高機能 GI 型プラスチック光ファイバの開発と 家庭内通信回線への応用

田中 爾文*

1. はじめに

近年、急速にネットワークの常時接続化とブロードバンド化が進展している。これらの発展に伴い、高画質動画等の大量の情報をオフィスや家庭の端末でいつでも自由に扱えるようになってきている。またユビキタス・ネットワーク社会の実現に向けてリアルタイムコミュニケーションを可能とする FTTH (Fiber To The Home, 家庭内通信回線) 向け光ネットワークのラスト数百 m の加速が重要になってきている。これらの背景から映像などの大量の情報をパソコン、ビデオ、ファックス、ゲーム機などの情報端末の間で自由にやり取りするためには、従来の電話線や同軸ケーブルでは限界があり、ギガビット/秒程度の大容量伝送が可能な光ファイバの利用に大きな期待が寄せられている。

一方、インターネットの普及により日本では約 160 万世帯以上が光ファイバを使用した FTTH を利用している (2004 年 6 月) が、残る約 4200 万世帯の内約 40% は集合住宅であり、集合住宅への光ファイバの普及が日本のこれからの FTTH 普及に大きな意味を持つと考えられている。今後地上波デジタルやデジタルカメラやビデオの画像が幅広く用いられるようになるのに伴い一般家庭間でも高精細のデジタル画像を、インターネットを通してやり取りする時代が到来し始めている。このような状況の中、日本の FTTH 化を進める上で特に重要な既築集合住宅での FTTH 化を進めるには低価格、高い施工性、高速対応に優れたプラスチック光ファイバ (POF: Plastic Optical Fiber) が開発され、FTTH の普及が加速されることが期待される。ここでは、これらを背景にした高機能 POF の開発と FTTH の応用について述べる。ここで述べる成果の一部は、慶応義塾大学小池康博教授の御指導のもと、NEDO「次世代 FTTH 構築用有機部材開発プロジェクト」高機能 POF の開発により得られたものである。

2. 通信用 POF としての要求特性

現在、都市間の長距離通信回線のほとんどを担っているのは石英系光ファイバである。これは、ファイバ径が 125

図1 各種光ファイバの光伝送

図2 光ファイバの屈折率分布形状

μm (毛髪は $90\mu\text{m}$ 程度) と細く、無機材料であるため折れ易く、分岐、接続コストが高い。このため、オフィスや家庭のいわゆる端末までの利用は進んでいないのが現状である。これに対して、接続が簡単で、大口径であり、フレキシビリティに富む POF が、新たな高速通信メディアとして注目を集めている。各種光ファイバの光伝送形態を図 1 に示す。帯域を向上させるためにコアの屈折率分布を SI (Step Index) 型のような「階段状」ではなく図 2 に示すように連続的に変化させ「つりがね」型にしたアクリル系 GI 型 (Graded Index) POF が上市されている¹⁾。このアクリル系 POF は、系中に存在する炭素-水素結合 (C-H) の伸縮振動の倍音による吸収のため、伝損失が大きくなるため伝送距離に制限がある。従って、水素をより重い原子であるフッ素 (F) に置換したフッ素樹脂を用いる

* Tanaka, Chikafumi
旭硝子㈱ ルキナ事業推進部技術開発 GL
裾野市今里 520 番地 (〒410-1104)
2006.10.2 受理

図3 吸収損失と各元素の置換基効果

ことで、通常の光通信に用いられる近赤外領域において、理論的に損失を 10 dB/km 以下に低減することが可能であると考える²⁾。基本的には、水素原子を重水素 (D)、フッ素 (F)、塩素 (Cl) のような原子に置換することで吸収波長を長波長側にシフトさせることができる³⁾。図3にフッ素原子の置換効果による吸収の影響について示した。従って、部分的にフッ素を導入するだけでは充分でなく、樹脂中のすべての水素原子をフッ素原子に置換した「全フッ素」樹脂を用いる必要があった。次に光学用透明フッ素樹脂について述べる

