

光ファイバ通信 (1)

大容量伝送システム用光ファイバの波長分散と その制御

株式会社フジクラ 光電子技術研究所

堀越 雅博

Optical fiber communications [I] Control of chromatic dispersion of optical fiber for high capacity transmission system

Masahiro Horikoshi

Fujikura Ltd. Optics and Electronics Laboratory

1. はじめに

インターネットの普及と提供されるサービスのブロードバンド化の進展により、最近では光ファイバを用いた 100 Mbps 広帯域サービスの提供が開始されるなど、光ファイバ通信はまさに身近なものになっている。そして、これに対応するネットワークへの大容量化の要求も高まりを見せている。その一方で光通信システムは、この数年間において、波長分割多重 (WDM: Wavelength Division Multiplexing) 方式を中心とした大容量化に関する開発と導入が活発に行われてきた。この様な大容量伝送システムに伝送路として用いられる光ファイバでは、波長多重化による伝送波長域の広がりおよび入力光パワーの増大等にもない、波長分散

の制御、偏波分散の抑制、光学非線形効果の抑制が特に求められている。ここでは大容量伝送システム用光ファイバにおける重要な要求特性の一つである光ファイバの波長分散とその制御について述べる。

2. シングルモード光ファイバの波長分散

光ファイバ通信において、光ファイバに入射された光信号パルスは、光源のスペクトル幅、ファイバ材料の屈折率分散、光ファイバの屈折率分布などによって決まるひずみを受け、光信号波形の幅が広がってしまい、この効果によって通信線路としての最高伝送速度が決定される。この光信号波形の広がりをもたらず効果を総称して分散と呼んでいる¹⁾。シングルモード光ファイバにおける分散は、材料分散、導波路分散、偏波分散の 3 要因が考えられる。この内、材料分散と導波路分散は波長依存性を示す

〒285-8550 千葉県佐倉市六崎 1440
㈱フジクラ
TEL 043-484-3944
FAX 043-481-1210
E-mail: hori@lab.fujikura.co.jp

ことから、両者を合わせて波長分散 s とも呼ばれており、次式²⁾で示される。

$$s = s_m + s_w = \frac{l}{c} \frac{d^2 n_1}{d l^2} + \frac{l}{2 p^2 c n_1} \frac{d}{d l} \left(\frac{l}{w^2} \right) \quad (1)$$

ここで、 s_m は材料分散、 s_w は導波路分散を表し、 l は波長、 c は光速、 n_1 は光ファイバのコアの屈折率、 w はモードフィールド半径である。

材料分散は、光の波長変化による光ファイバ材料の屈折率変化にともなう信号光の群速度が変化し、それと光源のスペクトルの広がりがあいまって生じる分散であり、材料であるガラスの屈折率分散から求めることが出来る。屈折率分散を表すものとして Sellmeier の多項式が知られており、現在通信用光ファイバの材料として主に用いられている石英及びゲルマニアドープ石英について各係数が求められている^{3),4)}。なお、石英系光シングルモード光ファイバの材料分散は、波長の単位を mm としたおおまかな近似では、ほぼ共通に以下のように表せる⁵⁾。

$$s_m = \left(\frac{l - 1.3}{l} \right) \times 120 \text{ ps/km/nm} \quad (2)$$

導波路分散は、光ファイバ中を伝搬するモードの広がり波長の変化によって変化し、これが光ファイバの屈折率分布（導波路構造）に依存して生じる分散である。

また偏波分散は、シングルモード光ファイバのコアの扁平、ファイバに残留するわずかな歪みや外力によって生じた異方性により、理想的には縮退している直交二偏波が、あたかも 2 モードとして振る舞うことによって生じる分散である。なお偏波分散は、通常上記二つの分散と比較すると小さいため、シングルモード光ファイバの“分散”という場合は、波長分散をさすことが多い。

従来の光通信システムは、単一波長の信号を伝送するシステムが主であり、信号光の高速化である時分割多重（TDM: Time Division Multiplexing）方式によって大容量化が進められて

