

光ソリトンと波長多重

鈴木正敏

(株) KDD 研究所

●地球を巡る大容量光海底ケーブル

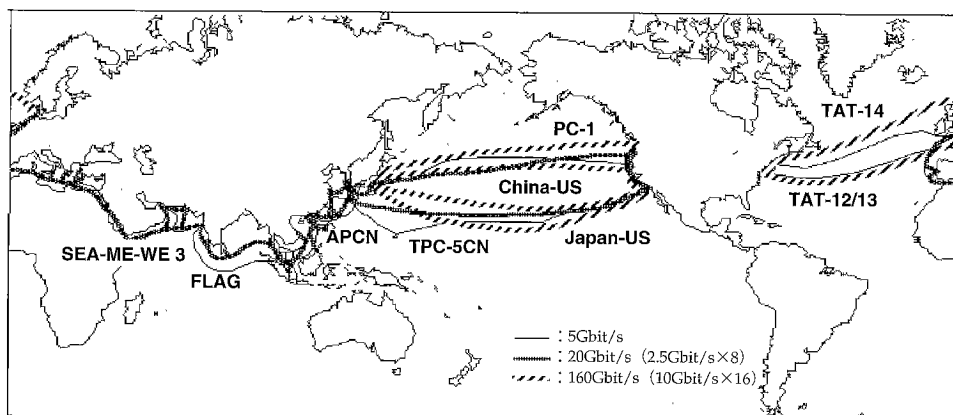
来るべき21世紀のメガメディア社会を支えるグローバル情報スーパーハイウェイを整備するため、世界規模で光海底ケーブル網の構築が急ピッチに進められている(図-1参照)。1996年には光増幅中継技術の導入により5Gbit/sの太平洋横断システム(TPC-5CN)および大西洋横断システム(TAT-12/13)が完成し、1999年には、波長多重(WDM)技術の導入により総容量20Gbit/sの米中ケーブル(China-US)や欧州アジアケーブル(SEA-ME-WE 3)が相次いで建設される。さらに、今世紀の終わりの2000年までに、太平洋ならびに大西洋で160Gbit/sの超大容量を有する大洋横断光海底ケーブルシステムの建設が計画されている(たとえば、Japan-US, TAT-14, PC-1)。このような光海底ケーブル伝送容量の増加と国際インターネット回線容量の爆発的な増大から推定すると、21世紀の光海底ケーブル容量は、1ファイ

バペアあたり、数百Gbit/sから1Tbit/sへ増大するものと予想される。

●波長多重伝送による大容量化

このような伝送容量の急激な増加を可能としたのは波長多重技術の進展である。波長多重伝送システムの概念図を図-2に示す。送信側では、波長の異なる複数の光デジタル信号が多重され、1本の光伝送路へ送出される。光伝送路は光ファイバと光ファイバの損失を補うための光増幅器で構成される。複数波長を一括増幅できる広帯域光増幅器の実現が、波長多重による容量の増加を可能とした。受信部では、各信号が光バンドパスフィルタにより波長ごとに分離されたのちに光受信器で復調される。

China-USケーブルなどでは、2.5Gbit/sの信号が8波長多重され、Japan-USケーブルなどでは、10Gbit/sの信号が16波長多重されている。以上のように、1波長あたりの伝送速度の高速化と、波長数の増加に関する研究・



- TPC-5CN : Trans-Pacific Cable 5 - Cable Network
- China-US : China-United States cable network
- Japan-US : Japan-United State cable network
- TAT-14 : 14th Transatlantic-Telephone Cable
- APCN : Asia-Pacific Cable Network
- FLAG : Fiberoptic Link Around the Globe cable network
- SEA-ME-WE 3 : South East Asia - Middle East- Western Europe 3 cable network
- PC-1 : Pacific Crossing 1 Cable Network

