

基幹光ネットワークの高速化



日本電信電話株式会社
NTT 先端技術総合研究所長
常務理事
萩本 和男 氏

光通信の伝送速度は100メガビットからスタートして、現在はテラビットで、さらにペタビットも間もなく視野に入ってくるようになります。伝送速度の高速化でビット単価が下がっていくというのは、通信を利用する上では非常にありがたいことですが、大容量を利用することで、より信頼性の高い、より利便性の高いというプラスアルファの面も含めて、光通信を展開して行きたいと考えております。少し難しい話にも触れることとなりますが、本日は「基幹光ネットワークの高速化」についてご紹介したいと思います。

光伝送技術の進展

(1) 大容量化への流れ

光ファイバ通信も同軸ケーブルと原理的には同じで、伝送容量を増やせば増やすほどS/Nが厳しくなって中継距離が短くなります。それでもNTTとしては、途中マンホール内に中継器を置かないで、中継距離80kmをキープしながら伝送容量を増やすことが使命でもあり、条件でもありました。図1は我が国の光伝送大容量化の推移を示したもので、1980年から今日まで、約30年間で伝送容量は100メガクラスから始まって、今年は100ギガをベースにした80波の超多重伝送システムが商用になるので、約8テラビットの容量までになりました。

実験レベルで無理やりマルチコアまで行くと、1波でペタビット近くの伝送容量も可能であり、伝送容量の増加は図1に示す通り右肩上がりです。電磁波の周波数である100THzを超えるところまでたどり着きました。私が入社したころのイメージからすれば、はるかに想像できないぐらいの進歩ですが、一番大きなポイントは私自身も深くかかわりましたが、光ファイバ増幅器(EDFA: Erbium-Doped optical Fiber Amplifier)が複数の波長を一括で増幅できるということ、80チャンネルの波長をまとめて増幅できるということ、増幅に必要なパワーである1ワットクラスも出力可能ということで、必要なS/Nを確保しながら

帯域を確保できるという、本当に使ってみて信じられないほどのグッドパフォーマンスをEDFAが提供してきました。その結果、1990年頃から今日に至るまで、ずっと伝送容量拡大という流れが続いております。

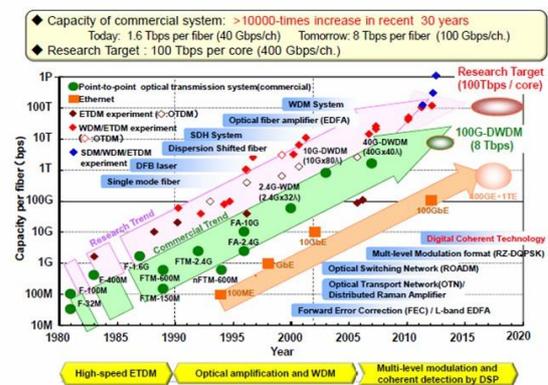


図1 Trends on High-Capacity Optical Transmission in Japan

最近、EDFAの帯域限界が徐々に見えてきて、帯域の利用効率を高めるということになって、0/1のバイナリ伝送から位相情報を使ったQPSK、さらには多値変調へと変調方式が進化して今日に至っています。以上が大容量化への大きな流れの説明です。変調方式進化の過程で既存ファイバを使って伝送容量が益々増えているわけで、太平洋横断ケーブルでもテラビットを超えるようになってきていますが、その間に敷設コストはそれほど変わらないので、伝送容量が増えた分だけビット単価が下がるということになります。一方、ネットワークに関しては、ROADM (reconfigurable optical add/drop multiplexer)などの技術を駆使して光スイッチを光ファイバでリング状につないだ構成を取ることで、日本の基幹ネットワークを作るということも可能になってきております。

アクセス回線の伝送速度が飛躍的に速くなってきていることは、皆さんが普段お使いのパソコンでも実感されることであります。映像のクオリティも向上する一方で、アクセス回線のトラフィックが非常に大きく伸びているというのは、何処の通信事業者でも同じであります。図2はインターネットトラフィックの伸びを示したグラフです。コアネットワークはテラビットクラスの伝送容量を提供する必要があるわけですが、一つ、通信事業者の課題としては、トラフィックは大幅に伸びているけれども収入は増えずにフラットに近い状況で、色々努力して設備コストを下げながら、皆様にネットワークを提供していかなければいけないというのが挙げられます。

