

光通信用フッ化物ガラスファイバ

国際電信電話(株)研究所調査役 三 村 栄 紀

1. はじめに

現在、国際間の通信には多くの海底ケーブルシステムが使用されています。図1は太平洋及び東南アジア海域に敷設されている国際海底同軸ケーブル図ですが、世界中の海域を合わせると約100システムものケーブルが張りめぐらされています。国際間の通信では必然的に通信距離が長くなり、表1に示しますように陸間距離が4,000 km を越える場合もあります。このような長距離通信では、減衰した信号を途中で再生増幅する必要があるため多数の中継器が挿入されています。同軸ケーブルでは、伝送損失が伝送周波数の平方根に比例して増大するため、通信容量を増やす程伝送距離が短くなって

しまいます。モールス信号のように周波数帯が非常に低い場合は太平洋を無中継で通信することもできますが、現在のように MHz 帯の伝送になると数 km の間隔で中継器を挿入しなければなりません。

ファイバを使った光通信では、通常、伝送帯域よりもファイバ損失によって通信距離が制限されます。従って、損失の小さな光ファイバを使えば伝送距離をどんどん伸ばすことができます。例えば、1988年に敷設が予定されている日米間光通信ケーブル TPC-3 では、中継間隔が53 km と同じ容量の同軸ケーブルに比べて約5倍となります。中継間隔が伸びるとそれだけ中継器の個数を減らすことができ、コスト、信頼性の点で非常に有利になります。また、極め

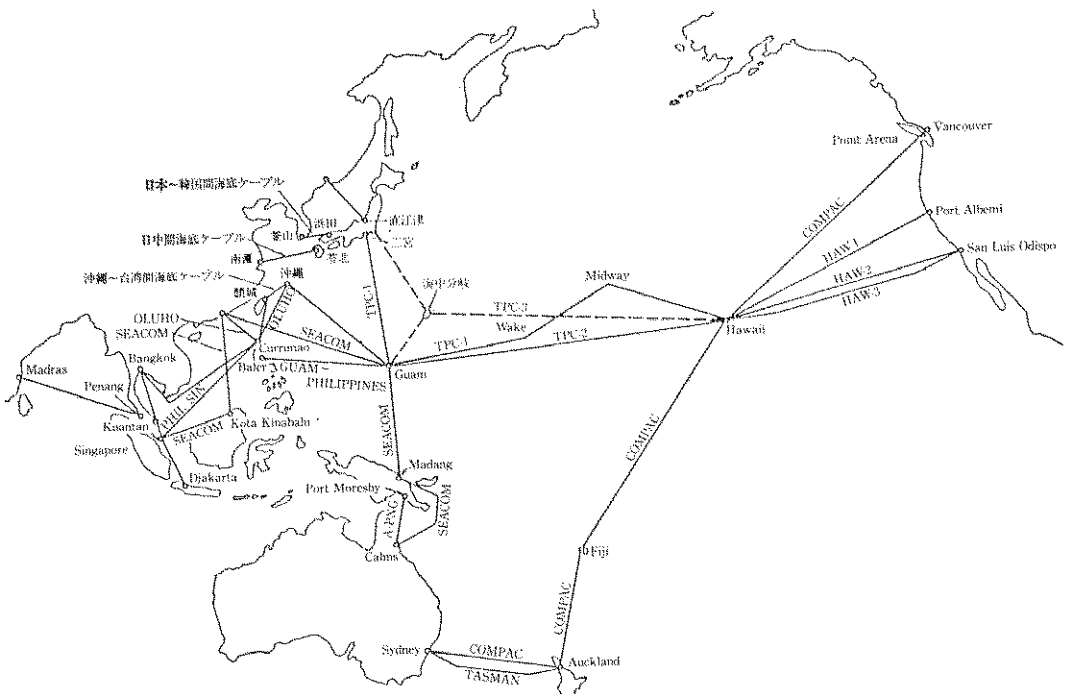


図1 世界の主な国際海底同軸ケーブル図(太平洋および東南ア海域)

