

# 超高速・低消費電力光ネットワーク技術の研究開発 (課題 I (d) マルチコアファイバ光接続技術)

The Research and Development Project for the Ultra-high-speed and Green Photonic Networks  
(Multi-core fiber optical connection technology)

## 研究代表者

坂本 健一 株式会社日立製作所 研究開発グループ 情報通信イノベーションセンタ  
Kenichi Sakamoto, Center for Technology Innovation- Information, Research & Development Group,  
Hitachi, Ltd.

## 研究分担者

李英根

Yong Lee

株式会社日立製作所 研究開発グループ エレクトロニクスイノベーションセンタ  
Center for Technology Innovation- Electronics, Research & Development Group, Hitachi, Ltd.

研究期間 平成 24 年度～平成 26 年度

## 概要

本研究開発では、マルチコアファイバを用いた光スイッチ冗長系による高密度大容量伝送と高信頼を同時に実現するネットワーク構成を提案し、本ネットワークを実現するために必要な各種マルチコアファイバ接続技術ならびにマルチコアファイバリンク対応の自動光経路切替技術を開発した。さらに、これらの技術を用いて、マルチコアファイバリンクにおける通信障害回復実験を行い、高速（50msec 以下）に通信が回復することを実証した。

## 1. まえがき

我が国のインターネット通信量は大幅な伸びを続けており、今後も大幅な増加が予想されている。同時に、これまでの通信機器を単純に高速化した場合、伝送する情報量の増加に比例して通信機器の消費電力も大幅に増加することとなる。そのため、大量の情報を高速かつ低消費電力で伝送できる通信方式や通信機器が求められている。また、災害時等におけるネットワークの途絶といった通信環境の激変に対しても、必要な通信を維持できるネットワークの構築が必要である。これらの課題を解消するため、伝送方式の高性能化や新型ファイバの導入等により、ネットワーク全体の超高速化、低消費電力化、耐災害性の強化を同時に実現する技術を確認し、国民生活の利便向上と地球温暖化対策に貢献する。特に、本研究開発の目的は、膨大な情報が常時流れるデータセンタ間、及びデータセンタ内におけるサーバ間などを複数の物理的な通信経路を有するマルチコアファイバで集約して接続し、且つ膨大な情報をマルチコアファイバの各通信経路に割り振る多重・分散化により、高速大容量化を実現することである。さらに、マルチコアファイバの余剰コアを冗長経路として確保することで、災害時に迅速な復旧が可能なネットワークの構築を可能となる技術を開発することである。

本研究開発では、マルチコアファイバを用いた光スイッチ冗長系による高密度大容量伝送と高信頼を同時に実現するネットワーク構成を提案した。さらに、本ネットワークを実現するために必要な各種マルチコアファイバ接続技術ならびにマルチコアファイバリンク対応の自動光経路切替技術を開発し、これらの技術を用いて、マルチコアファイバリンクにおける通信障害回復実験を行い、高速（50msec 以下）に通信が回復することを実証した。

## 2. 研究開発内容及び成果

本研究で提案している大容量かつ高信頼な光通信ネットワークの基本構造（P-to-P 光ネットワーク）を図 1 に示す。P-to-P ネットワークの送信部と受信部の各ノードに光経路切替装置を配置する。この光経路切替装置では、マルチコアファイバへの信号の多重分離機能に加え、伝送路に障害が生じた場合、内蔵の光スイッチにより正常な伝送路へ経路を自動的に切替える。マルチコアファイバは、複数のコア（伝送路）を有するため、信号線のほかに余剰コアを冗長用に割り当てることが可能となる。

本ネットワークを構築するためには、光経路切替装置の他に、複数の信号をマルチコアファイバに多重する、またはマルチコアファイバから分離するために必要なファンイン・ファンアウトデバイスが必要である。さらに、マルチコアファイバ同士を接続するためのマルチコアファイバコネクタが必要である。以下、これらについて詳細を述べる。

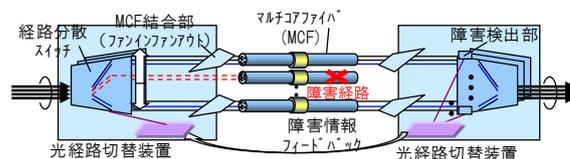
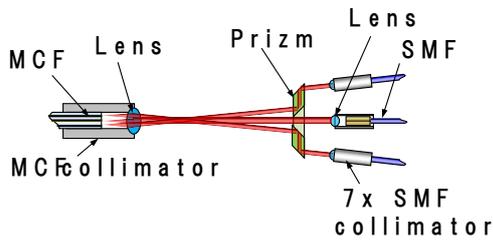


