

W形光ファイバの諸特性

Properties of W-type Optical Fibers

通常用いられている二層構造の単一クラッド形光ファイバは伝送帯域を広げると耐応力性が劣化するという相反した関係を持っているため、最近、伝送帯域と耐応力性を独立に設定できるねらいを持つ三層構造のW形ファイバが開発された。

本論文ではW形ファイバの基本特性について理論解析と対応する実験的検討を行ない、W形及び単一クラッド形の構造、屈折率パラメータとファイバ諸特性との関連を把握した。その結果、W形では単一クラッド形に比べ、より広い帯域まで良好な耐応力性を持っていることが明らかとなり、W形ファイバの設計基礎を与えることができた。また、コアの屈折率分布をグレーデッド状としたGW形ファイバを試作し、その広帯域特性を確認した。

田中捷樹* Tanaka Toshiki
 斧田誠一* Onoda Seiichi
 菅沼庸雄* Suganuma Tsuneo
 角 正雄** Sumi Masao

1 緒 言

新しい光通信伝送路として近年注目されている光ファイバは、最近の急速な技術進歩により当初の予想以上に早く実用段階に近づいている。

光ファイバの基本的特性は、伝送損失、帯域、結合接続性、耐応力性などであるが、ファイバの実際の設計に当たっては、これら諸特性を総合して判断する必要がある。

W形光ファイバの開発に当たってもこれら基本的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 W形光ファイバの基本特性

2.1 特性の概要

光ファイバの伝送損失は、第一次的には吸収、散乱損失を減少させる材料プロセスに依存しており、最近では低損失のレベルに容易に到達し得るようになった。一方、伝送帯域を第一次的に決めるものは、ファイバが長手方向に均一であるとして、断面内の寸法と屈折率分布から成る構造パラメータである。また、ファイバのケーブル化において問題となる耐応

力性は、ファイバの微小曲がりによる損失増加が基本的要因と考えられている。

高屈折率のコアとそれを包む低屈折率のクラッド層から成る単一クラッド形ファイバは、最も単純な構造であり、その伝送帯域はコア径とコア、クラッド間の屈折率差で決まる。伝送帯域を広くするには、コア径あるいは屈折率差を小さくして伝搬モード数を減少させることを要する。しかし、コア径を小さくすれば励起、接続に不利となり、また屈折率差を小さくすれば曲げ損失が増加し耐応力性が劣化する。このような単一クラッド形の問題点を解決する一方法として、東北大学川上助教授との共同により、W形ファイバを提案し開発検討を進めてきた^{1)~4)}。

図1にW形と単一クラッド形ファイバの屈折率分布を示す。W形はコアとクラッド層の間に低屈折率の中間層を持つ三層構造であり、その定性的な特性は単一クラッド形SC₁形、SC₂形と比較すると理解しやすい。すなわち、SC₁形においてコア内を伝搬する波は、幾何光学的に考えるとコア、クラッド

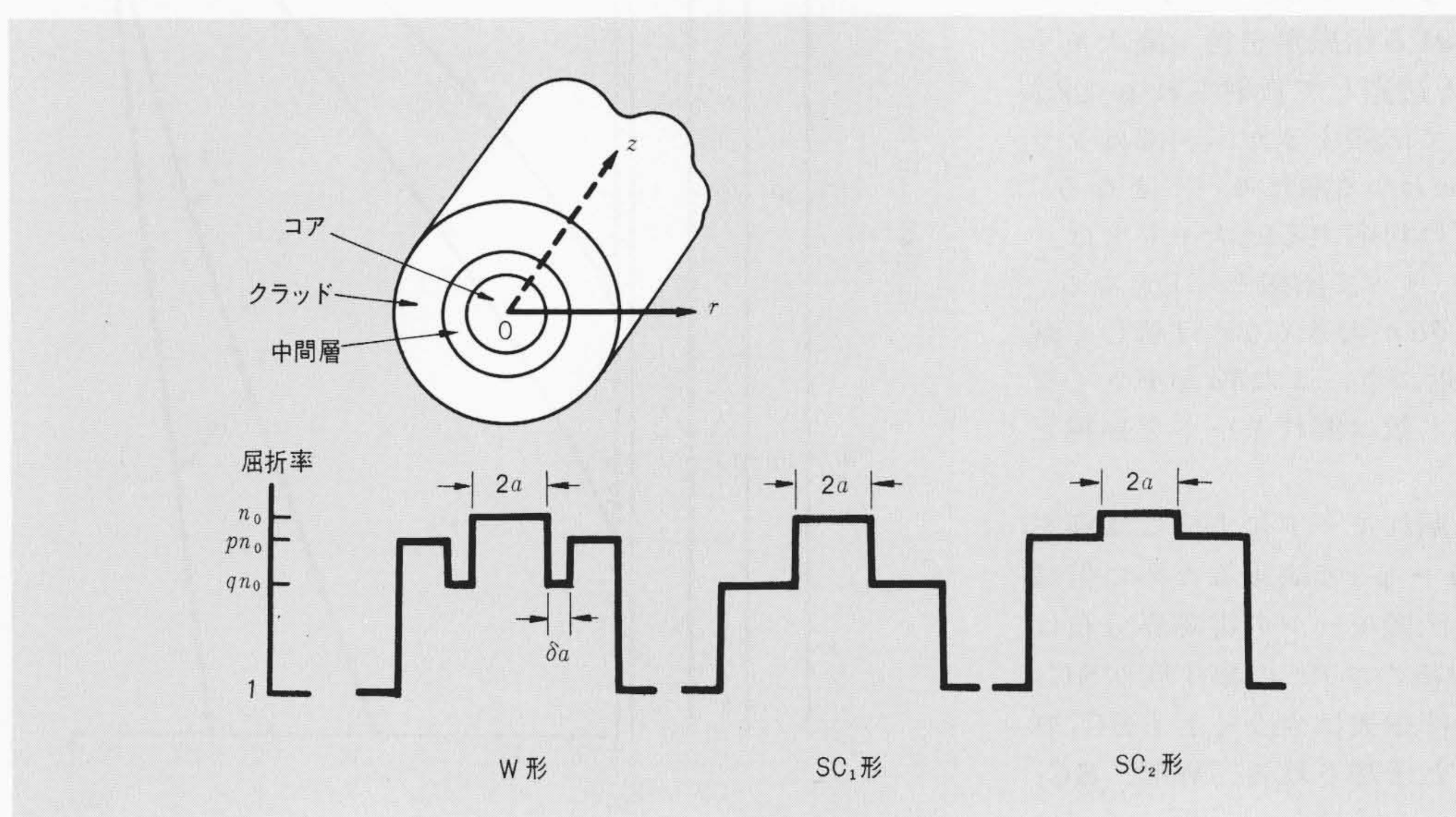


図1 W形ファイバ及び比較用の二種の単一クラッド形ファイバの屈折率分布 光ファイバは円筒状構造であり、一般に中心部(コア)の屈折率は外側(クラッド)の屈折率より若干高い。W形ではコア及びクラッドより屈折率の低い中間層が存在する。

