

# 大容量伝送用光ファイバー

西村正幸

エルビウム添加ファイバー増幅器 (EDFA: erbium-doped fiber amplifier) は、光ファイバー通信分野における近年最大の技術的ブレイクスルーのひとつとあってよい。光信号を光のまま増幅する高性能な EDFA の出現によって、長距離高速光伝送システムが大きく進展することとなった。光増幅器を用いた長距離光伝送システムにおいては、従来の光伝送方式に比べ、光ファイバー伝送路への入力光信号レベルが高い、伝送距離が長い、等の要因により、従来はあまり気にならなかった光ファイバー中の非線形光学効果の影響が無視できなくなってきた。また、伝送距離の長延化と伝送信号の高速化 (高ビットレート化) に伴い光ファイバーの波長分散もますます重要となっている。

さらに、EDFA の出現が  $1.55 \mu\text{m}$  帯での高性能な多波長一括光増幅をも可能にしたのを契機として、 $1.55 \mu\text{m}$  帯での高密度波長多重伝送技術の開発が急速に進展している。波長多重伝送の場合には、波長多重された信号チャネル間の非線形相互作用や信号チャネルごとの波長分散のずれ、等も重要となってくる。もちろん、従来からの標準的な光ファイバー ( $1.3 \mu\text{m}$  帯用単一モードファイバーや  $1.55 \mu\text{m}$  帯分散シフトファイバー) を伝送路としても、波長多重伝送は可能であるが、伝送容量や伝送距離によっては光ファイバーの特性に起因する制約が生じる。そこで、伝送方式の観点から、これを回避してシステム性能を向上させるための種々の工夫が検討されている。一方、究極的な伝送容量や伝送距離の拡大を目指すためには、伝送路としての光ファイバー自体について、波長多重伝送により適した光ファイバーという観点で開発検討を進めること

が重要と考えられる。本稿では、特に波長多重伝送用として検討が進む各種光ファイバーの技術開発動向について概説する。

## 1. 光ファイバーに対する要求条件

### 1.1 非線形光学特性

一般に、ガラス中を伝搬する光のエネルギー密度が高くなると、非線形光学効果と呼ばれる種々の現象が発生する。特に、波長多重伝送においては、波長のわずかに異なる多数の信号光が同時に 1 本の光ファイバー中を伝搬するため、四光波混合 (FWM: four wave mixing) や相互位相変調 (XPM: cross phase modulation) と呼ばれる異なる波長光間の非線形相互作用の影響が顕著となり、信号伝送品質劣化の要因となる。したがって、波長多重伝送用光ファイバーとしては、その「非線形性」ができるだけ小さいことが望ましい。

光ファイバーの非線形性を表す指標のひとつである「非線形定数」は、一般に以下の式で定義される。

$$\text{非線形定数} = (\text{非線形屈折率}) / (\text{実効コア断面積})$$

ここで、非線形屈折率は、屈折率が光強度に依存してわずかに変化する比率を示す係数であり、基本的にはガラス組成に依存する物性定数である。一方、実効コア断面積は、光ファイバー中を伝搬する光パワーの光ファイバー断面内での拡がり具合を表すパラメーターである。これは、伝送される光信号パワーが同じでも、光ファイバー断面内で狭い領域に強く閉じ込められているほど、局所的に光のエネルギー密度は高くなる効果を取り込んだものであり、光ファイバー構造に依存する。

非線形定数の定義式から明らかなように、光ファイバーの非線形性を低減するには、非線形屈折率を小さくするか、実効コア断面積を大きくすればよい。石英ガラスの非

住友電気工業(株)横浜研究所 (〒244-8588 横浜市栄区田谷町1番地)

E-mail: nishi@yklab.sei.co.jp

線形屈折率は、一般に、ゲルマニウム等の添加物を加えると大きくなる傾向がある。したがって、光が伝搬するコア部分にはできるだけ添加物を加えない構造が好ましい。ただし、通常的设计範囲内ならば、その影響はそれほど大きくはない。一方、実効コア断面積を大きくすることは、コアの屈折率分布構造を工夫することにより、かなりの程度可能である。しかし、一般には、実効コア断面積を大きくすると、光パワーのコアへの閉じ込めが弱くなるため、曲げ損失やマイクロバンド特性の劣化等、実用上の問題を引き起こす可能性があるため、その設計には十分な注意が必要である。

