

SEMINAR REPORT

ネットワークを革新する フォトリックネットワーク開発



超高速フォトリックネットワーク
開発推進協議会
技術部会長代理※

名古屋大学大学院 工学研究科
電子情報システム専攻
教授

佐藤 健一 氏

本日は、光ネットワークが将来どの様に進展していくか、どうい
うところを狙い、どのようなインパクトがあるかということに関し
て全体的な話をさせていただきます。

ネットワークを考えるに当たって、インターネットのトラフィッ
クの性質を十分理解している必要がありますので、その話から始
めさせていただきます。

インターネットトラフィックと映像

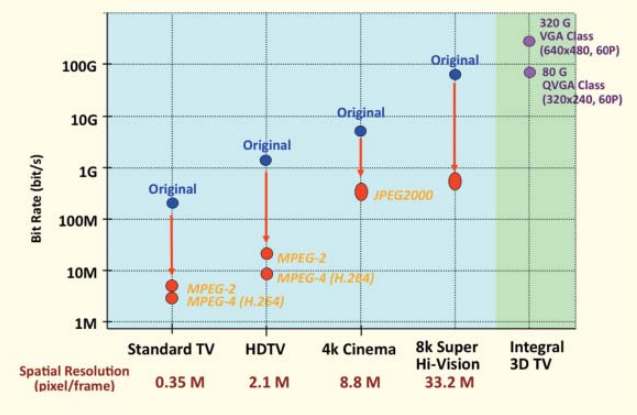
Googleのデータセンターで測定したデータをフローサイズで
見ると、ほとんどが1kB以下です。ところがこれをトータルのバ
イト数の確立分布で見ると、100Mバイト以上のフローに大き
なピークがあります。つまりフロー数で見ると、小さいサイズのフ
ローが大半を占めているのですが、トラフィック量としては、極少
数の大きなサイズのフローが全体のトラフィックの大半占めてい
ることが分かります。

このような傾向は、Googleのデータセンター内のみならず、ネッ
トワークの殆どの領域で観測されます。この傾向は、映像信号が
トラフィックの大半を占めるであろう将来において、増々顕著に
なると予想されます。

図1は「Video Bit Rate ; Source and Compressed」です。

現在我々が日常使っているのは Standard TVとHDTVです。シ
ネマの世界では4Kシネマが徐々に利用され始めています。2020
年からはNHKが8k Super Hi-Visionの試験放送を開始する予
定です。この様に映像は高品質化、即ち高ビットレート化に向
けてどんどん進化しています。最近ではYouTubeでもHDクオリティ

〈図1〉 Video Bit Rate ; Source and Compressed



のものが大分増えて来ていますが、高ビットレートの映像信号が
将来のトラフィックの大半を占めるようになると予想されます。

大画面化は、高品質化、高ビットレート化のドライビング
フォースです。我々は普通のテレビからHDTVになった時に、格
段に美しくなったことに感動しましたが、それがさらに大画面化
した時の映像へのインパクトは非常に大きいものがあります。

映像の品質を決めるには色々なパラメーターがあります。例え
ば、現行のTVのRGBの三原色は人間の見える範囲の一部を
表現していますが、Adobe RGBはそれより少し広い範囲を、さら
に、最近では6バンドの映像システムで、色の再生可能領域をさら
に広げようといった研究が行われています。

映像の他のパラメーターで代表的なものには、解像度を示す
ピクセル数、グラデーション、フレームレート、ビューポイントの
数などがあります。人間の知覚限界を超える映像を再現するた
めには、100 テラビット/秒の情報量が必要になります。

4K Cinemaの2時間のオリジナルコンテンツを10Gb/sのリ
ンクで送ろうとすると、1.2時間程かかります。UHDTVでは14
時間程かかってしまいます。こういったコンテンツの送信には高
速の回線が必要になることが判ると思います。

※平成23年7月15日の超高速フォトリックネットワーク開発推進協議会の総会以降に技術部会長に就任されました。

ノードスループットと電気技術の限界

センサーネットワークを考えた場合、仮に地球の人口70億人の10倍程度のセンサーがあり、各々が同時に1kbit/秒の情報が発生すると、全世界トータルで70Tbit/秒の情報量になります。このようなトラフィックを集めてくるにはインターネットは最適なネットワークです。このような状況で光技術は大量のトラフィックを転送するために、ネットワークの内部で主に使われることになります。

一方、超高精細の映像コンテンツを考えると、70Tbit/秒というのは高々1,000チャンネル分にしかありません。従って、こういう領域では光のfast circuit switchingが有効となり、その様なサービスを提供するために、光の技術がエンド・エンドまで入ってくることが予測されます。

非常に大きな情報量を送る場合のネットワークの課題を考察します。ネットワークはノードとリンクで構成されています。リンクの光ファイバーの技術革新はめざましく、去年のOFCでは実験値として、1ファイバー当たり69Tbit/秒の伝送が報告されています。