図-1 グローバル光海底ケーブルスーパーハイウェイ

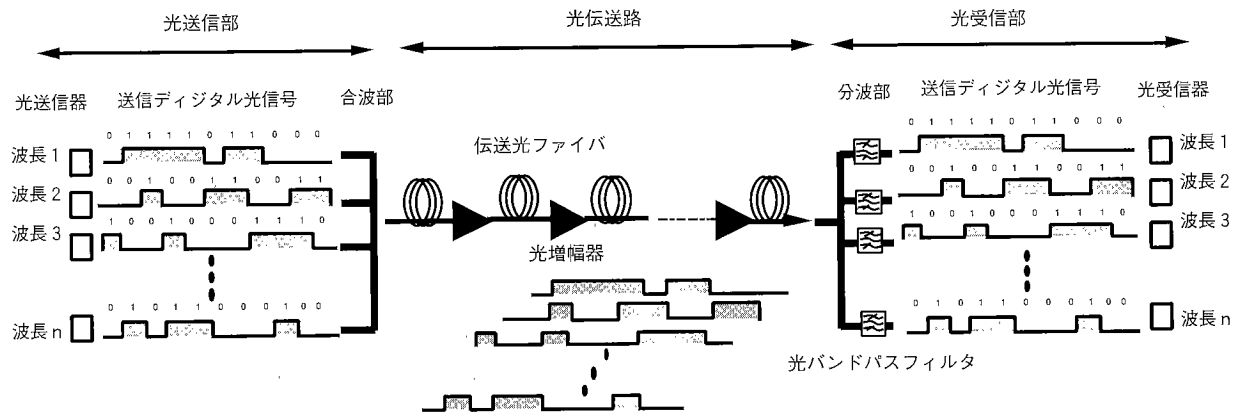


図-2 波長多重 (WDM) 伝送システムの概念図

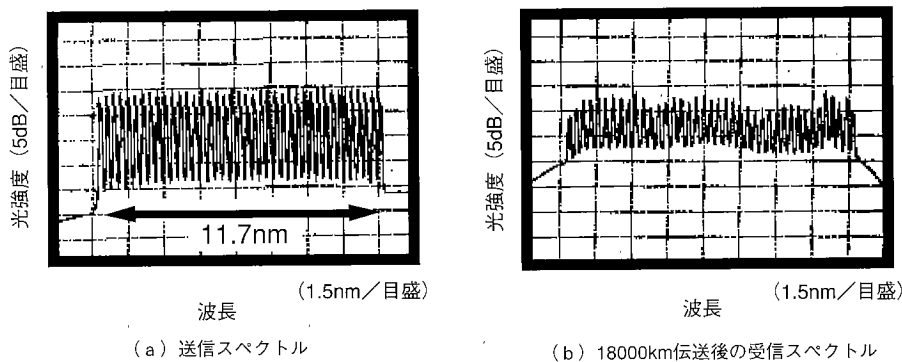


図-3 40WDM 信号に対する広帯域光増幅器の多中継後 (18000km, 360中継) の利得特性

開発が平行して進められてきた結果、1996年から2000年の4年間で伝送容量が32倍まで飛躍的に増大する予定である。

さらに次の世代のテラビット伝送システムにおいても伝送速度の高速化と、波長数の増加の研究が重要である。波長数の増加に関しては、光増幅器および光ファイバの広帯域化に関する研究が不可欠であり、各国の研究機関で積極的に研究が進められている。図-3に広帯域増幅器の一例を示す。40波長多重された信号が、18000km伝送後もほぼ均等なレベルで伝送されており、10nm以上の帯域に渡り平坦な利得特性が実現されていることが分かる。今後、利得帯域幅は数10nmまで拡大され、かつ、光ファイバ特性も所要帯域内で均一化されると期待される。