## 1.2 波長分散特性

光ファイバーの波長分散とは、群遅延時間の波長微分に相当する量であり、有限なスペクトル幅（波長成分）をもつ光信号が光ファイバー中を伝搬した場合の波形歪を直接的に支配する。一般に、長距離高速光伝送を実現するには、信号歪を抑えるため、信号光波長において波長分散の絶対値が小さい（零に近い）ことが必要である。ところが、波長多重伝送においては、波長分散が小さいと、波長がわずかに異なる光信号同士の位相整合が起りやすいため、四光波混合等の非線形相互作用が発生しやすい。これを抑制するには、信号光波長域において光ファイバーの波長分散の絶対値はむしろ大きいほうがよいということになる。これらの相反する要求を満たすための手法として、使用する信号波長域においてあえて波長分散の絶対値が大きい光ファイバーを伝送路として用い、伝送路の波長分散は別途キャンセルする（分散補償器を挿入する）構成や、伝送路の中で各部分の波長分散の絶対値は大きい（波長分散は正值または負値）が、全体としては平均波長分散が零に近くなるよう光ファイバーの組み合わせと配置を工夫する「分散マネジメント」等が考えられている。

さらに、波長多重数を増加するために使用波長帯域を拡大しようとする、帯域内の波長分散値のずれも問題になってくる。この波長分散の波長依存性を「分散スロープ」と呼ぶ。長距離大容量の波長多重伝送用伝送路としては、分散補償あるいは分散マネジメントを施した上で、伝送路全体の分散スロープができるだけ小さいことも要求されるようになってきた。

光ファイバーの波長分散特性は、ガラス組成自体の波長分散特性である「材料分散」と導波構造に起因する「構造分散」の和で表される。通常の光ファイバーの主成分である石英ガラスの材料分散は、零分散波長が  $1.3 \mu\text{m}$  付近にあり、 $1.55 \mu\text{m}$  帯では  $+20 \text{ ps/nm/km}$  程度の分散値を示す。ゲルマニウム等の添加により石英ガラスの材料分散特

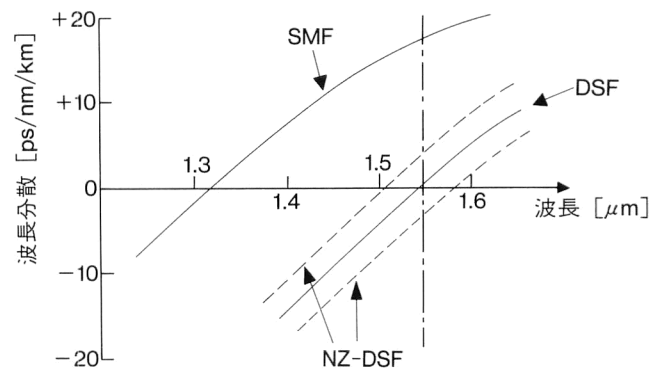


図1 分散シフトファイバーの波長分散特性。

性は変化するが、その変化はそれほど大きくない。一方、コア構造を工夫すると構造分散特性が大きく変化するので、これによって光ファイバーの波長分散特性をある程度制御することが可能である。ただし、上に述べたような所望の波長分散特性を得るようコア構造を調整するに従い、実効コア断面積が小さく（非線形性が悪く）なりやすい、あるいは曲げ損失特性が劣化しやすい、等々、さまざまな設計上のトレードオフ関係が存在する。このような制約条件の下で、いかに優れた光ファイバーあるいは光伝送路を実現するかが、光ファイバー開発者の負う課題である。

