

超高速光通信に最適な新光パルスを発明  
—「光ナイキストパルス」と名付けた光パルスにより  
高速光通信の伝送性能を大幅に向上—

中沢 正隆

東北大学電気通信研究所 超高速光通信研究分野

〒980-8577 仙台市青葉区片平 2-1-1

Tel: 022-217-5522, Fax: 022-217-5523

<成果の概要>

東北大学電気通信研究所の中沢正隆教授（光通信工学）の研究グループは、「光ナイキストパルス」と名付けた新たな光パルスを発明し、超高速光通信の伝送効率を大幅に向上させることに世界で初めて成功しました。

今回発明した光ナイキストパルスは、従来の光パルスとは異なり、隣り合うパルスどうしを重ねて送っても情報を完全に識別でき、誤りがないことが大きな特徴です。その結果、パルス幅が広くても高速伝送を実現できるため、伝送歪みに対する耐性が大幅に向上しました。実際の伝送実験により毎秒 160 ギガビット（ギガは 10 の 9 乗）の伝送速度で、歪みが従来の半分以下に抑えられることを実証しました。また、その帯域はこれまでより 1/2 以下に狭くなるため、信号を 2 倍以上高密度に多重化することが出来、その結果、周波数資源の有効利用が可能となります。

従来の超高速光通信に用いられてきた光パルスは、ガウス型や Sech（セカントハイパボリック）型と呼ばれる形状でありました。これらのパルスはその裾野が連続的に減少していくため、隣り合うパルスどうしが重なってしまうと互いの干渉により各ビットの情報が識別できなくなり、誤りが生じてしまいます。このためビットレートを高速化する（即ち、より多数のパルスを詰め込む）ためには出来るだけ幅の狭いパルスを用いる必要がありました。しかしながら、パルスの幅が狭くなるにつれて、光ファイバ伝送中に波形の歪みを受けやすくなり、長距離にわたって信号を歪み無く伝送させることが困難でした。また、パルス幅が狭いほど、そのスペクトルは広い帯域を占有してしまうことから、波長多重(WDM)通信における波長数の増大や高密度化の障害となっていました。

本成果は、従来のように高速伝送には超短パルスが不可欠という既成概念を覆し、幅の広いパルスを使っても超高速光通信が実現できることを世界で初めて明らかにしたものであり、高速光通信のまったく新しい方向性を示す成果です。これらの成果は米国

光学学会ならびに光ファイバ通信国際会議において報告されました。この光ナイクストパルスは発生が容易で実用性が高いため、実用化に向けての開発に注力していきたいと思えます。

#### <背景>

高精細画像の動画配信をはじめとするブロードバンドサービスの急速な普及に伴い、国内の情報量は年率約 40%の勢いで増加を続けています。このような情報量の増加に対応するため、基幹光伝送網の大容量化に向けた取り組みが加速しています。現在実用化されている波長多重(WDM: Wavelength Division Multiplexing)伝送システムにおいては、1 波長あたり毎秒 10~40 ギガビットのビットレートで、40~100 波の信号を波長多重することにより、1 テラビットを超える伝送容量が実現されています。今後は 1 波長あたりのビットレートを毎秒 100 ギガビット以上に高速化し、且つ限られた帯域の中でできるだけ多くの WDM 信号を高密度に収容することにより、伝送容量のさらなる拡大が重要な課題となっています。

#### <従来の技術>

光通信においてビットレートを高速化するには、信号間隔を短くし出来るだけ多くのパルスを詰め込む必要があります。このような技術は時分割多重(TDM: Time Division Multiplexing)技術と呼ばれています。特に、この多重化を光領域で行う方法は光時分割多重(OTDM)と呼ばれ、電子回路を用いずに光回路だけで光パルスを時間多重するため、電子回路の速度限界を超える伝送速度を実現することが可能となります。例えば光パルス 1 ピコ秒 ( $10^{-12}$  秒) 間隔で配置すれば、1 波長で毎秒 1 テラビットの超高速光通信を実現できます。

