

大口径グレーデッドインデックス (GI) 型プラスチック光ファイバ (LUMISTAR) および高速光伝送システムの開発

中村 善貞*, 水嶋 康之*, 佐藤 真隆*, 加藤 三紀彦**, 大橋 雄一**

The Development of Graded-Index Plastic Optical Fiber (LUMISTAR) and High Speed Optical Transmission System

Yoshisada NAKAMURA*, Yasuyuki MIZUSHIMA*, Masataka SATOU*,
Mikihiko KATOH**, and Yuichi OHASHI**

Abstract

Fuji Photo Film Co., Ltd. has succeeded in developing the world's first Graded-Index Plastic Optical Fiber (GI-POF:LUMISTAR) featuring more than 1 gbps/s high-speed transmission, a large diameter, high resistance to heat and humidity, easy workability and low cost. Fuji Photo Film is now developing a high-speed optical transmission system by making full use of the advantages of LUMISTAR. The first product is the Optical DVI (Digital Visual Interface) Link System. The system is suitable for home theater systems and stores/public facilities. In addition to the standard DVI image signal, the system can transmit audio and control signals at speeds of 3Gbps, an accomplishment that has never been realized so far. Moreover, LUMISTAR has enabled 30 m-class digital link-ups for the first time by virtue of its minimal signal degradation with distance. With conventional electronic DVI cables, links above 10 m was difficult.

1. はじめに

ここ数年の間に、「情報社会」という言葉は世界中に常識的概念として浸透した。携帯電話やインターネットの普及に代表されるように、情報通信の取り出し口は個人レベルに到達し、誰もが必要な情報を必要な時に享受できる時代が到来している。それに伴い、情報の形も音声から映像、さらには双方向のコミュニケーションへと変遷することで情報量の膨大化、情報伝達の高速化は加速度的に増大することが予測される。す

で、ADSLをはじめとしたインターネットのブロードバンド化の普及は成熟期に到達しつつあり、光ファイバも一般家庭の軒先まで敷設され始めている。

富士写真フイルム株式会社では、近未来のFTTH (Fiber To The Home) の情報伝送速度増大を見据え、ギガ (1ギガは10億) ビット/秒以上の高速通信が可能であり、低コストで耐熱性に優れ、家庭内の引き回しに対して十分な可とう性と機械強度を有し、さらに接続を容易にする大口径をも兼ね備えたグレーデッドインデックス (GI) 型プラスチック光ファイバ (POF) 「LUMISTAR」を開発し、プラスチック光ファイバで初めて30 mクラスの高速デジタル映像光リンクを実現する、「光DVI (Digital Visual Interface) リンクシステム」を本年12月より販売開始した。

本誌投稿論文 (受理2004年12月27日)

* 富士写真フイルム (株) R&D 統括本部
新規事業開発本部富士宮分室
〒418-8666 静岡県富士宮市中大里200

* Fujinomiya Office, Business Development Division
Research & Development Management Headquarters
Fuji Photo Film Co., Ltd.

Oonakazato, Fujinomiya, Shizuoka 418-8666, Japan
** 富士写真フイルム (株) R&D 統括本部
新規事業開発本部
〒106-8620 東京都港区西麻布2-26-30

** Business Development Division
Research & Development Management Headquarters
Fuji Photo Film Co., Ltd.
Nishiazabu, Minato-ku, Tokyo 106-8620, Japan

2. LUMISTAR の特長

LUMISTAR は、斯界の世界的権威である慶應義塾大学小池康博教授の新技术を基に、平成13年度より共同開発をスタートし、当社が長年培ってきた光学設計技術と有機素材設計技術を駆使することで実現した。LUMISTAR の特徴の一つは高速伝送特性であるが、当社ではPOFとしての大きな特徴である取扱い性、安全性、耐環境性、コストも重視し、「高速・タフネス・安全」を実現すべく開発を推進している。



Fig 1. Comparison of the cross section.