きた。この様なシステムでは伝送速度が高速になるにつれて光ファイバの分散が問題となるため、伝送用光ファイバは、使用波長での波長分散がほぼ零とすることが必要である。1.3 mm 帯シングルモードファイバ（SMF: Single-Mode Fiber）は、単純な階段型屈折率分布で、図 1a) に示される様に波長分散が零になる波長（零分散波長）が、ほぼ材料分散が零となる 1.3 mm 付近になっている。その後、光ファイバの最低損失波長域である 1.5 mm 帯を利用するために 1.5 mm 帯零分散シフト光ファイバ（DSF: Dispersion Shift Fiber）が開発された。1.5 mm 帯へ零分散波長をシフトさせるには、例えば図 1b) の様に階段型屈折率分布でもコア径を小さくしてコアとクラッドの屈折率差（比屈折率差）を大きくすることでも可能ではあるが、モードフィールド径が小さく光ファイバの接続等に関して実用的でない。この特性をも満足するような屈折率分布形状が検討され、デュアルシェイプ型やセグメントコア型屈折率分布の DSF が実用化されている。

3. 波長多重伝送システム用光ファイバと複合伝送路

光通信システムの大容量化に対応するもう一方の手法として複数波長の光信号を伝送する WDM 方式があり、ここ数年間にシステムの開発及び導入が活発に行われてきた。WDM システムにおいて伝送特性を劣化させる要因の一つに、光ファイバに入射される光パワーの増大にともなう光ファイバ中での光学非線形効果があり、光ファイバの零分散波長付近では、四光波混合（FWM: Four Wave Mixing）が顕著となる。この FWM は、伝送信号光のパワー密度に比例して光ファイバガラスの非線形屈折率がわずかに変化することに起因し、波長の異なる信号光間で相互作用が生じ、信号光波形にひずみや雑音を発生させる現象である⁶⁾。従って FWM を抑制するには、伝送波長帯におけ

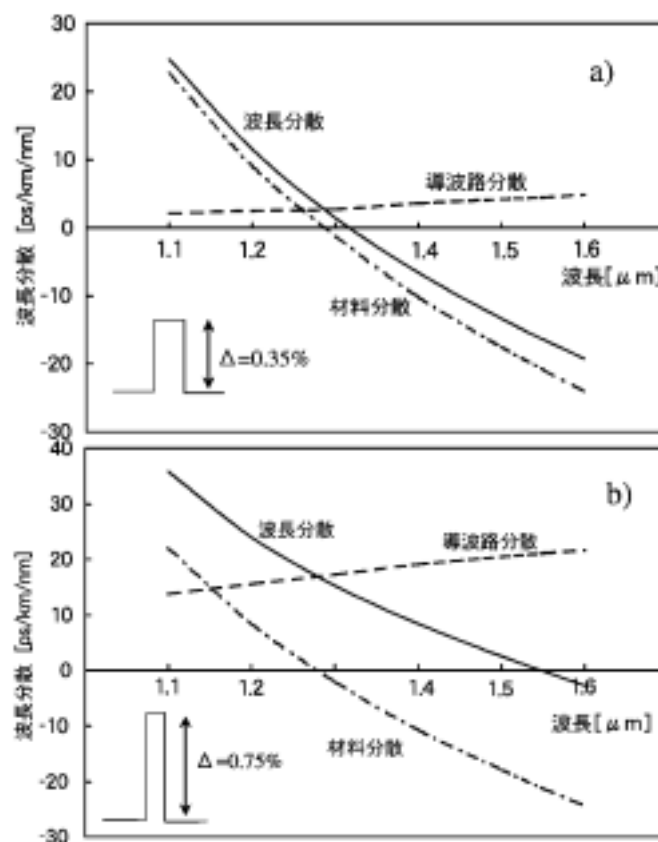


図1 シングルモードファイバの波長分散

る光ファイバの波長分散を零ではなく、ある程度の分散値を有する光ファイバとして、FWMの発生効率を低減させる方法が有効となる。このような光ファイバが、ノンゼロ分散シフトファイバ (NZDSF: Non-Zero Dispersion Shifted Fiber) と呼ばれている光ファイバである。この分散値は、伝送速度、波長間隔等のWDMシステムの条件に依存して変化するため、種々のタイプの光ファイバが開発されている。