表 1 海底ケーブル陸揚局間の距離分布

海 域	シ ス テ ム 長 (km)				
	0~500	500~1,000	1,000~2,000	2,000~4,000	>4,000
太平洋・アジア地域	1	6	3	4	3
大 西 洋	—	2	1	1	8
ア メ リ カ 東 海 岸	1	2	7	4	2
ヨ ー ロ ッ パ ・ ア フ リ カ	8	8	6	2	—
地 中 海	3	14	7	5	—
日 本	9	1	—	—	—
比 率 (%)	20.4	30.6	22.2	14.8	12.0

て低損失のファイバが開発され、無中継システムができると、コストだけでなく通信需要に応じて伝送容量を変えるなどフレキシビリティに富んだ理想的なシステムが実現することになります。石英系光ファイバを使ったシステムはその損失限界からみて、最長伝送距離が 200 km 程度と考えられます。将来コヒーレント方式、光増幅方式などの新しい通信システムが実現したとしても 500 km 以上の伝送は難しいと思われます。500 km を越える無中継伝送を実現するためには石英系ファイバより低損失なファイバの開発が必要で、その可能性を秘めたフッ化物ガラスファイバの研究が現在盛んに行われている訳です。

2. フッ化物ファイバと石英ファイバの違い

光ファイバの損失限界は、ガラスの微小な密度揺らぎによって起こるレーリ散乱と格子振動による赤外吸収によって決まります。図 2 はフッ化物ファイバの損失限界を示したものです。フッ化物ガラスの赤外吸収端は石英ガラスよりずっと長波長側にあり、レーリ散乱も石英ガラスの半分程度です。そのため、フッ化物ファイバの最低損失値は石英ファイバより低く 0.01 dB/km 程度になると考えられています。このように、フッ化物ガラスは超低損失ファイバを実現するための有望な素材ですが、実際にファイバを作るには多くの問題を含んでいます。表 2 はフッ化物ガラスと石英ガラスの性質の違いを示しています。最も大きな問題点は、フッ化物ガラスが結晶化し易いガラスであることです。

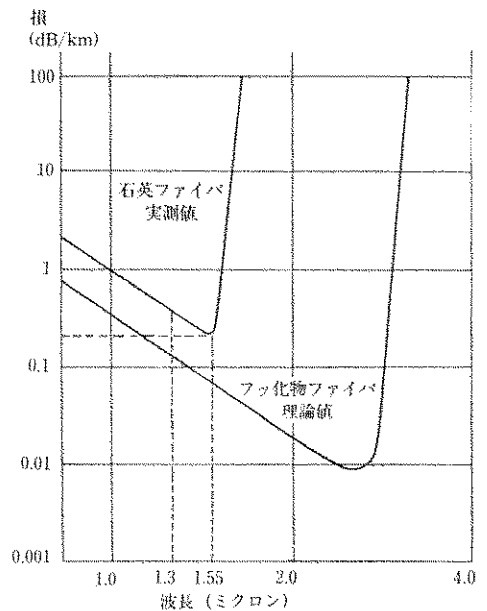


図 2 フッ化物ガラスファイバの損失特性

表 2 ガラス物性の違い

	フッ化物ガラス	石英ガラス
最低損失	10^{-2} dB/km (2.5 μ)	0.15 dB/km (1.55 μ)
透過波長	0.2~8 μ	0.2~3 μ
結晶化傾向	大	小
機械強度	5 GPa	7 GPa
耐水性	小	大
加工温度	300~400°C	~2000°C

ガラス中に結晶が析出すると散乱中心となって損失を増加させるので極力結晶化を防ぐことが必要ですが、現在のところファイバ製造工程中に生じる結晶化を完全に防ぐのは難しい状態です。また、耐水性、機械強度の点でも石英ガラ