- ▶ スマートフォン・高精細映像サービス・クラウドコンピューティング等の普及により、ネットワーク上を流れる情報(トラフィック)は今後も増加。
- ▶ 経済的な通信サービスを提供し続けるためには、高速・大容量で信頼性が高い光通信インフラが必須。

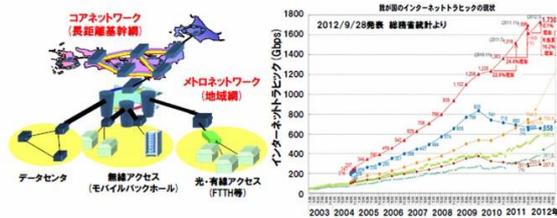


図2 クラウド時代の光通信ネットワーク技術

(2) デジタルコヒーレント光伝送

今日の話としては、「100Gbps のデジタルコヒーレント光伝送」をご紹介します。コヒーレント光伝送方式というのは、無線で普通に使われている位相変調や FM 変調を光通信でも行うということです。皆様方もお聞きになったことはあると思うのですが、1980 年代の中頃に、長スパンの実験が光コヒーレント伝送を使って成功しました。初めて 100 キロを超えるような伝送実験に成功したわけですが、受信感度を高めるということで、即ちコヒーレント検波で感度が上がって距離が延びるといことで、80 年代に研究が盛んに進みました。ただ、局発を使って位相検波や周波数検波することになるので、光の周波数での位相雑音は思ったよりも大きくて、実験上はうまく工夫すればできるのですが、実用システムとしては大きな課題がありました。一方、ファイバ増幅器というのは光直接増幅なので、直接増幅して受信器に入力するか、局発パワーを受信器に入力するか、いずれにしても受信器に多くのパワーを入力して、サーマルノイズに打ち勝つだけの光信号で受信するというのが光受信器の特徴です。

1990 年代はファイバ増幅器で中継して、受信感度も確保していました。今となつては、受信器の感度も少し良くなってきておりますが、それ以上にコヒーレント検波のメリットは、多値変調で周波数利用効率を高めるという点と、別の信号処理によっていろいろ位相が回るとか、要するにファイバ中での分散によって波形ひずみが発生しても、それらをデジタル信号処理で全部キャンセルできることです。例えば、分散値が大きくなってしまふほどファイバで遠くまで送っても、それと同じ分散値をデジタル信号処理でキャンセルし、その結果、距離に依存しないでアダプティブに処理できます。ただし、図3の100Gbps デジタルコヒーレント光伝送方式に示す通り、少し複雑な構造となります。多値になった分だけ変調器も複数並び、局発を受信器の数だけ、この図の例では4つに割って掛け合わせるということで少々複雑になります。

1980 年代から 20 年間に光デバイスも少しずつ集積化技術が進歩してきて、PLC (Planar Lightwave Circuit) 技術により電気と同じように光も処理回路の集積化が実現されています。図3の受信モジュールも PLC でできています。ただ、それ以上に LSI の進歩はすさまじくて、この図の例でいうと、1 億ゲートのトランジスタが搭載されています。その結果、局発の揺らぎも全てデータ信号処理の中で補償するというので、構成としては少し複雑にはなっていますが、ごく普通のレーザー発振器を局発に使って、受信モジュールが構成できるということになります。

