

電力系統制御用光ファイバケーブルの開発

Optical Fiber Cables for Electric Power System Control

電力系統制御の自動化を推進するには、ますます大量の情報を高信頼度かつ高速に伝送する必要がある。しかし、都心部においては高層ビルの電波しゃへいの面から、このためのマイクロ波回線を構成することが困難となり、これに代えて電力ケーブルと並設して同軸ケーブルを布設する方法も、電磁誘導防止が難しい。

一方、近年脚光を浴びてきた光ファイバケーブルは、電磁誘導妨害を受けないうえ、伝送容量が大きく、小形軽量であるなどの長所を持っているため、上記の情報伝送に対する要求を十分満足でき、にわかにその実用性が注目されてきた。既に東京電力株式会社及び関西電力株式会社では、本ケーブルの特長に着目して昭和49年以来、他の企業に先駆けてこの技術開発に着手し、昭和51年5月から東京、横浜及び大阪で架空、地中の光ファイバケーブル通信システムの現地実証試験を実施している。

このために、日立グループで開発した光ファイバケーブルは、W形の屈折率分布を持つ光ファイバを用いたスペーサ形構造のもので、現地布設工事及び接続を実施した後も伝送特性の劣化はなく、実用化への見通しが得られた。

久保田司馬男* *Kubota Shimao*
 内藤正一** *Naitô Masakazu*
 御子柴晃一*** *Mikoshihira Kôichi*
 下堀幸夫**** *Shimohori Yukio*
 岡田茂生**** *Okada Shigeo*

1 緒言

電力系統の巨大化、複雑化に伴い、この制御の自動化をいっそう推進する必要が高まっており、このためには大量の情報を高速、高品質で効率よく伝送することが必要になっている。

光ファイバケーブル通信方式は無誘導性、大容量性、小形軽量性など、従来にみられない優れた特長を持ち、この目的に極めてよくマッチした方式であるとともに、技術も著しく進歩し、実用化試験ができる段階に到達したと考えられるので、東京電力株式会社及び関西電力株式会社は、その早期実用化を目指して昭和49年から相互に協力して日立グループと開発に着手した。

現在、東京電力株式会社で3kmの管路布設、関西電力株式会社で1.5kmの架空布設を行ない、現地実証試験を行なっている。

本報告では、日立グループで開発したW形ファイバの特性と、これを用いた光ファイバケーブルの諸特性及び接続法、現地布設工事結果などについて述べる。

2 W形光ファイバ

W形光ファイバはコアとクラッドの間に中間層を設けたもので、その断面及び屈折率分布は図1に示すようになっている。この構造の光ファイバでは高次モードは漏れ波となるため、伝搬モードが減少し広帯域となる。一方、伝搬モードの電磁界分布は最外層のない単一クラッド形の場合に近く、したがって、曲げに強い構造となっている¹⁾。帯域は図2に示すように最外層とコアの屈折率差 Δn_1 で決まり、広帯域にするには Δn_1 を小さくしなければならない²⁾。3dB帯域幅で300MHz以上の帯域を得るには Δn_1 が0.05%以下となり、屈折率制御、伝送損失の点で実現困難なため、コアの屈折率分布をグレーデッド形とした。これをGraded W形、すなわちGW形と呼ぶ。GW形ファイバの屈折率分布は図1(c)に示すとおりである。

W形ファイバとGW形ファイバのベースバンド周波数特性³⁾の一例を図3に示す。

3 電力系統制御用光ファイバケーブル

3.1 目的及び要求事項

電力系統保護情報伝送用をはじめ、変電所、給電所のコンピュータ相互間や、変電所の集中監視制御用などの情報伝送用として、従来のマイクロ回線、通信ケーブル、制御ケーブルに代わり、光ファイバケーブルを使用することが考えられている⁴⁾。これは電力系統制御に光ファイバケーブルを使用した場合、次のことが期待されるためである。

- (1) 電磁誘導妨害やサージ雑音などの影響を受けないため、超高压電力線に併設したり、発電所構内に布設しても高信頼度の伝送ができる。
- (2) 伝送帯域が広いため多量の情報を高速で伝送することができる。
- (3) 情報量が多い割りにケーブルのサイズを小さくできるので従来の管路、電柱などが有効に使い、工事も容易である。
- (4) 伝送損失が少なくなりつつあるので、中継間隔を長くとれることが期待される。特に伝送距離があまり長くない大都市では無中継伝送路が構成できる。

このような利点を生かし早期実用化を図るために東京電力株式会社、関西電力株式会社で行なわれている実証試験用光ファイバケーブル通信システムの開発に関する前提条件は次に述べるとおりである。

