

高速インターコネクト用低コスト アクティブオプティカルケーブル

Cost-effective Active Optical Cable for High-speed Interconnects

● 八木澤孝俊

● 大工原 治

● 小宮山武司

● 井出 聡

あらまし

コンピュータの演算能力向上に伴い、スーパーコンピュータやハイエンドサーバでは、コンピュータ間の相互接続(インターコネクト)がますます重要になっている。従来、それらは電気ケーブルにより電氣的に接続されていたが、信号の高速化に伴う伝送可能距離の低下により、近年では光で信号を送送するアクティブオプティカルケーブル(AOC)が適用され始めている。AOCでは、光ファイバーの広帯域特性により信号の伝送距離は飛躍的に伸びる一方で、高コストであることが課題である。

本稿では、富士通研究所の光モジュール低コスト化技術を活用して富士通コンポーネントが開発した高速インターコネクト用AOCについて述べる。本開発では、100 Gbps (25 Gbps×4チャンネル)動作に向けて、安価な14 Gbps向けの面発光レーザーを25 Gbpsで動作させるオーバードライブ技術と、汎用的なフレキシブル基板を用いた安価な構造で光部品のパッシブアライメント実装を実現する技術を適用した。これらの技術を用いたAOCは、2015年8月に世界で初めてInfiniBand EDRに認定された。

Abstract

Interconnects have become more important in high-performance computing systems and high-end servers in line with improvements in computing power. Recently, active optical cables (AOCs) have started being used for this purpose instead of the conventional copper cables. AOCs make it possible to dramatically extend the transmission distance of high-speed signals due to their broadband characteristics; however, they tend to cause an increase in cost. This paper reports on our developed AOC utilizing cost-effective optical-module technologies developed by Fujitsu Laboratories. These are an over-drive technology that enables 100 Gbps (25 Gbps × 4-channel) operation with low-cost 14 Gbps vertical-cavity surface-emitting lasers (VCSELs) and a unique structure using generally used flexible printed circuits that enables low-cost assembly with a passive alignment. The developed AOCs were approved for the world's first InfiniBand EDR (enhanced data rate of InfiniBand, a computer-networking communications standard) in August 2015.

まえがき

IoT (Internet of Things) やビッグデータ解析、深層学習による人工知能や仮想現実 (VR: Virtual Reality)・拡張現実 (AR: Augmented Reality) など、センシング情報や画像を含む大量のデジタルデータの効率的な活用が、スーパーコンピュータやハイエンドサーバの飛躍的な性能向上によって進展してきている。演算を行うCPUにおいては、半導体プロセスの微細化による高速化や、複数のCPUコアを搭載したマルチコア化・メニーコア化により、演算能力を飛躍的に向上させている。それに伴い、CPU間やコンピュータ間のデータ転送量も飛躍的に増大し、信号伝送の高速化・並列化が進んでいる。

近年、このコンピュータ間の相互接続 (インターコネクト) には、従来の電気ケーブルに代わって光による信号伝送ケーブル、いわゆるアクティブオプティカルケーブル (AOC) が用いられるようになってきた。電気ケーブルでは、信号の高速化に伴い伝送距離が低下する。例えば、今後導入が進む100 Gbps伝送を実現する25 Gbps×4チャンネル伝送では数m程度が限度となっており、これ以上の伝送距離ではAOCの導入が必須となっている。

一方で、大容量データを一括で伝送できるAOCの安価な調達強く求められている。スーパーコンピュータのノード数やデータセンターを構成するサーバ数の増大に伴い、より多くのケーブルが

ノード間やサーバ・スイッチ間を接続するために必要となっているためである。

本稿では、富士通研究所の光モジュール低コスト化技術を活かして開発した富士通コンポーネントのQSFP28 (Quad Small Form-factor Pluggable)⁽¹⁾ AOCについて述べる。QSFP28は、100 Gbps 光モジュールのフォームファクタを規定した標準規格である。本AOCは、世界で初めて100 Gbps 高速伝送信号の標準規格であるInfiniband EDR (Enhanced Data Rate)⁽²⁾ の認証を2015年8月に取得した。