一方、1波長あたりの伝送速度を高速化するためには、伝送後の波形の劣化を最小限に食い止める必要がある。長距離伝送後の光波形劣化の原因は、光ファイバの波長分散特性 (波長ごとに伝送速度が変わる性質) と非線形性 (光の強さにより屈折率が変わる性質) である。伝送速度の高速化、あるいは、伝送距離の距離化に伴い両者の制約が大きくなるため、従来の矩形の光パルス信号を用いるNRZ (Non Return to Zero) 線形伝送システムでは、伝送速度を10Gbit/s以上に高速化することが困難である。それに対して、光ファイバの分散性と非線形性を

上手にバランスさせ、波形劣化なく信号伝送が可能となるのが光ソリトン伝送であり、次世代の伝送方式として注目されている。図-4にNRZ信号による線形伝送システムと光ソリトン伝送システムの伝送前後の波形の様子を模式的に示す。波形劣化の少ない光ソリトンは、大容量の情報を長距離伝達する手段として適している。

●形を変えない不思議な波—ソリトン—

ソリトンの由来は古く、19世紀半ばにスコットランドのラッセルが運河を眺めていたときに、停止した船のへさきから発生した孤立した波が、形を変えずに何kmも進むのを偶然発見したときにまで遡る。この不思議な波は、孤立して存在する波が形を変えずにどこまでも伝わり、孤立波同士が衝突しても衝突の前後でその性質を変えないという性質を持つことが次第に明らかとなってきた。ソリトンという言葉は、ザバスキ (Zabasky) とクリスカル (Kruskal) が1965年に発表した非線形方程式の数値解に関する論文で初めて登場し、粒子的振る舞いをする孤立波 (Solitary Wave) という意味でソリトン (Soliton: Solitary Waveの「Solit」とPhotonやElectronなど粒子を表す接尾語の「on」の合成語) と命名された。ソリトンは、波の「非線形性」と「分散性」のバランスに

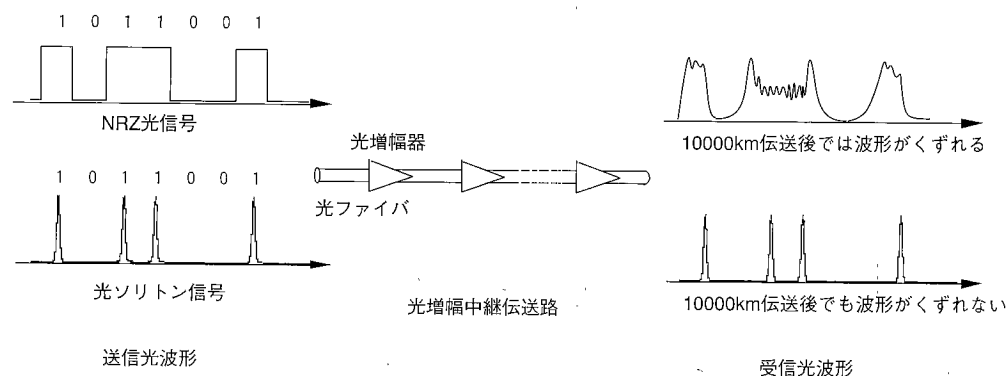
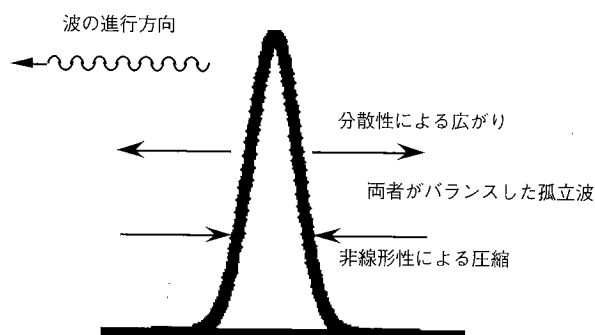