(1) ノンメタリックケーブル

銅などの貴重な金属を一切使用しない構造とする。主として管路内布設に適用される。

(2) メタリック複合ケーブル

監視打合回線、中継器給電線としての銅線及び補強のための金属も含む。主として架空に布設される。

* 東京電力株式会社 ** 関西電力株式会社 *** 日立電線株式会社研究所 工学博士 **** 日立電線株式会社研究所

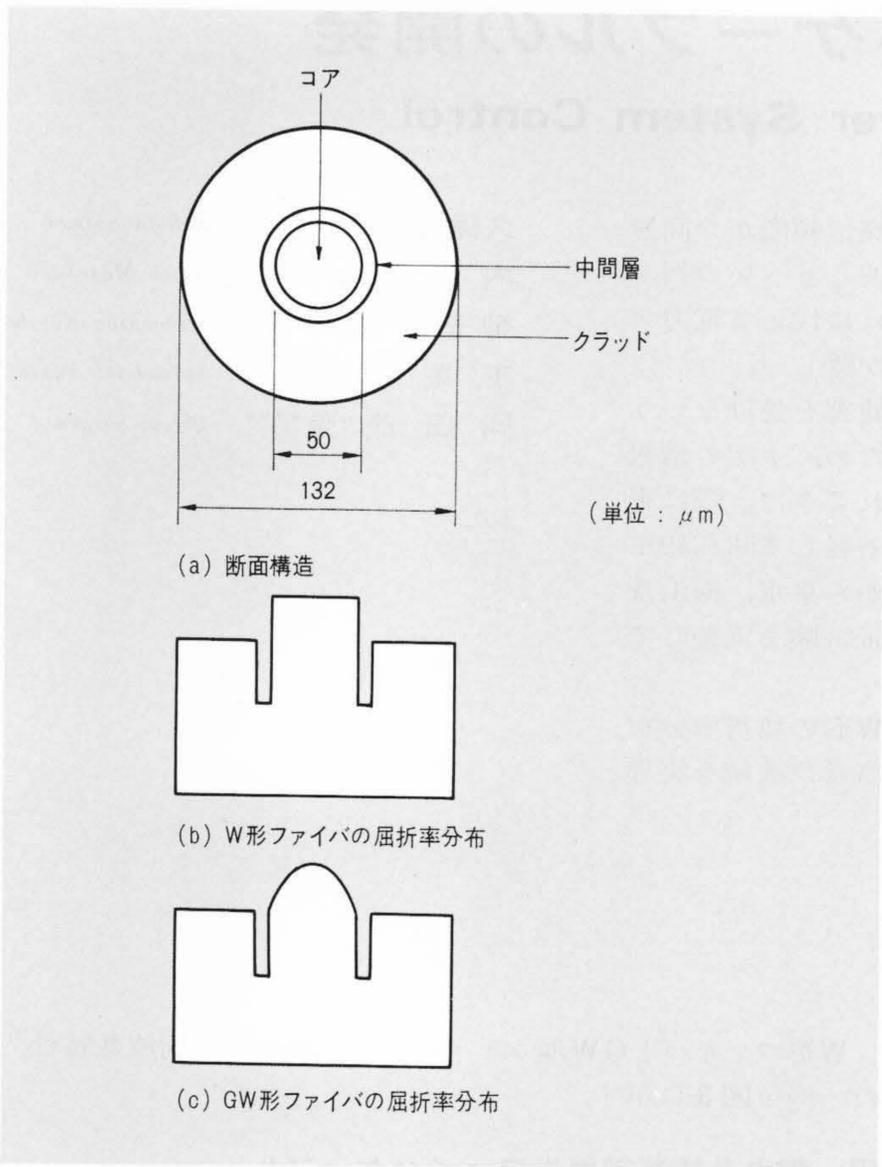


図1 W形光ファイバの断面及び屈折率分布 屈折率の低い中間層を持つことが特徴である。

(1), (2)いずれもファイバは4心である。

3.2 光ファイバケーブルの構造

光ファイバそのものは、通常の通信ケーブルに使用される銅線に比べて機械的強度が著しく弱いので、通常の通信ケーブルと同等の強度を持たせるためにケーブル構造を決めるに当たっては次の点に注意を払う必要がある。

- (1) 製造時及び布設工事の際に光ファイバに過度の張力がかからないよう適切なテンションメンバを持っていること。
- (2) ケーブルの温度伸縮はなるべく小さいこと。また温度伸縮から光ファイバを保護する構造であること。
- (3) 曲げ、圧縮、衝撃、しごき、振動などの外力に十分耐えること。
- (4) 垂直に布設してもファイバがずり落ちないように適当な拘束力を持たせること。

このような条件を満たすケーブル構造として、種々試作検討を行なった。その結果、図4に示すようなファイバを外力から保護するのに適したスペーサ形ケーブルを開発した。同図から分かるようにスペーサは中心のテンションメンバと一体構造となっており、外側には4本あるいは8本のらせん状の溝を持っている。この溝に光ファイバ及びメタリック線を入れることにより十分な機械強度を保つことができる⁵⁾。

また被覆ファイバにはクッション材として毛糸を巻き付け、これをスペーサ溝に挿入することによって緩い拘束力を持たせている。この方式により垂直布設時に光ファイバがずり落ちたり、振動が加わったときに伝送特性の変化が生じないようにしている。

ケーブルの短いサンプルを用いて種々の機械的強度の試験

を行なった。

代表的な試験項目、試験条件及び試験結果は表1に示すとおりである。スペーサ構造としたため、ファイバの保護効果が著しく、特に繰返し曲げ、衝撃、圧縮、しごき、引張りなど、布設工事の際に懸念される外力に対しては非常に強いことが分かる。

