

<背景の補足>

現在のインターネット通信は、光ネットワークにアクセスする部分では、1つの波長(毎秒1ギガビット)を複数のユーザがパケット単位にタイムシェアしています。また、ネットワーク内の中継ノードでは、いったん電気信号に直して、パケット毎に宛先を確認して行き先ごとに振り分けてから、光信号に戻しています。これらは、電子メールやWebなど、細かなデータの流れ(フロー)を、パケット単位に束ねて効率的に運ぶのに適した方式です(図1下段)。

これに対して、2020年頃には、100GbE技術が端末インタフェースとして普及し始めると予想されており、中継ノードでは電気処理をせずにユーザと遠隔地のサーバをオンデマンドに波長の束で結び、広域網の波長リソースを複数のユーザで効率的に共有する「波長単位にタイムシェア」という新しいパラダイムの開拓が期待されています(図1上段)。

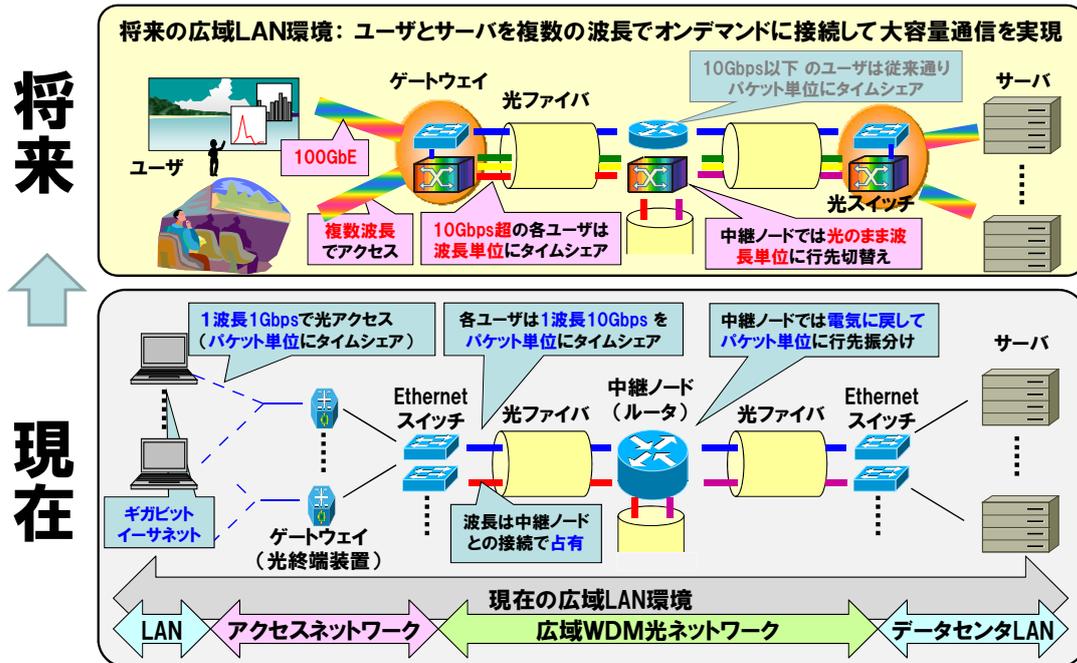


図1：波長リソースを有効活用する仮想光網が実現する将来の広域LAN環境(現在と比較)

<実験の詳細>

各社のプロトタイプ装置を持ち寄り、10~100Gbps(1~10波)でのオンデマンド通信をユーザ主導で実現する広域LAN環境としての連携動作を確認しました。実証実験は、NICTのJGN2plus光ファイバテストベッド(小金井~大手町間4芯各50km)に、NTT・NECの100Gbps NIC(ネットワーク・インタフェース・カード)、三菱電機・日立・KDDI研の100Gbpsアグリゲータ(集線装置)、NECのゲートウェイ、富士通・三菱電機の100Gbps光リンク、およびOKIの160Gbps光再生中継リンクを接続して行いました(図2)。

