

低消費電力光パスネットワーク

並 木 周

Ultra-Low Energy Dynamic Optical Path Network

Shu NAMIKI

This article will study a topology of the dynamic optical path network for a given number of ports in an optical matrix switch. The study suggests that a port number around 200 will suffice to accommodate 60 million subscribers in the dynamic optical path network. The total energy efficiency of such a network will be several digits better than the present network.

Key words: dynamic optical path network, optical matrix switch, circuit switch, Green ICT

インターネットトラフィックは、年率40%程度の増加率を示しており、いずれは高精細映像コンテンツの普及などに伴い現在の千倍となるだろう。ところが、そのインターネットを支えるIPルーターは、近年、消費電力限界が顕在化しつつある¹⁾。消費電力を抑え千倍の容量増大を可能とする技術の創出が焦眉の急なのだ。筆者らはその有力な技術候補として、光スイッチを活用するダイナミック光パスネットワーク（以下、DOPN）を提案している^{2,3)}。ネットワーク上で高精細映像のような巨大コンテンツを転送するには、ダイナミックな光回線交換がIPネットワークと好適な相補的關係になる⁴⁾。DOPNは、あくまでもIPネットワークに併設してこそ有効な技術である。

大規模光スイッチは、電気スイッチに対して光信号の伝送レート・フォーマットに無依存であるという利点を有する。特に、伝送レートが100 Gbit/sにも達し、かつ異なる伝送レートが混在するネットワークでは、光スイッチの利点が顕在化する。ところが、光スイッチ技術そのものは、30年も前に提案された概念であるにもかかわらず、いまだ十分な実用化がなされていない。一方で、高精細映像サービスを想定すると、直感的な印象とは異なり、実はそれほど巨大な光スイッチでなくても数千万の加入者を収容できるトポロジーを構成可能であることがわかる。本稿では、どの程度の光スイッチポート数があれば十分なユーザー数を収容でき、全体として持続発展可能といえる省電力を達成できるのか、考察してみることにする。

1. DOPN トポロジーに関する考察

まず、高精細映像サービスの内容を想定して、基本的な前提条件を明確にする。本稿では、2つのサービス形態を想定する。1つはユーザーとサーバーの間で巨大ファイルをやり取りするクラウドサービスなど、もう1つは「遠隔共存サービス」と名付け、ユーザーとユーザーの2点間に対して1本の光ファイバー回線をダイナミックに提供するサービス形態を考える。この形態には高精細なリアルタイム・テレコンファレンスサービスが含まれ、商談、医療行為、教育、福祉、エンターテインメントなどが含まれる。また、この形態は、ユーザーとユーザーではなくサーバーとサーバーへサービスを提供することも可能であり、データセンターとレプリカサーバー間の巨大ファイル転送、放送局間番組配信、高精細映像向けCDN（コンテンツ・デリバリー・ネットワーク）、企業用専用回線なども担う。ネットワークの占有率を考えると、大局の議論には「遠隔共存サービス」のみを想定して話を進めればよいことがわかる。

次に、DOPNの基本トポロジーを想定する。光マトリックス・スイッチ（以下MS）のポート数を変数 m と定義する。また、ユーザーであるエンドホストには、企業やサーバーなどのエンタープライズ・ユーザー（以下EU）と一般個人であるコンシューマー・ユーザー（以下CU）の2クラスを想定する。CUは1本のEUポートを複数で共有する構成を考えることとし、まずEUを収容するネットワーク・トポロジーを考える。光パスは双方向なので、

(独)産業技術総合研究所ネットワークフォトニクス研究センター (〒305-8568 つくば市梅園 1-1-1 中央第2) E-mail: shu.namiki@aist.go.jp