図 1 提案したマルチコアファイバを利用した大容量・高信頼光ネットワークシステム。

はじめに、ファンアウト・ファンイン(FI/FO)デバイスに関して説明する。FI/FO デバイスの基本構造図と試作した 7 コアマルチコアファイバ用 FI/FO デバイスをそれぞれ図 2 (a),(b)に示す。



(a)



(b)

図 2 (a) FI/FO デバイスの基本構造と(b)試作した FI/FO デバイス (7 コアマルチコアファイバ用)。

FI/FO デバイスの基本構造は空間光学型である。本方式は下記のようなメリットを有するため、採用した。

- 1) 広い波長帯域で動作可能である。
- 2) マルチコアファイバの任意のコア数、コア配置に対応でき、デザインのフレキシブル性が高い。
- 3) アイソレータなどの他の素子を容易に集積できるため、機能を拡張できる。

図 3 に FI/FO デバイスの挿入損失測定結果(青)を示す。各チャネルで目標値の 0.5dB 以下を達成した。

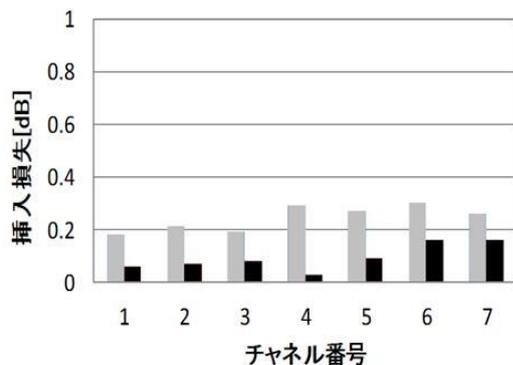


図 3 FI/FO デバイスの挿入損失測定結果 (青) と SC 型マルチコアファイバコネクタの挿入損失 (赤)。

図 4 (a),(b)には、波長 1.31  $\mu\text{m}$  と 1.55  $\mu\text{m}$  に対する上から挿入損失、損失の偏波依存性(PDL)、クロストークの測定結果を示す。測定したサンプル数は 22 個である。本結果では、挿入損失は 0.7dB 以下、PDL は 0.1dB 以下、クロストークは 50dB 以下であった。挿入損失が 0.5dB 以上になっている理由は、マルチコアファイバコネクタの損失も含まれているためである。各特性において、サンプル間で均一な特性が得られた。

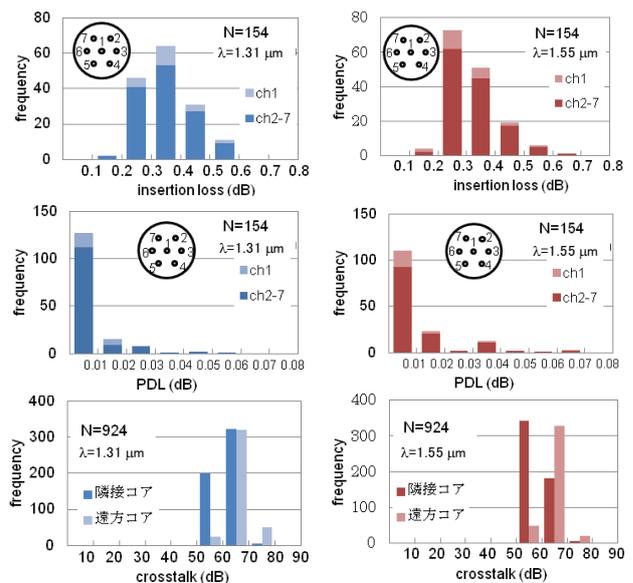


図 4 (a) 波長 1.31  $\mu\text{m}$  に対する上から挿入損失、損失の偏波依存性(PDL)、クロストークの測定結果。(b) 波長 1.55  $\mu\text{m}$  に対する上から挿入損失、損失の偏波依存性(PDL)、クロストークの測定結果。