3.3 光ファイバケーブルの伝送特性

東京電力株式会社は本システム実用化の基本条件として、伝送速度6.3Mb/s、無中継伝送距離は10km以上を目標として

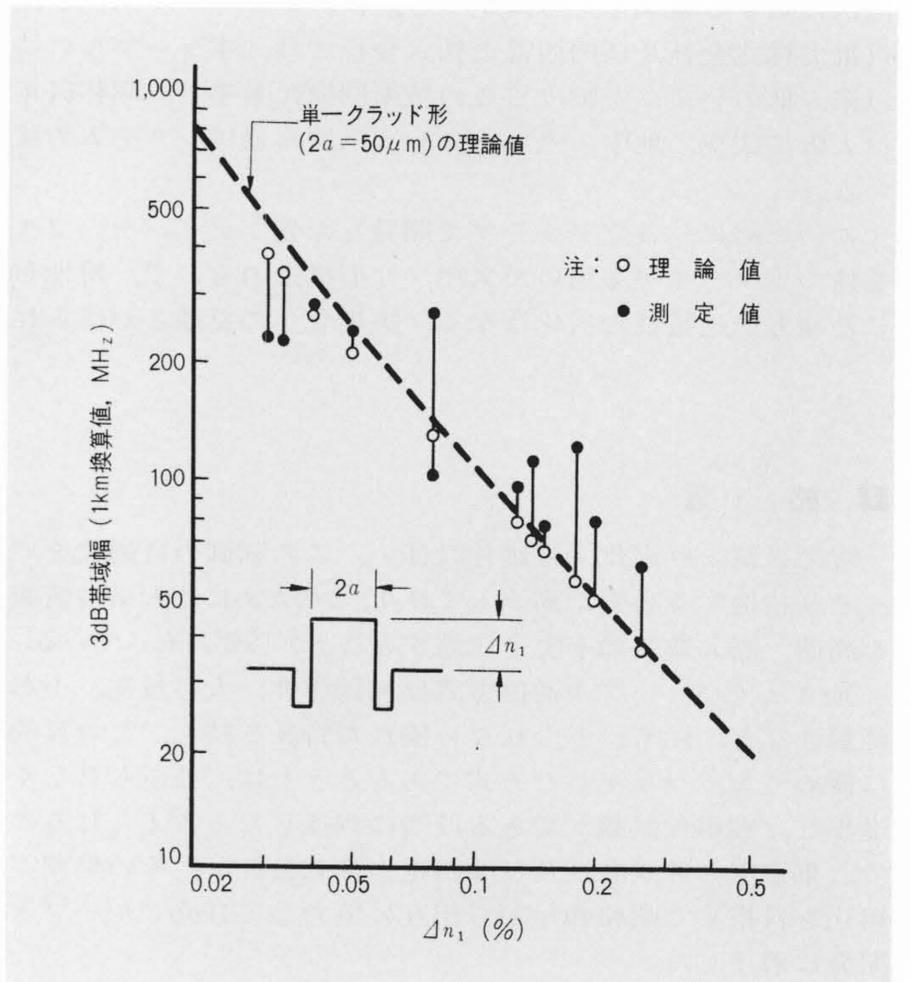


図2 W形ファイバでの屈折率差と伝送帯域の関係 伝送帯域は、コアとクラッドの屈折率差 Δn_1 で決まる。

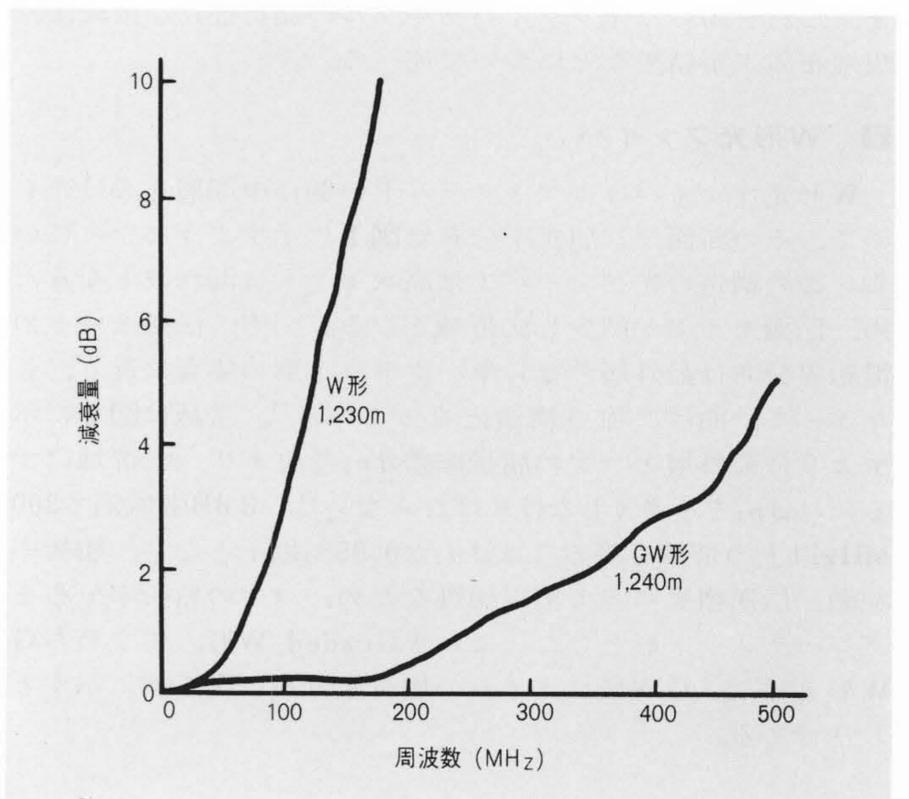


図3 ベースバンド周波数特性 レーザの変調周波数を掃引して測定したものである。

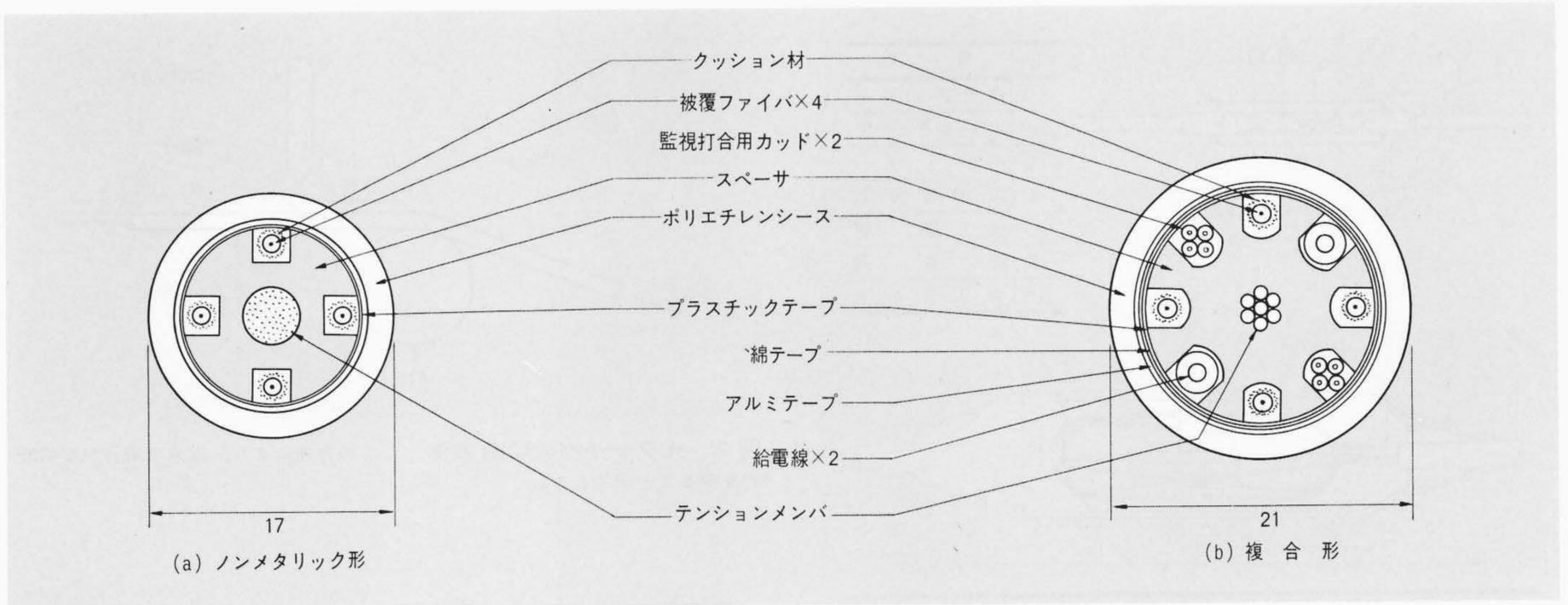


図4 光ファイバケーブルの構造 スペースサを用いて光ファイバを外力から保護している。

いる。また、関西電力株式会社は大容量テレコン（遠方監視制御装置）を組み合わせたシステムで、伝送速度は上り100Mb/s、下り6.3Mb/sで、無中継距離は同時に10km以上を目標としている。このような条件に対して今回の実証実験用システムの伝送特性及び現地に布設されたケーブルの特性は表2に示すとおりであり、これらは要求性能をすべて満たしている。

4 接続工法

光ファイバは非常に細く、かつ折れやすいというえに光軸を一致させなければならないため、その接続は従来の通信ケーブルと全く異なった方法を採用する必要がある。

接続方法には、光ファイバ端面を密着させるもの、レーザービームなどで溶着するもの及びレンズを使用するものなどが考案されている^{6),7)}。筆者らは現場での接続作業を容易にするため、スリーブを用いて光ファイバ端面同士を突き合わせる方法を検討し採用した。

光ファイバ接続部の構造は図5(a)に示すとおりであり、精度の良いガラススリーブ(以下、スプライスと呼ぶ)の中で光ファイバ端面を密着させ、スペースチューブ、保護管を用いて接着剤で固定している。

