

長波長帯光ファイバケーブルの伝送特性

Transmission Properties of Optical Fibers and Fiber Cables for Long Wavelength Region

梶岡 博* Hiroshi Kajioka

光ファイバの低損失化と均一製造技術、及び長波長帯用光デバイスの開発によって、 $1.3\mu\text{m}$ 帯を利用した光通信システムの実用化が各方面で進められている。長波長帯では光ファイバの伝送損失が容易に 1 dB/km 以下となるため、 20 km 以上の無中継伝送が可能となる。したがって、基本伝送特性はもとより長尺での特性の把握が重要となる。

本論文では、多モードGI形光ファイバの長尺での伝送特性を支配するモード変換に関する理論解析と、それに対応する実験的検討を行ない、実際の心線化、ケーブル化でのモード変換の要因を明らかにした。また、 25 km 以上の長距離伝送では、 0.1 dB/km 程度のモード変換損が帯域の長さ特性を2倍程度改善するため、長波長帯長距離伝送システムの実用化に当たってはモード変換効果を十分考慮し、光ファイバ及び伝送システムの設計を行なう必要があることも示した。その結果、今回開発した光ファイバケーブルは、心線化、多心ケーブル化工程の耐応力特性の改善により、 $1.3\mu\text{m}$ 帯で 0.7 dB/km 以下の低損失化を達成しており、 32 M ビット/秒の信号を 25 km 以上無中継に伝送できるものとなった。

1 緒言

多モードGI(Graded-Index)ファイバを用いた長距離伝送システムは、光源との結合、接続の容易さなどから各方面で実用化されている。近年、長波長帯での光ファイバの超低損失性の実現により、 25 km 以上無中継伝送システムの実用化開発が活発に進められている。

光ファイバの基本特性は、伝送損失、帯域、結合接続性及び耐応力特性であるが、長波長帯用伝送路の設計に当たっては、短波長帯では余り問題とならなかったモード変換効果も含めて総合的に考察する必要がある。長波長帯GI光ファイバケーブルの開発に当たって、このモード変換特性を明らかにするために、理論、実験の両面にわたって検討を行なった。

2 長波長帯GI光ファイバケーブル

石英系光ファイバの特性改善、具体的には(1)水酸(OH)基吸収損失低減、(2)心線化(ナイロン被覆)、ケーブル化時の特性安定化、(3)コア屈折率分布の最適化、精密制御などにより、光ファイバケーブルによる長距離伝送、例えば 32 M ビット/秒の高速信号を 25 km 以上無中継伝送する媒体として注目されている。

比屈折率差 $\Delta=0.01$ 、 $\text{GeO}_2\text{-P}_2\text{O}_5\text{-SiO}_2$ 系コアガラスを用いた光ファイバの波長 $\lambda=1.3\mu\text{m}$ での伝送損失 $A(1.3\mu\text{m})\text{ dB/km}$ は、次式のように求められる^{1),2)}。

$$A(1.3\mu\text{m}) \cong 0.5 + D(\lambda) + B \dots \dots \dots (1)$$

第1項はレーレー散乱と紫外吸収損の和、第2項はOH基吸収損失、第3項は心線化、ケーブル化での摂動に基づくモード変換損である。短波長帯($\lambda=0.85\mu\text{m}$)では第1項はおよそ 2.5 dB/km であるから、長波長帯ではこれが $\frac{1}{3}$ 程度に低減される。したがって、長波長帯ではモード変換損の占める割合が大きくなること、及び長距離伝送ではモード変換効果がベースバンド伝送帯域特性に与える影響が大きくなることから、心線

化、ケーブル化工程でのモード変換要因の把握と、その効果の解析が重要となる。

3 基本設計法

3.1 伝送損失

(1)式から $1.3\mu\text{m}$ 帯では、OH基吸収損失とモード変換損失の低減が重要である。OH基除去は、MCVD(Modified Chemical Vapor Deposition)法では出発石英管の内面にクラッドをCVD(Cheical Vapor Deposition)法で形成する内ばり法で、スート堆積法^{*1)}ではスート堆積とガラス化の中間工程で、塩素雰囲気中で脱OH処理を行なう方法で行なわれ、いずれも $1.3\mu\text{m}$ 近傍のOH基吸収損失 $D(\lambda)$ は無視できる程度まで除去されている²⁾。図1に伝送損失波長特性例を示す。モード変換損の要因はファイバ素線ではコア径、屈折率分布、コア、クラッド境界面の長手方向の変動、またナイロン被覆(心線化)以降のケーブル化の工程では、心線補強構造、ケーブル構造、製造法などが挙げられる。これらの各要因はすべて克服され、伝送損失もほぼ理論限界に近いファイバ心線、多心ケーブルが製造されるに至っている³⁾。このうち心線化の工程では、被覆材で決まるある程度避けられない量のモード変換が起こり、それが長尺での伝送特性に大きな影響を及ぼす。これについては4章で述べる。

3.2 伝送帯域

ここでは、コア径 $2a=50\mu\text{m}$ 、 $\Delta=0.01$ の標準タイプのGI光ファイバについて述べる。コア屈折率分布は次の(2)式に示すような α 乗分布を仮定する。

