T2R2 東京科学大学 リサーチリポジトリ
Science Tokyo Research Repository

論文 / 著書情報
Article / Book Information

論題	データセンター光インタコネクション技術
Title	
著者	那須秀行, 井出 聡, 小山二三夫
Authors	FUMIO KOYAMA
出典	電子情報通信学会誌, Vol. 106, No. 2, pp. 106-113
Citation	The Journal of Institute of Electronics, Information and Communication Engineers, Vol. 106, No. 2, pp. 106-113
発行日 / Pub. date	2023, 2
権利情報 / Copyright	本著作物の著作権は電子情報通信学会に帰属します。 Copyright(c) 2023 IEICE

Powered by T2R2 (Science Tokyo Research Repository)

データセンター光インタコネクション技術

Optical Interconnections for Datacenter Networks

那須秀行　井出　聡　小山二三夫

Abstract

データセンタートラヒックの急増に伴い，ネットワークの大容量化及び低消費電力化が急務となっている．フロントパネルに接続する従来型のプラガブル光トランシーバの高速化，小形化も進み，Tbit/s 級のトランシーバの規格も議論されている．一方，スイッチ LSI の極近傍に配置する超小形の CPO（Co-Packaged Optics）光トランシーバなど，新たな形態の光トランシーバ開発が世界中で活発に進められている．本稿では，プラガブル光トランシーバ及び次世代光トランシーバを中心に光インタコネクトの最近の技術動向を概説する．

キーワード：データセンター，光インタコネクト，光トランシーバ，光実装

1. は　じ　め　に

インターネットトラヒックの爆発的な増加により，データセンターはいわゆる「ゼタバイト時代」に突入し，クラウドコンピューティングの成長は，コンピューティング，及びストレージリソースへの膨大なアクセスの必要性をもたらしている．そのトラヒックの 70% 以上がデータセンター内のトラヒックであり，近距離の高速・大容量データ伝送の重要性が増し，光ファイバを伝送媒体とした光インタコネクションが大きな役割を果たしている[1]．一方，データセンターの消費電力も重要な問題として顕在化してきた．将来のデータセンター内のインタコネクションは，より少ない消費電力でより多くのデータを伝送することが必須である．データセンターの光リンクは，一般的に，光トランシーバを装置に挿入し，光ファイバケーブルのコネクタをそれに挿入して接続する．この形式のプラガブルトランシーバについて，高速化，小形化が進み，コヒーレント方式を用いた Tbit/s 級のトランシーバも議論されている[2]．一方，プラガブル光トランシーバにも限界が見えており，本小特集 1「データセンターネットワークの最新動向」の図 7(d) に示されるように，スイッチ LSI の極近傍に配置する超小形の CPO（Co-Packaged Optics）光トランシーバなど，新たな形態の光トランシーバ開発が世界中で活発に進められている[3]．本稿では，プラガブル光トランシーバ及び次世代光トランシーバを中心に光インタコネクトの最近の技術動向について概説する．

2. プラガブル光トランシーバ

2.1　光トランシーバの進展

プラガブル光トランシーバの外観を図 1 に示す．データセンターにおける光リンクは，光トランシーバをスイッチ装置フロントパネルに挿入し，光ファイバケーブルのコネクタをそれに挿入して接続する．この形態を「プラガブル光トランシーバ」と言う．標準化やマルチベンダ化が進み，コスト面で優位であることから，データセンターにおいて広く利用されている．

プラガブル光トランシーバの形状（Form Factor）に関する技術動向を図 2 に示す．高速化と高集積化により，光トランシーバのサイズ（面積）当りの伝送帯域は 10 年で約 10 倍の向上を実現している．近年では，QSFP56-DD をはじめとする 400 Gbit/s 光トランシーバ

那須秀行　正員：シニア会員　古河電気工業株式会社研究開発本部
E-mail　hideyuki.nasu@furukawaelectric.com
井出　聡　富士通オプティカルコンポーネンツ株式会社先行技術開発センター
E-mail　ide.satoshi@fujitsu.com
小山二三夫　正員：フェロー　東京工業大学科学技術創成研究院
E-mail　koyama@pi.titech.ac.jp
Hideyuki NASU, Senior Member (R&D Division, Furukawa Electric Co., Ltd., Ichihara-shi, 290-8555 Japan), Satoshi IDE, Nonmember (Advanced Technologies Research Center, Fujitsu Optical Components Ltd., Kawasaki-shi, 211-8588 Japan), and Fumio KOYAMA, Fellow (Institute of Innovative Research, Tokyo Institute of Technology, Yokohama-shi, 226-8503 Japan).
電子情報通信学会誌　Vol.106 No.2 pp.106-113 2023 年 2 月
©電子情報通信学会 2023

の実用化が進み，更には次世代の 800 G，1.6 T 伝送に対応した規格も複数（QSFP-DD800，OSFP）立ち上がりつつある[(4),(5)]．

2.2　低消費電力化と高速化

消費電力については，光トランシーバの世代を重ねるとともに低電力化技術が進展し，bit 当りの消費電力は 20 pJ/bit 以下を実現している．光トランシーバの消費電力と面積の関係を図 3 に示す．放熱特性の目安となる面積当りの消費電力は，従来 1～2 W/inch^2 であったが，400 Gbit/s 光トランシーバでは 4 W/inch^2 に及び，次世代の 800 G，1.6 T 世代では更に増大する見通しである．今後，光トランシーバの低消費電力化技術がますます重要になるとともに，スイッチ装置での高効率放熱の実現も不可欠となる．