現在最も細径の千芯の光ファイバーケーブルは高々直径23mmしかありません。そうすると、1本の千芯ファイバーケーブルで70Pbit/秒が伝送できることになります。

ノードに千芯のファイバーケーブルが1本入ってきた場合、その容量に比べ、今世界で最も大容量のIPルーターでもスループットは4桁以上小さくなります。また、レイヤ1のODUクロスコネク、光パスクロスコネク、ウエーブバンドクロスコネクなどのスループットもファイバーの能力に比べて非常に小さいと言えます。即ち、ノードの能力拡大が将来の通信では非常に重要になります。

1本のファイバーで考えた場合、例えば10Gbpsを100ch収容すると、その容量は1Tbpsになります。これを40Gbpsに上げると、ルーターのスループットを超えており、100Gbpsに上げればODUクロスコネクの能力も超えてしまいます。即ち、ファイバー1本分の容量もルーティングできないというのが現状です。対策として、ルーターのスループットを上げることが考えられますが、ルーターのスループットは既に飽和傾向にあります。インターネットのトラフィックの伸びは、ルーターのスループットの伸びをはるかに超えています。これは将来の大きな課題です。

光のトランスペアレンシーというのはそういう意味で非常に魅力的で、チャンネル当たりの信号速度の上昇とともに自然にスループットが拡大されます。将来的に非常に重要な技術です。

また将来の課題としてネットワークの電力問題があります。アクセス系、アグリゲーション、バックボーンの消費電力の推移を見ると、現状ではアクセス系がネットワークの消費電力の大半を占めていますが、この部分は年とともにあまり増加しません。問題になるのは年々増加する、アグリゲーション、バックボーンの消費電力です。

図2に「Router Throughput」を示します。

現状のルーターは使用率を下げても電力は下がりません。Offered Load 100%の時の最大電力を1とすると、Offered Load 0%の時でも、電力は0.9程度です。無駄を省いて0.3程度まで下げようという技術開発は進んでいます。これも重要な技術開発ですが、将来的に数10倍、100倍と増えていく電力を削減するための抜本的な解決策にはなりません。

電気の場合は、スループット性能を上げていくにはプロセッサのクロック周波数を上げていくのが常道です。ところがクロック周波数の向上は既に飽和傾向にきています。

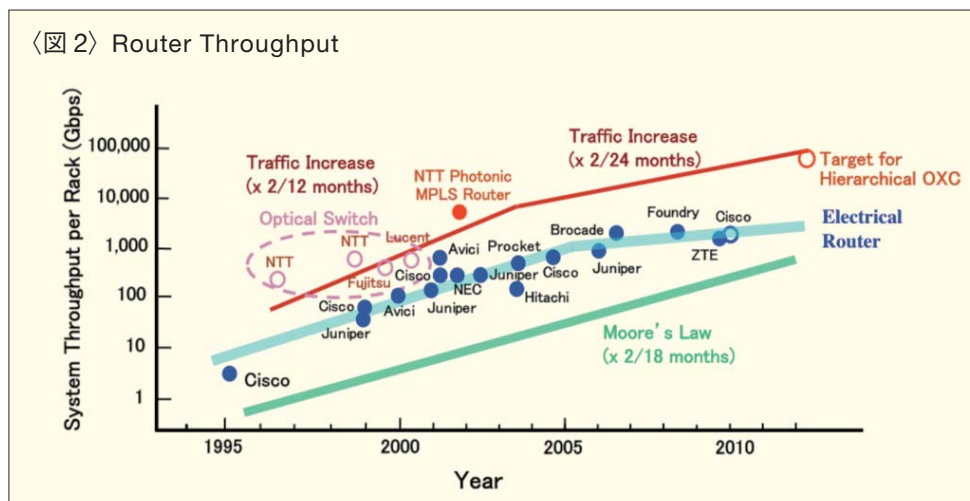
LSIの電圧も重要です。LSIの電圧は徐々に下がってきています。消費電力は電圧の二乗に比例しますから、電圧を下げることは低電力化を図る上で重要な役割を果たします。しかしここにきて下げ止まりが見えてきました。

消費電力に関してはダークカレントも重要です。ゲート長の細線化により漏れ電流が増えてダイナミックなパワーを超えてしまう状況に近づいています。

ルーターだけではなく、CMOSをベースとするすべての通信機器において、スループット当たりの消費電力削減が図られてきたのですが、そろそろ限界にきています。

一方、スーパーコンピューターの世界ではムーアの法則に近い形で現在でも処理能力が拡大し続けています。Top 500について、そのフロップスをプロットすると、飽和傾向は見られません。これはプロセッサを並列化してコア数を増やしてきているからです。2010年の6月頃アメリカのクレイが1位になりましたが、その時のプロセッサが22万コアで、消費電力は7MWです。

