

調査報告書

AI時代を牽引する光デバイス技術

エグゼクティブサマリー

本調査報告書は、今後の社会のデジタル化やAI技術の普及に不可欠となる、データセンター内における超高速光通信技術とそのコアである光デバイス技術に注目し、国内外の現状と今後の課題、研究開発の方向性などをまとめたものである。初めに、光通信システムの分類と基本的な構成について述べ、続いて、データセンター内における光通信システム導入の現状と今後の動向、光デバイスの産業・技術動向、高速化・低消費電力化などに向けた光デバイス技術の今後の課題、研究開発の方向性について記載している。

近年、デジタル化の進展により、膨大な量のデータをクラウド上で保存、分析・解析し、各種のサービスを提供する高性能なデータセンターが世界各地に構築されている。サイバー空間とフィジカル空間が高度に融合したCPS（Cyber Physical System）の中核を担うものである。また、機械学習、大規模言語モデルなどのAI技術の進展が著しく、それらの学習に使われるデータ量や積和演算などを行う計算量は急激に増加している。このような背景から、データセンターの処理能力の向上、大規模化への要請が急速に増している。

データセンターの処理能力の向上には、CPU（Central Processing Unit）やGPU（Graphic Processing Unit）などのプロセッサの高性能化だけでなく、ストレージと主記憶（メインメモリ）の間や、メインメモリとCPU・GPUの間のデータ転送（通信）の高速・大容量化が不可欠である。CPUやGPUは、国際的なロードマップに沿った技術開発が進められている一方、データ通信については、これまでの電気配線では一層の高速化・大容量化は困難であるため、光通信技術への質的な転換が必要になっている。

すでにデータセンター内への光通信システムの導入は始まっているが、技術開発に関する明確なロードマップはまだない。このため、データセンター内における光通信システム導入の現状とともに、今後のハードウェア構築の動向、特に光デバイス技術の研究開発の方向性について把握することは、わが国の研究開発戦略を考える上で有用である。

以下、本調査から見てきたデータセンター内の超高速光通信技術および光デバイス技術の動向、今後の課題、研究開発の方向性などの主な項目を示す。

1) データセンター内における超高速光通信技術の動向

① 現状と動向

- ・ここ数年間でサーバーラック上部まで光配線技術が導入され、電気配線から光配線へと急激に置換
- ・生成AIに対応するメガデータセンターでは、独自のアーキテクチャーによるAI（Artificial Intelligence）/ML（Machine Learning）クラスターが主流
- ・消費電力の低減に向けサーバー構成のディスクアグリゲーション化への移行
- ・ネットワーク帯域拡大に向けて、サーバーラック内における高速光配線技術を活用した光スイッチ・光リンク技術の導入

② 光トランシーバーと光デバイスへの期待

- ・光トランシーバー、光デバイスの高速化・低消費電力化
- ・光の特長である並列性を活かした大容量光通信技術化への対応
- ・画期的な低消費電力化に向けたLPO（Linear-drive Pluggable Optics）および光デバイスとスイッチASIC（Application Specific Integrated Circuit）を近接実装するCPO（Co-Packaged Optics）への対応

2) 光デバイスの技術動向

① 現状

- ・メガデータセンター内の超高速動作に対し光の優位性を活かし400 Gbit/sまで高速変調動作を達成
- ・光デバイスは日本の強み技術であり、リン化インジウム (InP) 系化合物半導体光デバイスの開発が光通信システムに大きく貢献し、現在でも光デバイスの国際会議論文採択数、InP系超高速光デバイスでの市場における製造国・地域別データと共に、世界トップシェアを保持
- ・経済安全保障、化合物半導体産業の強化などの視点から、米国、欧州、中国、台湾などが光通信用光デバイスに注力中

② 課題

- ・メガデータセンター内のさらなる高速化 (800 Gbit/s \Rightarrow 1.6 Tbit/s \Rightarrow 3.2 Tbit/s \Rightarrow 6.4 Tbit/s) への対応、LPO、CPO等革新的な方式への対応に向けた光デバイスの超高速動作、高温安定動作、低消費電力化・小型化

③ 2030年代に向けた研究開発の方向性

- ・InP系半導体光デバイス (レーザ光源として普遍・不可欠) でのさらなる超高速変調技術、低消費電力技術の推進
- ・シリコンフォトニクス光変調器: 既存のシリコンの集積回路プロセス装置での低コストチップ製造
- ・InPを凌駕する新材料を用いた光変調器: 高温動作・変調速度でInPに勝る可能性のある材料の適用・新材料の探索とそのデバイス化
- ・異種材料集積技術: InP系光デバイス、シリコンフォトニクス、新材料系などを幅広く集積するプロセス技術