一般に光通信に用いられる光パルスはガウス型あるいは Sech (セカントハイパボリック)型と呼ばれています。その波形の一例を図 1 に示します。これらの光パルスでは、裾野の僅かな部分でも隣り合うパルスと重なってしまうと、互いのパルスの干渉により各ビットの情報が識別できなくなり誤りが発生します。そのため、ビットレートを高速化する(即ち単位時間に詰め込むパルスの数を増大させる)ためには出来るだけ狭いパルスを用いてパルス間隔を空ける必要があります。例えば、毎秒 1 テラビットのビットレートを実現するには、300~400 フェムト秒(フェムトは 10 の<sup>-15</sup>乗)の超短パルスが必要です。このような超短パルス伝送は、光ファイバ伝送中に波形の歪みを受けやすいため、数 100 km のような長距離にわたって情報を正確に伝送することが難しい技術です。

## <今回の成果>

今回我々は、まったく新たな光パルスを発明し、隣接パルスが重なり合っても互いに干渉を引き起こすことなく、広いパルス幅でも TDM による高速伝送が実現できることを世界で初めて明らかにしました。そして、このパルスを「光ナイキストパルス」と名付けました。従来の原理とは発想を転換し、パルスの重なりを利用する新たな光伝送技術といえます。この方法では、パルス幅が広くても高速伝送を実現できることから、ファイバ伝送中も歪みを受けにくい点が優れた特徴です。これは高速通信にはできるだけ幅の狭いパルスが必須であるというこれまでの光通信の常識を覆す画期的な成果です。本伝送技術の実現にあたってのポイントは以下の通りです。

### (1) 光ナイキストパルスによる高速・高効率伝送方式の提案

光ナイキストパルスの形状を図2に示します。この形状は H. Nyquist 氏によって 1928 年に電気信号処理技術として導出されたもので、無線通信では「ナイキストフィルタ」と呼ばれる帯域通過フィルタのインパルス応答関数として知られています。インパルス応答とは、インパルスという非常に鋭い信号（幅が無限に狭く波高が無限に高いパルス）をフィルタに入力したときの出力信号を意味します。ナイキストフィルタのインパルス応答は「ナイキストパルス」の名で呼ばれていますが、インパルス応答とはあくまでも抽象的な概念であり、実際にこのような形状のパルスを生成した例は今までにありませんでした。

今回我々は、図2の形状をもつ光のナイキストパルスをパルスレーザとそのスペクトル制御により実際に発生させることに世界で初めて成功し、さらにこれを OTDM により多重化して送信する新たな超高速光通信方式を提案しました。図2に示すナイキストパルスは、裾野が周期的に振動しながら徐々に減衰し、ある一定間隔  $T$  ごとにその強度が必ずゼロになるという特徴をもちます。従って、次のパルスが時間  $T$  をおいて隣に存在しても、図3に示すように隣り合うパルスどうしが重なってしまうにも関わらず、各シンボル点では両者の干渉が生じません。その結果、この方式により信号パルスを従来よりも高密度に詰め込むことが可能となり、伝送効率が大幅に向上できます。

### (2) パルスシェーパーによる光ナイキストパルスの発生

通常、高速なパルスレーザから出力される光パルスは、ガウス型あるいは Sech（セカントハイパボリック）型と呼ばれる形状です。従って、光ナイキストパルスを発生させるためには、パルス波形をガウス型・Sech 型から図2の形状に整形するための光スペクトル制御回路（パルスシェーパー）が必要となります。我々は、LCoS (Liquid Crystal

on Silicon)と呼ばれる素子を用いたパルスシェーパにより高い分解能で波形整形を行い、光ナイキストパルスを生成することに成功しました。生成した光ナイキストパルスの波形を図4に示します。光パルスの波形はその強度（振幅の2乗）でしか測定できないため、同図に示す波形は図2の波形を2乗したものに对应しています（同図の黒線が、図2の波形を2乗したものです）。ナイキストパルスの特徴である裾野の振動が実現できていることがわかります。