3. 光学用透明フッ素樹脂

従来のフッ素樹脂の多くは白色不透明であるため、光学用途には適さなかった。改良 ETFE (テトラフルオロエチレン-エチレン共重合体) 等結晶性を抑え透明性を改良したものもあるが、透明樹脂と呼ばれている PMMA (ポリメチルメタクリレート) には及ばないばかりか、パーフルオロ体でないため、PTFE (ポリ四フッ化エチレン) よりも耐薬品性に劣っていた。フッ素樹脂が透明にならない理由として、主鎖の C-C 結合長さに比べフッ素原子が大きいことにより、ポリマー鎖が曲がりにくく剛直となることが挙げられる。このため樹脂内部で結晶性の構造を形成しやすくなり、結晶領域と非晶領域が共存する。これらはそれぞれの領域での密度や屈折率が異なるため、その領域界面で光の散乱を示し、結果として不透明なポリマーを形成する⁴⁾。従って透明なフッ素樹脂を開発することは、非晶質化が重要となる。即ちポリマー内部に結晶性構造を形成させない分子構造を導入することが必要になる。様々な手法が試みられたが、このなかから、環構造の導入により、非晶質で透明性に優れたフッ素樹脂が開発商品化されている。これらは、主鎖に環状構造を有している点で共通している。その一つは、分子内に2つの二重結合を持つエーテル (パーフルオロアルケニルビニルエーテル) を重合することにより、環化ポリマーを合成したものである。このモノマーはその構造の特徴から、重合すると環化することが知られており、環化した非晶質樹脂 (サイトップ[®]) が得られる。図4に透明フッ素樹脂の構造 (サイトップ[®], 旭硝子) を示した⁵⁾。この樹脂は、環状構造を有するため完

図4 透明フッ素樹脂の構造 (サイトップ[®], 旭硝子)

図5 非晶質パーフルオロ樹脂の散乱損失

全非晶質となり、かつホモポリマーであるため非常に均質であり、光散乱損失 (図5) は非常に低い。また、この開発された環状非晶質樹脂は、従来のフッ素樹脂が持つ耐薬品性、不燃性、低吸水性、低屈折率性、低誘電率など優れた物理化学的、電気特性を有し、更に熱可塑性樹脂であり特殊なフッ素系溶剤に溶解するという従来のフッ素樹脂にない特性を併せ持つ。従って、キャスト成形、押出成形、射出成形が可能である。屈折率は 1.34 と有機材料としては最も低い部類に属し、屈折率の波長依存性を示すアッペ数は 90 と、色収差が小さい低分散光学材料である⁶⁾。

こうして透明フッ素樹脂の光学特性を利用することにより、全フッ素 GI 型 POF が開発され、製品名「ルキナTM」(ギリシャ語で「光の女神」) として上市されている⁷⁾。

4. 全フッ素 GI 型 POF

開発した全フッ素 GI 型 POF の構成を図6に示す。ベースとなる原料は前述の透明パーフルオロ樹脂であり、GI 型の屈折率分布はドーパントと呼ばれる樹脂に比較して高屈折率である材料を添加することにより付与している。コア径は 120 μm 及びクラッド径は 230 μm であり、その外側には補強材料を被覆しているので実際のファイバの外径は約 500 μm である。これは石英ファイバの外径 125 μm (コア径 63 μm) に比較すると非常に大きく、これにより開発された GI 型 POF は接続が容易なファイバとなっている。原料がパーフルオロ樹脂であること及びホモポリマーであることから、伝送損失構成因子である分子振動吸収及び散乱損失を低減することが可能である。通常の PMMA 系 POF の伝送損失値が 100 dB/km 以上であるのに対し、この GI 型 POF のそれは 850 nm において 14 dB/km にまで及ぶ。また 650~1300 nm の全ての波長範囲で

図6 開発した全フッ素 GI 型 POF の構造

図7 開発した全フッ素 GI 型 POF の伝送損失値

低損失であることから、一般的な 650, 850, 1300 nm の全ての光源波長で通信が可能である。この GI 型 POF の伝送損失を図 7 に示す。現在この光ファイバはマンションや病院などでのネットワーク導入事例があるが、ファイバ心線に対し更に高機能化が要求されている。

5. 高機能 POF の開発目標

次世代 FTTH 用の高機能 POF の開発目標として次の 3 つの目標を掲げている。1) 低伝送損失、2) 低曲げ損失、3) 低コストである。これら目標の設定の理由としては、1) の低伝送損失に関しては、上述した全フッ素系 GI-POF は、