図-4 NRZ光信号伝送と光ソリトン伝送の伝送波形



「分散性」による波形広がりや「非線形性」による波形の圧縮がバランスするとき波形の変わらないソリトンが生成され伝搬する。

図-5 ソリトン波形

によって生じる（図-5参照）。たとえば、媒質に波の振幅が大きいほど波の速度が速くなるという「非線形性」があると、孤立波は次第に突っ立ってきて海岸で見られる波の振る舞いとよく似た変形が起こる。一方、「分散性」は波長（または周波数）ごとに速度が異なる性質であり、多くの異なった波長成分で構成される孤立波が分散性媒質を伝搬すると次第に広がっていく。この互いに逆に働く2つの効果が完全にバランスしたときにソリトンが形成される。

●光ファイバ中のソリトン

光ソリトン伝送方式の概念は1973年にAT&Tの長谷川らにより提唱されたものである¹⁾。実験的検討が本格化したのは1980年代末にNTTの中沢らによって光増幅器を用いた長距離伝送実験が行われてからであり²⁾、その後、実用的なソリトン光源³⁾の出現などの光デバイス技術の進展に支えられ、その実現性が高まってきた。

長距離光通信の波長約 $1.5\mu\text{m}$ の光は、周波数約 200THz の波であり、その強度のオン・オフにより波の包絡線にデジタル情報を乗せ信号を伝達する。光ファイバには、前述したように、光信号の波長により伝送速度が異なる波長分散特性と光の強さが強いほど屈折率が大きくなる非線形光学効果（カー効果）が存在し、両者と

も、現行の光通信システムでは伝送特性の劣化要因となっている。

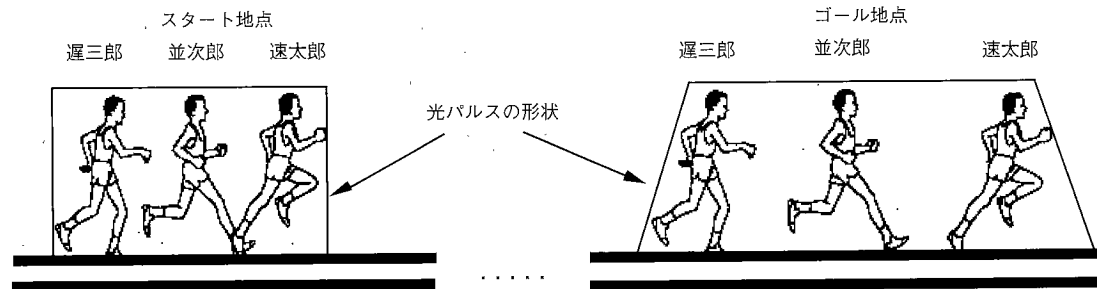
一方、光ソリトン伝送システムでは伝送路である光ファイバの波長分散特性を非線形光学特性で相殺することで形成される。すなわち、光ファイバの波長分散特性による本質的なパルス広がりや、非線形光学効果によって生じる光パルス圧縮とが光ファイバ中でバランスするよう各種のパラメータを設定し、光信号の波形（包絡線）を変化させずに伝送する方式である。

図-6は、波長分散により受信端で波形が広がる従来の伝送システムと波形劣化がなく形を変えずに光信号が伝搬する光ソリトン伝送システムの様子を、速さの異なる3人のランナーにたとえて説明したものである。従来の線形伝送システムでは、光パルス内の波長が異なる成分が、光ファイバの分散の影響により、受信端にバラバラに到着し受信光波形が広がるため、受信信号の「1」、「0」を判定するのが困難になる。それに対して、光ソリトン伝送では、強い光パルスで生じる光非線形の影響をゴムの窪みに例えることができ、その窪みの効果で波長分散による各成分の速度差がキャンセルされ、光パルスの形（集団の形）が変わらず進む様子が表現されている。その結果、正確なデジタル情報が長距離でも伝達可能となる。