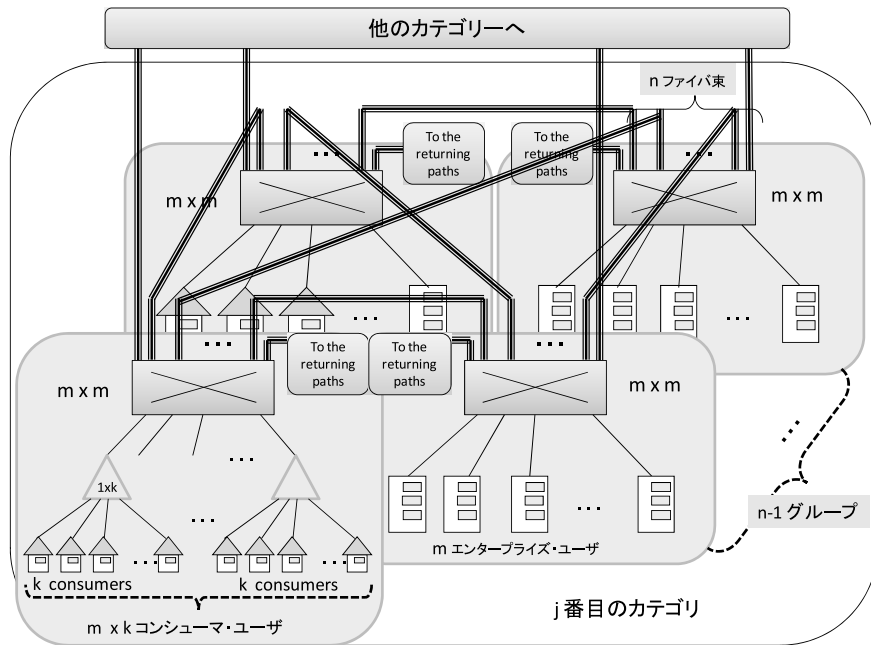


図1 DOPN 基本トポロジー。

2つのパスを常に同期して設定する必要がある。最も基本的かつ単純なトポロジーを図1に示す。 $m \times m$ のMSを $(n-1)$ 個用意し、 $m \times (n-1)$ の加入者を収容することを考える。この、 $m \times (n-1)$ 加入者の集まりをカテゴリーとよぶことにする。カテゴリー内のMS間の接続は、図1の通り、出力ポート側のファイバーを m/n 本ごとに束ねてフルメッシュ構成で互いのMS間を繋ぐことで実現する。すると、各MSからそれぞれ m/n 本のファイバー束が1つずつ余る。これらを $m \times m$ のMSを複数用いて接続することで、ボトルネックなく m 個のカテゴリー間の相互接続ができる。こうして、全EU数は、 $m^2(n-1)$ となる。

変数 n は、1つのMSから別の1つのMSへつながる出線数を決めるという点で、ボトルネックの太さを決めている。これは、入線数 m に対する出線数 m/n のスイッチにおける呼の衝突モデルと見なせる。これは、トラフィック理論にあるErlang B式によって、どの程度のボトルネックまで許容できるか議論することができる。Erlang B式を議論するには、ユーザーからの呼のリクエストの頻度と回線の平均保留(占有)時間を想定する必要がある。ネットワーク設計では、最悪時すなわち最頻時に破綻しないことを考えればよいから、最頻時のサービス利用状況を想定すればよい。EUが業務打ち合わせの目的で光回線による高精細テレコンファレンスを行うとすると、最頻時は入れ替わり回線をずっと使用しつづけると想定できる。ユーザーあたりの最頻時生起呼密度(平均回線占有率)は、100%すなわち1 Erlangである。MSあたり m ユーザーがいるの

で、合計すると m Erlang発生することになるが、接続先はユーザーごとにまちまちであり、 m ポートの出線に均等に分散することを想定すると、特定の出線ポートへの生起呼密度は平準化されて m/n Erlangになり、各MSへの出線数に等しくなる。Erlang B式によれば、生起呼密度 m/n に対する出線数 m/n の場合の呼損率(回線のリクエストに対して使用できない確率)が得られる。

「遠隔共存サービス」では、会議室の予約同様、回線の空き時間を見ながら予定の調整をすると想定できる。その場合、最頻時の午後1時~4時の時間帯に回線が空いていなくても、時間帯をずらせば空いている時間帯を見いだすことが可能となろう。たとえば3回に1回くらいは時間帯をずらしても大きなストレスにはならないと考え、Erlang B式における呼損率はおおよそ0.3くらいまで許容できることに対応する。そこで、生起呼密度 m/n 、出線数 m/n において、呼損率が0.3になる条件を探すと、 $m/n=4$ となる。すると、MSのポート数 m に対して収容可能なEUは、 $m^2(m-4)/4$ で与えられる。次にCUへの拡張を考える。CUはEUほど頻繁に回線を占有することはないと想定して、最頻時でもユーザーあたりの生起呼密度は平均して $1/28$ Erlang(週3回の接続、最頻時午後6時~9時の3時間における平均保留時間15分に相当)とする。統計多重効果を高めるために、たとえば256のCUが8本のエンタープライズ回線をスイッチを介して共有するようなトポロジーを考えると、ちょうどそこでの呼損率がおおよそ0.3となり、EUと同等の使い勝手が得られる。する

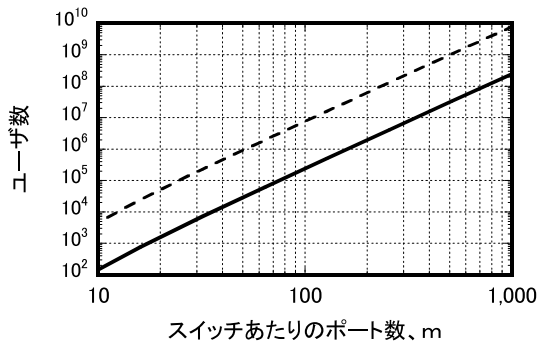


図2 スイッチあたりのポート数に対するユーザ数. EUの加入者数を実線, CUの加入者数を破線で示す.