電気インタフェース技術を表 1 に示す[(6)]．接続するスイッチ装置の入出力の速度向上に合わせ，光トランシーバの電気インタフェース高速化が必要となる．最新の実用化は変調速度 28 Gbaud/s，多値変調（PAM : Pulse Amplitude Modulation）技術でレーン当り 56 Gbit/s，400 Gbit/s 電気インタフェースは×8 レーンで構成される．

光インタフェースの技術動向を，図 4 に示す[(7),(8)]．サーバ間等の短距離（<100 m）では多モードファイバ（MMF），データセンター内（500 m～10 km）用途では単一モードファイバ（SMF）が用いられ，変調方式は距離に応じて最適な方式を用いる．400 G 光インタフェースでは，変調速度 56 Gbaud/s，PAM 技術を用いて波長当り 112 Gbit/s，×4 波長分割多重（WDM :

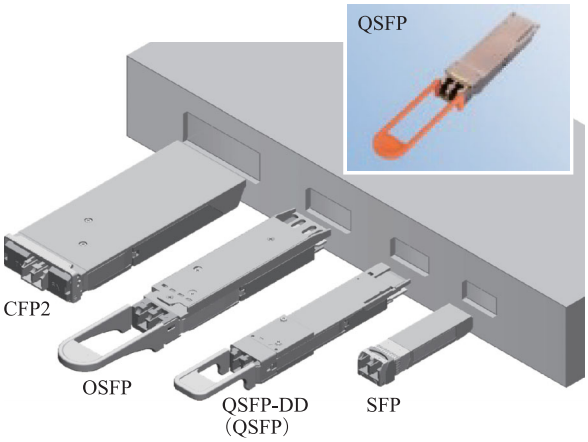


図 1　プラガブル光トランシーバの外観　スイッチ装置のフロントパネルに挿入する形式の光トランシーバ．

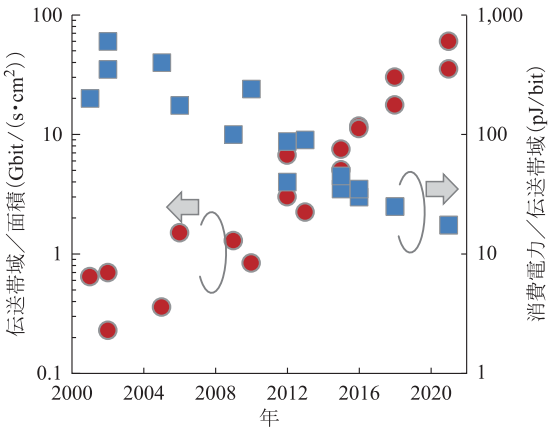


図 2　光トランシーバ Form Factor の技術動向　プラガブル光トランシーバの Form Factor は，世代を重ねるごとに，高速化と高集積化が進み，併せて低電力化も進展している．

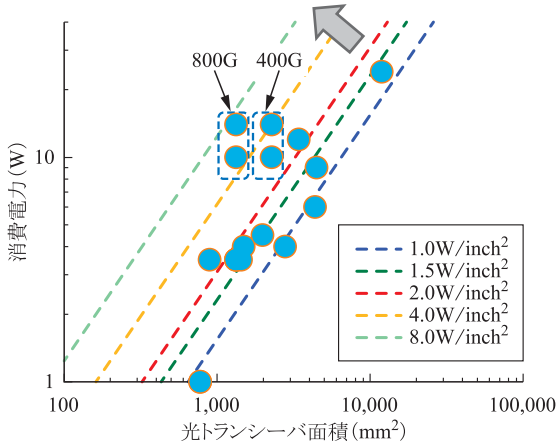


図 3　光トランシーバの消費電力とサイズ　光トランシーバの面積当りの消費電力は徐々に上昇し，放熱が次第に困難となることから，低消費電力化技術がますます重要となる．

表 1　電気インタフェース技術　スイッチ装置入出力の速度向上に合わせて，光トランシーバの電気インタフェース高速化が必要となる．

	2010	2012	2014	2016	2018	2020	2022	202?
スイッチ総伝送帯域	640G	1.28T	3.2T	6.4T	12.8T	25.6T	51.2T	102T?
スイッチ入出力数	×64	×128		×256		×512		TBD
スイッチ入出力速度	11G		28G		56G		112G	TBD
電気インタフェース	11G (NRZ)		28G (NRZ)		56G (PAM4)		112G (PAM4)	TBD