コア数と消費電力は強い正の相関を持っています。TOP 10の消費電力の平均は現在3MW程度です。すでに10MWほどの消費電力のものもありますが、いずれこの消費電力の拡大も飽和する時が近いと思います。



The Best Use of Lower Layer Transport

一定消費電力当たりのフロップスは頭打ちになって限界が見えつつあります。ルーターなど一般の機器の場合はそれよりも早く限界が見えています。それを打破するには、通信に関してはより Lower Layer のトランスポートにできるだけ移行することです。

ルーターと L2/L3 スイッチの電力効率を比較すると、スイッチの方が機能がシンプルなため 1桁近く電力効率は良くなります。さらに Lower Layer である ODU のクロスコネクタや SDH のクロスコネクタにすれば、さらに電力効率は良くなります。

グラニュラリティーの点で考えると、ルーター、ラベルスイッチルーター、フロールーターなどは自由な容量を設定できますが、ODU のクロスコネクタ、光のパス、ウエーブバンドなどは飛び飛びのグラニュラリティーしかありません。しかし、ODU のクロスコネクタは最近 ODU flex が標準化され、1.25Gbps 単位の細かいグラニュラリティーが利用できます。光のネットワークも Elastic Optical Path という形でより自由な容量を設定できるというように、フレキシビリティは将来的に拡大する方向に向かっています。

重要なポイントは Lower Layer に移ることです。電気ルーターをノード・バイ・ノードで経由していくものを、光レイヤーでカットスルーすることによって電力効率は 1桁程度改善できます。

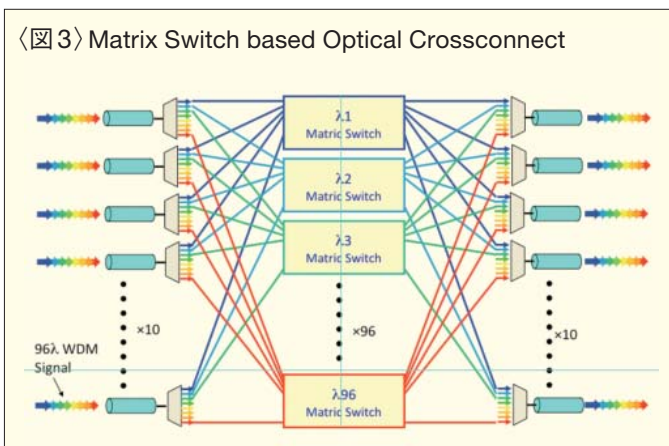
先ほど述べた 72Gbps といった非常にビットレートの高いものは、光のファーストサーキットスイッチングで収容していけば、ユーザインタフェース部にルーターを用いなくて済みますから、消費電力を全体的にさらに削減できます。

Waveband の効果

ウエーブバンドとは光ファイバーの中の波長を束にしてルーティングするものです。1波 1波のルーティングではこれに見合うスイッチ数が要りますが、束にしてルーティングするとスイッチ数が非常に少なくて済みます。

現状では、光の専用線には光の波長貸しとダークファイバーという選択しかありませんが、それにバーチャルファイバー的なウエーブバンドを導入していけば、新たなサービスもクリエイトできます。そういう意味でも非常に有望な技術と考えています。

図3に「Matrix Switch based Optical Crossconnect」の一例を示します。



ウエーブバンドのメリットを、マトリックススイッチを例に説明します。1ファイバー当たり 100波収容している場合、それを波長ごとにスイッチすると波長の数だけスイッチが必要になりますが、10波を1つの束に束ねて、束ごとにスイッチすればスイッチの数は 1/10 で済みます。ただし、それだけでは多少ルーティング能力が落ちるので、波長でグルーミングできる部分を付加すれば効率的になります。どの程度のグルーミングを許容するかは重要なポイントです。

9×9のメッシュのネットワークでウエーブバンドを使うと最大どの程度のコスト削減が可能かを調べた結果、2割程度のグルーミングが出来れば十分だということが判りました。

このグルーミングの値に関してキャリアは気にする必要はありません。自分がこのノードからどれ程のトラフィックを出したいかということだけ知っていれば、ネットワークの設計ツールが自動的にグルーミングの量を設計して必要な機器の大きさを算出してくれます。

マトリックススイッチを用いた光クロスコネクタに関しては、NTTさんと共同でハイヤーオーダーのクロスコネクタを試作して、横須賀地区の現場に敷設された光ファイバを用いて伝送実験を行い、非常に良い結果を得ました。

ウエーブバンドはメッシュだけでなく、リングの接続ノードなどにも非常に有効です。ウエーブバンドをリング間の接続ノードに使うと、数%ルーティング能力が下がりますが、スイッチ規模は 70%程削減できますので、コストの面で非常に有利です。