図 5 に試作したマルチコアファイバコネクタを示す。現在、世の中で最も広く使用されている SC 型コネクタをベースに試作した。マルチコアファイバの回転を抑制するため、金属の板バネを SC 型コネクタに加工して取り付けた。この方式により、位置合せに必要なフローティング機構を維持しつつ、回転抑圧機能を追加することができる。本コネクタの挿入損失の測定結果を図 3 に示す (黒)。目標値の 0.5dB 以下を達成した。図 6 (a),(b)には、波長 1.31  $\mu\text{m}$  と 1.55  $\mu\text{m}$  に対する上から挿入損失、損失の偏波依存性(PDL)、着脱再現性の測定結果を示す。測定したサンプル数は 32 個である。本結果では、挿入損失は 0.5dB 以下、PDL は 0.1dB 以下、着脱再現性は 0.4dB 以下であった。各特性において、サンプル間で均一な特性が得られた。



図 5 SC 型マルチコアファイバコネクタ。

図 7 に FI/FO デバイスとマルチコアファイバコネクタの長期温度サイクル試験結果を示す。試験条件は、0 度から 65 度の温度サイクル試験を 11 サンプルに対して行い、300 サイクル (1250 時間相当) で目標の挿入損失変動 0,2dB 以下であることを確認した。

A

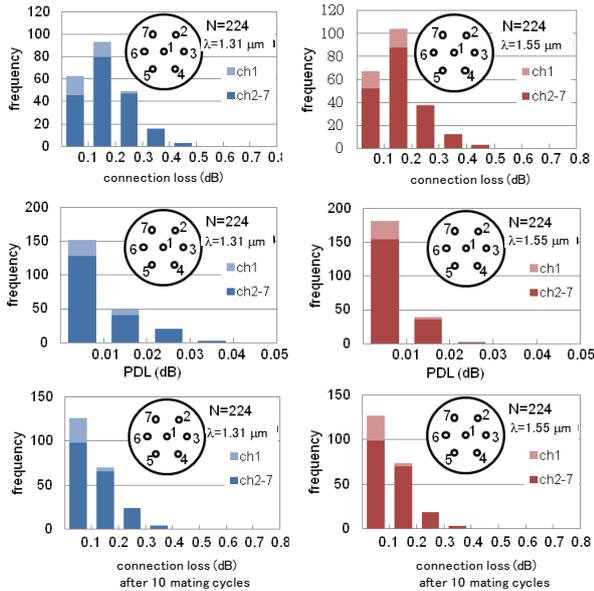


図 6 (a) 波長 1.31  $\mu\text{m}$  に対する上から挿入損失、損失の偏波依存性(PDL)、着脱再現性の測定結果。(b) 波長 1.55  $\mu\text{m}$  に対する上から挿入損失、損失の偏波依存性(PDL)、着脱再現性の測定結果。

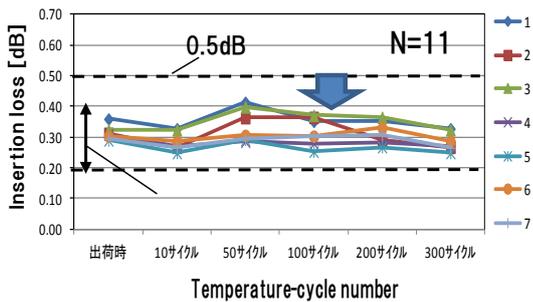


図 7 FI/FO デバイスとマルチコアファイバコネクタの長期温度サイクル試験結果。



(a)

	SC型	LC型
サイズ [mm <sup>2</sup> ]	9 x 7.5	4 x 5
挿入損失 [dB]	< 0.5	< 0.4
PDL [dB]	< 0.03	< 0.01
着脱再現性 [dB]	< 0.4	< 0.5

(b)

図 8 (a) L 型マルチコアファイバコネクタと (b) その性能表

さらに、追加成果として、LC 型マルチコアファイバコネクタを試作した。LC 型コネクタは、データセンタで最も用いられているコネクタであり、SC 型コネクタより小型である。図 8 (a) に試作した LC 型マルチコアファイバコネクタを示す。図 8 (b) に試作した LC 型コネクタとその性能を示す。比較のために、SC 型コネクタとその性能も示す。構造は、SC 型コネクタと同様に、金属板バネ方式を採用した。挿入損失、PDL、着脱再現性共に、SC 型コネクタと遜色のない性能が得られた。