AOC低コスト化に向けたアプローチ

AOCの低コスト化に向けたアプローチを議論するため、まずAOCの構造と機能について説明する。AOCの機能ブロックを図-1に示す。AOCの機能ブロックは、リタイマー IC、電気から光、光から電気への相互変換およびマルチモードファイバー (MMF) への光結合を行う光エンジン部、およびMMFから成る。光モジュールに入力された電気信号は、リタイマー ICで再生整形され、光エンジンに入力される。光エンジンに入力された電圧信号は、ドライバICで電流信号に変換され、この電流がVCSEL (Vertical Cavity Surface-emitting Laser: 面発光レーザー) を駆動することで光信号に変換される。光信号は、光結合部を介してMMFに結合される。MMFを伝送された光信号は、PD (Photo Diode: 光受光素子) で電流信号に変換さ

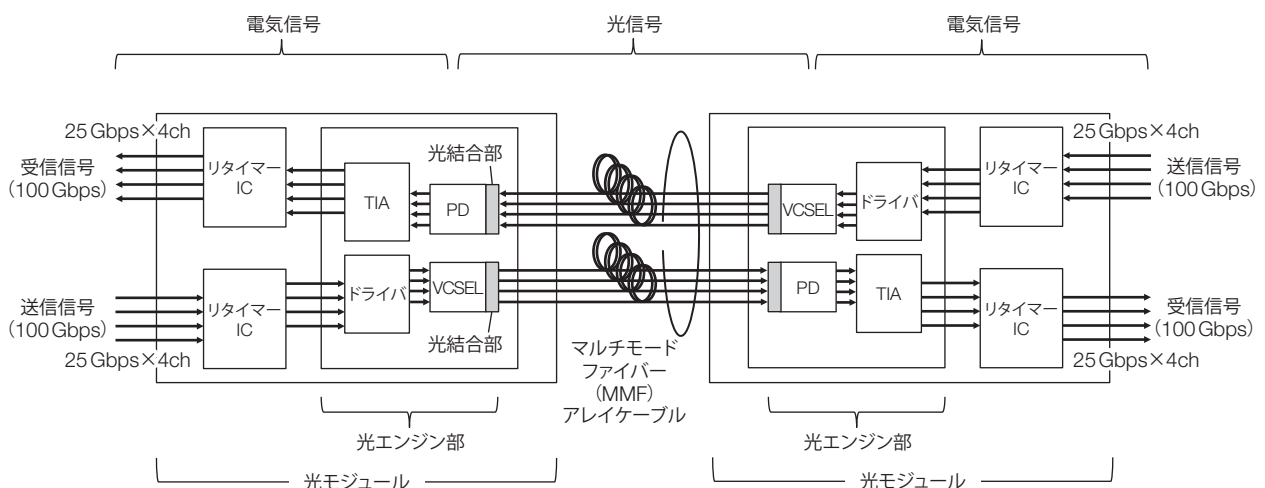


図-1 AOC機能ブロック図

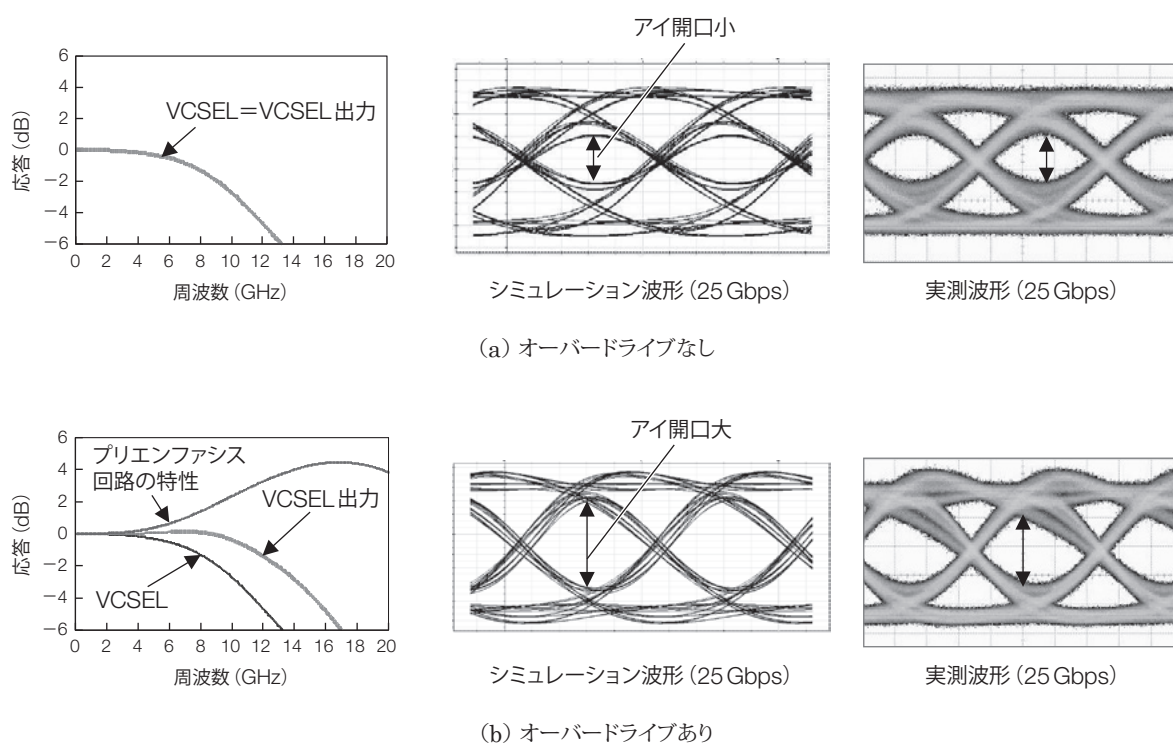


図-2 VCSELオーバードライブ技術

れ、TIA（Transimpedance Amplifier）ICで電圧信号に変換され、リタイマー ICで再生整形されて出力される。このようにして、100 Gbps AOCでは25 Gbps×4チャネルの信号が双方向に伝送される。

光エンジン部について、富士通研究所が開発した二つの技術を製品に展開することにより、低コストのAOCを実現した。一つは、100 Gbps(25 Gbps×4チャネル)動作に向けて、一世代前の安価な14 Gbps向けVCSELを高速動作させるオーバードライブ技術の開発である。