* 日立製作所中央研究所 工学博士 ** 日立製作所中央研究所 理学博士

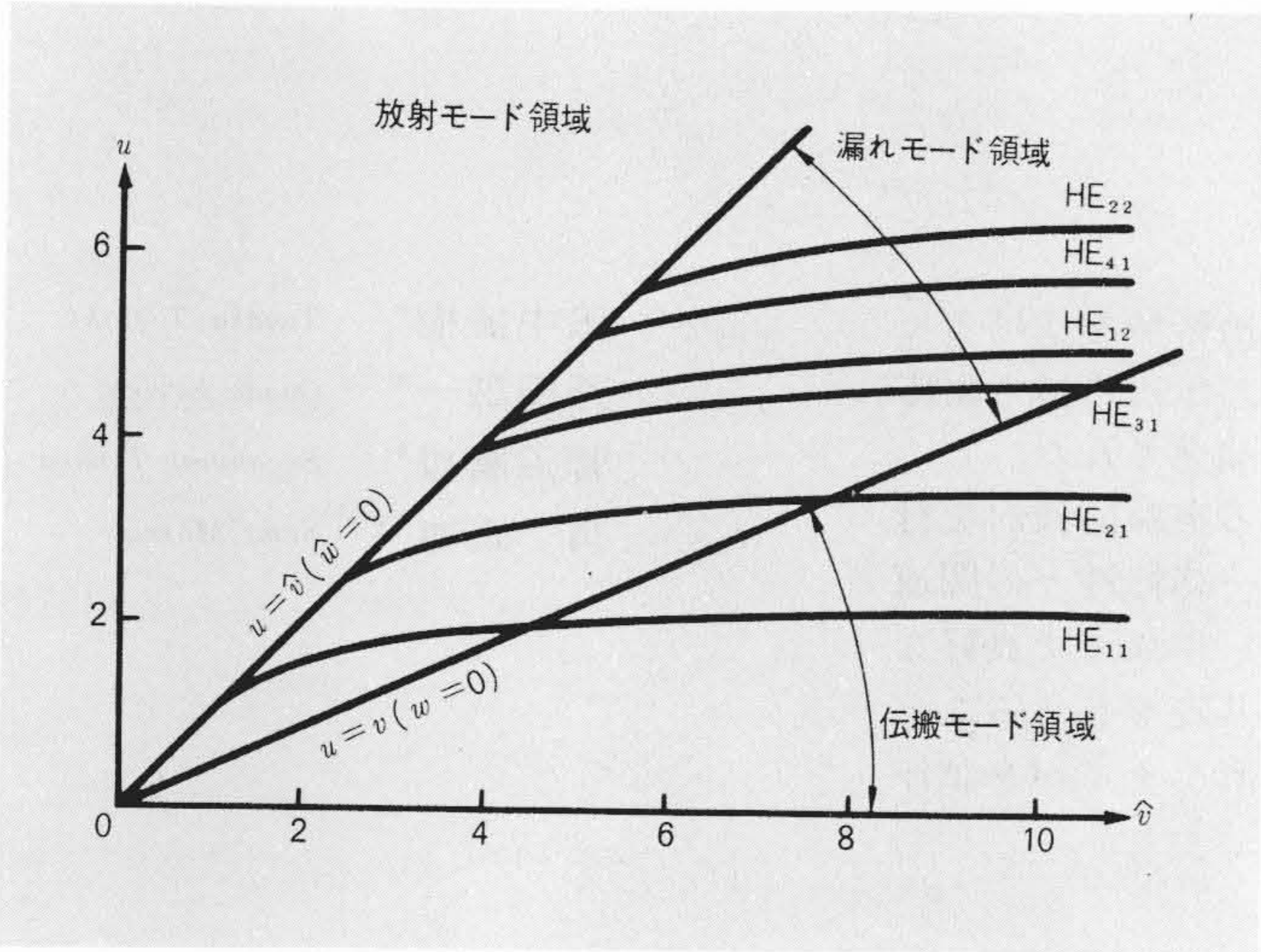


図2 W形ファイバのモード構成 SC₁形では $u=\hat{v}$ の直線が伝搬モードのカットオフを与えるが、W形では $u=v$ の直線で与えられ、両直線間の領域は漏れモード領域となる。

表1 W形と単一クラッド形の特性比較 単一クラッド形1(SC₁)は、耐応力特性は良好であるが伝送帯域は狭い。逆に単一クラッド形2(SC₂)は伝送帯域は広いが耐応力性に問題がある。W形は両者の長所を合わせ持つ。

特 性	ファイバ形式	W	SC ₁	SC ₂
伝 送 帯 域		広	狭	広
耐 応 力 性		良	良	不良

間の屈折率差 $(1-q)$ によって境界面で全反射される限界伝搬角以内のモードが伝搬モードを構成し、伝搬角が減少するにつれてモードは高次から低次へ移る。W形でも幾何光学的にはSC₁形と同様であるが、SC₁形のクラッドが中間層となり、その外側に高屈折率のクラッド層が接近するため、中間層への電磁界の波動光学的なしみ出しが問題となる。W形のコア、クラッド間の屈折率差 $(1-p)^{※1)}$ と前述の $(1-q)$ の間の屈折率差に対応して全反射される伝搬角を持つ高次モードは、しみ出し界がクラッド層へと透過して放射されるため、電磁界の一部はコア内に反射されて伝搬するが、一部はクラッド層へ放射されて損失となる、いわゆる漏れモードとなる。一方、ほぼ屈折率差 $(1-p)$ 以下に対応する低次モードは、しみ出し界を含めて全反射となり、すべて伝搬モードとなる。漏れモードの減衰は中間層の厚さ δa が大きくなれば著しく減少して、伝搬モード数はSC₁形に近づき、また δa が小さくなれば減衰は大きくなって伝搬モード数は漏れモードを無視してSC₂形に漸近する。

以上のようにW形ファイバでは漏れモードに十分な減衰を与えれば、伝搬モード数がほぼ $(1-p)$ で決まるために帯域もSC₂形と同程度となる。一方、伝搬モードの電磁界分布はSC₁形の低次モード群に近く、電力流のコアへの集中度がSC₂形に比べて極めて良いために、曲げ損失は少なくともSC₁形と同程度であり、耐応力性に強いと予想される。W形、SC₁

形及びSC₂形の特性を定性的に比較してまとめると表1に示すようになり、W形はSC₂形の広帯域性とSC₁形の耐応力性の両長所を併せ持つと考えられる。

以上は定性的な特性の概要であるが、次に特性をより定量的に明らかにするために行なった理論解析の結果を述べる。

2.2 モード構成と漏れモードの減衰特性

理論解析的にはW形はSC₁形が外側から近づいた高屈折率層により摂動を受けた構造とみなすことができ、SC₁形の固有モードをもとに摂動計算によってW形のモード構成などを求めることができる^{2),3)}。

いま、W形のコア、中間層、クラッドにおける径方向(r 方向)の規格化伝搬定数を u 、 $\hat{w}$ 、 w とし、SC₁形、SC₂形の規格化周波数を $\hat{v}$ 、 v とすれば、 λ を光の自由空間波長として、次の関係式が成立する。

$$u^2 + \hat{w}^2 = (2\pi n_0 a / \lambda)^2 (1 - q^2) \equiv \hat{v}^2 \cdots \cdots (1)$$

$$u^2 + w^2 = (2\pi n_0 a / \lambda)^2 (1 - p^2) \equiv v^2 \cdots \cdots (2)$$

これらのパラメータを用いてモード構成を記述することができ、その結果は図2のようになる¹⁾。まず、SC₁形のモード構成を示すと、図2において $u=\hat{v}$ の直線は(1)式により $\hat{w}=0$ 、すなわちSC₁形の伝搬モードのカットオフを与える境界線である。 $u > \hat{v}$ の領域では $\hat{w}^2 < 0$ となり、波は径方向に対しても伝搬波となる放射モードの領域に相当する。また、 $u < \hat{v}$ の領域は $\hat{w}^2 > 0$ 、すなわち $\hat{w}$ は実数となり、波はコア外で径方向に減衰し、コア内に電磁界が閉じ込められる伝搬モードの領域である。伝搬モードはHE₁₁モードより始まって多くのモードより成り、 $\hat{v}$ が大きくなるにつれて、伝搬モード数も増大することが分かる。