## 2. 分散シフトファイバー

図1に示すように、 $1.3 \mu\text{m}$ 帯に零分散波長を有する従来型「単一モードファイバー」(SMF: single mode fiber) に対し、 $1.55 \mu\text{m}$ 帯へ零分散波長をシフトした「分散シフトファイバー」(DSF: dispersion shifted fiber) は、石英系光ファイバーの伝送損失が最低となる  $1.55 \mu\text{m}$ 帯での光伝送に特化された光ファイバーである。しかし、前節で述べたように、 $1.55 \mu\text{m}$ 帯で波長多重伝送を行う場合には、その波長帯域で波長分散が小さいがために、非線形光学現象の影響を受けやすい。そこで、分散シフトファイバーの零分散波長をあえて信号光波長帯域の外にずらした「ノンゼロ分散シフトファイバー」(NZ-DSF: non-zero dispersion shifted fiber) が開発された。零分散波長をずらすこと自体は、従来のDSFをベースに、コアの構造パラメーターを調整することで比較的容易に実現可能である。

NZ-DSFは、その波長分散特性により、四光波混合等を抑制する大きな効果を示すが、さらにその効果を増すために、非線形性自体の低減も図られてきた。従来の光ファイバーと同等の曲げ損失特性を維持しながら、実効コア断面積を拡大する設計上の工夫がポイントであり、図2に示すような数多くの屈折率分布形状が提案されている。従来

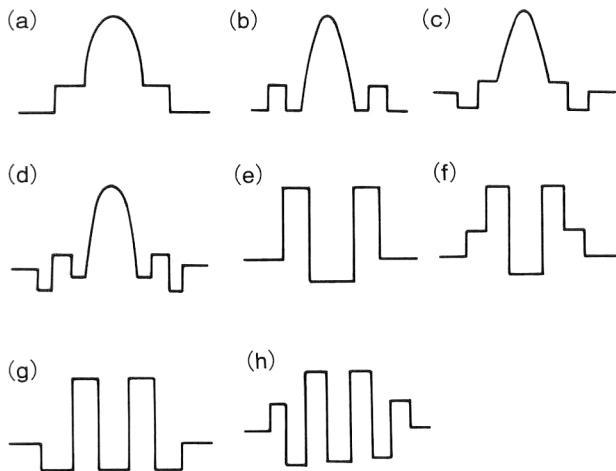


図2 実効コア断面積を拡大したノンゼロ分散シフトファイバーの屈折率分布形状例<sup>1-10)</sup>.

型 DSF の実効コア断面積が  $40\sim 50\ \mu\text{m}^2$  であるのに対し、 $60\sim 150\ \mu\text{m}^2$  まで拡大した設計試作例が種々報告されている<sup>1-10)</sup>.

なお、NZ-DSF は、信号光波長域 ( $1.55\ \mu\text{m}$  帯) において、小さいとはいえ有限の波長分散 (正値もしくは負値で数  $\text{ps}/\text{nm}/\text{km}$  程度) を示すから、長距離高速光伝送においては、システム全長にわたって累積する波長分散が問題となる。1チャンネル当たりのビットレートが  $10\ \text{Gbit}/\text{s}$  で伝送距離  $300\ \text{km}$  程度までは、特段の分散補償なしで伝送可能といわれているが、それ以上になると、正分散と負分散の NZ-DSF を組み合わせる分散マネジメントや、途中あるいは受信端で逆符号の大きな波長分散をもつ分散補償器の挿入、等の手段が必要である。

### 3. 分散フラットファイバー

一般に、DSF および NZ-DSF の分散スロープは  $+0.07\sim 0.13\ \text{ps}/\text{nm}^2/\text{km}$  程度である。上述のように分散マネジメントもしくは分散補償を行って、ある波長に対して伝送路全体の波長分散が零になるよう調節したとしても、使用波長帯域を拡大すると、波長による分散値のずれが伝送性能を制限する要因となる。そこで、分散スロープを低減したタイプの NZ-DSF も開発されている<sup>11)</sup>。さらに分散スロープを零に近づけた設計の光ファイバーは、特に「分散フラットファイバー」(DFF: dispersion flattened fiber) と称される。DFF 開発の歴史は古いですが、近年、特に注目されるのは、波長多重伝送用として、 $1.55\ \mu\text{m}$  帯近傍で分散スロープが小さくなるとともに、実効コア断面積が大きい設計の DFF である。DFF の波長分散特性の例を図3に示す。FWM 等の非線形現象の抑圧という観点からは、使用波長域で正分散と負分散の DFF を組み合わせる分散