表 3 ファイバ化技術の違い

	フッ化物ガラス	石英ガラス
原料	固体	液体
プリフォーム	キャスト法	CVD 法
製造法	ルツボ法	
脱水法	乾燥雰囲気 RAP	Cl ₂ 処理
線引	厳密な温度・雰囲気制御が必要	問題なし

スより劣っており問題となっています。

フッ化物ガラスと石英ガラスでは性質が大幅に異なるように、それらのファイバ化技術も必然的に異なります(表3)。よく知られていますように石英ファイバの作製では、高純度の液体原料を使った CVD 法によりまずプリフォームを作り、線引してファイバにします。また、Cl₂ ガスを使って完全な脱水処理を行うことができます。一方フッ化物ガラスの場合には、原料が固体でしか得られないため CVD 法を適用することは難しく、また、原料純度も良くありません。プリフォームの製造は主としてキャスト法によって行われていますが、まだ確立された技術とはいえない状態です。脱水処理に Cl₂ ガスは使えませんが、乾燥雰囲気、RAP 法(Reactive Atmosphere Processing)などを使うことにより水分の含有量はかなり低減してきています。線引に関しては、加熱による結晶化が問題になるため石英ファイバに比べ格段に厳しい条件で行わねばなりません。

3. ファイバ製造技術の現状

(1) コア・クラッド組成

フッ化物ガラスの結晶化を防ぐためにはできるだけ熱的安定性の高いガラスの開発が必要です。また、コア・クラッドに屈折率差をつけるためにドーパントの添加が必要ですが、ドーパントの添加によりガラスの安定性が損われることが多いためドーパントの選択は難しい問題です。さらに、フッ化物ガラスは粘性の温度変化が急峻なため、コア・クラッドの粘性-温度特性をできるだけ一致させておかないと線引が非常に難しくなります。表4は今までに発表された主なコア・クラッドガラス組成を示したもので

表 4 コア・クラッドガラス組成

コアガラス	クラッドガラス
Zr-Ba-Gd-Al	Zr-Ba-Gd-Al
Zr-Ba-Na-La-Al-Pb	Zr-Ba-Na-La-Al
Zr-Ba-Li-La-Al-Pb	Zr-Ba-Li-La-Al
Zr-Ba-Na-La-Al	Zr-Ba-Na-La-Al-Hf

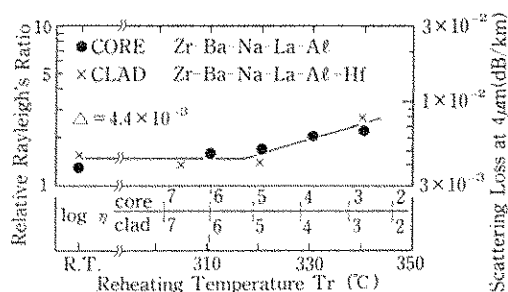


図 3 ZBLNA, HZBLNA ガラスの散乱、粘性の温度特性

すが、両ガラスの熱的安定性、粘性-温度特性の一致などの点で $\text{ZrF}_4\text{-BaF}_2\text{-NaF-LaF}_3\text{-AlF}_3$ をコア、 $\text{ZrF}_4\text{-BaF}_2\text{-NaF-LaF}_3\text{-AlF}_3\text{-HfF}_4$ をクラッドとする組合せが現状では最も優れていると思われます。この系で屈折率を制御している成分は HfF₄ と NaF です。図3はこれらのガラスを線引温度付近に再加熱した時の散乱強度と粘性を測定したものです。両ガラスの特性は殆んど同一で、320°C の線引温度 (log η=5) で加熱しても結晶化による散乱強度の増加は殆んど認められません。また、log η=3 のような低粘性領域まで加熱しても散乱増はほんのわずかです。この系では粘性-温度特性が完全に一致していますが、これは HfF₄ と NaF の添加が粘性-温度特性に対して逆に働くことを利用し、それらの含有量を調節しているためです。