スプライスは接続損失を0.3dB以下にするために軸ずれ、軸折れなどの発生を防止する対策を検討し、その細部寸法を決定した。その構造は両端を斜めに切断(はず切り)し、更にベルマウス状にすることによって光ファイバが容易に挿入で

きるようになっている。光ファイバの突合せ部にはマッチングオイルを注入し、端面からの反射を少なくしている。なお接続部の熱伸縮の影響を補償するため、光ファイバにオフセットを付けている。

被覆除去用としては、光ファイバの強度を低下させず、確実に作業が行なえるように図6に示すような、かんたんな方式の工具を開発した。これは被覆の上半分をそり落とすことによって被覆を除去する方法である。

光ファイバの鏡面切断方法としては、図7に示すように被覆を除去したファイバに張力をかけながらダイヤモンドスクライバで切り込みを付けた後、この部分を円筒面に沿って静かに移動することによって切断する方法を検討し、ばりがな

表2 光ファイバケーブルの伝送特性 実測値はすべて要求値を満たしている。

項目	東京電力株式会社		関西電力株式会社	
	要求値	実測値	要求値	実測値
伝送損失	10dB/km以下	6.2dB/km	10dB/km以下	4.6dB/km
伝送帯域幅*	80MHz以上	100MHz	300MHz以上	400MHz
伝送遅延時間	10μs/km以下	4.9μs/km	10μs/km以下	4.9μs/km
漏話減衰量	60dB以上	60dB以上	60dB以上	60dB以上

注：* ケーブル長1kmでの値、3dB低下の帯域

表1 光ファイバケーブルの機械特性 スペースサの補強効果が著しいことが分かる。

項目	試験条件	試験結果	
		東京電力株式会社用	関西電力株式会社用
繰り返し曲げ	マンドレルに沿って10往復	100mmφまで異常なし	同 左
振動	1mのサンプルの中央部を±5mm600回/分の振動を加える。	100万回まで異常なし	同 左
衝撃	直径25.3995mm 453.592gの錘を30.4974cmの高さから落下させる(10箇所)。	異常なし	同 左
圧縮	50mm幅の金属片で圧縮	荷重800kgまで異常なし	同 左
しごき	2号金車を用い135度の角度でケーブルをしごく(15往復)。	150kgまで異常なし	同 左
引張り	サンプルを一定速度で引っ張る。	200kgまで異常なし	300kgまで異常なし
ねん回	サンプル(1m)に25kgの荷重を掛けてねじる。	360度まで異常なし	同 左

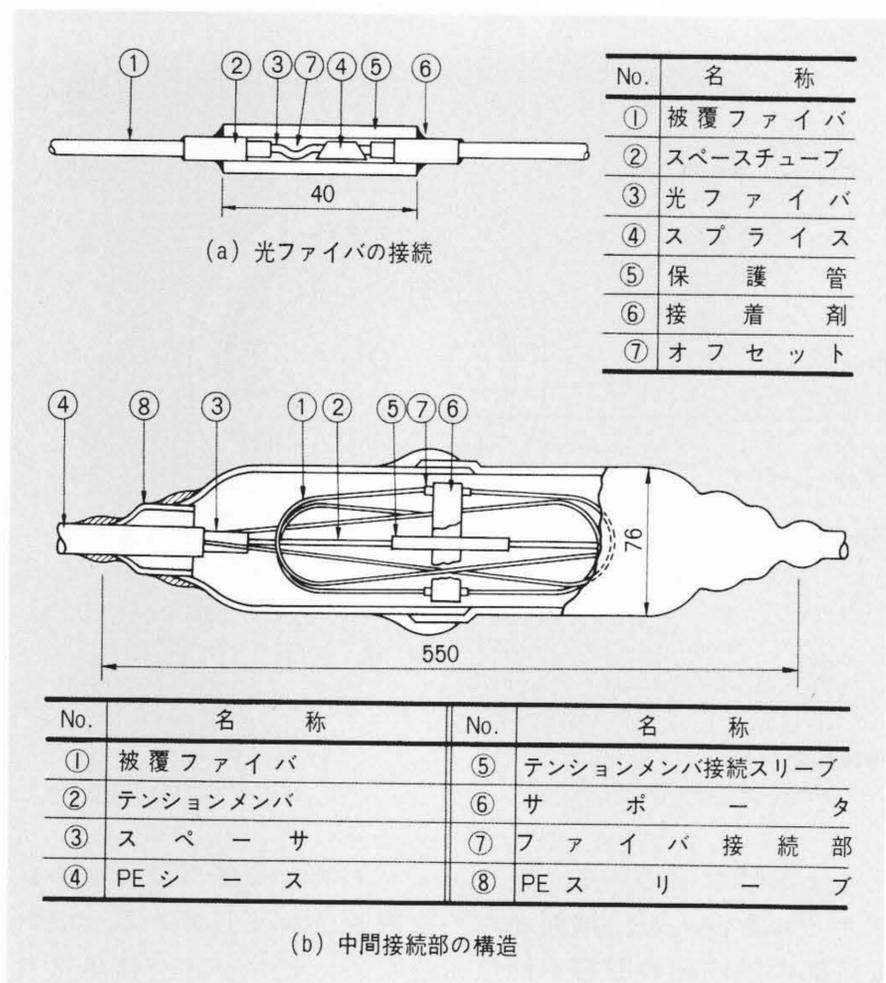


図5 光ファイバケーブル中間接続部の構造 光ファイバの接続は、ガラススリーブを用いた突合せ方式をとっている。

く安定した鏡面切断ができる条件を調べた。図8はこの方法による現場作業用の切断工具を示すものである。

開発初期の工場における接続損失測定結果は図9に示すとおりでその平均値は約0.3dBと所期の目標をほぼ達成できた。

ケーブルの接続部は図5(b)に示すように被覆ファイバをループ状にしてポリエチレンスリーブ内に収納させている。このような構造を採ることにより次のような利点がある。

- (1) 被覆ファイバの余長が十分採ってあるので、接続作業が容易で、万一の場合に再接続もできる。
- (2) ケーブルに熱伸縮、曲げ及び振動が加わっても、光ファイバ接続部にはそれらの応力が直接作用しない。