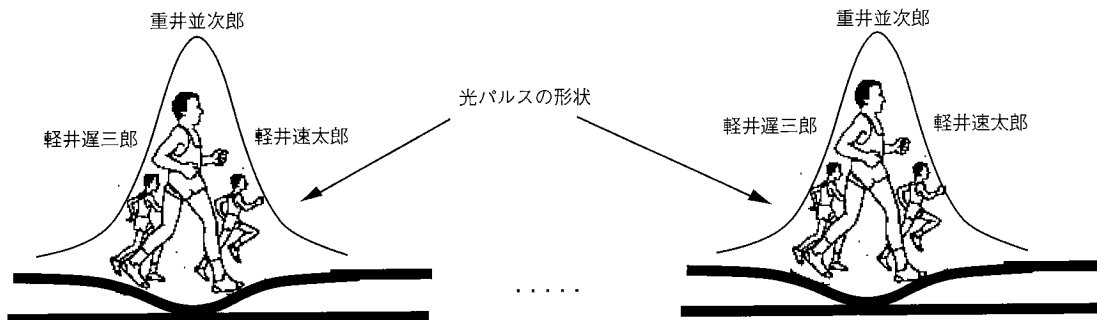
●ソリトン制御技術

原理的に波形歪みを伴わずに光信号を伝送できる光ソリトン伝送方式において伝送特性を劣化させる要因は、光パルス列の到着時間の揺らぎ（タイミングジッタ）である。これは、光ソリトンが光増幅器通過時に重畳される光の強度雑音や、光ファイバの非線形効果により中心周波数揺らぎに変換されことに起因する。周波数揺らぎを伴う光信号は、分散のある光ファイバを伝搬中に速度揺らぎに変換され、受信端でのタイミングジッタとなる（Gordon-Hausジッタ）。

このタイミングジッタは距離の3乗に比例するため、最大伝送距離や伝送速度を制限する。このため、タイミン



(a) 堅い道路を走る3人のランナー：速度の違いによりゴールにはバラバラに到着する。（従来の線形の光伝送システムにおいて、ファイバの分散により1つの矩形光パルス内の速度の異なる成分が、長距離伝送後に受信端で広がることに相当する。）



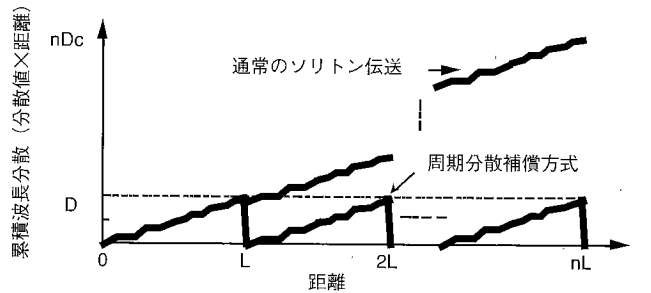
(b) ゴムマット上を走る3人のランナー：体重の重い中心のランナー（重井並次郎）がゴムマット上に窪みを作ると、前を走る速いランナー（軽井速太郎）は坂道を登るため減速され、遅いランナー（軽井遅三郎）は坂道を下るため加速される。マットの窪み具合と遅三郎と速太郎の速度差がバランスすると3人のランナーの固まりは同じ速度でゴールに到着する。（ソリトン光伝送システムにおいて、光ファイバの非線形性により、細い光パルスの内部で光強度に応じて屈折率が変わり、分散による速度差をキャンセルする速度差が形成されることにより、光パルスが形を変えずに受信端に到着することに相当する。）