さらに、このパルスを OTDM により 6.25 ピコ秒間隔に詰め込み、毎秒 160 ギガビットの超高速光信号を発生させました。発生した信号波形を図5に示します。商用の基幹回線の速度は 10 Gbit/s であるため、その 16 倍の伝送速度に対応します。図4のパルスは幅が 5.2 ピコ秒と広いため、6.25 ピコ秒間隔に並べると隣接パルスどうしが重なり合い、相互の干渉の結果、信号波形は一見複雑な形状に見えます。しかしながら、同図の青い点で示すように、各シンボル点では信号強度は常に 1 を保っています。このことは、パルスどうしの複雑な干渉にも関わらず、各パルスが有する情報が完全に保持されていることを意味しています。一方、従来のガウス型パルスを 6.25 ピコ秒間隔に並べようとすると、干渉を避け各シンボルの情報を保持するためには、パルス幅はパルス間隔の 30~40%（今の場合は少なくとも 2.5 ピコ秒以下）であることが要求されます。従って、ナイキストパルスを使えば従来よりも 2 倍以上広いパルス幅で同じ伝送速度を実現できます。このことは逆に、同じパルス幅で比較すると、光ナイキストパルスは従来よりもパルスを 2 倍以上詰め込むことが出来、伝送効率が大幅に向上できることを意味します。

### (3) 重なった光ナイキストパルスから情報を抽出する新たな多重分離手法（光サンプリング法）の発明

図5の OTDM 信号は、シンボル間隔が 6.25 ピコ秒と大変短く、また信号が重なっているため、そのまま電気信号に変換して各データを抽出することが出来ません。そこで今回、重なった信号から所望のデータを抽出するために、超高速光サンプリング法を新たに考案しました。これは、アナログ信号をデジタル信号に変換する際に使われるサンプリング技術を光に拡張した画期的なものです。実際に非線形光ファイバループミラーと呼ばれる光サンプリング回路を作製し、これにより幅が 1 ピコ秒の狭い光ゲートで所望のデータを抽出することに成功しました。その様子を図6に示します。

### (4) 光ナイキストパルスを用いた高速伝送の実証

以上の要素技術を組み合わせて、我々は光ナイキストパルスで構成した 160 Gbit/s

光信号を実際に長距離伝送させ、歪みに強いという本伝送技術の優れた特徴を実証しました。その様子を図7に示します。この実験では、分散が3.4 ps/nmという大きな値をもつファイバに毎秒160ギガビットの信号をナイキストパルスならびにガウス型パルスを用いて伝送させ、符号誤り率を比較しました。同図の白丸は、送信器と受信器を直結させた状態の結果（これをBack-to-backと呼びます）で、伝送後の誤り率曲線がこれに近いほど良好な伝送特性です。ナイキストパルスの場合は、赤いシンボルで示すように、伝送後の誤り率はBack-to-backと大きく変わらないのに対し、ガウス型パルスの場合は青いシンボルで示すように曲線がBack-to-backから大きくかけ離れています。この結果は、同じ分散のファイバであっても、ナイキストパルスは歪みの影響を格段に受けにくいことを意味しています。

次に、毎秒160ギガビットの信号をナイキストパルスならびにガウス型パルスを用いてそれぞれ500km伝送させ、ナイキストパルスの歪みに対する耐性をさらに詳細に評価しました。その結果を図8に示します。この実験では、波長分散の大きさを $\pm 8$  ps/nmの範囲で変化させ、 $10^{-9}$ という誤り率（10億個のパルスを送って信号の判定誤りが1個しか生じない伝送品質）を達成するのに必要な受光感度を比較しました。図8において、ガウス型パルスの場合は分散の大きさとともにグラフが急激に上昇しています。このことは分散の増大に伴い所要パワーが増大し、伝送性能が急激に劣化していることを意味しています。一方、ナイキストパルスの場合には伝送性能の劣化が2倍以上緩やかです。即ち、ナイキストパルスのほうが2倍以上分散歪みに耐えられることがわかりました。