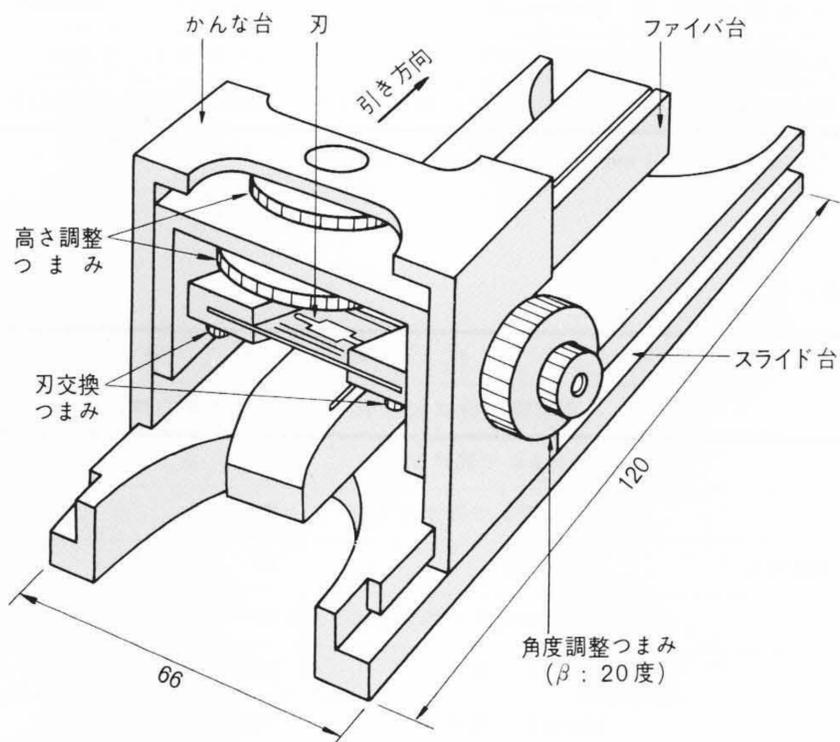


図6 被覆除去工具 被覆の上面をそり落とす工具である。

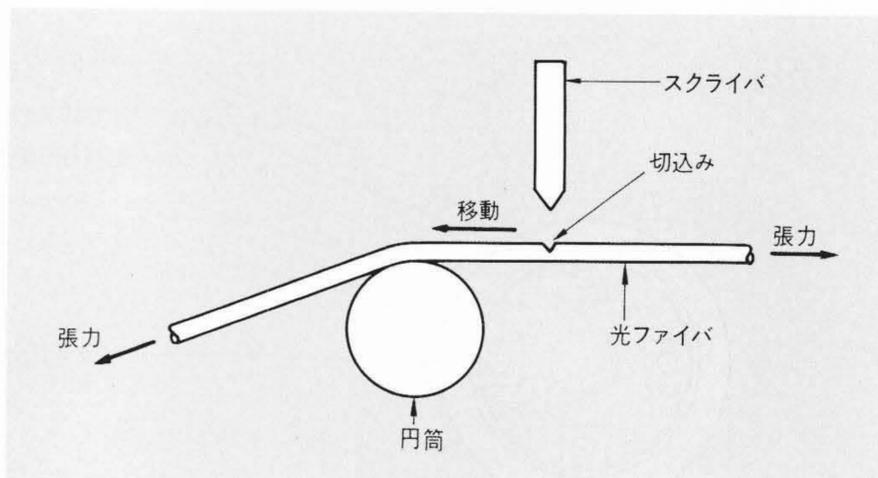


図7 光ファイバの切断方法 この方法により、直角で滑らかな切断面を得ることができる。

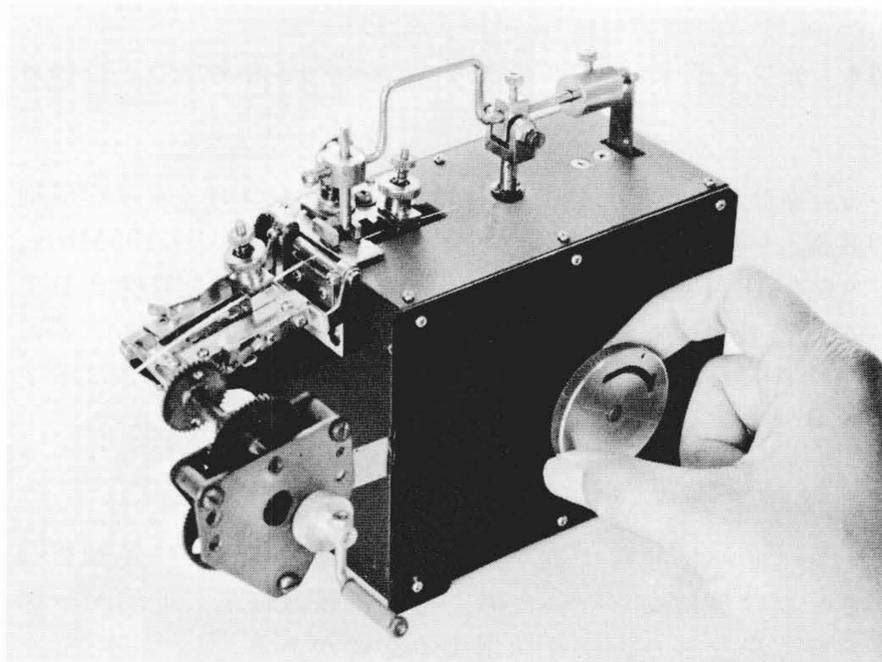


図8 切断工具 現場で作業できるように、小形かつ軽量になっている。

5 実証試験

5.1 ケーブル布設工事

東京電力株式会社では田端通信所を起点とし、一周約3kmの光ファイバケーブルを既設の管路と洞道内に布設した。布設ルートは図10に示すとおりである。ケーブルは1.5km地点で折り返され、田端通信所に送信端局と受信端局を設置している。管路は主として内径130mmの鉄製管路であるが、そこには50対の通信ケーブル2条が同時に布設されている。田端通信所側の約200mは洞道になっており、洞道内には光中継器が設置されている。

布設工法は通常の通信ケーブルと同じであるが、過度の張力が掛からないように張力を測定しながら布設した。布設時の引張り速度は約20m/min、最大張力は138kg(2条引き)、最小曲げ半径は約350mmであった。

関西電力株式会社では意岐部制御所を起点とし、東意岐部変電所で折り返し、約1.5kmのルートで実証試験が行なわれている。そのルートは図11に示すとおりである。光ファイバケーブルは一般の配電柱に添架され、往復のケーブルは1本のメッセンジャワイヤに2条掛けされている。途中3箇所の直角曲がり部分がある。