もう一つは、汎用的なFPC（Flexible Printed Circuit：フレキシブル基板）を用いた安価な構造で、レンズおよび光導波路のパッシブアライメント実装^(注1)を可能にする低コスト実装技術の開発である。併せて、富士通研究所の設計技術を活用して富士通コンポーネント製AOCに適用した、高速伝送可能なFPCコネクタも開発した。

回路技術：VCSELオーバードライブ

本章では、VCSELオーバードライブ技術について述べる。オーバードライブ技術は、富士通研究

(注1) レーザーを光らせることなく、光結合の光軸を合わせることを。

所が開発した安価な低速のVCSELを高速駆動する技術^{(3),(4)}である。VCSELの高速特性は、その光学特性のみならず、寄生抵抗（R）、寄生容量（C）によるRC時定数により制限されるため、複雑な周波数特性を有する。高速動作を実現するためには、VCSELの帯域不足を補償可能な高速性および柔軟性に優れたプリエンファシス技術が必須となる。

VCSELオーバードライブによる高速化の効果をアイパターン^(注2)により検証した結果を図-2に示す。オーバードライブなしの場合 {同図 (a)}、波形のアイ開口が小さいが、オーバードライブありの場合 {同図 (b)}、波形が十分に開口していることが確認できた。この技術を用いることにより、一世代前の安価な14 Gbps VCSELを25 Gbpsで動作させることができる。また、フィールドでの実績もあり、高信頼性が認められているVCSELを使用することから、信頼性の面でも利点大きい。

富士通コンポーネントでは、この技術を用いた

(注2) 0レベルと1レベルから成るバイナリデータの時間変化を周期的に重ね書きしたもの。その形状が目に見えることからアイパターンと呼ばれ、データエラーの少ない通信にはその目（アイ）が開いていることが求められる。

