

解説

単一モード光ファイバの実効的遮断波長*

北山 研一**

日本電信電話会社研究開発本部 〒180 武蔵野市緑町 3-9-11

(1986年5月31日受理)

Effective Cutoff Wavelength in Single-mode Fibers

Kenichi KITAYAMA

Research and Development Headquarters, Nippon Telegraph and Telephone Co.,
3-9-11, Midori-cho, Musashino 180

1. ま え が き

単一モード光ファイバは低損失でありかつ超広帯域であるため長距離大容量の基幹回線用伝送路に最も適している。単一モード光ファイバはコアの直径が $10\ \mu\text{m}$ 前後ときわめて細いため、従来の多モードファイバ(コア直径 $50\ \mu\text{m}$ が主流)に比べて発光・受光素子との結合やファイバ接続が困難であったが、これらの欠点も現在ではほぼ克服されている。NTTでは1985年に総長 $3,400\ \text{km}$ に及ぶ単一モード光ファイバケーブルの日本縦貫ルートを完成させ、すでに商用に供している¹⁾。また加入者系でも広帯域サービスの急速な需要の拡大に伴い、近い将来単一モード光ファイバが導入されるであろう²⁾。この導入を促進するのは光ファイバケーブルをはじめ光部品・周辺装置のよりいっそうの低価格化である。通信用以外にも応用分野は、偏波保持性能、磁気光学効果を利用した光センサーや³⁾、コアが細く高エネルギー密度が実現できるので非線形光学効果が得やすいという特徴を利用した光増幅用媒体、光波長変換素子、ファイバレーザ等⁴⁾多岐に及んでいる。

単一モード光ファイバでは単一モード条件を保証することが実用上重要であり、不要モードとして扱われる第1次高次モードの遮断波長は単一モード光ファイバの基本的なパラメータとなる。実際のファイバでは遮断波長

の近傍で高次モードの損失は大きくなるため、理論上は高次モードの導波が可能な遮断波長より短波長側の波長領域においても事実上基本モードしか導波されないという現象が生ずる。筆者らは光ファイバにおける単一モード条件を実際に規定する波長を実効的遮断波長 (effective cutoff wavelength) と名付けた⁵⁾。

本論文では、第1次高次モードの遮断波長近傍での導波特性と実効的遮断波長の概念について述べ、実効的遮断波長を導入することによって接続損失や曲げ損失が低減できることを示す。また実効的遮断波長のケーブル化工程における変化、距離依存性を理論的および実験的に明らかにする⁶⁾。最後に実効的遮断波長を用いて定めた長距離大容量伝送用単一モード光ファイバの規格^{7,8)}について述べる。

2. LP モード

コアの屈折率 n_1 が一様で、屈折率 n_2 のクラッドに囲まれた構造のいわゆるステップ形ファイバのモードについて考える。ファイバのモードは厳密には TE, TM モードとハイブリッドモードから成るが⁹⁾、コアとクラッド間の比屈折率差 $\Delta(=(n_1-n_2)/n_1)\rightarrow 0$ なる極限ではここで用いる LP (linearly polarized) モード¹⁰⁾ に集約される。基本モードの LP₀₁ モードは HE₁₁ モードに対応しており、第1次高次モードの LP₁₁ モードは TE₀₁, TM₀₁ モード, HE₂₁ モードから成っている。