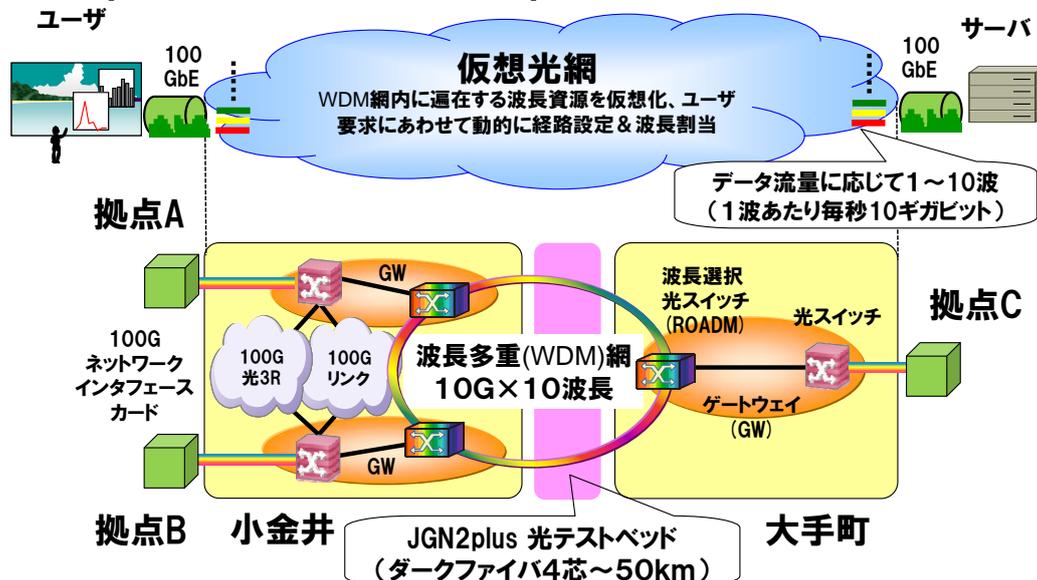
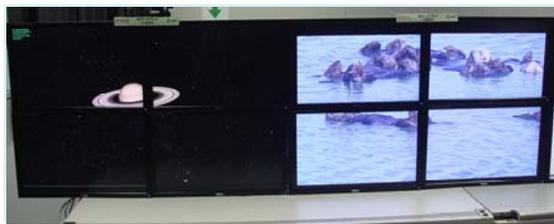
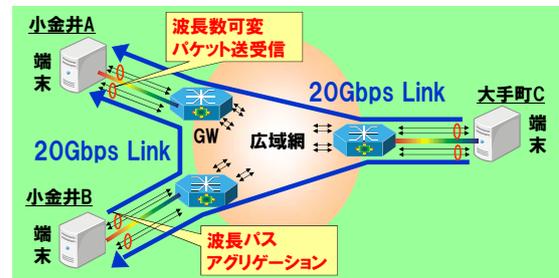


図2：100GbEを効率的に運ぶ広域光ネットワーク実験網の構成

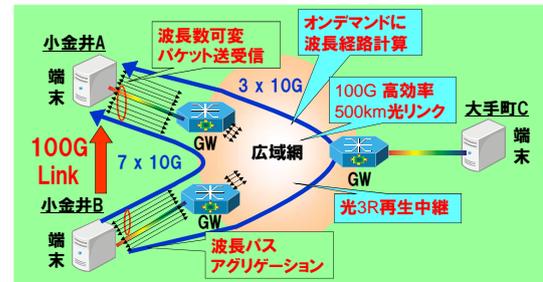
映像配信アプリケーションでは、オンデマンドにユーザが 2 波長(20Gbps 相当)を確保し、ハイビジョン映像の 4 倍の解像度と 2 倍の時間分解能を持つ 4K(60P)超高精細映像の非圧縮パケットストリーム(12Gbps)を受信できることを確認しました(図 3a)。また、データ転送アプリケーションでは、オンデマンドに 10 波長(100Gbps 相当)を確保し、ブルーレイディスク 1 枚分に相当する 25 ギガバイトの超高精細な衛星写真の瞬時転送に成功しました。現在のギガビット級ネットワークアクセスで広域転送すると 3 分以上を要するものが、わずか 2 秒(1/100 の所要時間)で一括転送できることを確認しました(図 3b, 3c)。



(a) 13Gbps動画を2画面同時表示



(b) 100Gbpsで衛星写真を瞬時転送



(c) 超高精細な衛星写真を瞬時転送(上)、拡大しても鮮明(下)

図 3 : 100GbE を効率的に運ぶ広域光ネットワーク実験網の構成

<開発された技術のポイント>

今回、NICT 委託研究により開発された各社の技術は、以下のとおりです(図 4)。

(1) ユーザーが 100GbE で仮想光網に効率的にアクセスする技術(λ アクセス技術の研究開発^{*1})

(1-1) パケット処理頻度を 1/100 に抑えて、複数波長に振分けてパケット送受信 (NTT、NEC、NTT Com)

(1-2) パケットを公平に束ねて、波長あたり 100Gbps でパケット送受信 (三菱電機、日立、KDDI 研)

(2) 仮想光網内の波長利用効率を向上する技術(λ ユーティリティ技術の研究開発^{*2})

(2-1) 1,000 ノード規模の波長資源をオンデマンドに計算して経路割当 (NEC)

(2-2) 多値変調と誤り訂正で波長利用効率を 10 倍に高め 100Gbps で広域光リンク (富士通、三菱電機)

(2-3) 100Gbps を超える速度の光信号をそのままデジタル再生して光中継伝送 (OKI)

(3) LAN や WAN の光リンクを高度化する技術(ユニバーサルリンク技術の研究開発^{*3})

(3-1) 100GbE のレーン障害を回避して高信頼化する並列レーン縮退伝送技術 (日立)