工法上の注意点は一般の通信ケーブルと同様に張力、曲げ、ねん回を最小限に抑えることである。布設時の最大張力は、

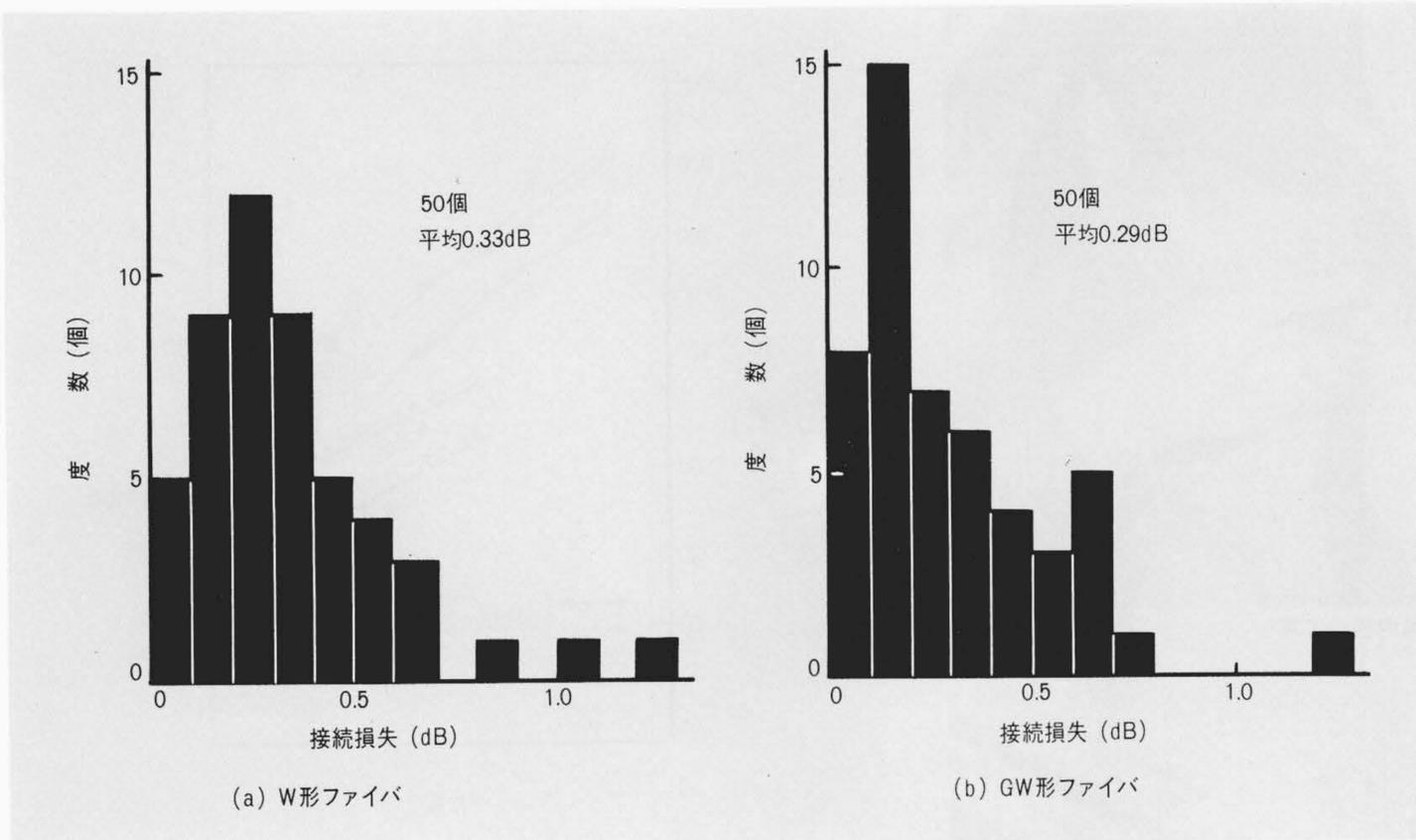


図9 接続損失のヒストグラム 50個のサンプルを測定した結果、平均値は約0.3dBであった。

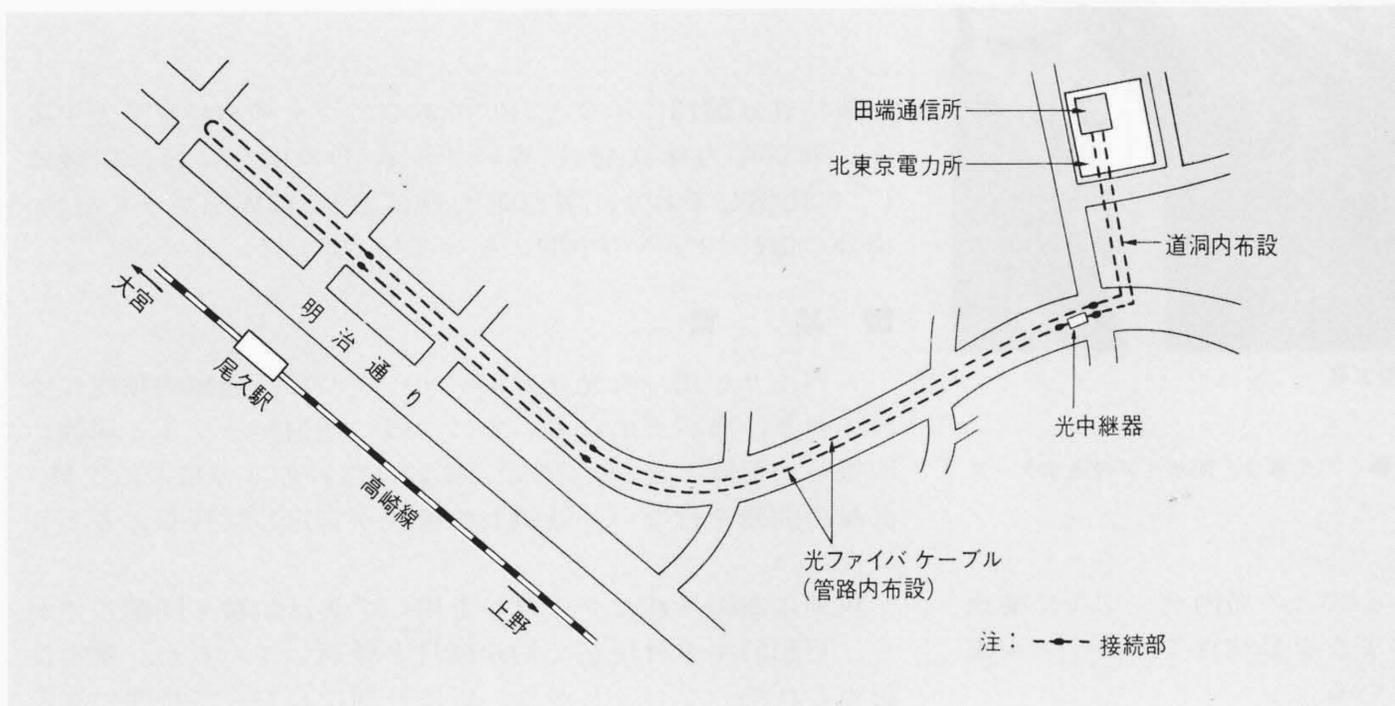


図10 東京電力株式会社での実証試験ケーブル布設ルート 既設管路と洞道を用いてルートが構成されている。ケーブル長は約3 kmである。

121kg、ねん回は40~60mで1回転であった。なおケーブルの直角曲がり部にはスラックをとり、更に接続作業用の余長をループ取りした。

管路内接続工事及び架線工事の状況を図12に示す。

5.2 ケーブル接続工事

現場での接続作業には、風、ほこり、振動などがつきまとうので、これらに対処することが重要である。人孔内では専用の組立式作業台を使用し、ほこり、水滴を防ぐためにビニルシートで覆いをかけた。