(2) 不純物の除去

ファイバの低損失化をはかるには、ファイバ原料の高純度化は不可欠の問題です。フッ化物ファイバの損失原因となる不純物には大別して表5に示すような4種類のものがあります。この表にあげた遷移金属、希土類金属化合物イオンはいずれも 2~3 μm 帯の光を吸収するため損失をひきおこします。一方、ZrO₂ のような

表 5 不純物の種類

遷移金属	$\text{Cr}^{2+}, \text{Fe}^{2+}, \text{Co}^{2+}, \text{Ni}^{2+}, \text{Cu}^{+}$	吸収損失 散乱損失
希土類金属	$\text{Ce}, \text{Pr}, \text{Nd}, \text{Sm}, \text{Eu}, \text{Tb}, \text{Dy}$	
化合物イオン	$\text{OH}^-, \text{NH}_4^+, \text{CO}_3^{2-}, \text{PO}_4^{3-}$	
酸化物	$\text{ZrO}_2, \text{HfO}_2, \text{BaO}$	

表 6 金属イオンによる吸収損失 (dB/km/ppm)

元素	2.0	2.5	3.0	3.5 (波長 μm)
Fe	90	0.028	2	0.9
Co	130	0.031	4	0.75
Ni	90	6	0.5	0.05
Cu	3	0.14	0.01	—
Ce	—	—	7.7	50
Pr	27	1.8	0.4	4.5
Nd	—	0.020	0.6	—
Sm	4.4	2.6	5.6	1.2
Eu	12	1.4	3.1	14.3
Tb	25	—	14.3	1.1
Dy	0.06	0.7	8.3	1.0
Ohishi et al. Phys. Chem. Glasses 25, 135 (1983)				

酸化物は吸収よりもむしろ、結晶化をひきおこす原因となり散乱損失を増加させます。また、 NH_4^+ 、 CO_3^{2-} のようなイオンも混入量が多いと結晶化の原因となります。表 6 は遷移金属と希土類金属による吸収損失を定量的に示したものです。最も有害な金属は Fe, Co, Nd であり、 $2.5 \mu\text{m}$ 帯でこれらの金属による吸収損失を 0.01 dB/km 以下にするには含有量を 1 ppb 以下にする必要があります。金属不純物を除去するために昇華、再結晶、溶媒抽出、イオン交換などの種々の精々法が行われていますが、現状の不純物含有量は数 10 ppb 程度であと 2 桁程度の高純度化が必要です。

化合物イオンの中で最も問題となるのは $2.9 \mu\text{m}$ に中心吸収波長をもつ OH イオンです。しかし、アルゴンや窒素などの乾燥雰囲気中でガラス溶融、プリフォーム作製等を行うことにより $2.9 \mu\text{m}$ における吸収が 20 dB/km になるまで低減されています。この値は最低損失波長の $2.5 \mu\text{m}$ における OH イオンによる損失は 0.01 dB/km まで減少したことを意味しています。また、 NF_3 ガスなどのフッ素系ガスを使った RAP 法により OH イオンを顕著に低減で

きることが報告されており、脱水に関しては見通しが明るいといえます。 NF_3 ガスによる処理は OH イオンだけでなく NH_4^+ 、 CO_3^{2-} などの他の化合物イオンや酸化物の除去、あるいは Fe^{2+} を Fe^{3+} に変えることによる Fe 吸収の低減などにも大きな効果があり、高純度ガラスの製造に有効な手段として今後の活用が期待されます。

各種の不純物の中で、新しい除去方法の開発が望まれるのはやはり Fe, Co, Nd などの金属不純物ですが、そのためには極微量不純物の測定法の開発も重要な課題で今後の研究の進展が望まれます。

(3) プリフォームの製造

低損失フッ化物ファイバを開発するための大きな技術課題はプリフォーム製造法の開発と思われます。先にもお話ししましたようにフッ化物ファイバの原料は固体でしか得られないため CVD 法は使えず、新たなプリフォーム製造法の開発が必要です。現在行われている主な製法にはビルドインキャスト法、ローテーションキャスト法、CPD 法などがあります。図 4 はビルドインキャスト法の原理を表しています。この方法では、フッ化物ガラスのガラス転移温度付近に予熱しておいた鋳型中にクラディングガラス融液を流し込み、ガラスが冷えきらないうちに中心部のガラス融液を流し出しクラディングガラス管をまず作ります。次いで、ガラス管中にコアガラス融液を注入してプリフォームを形成します。図 5 は