遮断波長近傍では一般的にモードの電磁界エネルギーのクラッドへの浸み出しが増加し、遮断波長ではクラッドの電磁界分布は減衰形から振動形に転ずる。コア半径

* 本稿は昭和60年度光学論文賞受賞記念講演 (1986年4月2日, 日本大学生産工学部) を骨子として、まとめたものである。

** 当時日本電信電話会社茨城電気通信研究所所属

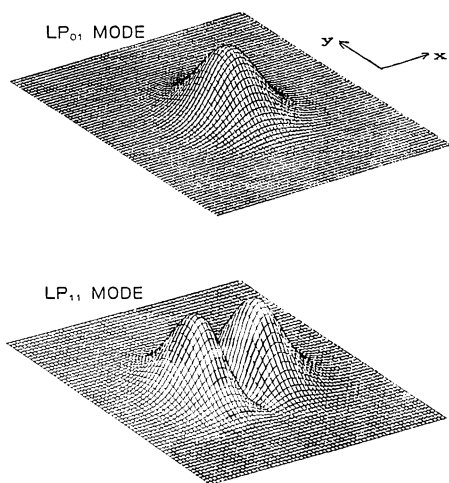


図 1 LP₀₁, LP₁₁ モードの電磁界強度分布

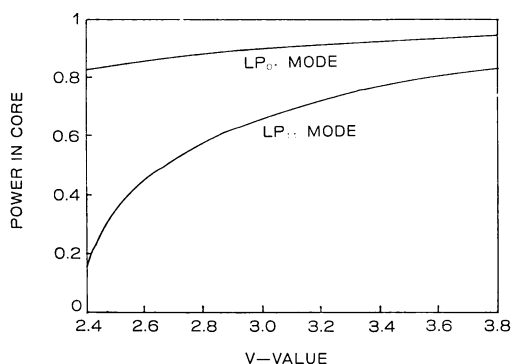


図 2 LP₀₁, LP₁₁ モードのコア内のエネルギーの割合と V 値の関係

a , 真空中の波数 k を用いて規格化周波数 $V (=kn_1a \times \sqrt{2\Delta})$ を定義すると, 遮断波長に対応する V 値, V_c は LP₀₁ モード, LP₁₁ モードについてそれぞれ 0, 2.405 となる.

x あるいは y 方向の電磁界の強度分布は図 1 に示すように LP₀₁ モードがほぼガウス形に近い分布であるのに対し, LP₁₁ モードはコア中心の強度がゼロである. 図 2 に示すように LP₁₁ モードでは V が 2.4 に近づくにつれてコア内のエネルギーは急激に減少するのに対して, LP₀₁ モードでは依然 80% 以上のエネルギーがコア内に閉じ込められている. このため LP₁₁ モードは遮断波長の近傍で曲げ等によって減衰を受けやすくなり, このことが実効的遮断波長の存在する鍵となる.

3. 実効的遮断波長の物理的意味

3.1 LP₀₁, LP₁₁ モードのパルス伝播特性

図 3 は 1.1 km のファイバ素線を伝播したパルス波形を種々の波長に対して示している⁵⁾. LP₀₁ モードと LP₁₁ モードの識別は出射端でファイバを軽く曲げて LP₁₁ モードのみを減衰させることによって行なった. 長波長では LP₁₁ モードの減衰が徐々に大きくなり, 波長 1.24

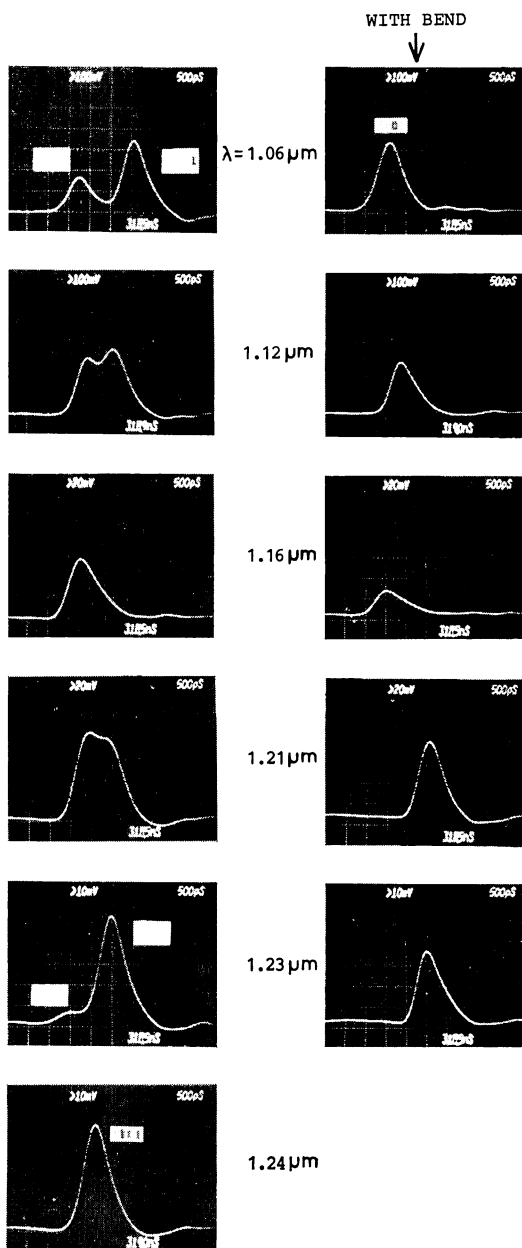


図 3 1.1 km の光ファイバ中を伝播した LP₀₁, LP₁₁ モードのパルス波形

μm では完全に減衰している。実効的遮断波長 λ_{ce} は LP_{11} モードが十分に減衰し事実上単一モードとなる波長を意味し、本実験例では $\lambda_{ce} = 1.24 \mu\text{m}$ となる。このとき両モードの振幅比は約 30 dB である。

