部門の工藤知宏副研究部門長、岡崎史裕氏、高野了成氏、竹房あつ子氏、谷村勇輔氏を始めとする研究者各位、ならびに協働研究機関・協働企業の皆さまから貴重なご意見を頂いた。ここに感謝の意を表す。

用語の説明

用語1: OSI7レイヤ: 国際標準化機構 (ISO) により策定された、データ通信における通信機能の階層モデルである。OSI参照モデルとも呼ばれる。物理層 (layer-1)、データリンク層 (layer-2)、ネットワーク層 (layer-3)、トランスポート層 (layer-4)、セッション層 (layer-5)、プレゼンテーション層 (layer-6)、アプリケーション層 (layer-7) から構成される。広域網において使われているIPルータはlayer-3の接続・ルーティングを、LAN (Local Area Network) において多く使われているEthernetスイッチはlayer-2の接続・スイッチングを行う通信機器である。DOPNの主要構成要素である光スイッチはlayer-1、あるいはさらに下位の階層 (layer-0と呼ばれることもある) に相当する。

用語2: 波長選択スイッチ (WSS: Wavelength Selective Switch): 基本構成として1入力多出力の光ポートをもつデバイスで、波長多重された入力光信号について、任

意の波長を任意のポートに振り分ける機能を持つ。波長チャンネルの帯域として、50 GHzグリッドあるいは100 GHzグリッドに固定のものと、フレキシブルグリッドと呼ばれる12.5 GHz毎に連続的な帯域を任意に扱えるものがある。

用語3: グルーミング: 小粒度の通信要求をグループ化することで大粒度の通信要求として取り扱い可能にするための処理。ここでは、宛先が同じ複数のサブ波長パスを同一の波長パスに収容することで一つの波長パスとしてスイッチング可能とする、あるいは、宛先が同じ複数の波長パスを同一の光ファイバに収容することで一つの光ファイバパスとしてスイッチング可能とする処理を指す。

用語4: 波長可変光フィルタ (TF: Tunable optical Filter): 透過する光信号の中心波長を変更できる光デバイス。また、中心波長と透過帯域幅とを変更可能な、中心波長帯域可変光フィルタもある。

用語5: DP-QPSK: デジタル信号の変調方式の一つで、四位相偏移変調信号に偏波多重を適用した方式である。2005年以降、スペクトル効率の向上を背景にデジタルコヒーレント光通信技術の進展とともに具現化されてきた。2010年にはOIF (The Optical Networking Forum) にて100 Gbps DP-QPSK光トランシーバーモジュールの標準規格が発表され、現在これに準拠した製品が発売され、チャンネル当たり100 Gbpsの伝送システムの実用化が急速に進んでいる。また、高速デジタル信号処理により伝送線路のさまざまな問題の線形補償を可能にすることから、再生中継無しでの数千km超の伝送も報告されている。

参考文献

- [1] Cisco Visual Networking Index: The Zettabyte Era – Trends and Analysis, http://www.cisco.com/en/US/solutions/collateral/ns341/ns525/ns537/ns705/ns827/VNI_Hyperconnectivity_WP.html
- [2] 平成24年版情報通信白書(総務省) 第2部 情報通信の現況と政策動向 第5節 電気通信事業, <http://www.soumu.go.jp/johotsusintokei/whitepaper/ja/h24/pdf/index.html>
- [3] 総務省: 我が国のインターネットにおけるトラフィック総量の把握(平成25年3月15日報道発表), http://www.soumu.go.jp/main_content/000211328.pdf
- [4] D. Qian, M. Huang, E. Ip, Y. Huang, Y. Shao, J. Hu and T. Wang: 101.7-Tb/s (370×294-Gb/s) PDM-128QAM-OFDM transmission over 3×55-km SSMF using pilot-based phase noise mitigation, *Optical Fiber Communication Conference and Exposition (OFC/NFOEC), 2011 and the National Fiber Optic Engineers Conference*, PDPB5 (2011).
- [5] R. S. Tucker: Scalability and energy consumption of optical and electronic packet switching, *IEEE Journal of Lightwave Technology*, 29 (16), 2410-2421 (2011).
- [6] W. Shen, T. Yamamoto, Y. Tsukishima and N. Takahashi: Power-aware traffic engineering for multi-layer networks with partial deployment of TDM-XCs, *European Conference and Exhibition on Optical Communication (ECOC)*,

Mo.1.D.5 (2010).