W形の場合は、 $w=0$ 、すなわち(2)式より $u=v$ の直線が

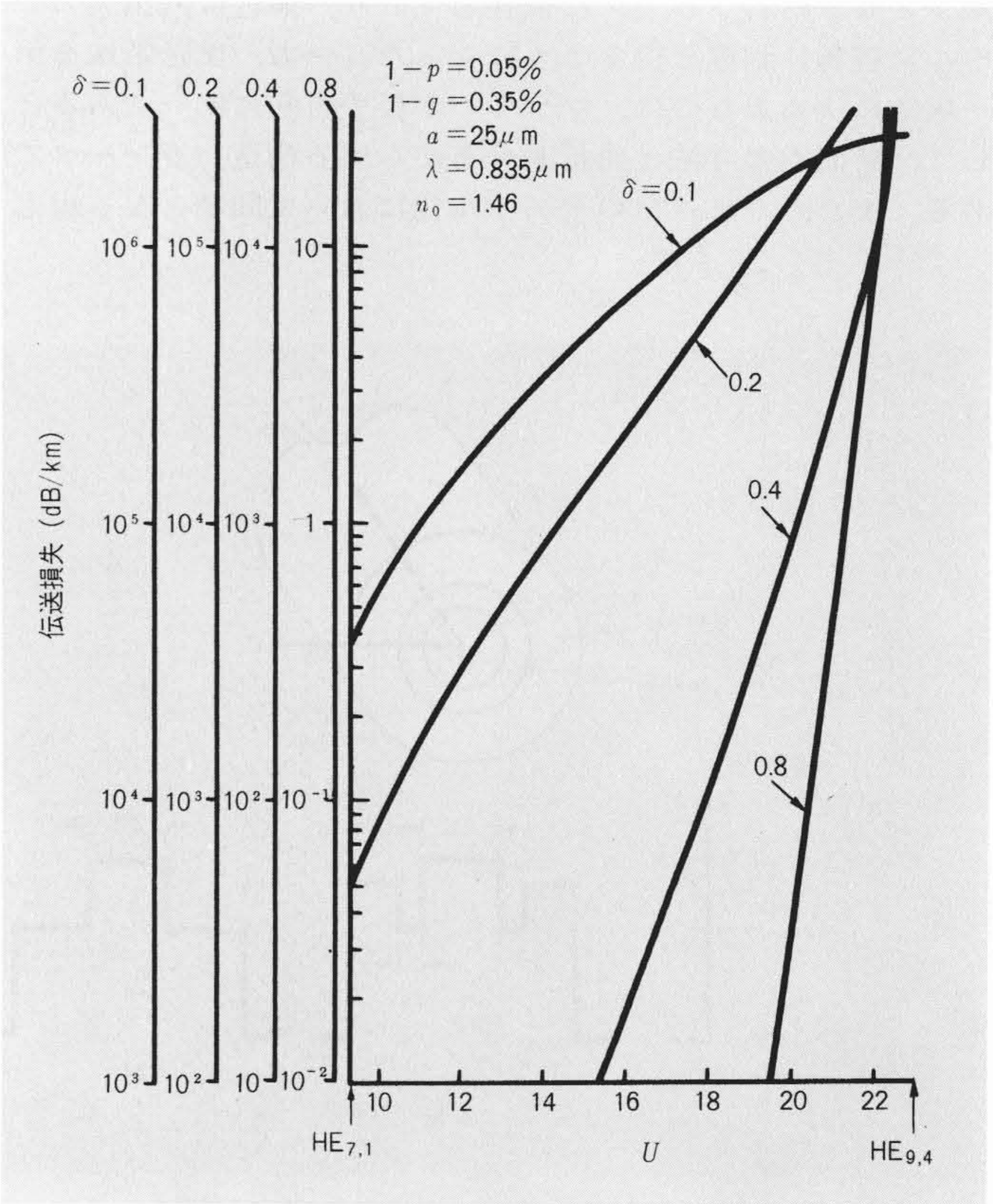


図3 多モードW形ファイバにおける漏れモードの伝送損失 漏れモードの伝送損失は、中間層厚さに強く依存するため中間層厚さを適当に選ぶことにより、任意の減衰を与えることができる。

※1) $(1-p)$ は後出の「電力制御用光ファイバケーブルの開発」では Δn で表現されている。

カットオフを与え、 $u < v$ の領域が伝搬モード領域となる。摂動計算によればW形の各モードはSC₁形の場合とほとんど変わらないので、SC₁形の各モード曲線群がそのまま対応する。このとき、二直線 $u = \hat{v}$ と $u = v$ に囲まれた領域では w は純虚数、 $\hat{w}$ は実数であり、これはエネルギーを放射して減衰しながらファイバに沿って伝搬する漏れモードを表わす。すなわち $\hat{v}$ 一定とすれば、SC₁形では伝搬モードであったもののうち、 $u > v$ である高次モード群は漏れモードとなり、 $u < v$ の低次モード群だけが伝搬モードとなる。

漏れモードの伝送損失を、摂動論成立の範囲内で理論的に求めた一例が図3である。横軸は漏れモードの最低次から最高次に至るモード番号に相当するもので、高次モードほど損失は大きい。また、規格化中間層厚さ δ によって減衰量は大幅に変わり、中間層を薄くしていくと漏れ損失は急激に増大する。これより、W形ファイバの設計に当たって、最低次漏れモードの損失が十分大きくなるように δ を選べば、伝搬モード数は最小となる。

2.3 伝送帯域³⁾

ステップ状屈折率分布を持つ光ファイバにおいては、各伝搬モードはそれぞれ異なる群速度で伝搬し、高次モードほど群速度は遅い。したがって、最低次モードと最高次モードの群速度の差が伝送帯域を制限する。伝送帯域を広げるには伝搬モード数を減少させる必要があるが、前節より明らかなように、W形では漏れモードに十分な損失を与えれば、伝搬モード数を減少させることができ、帯域を広げられるものと期待される。

伝送帯域の理論値を求めるに当たって、伝搬モード数は十分多く、すべての伝搬モードは一様な電力で励起され、モー

ド間の結合はなく独立に伝搬すると仮定する。まず、ベースバンド信号に対する伝達関数を求め、これより信号振幅が直流における値の-3dBとなる周波数として伝送帯域を定義する。図4は、このようにして求めたSC₁形、SC₂形及びW形の伝送帯域の相互関係を示したものである。縦軸は3dB帯域幅(1km当たり)、横軸は屈折率差(1-q)であり、(1-p)をパラメータとしてW形の帯域を実線で示してある。破線はSC₁形の帯域であり、(1-p)一定のW形の曲線と破線の交点がSC₂形の帯域となる。これより、(1-p)が一定であればW形の帯域はほぼSC₂形に近く、(1-q)にはあまり依存しないことが分かる。

2.4 耐応力性

光ファイバのケーブル化に際しては、ファイバに各種の外部応力が加わり、曲げなどの機械的変形をもたらす。これは伝搬モード間の結合をひき起こし、伝送帯域にも影響を与えるが、特に、伝搬モードと放射モードあるいは漏れモードとの結合は伝送損失を増加させる。ケーブル化に当たってはこの損失増加を最小にさせる耐応力性が重要である。

外部応力による損失増加の主要因は、ファイバの微小曲りに基づく伝搬モードから放射モードへの結合と考えられている⁵⁾。その結合強度は、コアとその隣接層との境界におけるモードの電力密度に比例し、電力流のコアへの集中度が良好なほど結合強度は小さく、耐応力性も良くなると考えられる⁶⁾。

ファイバのコア内電力流の集中度をモード間結合はないものとしてSC₁形、SC₂形及びW形について計算し比較することができる⁴⁾。コア径一定の場合、単一クラッド形では屈折率差が大きいほど集中度は良くなり、SC₁形は当然SC₂形より集中度は高い。W形ではSC₁形において集中度の悪い高次モードが漏れモードとして取り除かれるため、理論的集中度はSC₁形より更に良くなる。

一方、耐応力性の一つの目安として、表面に微小な凹凸を持つドラム上に一定張力でファイバを巻きつけ、無張力時からの損失増加を評価する方法がある⁷⁾。このときの損失増加 $\Delta\alpha$ を外力によるファイバの微小曲りに基因するものとして理論的に求めると近似的に $\Delta\alpha \propto (1-q)^{-2}$ の関係を得る⁵⁾。これは屈折率差が増大すれば、コアへの電力集中度が高くなり、したがって損失増加が減少する傾向と一致している。

2.5 開口角と広帯域化の問題

ステップ状屈折率分布を持つW形ファイバは、先にも述べたようにコアとクラッド間の屈折率差(1-p)を小さくすることにより原理的には1km長で数百メガヘルツの伝送帯域を実現することも可能である。しかし、この場合(1-p)は0.05%以下となり、伝搬モードは伝搬角の小さな低次モード群に限られるため、ファイバが伝搬モードとして受け入れる入射光角度、いわゆる開口角が著しく減少する。開口角の減少は光源との結合あるいはファイバ間の接続に不利な要因となり実用的ではない。