両モード間の遅延時間差から実効的遮断波長と遮断波長の理論値との比較ができる。遅延時間差がゼロとなる V の理論値 ($=3.03$) が波長 $1.18 \mu\text{m}$ に対応づけられるので、 V_c の理論値 2.42 は $\lambda_c = 1.48 \mu\text{m}$, λ_{ce} ($=1.24 \mu\text{m}$) に対応する V 値、 V_{ce} は 2.88 となる。その結果、実効的遮断波長は遮断波長の理論値に比べて14%短波長側にシフトしていることがわかる。

3.2 実効的遮断波長を導入する意義

実効的遮断波長を導入することは、単一モードとして使用できる領域の V 値すなわち動作 V 値を従来の値 (<2.4) に比べて拡大することを意味し、伝送特性に影響を及ぼす。前節の例では動作 V 値は約 20% 拡大できる。

3.2.1 接続損失と曲げ損失

図4は軸ずれによる接続損失の計算値を V 値に対して示している。軸ずれは接続損失の要因のうち最も影響が大きい。たとえば V 値を 2.2 から 2.8 とするとコア径が 20% 拡大でき、 $1.8 \mu\text{m}$ の軸ずれ量に対して接続損失は 0.48 dB から 0.40 dB に約 17% 低減される。

一樣曲げ損失についても同様に V 値が 2.2 と 2.8 の場合を比較すると、3桁程度低減される。以上のように損失特性の改善効果は顕著であり、実効的遮断波長を導入することの実用上の利点は大きい。

3.2.2 分散特性

単一モードファイバではその要因は材料分散と導波路分散である。前者はファイバ材料に依存し、後者はコアとクラッドにおける群速度の相違が原因である。分散は信号光の遅延時間差で定義され、波長拡がり $\delta\lambda$ とす

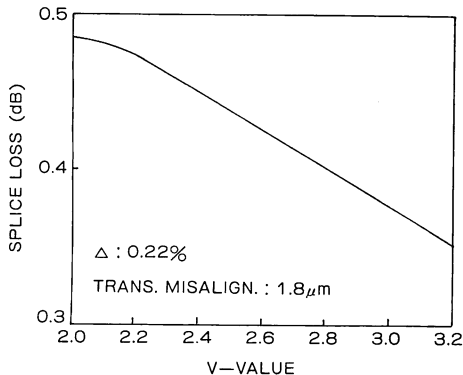


図4 軸ずれによる接続損失と V 値との関係

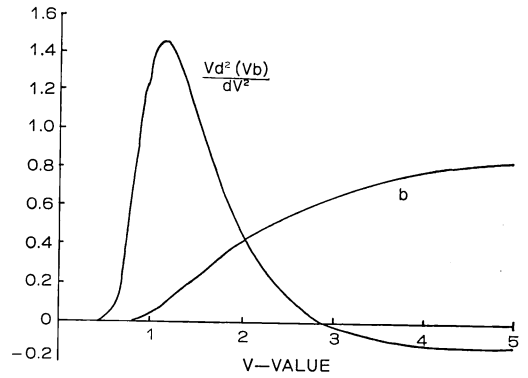


図5 LP_{01} モードの規格化伝播定数および $Vd^2(Vb)/dV^2$ と V 値との関係

ると次式で表わされる¹¹⁾。

$$\text{分散} = \frac{\delta\lambda}{\lambda} \left[\frac{k}{c} \frac{dN_1}{dk} + \frac{N_1 - N_2}{c} \frac{d^2(Vb)}{dV^2} \right] \quad (1)$$