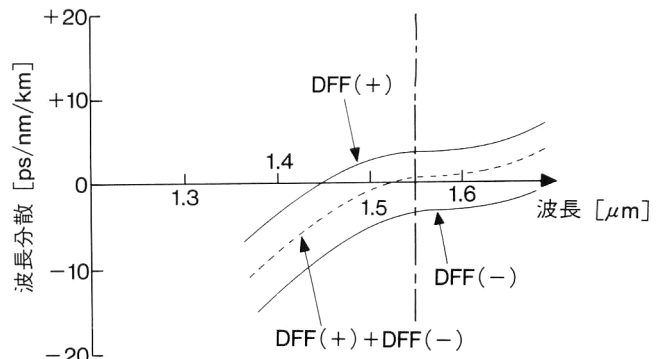


図3 分散フラットファイバーの波長分散特性。

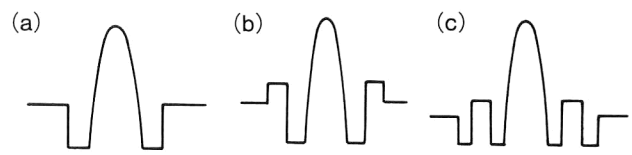


図4 分散フラットファイバーの屈折率分布形状例<sup>12-14)</sup>.

マネジメントが有効と考えられる。適切な分散マネジメントを行えば、図3に示すように、伝送路全体として広い波長帯域で波長分散を小さくすることができる。

一般に、所望の低分散スロープ特性を実現しながら、実効コア断面積を拡大する (かつ曲げ損失特性を劣化させない) には、かなりの設計上の工夫を要する。NZ-DSF と比較すると、DFF の設計および製造の難易度は一段と高い。図4に、DFF の屈折率分布形状の例を示す。従来、DFF の実効コア断面積が  $30\ \mu\text{m}^2$  程度だったのに対し、最近では、分散スロープを  $+0.03\ \text{ps}/\text{nm}^2/\text{km}$  程度まで低減するとともに実効コア断面積を  $50\sim 70\ \mu\text{m}^2$  にまで拡大した試作例が報告されている<sup>12-14)</sup>。今後、さらに総合的な性能をどこまで改善できるかが注目される。

### 4. 分散補償ファイバーおよびハイブリッド伝送路

EDFA の急速な進展に伴い、すでに布設された SMF ケーブルを利用して、 $1.55\ \mu\text{m}$  帯で長距離高速光伝送を行いたい、という要求が高まった。SMF は、 $1.55\ \mu\text{m}$  帯で  $+17\ \text{ps}/\text{nm}/\text{km}$  程度のかかなり大きな波長分散をもっているため、その波長分散をキャンセルする必要がある。分散補償技術としては、平面光導波路やファイバークレーティング技術を応用したものも開発されているが、 $1.55\ \mu\text{m}$  帯で比較的大きな負の波長分散を示す「分散補償ファイバー」(DCF: dispersion compensating fiber) は、その広帯域性等の優れた光学特性とともに信頼性や安定性の観点からも、非常に有力な手法である。図5に、DCF の波長分散特性の例を示す。SMF と DCF の分散値が釣り合うよ