開口角を大きく保ったまま広帯域化するには、コア内の径方向屈折率分布を自乗形とし、各モードの群速度が等しくなるようにしたグレーデッド形分布⁸⁾を採用すればよいが、この場合にも、W形構造にすればコア周辺部の屈折率分布の不完全性による帯域の劣化を防ぐことが可能となる⁹⁾。

3 実験結果

3.1 製法プロセスの改善

光ファイバの作製には現在低損失ファイバが最も容易に得られる内付け気相化学反応(以下、CVDと略す)法¹⁰⁾を採用

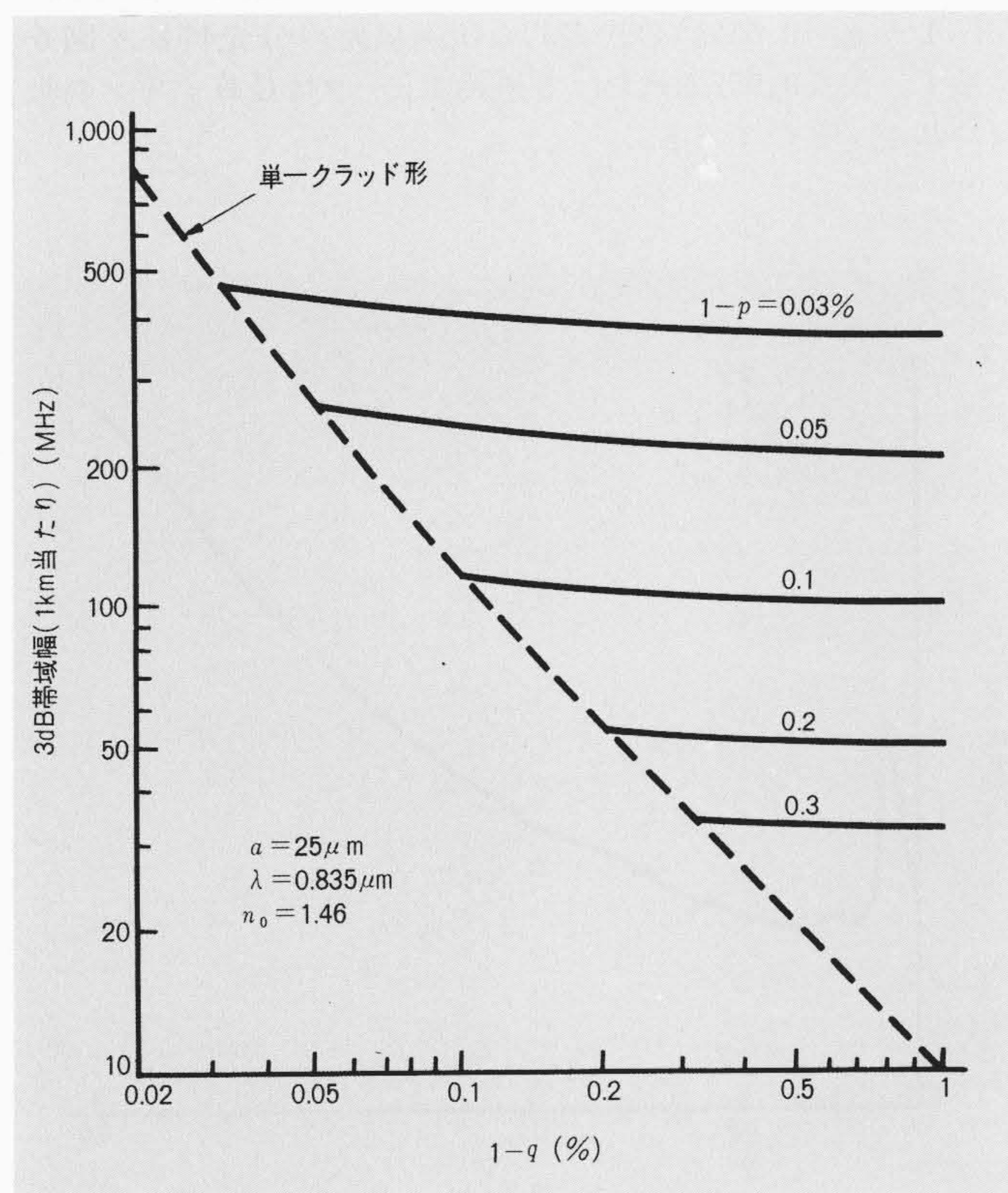


図4 コアと中間層間の屈折率差に対する3dB帯域幅(1km当たり) 単一クラッド形では、屈折率差が増大するにつれて伝送帯域は急速に減少するのに対し、W形ではコア、中間層の屈折率差を大きくしても帯域の劣化は小さい。