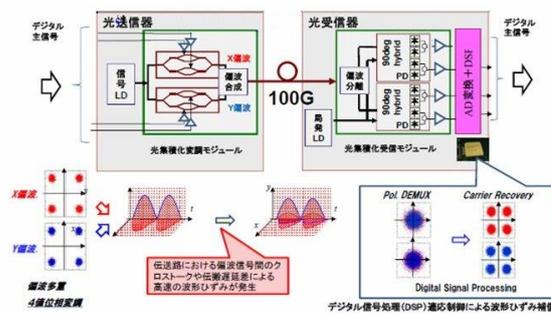


図3 100Gbps デジタルコヒーレント光伝送方式

搬送波位相は、縦軸、横軸に変調信号が分離されないといけないわけですが、QPSK の場合、図3左下のようになつていて、さらに偏波多重しているんで、X 偏波と Y 偏波という 2 つの偏波で伝送すると、ファイバ内で偏波もミックスされたような形になります。ファイバは楕円構造になっていて、偏波の軸によって伝搬特性がぐくわずか違いがあり、それが累積して歪みとなって受信側では区別がつかないようになってしまふますが、これをデータ信号処理でキャンセルすることで、偏波分離、位相分離して図3右下のように復元できるということになります。先ほど申し上げたような PLC 集積技術も使うと、複雑な構成ではあるけれども、それ相応にシンプルで、かつ小さなモジュールになるということです。

これらのモジュールを組み合わせると、程々にコンパクトなサイズにて 100Gbps のチップができて上がりました。図4に製作したチップの性能を示します。これは NTT が技術的に頑張つて、日本の各メーカーにも参加していただき、ノーテルや LG 電子に遅れを取らないように、4 年ほど前に国のご支援もいただいで、政権が変わつても重要な課題だということに継続してご支援いただいで、その結果、世界で初めて分散補償もきちつとできるチップができて上がりました。

Item	Specifications
Modulation format	PDM-QPSK
Line side signal bit rate	127.156 Gbps
Oversampling ratio	2.0
CD compensation	±40,000 ps/nm
Differential group delay (Polarization mode dispersion)	100 ps
Polarization tracking speed	50 kHz
Frequency offset compensation	± 5 GHz
FEC-NCG	10.8 dB @10 ⁻¹⁵ SD-LDPC + Enhanced-FEC
Recovery time	< 50 ms
Process	40nm CMOS



Snowball 作戦:
光伝送技術者が技術を結集
国の支援を受けて、開発規模への
チャレンジを実現
NEL が製造販売を担当
世界シェアを50%越えることを目標
2013年達成の見込み

E. Yamazaki et al., Optics Express Vol. 19, Issue 14, pp. 13179-13184 (2011)

図4 100Gbps デジタル信号処理の性能

そこで、図5にこのチップを使った高速切り替え実証実験の構成例を示します。これはリングネットワークになっており、右回り、左回りで長さが大きく違い、その長さが違うようなところをスイッチングで切り替えたときには分散量も大きく変わってしまうので、再度分散補償器を働かさないといけなくなります。デジタル信号処理でラーニングが必要となりますが、1 回学習させて輻輳値を決めて置きさえすれば、それに合わせてキャンセルできるので、50ms 以内に切り替えて再立ち上げできる、というデモンストレーションの実験です。

めておかないと間隔だけ決めたのでは、位置がずれてしまいます。NTT が ITU-T に諮って、当時の光増幅器の特性を一番把握していたのが NTT というか JAPAN だったので、アンカー周波数に関しては日本の提案が通って決まりました。

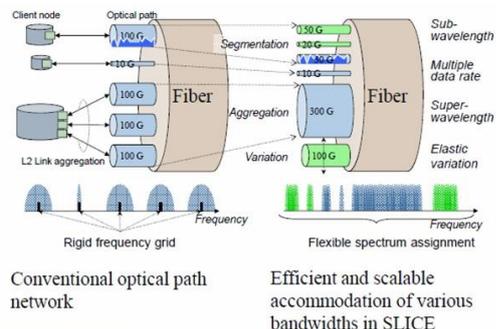


図9 光周波数の有効活用：密に詰める

そのときの光スイッチのテクノロジーは、**LCoS (Liquid Crystal on Silicon)** と呼ばれています。最初にマイクロミラーを使った MEMS 型 (Micro Electro Mechanical Systems) の光スイッチ、光クロスコネクトというのが出現しました。これはプロジェクターに使われているのと同じ技術です。それに対抗する形で、LCoS を使って波長選択をしようというのが図 10 で、最近はこちらの方が流行っています。特に **WSS (Wavelength Selectable Switch)** と、波長選択スイッチで多チャンネル化をしようとすると、どうもこちらの方が分が良さそうで、使われる LCoS の数によってはバンド幅も可変に設定できます。メカニズムの説明に難しいところがありますが、事実動作しております。今ここで表示している液晶のプロジェクターでは画素がきれいに並んでいるわけですが、これを一点に集めてファイバの上で結合させれば、全波長を多重できます。そういうわけで、メカニズム的にはプロジェクターとそんなに変わらない技術を用いています。

