

ボールペン技術による家庭用高精細映像光伝送システム開発

— 安価で簡易な光接続を可能とするボールペン型光インターコネクットの提案 —

当麻 哲哉^{1,2*}、瀧塚 博志^{1,2}、鳥飼 俊敬³、鈴木 等³、小木 哲朗²、小池 康博¹

ハイビジョン映像の品質を超える高精細なビデオフォーマットが開発されているが、その伝送のための高速データ通信技術は必ずしも一般家庭への適用が容易ではない。家庭向けには、高速通信というテクニカルな要求だけでなく、取り扱い易さ、接続不良のない信頼性、入手しやすい価格等の条件が満たされる必要があり、高速通信で代表的な石英系光ファイバーは、脆く折れやすい上、低コストで精度のよい簡単接続が困難なため、消費者のニーズに合わない。この研究では、折れにくく高速通信が可能な屈折率分布型プラスチック光ファイバーの端面に、球状のガラス・コリメータレンズを組み込んだ超小型ビーム拡大インターコネクットを、低コストで精度の高いボールペン製造技術の応用で実現し、4K3D高精細非圧縮映像伝送実験によるシステム検証を行った。

キーワード: 光通信、コリメータレンズ、光学デザイン、ボールペン、プラスチック光ファイバー

Development of a household high-definition video transmission system based on ballpoint-pen technology

— A low cost, easily deployed optical connection using a ballpoint-pen type interconnect —

Tetsuya TOMA^{1,2*}, Hiroshi TAKIZUKA^{1,2}, Toshitaka TORIKAI³, Hitoshi SUZUKI³, Tetsuro OGI² and Yasuhiro KOIKE¹

High quality video formats beyond HDTV are being developed, but these formats require data communication rates greater than 10 Gbps, which are not easily adaptable to household applications. Moreover, household usage requires ease of handling, robustness against poor connectivity, and affordable cost. Conventional silica optical fibers are not suitable for applications that involve high-speed, short-range communication, because of their fragility, and difficulty in achieving precise connectivity with a low cost connecting method. We proposed a novel expanded-beam interconnect using a graded-index plastic optical fiber (GI POF) with a glass spherical collimator lens uniquely fabricated by low cost ballpoint-pen technologies at both ends. Our power budget evaluation verified its suitability for consumer applications. Successful validation was then conducted by transmitting 4K-3D uncompressed video content.

Keywords: Optical communications, collimator lens, optical system design, ballpoint pen, plastic optical fiber

1 はじめに

家庭内の通信の中で非圧縮映像の伝送は、かなり広い帯域が要求されている。近年、急速に普及したハイビジョンテレビの映像フォーマット（画素数 1920 × 1080、毎秒 60 フレーム、インターレース）は、消費者には十分な高画質であると思われてきたが、リビングルームのテレビ画面サイズが年々大型化してきており、それに伴い同じ精細度では画素が拡大されて画質が落ちることから、さらなる高精細映像技術が必要とされ、研究開発が盛んに進められている。例えば画面サイズが 2 倍になった場合、リビングルームの同じ距離から視聴して同じ解像度を得るためには、画素数を縦横 2 倍ずつ、合計 4 倍に増やし、さらに

動きの速い映像に対応したフレームレートである 4K フォーマット（画素数 3840 × 2160、毎秒 60 フレーム、プログレッシブ）が必要で、データサイズはフルハイビジョンの 8 倍、伝送には、10 Gbps を超える帯域が必要になってくる。立体視 (3D) 映像を高精細にデュアル伝送するにはさらに 2 倍のデータ転送速度を要する。

こうした高精細映像の非圧縮伝送には、目標伝送速度を達成するために、既存の銅線、例えば同軸ケーブル、DVI (Digital Visual Interface)、HDMI (High-Definition Multimedia Interface) 等では不十分であり、銅線に代わる光通信の宅内導入が必要となっている。一般に短距離の光データ通信には、石英系マルチモード光ファイバー

1 慶應義塾大学 フォトニクス・リサーチ・インスティテュート 〒212-0032 川崎市幸区新川崎 7-1、2 慶應義塾大学大学院 システムデザイン・マネジメント研究科 〒223-8526 横浜市港北区日吉 4-1-1、3 三菱鉛筆株式会社 横浜研究開発センター 〒221-8550 横浜市神奈川区入江 2-5-12

1. Keio Photonics Research Institute, Keio University 7-1 Shin-Kawasaki, Saiwai-ku, Kawasaki 212-0032, Japan * E-mail: t.toma@sdm.keio.ac.jp, 2. Graduate School of System Design and Management, Keio University 4-1-1 Hiyoshi, Kohoku-ku, Yokohama 223-8526, Japan, 3. Research and Development Center, Mitsubishi Pencil Co., Ltd. 2-5-12 Irie, Kanagawa-ku, Yokohama 221-8550, Japan

Original manuscript received November 6, 2013, Revisions received November 21, 2013, Accepted November 25, 2013

(MMF) が広く使用されているが、家庭やオフィスの室内用途では、ケーブルを折り曲げたり束ねたり、むき出しで床に這わせたりするために、取り扱いに気を付けないと折れてしまうという欠点を持っている^{[1][2]}。また折れたファイバーのガラス破片が被覆を破って飛び出しユーザーを傷つける危険性もはらんでいる。さらに破損したガラスは、通常の燃えるゴミとして廃棄できない。さらにファイバーの端面にキズやホコリがつくと、接続不良が起りやすく、接続にあたって端面の汚れをアルコールで拭き取ったり、ホコリをエアブローで除去したりする必要があり、一般消費者にとっては扱いにくい。

端面処理の欠点を解消するために、従来からある技術として、光ファイバーの端面にボールレンズを付けて、端面から広がる光をコリメート(集光)し、コア径よりも出射光のビーム径を拡大させる「ビーム拡大コネクタ」が知られている^[3]。図1に示すように、通常は端面同士を精度よく密着させる必要がある光ファイバー接続において、ボールレンズを装着することにより、軸ズレ精度に余裕を持たせ、密着の必要性がなくなる上に、端面のキズやホコリの影響を受けにくくすることができる。過酷な屋外の条件下での光通信接続を可能にするため、航空機や船舶、車両、軍事用途等で用いられている^[4]。ところが光ファイバーの軸とボールレンズの中心の位置関係を精度よく固定するためには、コネクタのハウジング部分の設計および組み立て精度が必要で、大量生産に向かない上、非常にコストがかかることから、特殊用途にしか使われていない。またハウジングが大きくなりがちで小型化ができない。また、石英ファイバーの欠点である脆くて折れやすい点については、近年では折り曲げに強いものも出てきているが、被覆を厚くするなどケーブルが太くなってしまいうという欠点がある。

このような背景の中でこの研究では、一般家庭における高精細映像の非圧縮伝送を可能とするための、安全で扱

い易く、信頼性の高い低コストの高速光通信システムを提案するものである。具体的には、プラスチック光ファイバーの端面に小さなボールレンズを装着した、超小型光インターコネクタを開発し、このインターコネクタを複数組み合わせさせた新規コネクタ付きケーブルを試作、高精細映像を実際に流して検証を行った。

2 目標とシナリオ

一般家庭に普及可能な光通信システムを導入するにあたり検討しなければならない課題は、その通信速度(伝送帯域)というテクニカルな要求を満たすことだけではなく、ユーザーの視点に立って、安全で扱い易く、簡単に信頼性の高い接続が可能で、かつ低価格で提供できるかどうか、という点である。