次に、光経路切替装置について説明する。試作した光経路切替装置を図 9 に示す。本装置は、主に、伝送路の障害検出部、光経路切替部、信号線の多重・分離部 (ファンイン・ファンアウトデバイス)、冗長化経路切替アルゴリズムを搭載した部分から構成される。サイズは、データセンタで標準の 19 インチラックに収まる大きさである (3U 相当)。



図 9 試作した光経路切替装置。

評価したネットワークは、冗長化に有利なリングネットワークである。今回は、図 10 に示す 2 重リングのネットワークを用いて、伝送障害時における信号回復実験を行った。構成は、6 つの各ノードに光経路切替装置を配置し、その装置間を 7 コアのマルチコアファイバで接続した。本リングネットワークのように複数のノードを有するため、クラスター (図 10 の UnitZ) が伝送路の監視をする方式を採用した。各ノードの光経路切替装置から、常時伝送路の状態をクラスターに非同期で送信する。クラスターは、その伝送路の情報を基に、伝送路の切替が必要かどうかの判断をし、必要であれば、各光経路切替装置へ経路切替の命令信号を送信し、信号を回復させる。非同期でクラスターとノード間で情報のやり取りを行うことで、ネットワークの拡張は容易にできる。

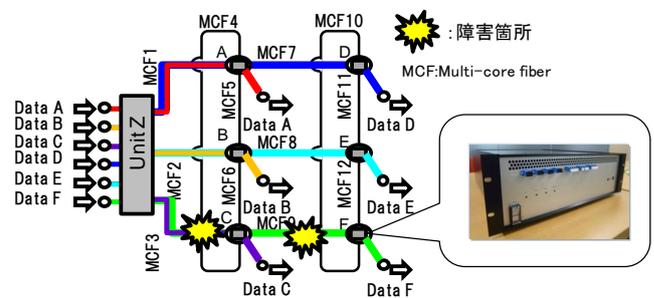


図 10 2 重リングマルチコアファイバネットワーク (3x2)。

図 10 の系を用いて行った伝送路の障害時における信号回復実験結果を図 11(a),(b)に示す。図 11(a)は、伝送路の 2 箇所伝送障害 (ファイバ断) が生じた場合の自動的に信号が回復している様子を示している。この場合、1 障害当りの回復時間は約 10msec 以下であった。また、10 Gbps の高速信号を用いて、光経路切替前後での信号の品質を評価した。図 4(b)に、信号のアイ波形とビットエラーレートの測定結果を示す。光経路切替前後で、信号の品質が保持されていることが分かる。

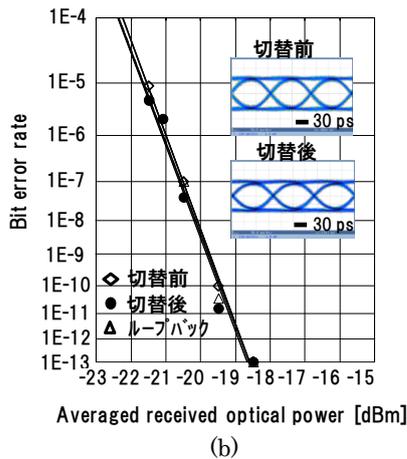
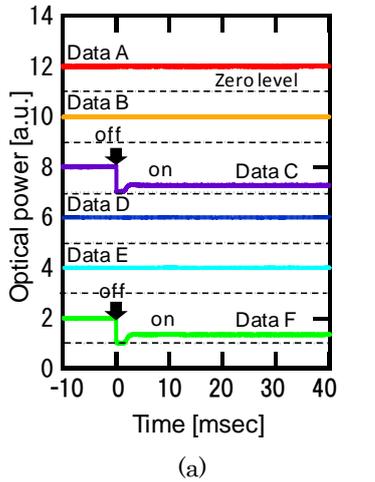
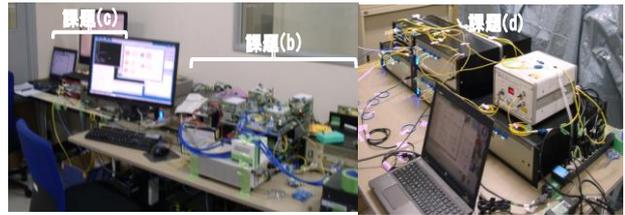
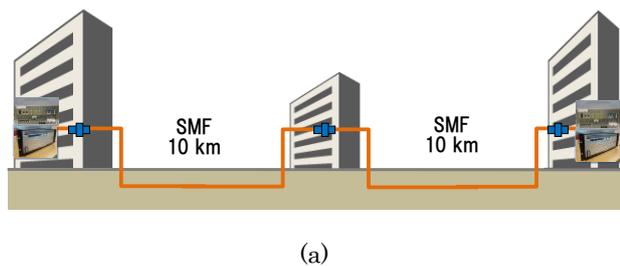