メトロ系とも呼ばれる 200 km 程度までの中距離 WDM システム用として開発された NZDSF の波長分散の一例を図 2 に示す。この光ファイバは、これまでの WDM システムにおいて主に用いられてきた波長領域である C バンド (1530~1565 nm) のみならず、S バンド (1460~1530 nm) をも含めた広い波長領域

で WDM 伝送が可能となるように設計されている⁷⁾。

従来の SMF も 1550 nm 帯に零分散波長がなく、実効コア断面積 A_{eS} が約 80 μm^2 と大きいことから WDM 伝送に用いることが可能である。特に 1260~1625 nm にわたる広い波長域で、20 nm 程度の“粗い”波長間隔で波長多重を行う WDM システム (CWDM: Coarse Wavelength Division Multiplexing)⁸⁾を可能とするために、従来 OH 基吸収損失が比較的大きく使用不可能であった 1.38 μm 帯の損失を低減した SMF が提案されている⁹⁾。また、この光ファイバは、水素による 1.38 μm 帯の損失増加も従来のものと較べて低減されていることも特徴である。なお SMF の 1550 nm における波長分散値は、約 17 ps/km/nm であり、

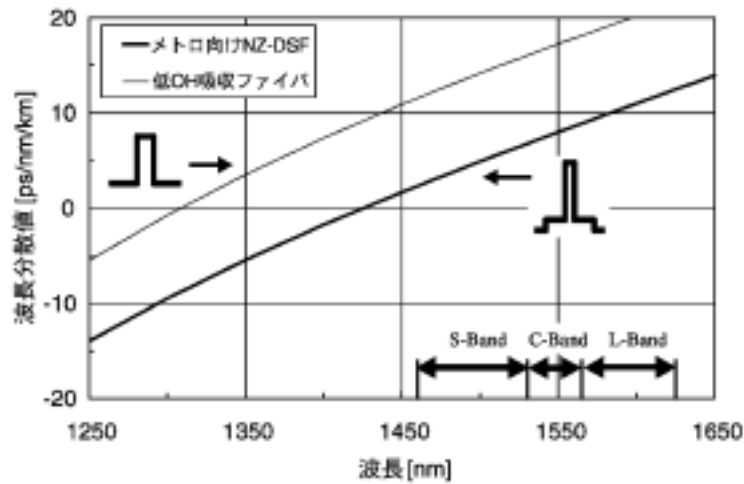


図2 中距離 WDM システム用光ファイバ

NZDSF と比べると大きい。このため、WDM システムに用いる場合は、この分散値を補償する分散補償ファイバ (DCF: Dispersion Compensation Fiber) と組み合わせて伝送線路を構成することにより、光学非線形効果を抑圧し、かつ伝送線路全体の波長分散を小さくした伝送線路を実現することが可能となる。DCF は、大きな負の波長分散を持った光ファイバで、零分散波長を 1550 nm 以上にするためにコア径を小さく、比屈折率差を大きくすることで実現している。

光海底システムのような長距離 WDM システム用の伝送線路では、光学非線形効果の低減とともに信号劣化につながる残留分散を低減することが厳しく要求される。光学非線形効果を低減するために A_{eS} を大きくした NZDSF が開発されており、長距離伝送システムとして、前半にこの A_{eS} 拡大 NZDSF を用い、後半に分散スロープを低く抑えた NZDSF を用いた複合線路が主流となっている。しかし、このような組み合わせでも伝送波長域の端部では、長距離伝送した際に分散スロープによって累積される残留分散が大きくなり、信号劣化が避けられない。この様な問題を解決して、さらなる大容量化を