この点で要求を満たすことが困難な石英系光ファイバーに代わって、プラスチック光ファイバー(POF)は、優れた柔軟性と物理的耐久性を示し、大量生産で安く製造することが可能な媒体として最も有力な候補である。

POFは石英系光ファイバーに比べて、折り曲げに強く、踏みつけても断線することがない。一般に普及しているPOFは、伝送帯域の狭いステップインデックス型(SI型)であり、コア径が大きく接続時の軸ズレや端面のキズ、ホコリに気をを使う必要がないので、消費者が使う室内の配線用途に向いていると考えられる。しかし、この研究が目指している非圧縮高精細映像の伝送を考えると、数100 Mbpsの帯域では、伝送速度が不足している。

一方で慶應義塾大学の小池らのグループが発明した全フッ素化屈折率分布型プラスチック光ファイバー(GI型POF)(図2)は、高速通信にも対応できるものとして商品化されており、プラスチックの素材の特徴である柔軟性を兼ね備えながら、40 Gbpsに迫る世界最速の伝送帯域を持つ。小池らは全フッ素化GI型POFを用いた大画面高

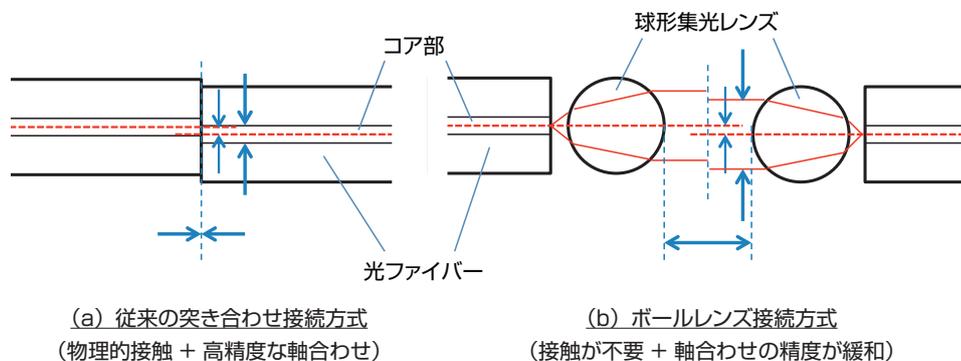


図1 ボールレンズの特徴

従来の光ファイバー接続は、端面を突き合わせて接触させ、光軸を正確に合わせる必要があった。これに対して、ボールレンズを終端に付けた光ファイバーは、コア径よりも拡大されたコリメート光が出射され、軸ズレの精度が緩和されるうえ、ギャップを開けて非接触でもつながるため、結合がとても簡単になる。

精細ディスプレイによる遠隔地間の「Face-to-Face コミュニケーションシステム」を提案している^[5]。

この全フッ素化 GI 型 POF は、石英系 MMF と同等の広い帯域を有しており、材料の物理特性では石英よりも優れているため、ジョージア工科大学のラルフらにより高い評価を受けた^[6]。プラスチック素材のため、押出成形技術で大量生産すれば低コストでの製品化が可能である。ただし、高速通信を可能にするために、コア径を小さくしており、接続の容易さの点では SI 型のような利点はなく、石英系 MMF と同様に軸合わせ精度のよい接続が求められ、端面のキズ、ホコリにも気を遣う必要があり、防塵キャップを付けたり、接続前に端面クリーニングをしたりすることが求められる。このキズ、ホコリについて言えば、プラスチックは石英よりも材料が柔らかい上に静電気を帯びやすく、むしろ石英以上に気を使っているのが現状である。

前述のボールレンズを組み合わせて、端面処理を改善する方法も考えられるが、低価格短距離通信を特徴とする POF のビジネス展開の上で、高コストになるボールレンズ装着は常識ではありえない選択であった。GI 型 POF が発明されて 20 年、特性の良さは理想的でありながら、実用

性を考えると、このようなトレードオフのために普及する用途が限定された状態が長年続いてきた。今回の我々の研究は、この事実をブレイクスルーできるイノベティブな統合技術である。

開発のシナリオを図 3 で説明する。光ファイバーの欠点である接続の精度要求の高さと端面のキズやホコリのケアについて解消する技術として、ボールレンズを装着する「ビーム拡大コネクタ」があることをすでに述べたが、POF を使うとコストが見合わないし、石英ファイバーでは、一般消費者に使用に耐える柔軟性がない。つまりボールレンズの機能は優れているが、従来のビーム拡大コネクタの組み立て技術では、トレードオフを抜け出せない。

一方、家庭用ではなくエレクトロニクス部品の用途で、基板上の狭く小さな場所をジャンパー線のようにつなぐことができる光コネクタを目指していた鳥飼（当時日本航空電子工業勤務）は、ボールレンズがあれば接続は容易になるものの、ジャンパー線に必要な超小型形状にすることに困難を憶えていた。2009 年、異業種交流で出会ったボールペンメーカー三菱鉛筆の技術者とのディスカッションがその方向性を大きく変えるきっかけとなった。「ボール」の材質



- 《特徴》
- 石英系と同等の高速通信
 - 柔らかく折り曲げても断線しない
 - 破断面から破片が出ず安全
 - 連続大量生産で低価格化可能
- 《欠点》
- × 柔らかく端面がキズつきやすい
 - × 静電気がホコリを引き寄せやすい
 - × 少量生産が困難で需要が必要
 - × 実績が少なく採用への障壁が高い

図 2 GI 型 POF の特徴と欠点

全フッ素化 GI 型 POF（屈折率分布型プラスチック光ファイバー）は、その物理的柔軟性によって、石英系ファイバーにはない折り曲げに対する耐久性を有し、破断による危険性もないため、一般家庭の消費者が取り扱い易い素材である反面、キズやホコリに対しては、石英系ファイバー以上に注意が必要である。

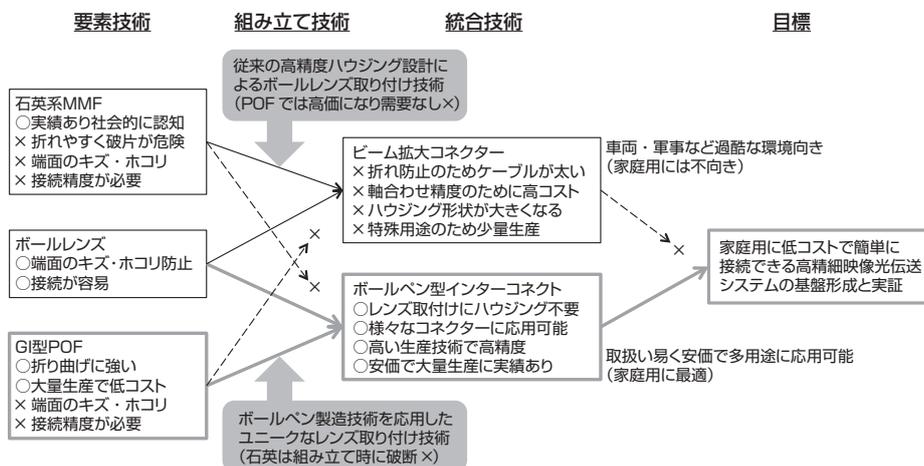


図 3 家庭用光接続技術開発のシナリオ

ボールレンズの効果はかつてより知られていたが、取り付けのためのハウジングを組み立てに精度が必要で、安価に製造することが難しく、特殊な用途にしか使われなかった。本研究は、ボールペン製造技術を応用することで、極めて精度良く低コストでボールレンズの取り付けを可能とした。