2.1 LUMISTARの特長

LUMISTARは非常に大きなコア径を有している。Fig. 1に、すでに大陸間を結ぶ幹線系や長距離の光通信で使用されているガラス系の光ファイバとLUMISTARの断面図を示す。LUMISTARはプラスチック特性を活かし、光の伝播領域（以下、コアと称す）が300～750 μmと大きいため、分岐・接続を多数要するようなネットワークを構築する際に、接続に高精度かつ高価な結合工程および結合器具（コネクタ）を必要としないため、易施工性と低敷設コスト性を両立して高速ネットワークシステムを構築できる。次に、最大の特徴の一つであるLUMISTARの高速伝送特性を紹介する。LUMISTARは、Fig. 2に示されるように光信号を伝達する領域（以下、コアと称す）において、コア周辺から中心部にかけて曲線的に屈折率が上昇する構造（これを屈折率分布型（GI型）と称する）を持っている。これに対し、コア部の屈折率は一定であり、階段状の屈折率構造を有する階段型（SI型）プラスチック光ファイバ（POF）がすでに市販されている。

大口径のプラスチック光ファイバにおいて、一つの光信号は膨大な光成分（以下、モードと称す）を含み、プラスチック光ファイバ内を伝播して行く。モードを1本の光線として模式的に考えると、これらのモードがプラスチック光ファイバ内を伝播する際に、Fig. 3に示されるようにSI型POFの場合、Aのモード成分とBのモード成分では屈折率が均一のため到達時間に差が発生し、100mオーダーでの短距離通信においても、大きな信号歪みを発生する。つまり、単位時間当たりの信号数が密になる（＝高速な通信）と信号の歪みが隣接する信号に影響を与え、正確な情報伝達が不可能となる。この現象は、多数のモードが伝播する大口径マルチモードファイバにおいて、「モード分散」と呼ばれ、特に、SI型POFではほとんどがこのモード分散により光信号の歪みが発生する¹⁾。

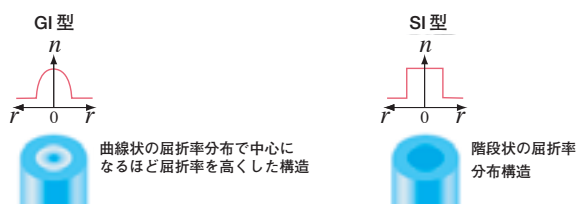


Fig 2. The index profiles of GI-type and SI-type fibers.

一方、LUMISTARのコア部屈折率分布構造により、Aのモード成分とBのモード成分の伝播速度を光速の屈折率依存性を利用してほぼ同一とすることが可能である。これにより、プラスチック光ファイバによる光信号伝送後の信号歪みを発生しにくいいため、～100mの短距離通信において1ギガビット/秒を超える高速伝送が可能となる^{2), 3)}。

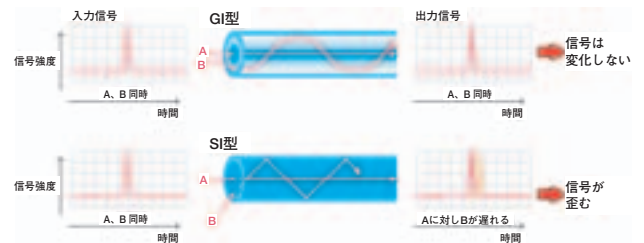


Fig 3. Comparison of the two types in terms of transmitting performance.

Fig. 4には、LUMISTARのタイムドメイン法による-3dB伝送帯域測定結果を示した。SI型POFではモード分散の影響により、伝送速度は100mの伝送において数十～数百メガビット/秒に留まるのに対し、LUMISTARでは1ギガ（1000メガ）ビット/秒以上の伝送速度を実現している。

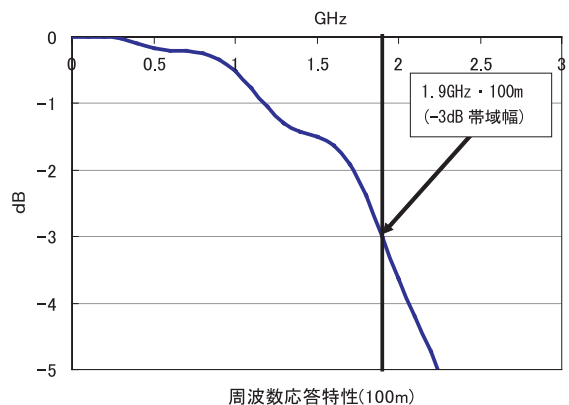


Fig 4. Frequency response after transmission through 100m GI-POF. Measured wavelength : 650nm