#### <今後の展望>

今後は次世代の伝送技術と目されている1波長あたり毎秒1テラビットに向けての取り組みが重要な課題です。そこで、光ナイキストパルスを使って、出来るだけ高い効率でこのような高いビットレートを実現することを目指します。また最近では、直交振幅変調(QAM: Quadrature Amplitude Modulation)と呼ばれる多値変調技術が光通信で広く用いられるようになり、デジタルコヒーレント伝送技術として実用化に向けた研究開発が進展しています。この多値コヒーレント技術を光ナイキストパルスに適用することにより、高速且つ周波数利用効率の高い究極的な伝送技術の実現が期待されます。

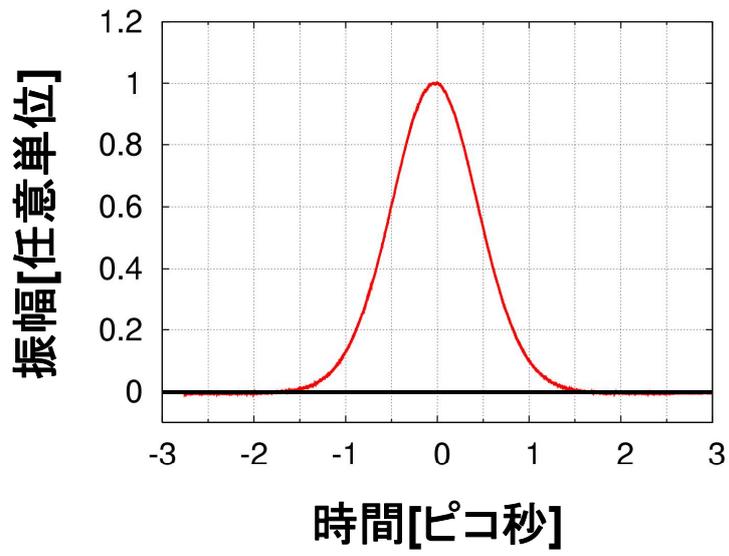