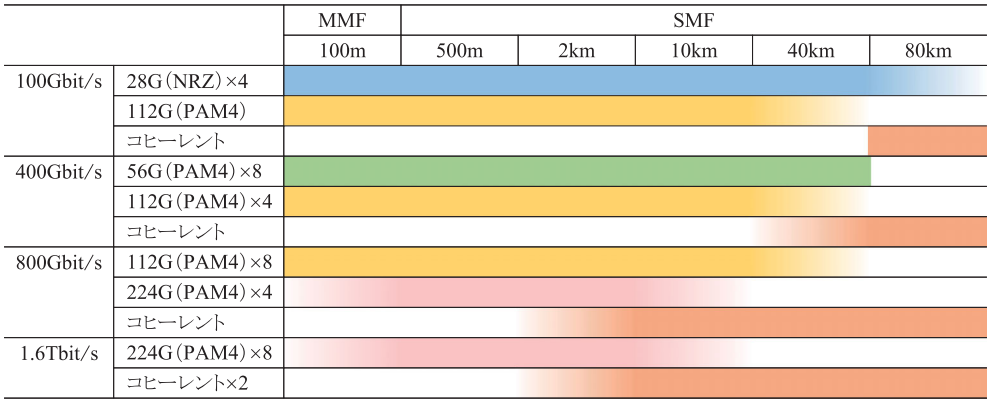
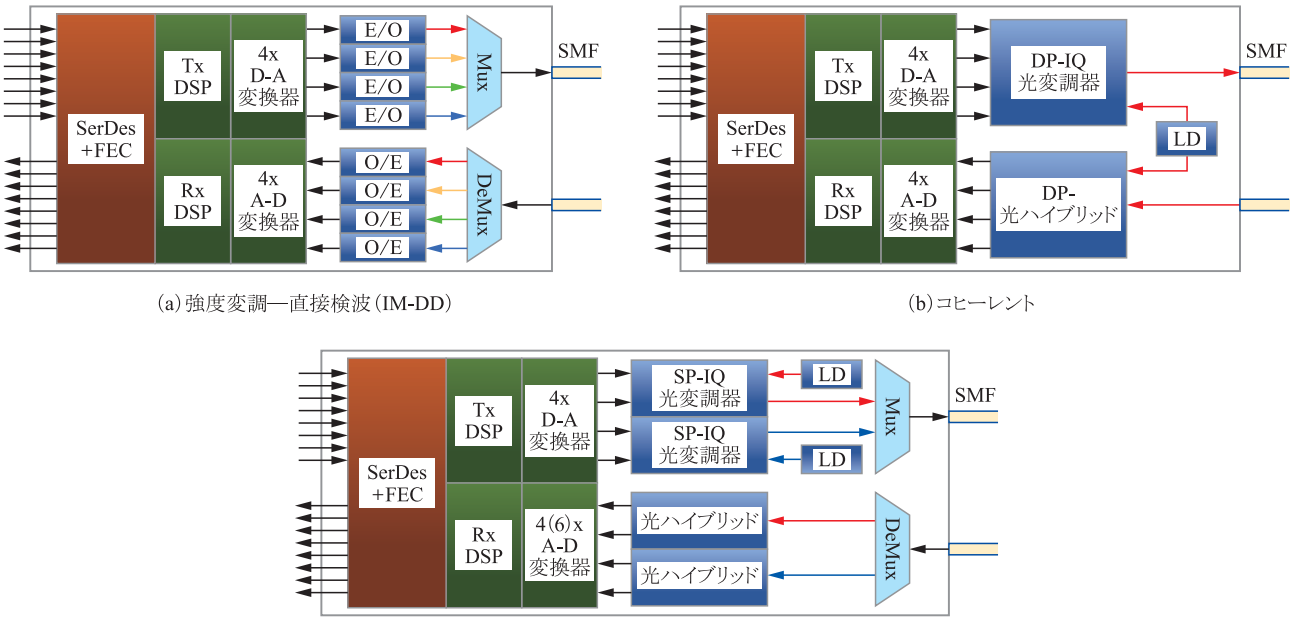


図4　光インタフェース技術　光インタフェースは伝送速度と距離に応じ，最適な光ファイバと，最適な変調方式が選択される．



(a)強度変調―直接検波(IM-DD)

(b)コヒーレント

(c)コヒーレント(自己ホモダイン検波，SHD)

図5　800 Gbit/s 光トランシーバ（10 km）の技術比較　強度変調―直接検波（IM-DD）方式とコヒーレント方式の境界に当たる．ライトコヒーレント方式を含む最適な変調方式について，活発な研究が進む．

Wavelength Division Multiplexing)，あるいは×4 並列で伝送する方式が主流である．800 G，1.6 T 伝送に向けては，更なる高速化の開発が活発化している．

2.3　今後の動向：ライトコヒーレント方式

PAM を含む強度変調―直接検波（IM-DD : Intensity Modulation-Direct Detection）方式では，変調速度の向上に伴い波長分散によるひずみが増大し，距離の長延化は困難となる．それを克服するため，データセンター間接続（>10 km）には，今後コヒーレント方式が徐々に適用される見込みである．IM-DD とコヒーレントの境界領域である 800 Gbit/s，10 km での技術比較を図 5 に示す．

コヒーレント方式では，長距離伝送に適する一方，局発光として狭線幅 LD（Laser Diode）が必要，DSP 処理が重く消費電力が大きい，等の課題も有する．本課題を解決するべく，LD 仕様の緩和，自己ホモダイン検波の提案等，より簡易なライトコヒーレント方式の研究開発も活発に進められている[(9),(10)]．

3.　次世代光トランシーバ

プラガブル光トランシーバの接続数は，フロントパネルの二次元的なサイズに依存し，伝送容量の向上が頭打

ちになりつつある．また，高速化及び低消費電力化の要求も高まっていることから，光トランシーバをきょう体内に配置して電気伝送距離を短尺化できる OBO（On-Board Optics）や CPO 等の次世代光トランシーバが求められるようになった．

3.1　On-Board Optics 光トランシーバ

OBO トランシーバ[11],[12]は，きょう体内のマザーボード上に高い自由度で高密度に配置でき，伝送容量を向上できるので，HPC への適応を皮切りに，2010 年頃から注目されるようになった．2015 年 3 月に OBO トランシーバの標準仕様を作成することで，相互接続性を担保し，OBO の普及を目指して，COBO（Consortium for On-Board Optics）が設立された．約 3 年の歳月をかけて，仕様を策定し，議論した結果，2018 年 2 月に第 1 版仕様書を発行した[13]．光モジュールは，50 Gbit/s×8 Ch と 50 Gbit/s×16 Ch の 2 通りがあり，変調方式に 25 Gbaud PAM4 を採用している．