ドライバICおよびTIA ICを内製化することにより、AOCの低コスト化を実現した。

実装技術：FPCを用いた光エンジン

本章では、富士通コンポーネントが採用した光エンジン部の構造について、低コスト化に適した実装技術とともに述べる。

開発した光エンジン部の構造を図-3に示す。光エンジンの電気回路部は、FPCの配線上に4チャンネルVCSELアレイ、ドライバIC、4チャンネルPD、およびTIAがフリップチップボンディングにより搭載された構造である。一方、光エンジンの光学結合部は、VCSELから出射された光信号をレンズと光導波路を介してMMFに結合し、更にMMFから入射した光信号を光導波路とレンズを介してPDに結合する構造である。FPCの裏面からインプリント技術により製造されたマイクロレンズフィルム⁽⁵⁾を貼り合わせ、更に45°ミラーが形成されたポリマー光導波路⁽⁶⁾を貼り合わせた構造となっている。ポリマー光導波路の端部には、開発したレンズ付きフェルールを介してMMFに接続する⁽⁷⁾。

まず、開発したレンズ付きフェルールについて述べる。従来は、ポリマー光導波路用コネクタには研磨工程が必要なPMTコネクタが用いられ

ていた。しかし、研磨工程はコスト増大の要因となるため、端面結合がなく研磨が不要なレンズ付きフェルール構造を開発した。その成形には、材料として実績のあるオレフィン樹脂を用いた富士通コンポーネントの超高精度射出成形技術を適用した⁽⁸⁾。

次に、この構造の光部品の実装に適用している、FPCを用いたパッシブアライメント技術について述べる。一般的な光部品では、レーザーを発光させて光結合系の位置を合わせるアクティブアライメント実装が用いられる。アクティブアライメントは、光パワーをモニタしながら位置を合わせるため特殊な製造設備が必要になることと、位置合わせに時間を要するため生産性が上がらないことが課題であった。その課題を解決するために、レーザーを発光させずに光結合系の位置を合わせて固定するパッシブアライメント実装を実現する構造を開発することにより、高歩留まりな製造を実現した^{(6), (9)}。

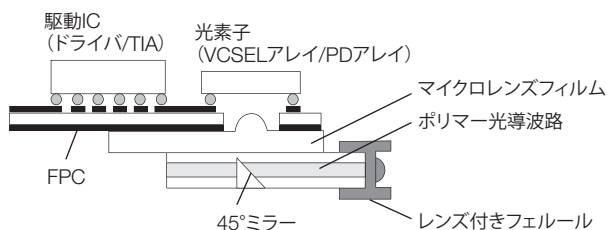
モジュール化技術

本章では、光エンジンの電気接続端子をモジュール基板に接続するために開発した高速伝送適用可能な小型・高密度のFPCコネクタを中心に、QSFP28モジュール開発について述べる。

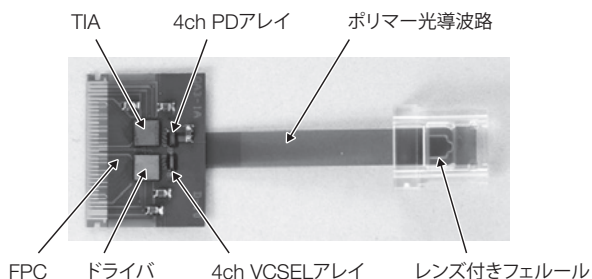
前述したように、光インターコネクでは多チャンネル並列伝送を用いるため、小型・高密度の電気接続が必要となる。富士通コンポーネントは、富士通研究所と共同で、25 Gbps以上の信号を劣化なく伝送できるFPCコネクタを開発した^{(10), (11)}。開発のポイントを以下に示す。

- (1) 端子による共振発生を抑制するために、端子長を短く設計
- (2) 突起部がオープスタブとして振る舞うことによる特性劣化を抑制するために、突起部を複数の短い突起に分割した新構造の採用
- (3) FPC上のランド部での反射増加を低減するために、寄生容量を低減した構造を採用

本コネクタは、一般的なFPCコネクタと同様の方法で製造が可能でありながら、40 GHz以上の高速伝送特性を実現した。FPCコネクタに25 Gbpsの信号を伝送させても信号劣化はほとんど発生せず、40 Gbpsの伝送においても波形劣化は軽



(a) 構造模式図(側面断面図)

