

令和 5 年度研究開発成果概要書

採 択 番 号 05001

研究開発課題名 エラーフリーPOF による革新的通信システムの開発

(1) 研究開発の目的

エラーフリーPOF により、多値変調方式による 1 レーン 50 Gbps 級のデータ通信を、現在必要とされている FEC (Forward error correction) 等の誤り訂正機能を用いずに実現する通信技術の確立を目指す。さらに、エラーフリーPOF の一括成型による多心化技術を確立する。既存の誤り訂正方式を採用した通信システムとの性能比較を行い、信頼性、転送性能、消費電力、通信遅延等の点において、エラーフリーPOF 伝送システムが優れていることを実証する。

(2) 研究開発期間

令和 4 年度から令和 5 年度 (2 年間)

(3) 受託者

学校法人慶應義塾<代表研究者>

(4) 研究開発予算 (契約額)

令和 4 年度から令和 5 年度までの総額 897 百万円 (令和 5 年度 399 百万円)
※百万円未満切り上げ

(5) 研究開発項目と担当

研究開発項目 1 エラーフリーPOF による革新的通信システムの開発 (学校法人慶應義塾)
研究開発項目 1-a) エラーフリーPOF の多心化技術の確立
研究開発項目 1-b) エラーフリーPOF のための新規光トランシーバーの開発
研究開発項目 1-c) Beyond 5G に向けた分散 MEC 環境の構築

(6) 特許出願、外部発表等

		累計 (件)	当該年度 (件)
特許出願	国内出願	2	2
	外国出願	0	0
外部発表等	研究論文	3	3
	その他研究発表	29	19
	標準化提案・採択	1	1
	プレスリリース・報道	2	1
	展示会	10	6
	受賞・表彰	0	0

(7) 具体的な実施内容と最終成果

研究開発項目 1 エラーフリーPOF による革新的通信システムの開発

研究開発項目 1-a) エラーフリーPOF の多心化技術の確立

多心用のコア・クラッド複合ダイを設計、製作し、既設の小型押出装置を改良することで、多心 POF (以下マルチコアシート) 用の溶融押出装置を立ち上げ、試作を実施した。本装置は、

コア、クラッド、オーバークラッドの3種類の材料を用い、同時に一括で溶融押出することにより、複数のコア、クラッドが一列に精度よく並び矩形のマルチコアシートを成形することができる。コア、クラッド材として特定の全フッ素材料を、オーバークラッド材は、ポリカーボネート系材料を選定しロッド状に加工した。押出条件（溶融粘度、押出温度、窒素圧力等）を種々検討し、3層4心のマルチコアシートの試作を繰り返した結果、目標通り、コア・クラッド・オーバークラッドの3層からなる矩形のマルチコアシートを得ることができた。複数のコアは、ほぼ一直線に並び、コア径約 $50\mu\text{m}$ 、その間隔も約 $250\mu\text{m}$ に制御できることを確認した。更に吐出圧力のばらつきを抑えたダイス流路の改善を行うことで、目的のマルチコアシートを試作できる事を確認した。

本マルチコアシート一括成型技術は、現行のガラス光ファイバーの複数の煩雑なフェルルール作製工程を大幅に簡略化できるため、極めて低コストでの社会実装が可能となるキーテクノロジーとして期待できる。

また、規格に準拠した従来のガラス光ファイバー用の MT (Mechanically Transferable) コネクターと互換性を有し、マルチコアシートを簡単に挿入・固定化できる構造の新規 MT コネクターを設計し、プロトタイプの新規 MT コネクターを光造形法により試作した。既に考案したマルチコアシートと新規 MT コネクターのアセンブル方法に準じ、試作したマルチコアシートと新規 MT コネクターを挿入することで、両端にコネクターが付いた多心光ケーブル（マルチコア光ケーブル）を初めて試作することができた。

更に、多心（4心、8心、12心・・・）の一括コネクター接続するための特許を令和5年9月に2件出願した。従来は、1本1本の光ファイバーのフェルルール内のアラインメントなど、極めて煩雑な工程が必要であったが、それらが不要となる一括成型コネクターの重要な特許である。

研究開発項目 1-b) エラーフリーPOFのための新規光トランシーバーの開発

データセンター用途の1レーン 53.125 Gb/s の PAM4 伝送を想定して、エラーフリー POF の伝送評価が可能な光トランシーバーを試作した。試作には市販の QSFP 光モジュールを用い、エラーフリーPOFを接続できるように光モジュールを加工した。光源は波長 850 nm の面発光レーザ (VCSEL) である。このトランシーバーに長さ 10 m のエラーフリー POF を接続して伝送実験を行った。その結果、FEC を用いずに 72 時間にわたってエラーフリー伝送が実証された。この結果は、エラーフリーPOFにより 10^{-15} 以下のビットエラーレートを達成できることを示している。この値は一般的なエラーフリー伝送の基準である 10^{-12} のビットエラーレートよりも3桁以上低い性能であり、エラーフリーPOFによる極めて安定な PAM4 伝送が実証された。以上の成果は 2024 年 1 月の国際会議 SPIE Photonics West で発表された。さらに、現在、学術雑誌への投稿を準備している。