*1) 日本電信電話公社で開発されたVAD(Vapor-phase Axial Deposition)法と類似な方法である。

* 日立電線株式会社電線研究所

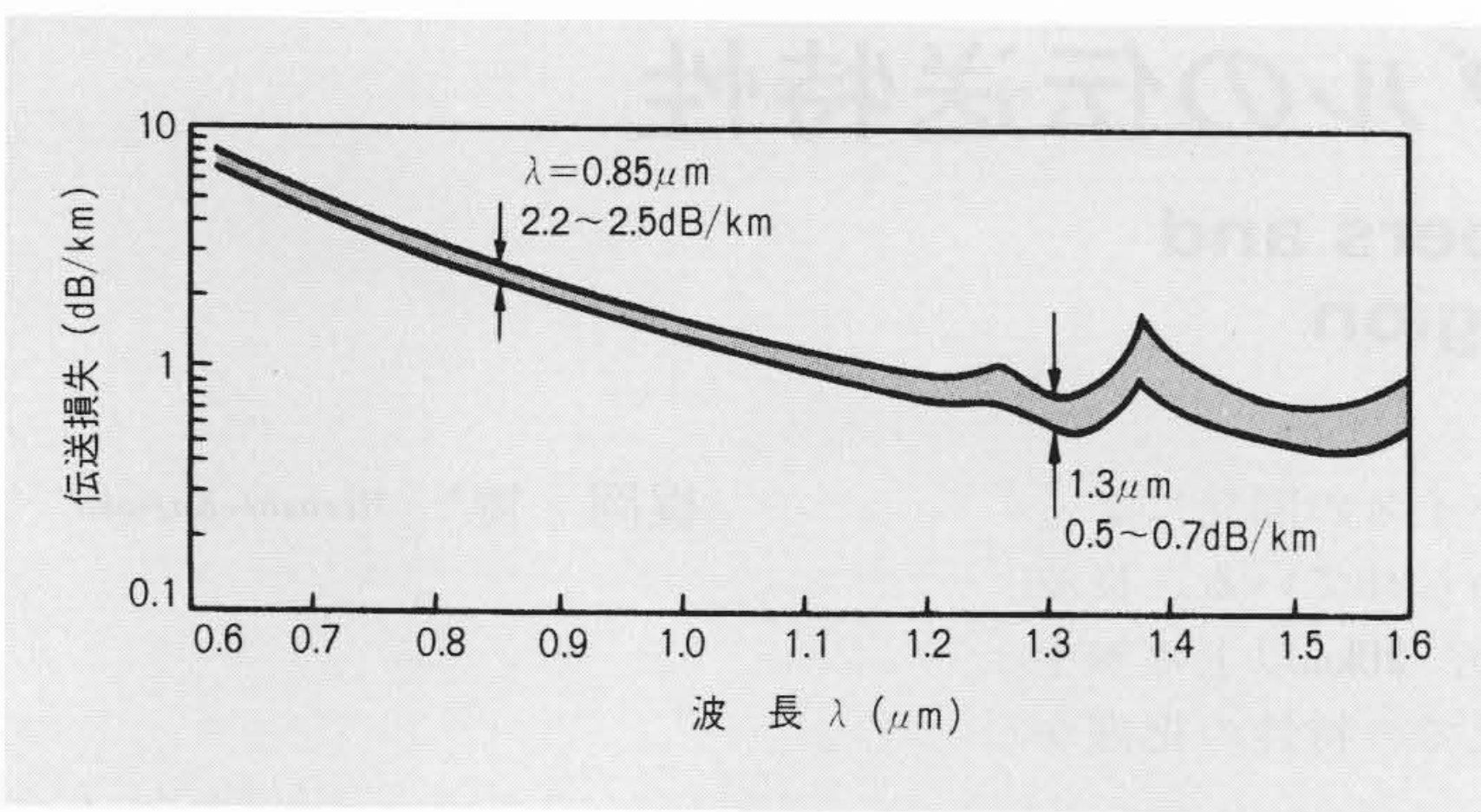


図1 長波長帯GI光ファイバケーブルの伝送損失の波長特性 スート堆積ファイバと、MCVDファイバは損失特性に差はない。長波長帯の損失のばらつきは、主にモード変換損の影響である。

$$n(r) = n_1 \sqrt{1 - 2\Delta \left(\frac{r}{a}\right)^\alpha} \dots\dots\dots(2)$$

ここに n_1 : コア中心屈折率
 α : グレーディング指数

GeO₂-P₂O₅-SiO₂系ガラスの場合、 $\lambda = 1.3\mu\text{m}$ 帯では $\alpha = 1.9$ 付近が最も広帯域にでき、現在、平均800MHz・km以上が達成できている²⁾。モード変換効果を考えなければ、32Mビット/秒の信号を25km以上伝送させるためには、およそ1,000MHz・km以上の広帯域性が要求されるが、実際はモード変換があるため帯域幅は異なったものとなる。すなわち、長さ l のファイバの帯域を、

$$BW(l) = BW_0 \cdot l^{-\gamma} \dots\dots\dots(3)$$

で表わせば、 $\gamma \approx 0.8$ (モード変換がないと $\gamma = 1$)であるため、 $l = 1\text{ km}$ での帯域特性 BW_0 が800MHz・km程度のGIファイバで25km伝送すると、帯域幅は約60MHzとなる。

4 モード変換解析理論と心線化によるモード変換効果

4.1 モード変換の解釈

光ファイバ素線は、心線化、ケーブル化工程で種々の機械的拘束力を受け、それによってファイバ軸が曲げられる。この曲げは、スカラー波動方程式の屈折率変化関数が、座標軸の変化に伴い等価的に変化⁴⁾することと対応し、その結果光線の伝搬角度が変わる。