「○」は家庭用途に有利な特性、「×」は家庭用途に不利な特性。

においてはガラスと金属の違いはあるものの、細いチューブの先端にボールを装着する、という構造概念の共通性に気づいたのである。

さっそくニードルチップ型のボールペンに石英系光ファイバーを挿入し、超小型コネクタを開発する研究が2社の共同で始まった。しかし、ペン先の金属製スリーブに石英系光ファイバーを差し込み、通常のボールペンインクチューブと同じ方法で、外側からかきしめて固定しようとする、石英の材質の脆さゆえに破損してしまうことがわかった。開発を断念せざるを得ない状況にあった2010年、偶然に三菱鉛筆の技術指導にあっていた小池に相談したところ、石英ファイバーを小池らが開発したGI型POFに置き換えるアイデアが出された。インクチューブのようなプラスチック素材の柔軟性を利用すれば、実現できるという発想である。

さらに、ボールペン技術を使えば、ボールレンズの装着が低コストで実現することから、エレクトロニクス分野に限らず、コスト面で困難とされていた家庭用にもボールレンズ付きのコネクタが導入できると予想された。実験の結果、ボールペン製造と同じかきしめる固定方法で、ファイバーを破損することなく固定できることが明らかになり、この研究が本格的にスタートすることになったのである。

以上要約すると、この研究では一般家庭で利用される低コストで簡単に接続できる高精細映像光伝送システムの基盤形成と実証を目標とし、主要な要素技術としてのボールペン製造技術により、GI型POFの端面に超小型で高精度でありながら低コストでボールレンズ装着を可能とし、その実現を図るというシナリオで研究を遂行した。

3 ボールペン型光インターコネクタの開発

このようにして我々は、光ファイバーの端面にボールレンズを精度よく装着する方法として、世界で初めて、ボールペン製造技術を応用することに成功し、極めて低コストでの

光インターコネクタを実現した^[7]。このユニークで全く新しい概念のレンズ装着方法について、その構造を図4に示す。

ニードルチップ型ボールペンのペン先は、3種類の部品から構成されている。ニードル部分にあたる金属製スリーブ（内径0.5 mm、長さ7.8 mm）、スリーブの先端に取り付ける金属ボール（直径0.55 mmの真球）、インクが流れるキャピラリーの3点である。このうち、金属製スリーブはそのままに、先端の金属ボールを高透明度の球状ガラス（材質BK7、直径0.55 mm、研磨して真球状にしたもの）に替え、インクチューブの代わりに、旭硝子株式会社製の全フッ素化GI型POF「FOF FONTEX®」を挿入した。金属製スリーブには、POFの位置合わせのためのポンチ加工があり、挿入してポンチ加工までつき当てることで、先端のボールと端面の距離が正確に固定される。また、挿入したファイバーが抜けないように、スリーブの外側からかきしめることで固定した。

このときのボールレンズの中心とファイバーの中心軸は、精度よく位置合わせされていなければならない。その点で、ボールペン製造技術はもともと、高い精度のもとに設計、製造がなされてきたために、光通信の要求を満たす高精度のアライメントを実現することができた。また、先端に装着するボールは、光学特性を高めるために、真球でかつ表面に凹凸のないなめらかさが必要であるが、この点においても、従来からのボールペン技術で培われてきた金属球の研磨方法が、およそそのまま生かされた。

挿入したPOFを抜けないように固定する「かきしめ」についても、およそ現状のボールペン製造技術が使われた。かきしめの位置と箇所、かきしめ強度については、POFの光学特性にダメージを与えることなく、十分な引き抜き強度が出るように最適化されたが、この点についても現状の生産工程における調整の範囲内で可能であった。

これらの工程が、石英ファイバーでは達成できず、POF

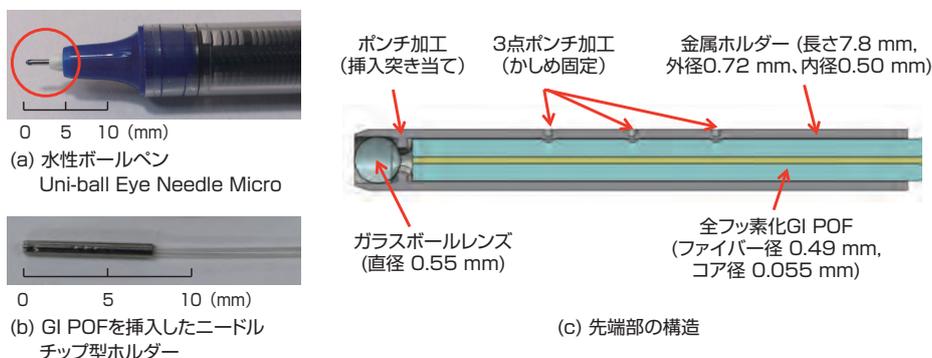


図4 ボールペン光インターコネクタの構造

ニードルチップ型のボールペン製造技術を応用することで、光ファイバーの先端にガラスのボールレンズを安価に精度よく装着することができる。コネクタのハウジングにボールを付けるのではなく、ハウジングレスでファイバー端に直接ボールが装着できるため、このあとのコネクタ設計に自由度が高い。

の特性をそのまま生かすことのできた、この研究における最も本質的にユニークな発明である。つまり、従来からのボールペンに必要とされてきた高精度のアラインメント、ボールの研磨、チューブの固定が、まさに光インターコネク트에求められる精度の高さと一致し、かつ極めて低コストでそれを実現するという、これまでの常識を覆す発明だったといえる。

4 実験方法と評価結果

それではここで、開発された新規光インターコネクットの性能を測定するための実験方法と、その結果を示す。

4.1 結合損失の評価

結合損失を測定するために、グレイテクノス社の光パワーメータ「Photom 205A」を使った。軸ズレ測定治具の上で、2本の光ケーブルを端部で結合させ、正確にその軸ズレ距離をx、y、zの3軸方向で制御して固定し、その2本のケーブルをパワーメータの入力と出力にそれぞれ接続し、各条件下で伝送される光のパワーを読みとった。光源の波長は850 nmである。ファイバー端部のゴミは取り付け前に、エアクリナーで除去した。パワーが最大となるxyz座標を原点と設定し、ここを起点にx、y、z方向に軸ズレさせたときの光パワーをdBm単位で測定し、原点での光パワーを基準に差を取って結合損失（単位dB）を計算した。

結合損失を実測するとともに、レイトレーシング法による工学設計ツールZEMAX™を用いて20万回のシミュレーションを実行し、実測データが理論的に間違っていないことを確認しながら実験を行った。シミュレーションで入力した条件は、現物に近い状態を再現するように、ファイバーの直径0.49 mm、コア径55 μm、屈折率1.350、開口数0.245、ボールレンズの直径0.55 mm、屈折率1.51とした。ファイバー端とボールレンズの距離は最適化された長さで設定した。