[7] B. Puype, D. Colle, M. Pickavet and P. Demeester: Energy efficient multilayer traffic engineering, *European Conference and Exhibition on Optical Communication (ECOC)*, Paper 5.5.2 (2009).

[8] J. Baliga, R. Ayre, K. Hinton, W. V. Sorin and R. S. Tucker: Energy consumption in optical IP networks, *IEEE Journal of Lightwave Technology*, 27 (13), 2391-2403 (2009).

[9] K. Ishii, F. Okazaki, J. Kurumida, K. Mizutani, H. Takeshita, K. Kobayashi, D. Mochinaga, S. Namiki, K. Sato and T. Kudoh: Unified approach of top-down and bottom-up methods for estimating network energy consumption, to appear in *European Conference and Exhibition on Optical Communication (ECOC)* 2013.

[10] 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).

[11] 来見田淳也, 並木周: 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 -, *Synthesiology*, 4 (2), 100-110 (2011).

[12] K. Yamada, Y. Tsukishima, K. Matsuda, M. Jinno, Y. Tanimura, T. Kudoh, A. Takefusa, R. Takano, and T. Shimizu: Joint strage-network resource management for super high-definition video delivery service, *Optical Fiber Communication Conference and Exposition (OFC/NFOEC) and National Fiber Optic Engineers Conference*, JWA1, (2011).

[13] アカマイ ホワイトペーパー「インターネットの現状2012年第2四半期」(http://www.akamai.co.jp/enja/html/perspectives/whitepapers_content.htmlからユーザー登録をすることにより無料で入手可能)

[14] ITU Telecommunication Standardization Sector: Optical transport network (OTN), *ITU-T Rec. G.709/Y.1331* ed., Apr. 2011

[15] O. Tamm, C. Hermsmeyer and A. M. Rush: Eco-sustainable system and network architectures for future transport networks, *Bell Labs Technical Journal*, 14 (4), 311-327 (2010).

[16] K. Sato and H. Hasegawa: Prospects and challenges of multi-layer optical networks, *IEICE Transactions on Communications*, E90-B, 1890-1902 (2007).

[17] X. Cao, V. Anand and C. Qiao: Waveband switching in optical networks, *IEEE Communications Magazine*, 41 (4), 105-112 (2003).

[18] 総務省統計局: 日本統計年鑑第2.2節 世帯, <http://www.stat.go.jp/data/nenkan/02.htm>

[19] 総務省統計局: 平成21年経済センサス-基礎調査 事業所に関する集計, <http://www.stat.go.jp/data/e-census/2009/index.htm>

[20] C. Clos: A study of non-blocking switching networks, *Bell System Technical Journal*, 32 (2), 406-424 (1953).

[21] Finisar Corporation, Press Release. (Sept. 13, 2011), available online: <http://investor.finisar.com/releaseDetail.cfm?ReleaseID=604799>

[22] ITU Telecommunication Standardization Sector: Spectral grids for WDM applications: DWDM frequency grid, *ITU-T Rec. G.694.1* ed., Feb. 2012

[23] 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, *European Conference and Exhibition on Optical Communication (ECOC)*, Mo.2.K.3 (2011).

[24] H. Sun, J. Gaudette, Y. Pan, M. O'Sullivan, K. Roberts and K. Wu: Modulation formats for 100Gb/s coherent optical systems, *Optical Fiber Communication Conference and Exposition (OFC/NFOEC) and National Fiber Optic Engineers Conference*, OTuN1 (2009).

[25] J. Faure, B. Lavigne, C. Bresson, O. Bertran-Pardo, A. C. Colomer and R. Canto: 40G and 100G deployment on 10G infrastructure: market overview and trends, coherent versus conventional technology, *Optical Fiber Communication Conference and Exposition (OFC/NFOEC) and National Fiber Optic Engineers Conference*, OThE3 (2010).

