「エキゾチック繊維」特集

極細 PMMA 繊維

鈴木 文 男

1. はじめに

「百聞は一見に如かず」との諺にもあるように、未知の物を的確に把握するためには、目で視ることが必要のようである。

医療の分野でも例外ではないようであり、体内にあって直接視ることができない患部を観察するために内視鏡が開発されている。特に最近では体の各部位を観察できるよう、直径が1mm以下の細径内視鏡が開発されている¹⁾。

細径内視鏡では画像を伝送するために、多数本の極細光ファイバーを束ねた画像伝送体(イメージガイド、ないしイメージファイバー)が使用されている。現在は多成分ガラス系と石英系のものが主流となっている。ただ、多成分ガラス系のイメージガイドは折れ易く細径化が困難であり、また石英系イメージファイバーは柔軟性が不十分である等の問題点が指摘されている。細径内視鏡用として、これらの問題点を解決した画像伝送体の開発が待たれている。

さて、本稿のテーマであるPMMA(ポリメタクリル酸メチル)繊維も、PMMAの優れた透明性の故、プラスチック光ファイバー(POF)として開発が進められてきた²⁾。ただ、PMMAは非晶質であり延伸による強度の発現が小さい。このため直径が細くなると強度が著しく低下し、紡糸が困難になりまた製品も取扱い難くなる。実際POFでは直径100 μm 以下のものは実用化されていない。まして直径が10 μm 以下の極細POFを得ることは非常に困難と考えられていた。したがって、極細の光ファイバーを多数本束ねた構造の画像伝送体もPOFでは実用化が困難と考えられていた。

三菱レイヨン(株)では製造法を工夫することによりこ

Ultra-Fine PMMA Fiber

筆者紹介 FUMIO SUZUKI

Central Research Laboratory, Mitsubishi Rayon Co., Ltd.

三菱レイヨン株式会社中央研究所 主任研究員

筆者は、高分子材料製造のプロセスエンジニアリング及び光ファイバーを専門とされている。趣味はサイクリング、家庭菜園。本稿では極細PMMA繊維の応用例であるプラスチック製イメージファイバーの概要について紹介していただいた。

れらの問題を解決し、直径10~20 μm のPOFを約1500本束ねた構造のプラスチック製画像伝送体(Plastic Image Fiber, 以下“PIF”と略称する)を開発し上市した³⁾。その後、一層の細径化と解像度向上を図るために研究を進め、直径10 μm 以下の極細POFを約3000本束ねた構造のPIFを今回開発した。以下にその概要を紹介する。

2. POFの概要

現在上市されているPOFは全て、コアの周囲にコアより低屈折率のクラッドを被覆したステップインデックスタイプであり、POFに入射した光はコアとクラッドの界面で全反射を繰り返しながら伝送される。図1に示すように、コアとクラッドの界面で全反射が起こる臨界角を ϕ_c 、その時の光の入射角を θ_c とすると、

$$\sin \phi_c = n_2/n_1 \quad (1)$$

$$\sin \theta_c = \sqrt{n_1^2 - n_2^2} = \text{NA} \quad (2)$$

となる。ここで、 n_1 はコアの屈折率、 n_2 はクラッドの屈折率である。また、(2)式のNAは開口数と呼ばれ、コアとクラッドの屈折率、即ち光ファイバーの素材によ

て決まる。

また、光ファイバー内での透過光の減衰は、(3)式で定義される伝送損失 α によって表される。

$$\alpha = -\frac{10}{L} \log \left(\frac{I}{I_0} \right) \quad (3)$$

ここで、 I 、 I_0 は距離 L を隔てた位置における光ファイバー内の出力側及び入力側の透過光量である。

また、POFの明るさは(4)式で定義される性能指数 F で表される⁴⁾。

$$F = (NA)^2 \cdot 10^{(-\alpha l/10)} \quad (4)$$

ここで、 NA は開口数、 α は伝送損失、 l はファイバー長さである。

3. プラスチックイメージファイバー

3.1 構造⁵⁾

今回開発したPIFの断面写真を図2に示す。PIFは直

図2 PIFの断面拡大写真

径約0.5mmの円形断面をしており、その中に直径約9 μ mのPOF(これを「画素」と呼ぶ)が約3000本最密充填構造で配列した構造となっている。各POFはステップインデックスタイプであり、コア直径、即ちPMMA繊維の直径は約7 μ m、クラッドの厚さは約1 μ mである。また、各POFはファイバーの全長にわたって互いに融着している。