図8 既築集合住宅の分岐ボックス

材料として透明フッ素樹脂を使用している事により波長 850 nm や 1300 nm で約 20 dB/km 程度の伝送損失値を有するが、将来の FTTH に対応するためには数 Gbps を越える伝送帯域を考慮に入れる必要がある。この場合、受光素子の感度が低下するためそれを補完するために光ファイバの低伝送損失化が求められている。また現在販売している全フッ素系 GI-POF の伝送距離を長距離化して欲しいとの市場の要求があるため現状の伝送損失値を更に低下させる事を目標とすることを考えた。これらを達成するためには、使用している材料および成形法等を開発する必要がある。次に 2) 低曲げ損失であるが、上述したように現在日本では新築集合住宅の FTTH 化が進んでいるが将来の FTTH の構築を考える上で最も障害になるのは国民の約 40% が住んでいると言われる既築集合住宅の FTTH 化である⁸⁾。この既築集合住宅は新築の集合住宅とは異なり空配管のある確率は非常に少なく、再度配管をするにはコスト高になるため既存の配管を使う方法が美観の維持、経済性を含め最も有効であると言われている。既存の配管を利用する場合、既に電話線が入っており、しかも図 8 のように分岐ボックスは小さく（接続に利用できる内部は 5 cm × 5 cm 程度）、厳しい曲げ半径の対応が求められており、既設集合住宅での配線試験に基づく予測では曲げ半径 5 mm クラスの非常に厳しい曲げ（直角曲げが 1~2 箇所）および狭いボックス内でのファイバ間接続等の対応が必要と考えている⁹⁾。この厳しい曲げ半径の対応に関してはいくつかの解決する方法論があるが、今回の開発では、プラスチックの優位性を発揮できる低曲げ損失 POF の試作を目指した。低曲げ損失の POF を得るために、ファイバ構造について W（ダブル）クラッド型及びマルチコア型の 2 種類を提案した。最後に 3) 低コスト化であるが、POF の普及を目指すためには、経済性が必要であるため低コスト化を掲げた。

図9 2種類の新しい POF の構造

6. 高機能 POF の開発

5章で述べた開発目標を達成するために、筆者らは図9に示すように2種類の構成のPOFの開発を提案している。

6.1 Wクラッド型 POF の開発

低曲げ損失 POF を得るには、一般に2種類の屈折率の異なるクラッドを用い、外側により低屈折率である薄い層と内側にクラッド層を用いる W クラッド型構造が有効であることが知られている。図10にその原理を示す。光ファイバを曲げると、開口角に近い角度で伝播する光線は臨界

図10 曲げ損失の原理

低損失WクラッドPOFの開発例
結んでも光が漏れない事を実証

図11 低曲げ損失 W クラッド POF の開発例

角を超えて伝送できないため曲げた箇所から光が漏れるが、Wクラッド構造にすることで光を閉じ込め、光の漏れを防ぐことができる。現在前述の環状非晶樹脂に比し低屈折率の全フッ素樹脂をWクラッド材として用いることにより、低損失、低曲げ損失高機能POFを得ることに成功している¹⁰⁾。図11にWクラッドPOFを結んでも光が漏れずに透過する写真を示した。また、本ファイバの低損失化のためにはWクラッド層とクラッド層の界面の密着性を良好にすることが重要であることが示唆された。図12のSEM写真は被覆層を剥がしたWクラッド型POFの断面写真を従来品と今回開発したWクラッドPOFを比較したものである。今回開発したものは外側のWクラッド層と内側のクラッド層が剥離しないで密着していることが判る。フッ素樹脂は本来密着性に乏しく、Wクラッド層と数 μm 程度の剥離を生じ易いため低伝損失に至らなかったが、同じ系統のフッ素樹脂を用いることで界面の密着性を良好にし低損失化に成功した。現在開発中のWクラッドPOFの性能と曲げ損失値を図13にまとめた。R5mmの曲げ半径で曲げ損失0.2dB以下の性能が得られている。

6.2 マルチコア POF の開発

一般に低曲げ損失を実現するにはコア径を小さくすることが有効であるが、コア径を小さくすると簡易接続性が失われるため複数のコアからなるアクリル系マルチコアPOFが以前より提案されている。今回の開発では全フッ素系の材料を用いてGI型マルチコアPOFの開発を行っており、127心タイプのマルチコアPOFの試作に成功し