達成するために、分散特性が通常の SMF とほぼ同等で、ステップ型やデプレストクラッド型で屈折率分布の最適化を行い、実効断面積をさらに拡大した光ファイバ (EEPDF: Enlarged Effective area Positive Dispersion Fiber) と分散スロープ補償型分散補償ファイバ (SCDCF: Slope Compensating and Dispersion Compensation Fiber) を組み合わせた複合伝送線路が提案され、開発の主流となっている^{10)~12)}。SCDCF は、大きな負の波長分散と負の分散スロープを持ったファイバである。この様な複合伝送線路の例を図 3 に示す。線路の前半に A_{eS} の大きな EEPDF を用いて光学非線形効果を低減し、後半で前半のファイバの波長分散と分散スロープを補償することによって、広い波長帯に渡って波長分散が零に近い値となる線路を実現することが可能となる。

4. ま と め

大容量光通信システムに伝送用光ファイバにおける重要な要求特性の一つである波長分散とその制御について述べてきたが、最近では、1 波長当たり 40 Gbit/s 以上の時分割高速伝送技

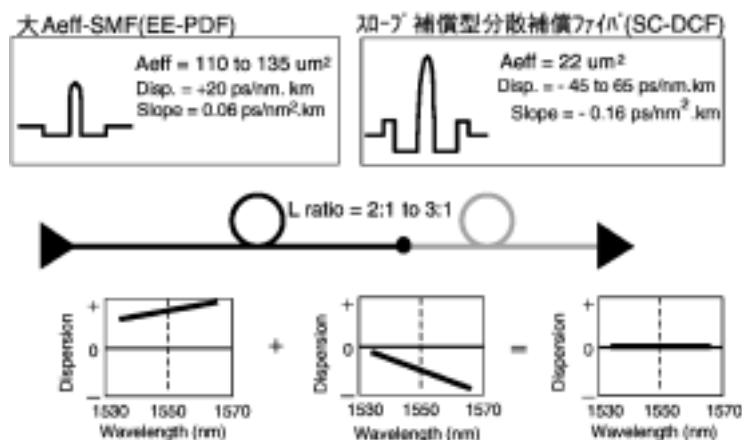


図3 SC-DCFを用いた複合伝送線路

術，200波以上の波長分割多重伝送技術を組み合わせ、光ファイバ1本当たりの伝送容量が10 Tbit/sを越える伝送実験報告もされている¹³⁾。この様な大容量光通信システムに用いられる光ファイバでは、波長分散のみならず偏波分散の抑制も必要であると言われており、製造技術を含めた光ファイバの開発が今後も進められていくと思われる。

参考文献

- 1) 大越，岡本，保立，「光ファイバ」オーム社(1983)。
- 2) C. Pask, Electron. Lett., vol. 20, No. 3, pp. 144-145 (1984)。
- 3) J. W. Fleming, J. Amer. Ceram. Soc. Vol. 59, No. 11-12, pp. 503-507 (1976)。
- 4) S. Kobayashi et. al., IOOC, B8-3 (1977)。
- 5) K. Petermann, Electron. Lett., vol. 19, No. 18, pp. 712-714 (1983)。
- 6) G. P. Agrawal, Nonlinear fiber optics, New York Academic Press (1989)。
- 7) T. Oishi, et al., OECC2000, 12B3-4 (2000)。
- 8) S. K. Das, et. al., NFOEC2001, pp. 850-855 (2001)。
- 9) 布目他，電子情報通信学会ソサイエティ大会，SB-12-2 (2001)。
- 10) K. Aikawa, et al., ECOC '99, I, pp. 302-303 (1999)。
- 11) T. Suzuki, et al., OECC2000, 14C4-4, 554-555 (2000)。
- 12) E. Sasaoka, et al., Suboptic2001, T4. 2. 3 (2001)。
- 13) K. Fukuchi, et al., OFC2001, PD24 (2001)。