式(1)中の c は真空中の光速、 N_i ($=d(n_i k)/dk$, $i=1, 2$) は群屈折率、 $b(=(\beta^2 - k^2 n_2^2)/(k^2 n_1^2 - k^2 n_2^2))$ は規格化伝播定数であり、第1, 2項はそれぞれ材料分散、導波路分散を表わす。図5に示すようにステップ形ファイバの LP_{01} モードにおいては $Vd^2(Vb)/dV^2$ は $V=1.2$ で最大となり、 $V=2.9$ でゼロとなる。材料分散に対する導波路分散の比は材料分散がゼロとなる波長 $1.3 \mu\text{m}$ 近傍を中心として $\pm 0.2 \mu\text{m}$ 以上の波長範囲ではたかだか10%と小さいが、 $1.3 \mu\text{m}$ 近傍では無視できなくなる。たとえば、 $\lambda=1.3 \mu\text{m}$ で $N_1=1.5$, $\Delta=0.3\%$ とすると導波路分散は最大 21 ps/km/nm となる。したがって、動作 V 値を 2.9 程度まで拡大することは導波路分散を低減するためにも有効である¹²⁾。

3.3 実効的遮断波長の測定法

λ_{ce} の測定には曲げ損失法¹³⁾ が広く用いられており、試料長 2m の曲げ損失法による実効的遮断波長を通常「遮断波長」としている。ファイバが真直状態と出射端でファイバに曲げを与え LP_{11} モードを減衰させたときの出射光量を測定し両者の比をとると、図6のような曲げ損失の波長に対する変化が得られ、損失が急激に増加する長波長側の波長が λ_{ce} に対応する。2m における測定値を理論値と比較すると、現状のファイバでは $1.1 \leq \lambda_c/\lambda_{ce} \leq 1.2$ となることが経験的に得られている。

図6でポピン巻きの状態のファイバの測定結果を見ると、曲げ径(出射端の半径は 20mm) が小さくなるにつれて曲げ損失の影響により実効的遮断波長は短くなっている。このように実効的遮断波長はファイバの物理的な状態(長さも含む)によって同種類のファイバであっ

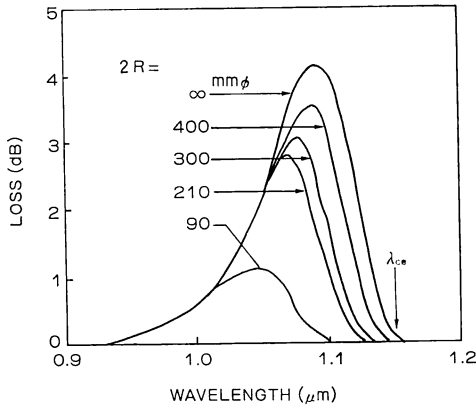


図 6 曲げ損失法による損失の測定値と波長との関係 (R はファイバの曲げ半径)

ても測定値は異なる。

LP₁₁ モードの遮断波長の測定法としては、この他に偏光法、ニアフィールド法等が種々提案されているが、いずれの方法においても測定されるのは実効的遮断波長である。ごく最近改良された偏光法¹⁴⁾によって試料長数 cm で理論値とほぼ等しい測定値を得たという報告がなされており注目に値する。

4. 実効的遮断波長の距離依存性⁶⁾

4.1 理 論

一般に複数のモードの導波特性は電力結合方程式で記述される。LP₀₁, LP₁₁ モードの平均電力 $P_i(z)$ ($i=1, 2$) と $z=0$ での初期値 $P_i(0)$ ($i=1, 2$) との関係を散乱行列 $[s_{ij}]$ を用いて次式で表わす。

$$\begin{bmatrix} P_1(z) \\ P_2(z) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} s_{11} & s_{12} \\ s_{21} & s_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} P_1(0) \\ P_2(0) \end{bmatrix} \quad (2)$$