図1 従来の光通信に用いられる光パルス

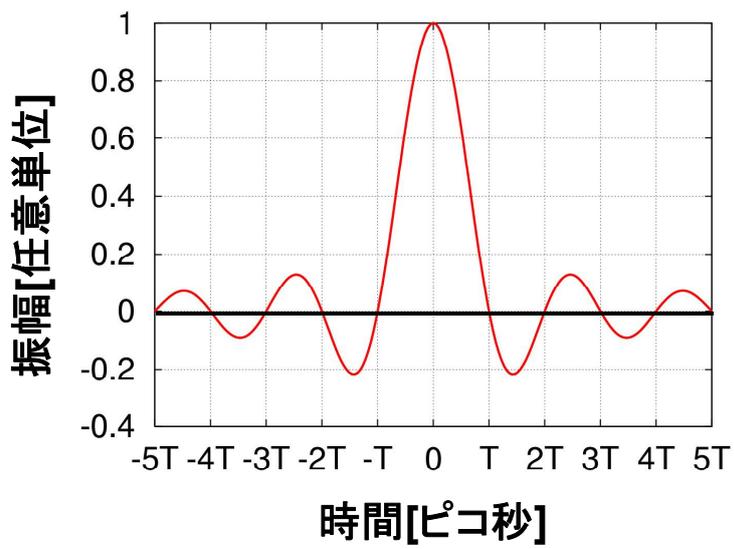


図2 光ナイキストパルスの形状

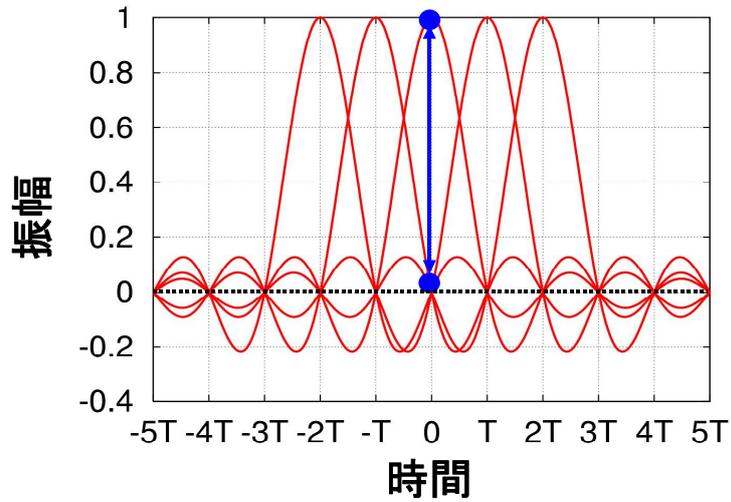


図3 ナイキストパルスを時分割多重した様子。隣り合うパルスどうしが重なっているにもかかわらず、青線で示すように各シンボル点では隣からの干渉が無く、情報が識別できる。

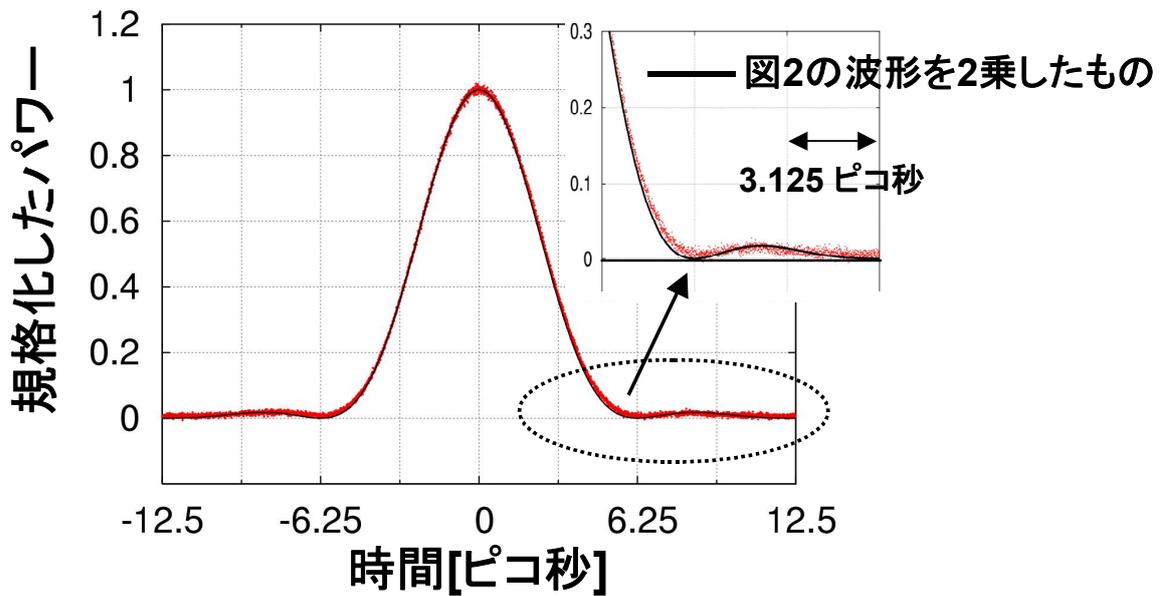


図4 パルスシェーパを用いて発生させた光ナイキストパルスの波形。黒線は図2の波形を2乗したものである。右上の拡大図に示すように、裾野の振動が高い精度で実現できていることがわかる。