[26] 由比藤光宏, 西史郎: ブロードバンドネットワークの電力消費量の試算, 電子情報通信学会ソサイエティ大会, BS13-5 (2008).

執筆者略歴

石井 紀代 (いしい きよ)

独立行政法人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光信号処理システム研究チーム、研究員。2008年名古屋大学大学院工学研究科博士前期課程修了。2011年同博士後期課程修了。同2008-2011年日本学術振興会特別研究員。2011年より現職。光ファイバ通信技術分野において、システムからネットワークにわたる研究開発に従事。並木、来見田と議論しながら、DOPNトポロジーの詳細を検討し、この論文ではすべての章を執筆した。



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ンクス研究センター光信号処理システム研究チーム、主任研究員。1998年大阪電気通信大学大学院工学研究科修士課程修了。2008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ビス校を経て2009年より現職。光ファイバ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。この論文では実用的なシステムの観点からDOPNの概要を検討した。



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ンクス研究センター、研究センター長、兼職、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。2013年より現職。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、電子情報通信学会通信ソサイエティ副編集長、OSA Optics Express誌のAssociate Editorを務め、現在、Optics ExpressのAdvisory Editor。理学博士。アメリカ光学会(OSA)フェロー。この論文ではDOPNの全体像を検討した。



査読者との議論

議論1 全般

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、近未来の情報通信ネットワークの隘路となる通信大容量化に伴う消費電力の著しい増大に対処するために考案した方式であるダイナミック光パスネットワーク（DOPN）に関して、そのトポロジ構成を検討してその有効性を明らかにしたもので、論理的にも明確で有意義な内容の論文と考えます。またその論文構成も、シンセシオロジー誌に掲載するのにふさわしい論文であると言えます。

議論2 ネットワーク構造について

コメント（坂上 勝彦：産業技術総合研究所・研究環境安全本部）

この研究は貴研究チームが取り組んでいる DOPN を、我が国の現実的な規模に適用するためのネットワークアーキテクチャに対する精密な検討であると理解しました。ただし、3.1 節でその要求条件が仮定され、3.2 節でいきなり検討対象として 4 階層からなるトポロジが示されています。このトポロジはとても合理的なものであり異論があるわけではありませんが、シンセシオロジー誌では、どのような思考過程や検討結果を経てこのトポロジに至ったのかの議論を書き下す必要があると考えます。適切な章の中で記述をお願いします。

回答（石井 紀代）

トポロジ検討の際の一番の課題は、数百ポートのスイッチを主要構成要素に、数千万ユーザーを相互接続するところにあります。また、ユーザーから送出されるトラフィック量が伝送路（光ファイバ）容量に比べ $1/80 \sim 1/6400$ 以下と小さいため、伝送路使用効率向上のためにユーザー端末からなるべく近い地点でトラフィックを集約する必要があります。既存網との親和性のみならず、ポート数制限とトラフィック集約の点からもフラットなネットワークトポロジによる DOPN 実現は困難で、ユーザー端末をグルーピングして階層的に接続する多階層トポロジが必要となりました。多階層ネットワークトポロジでは、少ない階層のシンプルな構成が望ましく、トラフィック集約階層（最下層）と長距離パス設立階層（最上層）の 2 階層以外に、どのような役割で何階層のネットワークが必要になるかがポイントでした。トラフィック集約について、ユーザーのパス粒度に応じ、サブ波長パスを波長パスへ、波長パスをファイバへと順次集約することとしました。集約を 2 段階に分けたのは、よりユーザーに近い位置でサブ波長パスから波長パスに集約することで、伝送路の使用効率を向上させるためと、ファイバ容量に集約する階層において必要となるサブ波長パススイッチのポート数を削減するためです。ターゲットとするユーザー数とユーザーあたりの帯域を考慮すると、最上層ネットワークに集約されるトラフィック容量は膨大となります。最上層ネットワークでは、波長スイッチより大きなポート数を想定可能で、より大容量を収容可能な光ファイバスイッチの使用が必須です。すなわち、ファイバ単位で切り替えられるほどに波長パス・サブ波長パスが整理された状態で、最上層ネットワークに接続する必要があります。集約ネットワークの通信ノード構成を定量的に検討した結果、光スイッチのポート数や光カプラのロス観点から、集約ネットワークでは宛先が同じ / 近い通信需要をファイバ容量まで集めるのは困難でした。そこで、集約するネットワークと最上層ネットワークとの間に、グルーミングを行うネットワークが必要になることがわかりました。すなわち、集約ネットワークが 2 層、グルーミングネットワークが 1 層、長距離パス設立ネットワークが 1 層の 4 階層ネットワークです。詳細な数値検討を行い、光スイッチポート数や収容人数の要求条件を満たせることがわかり、図 4 に示すトポロジおよびノード構成となりました。上記議論を 3.2 節に追加しました。