図 7 は散乱行列の各要素 s_{ij} の計算例である。 s_{22} は LP₁₁ モードの散乱係数であり、ゼロとなる波長が実効

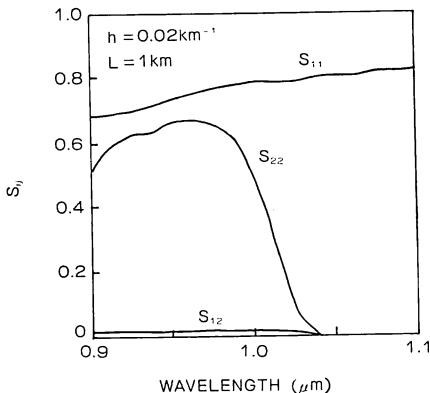


図 7 散乱行列の要素 s_{ij} と波長との関係

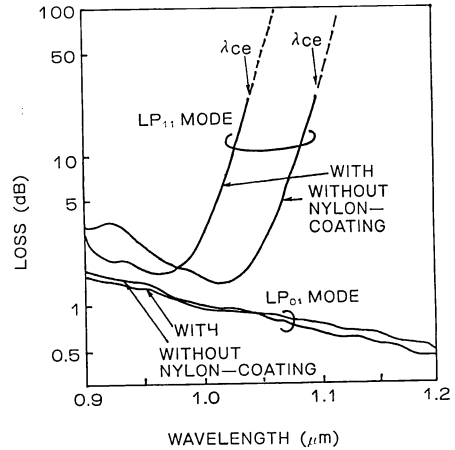


図 8 心線化(ナイロン被覆)前後の LP₀₁, LP₁₁ モードの損失の測定値と波長との関係

的遮断波長に対応している。また s_{12} はモード結合の影響を表わしている。

曲げ損失法で得られる真直状態と出射端に曲げを与えたときの出射光量の比 r は、 $[s_{ij}]$ を用いてファイバ長 L と光源波長 λ の関数として次式で示される。

$$r(L, \lambda) = \frac{(ks_{11} + s_{12})\exp(-\alpha_1' L_b) + 2(ks_{12} + s_{22})\exp(-\alpha_2' L_b)}{(ks_{11} + s_{12}) + 2(ks_{12} + s_{22})} \quad (3)$$

ただし α_i' ($i=1, 2$) は LP₀₁, LP₁₁ モードの単位長当りの出射端の曲げ損失、 L_b は曲がり部分のファイバ長、 $k (= P_1(0)/P_2(0))$ は両モードの入射光量の比を表わす。式(3)を用いると図 6 と同様の損失曲線が得られ、実効的遮断波長 λ_{ce} は曲げ損失が一定レベル、たとえば 0.1 dB に達する波長として決定される。

4.2 モード損失の影響

実効的遮断波長はモード損失に直接関係している。図 8 は LP₀₁, LP₁₁ モードの損失の測定値である。測定法の詳細はここでは省略する¹⁵⁾。測定は約 1 km のファイバの心線化前後で行なった。LP₁₁ モードの損失は波長が長くなるにつれて急激に増大しており、心線化後 LP₁₁ モードの損失のみが増加している。曲げ損失法で測定した λ_{ce} は素線から心線で 1.098 μm から 1.037 μm に減少しており、いずれの場合も損失が約 30 dB となる波長に一致している。一方、LP₀₁ モードの損失と短波長域における LP₁₁ モードの損失の漸減傾向はレーリー散乱によるものである。両モードに対する心線化の影響の差は図 2 に示すように電磁界エネルギーのコア内の閉じ込めの強弱によるものである。素線から心線、ケーブル

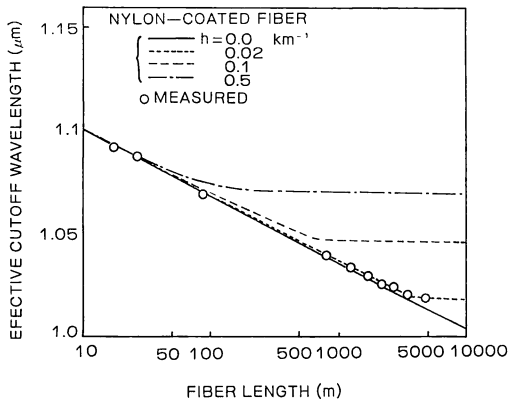


図9 ファイバ心線の実効的遮断波長の距離依存性 (測定値とモード結合係数 h をパラメータとした計算値)

に移る過程で実効的遮断波長が短くなるのは一般的な傾向ではあるが、ファイバケーブル製造技術の向上に伴ってほしい変化は小さくなりつつある。

4.3 モード結合の影響

図9は図8のモード損失の測定に用いたものと同種の長尺ファイバを順次切断し、曲げ損失法によって測定した実効的遮断波長である。 λ_{ce} はファイバ長の増大とともに短くなり、4 km 付近ではほぼ一定値に達している。 λ_{ce} が $\log_{10} L$ に対して直線的に減少する傾向は図8のモード損失の急激な立上りの傾向を反映している。 λ_{ce} のファイバ長に対する直線的な変化を

$$\lambda_{ce}(L) = \lambda_{ce}(L_0) - \gamma \cdot \log_{10}(L/L_0) \quad (4)$$