- 光帯域可変ROADM/WXC
- Bandwidth variable WSS

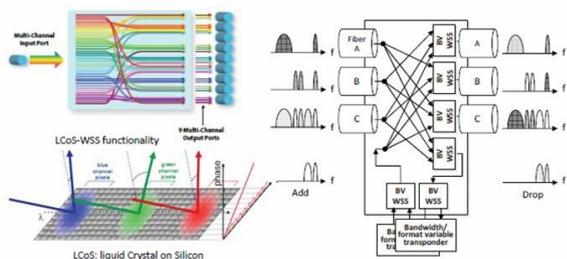


図10 エラスティック光ノードを構成するキー技術

光ファイバが焼き切れる状態、ファイバーヒューズが比較的に起きやすい条件というのは、**2W** ぐらいからです。ワットオーダーのパワーで伝送したいのですが、ファイバ内で徐々に減衰すれば問題ないですが、不純物があって一瞬そこでパワーに変換されてしまうと、本当にマイクロサイズのところで、エネルギーで言えば何千度を超えるような状況が起こり得ます。そこでコアが溶けたりするわけで、いま伝送技術としては **1W** を超えない数 **100mW** で伝送しています。極めて安全な状態で使っていますが、パワーを増やすと伝送の **S/N** は上がりますが、ファイバ非線形の影響が出やすいということと、あまり上げ過

ぎるとコネクタ端面のところに損傷を受けやすいという2つの課題があって、それでマルチコアでやってみようということになったわけです。

グローバル時代の役割分担

無線通信はさらに高速・大容量化へと向かっておりますが、光通信はファイバ内を電磁波が飛び交っているのであって、技術的には無線通信と光通信は極めて近い関係にあります。そういうことなので、今後光と無線の融合はアクセスの領域で一番重要なアイテムになるだろうと思います。無線通信に携わっている方の言によると、**2020~2030** 年頃には固定通信を追い越すことになるだろうとの予測です。技術的には難しいように思いますが、トレンドだけでいうと追い越しかねない勢いです。そこで、無線であれ有線であれ、伝送容量を大幅に増やせる技術が出現して、映像を便利に扱える時代となってきたのですが、コンテンツ、データを扱う側が優位な立場になってきて、ネットインフラを提供する側は振り回されて、いささか苦戦を強いられていると感じております。それでも、ICT を積極的に利用することは今後絶対不可欠なことであり、図 11 に示すように、これからはクラウド型サービスへと急速に移行して行くことになると思います。アクセスの部分はブロードバンドでシームレスになって、データの方は益々データセンターに集約されて仮想ストレージ化される形態になると思います。

