光ファイバ技術と高分子

山川 進三

Shinzo Yamakawa, 国立富山商船高等専門学校

1. はじめに

実用的とみなし得る石英系光ファイバが登場したのは1970年、米国 Corning 社による伝送損失 $20 \text{ dB} \cdot \text{km}^{-1}$ の低損失光ファイバの開発¹⁾からである。1979年には波長 $1.55 \mu\text{m}$ において $0.2 \text{ dB} \cdot \text{km}^{-1}$ と理論限界点近くまで低損失化が達成され²⁾、この間の技術的進歩は著しいものがあつた。最近では、光波通信、光計測・センサーなどへの適用を目的として新しい材料・材料構成、新しい導波構造からなる光ファイバ、光デバイスの研究開発が盛んになっている。また、光ファイバ通信の普及とともに、経済化、使用範囲の拡大を目的に高速製造技術、新しい被覆材料・ケーブル材料の研究開発も進められている。

高分子材料と光通信のかかわりは、プラスチック光ファイバのみならず、石英系光ファイバの被覆材料、ケーブル材料、光ファイバ接続用部品材料など広範囲に及んでいる。本稿では、まず石英系ファイバ技術の現状と動向について概説したのち、被覆材料、ケーブル材料として使用される高分子材料の研究開発動向を紹介する。

2. 光ファイバの種類と材料

光ファイバは屈折率分布形状、伝搬モード数、材料、製法の違いにより図1のように分類できる。すなわち、まず伝搬モードの違いによりマルチモード(MM)ファイバとシングルモード(SM)ファイバに分けられる。前者には屈折率がコアとクラッドの境界でステップ状に変化しているステップインデックス型(SI)と、屈折率がコアの中心から外に向って2次曲線状に小さくなっているグレーデッドインデックス型(GI)がある。

現在、光通信用として使われている光ファイバは大

部分石英ガラス系で、それ以外の光ファイバは1 km 以内の短距離通信に使われているにすぎない。多成分ガラス系、プラスチッククラッド系は1 km 以内のデータリンクに、プラスチック系は主に50 m 以内の簡易リンクに使用されている。いずれもSI・MM系で、大口径、高開口数という特長がある。

また、フッ化物ガラスなど $2 \mu\text{m}$ 以上の赤外域で吸収の少ない赤外ファイバの研究が続けられている。

3. 石英系光ファイバ技術の現状と動向

3-1. 概要

公衆通信幹線用として波長 $1.3 \mu\text{m}$ 帯で、SM 光ファイバがLDと組み合わせて大容量・長距離通信システムに使われている。最近 $1.5 \mu\text{m}$ 帯で $0.2 \text{ dB} \cdot \text{km}^{-1}$ 程度のSM光ファイバ($1.3 \mu\text{m}$ 零分散)を使用した $1.5 \mu\text{m}$ 帯伝送実験が盛んに行なわれており、コヒーレント通信方式で300 km 無中継伝送実験にも成功している。次世代海底伝送システムには、この $1.5 \mu\text{m}$ 帯が使用されるものと予想される。また、SM光ファイバの加入者系への導入の検討も始まっている。

GI・MM光ファイバはLEDと組み合わせてLAN用として多く使用されている。また、LDと組み合わせて $32 \sim 100 \text{ Mb} \cdot \text{s}^{-1}$ の中小容量公衆通信にも使われている。

上記SMファイバ(ステップ型)に対して、より高

山川進三 国立富山商船高等専門学校情報工学科(933-02 富山県新湊市海老江練合)教授・工博
昭和37年金沢大工学部工業化学科卒。37年金沢大工学部勤務。41年京大大学院修士課程修了(繊維化学専攻)。41年電電公社(現NTT)入社。通信用材料、光ファイバ材料・作製技術の研究開発に従事。62年より富山商船高専勤務。

MCVD: Modified Chemical Vapor Deposition
 OVD: Outside Vapor Deposition
 PCVD: Plasma CVD
 VAD: Vapor-phase Axial Deposition