で表わすと、図9では $\gamma = 0.03$ となる。現状のファイバの γ の値は 0.02~0.06 である。実効的遮断波長はファイバがきわめて短い場合あるいはファイバに振動がなく理想的な状態に近い場合には、理論値に限りなく漸近するはずであり、このような場合には一般に γ は小さくなる傾向にある。

図中にはモード結合係数をパラメータとしたときの λ_{ce} の数値計算結果を示す。計算ではモード損失は図8に示す実測値を用い、式(3)中の LP₀₁ モードと LP₁₁ モードの励振効率比 k は理論値を用いた。注目すべき点はモード結合が強くなるにつれて同一距離における λ_{ce} は長波長側にシフトしており、また λ_{ce} が一定になる距離も短くなっていることである。前者はモード結合によって LP₀₁ モードと LP₁₁ モードの損失が平均化されて見かけ上の LP₁₁ モードの損失が減少するためと解釈され、後者はモード結合の影響が強くなるに従ってより短距離で定常状態¹⁶⁾に達し LP₁₁ モードの伝送損失が

一定値になるからである。図9の破線はモード結合係数が $h = 0.02 \text{ km}^{-1}$ に対する計算値であり、測定値とよく一致している。この h の値は 1 km 当りモード結合で失われるのはモードの全電力の約 2% であることを意味し、モード結合の影響はかなり小さいといえる。

4.4 ファイバリンクの実効的遮断波長

複数本のファイバを接続して構成するファイバリンクの実効的遮断波長は以下のように決定される。これまでの検討からファイバ内のモード結合の影響は無視できると仮定し、接続点でのモード結合のみを考える。このとき接続点ごとに2モード間で結合・再結合が繰り返され、モードの群速度が互いに異なるのでパルスの遅延歪みが生じモードノイズの原因となる。これを防ぐためには接続点で発生した不要モードが次の接続点では完全に減衰し再び単一モードになっている必要がある。したがって全長にわたって単一モード条件を保証するためには、1) 長さの異なる同種ファイバを接続する場合：最短ケーブルの実効的遮断波長をファイバリンクの実効的遮断波長とする、2) ファイバ長が異なりかつ実効的遮断波長の距離依存性も異なる異種ファイバを接続した場合：個々のファイバの実効的遮断波長のうち最も長波長の値をファイバリンクの実効的遮断波長とする、必要がある。

5. ファイバパラメータの規格

単一モードファイバの規格は実効的遮断波長と LP₀₁ モードのスポットサイズ w_0 を用いて表わされる。ここではパラメータ最適化の詳細は省略することとし、以下

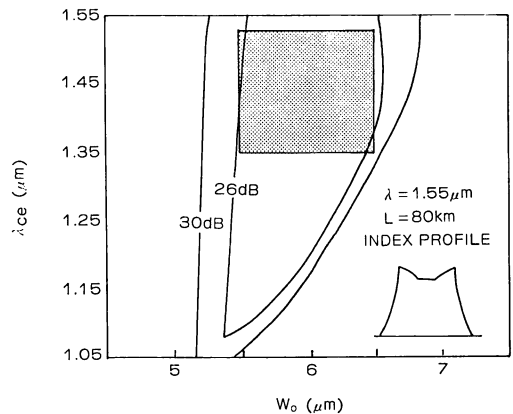


図10 波長 $1.55 \mu\text{m}$ 、中継距離 80 km に対する (w_0, λ_{ce}) と等損失曲線の関係 (ハッチ部分は $1.55 \mu\text{m}$ 帯用単一モード光ファイバのパラメータの許容範囲)

に結果のみを示す^{8,9)}。一例として、図 10 には波長 1.55 μm 、中継距離 80 km に対する 1 中継間隔の全伝送損失と λ_{ce} および ω_0 との関係を示す。ただし分散に関する規格は考慮に入れていない。許容最大損失は 26 dB であり、図からパラメータの許容範囲が定められる。図中の矩形の領域はパラメータの制御性等を考慮に入れて定めた実際のファイバ規格であり、 $1.35 \leq \lambda_{ce} \leq 1.53 \mu\text{m}$ 、 $5.5 \leq \omega_0 \leq 6.5 \mu\text{m}$ となる。