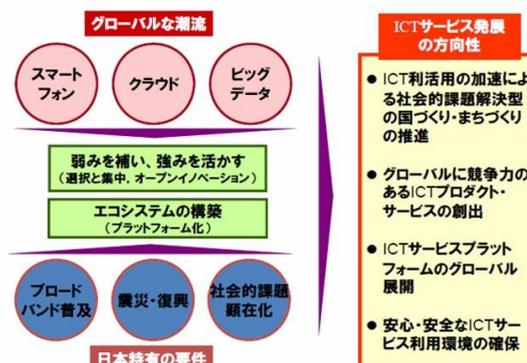


図11 日本のICTサービス発展の方向性

コンピュータ通信の世界では **TCP/IP** が普及して、便利なプロトコルではあるのですが、WAN や LAN で回線交換するにしても、**ATM** のようなパケット交換するにしても、どっちにしてもベストエフォート型の **TCP/IP** でネットワークサービスをそのまま構築することにはならないだろうと思っていました。しかし、LAN 側で展開された技術のコストパフォーマンスが非常に高くボリュームが大きいのと、デジタル技術としての進歩との両方が相俟って、WAN 側でも **IP** を積極的に活用するような状況がコスト面から出現してきました。今のインターネットは利便性の高いネット環境ですが、これをベースにして色々なミッションクリティカルなことをやろうとすると、やはり不安を拭き切れません。それで、医療・教育・行政・その他の実環境をサイバー上に展開するには、ネット側も少し工夫が必要なのではないかということで、新世代ネットワークや、あるいはデータセンターが中心なら、データセンターに適したプロトコルがネットワーク内にも展開されるのではないかと、**OpenFlow** などに取り組んでいます。図 12 は資源の仮想・抽象

化を示す概念図で、また試行錯誤段階ですが、色々な形態があると思いますが、大きなカテゴリーでいうと SDN (Software Defined Network)で、色々なフローをベースにしたネットワーク制御、ファイアネットワークサービスが挙げられます。

- 新世代NWでは最下位/最上位レイヤ双方の多様性両立が重要
- NWとIT資源の仮想・抽象化と、そのモデルの長期的利用
- フレキシブルで且つソフトウェアによる制御・管理 (SDN)

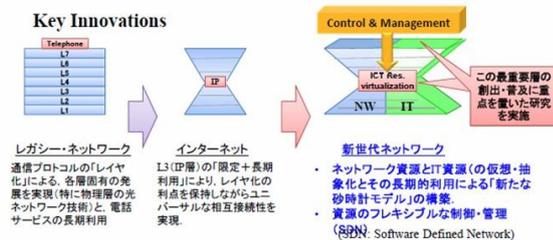


図 12 通信・情報処理資源の仮想・抽象化

日本の課題は、やはり専門家の活用の仕方が足りないということです。シリコンバレーの取り組みには、テクノロジーでも物量でも負けていました。日本は薄く広くという悪平等的な取り組みになってしまうので、もう少し一点重視で取り組んでも良いのではないかと思います。ビジネスと標準化というのは重要な二本柱なのですが、コンセンサスを得るための学会と、リアルビジネスを遂行するマーケットと、これをうまく利益誘導、論理誘導する標準化と、これらをセットで進めないといけない。特に、標準化の方は IEEE が大いに頑張っていて、IEEE はアメリカの学会でアメリカ中心に動くので、我々にとってはアウェーな環境での活動となっている。色々な技術が発生して枠組みも変わっていくので、ビジネスを展開するにしても、テクノロジーを追求するにしても、変化は激しい。しかも、変化が激しいのを追隨していくというよりは、その変化を変えていく側に、決める側に回らないと、ずっと追いかけて回され、振り回され放しになる。できるならば決める側に加わりたいということで、自分たちがカードを持っていて、その上でアメリカと一緒にやらないと、コミュニティーの中にはなかなか入れてもらえないのです。そういうわけで、最初に少しでもリスクを取ってでも無理なことをやってみるというのは、一番安全なやり方なのだと思います。

震災を踏まえて技術ポイントの変化

日本は震災があって世界中から支援を受けましたが、NTT としてもあの東日本大震災は非常に大きな衝撃であり、課題を残しました。日本はどこかで地震が頻繁にあるので、神戸のときも、新潟のときもそうでしたが、色々な地震の経験があって、NTT のビルが地震で倒壊するということは基本的にはありません。今回の地震でもなかったはずですが、津波に関してはコンクリートのビルがあっさり流されたので、とても信じられないほどのパワーでした (図 13 参照)。しかも、本来地震による津波というのは、リアス式の V 字型のところにエネルギーが溜まって海面上昇を招くというのが多いのですが、局所的、かつ広範囲に地震があったので、平面波のような津波が発生して、平坦なところまでも襲ってきました。その結果、色々な電話局がダメージを受けたり流されたりしました。その結果、海底ケ