(3-2) 100Gbps クラスの多値変調光リンクの信号状態を高安定にモニタする信号処理技術 (富士通)

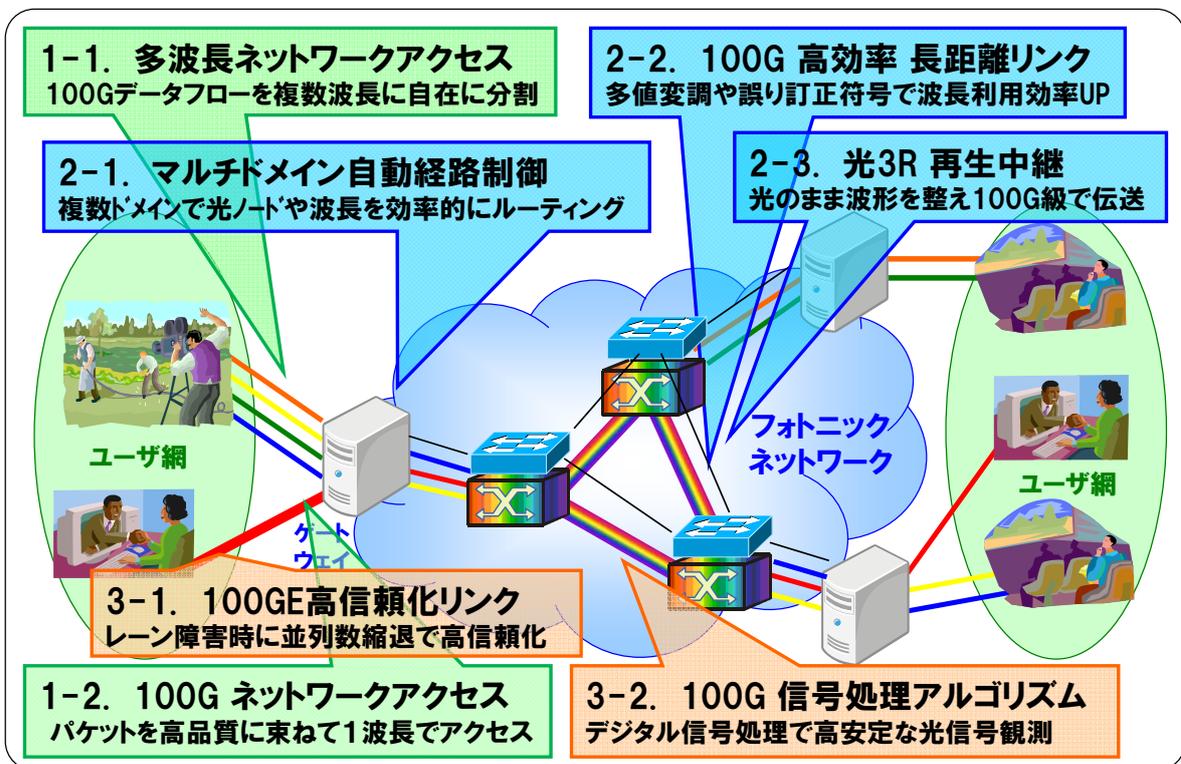


図 4: 「100GbE を効率的に運ぶ広域光ネットワーク」を実現する主な開発技術

1 ユーザが 100GbE で仮想光網に効率的にアクセスする技術(λアクセス技術の研究開発)

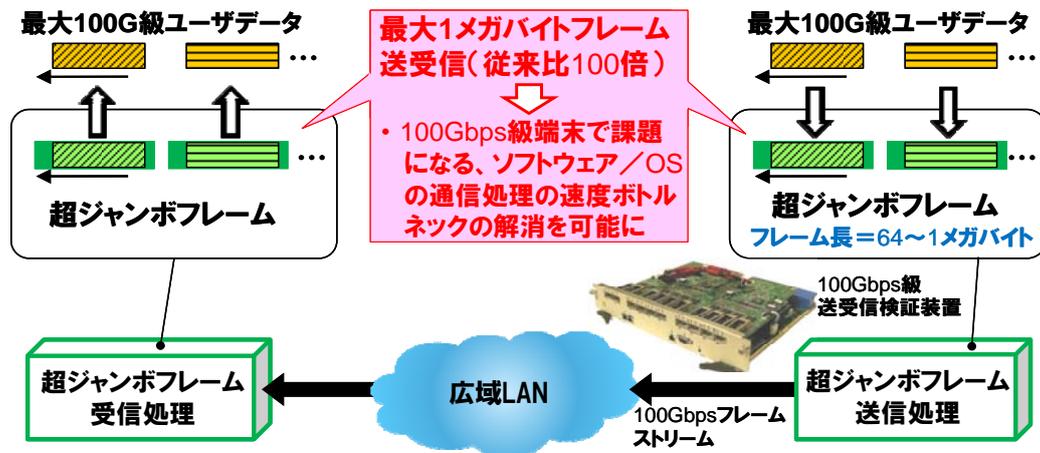
将来の Tbps 級ネットワークインタフェース実現を目指して、複数波長への並列展開数と波長あたりの伝送速度を、それぞれ、従来(1波, 10Gbps)の 10 倍にする技術を開発しました。