従来のWクラッドPOF

今回開発したWクラッドPOF

図12 Wクラッド POF 断面の SEM 写真

W クラッド型 POF の性能比較

	従来 GIPOF	W クラッド型 POF
クラッド層屈折率	1.342	1.328
R 5 mm での曲損 (dB)	1.5-2.0	0.08-0.11
コア径 (μm)	120	130-230
帯域 (Gbs)	2-5	4.5-5.3
損失 (dB/km)	14-25	22-30

Wクラッド型POFの曲損

(従来GIPOFの曲げ損失値はR5mmで1.5dB程度であり約10分の1に改善。同一曲げ半径の複数のデータは繰り返し測定による)

図13 W クラッド POF の性能及び曲げ損失データ

マルチコア型POFの断面写真
(ファイバ外径: 330 μm NA: 0.18)

マルチコア型POFの曲損 (参考値)
(同一曲げ半径の複数のデータは
繰り返し測定による)

図 14 127 心マルチコア POF の断面及び曲げ損失データ

ている¹¹⁾。図 14 に、マルチコア POF の NFP による断面及び曲げ損失データをまとめた。ファイバ外径は約 330 μm, 1 心あたりのコア径は 20 μm 程度, 開口数 NA は 0.18 であった。現在波長 850 nm において約 50 dB/km 程度の伝損失値が得られている。また曲げ損失も R 5 mm で 0.2~0.5 dB 程度であった。現在更に低曲げ損及び低伝損失化, 高帯域化を目指し開発中である。

7. 将来展望

10 ギガイーサネットの規格化が策定される中, 高機能全フッ素 GI 型 POF は, 大容量通信に必須の, 安価で使いやすい光ファイバとして期待できよう。

世界のホームネットワーク市場は今後拡大すると考えられているが, この中で大容量のデジタルコンテンツを伝送する要求は日増しに高まっている。また, ディスプレイの大型化, 高品質画像化による 5 Gbps 程度の非圧縮データ伝送が「家庭内光化」を促進させることが期待されている。このような状況のなか, 本開発で紹介した高機能 POF が高帯域, 安価, 取扱が簡易, 曲げに強い, 安全等の特徴を活かし, 種々の光通信市場へ応用できることが期待される。

今後は新しい未来の FTTH 構築に向け, 高機能 POF が新築の集合住宅や既築集合住宅の各住戸や家庭に張り巡らされる日が来ることを願ってやまないと同時に, 来るべき高速通信時代に向け, POF が人に優しく環境に安全で, 身近に感じられる情報化社会を期待したい。

参考文献

- 1) Koike, Y. and Ishigure, T., et al.: *J. of Lightwave Technol.*, **13**, 1475 (1995)
- 2) Koike, Y.: Symposium on New Trend of Advanced Materials Polymer Optical Fiber, Tokyo, November, 1995
- 3) Groh, W.: *Makromol. Chem.*, **189**, 2861 (1988)
- 4) 尾川 元: 工業材料, **49** (2) (2001)
- 5) Nakamura, M. et al.: US Patent 4, 897, 457
- 6) 田中爾文, 井出文雄監修: 光時代の透明性樹脂, 85 (2004), シーエムシー出版
- 7) 成富正樹: O plus E, 1999 年 6 月号
- 8) Naritomi, M.: "Home network in Japan from present to future", Proceeding of the 14th International Conference on Plastic Optical Fiber 2005, 169 (2005)
- 9) Takano, Y., Watanabe, Y. and Arai, T.: "Branching method for existing apartment building using Perfluorinated GI-POF", Proceeding of the 14th International Conference on Plastic Optical Fiber 2005, 185 (2005)
- 10) Tanaka, C., Ohnishi, T., Ogawa, G., and Naritomi, M. et al.: "Development of Multi-Core Perfluorinated POF", Proceeding of the 15th International Conference on Plastic Optical Fiber 2006, 152 (2006)
- 11) Sato, M.: "Perfluorinated GI-POF with double cladding layer", Proceeding of the 14th International Conference on Plastic Optical Fiber 2005, 23 (2005)