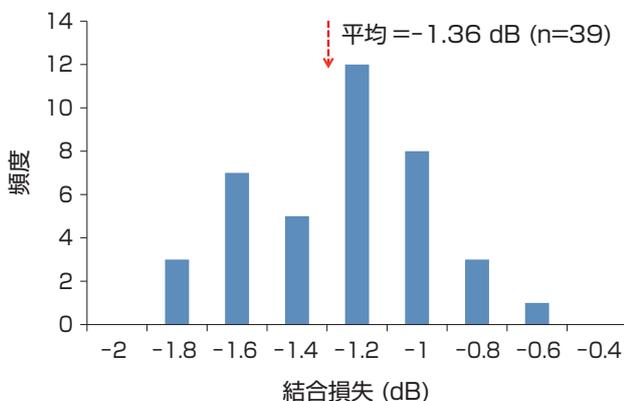


図5 試作サンプルの結合損失ヒストグラム
試作した40本のボールペン型インターコネクットサンプルの結合損失測定データ。平均損失は、1.36 dB。

結合損失は、最適な状態で結合したときのコリメーション損失と、結合時に軸ズレが生じて増加するアラインメント損失、端面間のギャップから生じる損失、光ファイバーの曲げから来る損失の4つに分けて評価した。その結果を以下に示す。

①結合そのものによるコリメーション損失

ボールレンズにより終端処理をしたGI型POFサンプルを40本作成し、そのうちの1本をマスターとして、残りの39本を1本ずつ、マスターに結合しながら損失量を測定した。平均損失は、-1.36 dBであった。その結果のヒストグラムを図5に示す。この結果から、パワーバジェット（送信側の最低出力と受信側の最低感度の差で、使用する機器での最悪の条件を想定した数値）の推定（5章）に使用される結合損失は、両端の結合を考慮して2倍し、2.72 dB（1.36 dB × 2）となった。

②軸ズレによるアラインメント損失

2本のケーブルの結合において、軸ズレ（軸に垂直なx、y方向にずれるもの）が生じた場合の結合損失を、ボールペン技術によりボールレンズが装着されたコネクタ同士の接続と、ボールレンズのない通常のファイバー端面つき合わせ接続とを比較して評価した。

図6は、パワーが最大となる点を原点とし、軸に垂直な方向に平行ずれを生じさせた場合の損失増加量を測定したデータを示している。この図が示すように、ボールレンズが装着されたものは、軸ズレの許容が高まり、高精度な結合を必要としなくてすむ。あるいは同じ精度の結合では損失を軽減することができる。

ボールがない従来のファイバー結合では、1 dB以下の損失に抑えるためには、10 μm以内の精度での結合が要

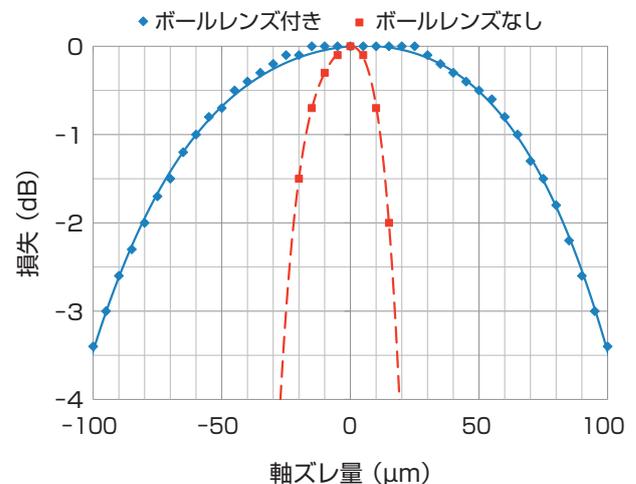


図6 軸ズレによる損失の比較データ
軸に垂直な方向のズレ量による光損失を、ボールレンズ装着の有無で比較したデータ。ボールレンズにより許容ズレ量が広がる。

求されるが、ボールレンズコネクタでは 60 μm のズレまで許容され、6 倍広いマージンを持つことがわかった。この特徴は、周辺のあらゆる部品の設計精度、組み立て精度、寸法安定性に影響して自由度を増すことにより、製造コストの削減に寄与できるものである。

③ギャップによる損失

図7は、ファイバーの端面間のギャップに対する損失量を示したものである。1 dB 以下の損失に抑えるためには、従来の結合方式では、ギャップはわずか 0.05 mm (50 μm) しか許されないが、ボールレンズを装着することにより、許容度が非常に大きくなり、10 倍の 0.5 mm のギャップでも損失はほとんどなく、測定された最大ギャップ 0.8 mm においても、損失は 0.5 dB 以下であった。ボールレンズによるビームのコリメート出力が、この重要な利点を提供しているといえる。

④曲げによる損失

また、全フッ素化 GI 型 POF と石英系 MMF の曲げ損失の比較も、同じ測定方法を用いて評価された。評価は、市販の石英系 MMF として古河電気工業製「OM2」と「OM3」の2製品を、また市販の POF として AGC 製全フッ素化 GI 型 POF FONTEX[®] を比較して行われた。図8に示すように、GI 型 POF の曲げ損失は、ケーブルをしっかりと結んだ状態 R=3.5 mm まで全く認められず、R が小さくなるほど損失が大幅に増大していく石英系 MMF よりはるかに低く、家庭やオフィスのネットワークへの応用が期待される。

4.2 光強度測定による特性評価

光パワーメータを使った光の減衰量等の測定により、この研究の光インターコネクタの特徴を調べた。

①BERTによるパワーペナルティの測定

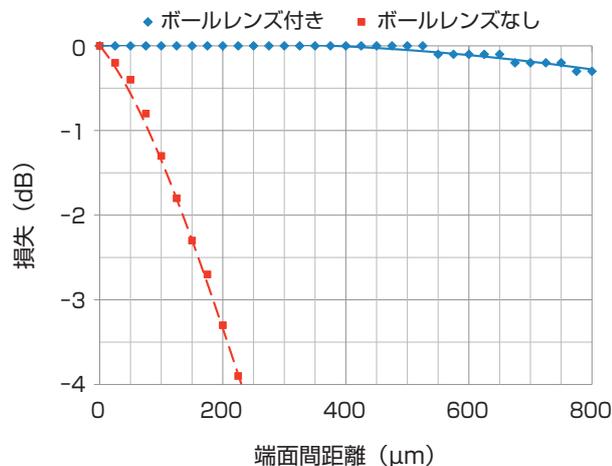


図7 軸方向のギャップによる損失の比較データ
軸方向のギャップによる光損失を、ボールレンズ装着の有無での比較データ。ボールレンズは間隔が空いても損失が非常に少ない。

ビット誤り率 (BER: 一定時間内に符号化して送られるデジタルデータの総数に対して、誤って受信された符号の数の比率) は、アンリツ社の「BERTWave MP2100A」(BERT、サンプリング・オシロスコープ) を用いて測定された。アジレント社の光減衰器 N7766A を介して、測定対象サンプルを BERT 測定器に接続し、減衰量を調整しながら、エラーが 1 となったときの光パワーをパワーメータで測定した。0.5 dBm ずつ変化させながらビット誤り率をプロットしていき、バックツーバック (送信機と受信機を直結し、損失が最も少ない基準となる状態) の石英系ファイバーのデータをリファレンスとして、ビット誤り率 $1\text{E-}12$ におけるパワー値の差を、パワーペナルティ (伝送路での損失を補うために増加させなければならないパワーの増加量) として算出した。