目次

1	背景と目的	1
2	調査方法	3
3	光通信システム	5
	3.1 光通信システムの分類	5
	3.2 光通信システムの基本的な構成	7
4	データセンター内における超高速光通信技術の動向	9
	4.1 データ通信量の増大とネットワーク構成の変化	9
	4.2 今後のデータセンターの コンピューティングと光配線の動向	10
	4.3 スイッチ装置と光トランシーバー	12
	4.4 光トランシーバーと光デバイスへの期待	15
5	光デバイスの技術動向	19
	5.1 光デバイスの種類	19
	5.2 光デバイス技術の高速動作への課題	20
	5.3 光デバイスの国際会議状況と日本の存在感	21
	5.4 光デバイスの今後の研究開発動向	23
6	まとめ	27

1 | 背景と目的

近年、インターネットやSNSの普及などのデジタル化の進展により、画像、動画、音声などの膨大な量のデジタルデータが日々生み出されている。このようなビッグデータをクラウド上で保存し分析・解析し、各種のサービスを提供するために、高性能なデータセンターが世界各国で作られ、サイバー空間とフィジカル空間が高度に融合したCPS（Cyber Physical System）の中核を支えるようになってきている。また、最近ではデータの分析・解析や高精度の画像認識、音声認識を可能にする機械学習（ML：Machine Learning）、深層学習、大規模言語モデル（LLM：Large Language Models）などの人工知能技術（AI：Artificial Intelligence）の進展が著しく、それらの学習に使われるデータ量や積和演算などの計算量は急激に増加し、データセンターの処理能力の向上、大規模化が急速に進展している。

データセンターにおけるデータ処理能力の向上には、論理演算、四則演算などを行う汎用プロセッサ（CPU：Central Processing Unit）や積和演算に優れたGPU（Graphic Processing Unit）などのアクセラレータの高性能化とともに、データが蓄えられているストレージと主記憶（メインメモリ）間や、メインメモリとCPU・GPU間のデータ転送（通信）の高速・大容量化が不可欠になっている。CPUやGPUについては、半導体集積回路の国際的なロードマップ（IRDS：International Roadmap for Devices and Systems）に沿った材料開発、微細加工技術、プロセス技術、高集積パッケージ技術などが進められており、今後も着実な進展が期待される。

一方、データセンター内のデータ通信に関しては、これまでの電気配線による通信ではさらなる高速化・大容量化は困難であり、光通信技術への質的な転換が必要になっている。すでにデータセンター内への光通信システムの導入は始まっているが、そこで使われる技術に関して材料開発からパッケージ技術までを含むような明確なロードマップはまだない。このため、データセンター内における光通信システム導入の現状を把握するとともに、今後のハードウェア構築の動向、光通信システムでコア技術となる光デバイスの研究開発の方向性について把握することは、日本としてこれらの分野の研究開発の戦略を考える上で重要である。この調査報告書の目的は文献情報、学会情報、有識者の情報などから、これらの事柄を明確にすることにある。

以下、この調査報告書の内容を理解する上で基本となる光通信システムの利用範囲の拡大、データセンター内部における光通信システムへの要求、光通信システムの中核技術である光デバイス開発におけるこれまでの日本の貢献、国際的な環境の変化について簡単に説明する。

光ファイバー内を光が伝搬することにより情報・データを伝達する光通信システムは、高速性、低減衰率、位相や波長による多重化が可能といった特長から、海底ケーブルを使った大陸間の通信、大容量基幹通信網、データセンター間通信といった比較的長い距離のデータ伝送用途で主に用いられてきた。最近では、データセンター内部や無線基地局の基地局とアンテナ間など、より近距離でも電気配線や無線による高速化・大容量化が困難になってきている区間での通信にも光通信が使われるようになってきており、光通信はインフラ基盤技術の中核としてだけでなく、建物の内部や装置間にまでその利用範囲が拡大している。

データセンター内部に注目すると、IPトラフィック（インターネット・コンピュータなどの通信回線において、一定時間内にネットワーク上で転送されるデータ量）の飛躍的な増大の要請から、ここ数年間でサーバーラックの上部まで光配線技術が導入され、電気配線から光配線へと一気に置き換わった。今後は、メガデータセンターの消費電力の問題からデータセンター内の通信に係わる電力を削減することが求められ、消費電力的にも優れる光通信の範囲がさらに拡大し、ラック間、ラック内といった短距離のデータ転送にも光通信技術が導入される。