12.8 Tbit/s スイッチ装置への OBO 適用を当初の目標としていたが，200 Gbit/s 及び 400 Gbit/s プラガブル光トランシーバが製品化されると，導入への動機付けが乏しくなった．COBO トランシーバは，きょう体内のボードには配置されるが，プラガブル光トランシーバの技術を踏襲しているためモジュールサイズは余り小さくなっていない．このような背景から，OBO をスキップして，次世代の CPO に移行するという流れが出てきた．

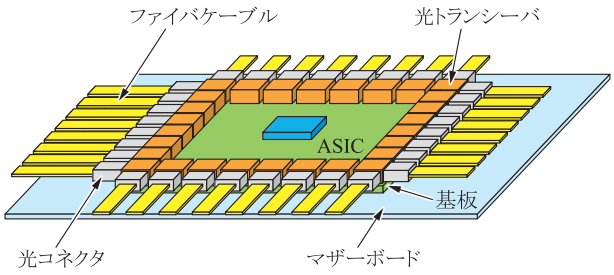


図 6　CPO トランシーバの概略図　基板の中心にはスイッチ ASIC が配置され，近接してその周りに光トランシーバを並列して配置する．

3.2　Co-Packaged Optics 光トランシーバ

図 6 は CPO トランシーバの概略図である．基板の中心にスイッチ ASIC が配置され，近接してその周りに光トランシーバが配置される．光トランシーバは高密度光コネクタを介して光ファイバケーブルと接続される．基板上の狭い領域において複数のアクティブデバイスが動作するため，狭い領域に熱が集中する．そのため，CPO アセンブリの上方にはヒートシンクが搭載され，要求される冷却能力に応じて所定の冷却システムを用いる．

現在，様々な方式の CPO 用小形光トランシーバが検討されている．表 2 は，その中でも主要な CPO 光トランシーバの概要である．大別して，O バンドを用いたシリコンフォトニクス（SiPh : Silicon Photonics）と面発光レーザ（VCSEL : Vertical Cavity Surface Emitting Laser）を搭載した光トランシーバが報告されている．次に，各光トランシーバの構成と特徴について概説する．

（1）　CPO Collaboration

2019 年 3 月に Microsoft と Meta Platforms が主導して設立した CPO Collaboration は，2021 年 2 月に，3.2 Tbit/s 光トランシーバの製品要求ドキュメントを発行した[14]．仕様目標値を表 2 に記載した．図 7 に CPO Collaboration における光トランシーバの構成を示す．光トランシーバ内部に光源を配置する内部光源（ILS : Internal Laser Source）または外部に配置する外部光源（ELS : External Laser Source）を採用し，温度依存性が

表 2　主要な CPO 光トランシーバの概要

	CPO Collaboration	Intel AyarLabs	ARPA-E MOTION	NICT B5G BRIGHTEN
光素子	SiPh MZM ＋ILS or ELS	SiPh MRM ＋ELS	850/940 nm MM VCSEL	1,060 nm SM VCSEL
伝送速度/Ch（Gbit/s）	100	16	100	25，50，100
チャネル数	32	64	32	16
多重方式	－/4 WDM	8 WDM	2 WDM	16 SDM
ファイバ	SMF	SMF	MMF	SM MCF
ファイバ芯数	64/16	16	32	2
伝送容量（Titb/s）	3.2	1.0	1.6	0.4，0.8，1.6
消費電力（pJ/bit）	＜17.5（ILS あり） ＜15（ELS なし）	＞4.9（ELS なし）	2（目標）	＜4（目標）

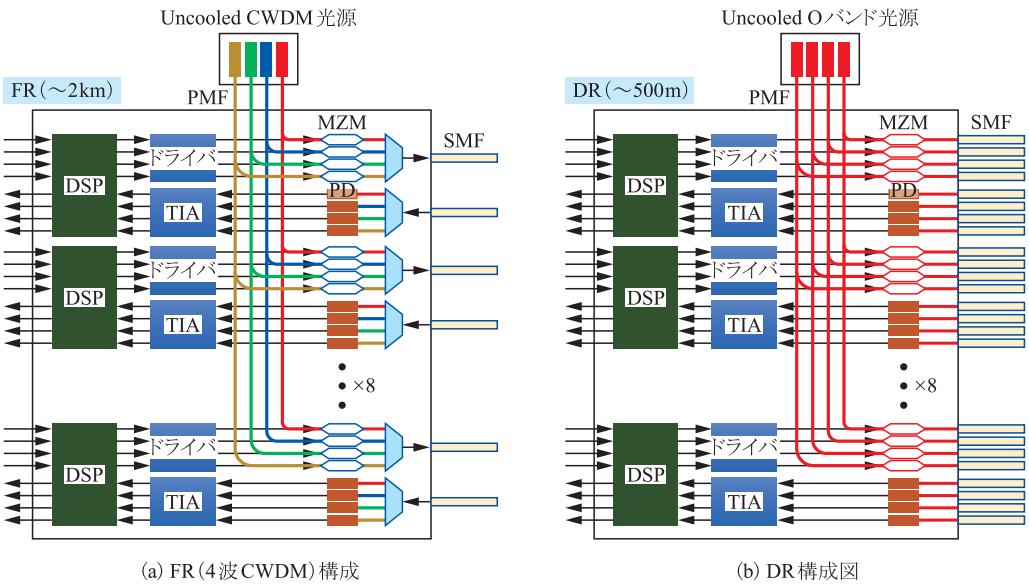


図7　CPO Collaboration の構成図　ELS を採用する 4 波の CWDM を用いた 400GBASE FR4 ポートと 400GBASE DR4 ポートを使う二つの構成．