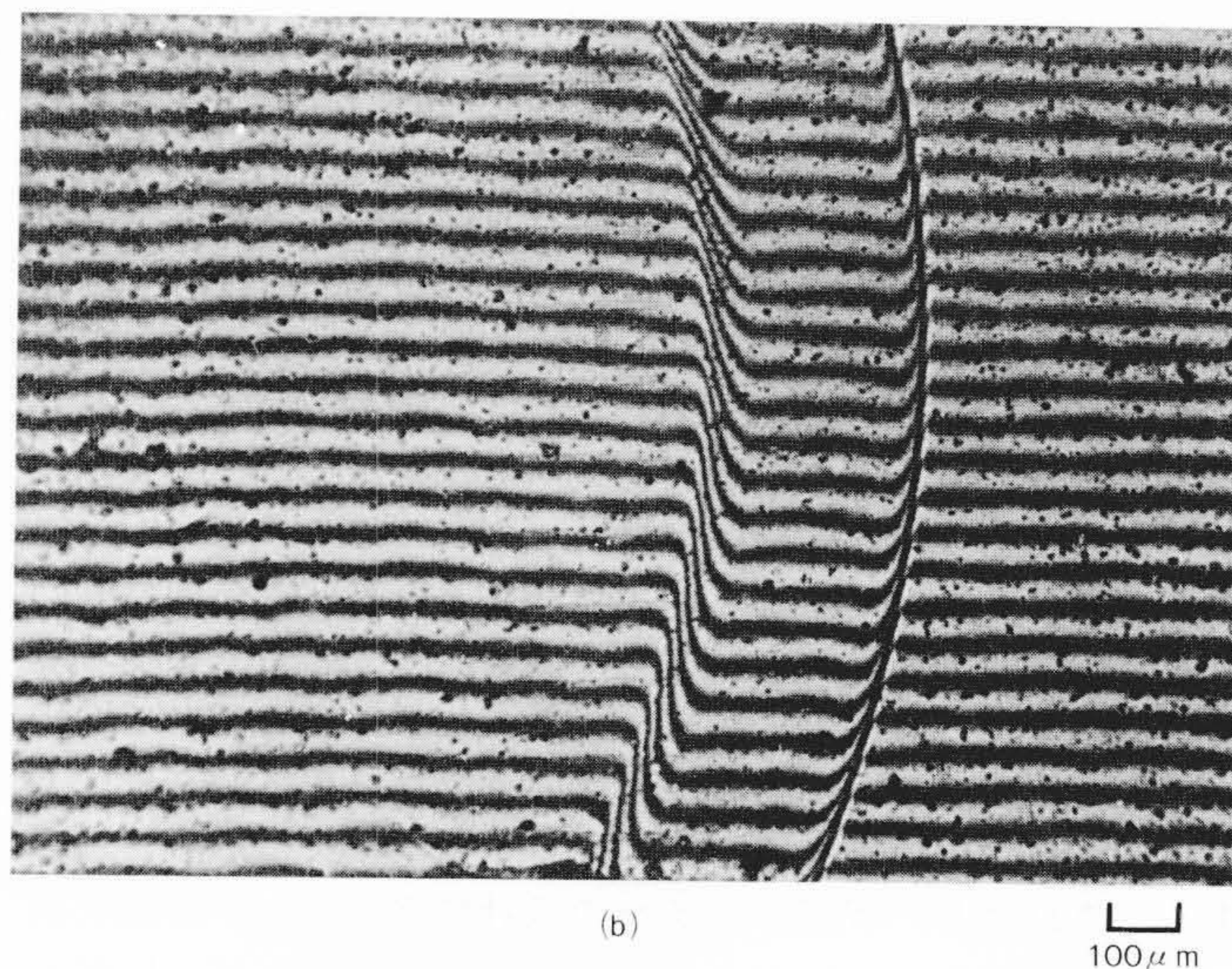
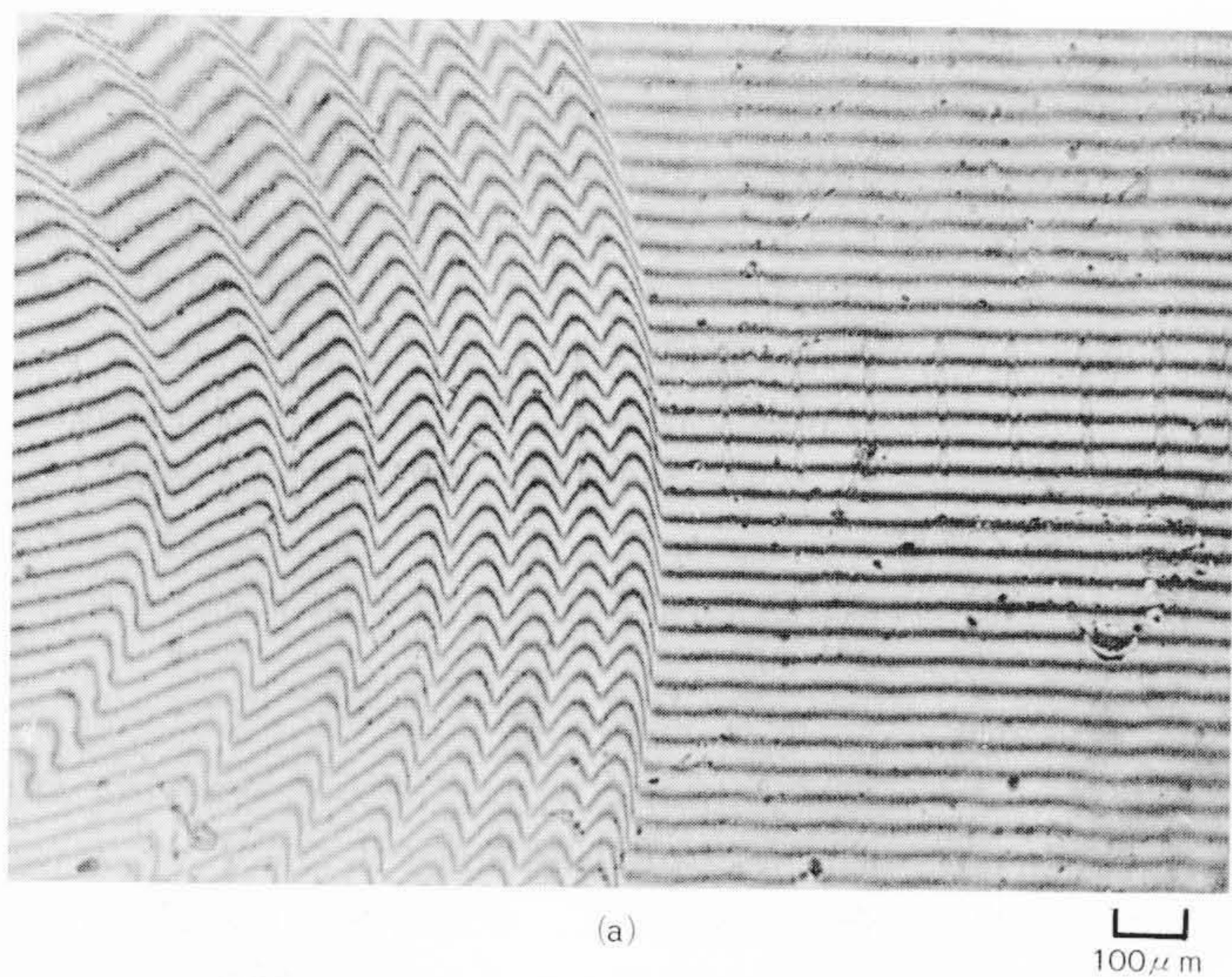


図5 屈折率分布を示す干渉縞写真 写真はファイバ線引き前のプレフォームを薄く輪切りにし、研磨して干渉顕微鏡により撮影したものである。干渉縞の模様の変化が屈折率変化に比例している。

している。その工程は、(1)石英管の内面にCVDにより多層のガラス膜を形成する過程、(2)ガラス膜形成後、石英管を回転しながら酸水素バーナで外側より加熱し、中実となるように溶着してプリフォームとする工程より成り、更に(3)プリフォームを線引き装置で溶融し、線引きする工程が付加される。上記各工程については、当初から幾つかの問題があったが、検討の結果次のような改善策を見いだすことができた。

(1) 年輪状屈折率分布の除去

CVD膜形成過程では石英管の内面に中間層となるホウケイ酸ガラス膜($B_2O_3-SiO_2$)を堆積し、次いでコアとなるリンケイ酸ガラス膜($P_2O_5-SiO_2$)を形成する。これを溶着したプリフォームの断面屈折率分布をみると、多くの場合図5(a)のプリフォーム断面の干渉縞写真にみられるように、径方向に周期的な年輪状の屈折率変化を持つコアを生じた。このような屈折率の変動はファイバ特性に不安定な要因を残すことになり望ましくない。これを除去するためにCVD反応時のソース濃度、反応温度等について検討を加えた結果、CVD膜の一層当たりの成長膜厚をある上限値以下とすれば良いことを見いだした。図5(b)はこのようにして年輪を除去した場合の干渉縞写真である。

(2) 加圧溶着法

石英管の中空部をつぶして中実のプリフォームとする工程において、石英管の形状、肉厚が変動しているために溶着したプリフォームが楕円化したり、コアの偏心を生ずることがある。これを防ぐために溶着時に石英管の一端を封じた後、他端よりガスを導入し、加圧しながら溶着する手法を開発した。その結果、真円度、偏心度を著しく改善できることを確認し、プリフォームの歩どまりを向上した。

(3) ガス流量線径制御方式

プリフォームは線引き装置の加熱炉で溶融され、ファイバに線引きされるが、線径の変動はファイバ諸特性に大きな影響を及ぼす。線径変動の要因はプリフォームの外径変動のほかに溶融されたプリフォーム周辺のふんい気のゆらぎがある。従来はファイバ巻取り速度にフィードバックして線径を制御する方式であったため、応答が遅く、速い変動は除去し切れなかった。このため、当初は溶融プリフォームの外周に沿って一定流量のガスを流すことによりふんい気のゆらぎの影響

を防いだが、更に、ガス流量の微小な変化に対して線径が速やかに応答する現象を利用して、線径変動の高周波成分はガス流量に、低周波成分は巻取り速度にフィードバックして制御を行なう新しい線径制御方式を開発した。この方式を採用することにより、簡単な比例制御回路だけで、外径変動 $\pm 1\%$ 以下のプリフォームについては線径変動が $\pm 0.5\%$ 以下となり、ファイバ特性を安定化することができた。

3.2 W形ファイバの諸特性

(1) 伝送損失

W形ファイバ(コア径 $50\mu m$ 、中間層厚さ $8\mu m$ 、 $1-p=0.20\%$ 、 $1-q=0.65\%$)の代表的な伝送損失の分光特性を図6に示す。波長 $0.95\mu m$ における損失のピークはOHイオンの吸収に基づくものである。