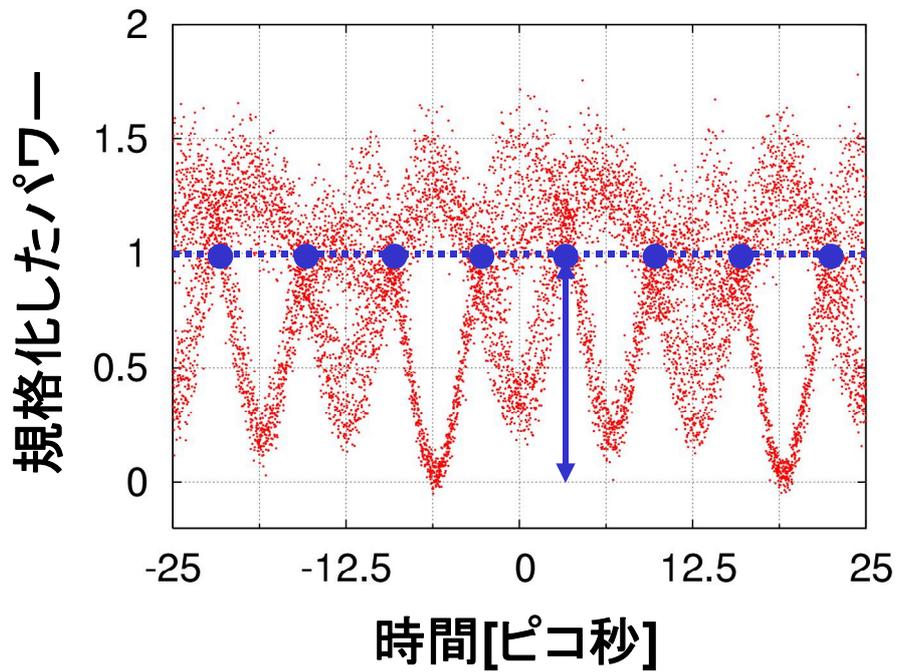


図5 図4の光ナイキストパルスを6.25ピコ秒間隔で多重化した超高速光信号波形。青い点は各シンボル点を表している。

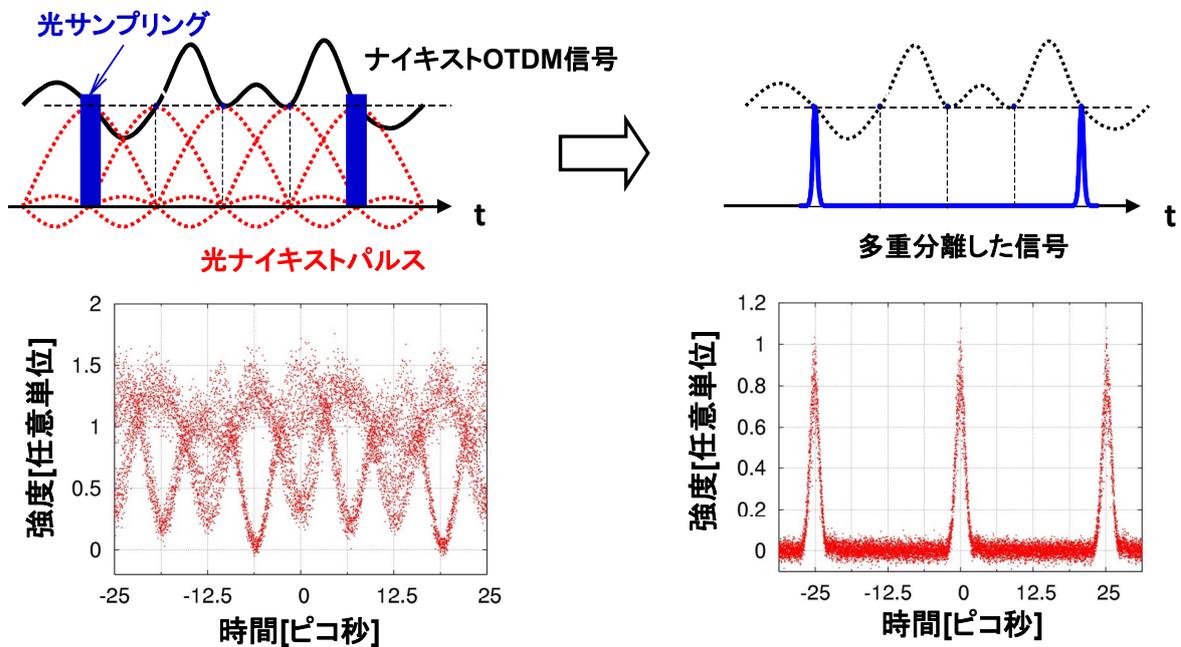


図6 超高速光サンプリング法による光ナイキストパルス信号の多重分離の様子

