

# 分散マネージメント光ソリトン伝送



松本 正行\*

## Dispersion Management in Optical Soliton Transmission

**Key Words** : optical communication, soliton, dispersion management

### 1. はじめに

ファイバ中の光ソリトンを長距離高速光通信の情報キャリアとして利用する試みは1973年の理論的提案<sup>1)</sup>および1980年の実験的検証<sup>2)</sup>以来世界各国の研究機関で精力的に進められ、最近の実験では毎秒20ギガビットのパルス列を8チャンネル波長多重した信号を10000kmの距離にわたって伝送できることが示されている<sup>3)</sup>。しかしながら、NRZ(Non-Return-to-Zero)信号を用いた従来の線形伝送方式を用いたシステムの性能向上も著しく、実用システムにおける光ソリトン伝送方式の優位性が明確に示されるまでには至っていない。そのような状況の中で、光ソリトンの伝送特性をさらに向上させる方法がいくつか提案されている。本文では、そのような試みの一つである、光ソリトン伝送におけるファイバの分散マネージメントについて、筆者の研究成果を交えて報告する。

### 2. 光ソリトン

長距離光ファイバ通信システムにおいては、

光ファイバの損失による信号強度の低下を回復するために伝送路中に中継器を挿入する必要がある。従来は、中継器内で光信号を電気信号に変換し、それを増幅した後に再び光に変換する法式(再生中継方式)が用いられてきたが、信号を光のまま増幅することができる良質の光ファイバ増幅器の出現に伴って、再生中継器を光ファイバ増幅器で置き換えた光通信システムの開発が急速に進展した<sup>4)</sup>。このような光増幅器を用いた光通信システムに、NRZ信号からなる従来の線形伝送方式を適用する場合、光増幅器から生じる雑音の累積による信号対雑音比の劣化を避けるために信号光電力を大きく選ぶ必要があり、その結果、ファイバの非線形性の影響が大きく現われ伝送特性が劣化する。

それに対して、ファイバ中の光ソリトンは、ファイバの非線形性と波長分散性(異常分散)のバランスによって作られる安定な光パルスであり、無損失の理想的な条件の下では非線形効果の影響を受けながらも無限の距離にわたって波形歪みなくファイバ中を伝搬する。このことは、ファイバ中の光波伝搬の振舞いを記述する非線形シュレディンガー方程式が定常的なソリトン解を厳密解としてもつことによって示される。

しかしながら、実際の伝送システムにおいては光増幅器からの雑音との相互作用によってソリトンパルスはランダムな時間位置の変調を受け、このことが情報伝達の誤りの原因になる。さらに、損失のあるファイバ中をソリトンが伝わる場合、非線形性と分散性のバランスが完全には維持されず、ソリトンパルスに歪みが生じ

\* Masayuki MATSUMOTO  
1960年1月6日生  
1984年大阪大学大学院工学研究科通信工学専攻博士前期課程修了  
現在、大阪大学大学院工学研究科、通信工学専攻、助教授、工学博士、光通信工学  
TEL 06-879-7729  
FAX 06-879-7774  
E-Mail matumoto@comm.eng.osaka-u.ac.jp



る。これらの問題は、伝送路中に狭帯域のフィルタを挿入したり、ファイバの分散性を伝送方向に徐々に変化させたりすることによって解決できることが知られている<sup>5)</sup>。しかし、これらの対策を講じることはシステムの構成を複雑にし、システムの保守性を損なうため、実用システムへの適用には問題が多いと考えられている。

### 3. 分散マネージメント光ソリトン

通常の光ソリトンは均一な異常分散性をもファイバを使って伝送される。ソリトン伝送に関する前述の問題点、例えば雑音の影響によってパルスの時間ずれが生じること、を軽減するためには、ファイバの分散性をできるだけ小さくすればよい。しかしながら、ファイバの分散性を過度に小さくするとそれとバランスする非線形性も小さく保つ必要があるため、パルスのエネルギーが小さくなりかえって雑音の影響が増大することになる。この問題を解決するための方法として、伝送路に周期的に分散補償用のファイバを挿入し伝送路の平均分散値を下げる方法が有効であることが実験的に示された<sup>6)</sup>。このような、分散マネージメントが施された伝送路、すなわち周期的に分散性の符号が反転するようなファイバ伝送路においては、光パルスは周期的に伸長と圧縮を繰り返しながら伝搬する(図1参照)。その結果、パルスが感じる平均的な非線形性が小さくなり、パルスのエネルギーが大きい状態で分散性とのバランスが達成される。このような非線形パルスは、ストレッチパルス(Stretched pulse)、あるいは、分散マネージソリトン(Dispersion-managed soliton)などと呼ばれ、最近多くの研究がなされている。