3.2 画像伝送性能

PIFの画像伝送性能としては、解像力と画像の明るさが重要となる。

3.2.1 解像力

PIFは線型な光学素子でないため解像力を一義的に求めることは難しい⁶⁾。実用的な方法として、画像伝送体端面での分解能で表示する方法がよく用いられる。

我々はガラス板上に形成されたテストチャート(ネガタイプ)を背面から拡散板を介し照明し、長さが1.5mの

図3 分解能測定用の写真

USAFテストターゲットのグループ5のラインペアを、長さ1.5mのPIFを介して観察した写真。ラインペア数(lp/mm)は写真左から順に、36, 40, 45, 51, 57。

PIFの一端をテストチャート表面に密着させ、他端から観察する方法で分解能を測定した。図3はUSAFテストターゲットのグループ5のラインペア(lp)を観察した写真である⁵⁾。本PIFはその端面上で40~50lp/mm(1mm中に白黒一対のラインペアが40~50組)の分解能があることがわかる。

上記のような測定をした場合、PIFの分解能の理論値は(5)式の範囲にあることが知られている⁷⁾。

$$\frac{1}{2d} \geq P \geq \frac{1}{3d} \quad (5)$$

ここで、 d (mm)は画素の直径、 P (lp/mm)はラインペア数で表した分解能である。(5)式が範囲となっているのは、ラインペアと画素の位置関係により分解能が変化するためである。今回開発したPIFは画素の直径が約9 μ mなので、分解能 P は55~37となる。上記測定値はこの理論値の上限に近く、本PIFは画素の直径と数が等しい他の素材の画像伝送体と同等ないし同等以上の分解能を有していると考えられる。

3.2.2 画像の明るさ

PIFで伝送された画像の明るさ E は、

$$E \propto F \cdot S \quad (6)$$

で表される⁸⁾。 F はPIFを構成するPOFの性能指数、 S はファイバー断面中のコアの面積占有率である。コアの面積占有率が同じ場合には、PIFの明るさは性能指数に比例することになる。性能指数は(4)式からわかるように伝送損失と開口数に依存している。

図4にPIFの代表的な伝送損失を示す。PIFの伝送損失は0.6~3dB/m程度であり、多成分ガラス系イメージガイドや石英系イメージファイバーに比較すると大きい。しかし、PIFは開口数が他の素材の画像伝送体より大きいという特徴がある。図5は今回開発したPIFの性能指数と、開口数が0.3の石英系イメージファイバーのそれを比較したものである。図5からわかるように、長さが数m以内と短尺の場合には、PIFは石英系のも

図4 PIFの伝送損失の代表例

測定長5mと1mで、カットバック法により測定。

図5 画像伝送体の長さと言能指数

表1 PIFの特性値

ファイバー外径 (mm)	0.5
引張破断強度 (Kg)	1.9
引張破断伸度 (%)	134
引張弾性率 (Kg/mm ²)	320
曲げ弾性率 (Kg/mm ²)	350
伝送損失値 (dB/m) (650nm)	0.6
開口数 (NA)	0.5

のより性能指数が大きく、伝送される画像は明るいことがわかる。

医療用の内視鏡の長さが通常2~3m以内であることを考慮すると、PIFは医療用内視鏡の画像伝送体として他の素材のものと遜色無い明るさを有しているといえる。

また、クラッドとしてさらに低屈折率のポリマを用いて開口数をさらに大きくし、より明るいPIFを開発できる可能性がある。

3.3 機械的特性

PIFの引張及び曲げ特性を表1に示す。1本1本のPOFの直径は約9μmと細いが、各POFが互いに融着して一体構造となっているので、PIFは取扱い上十分な強度を有している。またPIFは、多成分ガラスや石英に比較して弾性率が1/10以下のPMMAを主な素材としており、直径も0.5mmと細いので、非常に柔軟性に富んでいる。