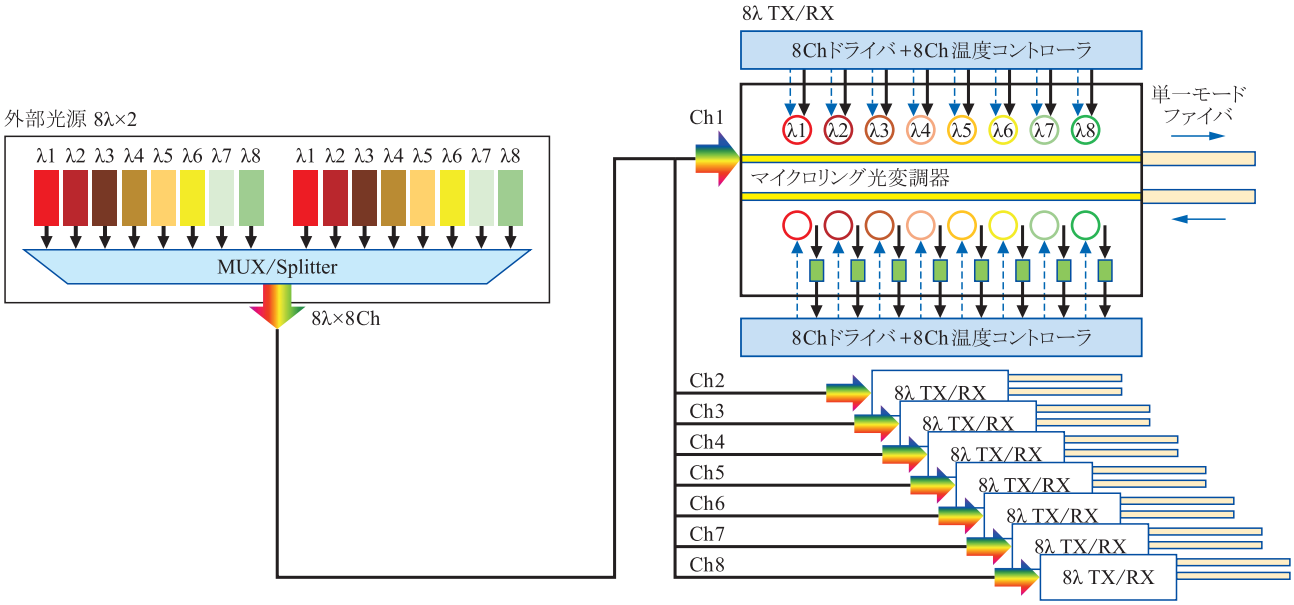


図8　マイクロリング変調器を用いた CPO トランシーバの構成図　波長の異なる 8 Ch の連続光を束ねて外部光源から出力し，直列に接続されたマイクロリング光変調器により各波長の光信号を変調．

極めて小さい SiPh マッハツェンダ変調器（MZM：Mach-Zehnder Modulator）を用いることが前提となっている．図 7 は，Uncooled な ELS を使用した構成を示している．光トランシーバの消費電力は，ILS を用いる場合は最大 17.5 pJ/bit，ELS を用いる場合，ELS の消費電力を含まずに最大 15 pJ/bit となっている．チャネル当りの伝送速度は 100 Gbit/s であり，図 7(a) に示す 4 波の CWDM（Coarse WDM）を用いた 400GBASE FR4 ポートと，図 7(b) に示す 400GBASE DR4 ポートを使う二つの構成がある．ファイバ芯数は，DR4 で 64 芯，FR4 で 16 芯となる．

（2）　Intel と AyarLabs のプロジェクト

Intel と AyarLabs は，ELS と SiPh マイクロリング変調器（MRM：Micro-Ring Modulator）を用いたチップレット型の光トランシーバ TeraPHY[注1] を用いた

（注 1）　TeraPHY は商標．

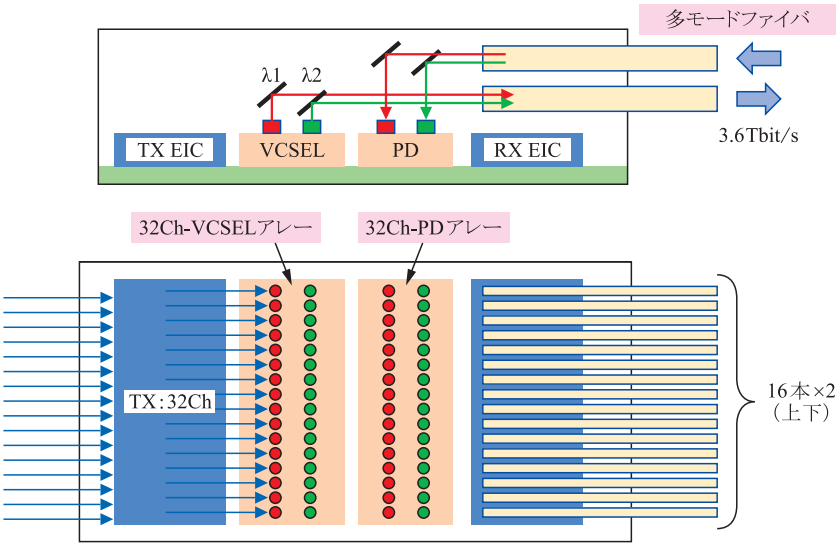


図 9　ARPA-E MOTION の構成図　850 nm と 940 nm の波長を多重することで，チャネル数を 32 に拡大し PAM4 を用いることでチャネル当りの伝送速度を 112 Gbit/s に向上．