ーブルもあちこちで切れたし、地上のケーブルもダメージを受けました。津波のダメージとそれに伴って電力の途絶があつて、各局舎のビルの給電ができなくなりそうになって、かなりぎりぎりの状態にまで追い込まれました。何とか電力配給して、3 日間ほどで大概のところは復旧になり、1 ヶ月余りで稼働すべきところは復旧できたと思います (図 14 参照)。

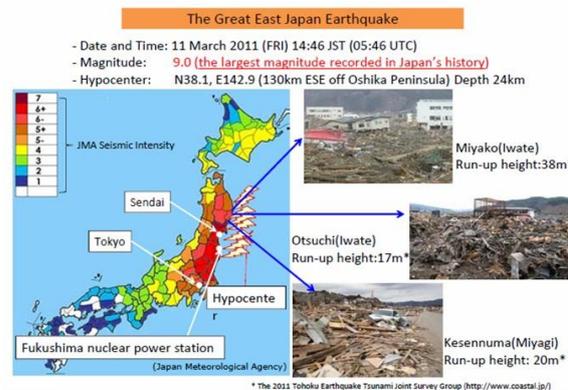


図 13 2011 年 3 月 11 日 東日本大震災の被害の様子

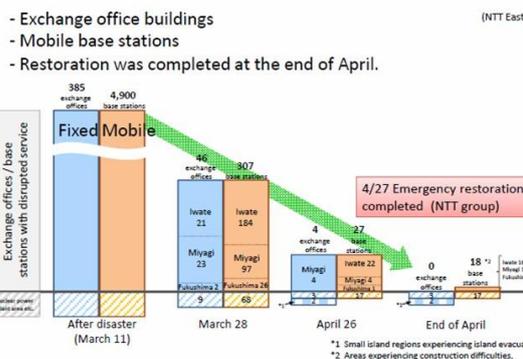


図 14 迅速な復旧活動

橋に架けているファイバが橋ごと流されると切れてします。橋が復旧するのを待ってのファイバの復旧では長い時間がかかるので、まず綱を張って、そこにファイバを引っ掛けてと応急処理をするわけです。例えば福島ルートでいうと、浜通り、中通り、会津側とありますが、浜通りは震災と原発のダメージでなかなか復旧できずに切れたままで、中通りも地震の影響で切れて、会津側だけが生き残っていて、そこで全て会津側に迂回させるということになりました (図 15 参照)。

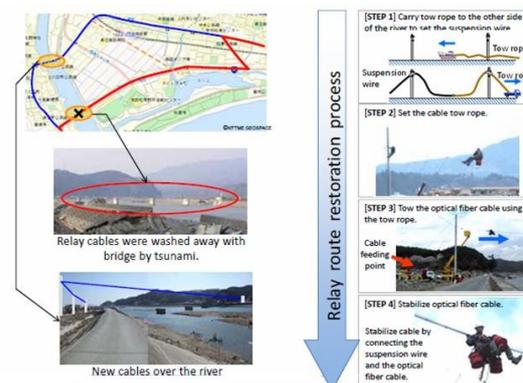


図 15 橋の流出により、ケーブル遮断

しかし、通常リングネットワークというのは、シングル故障に対してはそこが切れても反対側に回避できるということで対応可能なのですが、あの様な広域な震災では面的にダメージを受けるので、単純なリングのアーキテクチャーだけでまとめて一遍に切り替えるのはおおごとで、簡単には復旧できません。それで、もう少しリングを複数化するか、結果的に言うともルートになるかもしれませんが、冗長な形のルートとかにせざるを得ないということになります。

大きなダメージを受けたとしても、受けたところはどうにもならないもので、ダメージが全体に波及しないようにすることの方がより大事です。フィジカルな問題はルート分散などの方法がありますが、ネットワークリソース、特にサーバ系のリソースでは、仮想化して、できるだけ分散配置して、ダメージを受けたところが直ちにシステムダウンという事態にならないようにすることが肝要です。現在のハードディスクは非常に安く、かつ RAID ではなくても、RAID に近い運用がなされているので、壊れても取りかえないというのがデータセンターでの一つの運用スタイルとなっているように思います(図 16 参照)。何故かという、全体が仮想化されているので、壊れたところがあってもデータを喪失するのではなく、他のリダundantのところから吸収しているので、どこかが壊れたぐらいでは、全体としては問題なしということになります。ハードを順々に取り替えていって、全体のメンテナンスを一定のペースで実施していく方が、オペレーションコストがはるかに下げられるということになるわけです。