この方法により、ケーブル長とパワーペナルティの関係を評価した結果を、図9(a) に示す。長さとおよそ直線関係があることがわかる。100メートルのケーブル長のためのパワーペナルティは、1.12 dB であるが、50メートルでは 0.66 dB、20メートルでは 0.29 dB、10メートルで 0.11 dB であった。これらの値は、5章のパワーバジェットの計算で使用された。

②ケーブル損失の評価

アジレント社の PNA-X ネットワーク・アナライザ「N5242A」と光コンポーネント・アナライザ「N4376B」を使用し、ケーブルの周波数特性ならびに、ケーブル損失 (ゼロ周波数での DC モード値) を求めた。

さまざまな長さのケーブルを測定し、損失量を長さの関数として示したものが、図9(b)である。100メートル長のケーブル損失は 3.76 dB で、50メートルで 1.87 dB、20メートルで 0.75 dB、10メートルで 0.38 dB となった。これらの

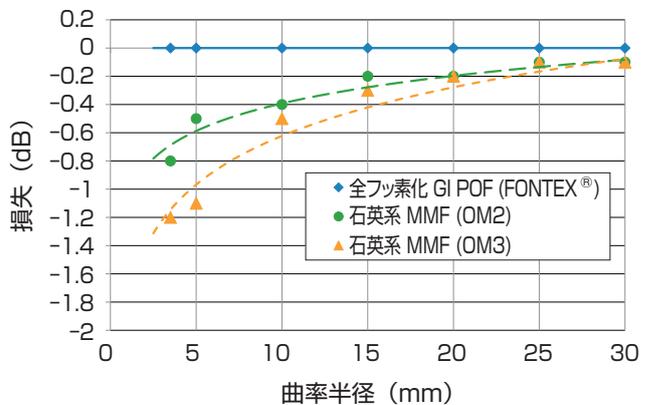


図8 曲げによる損失の比較データ
ファイバーを所定の半径で曲げたときの光損失を、従来の石英系 MMF と全フッ素化 GI 型 POF で比較したデータ。POF の曲げ損失は非常に小さい。

値も同様に、5章のパワーバジェット計算で使用された。

③レーザーの安全性評価

次に、万が一のケーブル破損による光漏れを想定し、レーザー光線による人体への影響、とくに目の安全のために被ばく放出限界 (AEL) 値に基づいた光パワーを評価した。ADCMT社の光パワーメータ「8250A/82311」と、NEC製の850 nm光源の光トランシーバー、その受信機を使用して安全性評価を実施し、AEL値のファイバー1本あたりが-1.57 dBmと算出され、家電向けクラス1のアイセイフティ安全基準 (レーザー光の安全性の規格で、家庭用機器では、最も安全なクラス1の規格値を守ることが要求される) を満たしていることを確認した。

5 パワーバジェットの評価

本提案システムが、目標とする家庭内高精細映像通信システムに適しているかどうかを確認するために、4章で述べた実験結果を組み合わせて、パワーバジェットの評価を行った。図10は、10メートル、20メートル、50メートルの3種のケーブル長におけるコリメーション損失、アライメント損失、パワーペナルティ、およびケーブル損失の4つの損失を積み上げて、目標とするパワーバジェットに対する余裕度 (マージン) を推定した結果である。パワーバジェットの目標値 (7.43 dB) は、IEEE802.3aeの受光感度 (Stressed Receiver Sensitivity: SRS) の数値 (-9 dBm) をもとに、アイセイフティを考慮して、Launch Powerの値 (レーザーの出射パワー: -1.57 dBm) を差し引いた分である (9 dB - 1.57 dB = 7.43 dB)。

コリメーション損失の値 (2.72 dB) は、図5の平均値 (1.36 dB) を2倍にしたもの (ケーブルの両端に結合損失があるため) である。アライメント損失は次の6章で述べる8チャ

ネルのGI型POFを束ねて作られたコネクタの総損失 (4.76 dB) から、各チャンネルの1本のファイバーのコリメーション損失分 (2.72 dB) を差し引いて算出したもの (4.76 dB - 2.72 dB = 2.04 dB) である。つまりコリメーション損失とアライメント損失を足したものが、コネクタ全体の挿入損失量となる。またケーブル長に依存するパワーペナルティ、およびケーブル損失の二つの損失値については、それぞれ図9 (a) および図9 (b) の近似直線から計算で求めた。

例えば、10メートル長のGI型POFにおけるパワーバジェットは、長さに依存しないコネクタの総損失 (4.76 dB) と長さに依存するパワーペナルティ (10メートルで0.11 dB) とケーブル損失 (10メートルで0.38 dB) をすべて合計した値 (5.25 dB) となり、目標バジェット (7.43 dB) に対して、2.18 dBの十分なマージンがあることがわかる。ここで示した10メートルという長さは、家庭用電化製品の室内配線接続には十分な長さであり、また、6.2節のシステム検証で実際に使用したプロトタイプケーブルのサンプル長でもある。

これらの他に4章では、軸ズレ損失 (図6)、ギャップ損失 (図7)、曲げ損失 (図8) の3つのミスアライメントによる結合損失の評価を行ったが、これらによって生じる損失を、図10で示したパワーバジェットのマージンから切り崩していくことになる。マージンの量が多ければ、接続精度が低くても目標に収まるが、マージンが少なく厳しければ、損失を最小限に抑える接続精度が必要となる。

4章で述べた結果からわかるように、この研究で提案し

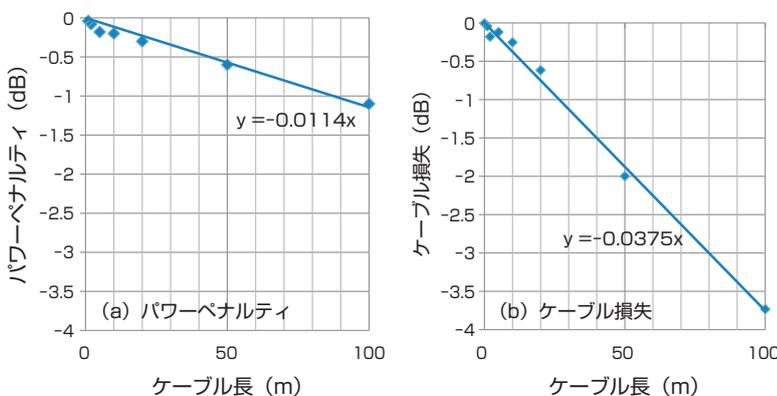


図9 ケーブル長に対するパワーペナルティと損失のデータ
左 (a) : 長さの異なるサンプルのパワーペナルティを実測し、近似直線の数式を求めた。
右 (b) : 光損失とケーブル長の関係を測定し、近似直線を求めた。

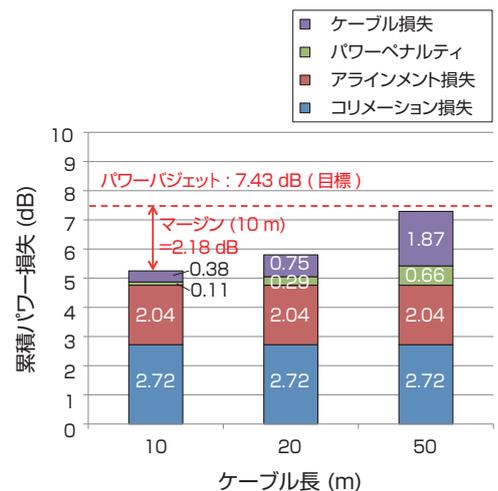


図10 トータルシステムの損失累計とパワーバジェット
損失の測定値を積み上げて累計し、トータルシステムのパワーバジェットに対する余裕度を求めた。10 mでは2 dB以上の余裕があり、20 mまでは問題なし、マージンがほとんどなくなる50 mくらいまで、用途拡大ができると予測できる。