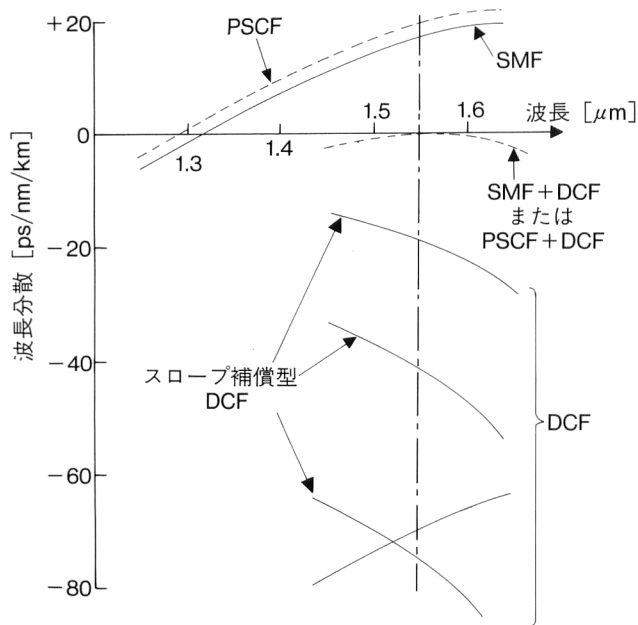


図5 分散補償ファイバーの波長分散特性.

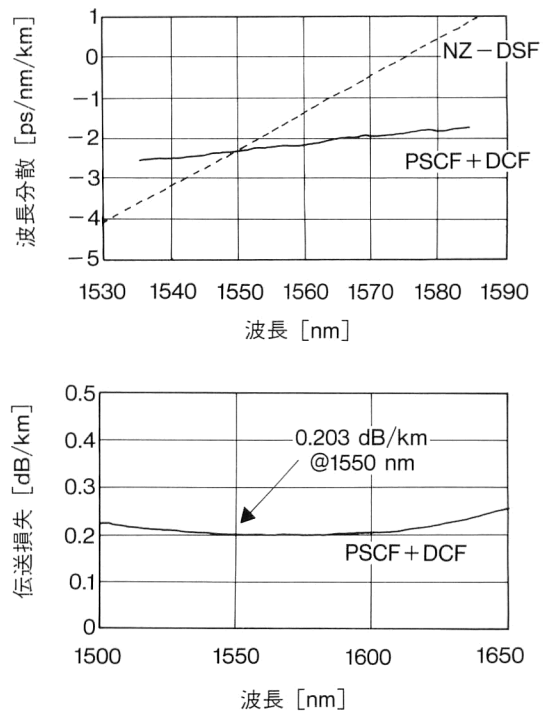


図7 純石英コアファイバーと分散補償ファイバーを組み合わせたハイブリッド伝送路の波長分散特性(上)と損失特性(下)の例.

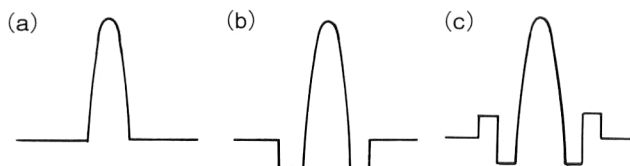


図6 分散補償ファイバーの屈折率分布形状例<sup>15-18)</sup>.

う長さを調整した DCF を適宜挿入すれば、全体として波長分散を零にすることができる。

図6に、DCFの屈折率分布形状の例を示す。図6(a)のタイプは、その単純な構造から、低損失性、製造性に優れているが、分散スロープはSMFと同様正值であるため、分散補償後の全体の波長分散特性として分散スロープを低減する効果はない。一方、図6(b)および(c)のタイプでは、その構造パラメータをうまく調節することにより、分散スロープを負値とし、かつ分散値と分散スロープの比をSMFのそれと概ね合致させることが可能である<sup>15-18)</sup>。この場合は、全体として分散だけでなく分散スロープも補償して零に近づけることができるから、広い波長域において波長分散を小さくすることができる。

DCFは、当初、既設SMF伝送路の分散を補償するための一種の機能性光ファイバーとして開発されたが、近年、これを伝送用ファイバーとして使い、SMFと組み合わせてハイブリッド伝送路を構成することが検討されている<sup>19,20)</sup>。波長多重用光伝送路として見た場合、伝送路全体での広帯域低分散特性に加え、各光ファイバーの波長分散値自体は大きいので、FWM等の非線形現象を抑圧しやす