質問（小林 直人）

要素技術 3 のネットワーク構造は、既存のネットワーク構造との類似性や下位層・上位層の制御特性等も考慮されており、妥当だと思います。

われます。ただし、他の選択肢も可能などまだ任意性があると考えてよいのでしょうか。あるとすればどのようなトポロジやノードの可能性が考えられるのでしょうか。

回答（石井 紀代）

この論文で示しているネットワーク構造は、3.1 節で示した目標と要求条件に基づき、妥当性をもとに積み上げたものです。本ネットワーク構造に行きつくまでに、フラットなネットワーク構造を含めさまざまなトポロジの検討を行いました。3.1 節の条件を満たすことはできませんでした。例えば、層を減らすことはスイッチポート数の観点から困難です。層を増やすことはノード数の増加、ひいては機器コストと消費電力増加につながり賢明ではありません。コンテンツサーバ配置のバリエーションや想定トラフィックパターンに応じて、カテゴリ NW やカテゴリコア NW の細かい調整など部分的な変更について、今後検討が必要であると考えております。また、地理的条件に応じ、コア NW について $N \times N$ の格子型ではなく、 $N \times M$ のラダー型やその他の非対称なトポロジを用いる等のバリエーションも考えられます。しかし、抜本的に異なるトポロジで 3.1 節の条件を満たすことは困難で、その場合には、光スイッチポート数拡大などデバイス技術の飛躍的な向上などの要求条件の変更、あるいは収容人数や容量についての目標変更が伴うものと考えております。上記議論について、3.2.5 項を新たに設け追記しました。

議論3 要素技術

質問（小林 直人）

要素技術 1 の光スイッチを始め、この研究では、現状の個別の要素技術の仕様で、DOPN の特性を予測していますが、特にどの部分の要素技術が飛躍的に変化すれば大きくネットワーク特性が改善されるかなどの見通しがあれば教えてください。

回答（石井 紀代）

さらなる低消費電力化の観点では、消費電力の大半を占めているユーザー端末（トランシーバー）でのスリープ機能が挙げられます。グループ網のトランシーバーは大半が単一ユーザーに使用されるため、複数ユーザーでシェアされる上流の網のトランシーバーに比べスリープ機能の導入が容易であると想定されます。各ユーザーの DOPN 平均使用時間を 5 時間 / 日と仮定し、未使用時にはトランシーバー電力を完全にオフできると想定すると、図 8 の試算に対し 22 ~ 37 % の消費電力削減が見込めます。また、光スイッチおよび WSS の挿入損失が改善されれば、必要となる EDFA 数および信号再生中継数が削減され、コア網の消費電力削減につながります。トポロジの観点からは、数百ポート規模の波長選択スイッチが実現されれば、波長パスグルーミングが容易になり、グルーミング処理のためのカテゴリコア NW 層の簡略化、あるいはコア NW とカテゴリコア NW との統合が可能になると考えられます。対象とするサービスの観点からは、波長選択スイッチや光ファイバスイッチの切替速度がサブミリ秒オーダーに向上すれば、保持時間が数秒程度のサービス（HV や 4K の VOD ダウンロード等）も DOPN で効率的に実現可能となり、対象となるサービス領域拡大の可能性がります。本議論について、5 章、3.2.5 項、および 3.2.2 項に追記しました。