8 Tbit/s FPGA ボードを報告している[15],[16]．図 8 に示すように，波長の異なる 8 Ch の連続光を束ねて ELS から出力し，直列に接続された MRM により各波長の光信号を変調する．各々の MRM は顕著な波長依存性を有するので，所定の波長を有する連続光のみを変調することができる．一方で，光信号の消光比を維持するために，各 MRM にはヒータが集積されており，精密に温度制御が行われる．64 Ch の信号を 8 波の WDM を用いることで，16 芯のファイバで伝送可能である．チャネル当り 16 Gbit/s の伝送では RX のアイダイアグラムは開いているが，25 Gbit/s では劣化している．消費電力は，ELS と MRM のヒータを含まずに 4.92 pJ/bit と報告されている．MRM の損失を補填するために，ELS には高い光出力が要求されるため消費電力は高くなる．それゆえ，リンクの消費電力には ELS とヒータの消費電力を含めるべきと思われる．

（3）　ARPA-E MOTION プロジェクト

VCSEL を用いた光トランシーバは，ARPA-E（The Advanced Research Projects Agency-Energy）の MOTION（Multi-Wavelength Optical Transceivers Integrated on Node）プロジェクト[17]が検討しており，Phase 1 では 56 Gbit/s，NRZ×16 Ch を，Phase 2 では 112 Gbit/s，PAM4×32 Ch を目標として取り組んでいる．図 9 は，Phase 2 の構成図を示している．Phase 1 では，16 Ch の 850 nm マルチモード VCSEL アレーと PD アレーを用いて 56 Gbit/s，NRZ×16 Ch 光トランシーバの試作検証を行っている．II-VI が担当する 850 nm VCSEL については，53.125 Gbaud NRZ と PAM4 の動作及び 2,000 時間を超える ALT（Accelerated Lifetime Test）の結果が報告されている[18]．MMF を用いているために伝送距離は 30 m ほどと短く使用用途は限定される．

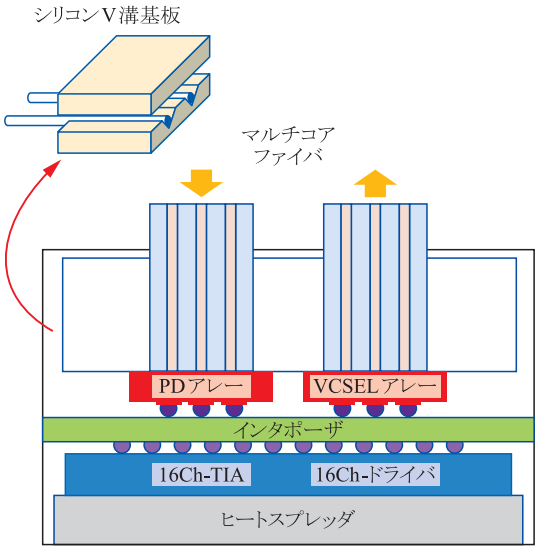


図 10　B5G BRIGHTEN Project の構成図　MCF と結合共振器型 1,060 nm SM InGaAs/GaAs VCSEL を採用．ファイバ当りの伝送容量を 16 倍に拡張可能．

Phase 1 では，VCSEL の低電流駆動特性を生かして 4 pJ/bit の消費電力を実証している．Phase2 では，850 nm と 940 nm の波長を多重することで，チャネル数を 32 に拡大し，PAM4 を用いて，チャネル当りの伝送速度を 112 Gbit/s にする計画である．チャネル数は増えるが，850 nm と 980 nm の光信号を一本の MMF に合波することでファイバ芯数を維持している．また，チャネル数の増加に応じて端子数も増加するが，フット

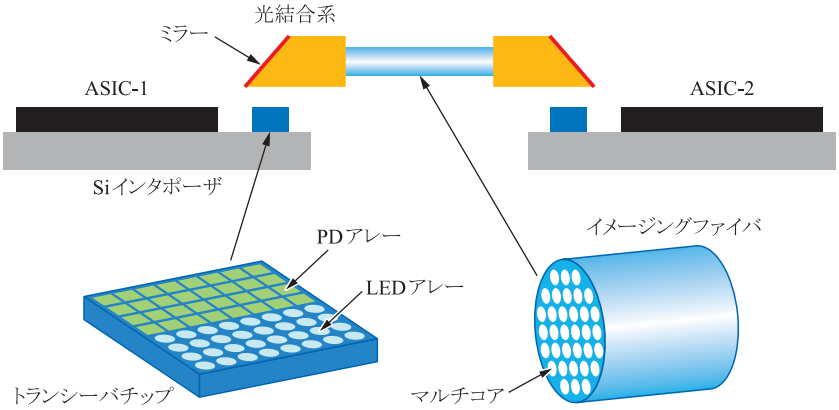


図 11　超並列光トランシーバの構成図　マイクロ LED アレーと PD アレーによるトランシーバチップとイメージングファイバを用いた超並列の光チップ間接続.