ているボールレンズを端面に装着することによって、ラフな精度で結合しても損失の増大が小さいことから、パワーバジェットのマージンに対する接続精度の設計が楽になり、部品製造工程や品質管理にも良い影響を与え、部品コストを抑えることが可能となる。逆に言えば、ボールレンズがない従来の結合方法の場合には、かなり精度良く接続しないと、パワーバジェット内に収まらないことが想像でき、通信不良を起こす危険性が高く、家庭内での使用はあまり勧められない。要求を満たすために接続精度を高めようとするれば、コストがかかり消費者価格へも影響する上、接続時の取り扱いも難しくなってくる。したがって、本提案システムは家庭内での使用に十分耐えられる性能とコストを持つと考えられ、住宅の通信配線設計において、高い自由度をもっていることを示唆している。

図 10 が示す通り、ケーブルが長くなると、パワーバジェットのマージンが少なくなってくる。長さが 20 メートルになった場合を考えてみると、長くなることで室内にとどまらず部屋間の機器接続も可能となって利用価値が高くなる。パワーバジェットは、5.80 dB とわずかに上昇し、目標に対するマージンが 1.63 dB と若干下がるものの、まだ十分なマージン (1.63 dB) がある。

この研究では住宅内のネットワークへの活用を目指している。これまでのところ、パワーバジェットの目標以下に抑えるには、50 メートルが最長である (図 10)。マージンがほとんどない (0.14 dB) ので、リスクは高くなるが、本提案のボールレンズ方式であれば、ミスアラインメントによる結合損失が非常に少ないので、50 メートルまでの長さであれば十分に期待が持て、ホームネットワーク市場に光通信を実現するための有力候補となり得る。しかし住宅内のネットワークはこれより長い場合もあり、将来的にさらに長いアプリケーション (大きな住宅、集合住宅、オフィス等) にも展開するためには、コネクタのアラインメント損失 (2.04 dB) を低減する改善が課題である。

6 非圧縮映像伝送の検証

6.1 光電ハイブリッド高速映像伝送インターフェース

この章では、開発された光インターコネクタの活用事例として、高精細映像伝送のための光ケーブルとコネクタのプロトタイプを開発し、その妥当性の検証のための映像伝送実験を行ったことを報告する。

高精細映像伝送の光化のためには、映像機器類からの信号出力、それとつなぐ映像機器への入力も光化されていることが前提である。しかし現実問題として、機器の入出力端子が光化されているものは非常に少ない。急にすべてを光化することは難しいため、過渡期として電気信号での

入出力と光での入出力の両方ができるようにしておくことが重要である。

端子は全く電気のまま、伝送路は光に変換して伝送するアクティブ光ケーブル (AOC) も盛んに開発が進んでいるが、我々はもう一歩進んで、映像端子の横に、新たに光端子を設けて、電気だけで接続することも、光と組み合わせて接続することもできる「ハイブリッドコネクタ」のプロトタイプを開発した。

このハイブリッドコネクタは、図 11 に示すような構造になっている。既存の映像電気信号の入出力方法としては、コンテンツ保護を厳格に行っている HDMI が消費者にも一般的に使われていることから、今回のプロトタイプ試作では、HDMI との互換性を重視し、HDMI が規定するものと同様な信号の入出力ができる端子を基本に、その横に並べて、最大 40 Gbps の伝送を可能とした光入出力端子を組み合わせて、コネクタ設計を行った。この光端子の中には、この研究で開発した超小型ボールペン型光インターコネクタが 8 チャンネル組み込まれている。各チャンネルに最大 10 Gbps の信号が流せることから、4 本ずつを双方向で利用すれば、最大 40 Gbps の双方向伝送ができる。

プロトタイプ試作は、オスのコネクタ (プラグ側) とメスのコネクタ (レセプタクル側) をそれぞれ作成した。レセプタクルの左側、プラグの右側に HDMI Type-A と同等のコネクタを付けた。通常のハイビジョン映像を伝送するためにはこちらが使われ、さらなる高精細映像の伝送には、光端子が使われる。

6.2 4K3D非圧縮映像伝送によるシステム検証

この研究で開発したハイブリッドコネクタのプロトタイプを使用して、慶應義塾大学内の施設を利用して、4K3D 60i (画素数 3840 × 2160、立体視左右デュアルストリーム、毎秒 60 フレーム、インターレース) の非圧縮映像を一方向

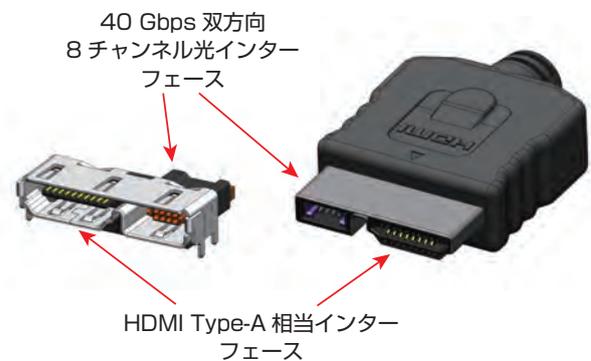


図 11 光電ハイブリッドコネクタ (試作品)

従来のハイビジョン映像伝送用コネクタ「HDMI」と同様の機能を備えながら、さらに高精細な映像を光通信で送受信できる光コネクタを組み合わせたもの。光コネクタには、8本のボールペン型光インターコネクタが組み込まれている。

に、反対方向はフル HD 60p（画素数 1920 × 1080、毎秒 60 フレーム、プログレッシブ）の非圧縮映像を同期させて伝送、同一部屋内の離れた 2 箇所の間で通信を行い、映像が途切れたり止まったりすることがなく、システムとして正常に伝送できる性能を持つことを検証した。

使用した映像は、2010 年に慶應義塾大学と NHK メディアテクノロジー株式会社が共同で制作した約 10 分程度の映像で、米国の Red.com 社の 4K カメラ 2 台を、3D リグを使ってハーフミラーを介してお互いに垂直に配置する 3D 撮影方式で収録を行ったものである。映像は計測技研株式会社の UDR-20S にデータ保存されているものを再生して上映された。

図 12 は、その検証実験におけるデバイスとその接続を示すシステム構成図である。実験は、日吉キャンパスの協生館 3 階に設置されている CDF 教室 (Concurrent Design Facility) において 2012 年 5 月に実施し、非圧縮の 4K3D 映像を正常に伝送できることを確認した。

7 結論

この研究では、ボールペンの製造技術を応用することで、一般家庭における高精細映像の非圧縮伝送に求められる低コストで接続が容易で、かつ安全で信頼性の高い高速光通信システムを提案し実証を行った。具体的には、全フッ素化屈折率分布型プラスチック光ファイバー (GI 型 POF) の端面に、ボールペン製造技術を応用して小型ボールレンズを装着した超小型光インターコネクと、これを複数本組み合わせ合わせた新規コネクタつき光伝送ケーブルのプロトタイプを試作し、高精細映像を実際に流して検証を行った。