一方、モード変換の波動理論的な厳密な解析は、Marcuseが摂動法で行なっている⁵⁾。彼はMaxwellの方程式をLocal Normal Modeで展開し、進行波に対するモードの振幅変換係数を次式で与えている⁵⁾。

$$K_{ij}(Z) \approx \frac{\omega \epsilon_0}{4P(\beta_i - \beta_j)} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{\partial n^2}{\partial Z} \epsilon_i^* \cdot \epsilon_j dx dy \dots\dots(4)$$

ここに P : 直交性から全電力で規格化される量
 ω : 光の角周波数
 ϵ_0 : 真空中の比誘電率
 ϵ_i : i モードの電界
 $*$: 複素共役

この(4)式からも長手方向に屈折率の変化があれば、モード変換が生ずることが分かる。

4.2 電力結合方程式と散乱行列法

MarcuseはCoupled Amplitude Equationに摂動による電磁界振幅の変化が小さく、緩やかであるという仮定を設け、摂動がランダムな場合のC.P.E.(電力結合方程式)を導いた⁵⁾。すなわち、モード変換要因を含む区間を $0 \leq Z \leq L$ とすると、

次の(5)式が得られる。

$$|\epsilon_i(0)| \approx |\epsilon_i(L)| \dots\dots\dots(5)$$

しかし、25km程度の伝送路の入出力間で各モードに対して(5)式が成立するかどうかは疑問が残る。そこで、(5)式の仮定が十分成立する範囲内で、モード間の電力遷移係数を要素とするような一種の散乱行列を定義し、それを縦続接続して全長のモード変換係数を求める散乱行列法^{6), 7), 1)}が提案されてきた。実際、伝送路の摂動を含む区間長さが短くなれば、散乱行列で結ばれる入出力間のモード電力の関係式はC.P.E.に一致する⁸⁾。散乱行列法は、励振電力がどのモードによって運ばれたかというモード履歴を、ベースバンド信号の位相情報を含めて厳密に計算する方法であり、任意のモード損失、群遅延時間、励振条件及びモード変換係数に対して解析が可能である⁶⁾。

4.3 散乱行列法によるGI光ファイバの解析

散乱行列法によるモード変換パラメータは、結合強度 K とモード変換の選択規則の二つである^{1), 6), 7)}。選択規則すなわちモード変換の生ずるモード次数差 Δm は、モード変換を引き起こす摂動の空間スペクトルの最高周波数成分で決まり、実験的検討により^{1), 7)}現状のGIファイバでは $\Delta m = \pm 1$ 、すなわち隣接モード間の変換が支配的であることが確認されている。単位区間のモード電力変換係数は、次の(6)式を仮定する。

$$d_{ij} = \begin{cases} d_0 \frac{ij}{(i-j)^2} & i \neq j \\ 1 - \sum_{j=1, \neq i}^{\infty} d_{ij} & i = j \end{cases} \dots\dots\dots(6)$$