プリントを維持するために，LGA（Land Grid Array）のピッチサイズを 0.4 mm から 0.3 mm に狭めている．消費電力は，2 pJ/bit という非常に小さい目標値が掲げられている．

（4）　NICT BRIGHTEN プロジェクト

情報通信研究機構（NICT）の Beyond 5G 研究開発促進事業に係るプロジェクト BRIGHTEN においては，MCF（Multi-Core Fiber）と結合共振器型 1,060 nm 裏面発光 VCSEL[19]を用いた超小形光トランシーバを研究開発している．図 10 に光トランシーバの構成図を示す．SM-MCF（19 芯のうち 16 芯を使用，カットオフ波長 <1 μm）を用いた空間分割多重方式（SDM : Spatial Division Multiplexing）を導入することで，ファイバ当りの伝送容量を 16 倍に拡張している．MCF はシリコン V 溝基板に固定され，その端面に VCSEL/PD（Photo Diode）アレーの基板裏面側が接着される．波長 1,060 nm の光は基板を透過するので，ひずみ系を導入した 1,060 nm VCSEL を用いることで，基板裏面側からの光出射を可能としている．しかし，一般的な SMF の MFD9 μm は，VCSEL の MFD3.5 μm と大きく異なるため，SM-MCF への直接光結合は極めて困難である．そこで，MCF のコア・クラッド間の屈折率差を大きくして MFD を 6 μm 程度に縮小し，更に新たな結合共振形構造により VCSEL の MFD を 6 μm 程度に拡大することで，両者の MFD が整合するため，高い光結合効率を実現可能となる[20]．また，裏面発光 VCSEL は PD とともにインタポーザにフリップチップボンディングされるため，電気配線の寄生成分が抑制され，高速動作が可能である．従来不可能であった VCSEL アレーと SM-MCF との直接光結合を実現することで，小形化・大容量化とともに，データセンターで求められる >2 km の伝送距離を可能としている．チャネル当りの伝送速度は，25 Gbit/s から検討を開始し，50 Gbit/s，100 Gbit/s と段階的に向上していく計画となっている．

電気インタフェースに 0.3 mm ピッチの LGA を用いることで，光トランシーバのフットプリントを小さくし，特に幅は世界で最も短い 7.7 mm を実現した．光トランシーバの幅は，ドータボードの大きさを決定する要因となる．4 辺にそれぞれ 8 個の光トランシーバを配列しても，ドータボードの大きさは 100 mm 角あれば十分である．消費電力は，低電流動作が可能な 1,060 nm 裏面発光 VCSEL や三次元インダクタ[21]を用いた CMOS ドライバ IC の採用によって，<4 pJ/bit を実現する見込みである．特に SiPh を用いた光トランシーバと比較すると，VCSEL を用いた光トランシーバの消費電力は顕著に低く，優位である．

（5）　Avicena 超並列光トランシーバ

Avicena Tech Corp. は，ディスプレイで用いられるマイクロ LED アレーと PD アレーによるトランシーバチップとイメージングファイバを用いた超並列の光チップ間接続技術を提案している[22]．伝送距離は 10 m 以下に限定されるのでデータセンター内の光通信には適用できないので，表 2 において比較はしていない．

図 11 は概略構成である．Si インタポーザ上にトランシーバチップと駆動回路を有する ASIC を実装する．マルチコアを有するイメージングファイバとトランシーバチップは，ミラーによる 90 度光路変換機能を有する光結合系で接続される．256 Ch の並列伝送のデモンストレーションを行い，超高密度（2 Tbit/(s・mm^2)），低消費電力（<2 pJ/bit）のチップ間通信の可能性について言及している．

4. む　す　び

本稿では，データセンターにおける光インタコネクトに焦点を当て，その中核要素である光トランシーバの最

近の技術動向を紹介し，今後の方向性について述べた．光インタコネクト技術は，これまで我が国が得意とする光技術分野の一つであり，光ファイバ通信の開発で世界の先端を走ってきた過去の実績からも研究開発の強みと基盤は整っていると言える．半導体チップを高速につなぐ光インタコネクトや，データセンター内のスイッチ装置の小形化・低消費電力化への貢献に加え，これらの新しいハードウェーハ技術により，スイッチ装置の極低遅延動作や，リソース分離形コンピューティング技術によるリソースの有効利用率向上や，AI 処理能力の向上などへの展開を期待したい．

謝辞　本稿で紹介した研究の一部は，NICT 委託研究（#00101）「Beyond 5G 超大容量無線通信を支える次世代エッジクラウドコンピューティング基盤の研究開発」で実施された．御支援頂く NICT 高橋亮博士，NICT 委託研究の共同研究者各位に感謝する．

文　　献

（1） Q. Cheng, M. Bahadori, M. Glick, S. Rumley, and K. Bergman, “Recent advances in optical technologies for data centers : a review,” Optica, vol. 15, no. 11, pp. 1354-1370, 2018.

（2） X. Zhou, R. Urata, and H. Liu, “Beyond 1 Tb/s intra-data center interconnect technology : IM-DD OR coherent? ,” J. Lightwave Technol., vol. 38, no. 2, pp. 475-484, 2020.

（3） C. Minkenberg, R. Krishnaswamy, A. Zilkie, and D. Nelson, “Co-packaged datacenter optics : Opportunities and challenges,” IET Optoelectron, vol. 15, no. 2, pp. 77-91, 2021.

（4） QSFP-DD800 MSA. http://www.qsfp-dd800.com/

（5） OSFP MSA. https://osfpmsa.org/

（6） R. Chopra, “Looking beyond 400G, a system vendor perspective,” IEEE802.3 ; chopra_b400g_01_210208.