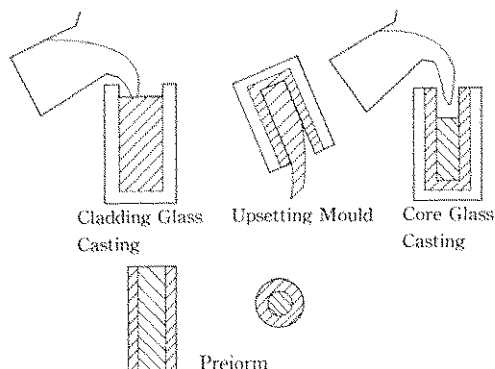


図 4 ビルドインキャスト法 (NTT)

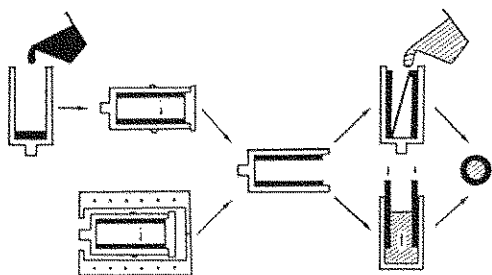


図 5 ローテーションキャスト法
(Naval Res.)

ローテーションキャスト法を示しています。この方法では、まず適当量のクラッドガラス融液を鋳型に流し込み、鋳型を高速回転させてクラッド管を作り、その後コアガラス融液を注入します。これらのキャスト法で作製したプリフォームから線引したファイバの損失として、現在 $0.7 \sim 0.9 \text{ dB/km}$ の値が報告されています。通常、キャスト法で作られるプリフォームの大きさは $8 \text{ mm}\phi \times 100 \text{ mm}$ 程度ですが、コアガラスの注入時に気泡が混入

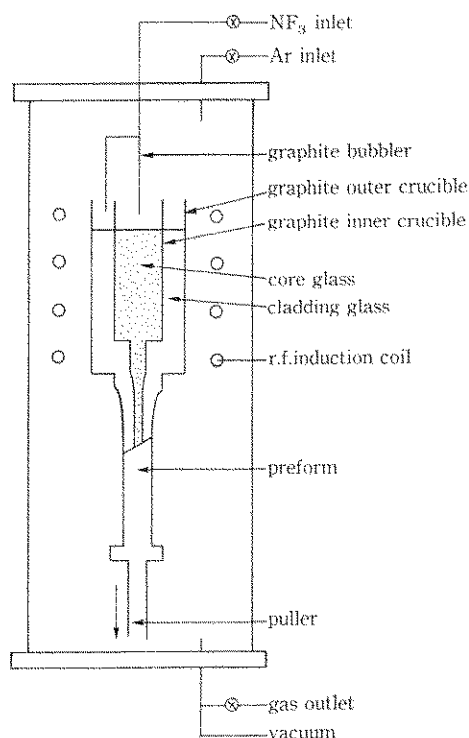


図 6 CPD 法 (KDD)