一方、架空ケーブルの接続に当たっては足場を組み、その上にテントを覆い作業した。接続作業はいずれもHe-Neレーザを用い接続損失をモニタしながら行なった。接続部は東京電力株式会社の場合9箇所、平均損失は約0.5dB、関西電力株式会社の場合は3箇所、平均損失は約0.2dBであった。

なお、東京電力株式会社の場合、ケーブルは屋内コードに変換せず直接端局に引き込み、その中でコネクタ付架内ファイバに接続した。中継器とはスタブケーブルを介して接続した。一方、関西電力株式会社の場合、光ファイバは局内で

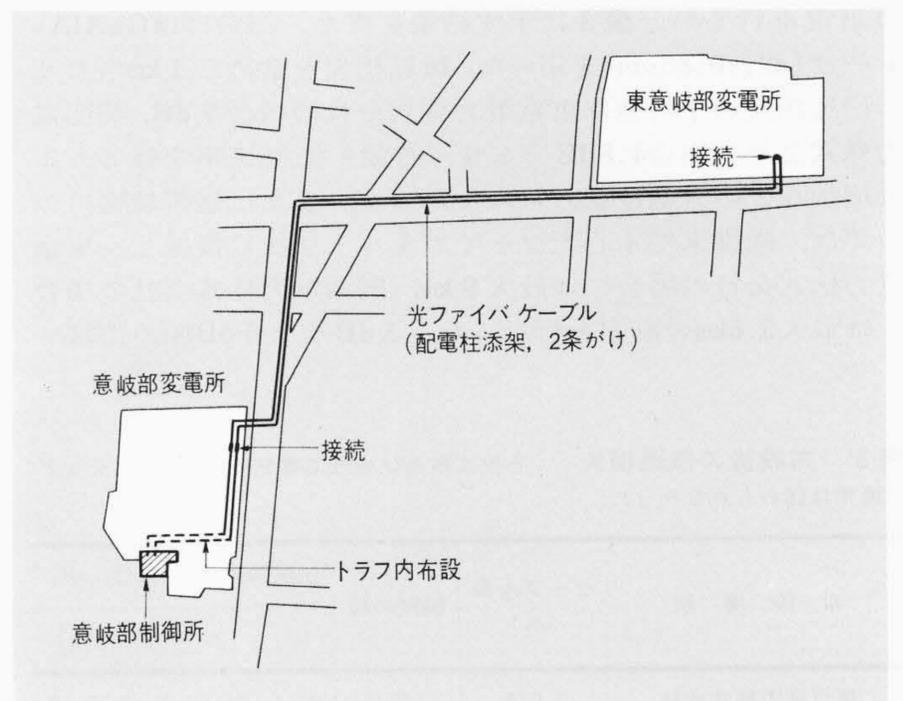
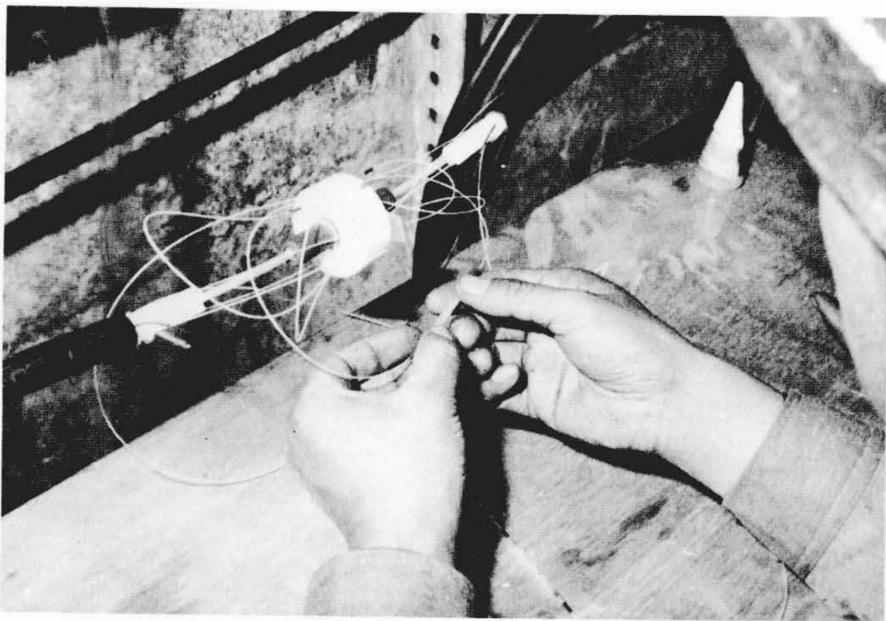
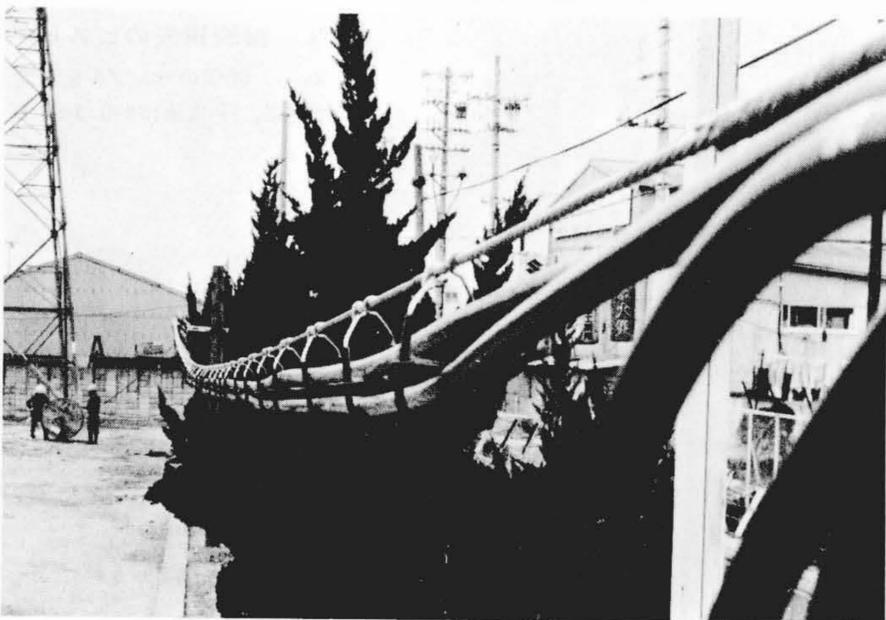