光通信システムは、1980年に伝送速度100 Mbit/sで開始され、現在は400 Gbit/sと約4000倍に高速

化されており^{1,2,3}、そのコア技術として光の高速変調動作を行う光デバイスの開発が大きく貢献してきた。この光通信システム用光デバイスは日本の強み技術の一つである。1980年代から日本が世界を席卷してきたInP系化合物半導体光デバイス技術は、現在でも国際会議論文数、超高速光デバイスでの市場における製造国・地域別データ、共に世界トップシェアを有しており、データセンター内の高速通信を可能にしたのは日本の優れた光デバイス技術によるところが大きい。これらのデータに関しては、5.3節で述べる。現在用いられている光デバイスの基本概念・材料プロセス技術は、伝統的に日本の大学・企業研究所が中心になって推進しており、強い技術を維持している。今後も光通信システムの超高速・大容量化、低消費電力化などの要求に伴い、光デバイスのさらなる超高速変調技術、低消費電力技術が要求されるが、これまでのInP系化合物半導体光デバイスでは高速変調の限界に達する可能性があり、新たな技術の模索が必要になってきている。

最近の国際的な変化として、経済安全保障、化合物半導体産業の強化などの視点から、米国、欧州、中国、台湾などが光通信用光デバイスに注力している。例えば、米国や欧州は、動作速度では劣るが集積化、低コスト化の利点を活かすシリコンフォトニクスに対して大規模なFAB設備（クリーンルーム設備）などへの資金投入を行い、試作・生産施設の充実などを進めている。また、中国や台湾は、アクセス系光通信であるBeyond 5G、FTTx（Fiber To The x）向けのメガデータセンターに比べ2～4世代遅れ（比較的遅い変調速度）の光デバイスにおいて、低コスト化に秀でて約50%のシェアを有している。キャッチアップ型で技術開発の速度が速いため、メガデータセンター等に向けた最先端光デバイスにおいても今後脅威になる可能性がある。

1 米津宏雄「光通信素子工学」東京：工学図書 1984年 p.1～p.11

2 萩本和男「Japan Prize 受賞特別記念講演 長距離大容量光データ通信の開拓」電子情報通信学会ソサイエティ大会 2023年9月 TK-3

3 電子情報通信学会 知識ベース 5群3編 光伝送技術 (https://www.ieice-hbkb.org/portal/5%e7%be%a4%e3%80%80%e9%80%9a%e4%bf%a1%ef%bd%a5%e6%94%be%e9%80%81/05_03/)

2 | 調査方法

本調査は、データセンターにおける光通信技術の導入の今後の動向や、光通信用光デバイス・材料技術の最新の研究開発動向と今後の方向性について、この分野の学会での注目動向や研究者の考えを直接的に知ることに重点を置いた。このため、光通信分野、光デバイス分野の主要な国内学会、国際会議、研究会、展示会での発表、学会志を含めた専門雑誌記事を調べるとともに、アカデミアおよび産業界の有識者へのインタビューを行って意見を伺う形で関連する情報を収集した。

参加した主要な学会・研究会等を表2-1に示す。また、インタビューした国内の有識者（13人）を表2-2に示す。なお、5.3節に示すECOC欧州光通信国際会議での「光デバイスの国際会議状況、光デバイスの論文発表数に関する日本の存在感」のデータに関しては、作成メンバーが、ECOC国際会議のプログラムと予稿集を調査して独自で算出したものである。

表 2-1 調査を行った主要学会・研究会等のリスト

#	名称	開催年月	開催場所	調査方法
1	光ネットワーク産業・技術研究会	2023年 7月	東工大	現地参加
2	LQE 研究会	2023年 8月	東北大	現地参加
3	電子情報通信学会ソサイエティ大会	2023年 9月	名古屋大	現地参加
4	ECOC2023（欧州光通信国際会議）	2023年10月	英国 Glasgow	On-line
5	電子情報通信学会 LQE 研究会	2023年11月	On-line	On-line
6	電子情報通信学会 PDW 研究会	2023年12月	機械振興会館（東京）	現地参加
7	電子情報通信学会 総合大会	2024年 3月	広島大	現地参加
8	光ネットワーク産業・技術研究会	2024年 3月	明治大	現地参加
9	OFC2024（光ファイバー通信国際会議）	2024年 3月	米国 San Diego	報告会他
10	電子情報通信学会 LQE 研究会	2024年 5月	On-line	On-line
11	電子情報通信学会 LQE 30周年記念研究会	2024年 5月	沖縄青年会館（那覇市）	現地参加
12	COMNEXT 次世代光通信技術（FOE）展示会	2024年 6月	東京ビッグサイト	現地参加
13	光ネットワーク産業・技術研究会	2024年 7月	東工大	現地参加
14	電子情報通信学会 ソサイエティ大会	2024年 9月	日本工業大	現地参加
15	ECOC2024（欧州光通信国際会議）	2024年 9月	独逸 Frankfurt	On-line
16	ISLC2024会議（半導体レーザ国際会議）	2024年 9月	米国 Florida	On-line