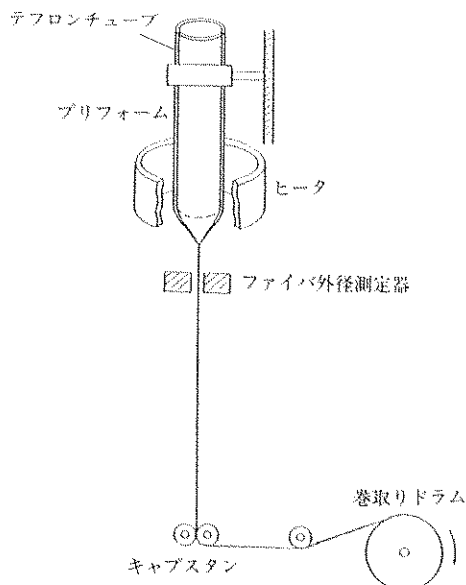


図 7 線引き装置の模式図

し易く均一で大型のものが作りにくい点、コア径の制御が難しい点などが問題と思われます。図 6 は CPD 法による作製原理を示しています。この方法は二重ルツボからプリフォームを製造するものですが、 NF_3 ガス雰囲気中でガラスの溶融からプリフォームの作製まで連続的に行う点が大きな特徴です。 NF_3 ガス雰囲気中で作製するとガラスの品質が非常に良いという利点がありますが、 F_2 ガスの腐蝕性のため金属容器が使用できないという問題があります。現在の CPD 法ではカーボン製ルツボが使われていますが、ルツボ壁に付着している気泡がプリフォーム内に取り込まれるという問題があり、その解決は今後の課題といえます。

(4) ファイバ線引

フッ化物ファイバはプリフォームからの線引、あるいは二重ルツボを使った線引によって作製されます。プリフォームの線引法は図 7 に示しますように、石英ファイバの場合と殆んど同じですが、結晶化し易いガラスのため厳密な温度制御、雰囲気制御が必要な点と線引温度が $320 \sim 350^\circ\text{C}$ の低温である点が異なります。通常の線引では、大気からの保護のためプリフォームにテフロン熱収縮チューブを被覆します。

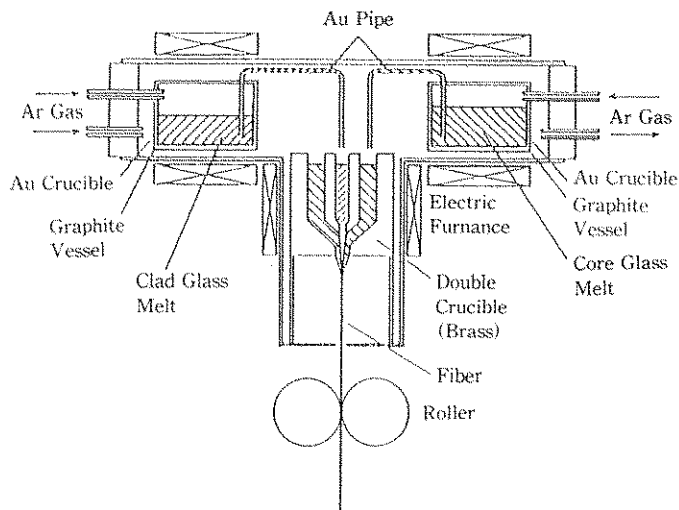


図 8 二重ルツボ法による線引

この被覆がない場合は、結晶化を起こし易く線引が非常に難しくなります。現在バルクガラスの散乱は理論値に近いところまで達していますが、ファイバの散乱損失はまだ大きくその一因は線引に問題があるためと思われます。また、10 mm ϕ 以上の径のプリフォームの線引は細径のプリフォームに比べて非常に難しく、線引速度の増大などと共に大型のプリフォームの線引も今後の技術課題と思われます。

図 8 は二重ルツボを使った線引です。この方法では、コアガラスとクラッドガラスは各々密封容器内で熔融され、金パイプを通して二重ルツボへ注がれます。注がれた融液はルツボ内で適度な粘性になるまで冷却され、ファイバへひかれます。二重ルツボ法の課題はルツボ内におけるガラスの結晶化をいかに防ぐかという点ですが、現状では雰囲気制御が不十分のため結晶化を完全に防げない状態です。二重ルツボ法は長尺ファイバの製造、低コスト化の点で有利な方法であり今後の進展が期待されます。

4. ファイバ設計と通信システム

(1) 付加損失

フッ化物ファイバの低損失化が進み、仮に 0.01 dB/km の損失のファイバができたとしても実際に光ケーブルとして使用する場合にはマイクロバンド、接続、被覆材、ケーブル化時の