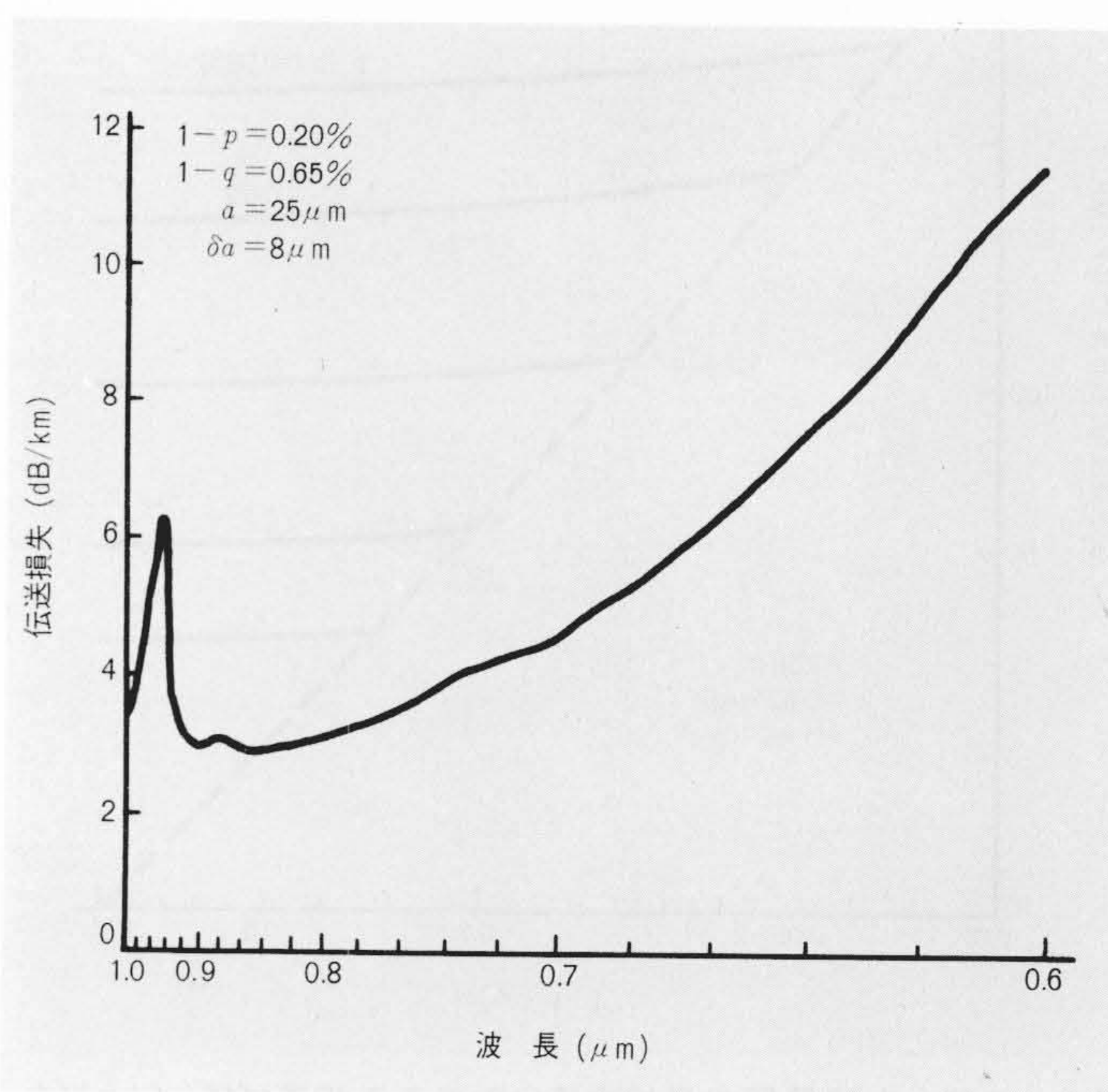


図6 多モードW形ファイバの伝送損失分光特性 横軸は(波長) $^{-4}$ で目盛っている。波長 $0.95\mu m$ での伝送損失のピークは、ファイバ材質中に含まれるOHイオンの吸収に基づくものである。

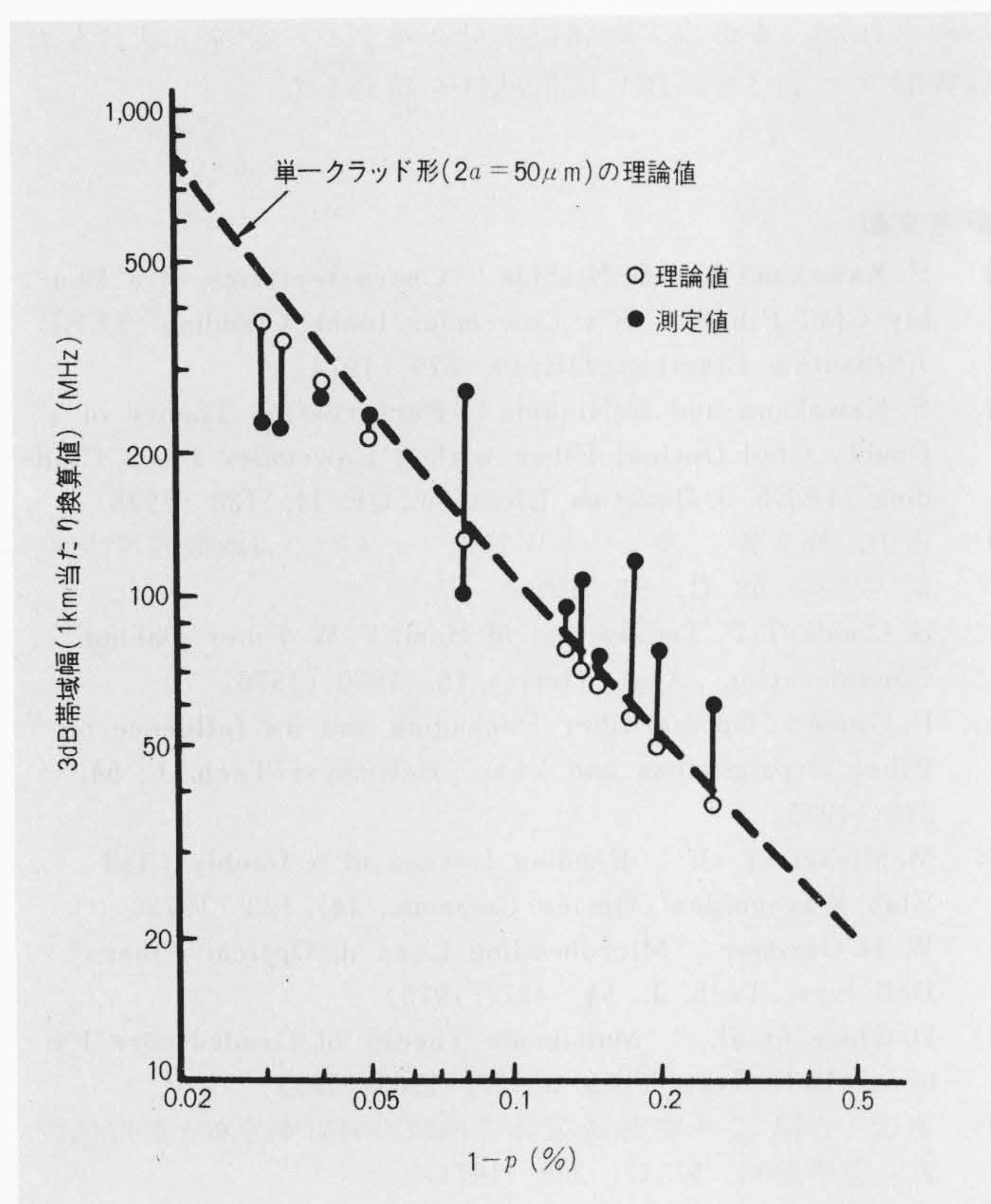


図7 コアとクラッド間の屈折率差に対する3 dB帯域幅(1 km換算値) 帯域の測定値は多少のばらつきはあるが、コア、クラッドの屈折率差の減少とともにほぼ理論曲線に沿って増加している。

(2) 伝送帯域

仕様の異なる多数本のW形ファイバを試作し、実測した伝送帯域と屈折率差の関係を示したものが図7である。コア径は $50\mu\text{m}$ 、中間層厚さは $4\sim 6\mu\text{m}$ であり、 $(1-p)$ は 0.03% から 0.26% 、 $(1-q)$ は 0.40% から 0.62% まで変化している。