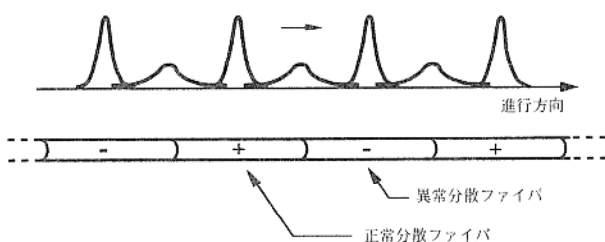


図1 群速度分散の符号が周期的に反転するファイバ伝送路におけるストレッチパルスの伝搬(パルスは圧縮と伸長をくり返しながら伝搬する)。

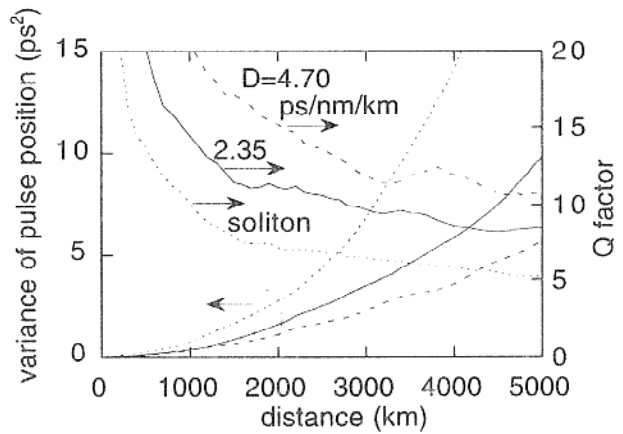


図2 ストレッチパルスおよび通常のソリトン伝搬における時間ジッタとQファクタ(伝送路の平均群速度分散は  $d=0.094 \text{ ps/nm/km}$ , ファイバ1区間の長さは50kmである)。

図2に通常のソリトンとストレッチパルスに対するQファクタ(雑音の影響によるパルスエネルギーのゆらぎの程度を与える指標である。Qファクタが大きいほどパルスエネルギーのゆらぎが小さく信号対雑音比が大きい。)と時間ずれの数値計算例を示す<sup>7)</sup>。伝送速度が毎秒20ギガビットの場合、Qファクタが6以上、時間ずれの分散が  $7.5 \text{ ps}^2$  以下であれば信号伝送時のビット誤り率を  $10^{-9}$  以下とすることができる。なお、通常のソリトンの場合、伝送路の分散値は  $d$  で与えられ、ストレッチパルスの場合は、分散値が  $D+d$  と  $-D+d$  のファイバが交互に接続される。図2より、ストレッチパルス、特に  $D$  が大きい場合のほうがQファクタが大きく、

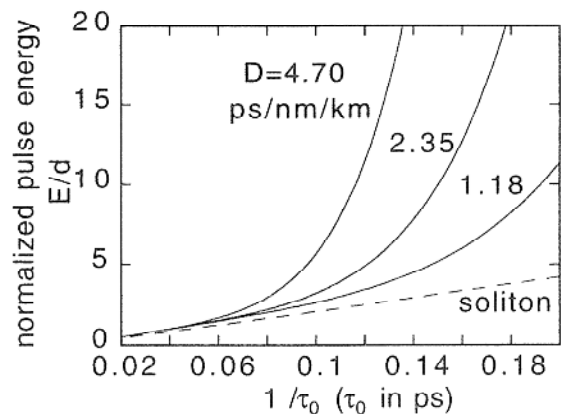


図3 ストレッチパルスおよび通常のソリトンのパルスエネルギーとパルス幅の関係(ストレッチパルスの場合のパルス幅  $\tau_0$  は、パルスが最も圧縮された時のパルス幅である)。

また、パルスの時間ずれも小さいことがわかる。

このようなストレッチパルスの優れた性質は、ストレッチパルスのエネルギーが通常のソリトンのエネルギーよりも大きくなることによってもたらされるので、それらのエネルギーの比を定量的に把握することが重要である。図3はパルスエネルギーとパルス幅との関係を両者のパルスについて理論的に計算した例である<sup>8)</sup>。図3より、Dが大きいほど、また、パルス幅が狭いほどストレッチパルスのエネルギーがソリトンのエネルギーより大きくなるのがわかる。

#### 4. む す び

最近の長距離(数千キロメートル以上)大容量(毎秒数十ギガビット以上)の光ファイバ伝送実験においては、NRZ信号を用いた線形伝送方式とソリトン伝送方式とを伝送路構成上の違いによって明確に区別することができなくなりつつある。両者の場合ともファイバの平均分散値はゼロに近い値に設定されているし、また、どちらにおいても本文で述べた分散マネジメントの手法が活用されている。実際、NRZ伝送方式において送信器の出力がNRZ信号波形をもっていたとしても伝送途中にソリトン型のパルス波形に変形する場合があることが報告されている<sup>9)</sup>。固定された2点間を結ぶ長距離光ファイバ通信にとっての最適な伝送方式は、従来のNRZ線形伝送方式とソリトン伝送方式の間にあると考えられる。分散マネジメント光ソ

リトン(ストレッチパルス)を用いた伝送方式はこのような最適伝送方式を目指すソリトン側からのアプローチであると言える。

分散マネジメント光ソリトン(ストレッチパルス)伝送に波長分割多重の考えを適用し、さらに伝送容量を向上させることが次の研究課題である。

#### 文 献

- 1) A. Hasegawa and F. D. Tappert, *Appl. Phys. Lett.* 23, 142 (1973).
- 2) L. F. Mollenauer et al., *Phys. Rev. Lett.* 45, 1095 (1995).
- 3) M. Nakazawa et al., *Optical Amp. and Their Appl. Topical Meeting*, PD10 (1997).
- 4) E. Desurvire, "Erbium-doped fiber amplifiers", John Wiley & Sons (1994).
- 5) A. Hasegawa and Y. Kodama, "Solitons in Optical Communications", Oxford Univ. Press (1995).
- 6) M. Suzuki et al., *Electron. Lett.* 31, 2027 (1995).
- 7) M. Matsumoto and H. A. Haus, *IEEE Photon. Technol. Lett.* 9, 785 (1997).
- 8) M. Matsumoto, *Opt. Lett.* 22, 1238 (1997).
- 9) N. S. Bergano et al., *Optical Fiber Commun. Conf.*, PD16 (1997).