1-1 パケット処理頻度を 1/100 に抑えて、複数波長に振り分けてパケット送受信 (NTT、NEC、NTT Com)

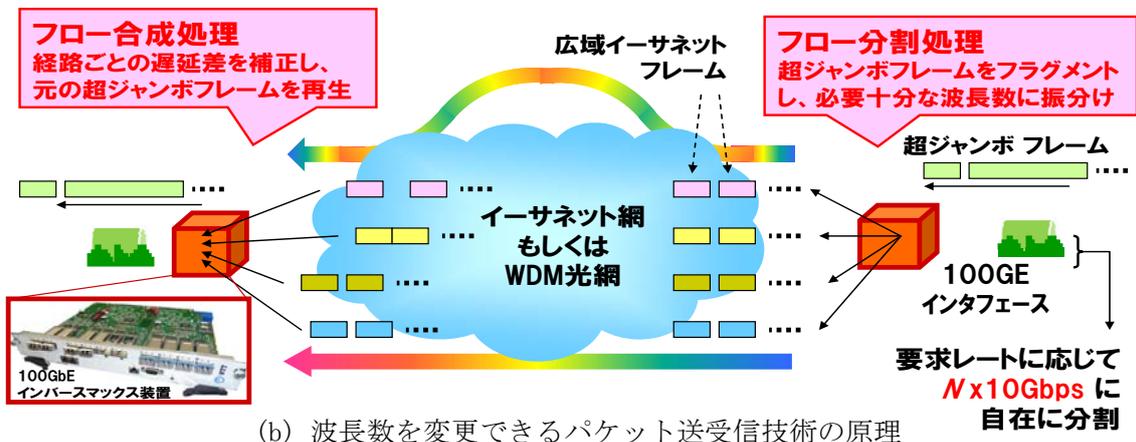
NEC は、100Gbps でのネットワークアクセスに際して、ユーザが通信に用いるデータ単位であるフレームのサイズを大幅に大きくすることで、通信の効率を上げることを可能とするパケット送受信技術を開発しました。今回開発した「超ジャンボフレーム処理技術」では、通信効率で課題であったフレームサイズを最大 1 メガバイトと従来の 100 倍以上のサイズとし、このフレームの送信、受信処理部に新たな回路を開発することによって、100Gbps 動作を実現しました。とくに、1メガバイトという巨大なフレームの誤り検出情報を生成する回路、および誤りを検出する回路を実現することにより、多種多様なデータを多重しても 100Gbps の速度で動作することを実現しました(図 5a)。

NTT は、この「超ジャンボフレーム」を標準イーサネットフレームに小分けにするフラグメント機能を新たに実装し、アプリケーションが必要とする帯域やネットワーク側の事情に応じて、並列数を自在に変更できるパケット送受信技術⁹⁾と統合することで、100Gbps NIC(ネットワーク・インタフェース・カード)機能を実証しました。送信側の NIC でパケット毎にタイムスタンプを付与し、受信側の NIC ではこのタイムスタンプに基づいてパケット順を正しく復元します。パケット網経由での網クロック配信¹⁰⁾により NIC での時刻精度を常時数 μ 秒以内に保ち、end to end でのジッタをほぼ完全に抑圧した高品質な大容量転送を実現します(図 5b)。

実験では、NTT Com が開発した送信端と受信端において複数の波長パスを 1 本に集約することにより弾力的な大容量リンクの生成を実現する波長パスアグリゲーション技術⁹⁾を用いて、自動経路制御を行うゲートウェイ(GW)と相互接続することにより、広域ネットワーク越しに、10Gbps~100Gbps の大容量リンクをユーザがオンデマンドに設定可能で、容量も柔軟に変更できることを実証しました。



(a) 超ジャンボフレーム処理技術の概要



(b) 波長数を変更できるパケット送受信技術の原理

図 5 : パケット処理頻度を 1/100 に抑えて、複数波長に振り分けてパケット送受信

1-2 パケットを公平に束ねて、波長あたり 100Gbps でパケット送受信(三菱電機、日立、KDDI 研)

100GbE へパケットを公平に束ね、1つのレーザにより発生した単一波長信号で光伝送するための符号化技術、光伝送技術を世界に先駆けて開発しました。

三菱電機は、多数のユーザから受信するパケットを公平に多重化する方式を開発しました。本方式は「DS-SWFQe: Delay Sensitive - Simplified Weighted Fair Queuing enhancement」と呼び、ユーザ単位、アプリケーション単位に遅延時間と帯域の公平性を保証し、多重化するものです。入力側のインタフェース帯域に依存しないため、将来の高速、大規模なアクセスネットワークに対しても適用できます。