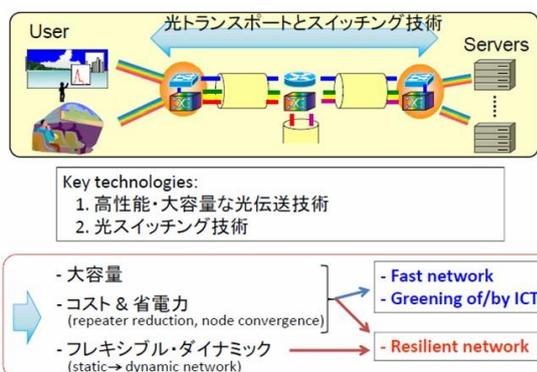


図 16 フレキシブルで経済的な光ネットワークを目指して

リダundantにすると、データはストレージ内に常に行き来することになるので、仮想化すると内部トラフィック量が大幅に増えます。そうでないと仮想化は無理です。リダundant、かつフレキシブルということは、内部トラフィックを大量に発生させることのできる環境にしなくてはならないことになります。そういった意味でも、大容量システムというのは役に立つはずだと思っています。

SDN がフレキシビリティの確保に役立てられるのではないかと考えています。仮想化によるトラフィックの制御を波長でそのままダイレクトに行えるかどうかは別にしても、そういうことを実現し易いネットワークに変えていくには、波長選択スイッチを用いたフレキシビリティの高い光ネットワークで提供できるのではないかと考えています。図 17 に将来ネットワークのイメージを示します。

- ▶ NWとITリソースの密な結合
 - ハードの違いを隠蔽したソフトウェアNW制御技術がキー。
 - “OpenFlow” が有望な技術としてデータセンターを中心に脚光を浴びている
- ギブンなリソース環境で制御・管理が出来れば、災害などの大きなリソース損傷にも対処が可能。

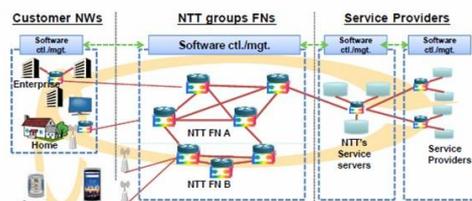


図 17 SDN をキーに将来ネットワークのイメージ

構造的変革の時代

最後に、チップの話をして致します。総務省からご支援を受けたものが、キッチンと世の中に貢献できているという話です。NEC や富士通が波長多重 100G ベースの超多重システムを今年商用化して導入しています。国内展開もしますが、海外にも展開していきます。昨今の風潮としては、海底システムへの新しい技術の導入が図られています。端局装置をリプレースするだけで性能が数倍アップするというので、効果が端的に現れる分、導入がやり易いということのようです。海底システムでは、まずはデジタルコヒーレント技術が展開されています。

100G システムのプロジェクトとしては、チップを作るというのがシステム実現のためのキー技術であり、そして作ったチップを自らハンドリングできるかどうか重要なポイントなので、こうやって開発したチップやそれをモジュール化して、WAN 領域からボリュームが期待できる LAN に近い領域まで展開しようと、ベンダーとも相談をしながら、今話を進めているところです。世界マーケットの半分ぐらいを JAPAN チップで占めて、さらに拡大していけることを期待しています。

テレビも 4K デジタルの時代に移行していくのではないかと期待しております。コンテンツとセットで考えないと、なかなか箱モノだけでは話は進みませんが、うまく取り混ぜてやっていけば良いかなと思います。それには、何か世界の標準に寄与しながら進めるというのが重要な取り組み方であり、うまく取れたときに、それをどう生かすかという点では、日本の取り組みはまだまだ不十分な状況ではありますが、諦めずに取り組んでいきたいと思っております。図 18 はコンテンツ制作において、コンテンツ生データがクラウド内をあちこち飛び交ったり、ストレージと繋ないだりするクラウド型のトライアルサービスを示したものです。