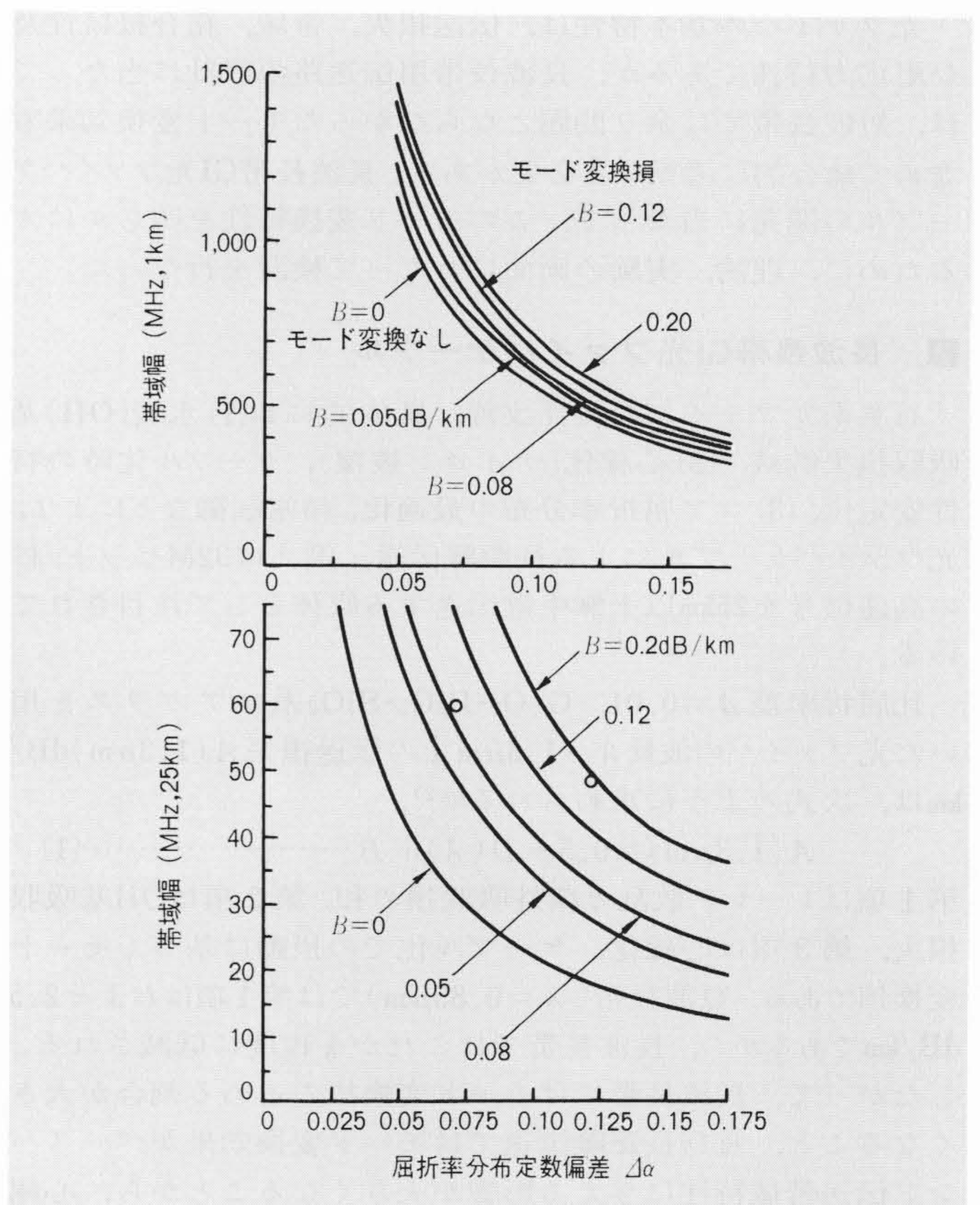


図2 屈折率分布定数偏差と帯域特性との関係 ファイバ長さ1km(上)、ファイバ長さ25km(下)を比較すると、長尺になるほどモード変換効果の帯域への影響が大きくなる。0.1dB/kmオーダのモード変換損で帯域が大きく改善される。

表1 モード変換損と帯域幅長さ特性の関係 0.1dB/kmオーダのモード変換損が存在するだけでも $\gamma \approx 0.8$ となる。

モード変換損(dB/km)	B	0.05	0.08	0.12	0.20
結合強度	K	1×10^{-2}	2×10^{-2}	4×10^{-2}	6.4×10^{-2}
1 kmでの帯域幅(MHz)	BW ₀	61/Δα	64/Δα	68/Δα	71.5/Δα
帯域幅長さ定数	γ	0.87	0.85	0.80	0.75

η は放射モードの次数、 d_0 は定数であり、結合強度Kは d_0 と1km内のモード変換頻度Rの積で求められる。例えば、モード変換損 $B \leq 0.2\text{dB/km}$ とするためには $K \leq 6.4 \times 10^{-2}$ である¹⁾。図2にBをパラメータとした場合の、最適な屈折率分布定数 α_0 からの偏差 $\Delta\alpha$ と帯域幅の関係を $l = 1\text{km}$ と 25km について示す。B=0はモード変換のない場合を示すが、B=0.2dB/kmのモード変換損の場合、 $l = 1\text{km}$ ではモード分散の改善は約15%であるが、 $l = 25\text{km}$ ではおよそ3倍にもなり、長距離伝送では0.1dB/kmオーダのモード変換損が重要な役割を果たすことが分かる。表1には(3)式で帯域を表わした場合の γ とBの関係を示す。B=0.1dB/kmでも25km伝送の場合 $\gamma \approx 0.8$ となることが分かる。

4.4 心線化によるモード変換係数

ここではジャケット材の収縮によって、ファイバ軸にランダムな微小曲り(マイクロベンド)が生ずる場合の解析を行なう。曲りのパワースペクトルを $C(\Delta\beta)$ 、 $(\Delta\beta = \sqrt{2\Delta/a})$ とすると、 m モードと $(m \pm 1)$ モードとの変換係数 dm は次式で表わされる。

$$dm = \frac{1}{2} \left(n_1 \frac{2\pi}{\lambda} a \right)^2 \Delta^2 [m/M] \Delta\beta^{-4} \cdot C(\Delta\beta) \dots\dots(7)$$

ファイバ軸の曲りのスペクトルを、弾性的な床に置かれた梁が1個の集中荷重を受けた場合のたわみの問題¹⁰⁾として扱い、

集中荷重をナイロン被覆とファイバ素線の焼きばめ力¹⁰⁾として考える。数値計算例として、ファイバクラッド径 $2b = 0.125\text{mm}$ 、ナイロンヤング率 $E_N \approx 1.4 \times 10^9\text{N/m}^2$ 、ファイバヤング率 $E_f = 7.3 \times 10^{10}\text{N/m}^2$ 、心線外径 0.9mm 、ポアッソン比 $\nu \approx 0.3$ とすると、摂動区間を 1mm 、1m当たりのナイロン被覆内面の不均一の高さの分散を $10^{-14}(\text{m})$ とすると次の(8)式のように求められる。

$$dm \approx 0.1m/M \dots\dots\dots(8)$$

シリコンバッファ層²⁾が存在する場合、緩衝層外径が $350\mu\text{m}$ の場合、集中荷重は $\frac{1}{2}$ に緩和される¹¹⁾。図3には(6)式のモード変換係数で $R = 256$ 、 $d_0 = 2.5 \times 10^{-4}$ の場合、すなわち $K \approx 6.4 \times 10^{-2}$ で $B = 0.2\text{dB/km}$ の場合と(8)式で与えられる場合につき、モード変数 m と1箇所当たりのモード変換係数の関係を示す。