また、本研究開発項目では、新規光トランシーバーのための新規レンズ系の設計、試作を進めている。光学特性が異なる種々のレンズ系を試作し、エラーフリーPOFへの光結合条件およびデータ伝送特性を比較評価した。これにより、高いエラーフリー性能と軸ずれ耐性を実現する新規レンズ系の設計指針が得られてきている。また、光トランシーバーの性能は光源である VCSEL の特性にも依存する。そこで、種々の VCSEL を用いた場合のエラーフリーPOFのデータ伝送特性を比較評価し、VCSEL の選定を行った。以上述べたように、レンズ系の最適化および VCSEL の選定により、より低いビットエラーレートを達成する光トランシーバーの開発を目指している。

研究開発項目 1-c) Beyond 5G に向けた分散 MEC 環境の構築

エラーフリーPOF を用いた次世代通信の実現に向けた取り組みでは、高速かつ低ビットエラーレート(BER)を実現するエラーフリーPOF 通信の実用化を目指し、2つの目標を設定している。1つ目はエラーフリーPOF の優位性を検証するためのテストベッド環境の構築であり、2つ目はエラーフリーPOF に最適な codec の研究開発である。

この目標を達成するために、まず PAM4 通信に対応した FPGA ボード(VCU129 評価ボード)上に BER 計測が可能な通信評価環境を構築した。この環境で、銅ケーブルおよびガラス光ファイバーケーブルを用いた BER 測定を実施し、従来ケーブルの性能を確認した結果、10 の⁻⁷乗オーダーの高いエラー率とチャネル間での BER の差異が大きいことが判明した。さらに、FEC(Forward Error Correction)機能の ON/OFF を柔軟に制御できる環境も構築した。

また、データセンターで POF を利用するためには NIC (Network Interface Card)が必要となるが、そのための通信試験環境と NIC の研究開発環境を1つの評価ボード(VPK120)で構築した。また、VPK120 評価ボードには PCIe Gen5 x8 スロットが搭載されており、コンピュータと接続することで NIC の研究開発が可能となる。

さらに、codec 単独でクロック埋込、DC バランス、エラー検出、及びエラー訂正ができる 4b10b codec を IEC TC100/TA 18 において IEC PT 63455 として国際標準化を行った。2023 年 11 月に IEC TC100/TA 18 の加盟国の投票により CDV が承認され、ほぼ国際標準となっている。2024 年中には、国際標準(FDIS)として出版される予定である。

現在の FPGA クラスタを光ネットワークで構成し、そのエラー検出機構がどの程度のエネルギーを消費しているかを調査した。稼働中の FPGA クラスタ (M-KUBOS クラスタ) のネットワークを光インターコネクต์に置き換え、エラー検出機構がどの程度のオーバーヘッドかを実機計測した。その結果、電力については、CRC をチェックすることにより 3%増加することがわかった。一方、転送時間は CRC の分をデータに回すことで 5.8%短くなる。全体として約 8.6% (すなわち $(100\% - 3\%) \times (100\% - 5.8\%)$) のエネルギー効率の向上が観測された。現在利用している FPGA クラスタは、CRC によるエラー検出のみを考慮している。エラーフリーPOF により、FEC をなくすことが出来れば、効果はさらに大きくなることが期待される。

(8) 研究開発成果の展開・普及等に向けた計画・展望

本研究開発課題は、2024 年度より採択番号 08001 (エラーフリーPOF による革新的通信システムの開発) へ移行し、当初の最終目標達成に向けて研究開発を継続する。

令和 6 年度の年度計画は以下の通りである。

- 研究開発項目 1-a) エラーフリーPOF の多心化技術の確立
 - ✓ マルチコアシートの試作を進め、その評価をもとに改良を行う。
- 研究開発項目 1-b) エラーフリーPOF のための新規光トランシーバーの開発
 - ✓ 多心エラーフリーPOF を新規光トランシーバーに接続して通信実験を行い、1 レーン 50 Gbps (25 Gbaud PAM4) の FEC 無しエラーフリー伝送を検証する。

- 研究開発項目 1-c) Beyond 5G に向けた分散 MEC 環境の構築
 - ✓ 開発したシステムで転送試験を行い、その時点で可能なソフトウェアシステムの構築を行う。
 - ✓ エラーフリーPOF 用ネットワークチップの設計および検証を行う。