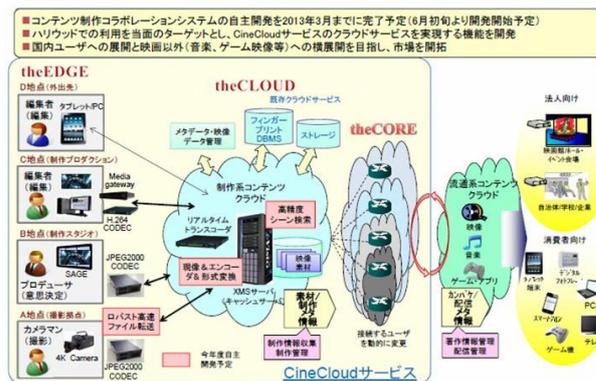


図 18 コンテンツ制作コラボレーション

最後に、やはりビッグデータというか、とにかく多くのデータを集めてくることによって、うまく価値を生み出せるかどうか重要なキーポイントと捉えており、そのキーポイントのデータ処理系というところの機械学習というのが重要と考えています。宣伝になっていささか恐縮ですが、NTTコミュニケーション科学基礎研究所と東大喜連川先生のチームが組んでウィークデータ解析というのを試みています。ビッグデータはビッグという名の通り、たくさん集めてくることに価値があるので、どれだけ先入観なく色々なデータを集めて来て、そこから新しい価値を生み出せるかということに成否がかかっています。FTTHもモバイルもそういったデータを集めて来るのに重要なアクセスラインであり、単にデータが無駄に集まってきただけということに終わらせないで、また、データの縦割りにならないようにうまく生かして、組織、分野を超えてまとめていくというのを、なんとか日本が頑張ってやれたら良いだろうと思っています。ここは重要なポイントであり、日本の研究者の情報処理系の英知を結集してほしいと思います。

まとめ

まとめとしては、図 19 に書き連ねたように、伝送容量は100Tbpsが見えてきました。映像技術も大いに進んで、入出力も進歩してきていますが、ただ、1箇所にも色々なリソースが集中していることはリスクであり、政治や首都機能も含めて地方分散してもらえれば、ネットワークもそれに合わせて分散することができる。仙台地域というか、東日本地域でまだNTTのネットワークで復元できていない箇所がありますが、それは復元できないのではなくて、まだ街に人が戻らないので、そこにネットワークを張っても、どういうふうに張ったら良いのか決まらないから張れないわけで、実際に行政や市民の方々のこういうふうに街を造りますという話に合わせて、ネットワークを復元させるところがまだまだ幾つも残っているということです。

情報はグーグルやアップル、アマゾンに集まってくる一方のような気もしますが、そうならないようにしないといけないので、皆さんの英知も集めて、日本の価値を生み出せるような結集というのを是非とも考えていただきたいと思います。

光通信容量の可能性は、100Tが見えてきた。映像技術やネットワーク技術の進展で、ブロードバンド環境は仮想化され、「テレポーテーション」に大きく近づいたように見えるが、一極集中は止まらない。大震災を受けてネットワークリソースやデータストレージの分散が叫ばれるが、政治や首都機能の分散・仮想化のことが大事そう。一方で、物理インフラとは一線を画して、情報は、グーグル・アップル・アマゾンに集まる一方である。ビッグデータ時代は、データセンターとモバイルアクセスに益々比重が高まろう。光通信の高速化は、幹線やアクセス収容はもちろん、データセンターなどに波及し、小型化省電力化を果たすための技術チャレンジは続く。

図 19 まとめにかえて

本講演録は、平成 25 年 3 月 15 日に開催されました、SCAT主催の「第 89 回テレコム技術情報セミナー」、テーマ「基幹光ネットワークの高速化」の講演要旨です。

*掲載の記事・写真・イラストなど、すべてのコンテンツの無断複製・転載・公衆送信等を禁じます。