図1 光ファイバの分類

度な光伝送システムへの適用をねらいとして、新しい導波構造をもつ SM 光ファイバの研究が活発に行なわれている。一つは零分散波長を $1.3\mu\text{m}$ から $1.5\mu\text{m}$ 帯にシフトしたり、この波長域全体を低分散にする分散制御型ファイバで、種々の屈折率分布をもつファイバが検討されている³⁾。もう一つは、長距離にわたって直線偏波面を保存する偏波保持光ファイバで、

図2 長距離幹線系光ファイバケーブルの例

光波通信、センサ・計測などへの適用が検討されている³⁾。

3-2. 光ファイバケーブルと製造法

図2に現在わが国の長距離幹線網に使われている光ファイバケーブル、図3に超多心構造の加入者系光ファイバケーブル（開発中）を示す。また表1に、図2～3を含めて、石英系光ファイバを支える被覆材料・ケーブル材料をまとめて示す。

石英系光ファイバを製造するには、まず屈折率分布を正確にもつガラス太棒（母材）を作る。この母材を

図3 加入者系光ファイバケーブルの例

表 1 石英系光ファイバを支える主な高分子材料
* 開発中

機 能		材 料
軟質・一次被覆		シリコン, UV 軟化アクリレート, TPR*
硬質・二次被覆	タイト	ナイロン 12, UV 軟化アクリレート, LCP*
	ルース	ポリエステル
抗張力体		鋼線, FRP, アラミド繊維, PE 繊維*, LCP 繊維・ロッド*, POM ロッド*
ユニット	リボン	PET テープ, UV 硬化アクリレート, LCP*
	パイプ	PVC, ポリエステル, PE/Al ラミネート
	スぺーサー	PE
外 被		PE, PE/Al ラミネート, PVC
充てん剤		パラフィン, TPR 混和物, 吸水ヤーン*
緩衝物, 巻テープ		PE ひも, PP ヤーン, PET フィルム

溶融線引きして細い光ファイバとするが(線引き), このとき同時に樹脂が被覆される。図2の場合, シリコン樹脂が被覆されているが, このシリコン被覆層(軟質・一次被覆)の上にナイロンが押出被覆される(硬質・二次被覆)。この被覆光ファイバを6心, 抗張体の周りに撚合わせて1ユニットを構成し, このユニットを8本, 中心抗張体の周囲に巻きつけ, その上に外被をかけてケーブルとしている。図3の場合, 5心の被覆光ファイバをリボンとして集合し, これを4段層積みし, パイプ内あるいはスぺーサ内に収納して20心ユニットを構成したのち, ケーブルとしている。

3-3. 光ファイバの経済化と高速製造技術

光ファイバの経済化を図るための技術課題として

- 1) ファイバ母材合成速度の向上・母材の大形化
- 2) ファイバ線引き速度の高速化
- 3) 使用材料の低価格化

がある。また, 新しい被覆材料・ケーブル材料の開発とそれを使ったシンプルなケーブル構造設計もまた重要な研究課題である。

1) の母材合成速度については, 各製法(図1)とも開発当初に比較して数倍～十数倍に向上している³⁾。わが国で実用化された VAD 法については, バーナ構造の改良によって(多重火災 VAD 法), バーナ1本当たり合成速度約 $5 \text{ g} \cdot \text{分}^{-1}$, 光ファイバ長に換算して 600 km に相当する大形母材(GI コア)が達成されている⁴⁾。また, コアとクラッドを同時に合成する全合成母材の高速合成(SM, $10 \text{ g} \cdot \text{分}^{-1}$)も実現している⁵⁾。

2) のファイバ線引き速度の高速化については, 母材の大形化の達成とともに重要な研究課題となっている。線引き速度の向上を図るうえで問題となった点は, (1) 光ファイバと被覆材料間のすべり防止(せん断ひずみの低減), (2) 高速線引き時のファイバ破断防止(ファイバにかかる張力の低減化), (3) 被覆材料の硬化速度の向上, (4) 被覆前のファイバ冷却であった。(1)に関しては開放型常圧ダイスから加圧ダイスの変更によって, (2)に関しては被覆時の抵抗を少なくすることによって, (3)に関しては熱硬化型から UV 硬化型被覆樹脂への変更によって, (4)に関しては線引き装置の大型化によって, 上記問題点の解決が図られ, $1,200 \text{ m} \cdot \text{分}^{-1}$ の超高速で光ファイバが線引きできることが実証されている⁶⁾。今後, この技術が実用になるためには, 軟質/硬質2層被覆技術, 硬化速度の大きい軟質樹脂の開発が研究課題として残されている(4. 被覆材料参照)。