図 11 (a) 伝送障害時における光経路切替動作 (b) 光経路切替前後における信号のアイ波形とビットエラーレート。

本課題で試作した光経路切替装置と課題 I (b)と(c)の試作装置の性能や接続性を実使用に近い環境で評価するフィールド実証試験を北海道札幌市で実施した (図 12)。



(b)

図 12 課題間連携フィールド試験:(a)敷設ファイバ外略図, (b)現場の様子

図 13 に課題 (b)と (d)の連携実験系を示す。400 ギガビット/秒の光多値送信器から 1 波長 112 ギガビット/秒 (ポーレート: 28 ギガビット/秒, 多値数: 16 値で 28 ギガビット/秒×4=112 ギガビット/秒) の信号を 4 波長多重し、20 km の敷設光ファイバで伝送する。その後、経路切替装置を通して光多値送信器で受信し、誤り率、16 値 APSK 波形を測定した。経路切替は MCF1 を光断した単発障害である。図 14 に単発障害による経路切替前後の 16 値 APSK 波形を示す。経路切替前後で大きな変化は見られなかった。また、経路切替前後の受信機の平均パワーは、それぞれ、-2 dBm と -8.9 dBm であった。また、経路切替前後誤り率は、それぞれ、 $2.77\text{E-}3$  と  $3.3\text{E-}3$  であった。経路切替後の誤り率は、経路切替前と比較して多少劣化しているものの、誤り訂正回路によって修正可能な誤り率の閾値の  $4\text{E-}3$  以上である。この結果より、通信障害時に経路が切替った際でも、エラーフリーで伝送可能であることを実証した。

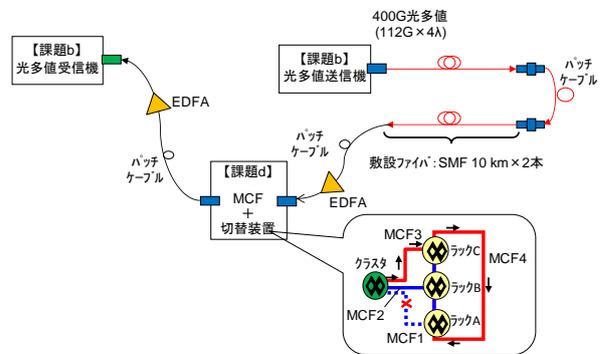


図 13 課題 (b)と (d)の連携実験系

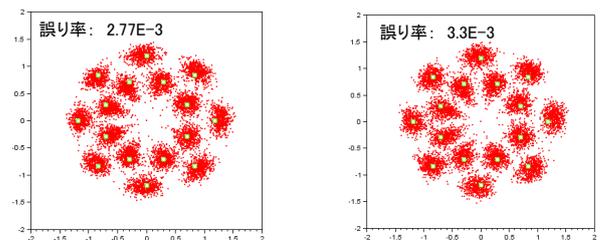


図 14 経路切替前後の 16APSK 波形の測定結果 (a)経路切替前 (誤り率: $2.77\text{E-}3$ ), (b)経路切替後 (誤り率: $3.3\text{E-}3$ )。

課題(c)と(d)間連携の実験系を図 15 に示す。IXIA から出た 10 ギガビット/秒のデータ信号を EDFA で増幅した後、経路切替装置、敷設光ファイバ 20 km を通して、IXIA で受信してエラー数を測定した。本実験は、通信障害による一時データ不通の装置(c)のリンク多重機能への影響を評価するために行った。経路切替は MCF1 を光断した単発障害である。