6. ま と め

単一モードファイバの特性評価やパラメータの規格の決定にあたって実際のファイバに即したより現実的な実効的遮断波長を導入し、その物理的性質を明らかにした。また実効的遮断波長を用いることによって実使用条件下の V 値が拡大でき、これによって伝送特性および分散特性が改善できることを示した。また実効的遮断波長を用いた単一モードファイバの規格の一例を示した。

最後に、この実効的遮断波長は CCITT (電信電話国際諮問委員会) において遮断波長の定義として取り入れられており、単一モード光ファイバの国際標準化に寄与している。

本研究を遂行するにあたってご討論、ご助言をいただいた NTT 石田担当部長、茨城通研青海主幹研究員、加藤主任研究員、大橋研究主任ならびにご指導いただいた茨城通研小島線路部長、内田線路部統括、根岸中継線路室長に深謝いたします。

文 献

- 1) 鷺山幾男, 三浦秀利, 山本尚嗣, 石川隆夫: "日本縦貫ルート形成する F400M 方式", 電気通信施設, 施-35-6 (1983) 78-88.
- 2) 山本良一, 谷藤忠敏, 中西 寛, 松浦正明, 及川寿雄: "加入者単一モード光線路の適用方法と線路網構成", 信学技報, CS 85-148 (1986) 1-8.
- 3) T. G. Giarozenzi, J. A. Bucaro, A. Dandrige, G. H. Sigel, Jr., J. H. Cole, S. C. Rashleigh and R. G. Priest: "Optical-fiber sensor technology," IEEE J. Quantum Electron., **QE-18** (1982) 628-665.
- 4) R. H. Stolen: "Nonlinear properties of optical fibers," *Optical Fibers Telecommunications*, ed. S. E. Miller and A. G. Chynoweth (Academic Press, New York, 1979).
- 5) Y. Kato, K. Kitayama, S. Seikai and N. Uchida: "Effective cutoff wavelength in single-mode fibers," IEEE J. Quantum Electron., **QE-17** (1981) 35-39.
- 6) K. Kitayama, M. Ohashi and Y. Ishida: "Length dependence of effective cutoff wavelength in single-mode fibers," IEEE J. Lightwave Technol., **LT-2** (1984) 629-634.
- 7) K. Kitayama, Y. Kato, M. Ohashi, Y. Ishida and N. Uchida: "Design considerations for the structural optimization of a single-mode fiber," IEEE J. Lightwave Technol., **LT-1** (1983) 363-369.
- 8) K. Kitayama, N. Uesugi, M. Ohashi, S. Seikai and K. Ishihara: "Design and performance of ultra-low-loss single-mode cable in 1.5 μm wavelength region," IEEE J. Lightwave Technol., **LT-3** (1985) 579-585.
- 9) E. Snitzer: "Cylindrical dielectric waveguides modes," J. Opt. Soc. Am., **51** (1961) 491-498.
- 10) D. Gloge: "Weakly guiding fibers," Appl. Opt., **10** (1971) 2252-2258.
- 11) D. Gloge: "Dispersion in weakly guiding fibers," Appl. Opt., **10** (1971) 2442-2445.
- 12) W. A. Gambling, H. Matsumura and C. M. Ragdale: "Zero-mode dispersion in single-mode fibres," Electron. Lett., **14** (1978) 618-620.
- 13) Y. Katsuyama, M. Tokuda, N. Uchida and M. Nakahara: "New method for measuring V-value of a single-mode optical fiber," Electron. Lett., **12** (1976) 669-670.
- 14) Y. Kato and M. Miyauchi: "Measuring cutoff wavelength of HE_{21} , TE_{01} , TM_{01} modes: a novel method using single-polarization launching," Appl. Opt., **24** (1985) 2351-2354.
- 15) M. Ohashi, K. Kitayama, T. Kobayashi and Y. Ishida: "LP₁₁ mode loss measurements in the two-mode-propagation region of optical fibers," Opt. Lett., **9** (1984) 303-305.
- 16) S. Kawakami and M. Ikeda: "Transmission characteristics of a two-mode optical waveguide," IEEE J. Quantum Electron., **QE-14** (1978) 608-614.