伝送帯域の測定は光源としてGaAlAs半導体レーザ(波長 $0.835\mu\text{m}$)を用い、これに変調をかけて変調信号を適当な周波数範囲で掃引し、長尺、短尺での受光信号のスペクトルを比較することにより行なった³⁾。なお、ファイバは素線の状態であり、測定長はすべて1 km前後である。

図7において、破線はコア径 $50\mu\text{m}$ の単一クラッド形ファイバに対する理論曲線であり、SC₂形に対応している。帯域の実測値は多少のばらつきはあるものの、 $(1-q)$ にはあまり影響されず、 $(1-p)$ が小さくなるにつれて、ほぼSC₂形の理論曲線に沿って増加している。これは図4に示される理論的予測と良く一致する傾向である。

(3) 耐応力性

実際のケーブル化において、ファイバに加わる外部応力は非常に複雑であると予想されるが、ここでは代表的な耐応力測定法としてファイバをドラムに一定張力で巻きつけ、無張力時と比較して損失増加分を測定する方法を採用した。用いたドラムは 300mm 径、表面あらさ $\pm 2\mu\text{m}$ のアクリル製のものであり、印加張力は 30g である。このようにして測定した損失増加分と屈折率差 $(1-q)$ との関係を図8に示す。横軸は単一クラッド形に対してはコアとクラッドの屈折率差、W形ではコアと中間層間の屈折率差である。

同図において白ぬき点は単一クラッド形についての測定値であり、黒点はW形の測定点である。破線は $(1-q)^{-2}$ の傾

向線であるが、単一クラッド形、W形共に同様な $(1-q)$ 依存性を持っている。特にW形のコアとクラッド間の屈折率差 $(1-p)$ は 0.08% から 0.44% であり、高屈折率クラッド層の存在にもかかわらず、W形の耐応力性は単一クラッド形と同様に $(1-q)$ で決まることが分かる。この結果も前章で述べた理論に基づく予測傾向と一致しており、またジャケット付きファイバの耐応力性及びケーブル化について、日立電線株式会社で得られている結果¹¹⁾もこれを更に裏付けている。

(4) その他

(a) 励起条件とモード間結合

伝送帯域の実測値を示した図7において、理論値は全伝搬モードが一樣な電力で励起され、モード間の結合はなく独立に伝搬するという仮定に基づいて求めたものである。実際のファイバではモードの励起条件もこれと異なり、モード間結合もかなり生じている。このような状況を考慮に入れると図7の実測値と理論値との差はかなり補正されることが考えられる。先に述べたように、伝送帯域を決める第一要因はファイバの構造パラメータであるが、励起条件とモード間結合は第二要因として実際上重要なものである。事実、モード間結合によって生ずる伝搬モードと放射あるいは漏れモードとの変換、逆変換を考慮すれば、伝送損失、帯域、耐応力性が相互にかかり合ってくる。これらの相互関係について理論的、実験的検討を行ない、ファイバの最適設計法を確立することは今後に残された課題である。

(b) 広帯域化

1 km長で数百メガヘルツの広帯域化は、ステップ状屈折率分布を持つW形では不利であることを先に述べた。製作技術上からも 0.05% 以下の屈折率差はその制御性、再現性に問題を生ずる。このため、広帯域ファイバとしてコアの屈

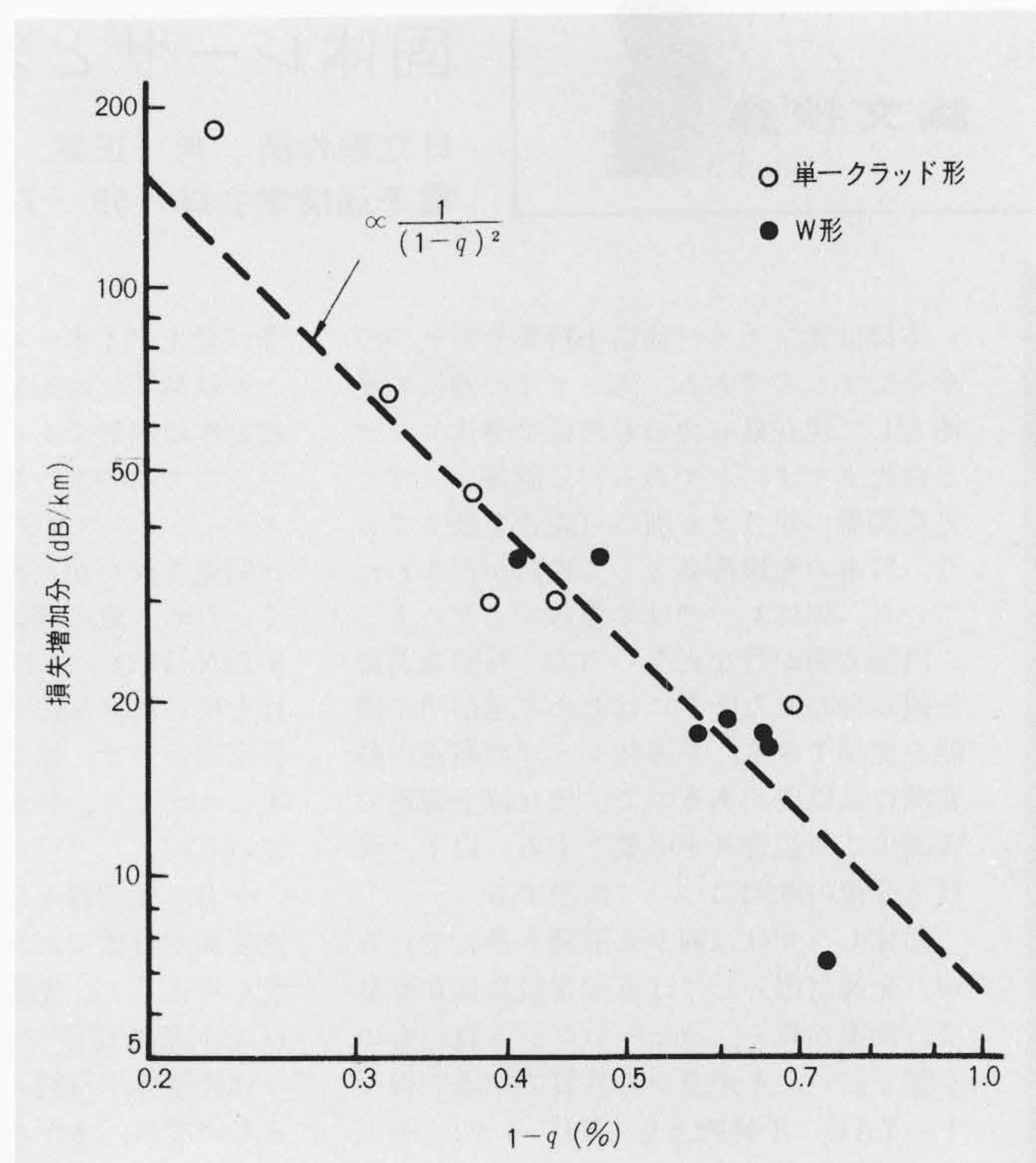


図8 コアと中間層間の屈折率差に対する応力による損失増加分の変化 SC形、W形共に損失増加は屈折率差の自乗に反比例する傾向を示しており、高屈折率クラッド層の存在にもかかわらずW形は良好な耐応力特性を示すといえる。