図-6 従来の矩形光パルスを用いる線形伝送システム (a) とソリトン伝送システム (b) の概念図

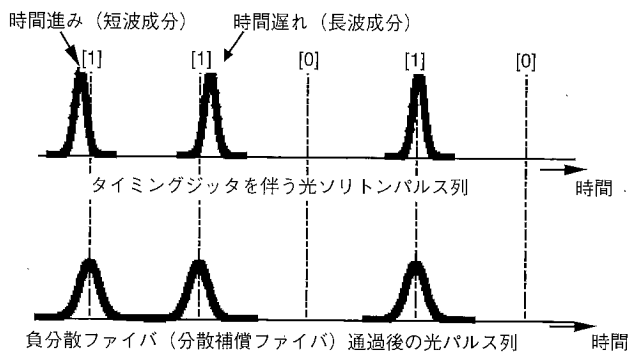
ゲジッタを抑制するソリトン制御技術が、各国の研究機関で活発に研究されている¹⁾。周波数領域の代表的なソリトン制御方法としては、周波数揺らぎを安定化させる光フィルタを中継器内部に挿入し、光フィルタの中心波長を距離とともに徐々にシフトさせ、非線形波であるソリトンを光フィルタにトラップして、線形波である雑音をフィルタの帯域外へ分離する方法である（スライディング周波数フィルタ方式）。これにより、周波数の安定化と周波数揺らぎの元となる光雑音の分離が可能となる。また、時間領域での制御方法として、伝送路中に伝送速度と同期がとれた光変調器を挿入し、直接光パルスの位置揺らぎを安定化する方法（同期変調方式）が提案されている²⁾。いずれの方式も、線形伝送システムでは不可能な、雑音と信号の分離が可能である点が特筆すべき点であるが、光フィルタの精密制御や高速光・電子回路を含む特殊な光中継器を伝送路中に配置するなど実用上数々の課題を抱えており、光増幅中継システムの持つ「簡便な中継技術」という利点をかなり犠牲にしなければならない。それに対して、すでに確立された光増幅中継伝送技術をできるだけ変更せず、光ソリトン伝送システムが構築できる新しいジッタ抑圧方式として「周期的分散補償方式」が提案されている⁴⁾。

●新ソリトン伝送方式—周期的分散補償によるタイミングジッタの克服—

周期的分散補償方式は、タイミングジッタの発生が伝送用光ファイバの波長分散特性に起因することに着目し、これを限りなく小さくすることで、発生した光信号の周波数揺らぎがジッタに変換されないようにする方法である。光ソリトンが形成されるには、適量の波長分散が必要となるので、伝送用光ファイバの波長分散をシステム全域に渡って零にすることはできない。そこで、伝送用光ファイバには、光ソリトン伝送を可能とする正の分散を持つファイバを選び、システム中の所々（たとえば数百kmごと）に、伝送用光ファイバで累積した波長分散を打ち消す（すなわち分散補償する）逆分散特性を有する負分散ファイバを挿入する。局所的には光ソリトン伝送の条件を満たしつつ、システム全体から見た場合には、線形伝送システムと同様に、ほぼ零分散伝送となるように光ファイバを配列する。図-7に、周期的分散補償方式と通常の光ソリトン方式の分散マップを示す。通常の光ソリトン方式では、分散値が距離とともに累積するのに対し、周期的分散補償方式では、分散がオフセットされ距離とともに累積しない。また、図-7に示すように時間遅れのある光パルスは長波長成分を有し、時間進みのある光パルスは短波成分を有していることから、逆符号の分



(a) 通常ソリトン伝送と周期的分散補償方式の伝送距離に対する累積分散



(b) 周期的分散補償によるタイミングジッタ抑制の概念図

図-7 周期的分散補償方式

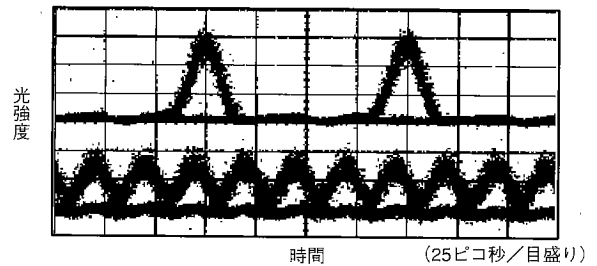
散を持つ分散等化ファイバ通過後には、光パルスの位置ずれが引き戻されタイミングジッタが抑制される様子が分かる。分散補償後に光パルスは広がるが、次のソリトン伝送路区間を伝搬中にソリトンの性質により再び細くなるため、波形は細くなったり広がったりを繰り返しながら伝搬する。