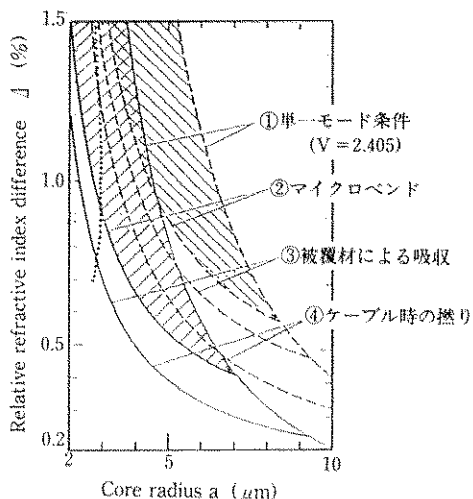


図 9 付加損失 $\leq 10^{-5}$ dB/km の条件
(ファイバ外径 150 μm^{ϕ})

撓りなどによる付加的な損失を考慮しなければなりません。これらの付加損失はコアクラッドの屈折率差、コア径、クラッド径などのファイバパラメータによって変化します。従って、付加損失をできるだけ小さくするファイバパラメータの設計が必要となります。図 9 はマイクロバンド、被覆材の吸収、ケーブル化時の撓りによる損失が 10^{-5} dB/km 以下になる条件をシングルモードファイバについて計算したものです。実線は 2.5 μm 、破線は 3.5 μm の波長に対応しています。付加損失が 10^{-5} dB/km 以下

表 7 極低損失ファイバ用のファイバ・パラメータ

Fiber diameter (μm^{ϕ})	Operating wavelength λ (μm)	Core rading a (μm)	Relative refractive index difference Δ (%)	Dispersion (ps/km/ $\text{\AA}$)
125	2.5	5.0	0.81	1.636
	3.5	6.1	1.1	3.173
150	2.5	6.9	0.43	1.784
	3.5	8.1	0.6	3.288
200	2.5	9.1	0.24	1.848
	3.5	11.6	0.3	3.386

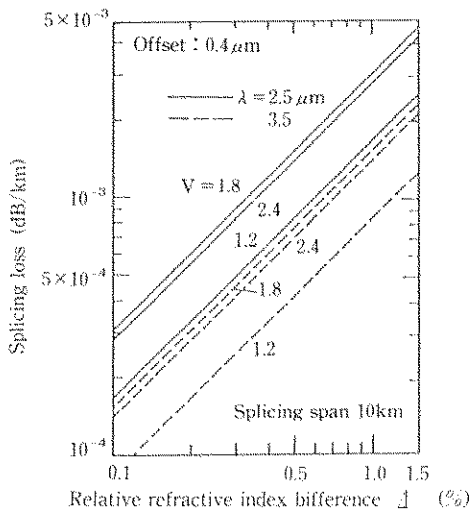


図 10 接続損失 (接続間隔 10 km)

になる領域が斜線によって示されていますが、接続損失を考えると比屈折率差の小さな領域が低損失領域と考えられます。図10は接続損失を比屈折率差の関数として表したものです。ただし、コアどうしのオフセット量を $0.4 \mu\text{m}$ 、接続間隔を 10 km と仮定してあります。この図から、比屈折率差を $0.4 \sim 0.5$ 程度にすれば接続損失を 10^{-3} dB/km 程度にできることがわかります。これらの計算から、付加損失を小さく抑えた極低損失用フッ化物ファイバの設計パラメータは表7のようになります。

(2) 分散

フッ化物ファイバを通信に使うためには損失の他に分散が問題となります。ファイバの分散

は、異なる波長の光がファイバ中を伝搬する際にそれらの速度が異なるためパルス広がりを生じる現象で、帯域の制限要因となります。フッ化物ガラスの材料分散は $1.6 \mu\text{m}$ 帯で零となり、使用波長帯の $2.5 \mu\text{m}$ では約 20 PS/km/nm となります。この材料分散を構造分散で打ち消し $2.5 \mu\text{m}$ 帯の零分散ファイバを作ろうとすると比屈折率差を 1.1% 以上にしなければなりません。このようなファイバを作るとは現実的に難しく、また、作製できたとしても接続損失などの付加損失が大きくなってしまいます。従って、フッ化物ファイバの場合には零分散ファイバを作るのは得策でなく、入射光のスペクトル幅を狭くすることによりパルス広がりを抑える必要があると思われます。