我々の提案する全く新しいボールペン型光インターコネ

クトは、POF の末端に直接ボールレンズを装着する形で、超小型化していることが特徴であり、そのまま機器内の基板接続を行うジャンパー線としても使用できるほか、複数本組み合わせることで、高速通信コネクタとすることもでき、その本数や形状の設計も自由度が高い。

また、ボールレンズの装着工程が、ボールペン製造技術を応用しているために、非常に安価に大量生産ができ、かつ実績のある高精度の軸合わせを達成できることから、極めて実現性と完成度の高い技術であるといえる。その性能についてもこの論文の中で示したが、ボールレンズによる接続の容易性、すなわち軸ズレやギャップが生じて、損失を最小限に抑えて結合できることが証明された。パワーバジェットの評価結果では、ケーブル長 50 m を超える中距離伝送、例えば家庭用ネットワークの光化等への活用にあたっては、パワーバジェットに余裕がないため、さらなる損失低減の改善が必要であるが、機器間接続のような短距離では、かなり余裕があることもわかり、実用性の高さを示すことができた。

謝辞

この研究は、総合科学技術会議により制度設計された最先端研究開発支援プログラム (FIRST プログラム) により、日本学術振興会 (JSPS) を通して助成されたものです。また、この研究に用いる評価サンプルの作成にあたって、旭硝子株式会社 AGC 電子カンパニーの渡邊勇仁氏、三菱鉛筆株式会社横浜研究開発センターの三井章仁氏の両氏に感謝申し上げます。なお論文作成にあたっては、慶應義塾大学 SDM 研究所の日比谷孟俊顧問より多大なるアドバイスをいただきました。お礼申し上げます。

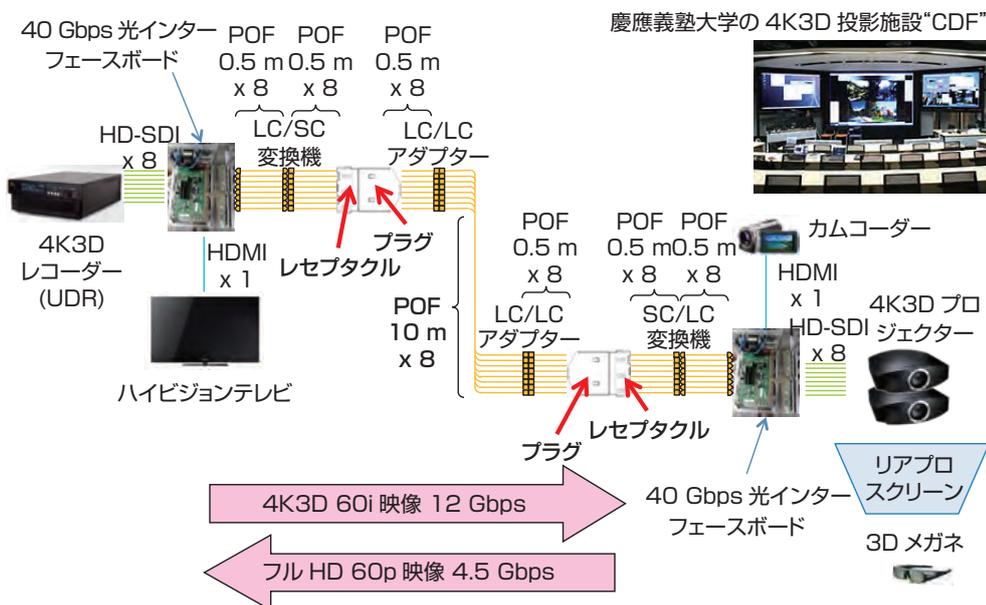


図 12 光電ハイブリッドコネクタを用いた 4K3D 映像伝送検証のシステム構成 8 チャンネルのボールペン型光インターコネクタを用いた 4K3D 高精細立体視映像を一方方向に伝送し、逆方向にハイビジョン映像を返す現場を想定した検証テストを実施。

参考文献

- [1] P. Polishuk: Plastic optical fibers branch out, *IEEE Commun. Mag.*, 44 (9), 140-148 (2006).
- [2] I. Mollers, D. Jager, R. Gaudino, A. Nocivelli, H. Kragl, O. Ziemann, N. Weber, T. Koonen, C. Lezzi, A. Bluschke and S. Randel: Plastic optical fiber technology for reliable home networking: overview and results of the EU project pof-all, *IEEE Commun. Mag.*, 47 (8), 58-68 (2009).
- [3] J. C. Baker and D. N. Payne: Expanded-beam connector design study, *Applied Optics*, 20, 2861-2867 (1981).
- [4] R. J. Pimpinella: A fiber optic connector designed for military optical backplanes, *IEEE Trans. Comp. Hybrids, Manufact. Technol.*, 15 (6), 992-997 (1992).
- [5] Y. Koike and T. Ishigure: High-bandwidth plastic optical fiber for fiber to the display, *J. Lightwave Technol.*, 24 (12), 4541-4553 (2006).
- [6] P. J. Decker, A. Polley, J. H. Kim and S. E. Ralph: Statistical study of graded-index perfluorinated plastic optical fiber, *J. Lightwave Technol.*, 29 (3), 305-315 (2011).
- [7] T. Torikai, T. Yamauchi, S. Mine, N. Moriya, A. Mitsui, H. Suzuki, Y. Watanabe, M. Kanou, H. Takizuka, T. Toma, and Y. Koike: Optical I/O connectors employing ball-point pen type optical collimator lenses suitable for plastic optical fiber communications, *Proc. 21st Int. Conf. POF (POF2012)*, (Atlanta, USA, 2012).

執筆者略歴

当麻 哲哉 (とうま てつや)

1988年、慶應義塾大学大学院理工学研究科応用化学専攻修士課程修了、同年住友スリーエム株式会社入社。2001年米国3M社の製品開発アドバンストスペシャリストとして転籍。2008年より慶應義塾大学大学院システムデザイン・マネジメント研究科准教授。2014年同研究科博士課程修了。博士(システムデザイン・マネジメント学)。この研究を含む内閣府最先端研究開発支援プログラムのサブテーマ「Face-to-Face コミュニケーションシステム開発」のリーダーで、光ホームネットワーク開発プロジェクトを指揮し、この論文の全体の調整と執筆を担当した。



瀧塚 博志 (たきづか ひろし)

1978年慶應義塾大学大学院工学研究科電気工学専攻修士課程修了、同年ソニー株式会社入社。ホームネットワーク技術の開発に従事し、多くの製品を市場に送りだすとともに、家庭向け光インターフェース規格 OP i.Link、広色域規格 xvYCC、映像伝送規格 HDMI 等、さまざまな規格化を推進してきた。2013年6月より、慶應フォトニクス・リサーチ・インスティテュート研究員。この論文では、40 Gbps 光伝送システムの作成、ならびにコネクタ開発とその評価を担当した。



鳥飼 俊敬 (とりかい としたか)

1977年3月鳥取大学電子工学科卒業、4月日本電気株式会社(NEC)入社。2004年まで研究所にて光通信デバイス開発に従事。2004年から2013年まで日本航空電子工業株式会社(JAE)にて、コネクタ、光インターコネクション開発に従事。2013年4月より技術コンサルティングとして独立し、三菱鉛筆株式会社顧問。この論文のボールペン型光インターコネクタの共同発明者であり、光電ハイブリッド型コネクタの開発を担当した。



鈴木 等 (すずき ひとし)