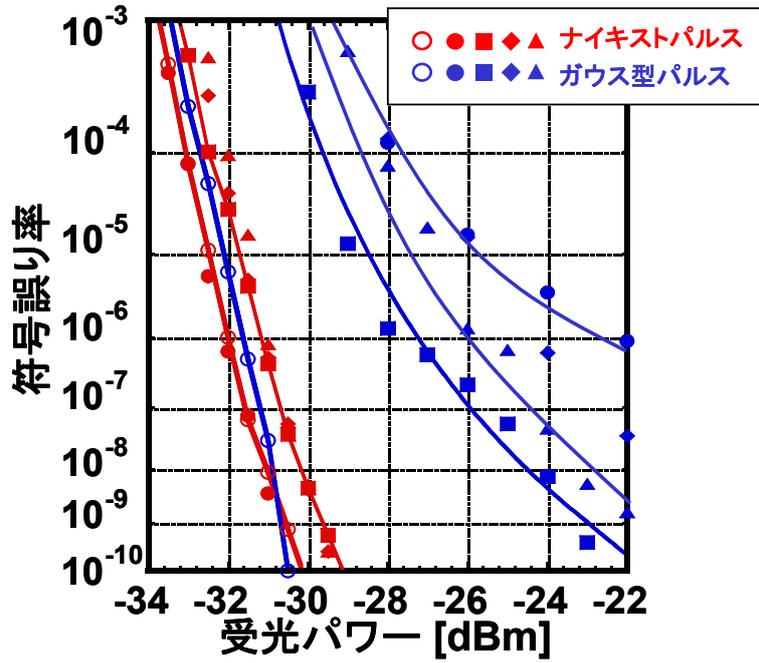


図7 ナイキストパルスならびにガウス型パルスを用いて毎秒160ギガビット信号を伝送させたときの符号誤り率測定結果

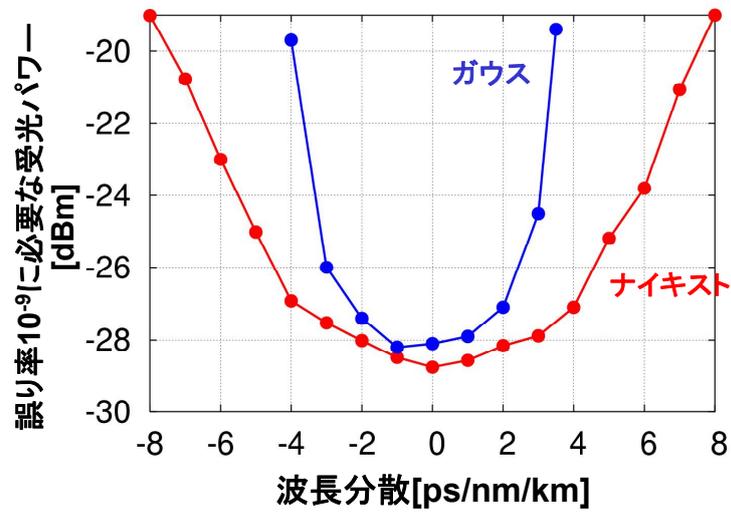


図8 波長分散に対する信号歪みの耐性