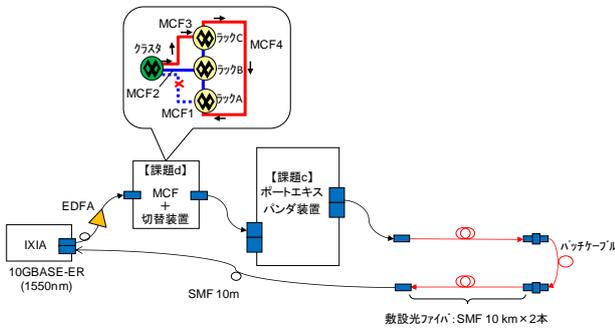


図 15 連携実験：課題(c)、(d)の順で接続した場合の単発障害時の信号回復実験系。

図 16 に IXIA の受信信号における積算誤り数の時間変化を示す (図 16(b))。比較のために 10 m 伝送に対する結果 (図 16(a)) も示す。通信中断時 (経路切替中) でエラーが 4 つまで増え、通信の回復後 (経路切替後) ではエラー数の増加は見られなかった。通信障害により通信が一時中断しても、その回復後迅速にリンク多重機能が動作していることが分かる。また、通信中断中でのエラーの増加数は 10m 伝送場合と 20 km 伝送の場合で大きな差は見られなかった。

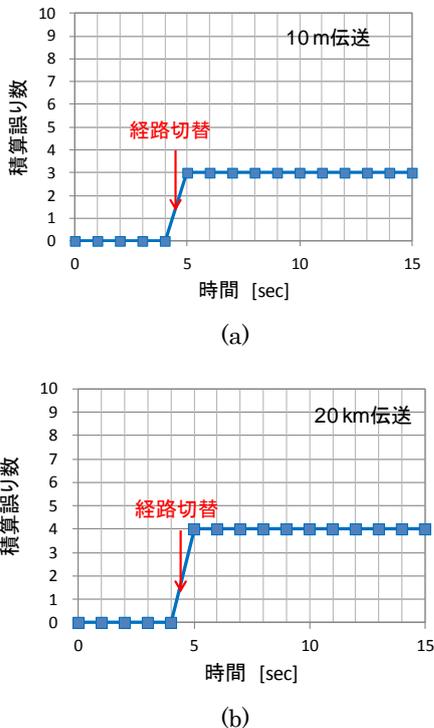


図 16 IXIA の受信信号における積算誤り数の時間変化の測定結果：(a)10 m 伝送，(b)20 km 伝送。

### 3. 今後の研究開発成果の展開及び波及効果創出への取り組み

本課題では研究開発成果の普及促進に向けて、学会発表、フィールド試験、新聞発表などの活動を行った。

学会発表に関しては、国内外の招待講演 5 件を含む計 10 件の発表を行い、積極的に本研究の成果の発信を行った。この中で、H25 光ネットワーク産業・技術研究会 (招待講演) では、データセンタに関する著名な発表者と共にパネルディスカッションのパネラーとして参加し、マルチコアファイバ技術のデータセンタへの適用の可能性に関してインプットできたことは大きい。また、EXAT の研究会にも招待され、NICT の別のプロジェクトで進められている他のマルチコアファイバ研究グループへ、直接成果をアピールできたことは、お互いの技術の発展に有意義であった。発表のみでなく、海外の論文誌への投稿も積極的に行い、IEEE の著名な論文誌である IEEE Photonics Technology Letters と IEEE Journal of Lightwave Technology に計 3 件すでに掲載されたことは、世の中に早く、広く本研究成果を発信する点で大きな成果と考える。因みに、IEEE Photonics Technology Letters に掲載した論文は、査読者から、世の中のマルチコアファイバ技術中でトップクラスの成果であるとの高い評価を得た。

フィールド試験に関しては、実用化をアピールするため、課題 I(b)と(c)と連携実験を北海道札幌市の敷設ファイバを用いて実験を行った。その結果を弊社ニュースリリース (日立製作所、「大規模・分散型データセンター向け大容量・高信頼伝送技術を開発」、平成 26 年 3 月 9 日) として発表した。さらに、本発表の内容は 3 月 10 日付けで日経新聞、日経産業新聞、化学工業日報、電波新聞の 4 紙に掲載されるなど広い反響があり、本研究開発の成果を広くアピールすることができた。課題(d)への反響の 1 つとして、ファイバメーカーから打合せを設けて今後の計画などについて質問された。