3. 光DVIリンクシステム（ODVI-03）開発

富士写真フイルム株式会社は、平成14年9月のGI型プラスチック光ファイバ「LUMISTAR」開発発表以降、グループ会社である富士ゼロックス株式会社、富士写真光機株式会社（現、フジノン株式会社）と共同で高速光伝送システムの開発を進めてきた。その第1弾である「光DVIリンクシステム」は、ホームシアターや店舗・公共施設での映像表示に最適な、プラズマテレビ、大型液晶テレビ、プロジェクターなどの映像表示機器と、チューナー、DVDプレーヤー・レコーダー、デジタルセットトップボックスなどの映像送出機器をリンクするシステムである。LUMISTARを使用し、今ま

で実現されていなかった、DVI規格の映像信号に加えて音声・制御信号の伝送も可能にし、3Gbpsの高速光伝送を可能にした。また、従来の電気DVIケーブルでは距離が伸びると電気信号が劣化するため、10m以上のリンクが困難であったが、信号劣化の少ないLUMISTARを使用することで、30mクラスのデジタル接続が、取り扱い容易なプラスチック光ファイバで初めて（平成16年8月現在、当社調べ）可能になった。

「光DVIリンクシステム」は下記の特長で、ホームシアターや店舗・公共施設など（イベント会場、アミューズメント施設、商業店舗、セキュリティー施設、ホテル、学校、病院、駅／空港、放送局）での、プラズマテレビ、大型液晶テレビ、プロジェクターなどの映像表示機器とチューナー、DVDプレーヤー・レコーダー、デジタルセットトップボックスなどの映像送出機器とのリンクに最適である。

- (1) 信号劣化が少ないGI型プラスチック光ファイバLUMISTARの使用により、電気DVIケーブルでは難しかった30mクラスのデジタル接続を可能にした。
- (2) 柔軟性と大口径化を両立したLUMISTARの特性を活かして、取り扱い性が高いシステムを実現した。
- (3) DVI規格の映像信号に加えて音声・制御信号の伝送を可能にし、3Gbpsの高速伝送を実現した。



Fig 5. Optical DVI Link System.

「光DVIリンクシステム」には、富士フィルムのGI型プラスチック光ファイバLUMISTARとともに、富士ゼロックス開発の「光送受信モジュール（VCSEL：面発光レーザー、高速トランスミッター：電気信号から光信号へ変換する装置、レシーバー：光信号から電気信号へ変換する装置）」と、放送用テレビレンズからカメラ付携帯用レンズまでFUJINONブランドの幅広い製品群で光学制御技術に定評のある、富士写真光機開発の「光学レンズモジュール」を搭載している。組み立ては、デジタルカメラ・携帯電話用カメラモジュールの生産で高密度実装・高精度組み立て技術に実績のある富士フィルムフォトリソグラフィが担当した。

このように、富士フィルムグループの技術力を結集してシステム化を推進した本製品を皮切りに、今後はDVIの次世代版規格であるHDMI（High Definition Multimedia Interface）規格に準拠した光HDMIリンクの開発など、さらにグループ内のキーデバイス・キー技

術を活かして、光伝送システム事業を展開していく計画である。

4. LUMISTARの主要技術

4.1 屈折率分布形成技術

ここでは、高速伝送特性を実現する屈折率分布形成技術を紹介する。

屈折率分布の形成は界面ゲル重合法を用いる。界面ゲル重合法の基本原理は、まず、クラッドとなる中空状の樹脂パイプ内にコアポリマーの原料（モノマー）と屈折率分布形成用の低分子化合物（以下、ドーパントと称す）、重合調整剤の混合溶液を注入する。ここで、加熱重合を行う過程において中空状の樹脂パイプはモノマーに可溶なため、パイプ内面がコア重合に用いるモノマー原料により膨潤し、粘長なゲル層が形成される。一般的に高分子ラジカル重合反応において、粘度上昇が起こると重合停止反応速度が急激に減少するため、重合反応が急速に進行することが知られており、「ゲル効果」と呼ばれている。界面ゲル重合法は、このゲル効果によりコアの重合反応が中空管内壁の近傍から中心部に向かって進行する。この際、モノマーと反応しないドーパントはゲル層へと拡散していくが、モノマーに対し比較的大きい分子サイズを有するドーパントを選択することによって、拡散が妨げられ、界面ゲル重合に伴い、ドーパントは周辺から中心に向かって濃度が高くなる形で濃度分布を形成するようになる。ドーパントは、コア中に光を伝播させるためにポリマー母材に比べ屈折率の高い材料を選択しているため、ドーパントの濃度分布はコア中の屈折率の分布となり、GI型の構造が形成される⁴⁾。Fig. 6には、界面ゲル重合による分布形成機構を模式図で示した。