5 光ファイバ心線、ケーブルの伝送特性

本章では実際の心線化、ケーブル化での伝送特性を検討し、先に述べた理論と比較検討の上、得た結果について述べる。

5.1 心線化に伴う伝送損失

図3のモード変換係数の計算に用いたナイロンのヤング率は、普通グレードナイロンでは 20°C 、柔軟グレードナイロンでは -30°C の値に対応する。普通グレードナイロン2層補強構造では $\lambda = 0.85\mu\text{m}$ で約 2.8dB/km 、 $\lambda = 1.3\mu\text{m}$ で 0.8dB/km ($B \approx 0.3\text{dB/km}$)であること、柔軟グレードナイロンで3層補強構造では 20°C では $B \leq 0.03\text{dB/km}$ 以下であるが、 -30°C では 20°C に対しおよそ 0.1dB/km 増加することから、4章での解析結果は実際の心線化での損失特性を定量的に説明できる。

5.2 帯域幅長さ特性

図4に心線、ケーブルの帯域の長さ特性を示す。ファイバ群①は、平均帯域幅 $1,300\text{MHz}\cdot\text{km}$ ($\Delta\alpha = 0.046$ 、 $1.3\mu\text{m}$ での伝

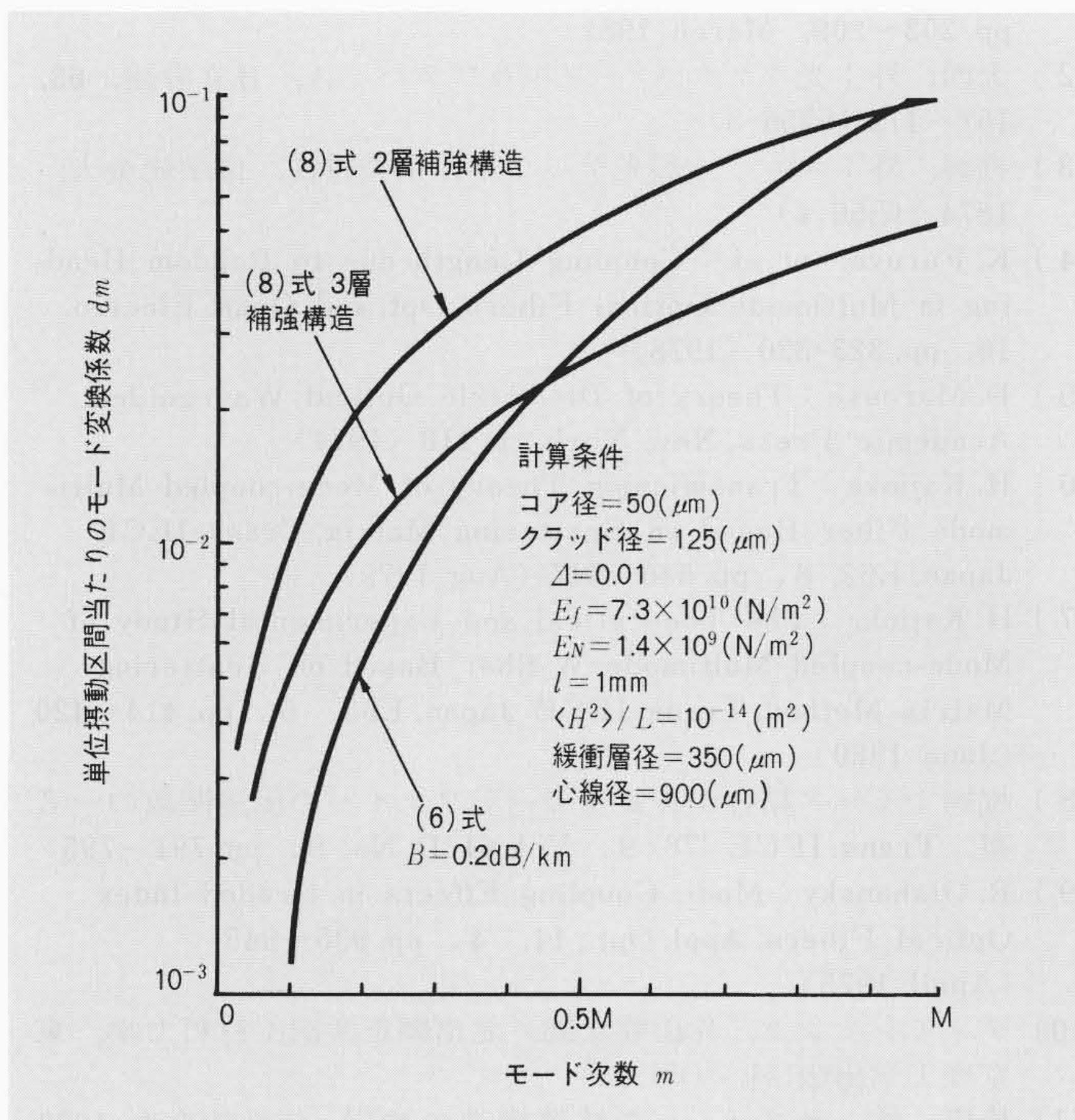


図3 心線化によるモード変換係数 モード変換損は高次モードのふるまいで特に決定されるため、2層補強構造の普通ナイロンでは心線化で0.2~0.3dB/km、3層補強構造の柔軟グレードナイロンでは -30°C で0.1dB/km程度の損失増が生ずる。