表 2-2 インタビューした有識者【五十音順、敬称略】

氏名	所属	役職
荒川泰彦	東京大学ナノ量子情報エレクトロニクス機構	特任教授
小川憲介	東京科学大学大学院	特任教授
高井厚志	LitAhead	代表
高橋亮	国立研究開発法人情報通信研究機構ネットワーク研究所	総括研究員
竹中充	東京大学大学院工学系研究科電気系工学専攻	教授
田中磁久	日本ルメンタムデバイス開発部	部長
富澤将人	NTTイノベティブデバイス	代表取締役副社長/CTO
那須秀行	古河電気工業フォトンクス研究所	フェロー 兼 光電融合技術開発部長
並木周	国立研究開発法人産業技術総合研究所 プラットフォームフォトンクス研究センター	研究センター長
西山伸彦	東京科学大学工学院電気電子系	教授
牧野俊太郎	富士通オプティカルコンポーネンツ	マネージャー
松尾慎治	NTT先端集積デバイス研究所	フェロー
横山士吉	九州大学先導物質化学研究所	教授

3 | 光通信システム

3.1 光通信システムの分類

AI (Artificial Intelligence)、HPC (High Performance Computing)、メガデータセンターなどが中核的な役割を担う大規模高度情報化社会では社会の多様なニーズ・要求の下、IPトラフィック量は急激に立ち上がっており⁴、通信がボトルネックになってきている (図3-1)。

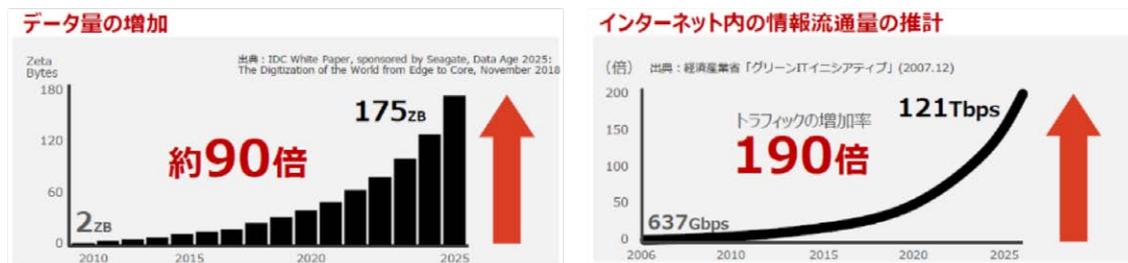


図3-1 データ通信量 (IPトラフィック量) の急激な立上りの例

現在、それらを支える超高速大容量通信データのほとんどは光通信システムで伝送されている。従来の電気配線技術による通信システムでは、高速化に伴うデバイスの電気損失と消費電力の増加などで、システムとしてのトータルの消費エネルギーが増大する。一方、光通信では光ファイバーの伝送損失が圧倒的に小さく、様々な多重化技術が利用でき、超高速大容量化しても消費電力の増加は少ない。このため、光通信の利用がここ10年で急速に拡大しており、各家庭や無線送信アンテナまで光ファイバーが接続されるようになっている。このように、超高速大容量の通信データのほとんどは光通信システムで伝送されており、光通信技術は持続可能な高度情報化社会を支える通信インフラの中核基盤技術として、さらなる高度化の期待が高まっている。様々な光通信システムを図3-2に示す⁵。

光ファイバーの伝送損失が最も小さい波長 1.55 μm 帯で長距離伝送を行う基幹ネットワークは、海底通信系 (~10,000 km)、基幹幹線系 (~数100 km)、メトロ伝送系 (40 km ~ 100 km)、データセンター間接続 (~80 km) など構成されており⁶、テレコム系と言われている。テレコム系光通信システムでは、光の強度と位相の両方を使って伝送するデジタルコヒーレント技術と高密度波長分割多重技術 (DWDM: Dense Wavelength Division Multiplexing) を組み合わせた超高速光伝送技術、および光を発生する光デバイス技術が大きな鍵となる。現在、光ファイバー1本あたり、20 Tbit/s (400 Gbit/s \times 50波長) の伝送速度が実用化されており、シングルモード光ファイバーの物理限界の100 Tbit/sを目指した研究開発が行われている。