4. 被覆材料

現在用いられている被覆光ファイバは, 軟らかい(低弾性率の)材料を内側に一次被覆し, 硬い(高弾性率の)材料を外側に二次被覆した2層構造となっている。すなわち, 硬い外層は摩擦, 外力から光ファイバを保護し, 軟らかい内層はクッション効果によって光ファイバにかかった側圧(横方向からの外力)などを緩和する働きをしている⁷⁾。

現在実用化もしくは開発中の2層被覆材料の組み合わせとして, 1) シリコン樹脂(高屈折率のフェニルメチルポリシロキサンとジメチルポリシロキサンの2層構造)/ナイロン 12(図2), 2) 軟質 UV アクリレート/硬質 UV アクリレート(例えば図3), 3) 熱可塑性ゴム(TPR)/液晶高分子(LCP)(開発中)⁸⁾がある。1)の場合, 光ファイバ線引き過程でシリコンを被覆し, 別工程でナイロンを押出被覆する。2)の場合, ファイバ線引き過程で軟/硬2層を順次被覆する。3)の場合, 軟/硬2層を1つのダイスを用いて同時押出し被覆する。以上3つの組み合わせではいずれも二次被覆が一次被覆に密着しているが(タイト型二次被覆), 欧米では被覆ファイバの耐側圧性などを向上させるため, その上に外径 $1 \sim 2 \text{ mm} \phi$ のチューブをルース状に被覆したルースチューブ被覆構造を採用している場合がある(ルース型二次被覆)。

4-1. 軟質・一次被覆材料

一次被覆材料には, 1) 低弾性率, 特に低温まで低弾性率であること, 2) 高速被覆が可能であること, すなわち塗布性に優れ, 硬化速度が速いこと, 3) 水素を発生しないこと, 4) ファイバ表面との接着性が

良いこと、が要求される。

現在、熱硬化シリコン、UV 硬化ウレタンアクリレートなどが実用化されている。しかし、今後の低価格、より厳しい環境下での使用を考えれば、不十分な点も多く、低温特性の向上、被覆速度の高速化をねらいとして、既存材料の改良、新材料・新被覆技術の研究開発が続けられている。最近、シリコンに近い低温弾性率をもつ UV 硬化アクリレートとして、ポリエーテル系のポリウレタンアクリレート、部分水添ポリブタジエンアクリレート一次被覆材料が開発されている。

4-2. 硬質・二次被覆材料

二次被覆材料は外力から光ファイバを保護し、取り扱いやすくするために、いずれも高い弾性率 (0.5~3 GPa) を有している (表 1)。しかし、これら現用高分子材料の線膨張率 (10^{-4}C^{-1} オーダー) は石英ガラス ($5 \times 10^{-7}\text{C}^{-1}$) に比べて 3 けたも高いため、降温過程でこれら被覆層が収縮すると、ファイバに強い圧縮力を与え、ファイバの座屈によるマイクロバンド損失が生じ得る。

この問題を解決するために、現用二次被覆ファイバはタイト型 (ナイロン)、ルース型 (ポリエステル) とも、製造上種々の工夫がなされている。もし、高弾性率を保持したままで二次被覆層を低線膨張率にすることができれば、二次被覆材料としては理想的になる。このような低線膨張率二次被覆材料の一つとして、サーモトロピック液晶高分子 (LCP) の開発が進められている^{9)~11)}。LCP 被覆以前の低線膨張率二次被覆技術の検討例として、超延伸 PP¹²⁾、超延伸 POM¹³⁾、FRP¹⁴⁾ がある。FRP 被覆ファイバは電力送電系の光複合架空地線用として実用化されている。