(3) システム

0.01 dB/km の損失のフッ化物ファイバを用いた通信システムの伝送距離と帯域を考えてみることにします。伝送路の損失が決まっている場合、伝送距離を決める他の要因は入射光パワーと検出器の感度です。入射光パワーを制限する要因は誘導ラマン散乱、誘導ブリリアン散乱などの非線形効果ですが、これらの効果を考慮しても数 mW の光を入射させることは可能です。ディテクタの最低受光レベルは -60 dBm 程度と考えられますが、受信端での S/N を考慮するとシステムの受信感度は -38 dBm 程度になります。これらの値から見積ると $4,200 \text{ km}$ の無中継伝送が可能と考えられます。

$4,200 \text{ km}$ もの距離を伝送すると分散による帯域制限が大きな問題となります。零分散ファイ

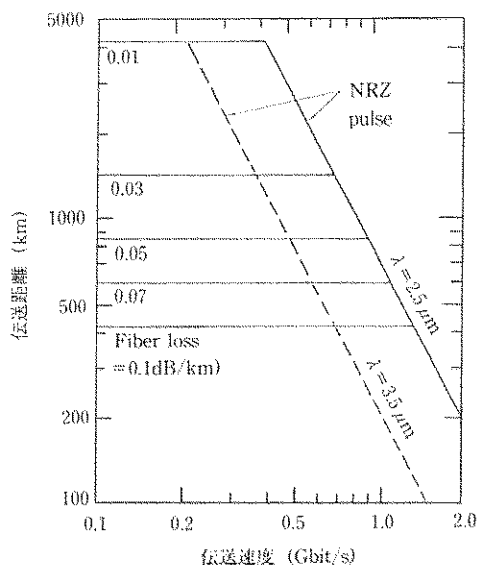


図 11 伝送距離対伝送速度

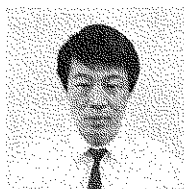
バを使わないで帯域を広げるためにはスペクトル幅の極めて狭い光源を使う必要があります。半導体レーザを直接変調した場合にはあまり狭いスペクトル幅になりませんが、外部変調器を使用すれば極めて狭いスペクトル幅を得ることが可能と考えられます。図11は外部変調器の使用を仮定して伝送距離対伝送速度の関係を計算した例です。この図に示されるように 0.01 dB/km のファイバ損失を達成できれば 4,200 km,

420 Mbit/s の無中継伝送システムが可能と考えられます。もし、4,200 km の無中継伝送システムが実現すると世界中のすべてのケーブルシステムを無中継システムにすることも不可能ではありません。

5. おわりに

フッ化物ファイバの損失はまだ石英ファイバより大きく、均一に作製できるファイバ長も数 10 m 程度です。しかし、超低損失ファイバが実現された場合には、通信に一大変革をもたらすだけでなく大きな波及効果を生むと思われます。低損失ファイバを実現するための基本的な課題は①結晶化傾向の小さなガラスの開発、②プリフォーム製造法の開発、③高純度原料の開発の3つではないかと思います。フッ化物ファイバの研究人口はまだそんなに多くありませんが、化学、電気、通信などの広範な分野からの研究への参画がファイバ実現に最も重要なのではないかと思います。

〔著者紹介〕



三村栄紀（みむらよしのり）
昭和 48 年大阪大学理学研究科
修士課程修了。同年 KDD 研究
所に勤務。以来、光磁気ディス
ク記録媒体赤外ファイバの研究
に従事。現在、材料部品研究室
主任研究員