4 情報通信審議会 情報通信政策部会 総合政策委員会(第15回)(2023年3月17日開催) 資料15-3「日本電信電話株式会社発表」

5 国立研究開発法人情報通信研究機構 NICT 図面 (<https://www.nict.go.jp/photonic-ict/>) を元に CRDS にて作成

6 宮本豊 他「将来の大容量通信インフラを支える超高速通信技術」NTT 技術ジャーナル 2019年3月 pp.11 ~ 15

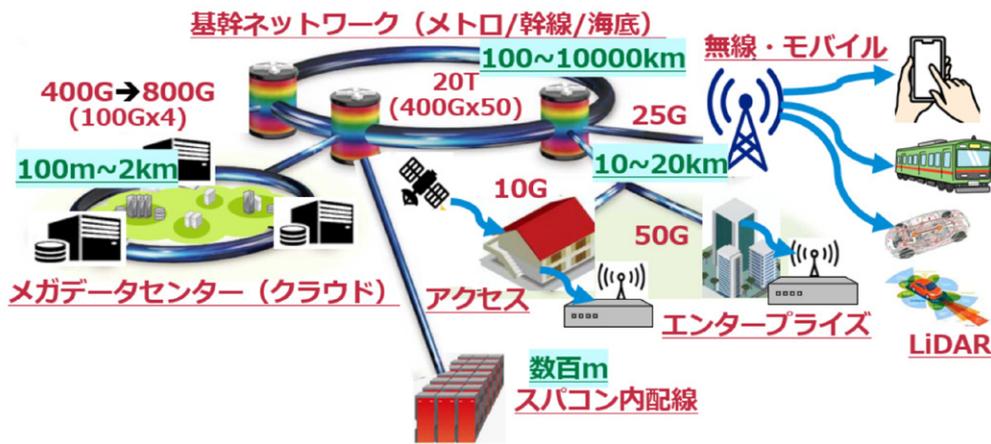


図3-2 光通信システムの種類 (赤色の数字の単位はbit/s)

一方、メガデータセンター内、アクセス系、エンタープライズ系、無線・モバイル系の光通信システムでは、光ファイバーの波長分散が小さい波長 $1.3 \mu\text{m}$ 帯を用いて 500 m ~ 20 km の比較的短い距離での光伝送を行っている。これらはデータコム系と呼ばれており、その通信規格はイーサネット (Ethernet) であり、その技術仕様は IEEE 802.3 で規定されている。データコム系光通信システムでは、光の強度のみを使って伝送する強度変調のシンプルな光伝送方式であり、光を発生・変調する光デバイスの性能により伝送速度、伝送距離が決まる。図3-2に示すように、現在の伝送速度は適用領域に大きく依存し、アクセス系、エンタープライズ系、無線・モバイル系では 10 Gbit/s ~ 50 Gbit/s である。今後は、特に高速変調化が大きな鍵になる。

以上は、光ファイバー通信が始まった1980年以降の光ファイバーの低い伝送損失性の利点を活かした長距離伝送の考え方であるが、ここ数十年急激に発展してきたデータセンターでは光技術導入の観点は全く異なっている。メガデータセンター内部では400 Gbit/s (100 Gbit/s × 4チャンネル) の超高速伝送が主流になっている。伝送距離はたかだか 100 m ~ 2 km であるが、このような伝送速度では、従来の電気配線による通信技術は高速化に伴い消費電力が急増することから適用できず、低損失・低消費電力で高速化に優れる光通信技術が適用されその数が急速に増加している。現在、メガデータセンターではIPトラフィックの70%を扱い、そのトラフィック量が年率25%で増加していることから、800 Gbit/s (100 Gbit/s × 8チャンネル) の適用が始まりつつある^{7,8}。また、データセンター向けにデータコム系光デバイス技術の高性能化の研究開発が継続的に進められており、今後のIPトラフィック量の増大要求に対し、1.6 Tbit/s、3.2 Tbit/s、6.4 Tbit/sを目指した研究開発が活発化している。

図3-3に国内外で実用化してきた光通信システム伝送速度の変遷を示す。1990年後半までは基幹ネットワークの伝送速度を示し、それ以降はデータコム系光システムの伝送速度を表示している。この理由は、光デバイスを核にした光伝送技術の伝送速度推移を明確にするためであり、伝送速度を飛躍的に増大させるために1990年代後半から基幹ネットワークに導入された高密度波長分割多重技術 (DWDM: Dense Wavelength Division Multiplexing) による影響を避けるためである。この図から、光通信システムの伝送速度は、光デバイスの超高速化により、1980年の光通信導入時の100 Mbit/sから現在の400~800 Gbit/sへと超高速化 (約一万倍) し、通信システムでのIPトラフィック量の飛躍的な増加を支えてきたことがわかる。持続可能な社会を支える Society5.0の実現へ向けて、今後もインフラ基盤技術である超高速大容量