い、という利点もある。

ただし、一般に、DCFの実効コア断面積は20~30  $\mu\text{m}^2$ と小さく、それ自体の非線形性が強いと同時に、伝送損失も通常の伝送用光ファイバーと比べると高めである。伝送路全体の損失および非線形性を改善するには、通常のSMFの代わりに、極低損失で低非線形性にも優れる「純石英コアファイバー」(PSCF: pure-silica core fiber)と組み合わせるのが有効である<sup>20)</sup>。PSCFについては、極低損失特性は維持しつつ、実効コア断面積を従来の80  $\mu\text{m}^2$ から110  $\mu\text{m}^2$ にまで拡大した極低非線形性タイプのPSCFが開発されている<sup>21)</sup>。これとDCFとを組み合わせたハイブリッド伝送路の最適設計についても検討が行われており<sup>22)</sup>、伝送路全体としての非線形性や伝送損失を考慮して総合的に最適化すると、DCFの長さの比率は全体の30~35%程度が良いこと、等が明らかになっている。このような最適化設計に基づき製造されたPSCF+DCFハイブリッド伝送路の波長分散特性と損失特性(接続損失を含む)の例を図7に示す。比較のため、典型的なNZ-DSFの波長分散特性の例も示してある。平均分散スロープが0.02 ps/nm<sup>2</sup>/kmと大幅に低減されているとともに、平均伝送損失も通常の伝送用光ファイバー並みに小さい。また、伝送路全体の等価的な実効コア断面積も比較的大きい60  $\mu\text{m}^2$ と見積もられており、伝送路としての総合的な性能は、これまで知られている光ファイバーあるいは伝送路

の中で最も優れたものとして期待されている。

長距離超大容量伝送を目指す波長多重伝送技術の研究開発が急速に進展するのに伴い、伝送路としての光ファイバーについても、その極限的な性能を追及したい、という要求、期待が高まっている。材料や導波構造に基づく原理的な制約条件の中で、いかに高性能な光伝送路を実現するか、さまざまな検討が進んでいる。

今後どのタイプの光ファイバーがどのような形で実用化され普及していくかは、ケーブル化特性や接続損失特性等を含む伝送路としての総合的な性能とともに、製造性や量産性の観点から合理的なコストで製造可能かどうかという点にも強く依存している。いずれにせよ、今後、波長多重伝送方式自体の開発と相まって、光ファイバーとしての性能追求と実用化に向けての開発が一層進むものと予想される。