と, 1 エンタープライズ回線あたり 32 の CU が利用可能という計算となる. 以上より, CU の最大収容可能数は, $m \times m$ MS に対して, $8m^2 (m-4)$ となる.

カテゴリ間をつなぐ回線数について考察しておく. カテゴリ内のユーザ数と総ユーザ数との比は $1/m$ であるため, カテゴリ間を繋ぐリクエストがカテゴリ内を繋ぐ回線の $1/m$ であればよいことになる. このことは, 私たちが一生涯まったく電話をかけることのない相手の数を想像すれば, それほど無理がないといえよう.

2. 光パズネットワークのスケラビリティと超低消費電力性

図2に, すべてのユーザがEUである場合と, すべてのユーザがCUである場合の, 加入者数とポート数の関係を示す. ユーザ種類の配分にもよるが, 目標CU数を6000万世帯とすると, 200程度のポート数を有する光スイッチがあれば構成可能であることがわかる. この場合に必要光スイッチ数は数百万台となるので, 量産性, 低コスト性, 集積性を兼ね備えた光スイッチ技術が希求されることになる. MEMS⁵⁾ もシリコンフォトニクス・スイッチ⁶⁾ も, 200ポート程度であれば, 課題はあるものの実用化を狙える. 特にシリコンフォトニクスをベースとした光スイッチは, 材料の性質が有望であり, 今後の研究開発が期待される.

次に, ネットワーク全体の消費電力について考える. 材料特性から推論して, MEMSもシリコンフォトニクスも, 消費電力は200ポート程度であれば100Wを十分下回る. 重要なのはむしろ, 光スイッチの光学的損失を補う光増幅器の消費電力である. ここでは, ポートあたり1台につき消費電力3Wの光増幅器を配置することを考えて, ネットワーク全体の消費電力を計算する. 図3に, その結果を示す. 横軸にはポート数 m に対応したネットワーク全体のトラフィック量を示してある. ネットワーク全体のトラフィック量は, 全EUが平均伝送レート10Gbpsで通

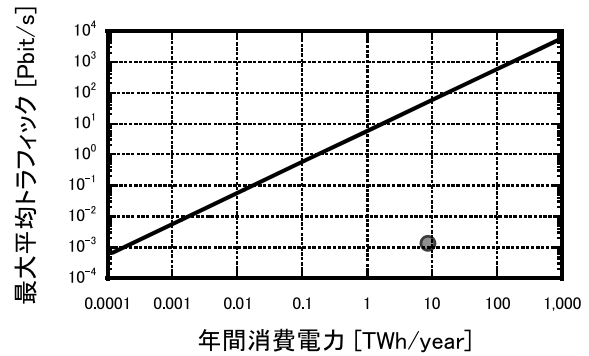


図3 光スイッチ部分の総年間消費電力と最大平均トラフィックの関係. 図中の黒丸は現在の値.

信をしたときの総トラフィックとして計算した. 同図に, 現在のインターネットのトラフィックとルーターの総消費電力を合わせてプロットした. この結果は, 非常に興味深いことを示唆している. すなわち, 理想的なDOPNは, 現在のインターネットに対して5桁も優れた電力効率を実現できる可能性を秘めている. もちろんこの図は, 現状のインターネットを置き換えて電力消費を劇的に低減できるということではない. 光パズネットワークがIPネットワークと併設して持続的発展可能な社会を生み出す新しい技術となり得ることを示唆している.

本稿では, あくまでも仮説検証的な考察であるが, 200×200程度のMSでも大規模な光ネットワークを構築できる可能性を指摘し, さらに, 従来型ネットワーク技術に比べ同等の電力消費にて桁数大きいトラフィックを収容できる可能性を指摘した. 具体的な実現手段や研究課題に関する考察は誌面の関係上別の機会に譲るが, 筆者は, 「光ネットワーク超低エネルギー化技術拠点³⁾」の運営に参加している. このような活動をさらに広め, 光パズネットワークの可能性を提案したい.

文 献

- 1) 挾間壽文, 石川 浩: “ネットワークトラヒックと電力消費の動向”, 電子情報通信学会誌, **93** (2010) 649-653.
- 2) S. Namiki, *et al.*: “Challenges for the future networks and enabling photonic technologies,” *OECC 2009*, FT2 (Hong Kong, 2009).
- 3) <http://www.aist-victories.org/>
- 4) S. Shioda and S. Namiki: “Fundamental studies on ultra-high-speed optical LAN using optical circuit switching,” *Photonics Network Commun.*, **19** (2010) 32-41.
- 5) S. Ide, *et al.*: “High-speed 80×80 MEMS optical switch module with VOA,” *ECOC 2003*, MO3.5.1 (Rimini, 2003).
- 6) Y. Shoji, *et al.*: “Low-crosstalk 2×2 thermo-optic switch with silicon wire waveguides,” *Opt. Express*, **18** (2010) 9071-9075.

(2010年6月3日受理)