7 <https://www.ieee802.org/3/df/index.html> (2024年9月3日アクセス)

8 <https://www.800gmsa.com/> (2024年9月4日アクセス)

光通信システムへの社会的要求・期待は高まっており、光デバイス含めた光伝送方式のさらなる高性能化が不可欠である。

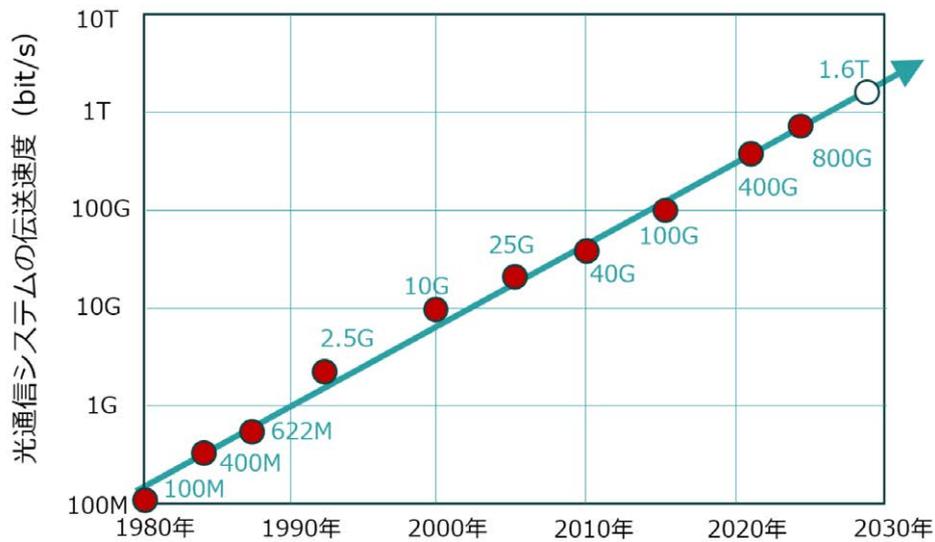


図3-3 光通信システム伝送速度の変遷

3.2 光通信システムの基本的な構成

光通信システムでの基本的な構成を図3-4に示す⁹。電気信号を光信号に変換する半導体レーザー、光信号を伝送する光ファイバー、光信号を電気信号に変換する受光器が三大要素になっており、それぞれの簡単な説明を下記に示す。

1) 半導体レーザー

光を発生し、アクセス系の電話・パソコン、エンタープライズ系の企業・大学等の装置から発生した電気信号を光信号に変換し送信するのが半導体レーザーである。半導体レーザーの内部では、入力である電気のON/OFF信号で半導体レーザーの注入電流をON/OFFさせて、光信号の強弱信号に変換する。半導体レーザー単体のものだけでなく、光変調器を集積したものもあり、これについては5.1節で述べる。

2) 光ファイバー

半導体レーザーで発生した光信号を伝送する媒体が光ファイバーである。光ファイバーの構造は、中心部のコアとその周囲を囲むクラッドの二層構造であり、コアが光を通しクラッドが光を全て内部に反射させることで、低損失で光信号を伝送できる。本報告書で扱っている光通信システムでは、石英ガラスの素材で構成された長距離通信に優れたシングルモード光ファイバーが使われている。その伝搬損失は、波長1.3 μm で約0.35 dB/km (1 km伝送した時の光信号の減衰は8%)、波長1.55 μm で約0.2 dB/km (1 km伝送した時の光信号の減衰は4%)と小さい。このため、80 kmの伝送を行っても光の損失は16 dB (光信号の減衰

9 <https://www.rd.ntt/dic/master/photonics/>、https://www.rd.ntt/dic/master/photonics/03_ftth/002.html

は約1/40)であり、受光器で問題なく電気信号に変換できる^{10,11}。

3) 受光器

光ファイバーを伝搬した光信号を電気信号に復号するのが受信側の受光器である。代表的な受光器は、光電変換を行うフォトダイオードとその信号を増幅する増幅回路のTIA (Transimpedance Amplifier) で構成されている。

なお、本報告書内では、情報・データの電気信号を光信号に変換する送信側光源の半導体レーザを「光デバイス」、電気信号の処理が多い受光器を「電子デバイス」と呼んでいる。