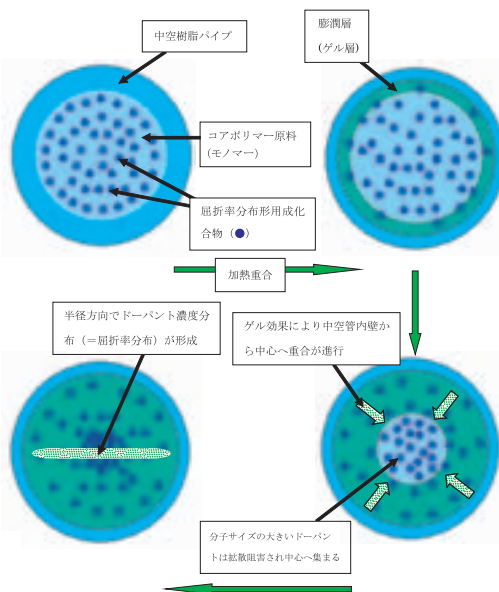


Fig. 6 Mechanism of graded index structure formation via interfacial gel polymerization.

4.2 タフネス性向上技術

ここでは、当社有機素材設計技術に基づいて実現したタフネス性の向上について紹介する。

界面ゲル重合法によるGI型POFは、光通信において最も重要な優れた透明性を維持するために、可視光領域で、優れた透明性を有するポリメタクリル酸メチル（以下、PMMAと称す）を基本母材とし、数ナノオーダーの分子サイズを有するドーパントを用いることで過剰な散乱による透明性（以下、伝送損失と称す）の劣化を抑制している。しかし、一方で、モノマーと反応しないドーパントを添加することにより、ポリマーの持つ熱変形温度（以下、 T_g と称す）が低下する。基本的に、単一ポリマーで構成されているSI型POFに対し、①耐熱性が劣る傾向、②高温保存下でのドーパントの拡散による屈折率分布変化、③ドーパントを含有するポリマーにおいて、高温・高湿下でポリマー中に吸着した水分子が凝集構造を形成し、大幅な透明性劣化を引き起こす場合がある、などの諸問題点が挙げられる⁵⁾。当社ではこれらの問題に対し、透明性を損なわないGI型POF母材の開発と、分布形成に用いるドーパント化合物の設計・開発に取り組むことにより、高いタフネス性を実現した。

Fig. 7に、LUMISTARを90℃という高温環境下にさらした際の屈折率分布形状の変化を示す。LUMISTARは90℃という高温環境において、数千時間オーダーでの屈折率分布形状の維持を達成し、当社のGI-POFが高い耐熱性を有していることが確認された⁵⁾。

一方、高温・高湿環境下での損失安定性に関しては、屋内基準の1つである70℃/95%RHの条件にて当社GI-POFの伝送損失変化を測定した。Fig. 8に示されるように、LUMISTARは母材構成とドーパント設計の同時最適化により、開発当初のGI型POFに比べ、高温・高湿特性を飛躍的に向上させた。

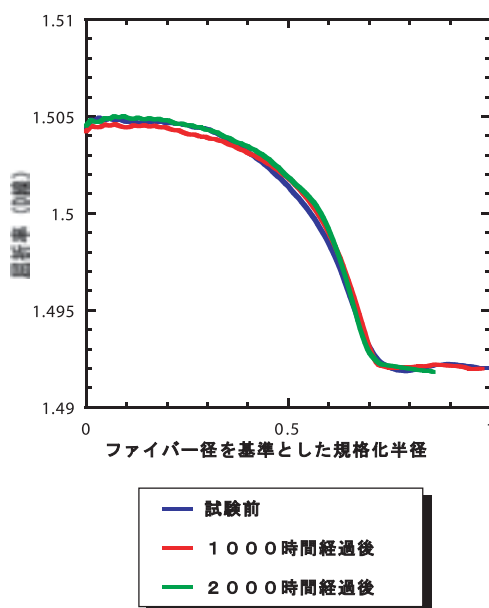


Fig. 7 Thermal stability of the index distribution in GI-POF.
Test temperature : 90°C