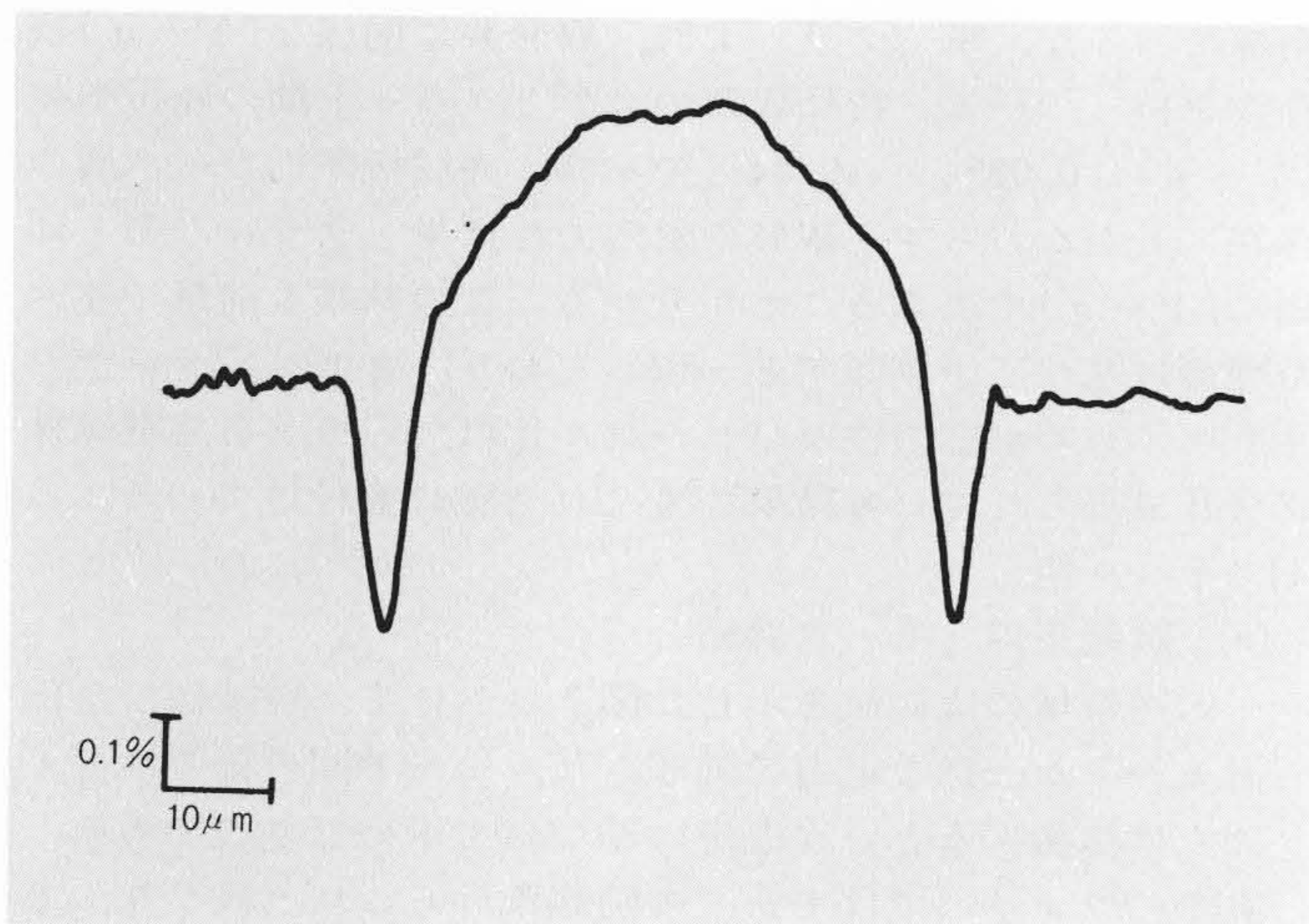


図9 試作GW形ファイバの屈折率分布 測定は、ファイバ端面からの光反射量によって屈折率差を求める端面反射法による。

折率分布をグレーデッド状としたGW形ファイバが試作された。その結果、図9に示すような屈折率分布に対して1km長で300MHz以上の広帯域化を実現できることを確認した。

4 結 言

三層構造より成るW形ファイバの諸特性について理論的及び実験的検討結果を述べた。

W形の構造パラメータと伝送帯域、耐応力性との関係が明らかになり、W形ファイバは単一クラッド形ファイバに比べて広い帯域のものまで良好な耐応力性を持っていることが確

かめられた。またコアの屈折率分布をグレーデッド状にしたGW形ファイバを試作し広帯域性を確認した。

参考文献

- 1) S. Kawakami and S. Nishida: "Characteristics of a Doubly Clad Fiber with a Low-index Inner Cladding", IEEE J. Quantum Electron., QE-10, 879 (1974)
- 2) S. Kawakami and S. Nishida: "Perturbation Theory of a Doubly Clad Optical Fiber with a Low-index Inner Cladding", IEEE J. Quantum Electron., QE-11, 130 (1975)
- 3) 田中, 外2名: 「多モードW形光ファイバの周波数応答特性」 信学論(c), 59-C, 91 (1976)
- 4) S. Onoda, T.P. Tanaka and M. Sumi: "W Fiber Design Consideration", Appl. Optics 15, 1930 (1976)
- 5) D. Gloge: "Optical-fiber Packaging and its Influence on Fiber Straightness and Loss", Bell Syst. Tech. J., 54, 245 (1975)
- 6) M. Miyagi et al.: "Bending Losses of a Doubly Clad Slab Waveguides" Optics Commun., 14, 123 (1975)
- 7) W. B. Gardner: "Microbending Loss in Optical Fibers", Bell Syst. Tech. J., 54, 457 (1975)
- 8) D. Gloge et al.: "Multimode Theory of Graded-core Fibers" Bell Syst. Tech. J., 52, 1563 (1973)
- 9) 末松, 古屋: 「多変態誘電体導波路の屈折率分布と群遅延特性」 信学論(c), 57-C, 289 (1974)
- 10) W. G. French et al.: "Optical Waveguide with Very Low Losses", Bell Syst. Tech. J., 53, 951 (1974)
- 11) K. Mikoshiba et al.: "The Influence of Mechanical Stress on Transmission Characteristics of W-type Optical Fibers", 2nd European Conf. V. 7 (Sept. 1976)

論文抄録

固体レーザと変調器

日立製作所 角 正雄

電子通信学会誌 59-7, 721 (昭51-7)

本稿は光ファイバ通信小特集号の一つの章をなすものである。光ファイバ通信の光源として現在最有力のものは半導体レーザと発光ダイオードであるが、固体レーザと光変調器の組合せも別の可能性を持っており、将来の光源部品として検討が行なわれている。固体レーザは半導体レーザのように内部変調が行なえないので、外部変調器と組み合わせたときにはじめて通信用の機能を発揮できる。半導体レーザの高速内部変調には限度があるので、それ以上高速の変調はこの組合せを必要とする。以下、現状と今後の動向について概説する。

固体レーザは以前から開発も進んでいるが、光通信用としては室温連続発振が容易で、効率がよく、コヒーレンスも良いものが望ましい。その点から良質の結晶が得やすいYAGに不純物として Nd^{3+} イオンを入れた結晶によるレーザが最も有望とされてきた。しかし、最近小形化のために励起光

源に発光ダイオードを用いるようになると、この結晶では励振効率が低いために室温連続動作は困難であることが明らかとなった。

そこで高効率の新レーザ結晶として、ネオディミウムペンタフォスフェイト(NdPP)が開発されたが、良質大形結晶が育成しにくいため、更に探索が進められた結果、近年 $\text{LiNdP}_4\text{O}_{12}$ (LNP)が見いだされた。これを用いれば Nd^{3+} の濃度がYAGより30倍程度高いので、室温連続動作の条件を満たすことができ、将来の見通しは明るくなっている。

一方、変調器としては1GHz以上の超高速変調が目標であり、光ファイバとの結合性も考えると、光導波構造を持ち、将来光IC化可能な素子であることが望ましい。

強誘電体材料の電気光学効果を利用するものでは、永年の検討の結果、 LiNbO_3 と LiTaO_3 が最適とされている。これに導波路を形成する手法について、寸法精度、

屈折率制御性、結晶品質など広く検討されており、現在は拡散法が多いが、今後液相エピタキシャル、イオンエッチングなどに移るであろう。また変調器の形態としては、位相遅延形、方向性結合形などの試みがあり、簡易な構成と変換効率向上を目指している。

半導体系材料を用いる変調器は、半導体レーザと同一の材質を用いることができるので、一体化してモノリシックICとすることができる。光導波路形成も半導体プロセス技術を導入すれば精密製作が可能となる。ただ、導波路そのものの光吸収があるため損失が大きく、導波路長は制限される。現状では変調器の帯域、駆動電圧、そう入損失など不十分な点も多く、それらの改善が先決である。将来は、半導体レーザ、光ファイバ、変調器を含めたモノリシックIC光源は大きな魅力であろう。