日立は、このフレーム単位に束ねられたデータストリームを、1つの波長で 100Gbps の光伝送を可能とする符号化・復号化技術を開発しました。今回開発した「単一波長対応符号化技術」では、多重／分離処理において生じる信号伝播遅延差を検出して補正し正しい受信データを再生する標準機能^{*11}に加えて、1つの光波長の通信密度を向上する光多値変復調に必要な差動符号化を行う機能を開発し、速度 100Gbps の動作を実現しました。

KDDI 研は、この符号化された信号を単一波長で光伝送する技術を開発しました。現在の 100GbE 標準は複数(4または10)の光源を用いますが、単一波長方式とすることで、必要な光源数を1つへ削減できます。単一波長光伝送方式としては、差動4値位相変調方式を採用しました。この方式では、1つの光信号により2ビットの情報を伝送することができるため、100GbE 信号を伝送するための実効的な速度を 50Gbps に半減できます。そのため、光・電気部品に要求される応答速度や、光ファイバ伝送における各種信号劣化要因の影響を大幅に軽減できます。

実験では、三菱電機が開発したフレーム多重技術により複数の 10Gbps イーサネット信号を 100Gbps 信号へと束ねた後、日立が開発した技術により符号化し、KDDI 研が開発した光伝送技術により単一波長による 100Gbps でのパケット送受信を実証しました。(図6)

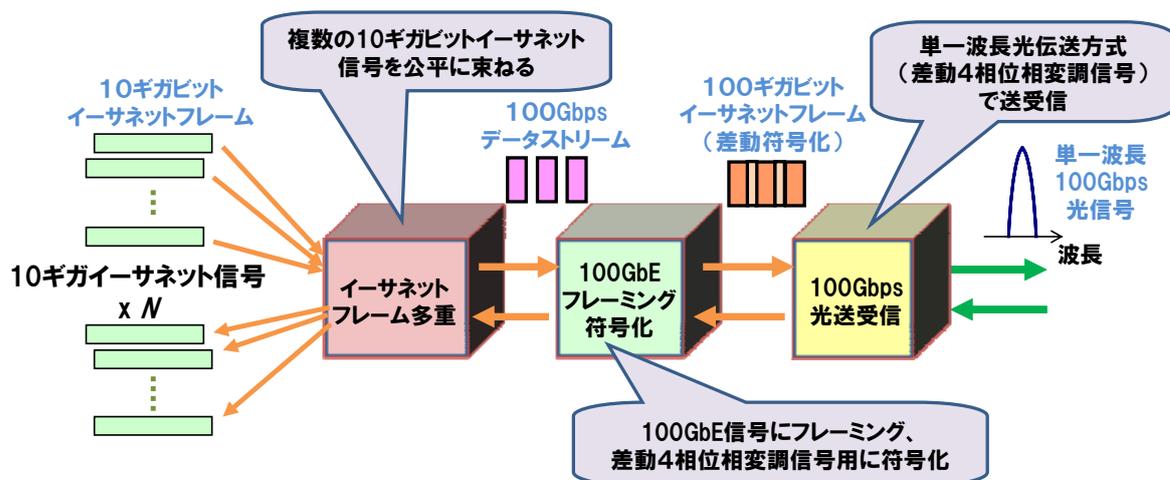


図6：パケットを公平に束ねて、波長あたり 100Gbps でパケット送受信

2 仮想光網内の波長利用効率を向上する技術(λユーティリティ技術の研究開発)

2-1 1,000 ノード規模の波長資源をオンデマンドに計算して経路割当 (NEC)

NEC は、複数ドメインからなるネットワークにおいて、異なるドメインにまたがる最適経路を複数のサーバが連携して計算するマルチドメイン自動経路制御技術^{*12}を開発し、従来の 10 倍以上の大規模光ネットワークにおける最適経路制御およびオンデマンドな波長パス設定の自動化を実現しました。さらに、偏波モード分散(Polarization Mode Dispersion: PMD^{*13})による光信号の劣化を監視する光品質モニタを新たに開発しました。この光品質モニタを使って光信号の劣化を初期段階で検出し、品質のよい他の波長パスに切り替えることで、ユーザの通信品質の劣化を未然に防ぐことに成功しました。これらの技術により、大規模光ネットワークにおいて、大容量ユーザ通信の体感品質を維持しながらオンデマンドに波長資源を効率よく利用できるようになります(図 7)。