（7） IEEE 802.3 Ethernet Working Group. http://www.ieee802.org/3/

（8） Ethernet Alliance. https://ethernetalliance.org/

（9） C.F. Lam, X. Zhou, and H. Liu, “Coherent-lite for beyond 400GbE,” IEEE802.3 ; lam_b400g_01_210720.

（10） T. Zhang, S. Zhang, and Y. Zhuang, “Technical feasibility of the “10 km@800 Gb/s” objective,” IEEE802.3 ; zhang_b400g_01_0812.

（11） J. Duis and T. Hultermans, “The cool future of optics “CoolBit”,” 40th European Conference and Exhibition on Optical Communication, Paper We. 2.1.2, Sept. 2014.

（12） U. Keil, “Compact pluggable 300 Gbit/s on-board-transceiver for high density optical data transmission,” 第 59 回 OPT 公開研究会，no. 2015.

（13） Consortium for On-Board Optics, “COBO 8-lane & 16-lane on-board optics specification,” Release 1.0, Feb. 2018.

（14） Co-Packaged Optics Collaboration, “3.2 Tb/s copackaged optics optical module product requirements document,” Version 1.0, Feb. 2021.

（15） K. Hosseini, E. Kok, S.Y. Shumarayev, C.-P. Chiu, A. Sarkar, A. Toda, Y. Ke, A. Chan, D. Jeong, M. Zhang, S. Raman, T. Tran, K.A. Singh, P. Bhargava, C. Zhang, H. Lu, R. Mahajan, X. Li, N. Deshpande, C. Keeffe, T.T. Hoang, U. Krishnamoorthy, C. Sun, R. Meade, V. Stojanovic, and M. Wade, “8 Tbps co-packaged FPGA and silicon photonics optical IO,” Optical Fiber Communication Conference and Exposition 2021, Th4A.2, March 2021.

（16） M. Wade, E. Anderson, S. Ardalan, W. Bae, B. Beheshtian, S. Buchbinder, K. Chang, P. Chao, H. Eachempatti, J. Frey, E. Jan, A. Katzin, A. Khilo, D. Kita, U. Krishnamoorthy, C. Li, H. Lu, F. Luna, C. Madden, L. Okada, M. Patel, C. Ramamurthy, M. Raval, R. Roucka, K. Robberson, M. Rust, D. Van Orden, R. Zeng, M. Zhang, V. Stojanovic, F. Sedgwick, R. Meade, N. Chan, J. Fini, B. Kim, S. Liu, C. Zhang, D. Jeong, P. Bhargava, M. Sysak, and C. Sun, “An error-free 1 Tbps WDM optical I/O chiplet and multi-wavelength multi-port laser,” Optical Fiber Communication Conference and Exposition 2021, F3C.6, March 2021.

（17） D. Kuchta, “Co-Packaging on organic laminates : MOTION phase 2,” ARPA-E ENLITENED Kickoff Meeting, Jan. 2021.

（18） M. Hoser, W. Kaiser, D. Quandt, J. Bueno, S. Saintenoy, and S. Eitel, “Highly reliable 106 Gb/s PAM-4 850 nm multi-mode VCSEL for 800G ethernet applications,” Optical Fiber Communication Conference and Exposition 2022, Tu2D.5, March 2022.

（19） S. Hu, X. Gu, H. R Ibrahim, M. Nakahama, S. Shinada, and F. Koyama, “1060 nm single-mode transverse coupled cavity VCSEL with surface relief engineering for 80 Gbps PAM4 modulation,” Optical Fiber Communication Conference and Exposition 2022, Tu2D.5, March 2022.

（20） L. Dong, X. Gu, M. Yoshiki, and F. Koyama, “Densely integrated 1060 nm 2D VCSEL array for space-division multiplexing toward co-packaging optics transceivers,” 10th IEEE CPMT Symposium Japan, 2-34, Nov. 2021.

（21） A. Tsuchiya, T. Inoue, K. Kishine, Y. Takahashi, D. Ito, and M. Nakamura, “A small-area integration of optical receiver using multi-layer inductors and capacitor-under-pad,” International Midwest Symposium on Circuits and Systems（MWSCAS）, 8.4, Aug. 2022.

（22） B. Pezeshki, F. Khoeini, A. Tselikov, R. Kalman, C. Danesh, and E. Afifi, “MicroLED array-based optical links using imaging fiber for chip-to-chip communications,” Optical Fiber Communication Conference and Exposition 2022, W1E.1, March 2022.

（2022 年 8 月 31 日受付　2022 年 9 月 15 日最終受付）

那須（なす）　秀行（ひでゆき）（正員：シニア会員）

平 5 日大・理工・電気卒．平 7 同大学院修士課程了．同年古河電気工業株式会社入社．現在，情報通信・エネルギー研究所主幹研究員，光電融合技術開発部長．京都工繊大・非常勤講師．博士（工学）．本会光エレクトロニクス研究専門委員会専門委員．

井出（いで）　聡（さとし）

平 3 東大・工・電気電子卒．同年（株）富士通研究所入社．現在，富士通オプティカルコンポーネンツ株式会社先行技術開発センター開発企画部長．

小山（こやま）　二三夫（ふみお）（正員：フェロー）

昭 55 東工大・工・電気電子卒．昭 60 同大学院博士課程了．同年同精密工学研究所助手．昭 63 同助教授．平 12 同マイクロシステム研究センター教授．平 28 科学技術創成研究院教授，面発光レーザフォトニクス，半導体光デバイスの研究に従事．平 20 IEEE/LEOS William Streifer Award，平 30 大川賞，令元 Optica Nick Holonyak, Jr. Award，本会業績賞など各受賞．