3.4 耐屈曲性

PIFの一端から一定強度の光を入射して他端から出射される光の強度を測定しながら、PIFを直径10mmの棒に巻き付ける方法で耐屈曲性の試験を行った。その結果、巻き付け回数が100回に達しても出射光強度は巻き付け前の90%以上を保持していることが確かめられた。また、PIFは半径1mm程度に曲げても破断しない。

このように、PIFは優れた耐屈曲性を有している。

3.5 耐滅菌性

体内に挿入するものは滅菌する必要があるが、内視鏡の場合はEOG滅菌法で滅菌することが多い。EOG滅菌法では、温度が50~65℃の滅菌ガス(酸化エチレンと二酸化炭素の混合ガス)中に対象物を数時間放置して滅菌する。内視鏡に組み込まれたPIFは滅菌用ガスに直接は触れないが、PIFもこの滅菌法に対して耐性を持っていることが望ましい。

そこで65℃で8時間、PIFを単体でEOG滅菌して、光学特性及び機械的特性の変化を測定した。その結果、両特性ともほとんど変化しないことが確かめられた。

4. まとめ

今回開発したPIFは優れた画像伝送性能と機械的特性を有しており、多成分ガラス系イメージガイドや石英系イメージファイバーに無い特徴を備えた画像伝送体である。

今後さらに研究開発を進め、より細く、より高解像度でしかも明るいPIFを開発したいと考えている。

また、PIFの優れた特徴を生かし、新しいタイプの内視鏡が開発されることを期待したい。

参考文献

- 1) 例えば日経産業新聞, 1991年2月6日, p. 8
- 2) 例えば井手文雄, 寺田 拓, 「光ファイバ光学材料」, 共立出版 (1987)
- 3) 日本経済新聞, 1988年7月19日付け, p. 8
- 4) 松田美一, 計装, 24, No. 8, 3 (1981)
- 5) 鈴木文男, 岡本正司, 隅 敏則, 作永憲一, 中嶋 敦, 第38回応用物理連合講演会予稿集「投稿中」
- 6) 中原恒雄, 「光通信ハンドブック」(柳井久義編), 朝倉書店, p. 590 (1982)
- 7) 千吉良定雄, 真田和夫, 福田 長, オプトロニクス, 4, No. 2, 47 (1985)
- 8) 松田裕男, 電気通信学会誌, 68, 666 (1985)
(平成3年3月14日受理)

第11回熱測定ワークショップ

熱分析で“探る”シリーズ2 高分子-水系の相互作用

主 催: 日本熱測定学会, 熱測定応用研究グループ
協 賛: (社)繊維学会ほか
日 時: 1991年7月30日(火) 9:30~19:00
場 所: 大妻女子大学(東京都千代田区3番町12)
参加費: 会費, 非会費とも無料(懇親会費3,000円)
連絡先: 日本熱測定学会事務局
〒113 東京都文京区湯島 2-16-13
斉藤ビル 2F

第27回熱測定討論会

主 催: 日本熱測定学会
共 催: 繊維学会ほか
期 日: 1991年11月6日(水)~8日(金)
会 場: 平安会館(京都市上京区)
討論主題: ①熱測定および温度測定 ②熱分析ミニシンポジウム「計算機シミュレーションと熱測定」「溶液および界面の熱化学」
講演申込締切: 1991年6月29日(土)
予稿原稿締切: 1991年9月25日(水)
要旨集事前送付, 登録, 懇親会予約申込締切:
1991年10月15日(火)
申込・連絡先:
日本熱測定学会事務局 電話 03-3815-8514
〒113 東京都文京区湯島 2-16-13 斉藤ビル2F