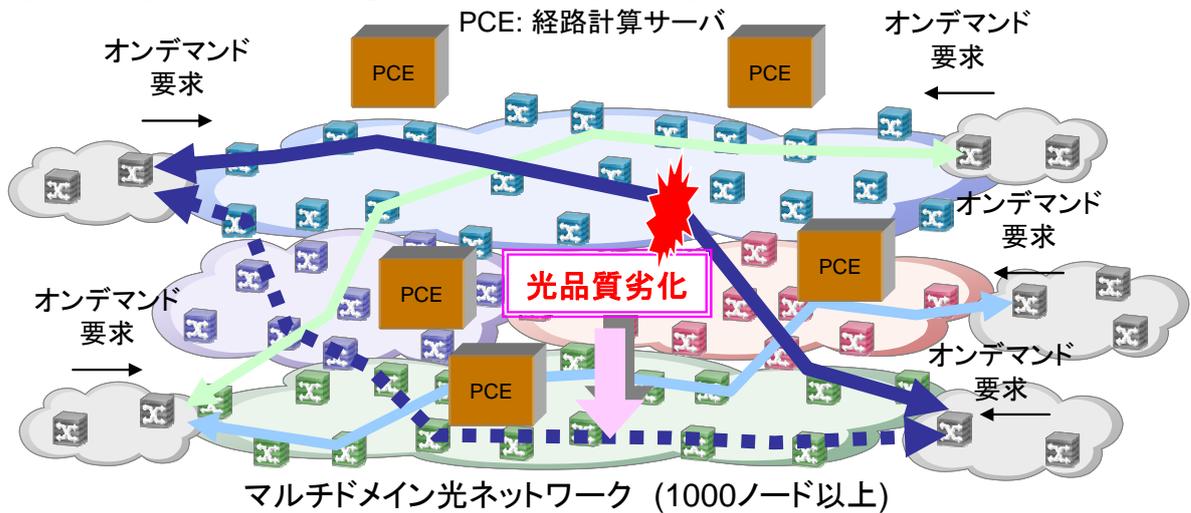


図 7 : 1,000 ノード規模の波長資源をオンデマンドに計算して経路割当

2-2 多値変調と誤り訂正で波長利用効率を 10 倍に高め 100Gbps で広域光リンク(富士通、三菱電機)

富士通は、波長利用効率を従来の 10 倍に高めるための変調方式として、偏波多重 4 値位相変調方式に着目し、それを実現するための光送受信機構成技術の開発を行いました。長期間安定な動作を実現するために、①集積型光変調器、②光変調器の制御回路、③光復調器制御回路を開発し、試作機に実装しました。開発した光送受信機を 500km を超える実フィールドファイバ伝送に適用して誤り率特性を評価した結果、安定な特性が得られることを確認しました。

三菱電機は、低密度パリティ検査 (LDPC) 符号^{*14}と軟判定復号による高利得・低消費電力 FEC 技術の開発を行いました。軟判定とは、デジタル化した受信シンボルに、そのシンボルの確からしさを示す信頼度を付与することです。今回、開発した 2bit 32G samples/s の高速処理可能な軟判定 LSI^{*15}を用いて、2bit という限られた軟判定情報でも高い誤り訂正性能を発揮する LDPC 符号を Field Programmable Gate Array (FPGA) エミュレータに実装しました。FPGA エミュレータによる 10Gbps スループットでの性能検証の結果、従来よりも 3 倍高速の受信デジタル信号であっても確からしさを識別できることを確認しました(図 8)。

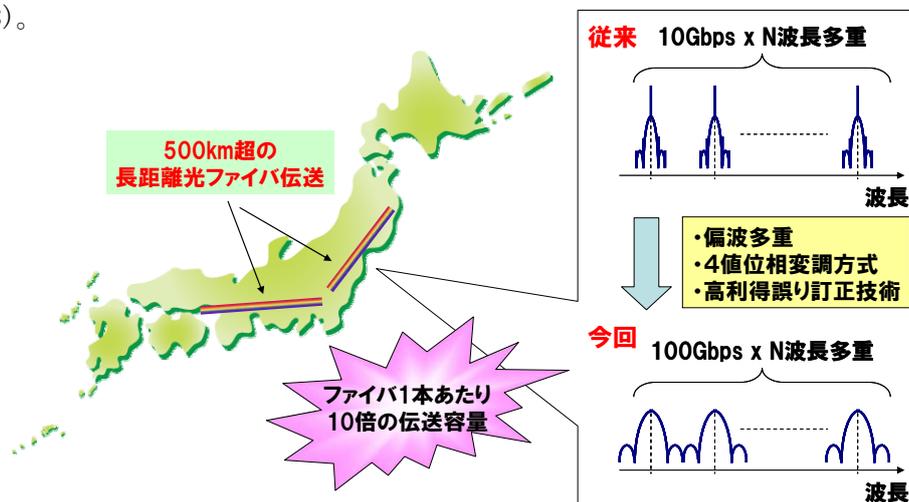


図 8 : 多値変調と誤り訂正で波長利用効率を 10 倍に高め 100Gbps で広域光リンク

2-3 100Gbps を超える速度の光信号をそのままデジタル再生して光中継伝送(OKI)