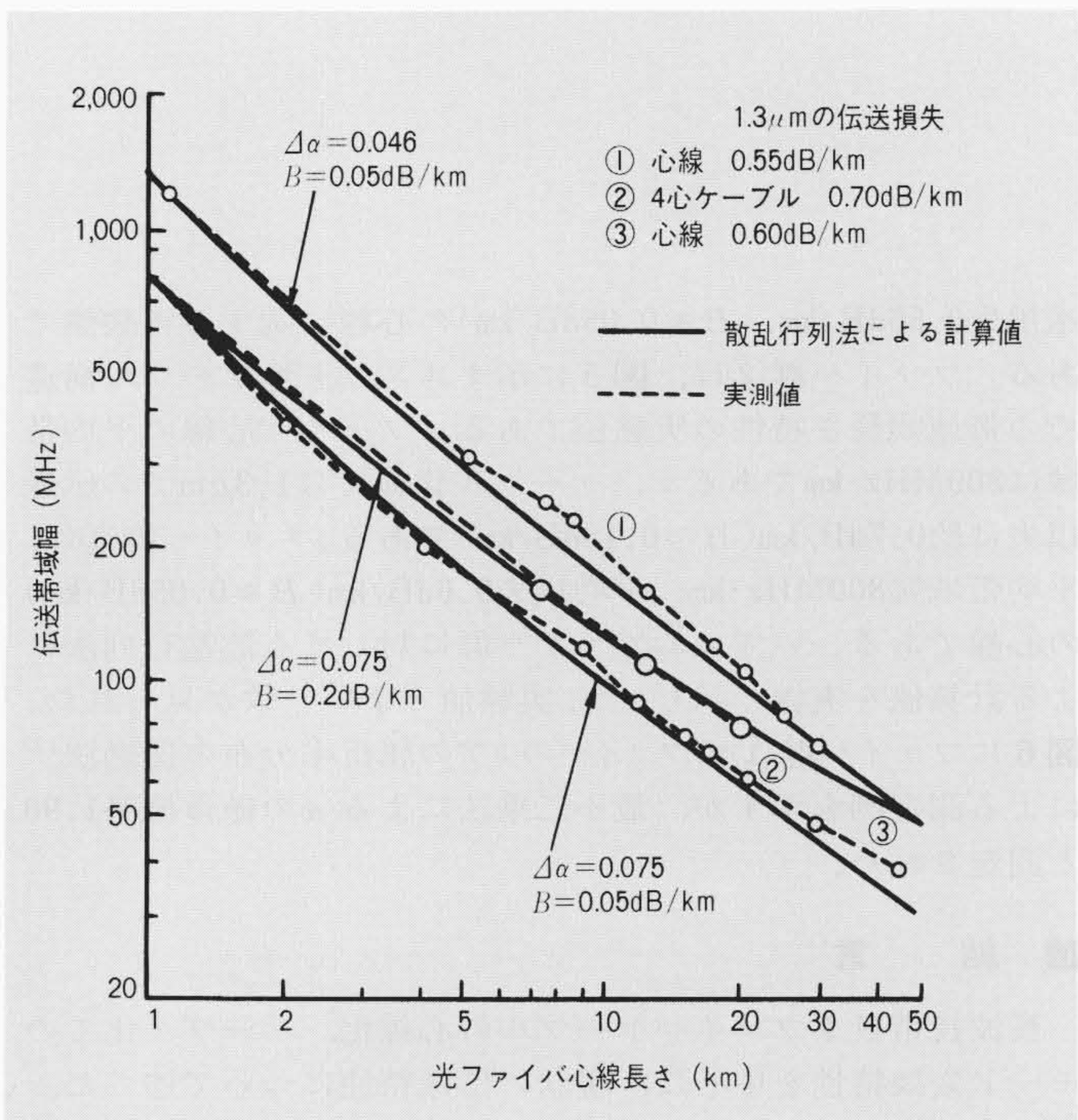


図4 長波長帯光ファイバ心線、ケーブルの帯域幅長さ特性 パラメータの $\Delta\alpha$ 、Bは各ファイバ群の平均値である。②の光ケーブルではケーブル化で0.1dB/kmのモード変換損が発生しているため、③に比べ帯域の長さ比例定数が小さくなっている。