図11 関西電力株式会社での実証試験ケーブル布設ルート 大部分が架空布設となっている。ケーブル長は約1.5kmである。



(a) 管路内接続工事



(b) 架線工事

図12 光ファイバケーブル布設工事 工事は、同サイズの通信ケーブルと同等の条件で行なわれた。

メタリック回線と分離して、1心ごとの局内ケーブルに接続し端局内に導いた。なお、このような分岐点でのケーブル成端部は、ガスダム構造になっている。

5.3 現地試験結果

工事終了後、光ファイバケーブルの伝送損失と伝送帯域幅の測定を行ない、表3に示す結果を得た。測定にはGaAlAsレーザ(波長 $0.85\mu\text{m}$)を用いた。接続損失を含めて1km当たりの伝送損失の平均値は東京電力株式会社の場合7dB、関西電力株式会社の場合4.8dBであり、布設・接続工事を経ても損失増加などの異常は認められなかった。また伝送帯域幅については、両端末で4心光ファイバをループ状に接続し、東京電力株式会社の場合には最大9km、関西電力株式会社の場合には最大5.6kmの測定を行なった。3dB及び6dB幅の帯域—

表3 布設後の伝送損失 布設工事及び接続工事を経ても特性劣化などの異常は認められなかった。

布設場所	ケーブル長(m)	接続の数	伝送損失(4心, 単位: dB)			
			(1)	(2)	(3)	(4)
東京電力株式会社	3,049	7箇所	20.4	21.6	21.7	22.2
関西電力株式会社	1,472	3箇所	6.8	6.3	7.3	7.7

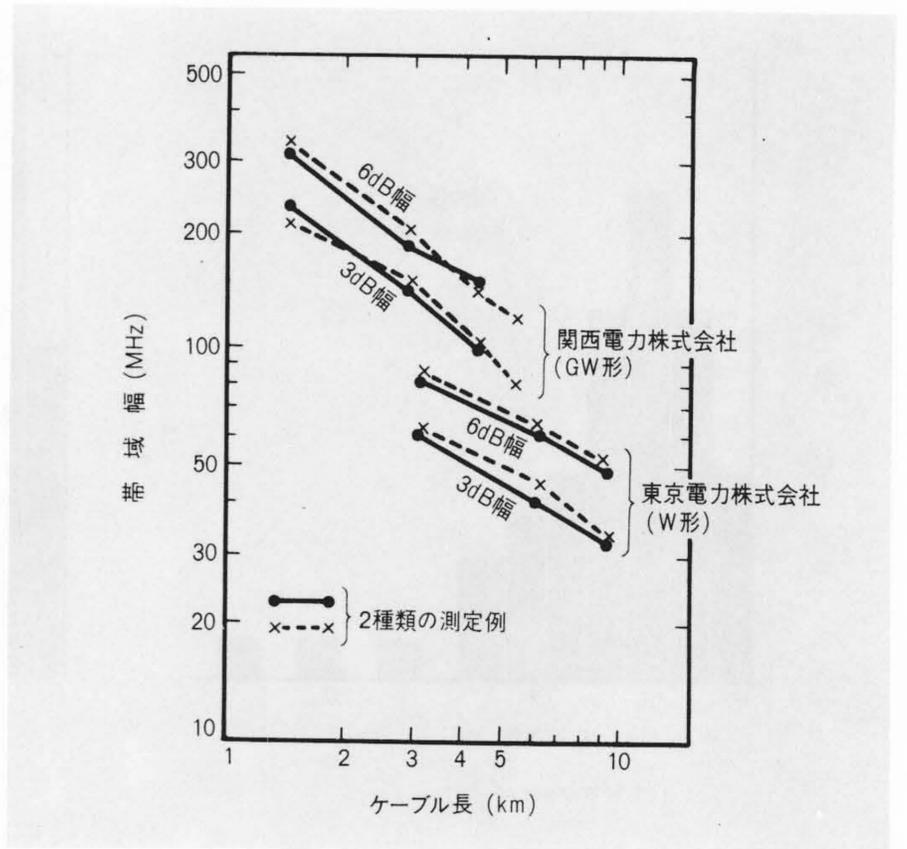


図13 布設されたケーブルの伝送帯域幅 4心ファイバを相互に接続し、長距離の測定を行なっている。

距離特性は図13に示すとおりである。ファイバ長を l とすると、東京電力株式会社(W形ファイバ)の場合には、帯域は $l^{-1/2}$ に比例しており、関西電力株式会社(GW形ファイバ)の場合には l^{-1} と $l^{-1/2}$ の間になっている。

6 結 言

スペーサを用いた光ファイバケーブルは、機械的強度に優れており、布設工事においては一般の通信ケーブルと同等の取扱いが可能となった。また、接続については専用の治工具、部品の開発を行ない、低損失の接続が安定して行なえるようになった。

現地に布設されたケーブルを用いて実証試験を開始してから、昭和51年9月現在で約6箇月を経過しているが、異常は認められていない。しかし、更に長期にわたって特性の測定を行ない、信頼性を含め実用化の基盤を明確にしていきたい。

最後に本ケーブルの開発及び工事に関して、終始御指導いただいた東京電力株式会社技術開発研究所の青木主査、同系統運用部の安藤課長及び関西電力株式会社総合技術研究所の西田副調査役、同深津主任研究員並びに関係各位に対し深謝する次第である。

参考文献

- 1) 田中, 斧田, 角: 「多モードW形光ファイバの周波数応答特性」, 電子通信学会論文誌J59, C2 (昭51-2)
- 2) 田中, 斧田, 角: 「多モードW形光ファイバの帯域特性」, 昭和51年度電子通信学会総合全国大会, No. 1874
- 3) 小林, 小山: 「周波数掃引法による光ファイバ伝送特性の測定」, 昭和51年度電子通信学会総合全国大会, S13-4
- 4) 青木, 安藤, 西田, 深津: 「電力用光ファイバケーブル通信方式のすべて」, OHM 21, 32 (昭51-9)
- 5) 久保田, 内藤, ほか: 「スペーサを用いた光ケーブルの諸特性」, 昭和51年度電子通信学会総合全国大会, No. 1688
- 6) 富山, 土屋: 「融着による光ファイバの接続」, 電子通信学会光量子エレクトロニクス研究会資料, OQE75-92
- 7) 藤田, ほか2名: 「CO₂レーザによる光ファイバの接続」, 昭和51年度電子通信学会全国大会, No. 867