OKI が開発した光 3R 再生中継装置^{*16}は、従来の光増幅中継機能(Re-amplification)に、光信号の波形歪を除去する波形整形機能(Re-shaping)と時間揺らぎを抑圧するタイミング再生機能(Re-timing)を加えた新しい光中継器です。100Gbps を超える伝送速度では、波形の劣化や時間ゆらぎが顕著になり、その伝送距離は短くなります。開発した光中継器により、160Gbps の光信号を光/電気変換することなく、そのまま効率良く再生することが可能になります。今回、あらたに開発した光中継器は、今後の信号フォーマットの多様化を鑑み、複数の信号フォーマットに対応できる方式を採用しています(図9)。



図9：100Gbps を超える速度の光信号をそのままデジタル再生して光中継伝送

3 LAN や WAN の光リンクを高度化する技術(ユニバーサルリンク技術の研究開発)

3-1 100GbE のレーン障害を回避して高信頼化する並列レーン縮退伝送技術(日立)

日立は、LAN 領域でのリンクの高信頼化を実現する「並列レーン縮退伝送技術」を開発しました。標準の100Gbps イーサネットでは、リンクを複数の伝送路(レーン)で構成するマルチレーン伝送を行います。その際一部のレーンで障害が発生すると、その影響がリンク全体に波及し、最終的にリンクダウン(通信遮断)を引き起こします。今回開発した技術では、各レーンの通信状態を逐次監視し、障害が生じたレーンの使用を即時停止して正常なレーンのみを使用することで、リンクダウンを防止します(図10)。この技術により LAN 領域でも光リンクの高信頼化を実現しました。

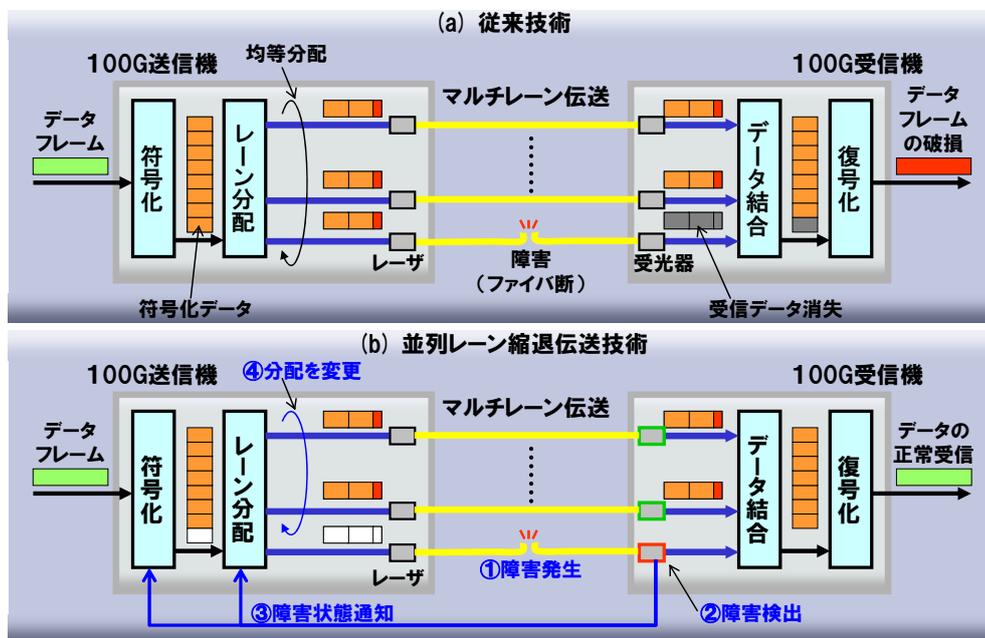


図10：100GbE のレーン障害を回避して高信頼化する並列レーン縮退伝送技術

3-2 100 Gbps クラスの偏波多重多値変調光の信号モニタリングを可能にする信号処理技術(富士通)

富士通は、多値変調光の高安定なコヒーレント受信を実現するためのデジタル信号処理アルゴリズムを開発しました。このアルゴリズムを活用することにより、100Gbps クラスの偏波多重多値符号の特性として、各偏波の振幅・位相の状態をモニタリングすることに成功しました(図 11)。