WSS / WBSS ベース階層化光パスクロスコネクタ

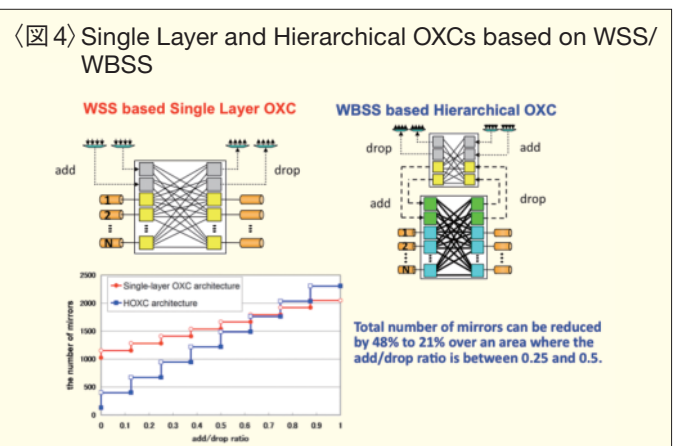
もう一つ重要なものに、WSS/WBSS (ウエーブバンド・セレクトティブ・スイッチ) があります。

図4に「Single Layer and Hierarchical OXCs based on WSS/WBSS」を示します。

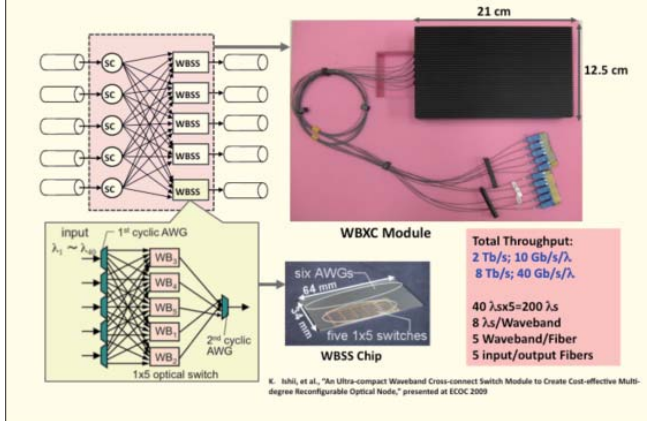
この WSS は 3D MEMS でも LCOS でも、光導波路ではなく空間結線で実現しています。

WSS を使った時もウエーブバンドは有効です。ウエーブバンドのクロスコネクタと WSS のクロスコネクタを組み合わせることにより、小型化が達成できます。

ここで開発した WBSS は小さな集積回路でできています。通常、WSS は大きなモジュールに入っている 3D MEMS 光スイッチや LCOS (Liquid crystal on silicon) というようなもの



〈図5〉 Ultra-Compact Waveband Cross-Connect Switch Module



ですが、それに相当する機能を光の1Chipで実現しています。これは富士通、NTT、大分大学、名古屋大学、NTTコミュニケーションズが連携して受託した NICT 委託研究「高機能フォトニックノード技術の研究開発」において、名古屋大学が開発したものです。

図5はウエーブバンドのクロスコネクタです。

WBSS Chipとカップラーが5組1つのケースに入っています。大きさは通常の WSS 1個とほとんど変わりませんが、クロスコネクタのスイッチ機能全体がこの規模におさまっています。

光クロスコネクタや multi-degree ROADMが広範囲に導入されない大きな原因の1つが、インターフェースの自由度の制約です。CDC（カラーレス、ディレクションレス、コンテンションレ

ス）が実現困難な状況です。1つの方策として、落ちトラフィックに制約を加えること、即ち100%確保しないで限定する方法があります。その他、CDC部を光スイッチで実現することが困難であれば、電気スイッチの利用も考えられますし、さらに細かいグラニュラリティーが必要となれば、ODUのクロスコネクタを利用することができます。また、スルートラフィックを扱う光の部分はウエーブバンドを利用すると非常に小型になります。こういうものを組み合わせて次の世代のシステムが実現されると考えています。

まとめ

将来のトラフィック増は、映像サービスが支配的要因で、その映像の転送には光レイヤーのトランスポートが非常に有効になります。

本日はアクセス系の話は殆どしませんでした。アクセス系の低消費電力化には、やはり光化(FTTHの導入)が非常に有効です。

将来的にボトルネックになるのはアクセス系ではなく、コア/メトロルーターの消費電力です。CMOSの低消費電力化がより困難な状況では、将来的にスループットを2桁、3桁上げようとする、フォトニックネットワーク技術がキー技術となります。

フォトニックネットワークの構築においては、高速の光サーキットスイッチング技術、多粒度光バス技術が今後重要になると考えています。