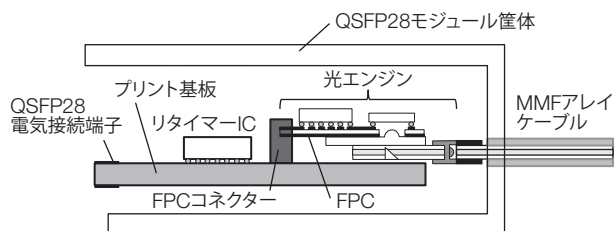


(b) 外観写真(上面図)

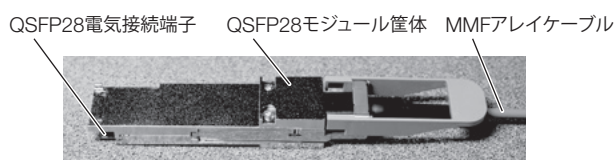
図-3 開発した光エンジン部の構造

微であることを確認した。

開発したFPCコネクタを用いたモジュール構造を図-4 (a) に示す。図-3に示した光エンジン構造をプリント基板の上に搭載したFPCコネクタで電気接続する。この電気接続には、送信4チャンネルと受信4チャンネルの高速電気信号、電源供給、お



(a) 構造模式図 (側面断面図)



(b) モジュール部外観 (斜視図)

図-4 開発したQSFP28モジュール

よび駆動IC制御信号が含まれる。モジュール基板には、以下の回路を形成している。

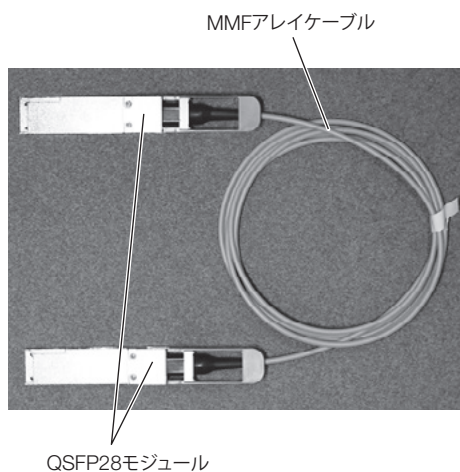
- (1) ホスト側との高速電気信号を再生整形するためのリタイマー IC (送信側および受信側)
- (2) 外部との制御インターフェース対応とモジュール内部制御のためのマイクロコントローラおよびEEPROM (不揮発メモリ) から成る制御回路 (図には示していない)
- (3) 電源安定供給回路 (図には示していない)

開発したQSFP28のモジュール外観写真を図-4 (b) に示す。

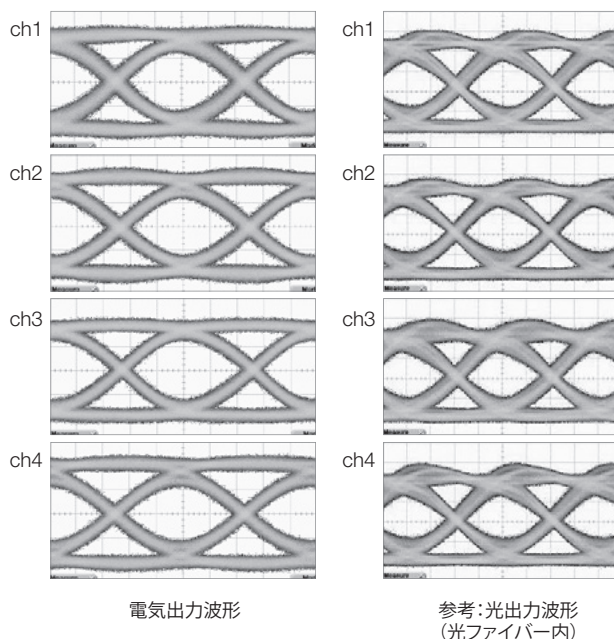
AOCの特性

開発したAOCの外観を図-5 (a) に示す。MMFアレイケーブルの両端をそれぞれQSFP28モジュールで終端し、電気から光、光から電気への相互変換を行う。MMFの伝送特性限界から、25 Gbps×4チャンネル、トータル100 Gbpsの伝送を100 mまでの距離で可能としている。各モジュールで独立して送受信するため、双方向での100 Gbps伝送が可能となる。