議論4 将来のアプリケーションの課題

質問（坂上 勝彦）

DOPN が使われるのは、将来登場・発展が期待される遠隔診断医療・遠隔教育等を含む高臨場感映像アプリケーションであると随所に書かれています。しかし、これらは、現状の IP ルータ網でも実現されつつあり、IP 技術による柔軟性が、L1 スwitch を光にすることによる低電力性・高速性を凌駕しているのが現実であるように思えます。現状の IP ルータ網では破たんするアプリケーションとはどのような規模感の姿なのでしょうか？

回答（石井 紀代）

DOPN がターゲットとする映像サービスの品質として、現在開発が進められているスーパーハイビジョン（SHV）があります。SHV はハイビジョン（HV）の 16 倍の高精細画像で、非圧縮伝送には 72Gbps 以上の帯域が必要となり、現在の日本のインターネット網のピーク接続速度の 40.5 Mbps と比較すると、3 ケタ以上のギャップがあります。DOPN を用いれば SHV の非圧縮伝送に必要な帯域を安定して提供可能です。当然、映像圧縮技術も開発されていますが、実際に対面しているのと遜色ない程の高臨場感を実現するためには、圧縮の適用に限界があり、DOPN でターゲットとしている数 Gbps ～ 100 Gbps 程度の伝送帯域が必要になると考えております。上記議論を第 1 章に追記しました。

質問（小林 直人）

将来のアプリケーションとして映像関連アプリケーションの多数のユーザーを想定していますが、実際にはトラフィック上にはダウンロード・サービスが極めて多く、リアルタイム映像ストリーミングは少ないのではないかと、という予想もありそうです。3.2.2 で「コンテンツサーバを各カテゴリに配備することで、ダウンロード型サービス等でのブロッキング率低減が可能」と記されていますが、その場合コンテンツサーバの数や容量が膨大になり、かえって非効率になるということはないでしょうか。

回答 4（石井 紀代）

ご指摘いただきました通り、コンテンツサーバ設置による消費電力やコストの増大と、トラフィックのローカリゼーションによる網の効率化との間にはトレードオフの関係があります。適切なサーバ配置とトポロジ設計により、ネットワーク資源のみでなくコンテンツ資源も含めて高効率化が可能であると考えています。このトレードオフの最適化

は、ビジネスモデルや資源管理方法とも関連する問題で、今後の課題となっています。コンテンツサーバ配置では、サーバ間接続も重要な課題ですが、これについては多数のユーザーからのリクエストが集約され大容量の需要が発生するため、大容量パスを扱う DOPN で効率的に収容可能です。上記議論について、3.2.2 項に追記しました。

議論5 将来のユーザビリティ

質問（小林 直人）

将来、ユーザーは、既存の IP ネットワークと今回提案の DOPN をシームレスに、違いを意識せずに使いたいと期待するものと思われます。そのようなことは実際に可能でしょうか。あるいは、DOPN 利用の場合は常に光パスを確保するための予約作業が入る可能性があるため、そうなる使い勝手がよくないということはないでしょうか。

回答 5（石井 紀代）

DOPN の運用管理には、ネットワーク資源からストレージ資源まで包括的な予約管理を行う新たな資源管理システムの導入が必要となります。IP 網と DOPN 網との併用の観点では、web やメールは IP 網、高精細 VOD 等の大容量ファイル転送は DOPN といったように、アプリケーションに応じて使用する網を資源管理システムが自動的に選択し、必要に応じて光パスの確保を行います。また、遠隔会議サービス等のように、ユーザーが事前予約を行うことが自然なものについては、ユーザーからのサービス予約に基づき、資源管理システムが光パスの事前予約を行います。この際も、ユーザーが行うのはあくまで遠隔会議サービスの予約であり、光パスの予約は資源管理システムが行うため、ユーザーが DOPN の使用を意識する必要はありません。これを実現する資源管理システムについて、産総研情報技術研究部門と協働して検討を進めています。上記議論について、第 1 章に追記しました。