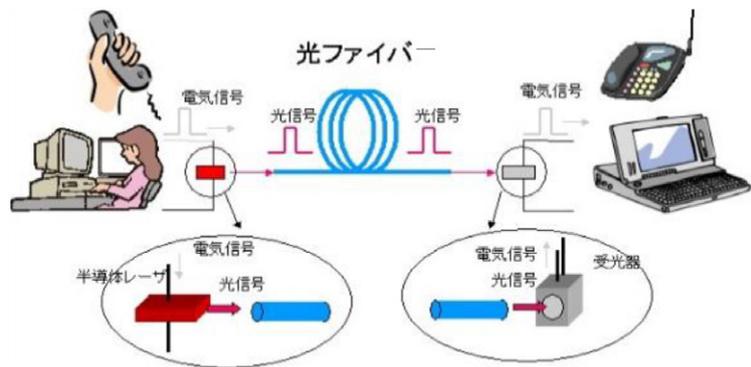


図3-4 光通信システムでの基本的な構成

10 米津宏雄「光通信素子工学」東京：工学図書 1984年 p.311～p.325

11 電子情報通信学会 知識ベース 5群2編 光アクセス線路・伝送技術 (https://www.ieice-hbkb.org/portal/5%e7%be%a4%e3%80%80%e9%80%9a%e4%bf%a1%ef%bd%a5%e6%94%be%e9%80%81/05_02/)

4 | データセンター内における超高速光通信技術の動向

本章では、光通信用光デバイス技術の超高速変調化・低消費電力化等の高性能化の研究開発を10年間以上牽引してきた「データセンター内の超高速光通信技術」の現状、今後の動向、光技術と光デバイスへの期待に関して述べる。

4.1 データ通信量の増大とネットワーク構成の変化

サイバー空間とフィジカル空間を融合したCyber Physical Systemは、Society5.0の実現に必要なシステムであり（図4-1¹²）、フィジカル空間とサイバー空間を繋ぐ超高速大容量光通信技術とともに、サイバー空間内でのコンピューティングリソースの大幅な増大への対応とデータ通信の超高速化が重要である。近年の大容量データの収集・蓄積・解析に対する要求の高まりから、サイバー空間では、リアルタイムのデータ送受信に対応する都市部近郊に分散配置された中小規模のマイクロデータセンターと、メトロコア伝送系と基幹伝送系幹線系などに接続され広域に配置されたメガデータセンター（図中では大規模データセンターと記載）に役割を分割することで、超大規模データ処理の要求に答えている。マイクロデータセンターが利用側末端に近い場所で迅速にデータ処理を行う「エッジコンピューティング」の機能を担い、メガデータセンターがより大きなデータを扱う「クラウドコンピューティング」機能を担っている。なお、「エッジコンピューティング」の定義に関しては諸説あるが、今回は図4-1の構成での定義とした。

データセンターは全世界のIPトラフィック量の70%を扱っていると言われていたが、そのデータセンターのIPトラフィック量は年率25%で増加し、AI/ML等の導入が先行するメガデータセンターでは年率50%以上と爆発的に増加中である¹³。

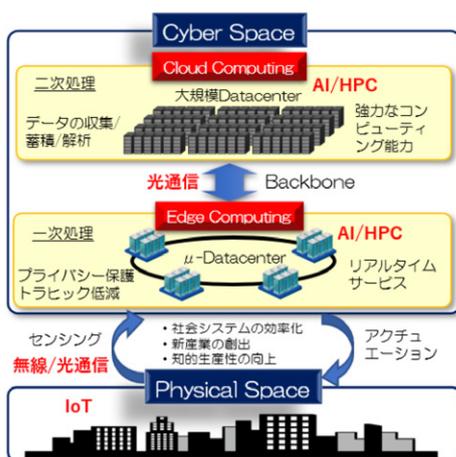


図 4-1 Cyber Physical System (CPS)