特性例を図-5 (b) に示す。AOCの外部との高速信号インターフェースで、良好なアイ開口を持つ



(a) AOC外観



(b) AOC特性例

図-5 開発した100 G QSFP28 AOC

電気出力波形 (25.78125 Gbps) が得られた。信号誤り率は、仕様として 10^{-12} 以下であるが、4チャンネルとも 10^{-15} 以下の良好な特性が確認できた。また、片端のモジュールのみを試験し光波形を観測したところ、図-5 (b) 左にあるように良好なアイ開口を持つ結果が得られており、オーバードライブの効果が現れている。

む す び

本稿では、低コスト化に着目して新しい技術を適用し、100 Gbps (25 Gbps×4チャンネル) QSFP28 AOCの開発について述べた。

VCSELオーバードライブおよびFPCを用いた光エンジン構造は、本AOCに限らず、今後ますます需要が増大すると予想される小型・高密度の高速光モジュールに適用できる技術であり、更なる展開を図っていく。

参考文献

- (1) 富士通コンポーネント：世界初 100 Gbps対応マルチモードQSFP28アクティブ・オプティカル・ケーブルを開発。
<http://www.fujitsu.com/jp/group/fcl/resources/news/press-releases/2014/20140122.html>
- (2) INFIBAND：Networking for Hyperconverged Integrated Systems.
<http://www.infinibandta.org/>
- (3) Y. Tsunoda et al.：25-Gb/s Transmitter for Optical Interconnection with 10-Gb/s VCSEL Using Dual Peak-Tunable Pre-Emphasis. The Optical Fiber Commun. Conf. (OFC), Los Angeles, CA, March, 2011, Th3C.3.
- (4) M. Sugawara et al.：Novel VCSEL driving technique with virtual back termination for high-speed optical interconnection. The International Society for Optics and Photonics. (SPIE), Vol.8267, February, 2012.
- (5) T. Shiraishi et al.：Cost-effective Low-Loss Flexible Optical Engine with Microlens-imprinted Film for High-speed On-board optical Interconnection. IEEE Electronic Components and Technol. Conf. (ECTC), San Diego, CA, May 2012, p.1505-1510.

- (6) T. Shiraishi et al.：Cost-effective On-board Optical Interconnection using Waveguide Sheet with Flexible Printed Circuit Optical Engine. The Optical Fiber Commun. Conf. (OFC), Los Angeles, CA, March, 2011, OTuQ5.T.
- (7) T. Shiraishi et al.：24-ch microlens-integrated no-polish connector for optical interconnection with polymer waveguides. The International Society for Optics and Photonics. (SPIE), Vol.8630, February, 2013.
- (8) 大工原 治：3次元ポリマー導波路を応用した並列光トランシーバ. 第22回エレクトロニクス実装学会講演大会予稿集, 17B-01, 2009.
- (9) T. Yagisawa et al.：Structure of 25-Gb/s Optical Engine for QSFP Enabling High-Precision Passive Alignment of Optical Assembly. IEEE Electronic Components and Technol. Conf. (ECTC), Las Vegas, NV, May 2016, p.1099-1104.
- (10) 富士通コンポーネント：440 Gbps対応FPCコネクタFCN-152J形サンプル供給開始。
<http://www.fujitsu.com/jp/group/fcl/resources/news/press-releases/2013/20131126.html>
- (11) T. Yagisawa et al.：FPC-Based Compact 25-Gb/s Optical Transceiver Module for Optical Interconnect Utilizing Novel High-Speed FPC Connector. IEEE Electronic Components and Technol. Conf. (ECTC), Las Vegas, NV, May 2013, p.274-279.

著者紹介



八木澤孝俊 (やぎさわ たかし)

富士通コンポーネント (株)
AOC開発設計部
光エンジンおよびAOCの技術開発、製品化に従事。



大工原 治 (だいくはら おさむ)

富士通コンポーネント (株)
AOC開発設計部
AOC技術開発、および製品化に従事。



小宮山武司 (こみやま たけし)

富士通コンポーネント（株）
AOC開発設計部
光エンジン実装技術開発に従事。



井出 聡 (いで さとし)

富士通コンポーネント（株）
AOC開発設計部
IC，およびAOCの技術開発，製品化に
従事。