## 文 献

- 1) Y. Terasawa, Y. Suetsugu, T. Kato and M. Nishimura: "Design optimization of dispersion shifted fiber with enlarged mode field diameter for WDM transmission," *Proceedings of IOOC '95*, Vol. 4, FA2-2 (1995) pp. 12-13.
- 2) P. Nouchi, P. Sansonetti, S. Landais, G. Barre, C. Brehm, J. Y. Boniort, B. Perrin, J. J. Girard and J. Auge: "Low-loss single-mode fiber with high nonlinear effective area," *Technical Digest of OFC '95*, ThH2 (1995) pp. 260-261.
- 3) Y. Liu, A. J. Antos, V. A. Bhagavatula and M. A. Newhouse: "Single-mode dispersion-shifted fibers with effective area larger than  $80 \mu\text{m}^2$  and good bending performance," *Proceedings of ECOC '95*, TuL.2.4 (1995) pp. 333-336.
- 4) 松尾昌一郎, 山田成敏, 畔蒜富夫, 高橋浩一, 山内良三: "非線形性低減型分散シフトファイバ", 1996年信学会エレクトロニクスソサイエティ大会, C-174 (1996).
- 5) T. Kato, S. Ishikawa, E. Sasaoka and M. Nishimura: "Low nonlinearity dispersion-shifted fibers employing dual-shaped core profile with depressed cladding," *Technical Digest of OFC '97*, TuN2 (1997) p. 66.
- 6) 松尾昌一郎, 山田成敏, 堀越雅博, 江邨洋子, 高橋浩一, 山内良三: "WDM伝送用分散シフトファイバ", 信学技報, OCS97-23 (1997) pp. 37-42.
- 7) P. Nouchi, P. Sansonetti, J. von Wirth and C. Le Sergent: "New dispersion shifted fiber with effective area larger than  $90 \mu\text{m}^2$ ," *Proceedings of ECOC '96*, Vol. 1, MoB.3.2 (1996) pp. 49-52.
- 8) Y. Liu, A. J. Antos and M. A. Newhouse: "Large effective area dispersion-shifted fibers with dual-ring index profiles," *Technical Digest of OFC '96*, WK15 (1996) pp. 165-166.
- 9) M. Kato, K. Kurokawa and Y. Miyajima: "A new design for dispersion-shifted fiber with an effective core area larger than  $100 \mu\text{m}^2$  and good bending characteristics," *Technical Digest of OFC '98*, ThK1 (1998) pp. 301-302.
- 10) M. Hirano, T. Kato, T. Ishihara, M. Nakamura, Y. Yokoyama, M. Onishi, E. Sasaoka, Y. Makio and M. Nishimura: "Novel ring core dispersion-shifted fiber with depressed cladding and its four-wave-mixing efficiency," *Proceedings of ECOC '99*, Vol. 2 (1999) pp. 278-279.
- 11) D. W. Peckham, A. F. Judy and R. B. Kummer: "Reduced dispersion slope, non-zero dispersion fiber," *Proceedings of ECOC '98*, Vol. 1 (1998) pp. 139-140.
- 12) Y. Akasaka and Y. Suzuki: "Enlargement of effective core area on dispersion-flattened fiber and its low nonlinearity," *Technical Digest of OFC '98*, ThK2 (1998) pp. 302-303.
- 13) Y. Yokoyama, T. Kato, M. Hirano, M. Onishi, E. Sasaoka, Y. Makio and M. Nishimura: "Practically feasible dispersion flattened fibers produced by VAD technique," *Proceedings of ECOC '98*, Vol. 1 (1998) pp. 131-132.
- 14) Y. Liu, W. B. Mattingly, D. K. Smith, C. E. Lacy, J. A. Cline and E. M. De Liso: "Design and fabrication of locally dispersion-flattened large effective area fibers," *Proceedings of ECOC '98*, Vol. 1 (1998) pp. 37-38.
- 15) A. M. Vengsarkar, A. E. Miller and W. A. Reed: "Highly efficient single-mode fiber for broadband dispersion compensation," *Technical Digest of OFC '93*, PD13 (1993) pp. 56-59.
- 16) M. Onishi, C. Fukuda, H. Kanamori and M. Nishimura: "High NA double-cladding dispersion compensating fiber for WDM systems," *Proceedings of ECOC '94*, Vol. 2 (1994) pp. 681-684.
- 17) M. Onishi, H. Kanamori, T. Kato and M. Nishimura: "Optimization of dispersion-compensating fibers considering self-phase modulation suppression," *Technical Digest of OFC '96*, ThA2 (1996) pp. 200-201.
- 18) Y. Akasaka, R. Sugizaki, A. Umeda and T. Kamiya: "High-dispersion-compensation ability and low nonlinearity of W-shaped DCF," *Technical Digest of OFC '96*, ThA3 (1996) pp. 201-202.
- 19) K. Mukasa, Y. Akasaka, Y. Suzuki and T. Kamiya: "Novel network fiber to manage dispersion at  $1.55 \mu\text{m}$  with combination of  $1.3 \mu\text{m}$  zero dispersion single mode fiber," *Proceedings of IOOC/ECOC '97*, Vol. 1 (1997) pp. 127-130.
- 20) T. Kashiwada, M. Onishi, S. Ishikawa, T. Kato, T. Okuno and M. Nishimura: "Ultra-low chromatic and polarization mode dispersion hybrid fiber links for ultra-high speed transmission systems," *Proceedings of OECC '98*, 15C1-3 (1998) pp. 364-365.
- 21) T. Kato, M. Hirano, M. Onishi and M. Nishimura: "Ultra-low nonlinearity low-loss pure silica core fiber for long-haul WDM transmission," *Electron. Lett.*, **35** (1999) 1615-1617.
- 22) E. Sasaoka, M. Tsukitani and M. Nishimura: "Design optimization of SMF-DCF hybrid transmission lines for long haul large capacity WDM transmission systems," *Proceedings of APCC/OECC '99*, Vol. 1 (1999) pp. 378-380.

(1999年11月4日受理)