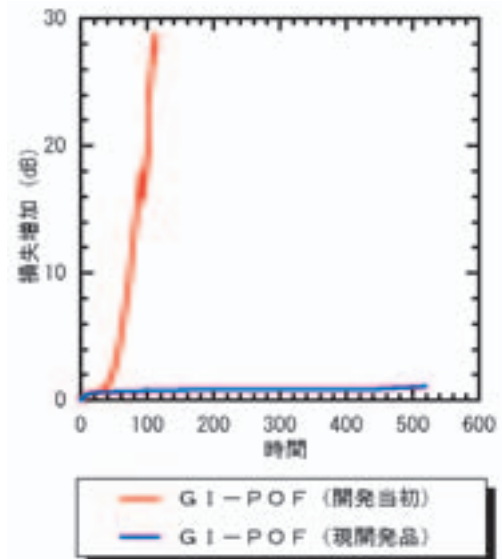


Fig. 8 Improvement of the heat and humidity resistance of GI-POF.
Test condition : 70°C, 95% RH

その他の特性として、屋内配線において重要となるファイバが曲げられた際の伝送損失増加に関して紹介する。光ファイバは、コアとクラッドの屈折率差により光がコア中に閉じ込められるため、ファイバが曲げられた際にコア中を伝播する光が臨界角を超えると放射され伝送損失の増加を招く。一般的に、大口径のSI型POFにおける曲げ損失は、コア・クラッド間の屈折率差を増加させることで改善が可能であるが、屈折率差の増加によって伝播モード数も増大し、モード分散の影響が大きくなるため、伝送速度とのトレードオフとなる。LUMISTARは、モード分散を最小化する屈折率分布を導入することで、優れた高速伝送特性を維持したままきわめて高い屈折率差を実現し、Fig. 9に示されるように開発当初のGI型POFに比べ、大幅に曲げ損失を改善するに至った。

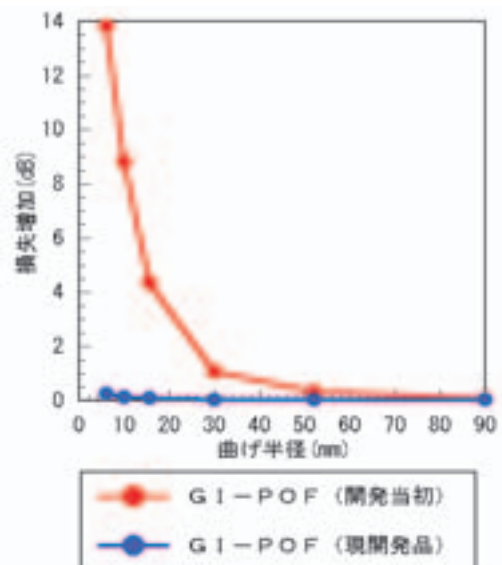


Fig. 9 Improvement of folding loss characteristics of GI-POF.
Light source wavelength : 650nm
Test condition : single folding by 360°

5. おわりに

ここ数年で、情報インフラは急速に発展するきざしが見えている。情報の光化は高速通信のニーズによって発展してきており、ギガビット／秒の伝送でも十分と言えなくなる時代の到来も遠くは無いと考える。ガラスファイバによる幹線系光ネットワークにおいては、すでに波長多重分割方式（WDM）による通信の高速化が図られている。大口径のGI型POFにおいてさらなる高速化に対応するために、最適屈折率分布の制御が重要となるが、WDM対応のための広い波長域での低損失化、材料自体が持っている分散の低減なども今後の課題として挙げられる。当社は、本開発のGI型POF技術を有機素材設計技術と融合させることで高速伝送性能のさらなる飛躍を目指す。

参考文献

- 1) D.Marcuse. “Principles of Optical Fiber Measurement”. Academic Press, Inc., New York, 1981.
- 2) T.Ishigure; E.Nihei; Y.Koike. “Graded-index polymer optical fiber for high data communication” Appl.Opt., **33** (19), 4261-66 (1994).
- 3) R.Olshansky; D.B. Keck. “Pulse broadening in graded index optical fibers,” Appl. Opt., **15** (2), 483-491 (1976).
- 4) Y.Koike; T.Ishigure; E.Nihei. “High-bandwidth graded-index polymer optical fiber,” J. Lightwave Technol., **13**, 1475-1489 (1995).
- 5) M.sato; T.Ishigure; Y.Koike. “Thermally stable high-bandwidth graded-index polymer optical fiber,” J. Lightwave Technol., **18**, 952-968 (2000).

(本報告中にある“LUMISTAR”，“FUJINON”は、富士写真フイルム(株)の商標です。)