周期的分散補償方式は、「形を変えずにどこまでも伝わる固有値解である」純粋な光ソリトン通信とは異なり、マクロ的には形を変えないものの、ローカルには形を変えながら伝送させる新しい方式であり、ゼロ分散で信号を伝送する線形システムと非線形システムの利点を融合させた方式である。

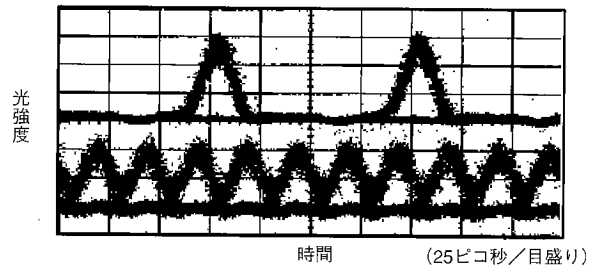
図-8 に一例として、周期的分散補償方式による40Gbit/s 光ソリトンの10000km 伝送前後の光波形を示す。この方式を用いると、日米間の海底ケーブルの距離9000km を上回る10000km 伝送後でも波形劣化はほとんどなく、符号誤り率 10^{-9} 以下(符号誤りの確率が10億分の1)の良好な伝送特性が達成されている。

●多波長化によるテラビット伝送システムの実現に向けて

シングルチャンネル伝送では、光ソリトン伝送により20～40Gbit/s の大洋横断伝送の可能性が確認されており、従来のNRZ 伝送に対するソリトン伝送の優位性が実証されている。ソリトン波長多重(WDM) 伝送では、周期的分散補償方式で20Gbit/s, 20WDM (総容量: 400Gbit/s) で2000km の伝送や20Gbit/s, 32WDM (総



(a) 伝送前の光波形 (上: 多重前の10Gbit/s の信号, 下: 時分割多重化された40Gbit/s の信号)



(b) 10000km 伝送後の光波形 (上: 時分割分離された10Gbit/s の信号, 下: 受信端での40Gbit/s の信号)

図-8 40Gbit/s, 10000km 伝送前後の光ソリトン波形

容量: 640Gbit/s) で1000km の伝送が報告されている。いずれも、ソリトンの特徴である高速性を保ちつつ、少ない波長数で大容量を実現している。

一方、線形伝送システムでは、分散管理の改良や非線形性の小さい光ファイバを使用することで非線形性による異なる波長間の干渉を抑制することにより、多波長・長距離化を実現している。また、送信光波形については、従来のNRZ 型からソリトンと同様のRZ (Return to Zero) 型の光波形に変更し光非線形による波形劣化の影響を緩和している。ソリトンの性質の利用がすでに始まっており、これまでに、5Gbit/s～10Gbit/s のRZ-WDM 伝送で160Gbit/s, 9000km の伝送が達成されている。

以上のように、ソリトン伝送は周期的分散補償方式の導入により線形伝送系へ近づいており、また、線形伝送系はRZパルス化などによりソリトン系へ近づいている。数100Gbit/s～Tbit/s の大容量・長距離伝送システムの実現には、高速化と多波長化が要求されるが、このような将来のテラビット長距離光伝送システムは、線形システムで培われた分散管理技術と高速ソリトン伝送技術のさらに進んだ技術融合により実現されると期待される。

参考文献

- 1) Hasegawa, A. and Kodama, Y.: Solitons in Optical Communications, Oxford University Press (1995).
- 2) 中沢正隆: 光ソリトン伝送, 信学論, Vol.J74-C-1, No.11, pp.429-439 (1991).
- 3) 鈴木正敏: 光ソリトン用超短光パルス, レーザ研究, Vol.20, No.8, pp.673-679 (1992).
- 4) 鈴木正敏: 光ソリトン通信, 信学誌 Vol.80, No.11, pp.1117-1121 (1997). (平成11年1月12日受付)