今年度から、社内の伝送装置事業部と連携し、これまで開発したマルチコアファイバ接続技術を活用して、次世代のデータセンタ向け大容量伝送装置に適用可能な高密度光配線技術の開発を行うことを予定している。装置内または装置間における光配線において、今後、配線数の増大が予想され、高密度配線技術の必要性が高まってきている。そこで、高密度配線に適したマルチコアファイバ技術の必要性が認識されつつある。本研究で培ったマルチコアファイバ技術を基に、装置内または装置間の光配線の高密度配線技術の適用性の検討を事業部と一体となって開始し、製品展開を加速する。予想される波及効果として、これまで、マルチコアファイバ技術は長距離光伝送応用を主要なターゲットとして開発が進められてきたが、新たに短距離光伝送応用も加わることで、マルチコアファイバ技術の開発がさらに活性化されると予想される。将来本格的に始まると予想される標準化を有利に進めるために、これからの成果を外に発信することで、仲間作りを行っていく。

本研究成果である光経路切替装置ならびにマルチコアファイバ接続デバイス (ファンイン・ファンアウトデバイス) とマルチコアファイバコネクタに関しては、内外問わず、適用先を継続して探索していく。

#### 4. むすび

本研究開発では、マルチコアファイバを用いた光スイッチ冗長系による高密度大容量伝送と高信頼を同時に実現するネットワーク構成を提案し、本ネットワークを実現するために必要な各種マルチコアファイバ接続技術ならびにマルチコアファイバリンク対応の自動光経路切替技術を開発した。

7 コアを有するマルチコアファイバを用いて、ファンイン・ファンアウトデバイスと SC 型コネクタを設計ならびに試作し、各々の光結合（接続）損失が 0.5dB 以下であることを確認した。信頼性に関しては、ファンイン・ファンアウトデバイスと SC 型コネクタ共に、温度サイクル(0～65 度)の長期試験(300 サイクル、1250 時間)を行い、接続損失変動が目標の 0.2dB 以下であることを実証した。さらに、コネクタに関しては、SC 型より小型でかつデータセンタで広く用いられている LC 型コネクタの開発も行い、本課題で開発した SC 型コネクタと同等の特性（接続損失 0.5dB 以下など）が得られることを確認した。

ファイバの障害に対する高信頼化を実現する高機能切替制御方式として、複数のマルチコアファイバの障害時に自動で信号回復が可能な冗長化経路切替アルゴリズムを開発し、光経路切替装置にそのアルゴリズムを搭載し、経路切替機能を検証した。具体的には、六つのノードの各ノードに光経路切替装置を配置し、各光経路切替装置をマルチコアファイバで接続して、マルチコアファイバリングネットワークを構築した。そして、複数（最大 4 本）のマルチコアファイバを断線させ、信号が 50 ミリ秒以下で回復することを実証した。

#### 【本研究開発課題を掲載したホームページ】

<http://www.hitachi.co.jp/New/cnews/month/2015/03/0309.html>

#### 【査読付発表論文リスト】

- [1] Y. Lee, K. Tanaka, K. Hiruma, E. Nomoto, T. Sugawara, and H. Arimoto, “Experimental Demonstration of a Highly Reliable Multicore-Fiber-Based Optical Network”, IEEE Photonics Technology Letters, Vol. 26, No. 6, pp. 538-540 (2014).
- [2] K. Tanaka, Y. Lee, E. Nomoto, T. Sugawara, and H. Arimoto, “Experimental Evaluation of Recovery from Multiple Failures in Multicore Fiber Links Using FPGA-based Optical Switch Units”, IEEE Journal of Lightwave Technology, Vol. 33, No. 1, pp. 201-211 (2015).
- [3] E. Nomoto, K. Hiruma, T. Sugawara, K. Tanaka, and, “Connectors for optical fibres and cables,” SC-type multi-core optical-fiber connectors using a pressurization spring,” Optical Review, DOI: 10.1007/s10043-015-0.127-0 (2015).

#### 【報道掲載リスト】

- [1] “データ通信速度 4 倍に”、日経新聞、2015 年 3 月 10 日。
- [2] “毎秒 400 ギガビット高速通信技術 日立、データセンタ向け”、日経産業新聞、2015 年 3 月 10 日。
- [3] “大規模・分散型データセンター向け 日立が大容量・高信頼伝送技術”、電波新聞、2015 年 3 月 10 日。