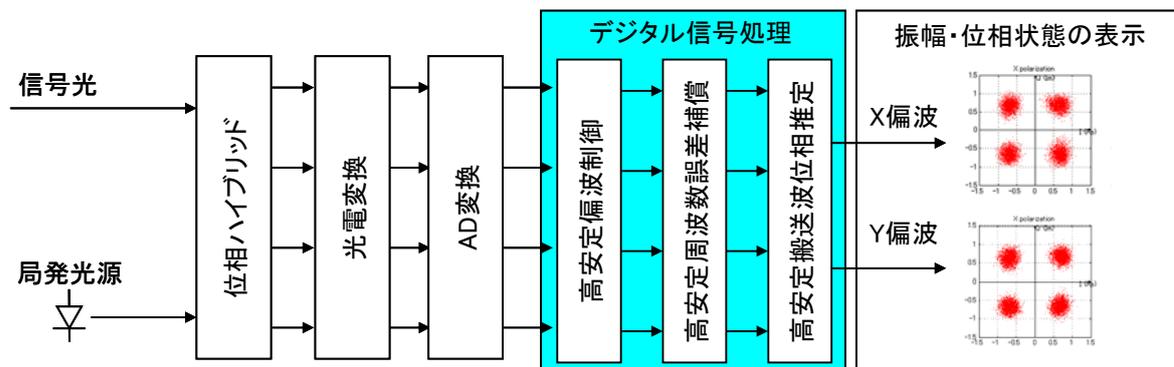


図 11:100Gbps クラスの偏波多重多値変調光の信号モニタリングを可能にする信号処理技術

<用語 解説>

- *1 NICT の委託研究「λアクセス技術の研究開発」(2006 年～2010 年)
NTT、NEC、東京大学、NTT Com、三菱電機、日立製作所、KDDI 研究所、慶応義塾
- *2 NICT の委託研究「λユーティリティ技術の研究開発」(2006 年～2010 年)
NEC、大阪大学、富士通、三菱電機、OKI
- *3 NICT の委託研究「ユニバーサルリンク技術の研究開発」(2008 年～2011 年)
NTT、日立、富士通、三菱電機、NEC、NTT Com
- *4 JGN2plus
NICT が運用する、研究開発用の超高速・高機能なテストベッドネットワーク。2008 年 4 月から運用。
- *5 仮想光網(Virtualized Optical Network: VON)
フォトニックネットワーク(光網)内に遍在する波長資源を、ユーザには意識させずに、オンデマンドで End-to-End 通信用に提供。物理的なファイバ網の上に、ユーザ毎に分離された波長網を動的に構築。
- *6 100 ギガビット Ethernet(100GbE)
米国電気電子学会(IEEE)802 標準委員会が 2010 年 6 月に標準化。並列伝送方式を採用し、10 波(短距離)もしくは 4 波(中長距離)を固定的に占有して通信する。
- *7 2 秒で高精細映画 1 枚分
ブルーレイディスク 規格(一層片面、25GB)で換算。地上波デジタルハイビジョン画質映像 180 分に相当。
- *8 光通信システムシンポジウム(OCS シンポジウム)
電子情報通信学会 光通信システム研究専門委員会(OCS)主催。光通信に関する日本最大の研究会。
- *9 並列数を自在に変更できるパケット送受信技術、波長パスアグリゲーション技術
NTT が波長数を変更できるパケット送受信技術を、NTT Com が複数の波長パスを 1 本に集約して扱う技術を開発し、大容量映像のオンデマンド瞬時配信に成功。
2009/12/8 報道発表 <http://www.ntt.co.jp/news/news09/0912/091208a.html>
- *10 パケット網経路での網クロック配信
標準 Sntp プロトコルをハードウェア処理する NTT 技術を利用。従来のソフトウェア処理に比べ 1,000 倍以上も高精度で、非同期 IP ネットワーク経路でも同期ネットワーク並(~数 μ 秒)の同期精度を実現可能。
- *11 正しい受信データを再生する標準機能
複数の通信路(レーン)を束ねて信号を伝送することにより、大容量伝送を実現する 100GbE 標準に準拠したマルチレーン分配方式をフレーム伝送に採用した 100GE システムの試作に成功。
2009/7/15 報道発表 <http://www.hitachi.co.jp/New/cnews/month/2009/07/0715a.html>
- *12 マルチドメイン自動経路制御技術
超高速かつ大容量な光ネットワークの運用を自動化する技術(GMPLS)を利用し、数千台のネットワーク機器で構成される大規模ネットワークに対応可能。
2007/10/23 報道発表 <http://www.nec.co.jp/press/ja/0710/2301.html>
- *13 PMD
偏波モード分散(Polarization Mode Dispersion)。偏波状態によって光ファイバの中を伝播する速度が微妙に異なる物理現象により、受信側で信号波形が歪んで(劣化して)しまう現象を引き起こす。
- *14 低密度パリティ検査(LDPC: Low Density Parity Check)
高い誤り訂正性能で注目されている符号化方法の一つ。理論限界に近い誤り訂正特性を、実装可能な計算量で実現できる符号。
- *15 100Gbps 光通信に適用可能な世界最高速の誤り訂正用軟判定 LSI を開発
世界最高速の軟判定速度(毎秒 32 ギガサンプル)を、最先端プロセスによる 1 チップ LSI 化により達成。
2008/10/16 報道発表 <http://www.mitsubishielectric.co.jp/news/2008/1016.htm>
- *16 毎秒 160 ギガビットデータの超長距離伝送に成功
毎秒 160 ギガビットデータの光信号品質を 380km 伝送した後に復元する、全光信号再生中継伝送に成功。
2008/3/18 報道発表 <http://www.oki.com/jp/press/2008/03/z07165.html>