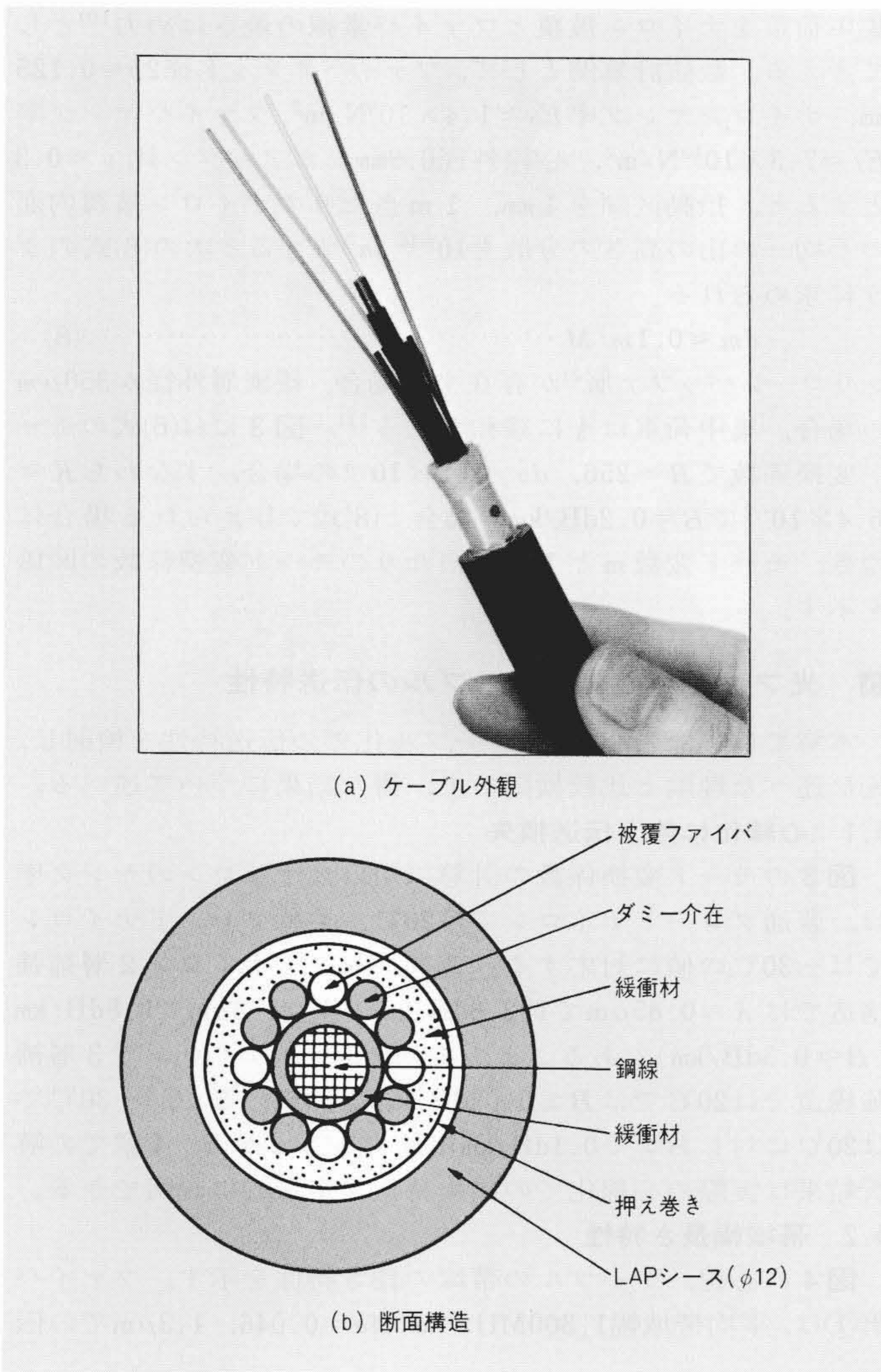


図5 長波長帯4心ユニット形光ファイバケーブル 写真は4心ユニット形ケーブルの外観を、図はその断面を示す。

送損失0.55dB/km, $B \approx 0.05\text{dB/km}$)の心線に関する実験値である。ファイバ群②は、図5に示すユニット形ケーブル構造での帯域幅長さ特性の実験値である。ファイバ心線の平均帯域は800MHz・kmであるが、ケーブル化後では $1.3\mu\text{m}$ での伝送損失は約0.7dB/km($B \approx 0.18\text{dB/km}$)である。ファイバ群③は、平均帯域幅800MHz・km, 平均損失0.6dB/km($B \approx 0.05\text{dB/km}$)の心線である。いずれのファイバ群に対しても散乱行列法による計算値を実線で示したが、実験値とよい一致が見られた。図6にファイバ群①のファイバのコアの屈折率分布の透過法¹²⁾による測定例を示すが、最小二乗法による α の値は概略1.90と測定された。

6 結 言

長波長帯GIファイバケーブルの心線化、ケーブル化でのモード変換特性を中心に、現状の伝送特性について述べた。多心のGIファイバケーブルとしても、 $1.3\mu\text{m}$ 帯で伝送損失が0.7dB/km以下となり、モード変換効果により30km伝送後も50MHz以上の帯域幅が確保されるため、長距離無中継伝送路として実用化が期待されている。