1983年埼玉大学工学部機械工学科卒業、同年三菱鉛筆株式会社入社、機械技術部、米国会社勤務、横浜研究開発センター シャープペングループリーダーを経て、2005年より横浜研究開発センター所長。2013年4月より取締役。この論文では、ボールペン型光インターフェースの開発チームの統括指揮を担当した。



小木 哲朗 (おぎ てつろう)

1986年東京大学大学院工学系研究科修士課程修了。同年三菱総合研究所入社。1994年東京大学大学院工学系研究科博士課程修了。博士(工学)。1996年東京大学大学院工学系研究科助教授、2004年筑波大学大学院システム情報工学研究科准教授、2008年より慶應義塾大学大学院システムデザイン・マネジメント研究科教授。システム工学、VR、ヒューマンインタフェース等の研究に従事。この論文では研究全体に対する助言とサポート体制の構築を担当した。



小池 康博 (こいけ やすひろ)

1982年慶應義塾大学大学院工学研究科応用化学専攻博士課程修了。1997年より慶應義塾大学教授。フォトニクスポリマーを専門とし、屈折率分布型プラスチック光ファイバー(GI型POF)、高輝度光散乱ポリマー導光体(HSOT)、ゼロ複屈折ポリマー等を発明。2010年より内閣府最先端研究開発支援プログラムとして、Face-to-Face コミュニケーションシステム開発の中心研究者としてプロジェクトを指揮。Society of Plastics Engineers (SPE) の International Engineering and Technology Award、藤原科学財団藤原賞、紫綬褒章を受章。慶應義塾評議員。この論文の基本的アイデアであるGI型POFとボールペン技術の融合は小池のオリジナルの発明。全体の指揮統括を担当した。



査読者との議論

議論1 全般

質問・コメント(小林 直人:早稲田大学研究戦略センター)

この論文は、家庭用高精細映像光伝送システムを実現するにあたり、高性能、簡便、安価、安全等の極めて厳しい要求を満たす技術として、ボールペン製造技術を利用したボールレンズとプラスチック・ファイバーを組み合わせた光インターコネクタを実現し、実際の高精細映像伝送システムの実証実験を行った成果を示しています。要素技術としてもユニークであるとともに、それらを統合してシステムに組み込んで実証したと言う点で十分価値の高い論文であり、シンセシオロジー誌に相応しい論文と考えられます。

質問・コメント(石川 浩:産業技術総合研究所)

ボールペン技術による低コストの光結合はPOF普及に向けての重要な開発成果だと高く評価します。また、異業種交流の場がこの技術開発のきっかけになったことは興味ある事実だと思います。

議論2 シナリオについて

質問・コメント(赤松 幹之:産業技術総合研究所)

この技術は、フッ素化GI型POFとボールペン型インターコネクタを組合せによって実現したことがポイントであり、そのシナリオが2章に書かれています。2章の前半の数段落でGI型POFのメリットが書かれ、第6段落で「POFを使ってボールレンズ装着はあり得なかった」としてあります。第7段落以降ではボールコネクタの話になり、第

9段落で「偶然にGI型POFの存在に触れ」と書かれています。前半を読んでいると、POFありきで、コネクタ技術を模索していたように書かれています。その一方で後半では、ボールコネクタの低コストを目指してボールペン型を見いだしたが、スリーブに石英ファイバーでは入らない問題を解決するものとしてPOFを発見したように書かれています。POF→ボールコネクタというシナリオと、ボールコネクタ→POFという逆向きのシナリオが併存して書かれており、読者が混乱すると思います。本当はどちらむきだったのか、あるいは実際には同時並行だったのかなど、シナリオを明確に記載して下さい。

回答（当麻 哲哉）

全く別の流れで開発をしていた二つのグループが、ある時点で偶然にお互いの共通点に気づき合流したことで、この研究が始まっております。記述をわかりやすく書きなおしました。

議論3 プラスチック・ファイバーの波長や帯域制限について

質問・コメント（石川 浩）

POFは0.8 μm帯で使われると思いますが、使用する波長をどこかに書いておいた方が良いと思います。また、大多数の読者は、SI-POF、GI-POFの帯域が制限される要因を知らないと思いますので帯域が制限される理由を簡単に説明されると良いと思います。私自身、石英ファイバーについてはわかりますが、POFの分散等の値についてよく知りません。

回答（当麻 哲哉）

通常のアクリルポリマーでは、水素-炭素結合の吸収が赤外にあるため、可視光領域に制限されますが、全フッ素化ポリマーを使用することにより、赤外の吸収が下がります。今回は850 nmを使っており（4.1に記載）が、700 nm～1300 nmの範囲では、石英と同じ波長でも問題ありませんし、むしろ石英より材料分散が小さいために、より高速の伝送が可能となります。また、SI型の場合は、光の経路によって、中心を直進する光と、コアとクラッドの界面を全反射しながら伝搬する光に、行路差が生じ、伝搬スピードに差が出るために、パルスがブロードに広がる欠点があります。しかし屈折率分布をつけたGI型の場合、光は全反射せずにコア内をサインカーブを描きながら最速経路を経由するように通り抜け、入射光の角度によらず同じ速度で伝搬するため、帯域を広く取ることができます。

議論4 ボールペン技術について

質問・コメント（小林 直人）

この研究では、①ボールペン製造技術を利用したレンズシステムの採用と②プラスチック・ファイバーの組み合わせ、が極めて重要なキー

テクノロジーだったと思います。実験結果も極めて良好ですが、今回特にこのような技術を実現する上で困難な点があったのであれば教えていただきたいと思います。

回答（当麻 哲哉）

この論文にあるように、プラスチック光ファイバーを、かきめて固定するのは容易でしたが、損失を発生させずに固定するかきめ方法の最適化には苦労しました。

議論5 異業種との交流

質問・コメント（小林 直人）

この研究のエッセンスであるボールペン製造技術を利用して光インターコネクタをした点について、この技術を生み出すには異業種との交流が重要だったとの指摘がありました。今後、このような異業種間の連携によりイノベーションを生み出すための積極的・意識的な方法についての考えがあればお教え下さい。

回答（当麻 哲哉）

異業種交流の場において、お互いの技術を一段高いレベルで抽象化して、概念的に見ることで共通する点を見つけ出すことが大切だと思います。システムの要素を物理的な視点と、機能的な視点とで抽象化することによって、新しい発想が生まれてくるものと考えます。

議論6 無線技術との競合

質問・コメント（小林 直人）

2020年の東京オリンピック等も視野に入れ、今後家庭内でも高精細映像伝送のニーズは高くなると思われませんが、一方でLTE等の無線技術が急速に進展しています。その結果高精細映像伝送等の特別な場合を除いて、光ファイバーは家庭まで信号を伝送すればよく、家庭内は無線という考えもあるようです。今後の家庭内での光通信と無線通信の競合・棲み分けについての考えがあればぜひお聞かせ下さい。

回答（当麻 哲哉）

無線は有線に比べ転送スピードが遅く、環境により通信品質が大きく変わるため、4Kや8KのSHVを非圧縮で伝送するのに必要とされる10 Gbps以上の伝送は困難です。また高周波（数十GHz）になればなるほど環境の影響を受けやすく、人が通るだけでも伝送できなくなる場合があり、壁を超えるのも難しいのが無線の現状です。10 Gbpsを超える高速転送では、無線のメリットはないと考えます。また、有線に比べ、無線はセキュリティの確保に手間が必要となります。