5. 抗張力体材料

抗張力体材料には、1) 高い引張弾性率、低い線膨張率をもつことが要求されている。また、2) 抗压縮性、3) 適度の屈曲性をもつことが望まれる。

公衆通信用光ケーブルのユニット抗張力体にはメッキ鋼線、中心抗張力体には PE 被覆鋼撚線が使用されている (図 2)。電磁誘導、落雷などの影響を受けないという光ファイバの特長を活用したノンメタリック (金属を使わない) ケーブルや、軽量化をねらった光ケーブル、光コードには、非金属または高分子材料系の FRP ロッドやアラミド繊維ヤーンが使用されている。

光ケーブルの無金属化の傾向は、電力分野、ビル・工場内 LAN を中心として今後増加するものと予想されるが、そのネックとなっているのが非金属系抗張力

材の不十分な特性、高価格である⁷⁾。近年、高弾性率・高強度高分子材料の研究が盛んになりつつあり、種々のスーパ繊維の開発が報告されている。PE 繊維 (100 GPa)¹⁵⁾、サーモトロピック液晶性全芳香族ポリエステルから作られた高弾性率繊維 (130~140 GPa)¹⁶⁾ や高弾性率ロッド (50 GPa)^{17), 18)}、超延伸ポリオキシメチレンロッド (40 GPa)¹⁹⁾ などが光コード、光ケーブルの抗張力材として検討されている。

6. その他の光ケーブル構成材料

被覆材料、抗張力材以外に光ケーブル構成材料として、ユニット材料、外被材料、各種充てん剤・テープ・ひも類がある (表 1)。リボンユニット材料として LCP を適用した例²⁰⁾ がある。光ファイバ接続用材料、外被接続材料については別報²¹⁾ を参照されたい。

文 献

- 1) F.P. Kapron, D.B. Keck, R.D. Maurel: *Appl. Phys. Lett.*, **16**, 423 (1970)
- 2) T. Miya, Y. Terunuma, T. Hosaka, T. Miyashita: *Electron. Lett.*, **15**, 106 (1979)
- 3) 例えば、堀口正治: 繊維学会誌, **42**(4) p.101 (1986)
- 4) H. Suda, et. al.: Proc. 10th ECOC, p. 296 (1984. 11); *Electron. Lett.*, **21**, 29 (1985)
- 5) H. Suda, M. Horiguchi: Proc. 12th ECOC, p.59 (1986. 9)
- 6) S. Sakaguchi, T. Kimura: *J. Lightwave Technol.*, **LT-3**, 669 (1985)
- 7) 高田久夫, 山川進三: 化学と工業, **39**(3), 227 (1986)
- 8) M. Wagatsuma, et. al.: *Electron. Lett.*, **20**, 198 (1984)
- 9) 山川進三: 海外高分子研究, **32**(11), 18 (1986); *Polyfile*, **23**(5), 16 (1986)
- 10) 山本二三男, ほか: 高分子学会予稿集, **35**(9), 2914 (1986)
- 11) S. Yamakawa, et. al.: Proc. 9th ECOC, p. 227 (1983); *Electron. Lett.*, **20**, 199 (1984)
- 12) L.A. Jackson, M.H. Reeve, A.G. Dunn: *Opt. Quantum Electron.*, **9**, 493 (1977)
- 13) F. Yamamoto, et. al.: *Electron. Lett.*, **19**, 674 (1983)
- 14) K. Fuse, et. al.: Proc. 30th IWCS, p.147 (1981)
- 15) 高橋文雄, ほか: 昭 61 電子通信学会総合全国大会, No. 2118 (1986. 3)
- 16) 青木徹治, ほか: *ibid.*, No. 2121 (1986. 3)
- 17) 山村哲哉, ほか: *ibid.*, No. 2105 (1986. 3)
- 18) 岡田達也: プラスチックス, **37**(3), 86 (1986)
- 19) 富田 茂, ほか: 昭 59 電子通信学会通信部門全国大会, No. 471 (1984. 9)
- 20) 山村哲哉, ほか: 昭 61 電子通信学会光・電波部門全国大会, No. 255 (1986. 9)
- 21) 山川進三, 村田則夫: 工業材料, **33**(2), 31 (1985)