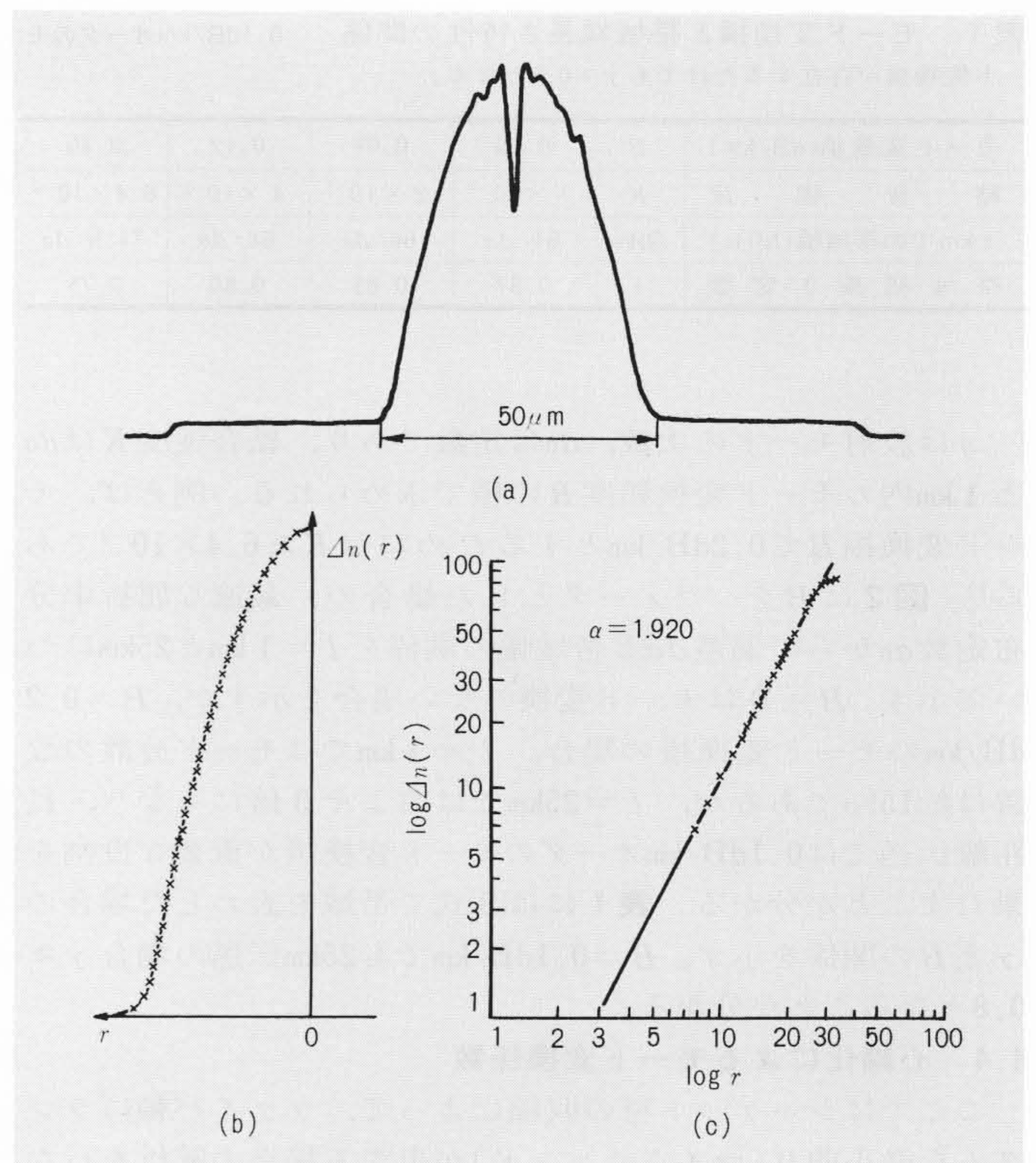


図6 長波長帯GI光ファイバコア屈折率分布測定例 (a)実測例, (b)サンプル点から求めた最小二乗 α 曲線, (c)計算機処理の結果, $\alpha = 1.920$ と求められている。本ファイバの帯域： $\lambda = 1.3\mu\text{m}$ で1,443MHz・km, $\lambda = 0.85\mu\text{m}$ で540MHz・kmである。

参考文献

- 1) H. Kajioka: The Theoretical and Experimental Study of Mode-coupled Graded-index Fibers Based on Scattering Matrix Method, Trans. IECE Japan, Vol. E. 64, No. 3, pp. 203~209, March 1981
- 2) 大西, 外: 光ファイバケーブル及びデバイス, 日立評論, 63, 167~172 (昭56-3)
- 3) 梶岡, 外: ユニット形光ケーブルの損失特性, 信学総全大, 1874 (昭56-4)
- 4) K. Furuya, et al.: Coupling Length due to Random Bending in Multimode Optical Fibers, Opt. and Quan. Electro. 10, pp. 323-330 (1978)
- 5) D. Marcuse: Theory of Dielectric Optical Waveguides, Academic Press, New York, p. 110 (1974)
- 6) H. Kajioka: Transmission Theory of Mode-coupled Multimode Fiber Based on Scattering Matrix, Trans. IECE Japan, E62, 8, pp. 546~547 (Aug. 1979)
- 7) H. Kajioka: The Theoretical and Experimental Study of Mode-coupled Multimode W-fiber Based on Scattering Matrix Method, Trans. IECE Japan, E63, 6, pp. 414~420 (June 1980)
- 8) 梶岡: モード結合がある多モードファイバの伝達関数の一考察, Trans. IECE '78/9, Vol. 61-B, No. 9, pp. 791~795
- 9) R. Olshansky: Mode Coupling Effects in Graded-Index Optical Fibers, Appl. Opt., 14, 4, pp. 935~945 (April 1975)
- 10) ティモシェンコ, 片山健次郎, 北畠顯正共訳: 材料力学, 東京理工大学出版(株) (昭.13)
- 11) 松田, 外: 光ファイバの被覆構造の検討, 信学総全大, 1682 (昭53-3)
- 12) J. A. Arnaud et al.: Novel Technique for Measuring the Index Profile of Optical Fibers, B.S.T.J., Vol. 55, No. 10, pp. 1489~1508 (Dec. 1976)