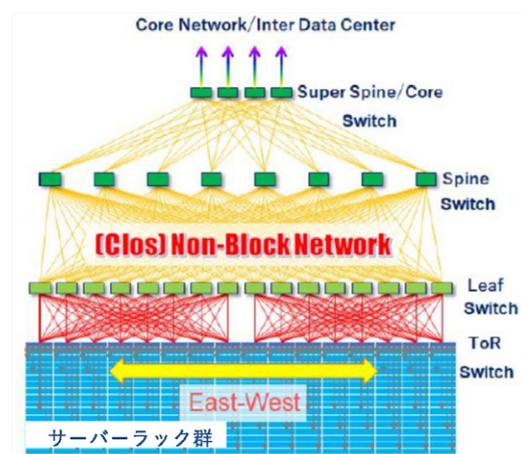


図 4-2 メガデータセンター内部の構成

12 高橋亮「データセンターネットワークの最新動向」電子情報通信学会誌 Vol.106 No.2, 2023年2月 pp.99～101

13 高橋亮「データセンターネットワークの最新動向」電子情報通信学会誌 Vol.106 No.2, 2023年2月 pp.98～99

サイバー空間での大容量データ処理の中核を担うのはメガデータセンターであり、サッカー場以上の広さを有する建物に、数十万台～百万台のサーバーが設置されている。現在の典型的なメガデータセンター内部の構成を図4-2¹⁴に示す。メガデータセンター外部の回線（DCI：Data Center Interconnects）から光ファイバーを通してメガデータセンターに入ってきた光信号は、上部のコアルータから、スイッチ階層（Spineスイッチ、Leafスイッチ、Top of Rack [ToR]スイッチ）を通過して制御され、一番下のサーバーラック上部（19インチ幅）まで伝わる。

大規模システムにおけるこれらのスイッチの階層構造は、待機中のサーバーに情報を効率的に転送して稼働率を高め経済性を確保するために導入されたものである。具体的には、Spineスイッチで折り返される形で、多数のToR、Leaf、Spineの各スイッチで構成される冗長リンクでのノンブロックネットワークが構築され、サーバーからのデータ出力を時分割多重により効率的に目的のサーバーに転送できるようになっている。このように、メガデータセンター内部には膨大な光ファイバーリンクが構築され、転送経路の大幅な拡張とともに接続距離の短縮化が図られている。これにより、サーバーで処理されたデータやプログラムを次々と他のサーバーに転送することが可能になり、サーバー間通信がデータセンターでの通信処理の多くを占めている。メガデータセンターにおけるIPトラフィック量の割合は、データセンター内部のトラフィックが約70%、データセンターとデータセンター間のDCIが約15%、データセンターとユーザー間が約15%となっており、データセンター内部のトラフィック量が圧倒的に多いのが現状である¹⁵。このように、メガデータセンター内部では図4-2において横方向のデータ転送量が主流なので、これを「東西トラフィック」と呼んでいる。一方、メガデータセンター以前のエンタープライズデータセンターでは、図4-2における縦方向（サーバーとデータセンター外部）のデータ転送が主流であったので、「南北トラフィック」と呼んでいた。

4.2 今後のデータセンターのコンピューティングと光配線の動向

近年大きな話題を呼んでいる生成型AIチャットや画像生成AIなどの進展により、ビッグデータを取り扱うメガデータセンターへの期待は大きく、それを反映したメガデータセンターの技術的革新には目覚ましいものがある。このようなAIの進展に伴いメガデータセンター内トラフィックは増加の一途をたどっており、ネットワークの広帯域化、低遅延化、低消費電力化への要求はこれまで以上に大きくなっている。特に、メガデータセンターでのコンピューティングとネットワークで扱う計算量が莫大になっており、これらの消費電力の増大が社会問題になっている。データセンターの消費電力は2030年には全世界の総発電量の約10%になると言う深刻な予測がある¹⁶。ネットワークの広帯域化、低遅延化、低消費電力化は独立事象ではなく相互に関連しあっている（例えば、広帯域化すると消費電力が増大するなど）ので、注意が必要である。以下、これらの動向について整理する。

1) AI/MLクラスターへの急速な進化

生成AIの基盤モデル構築には膨大な量のデータの学習が必要であり、メガデータセンターで扱う計算量および消費電力が増大していることが、これに対応して、計算を効率化し消費電力増大を抑えるための取り組みが活発化してきた。汎用のCPUではこれらに対応できないため、サーバーラック構成において、各社が独自

14 高井厚志「データセンターの動向と光ネットワーク」日本オプトメカトロニクス協会光技術コンタクト 2023年4月号 p.4

15 高橋亮「データセンターネットワークの最新動向」電子情報通信学会誌 Vol.106 No2. 2023年2月 p.99

16 高井厚志「データセンターの動向と光ネットワーク」日本オプトメカトロニクス協会 光技術コンタクト 2023年4月号 p.1～7

のシステムアーキテクチャに対応したGPU、TPU（Tensor Processing Unit）などのアクセラレータを使用してAI処理ノードを構成し、これを大量に接続したAI/MLクラスターの構築が主流になっている。半導体の中でも特にGPUの設計に特化しているNVIDIA Corporationは、Hopper（2024年）から、Blackwell（2026年）、Rubin（2028年）へとつながるGPUの世代交代の技術戦略を明確に示している¹⁷。また、Googleは独自技術であるTPUを用いて、後述する「光スイッチ（OCS：Optical Circuit Switch）技術」を適用したトランスネットワークにより大規模なAI/MLクラスターを形成している。

2) ディスアグリゲーション化（機能を独立させ最適に再分割）

各サーバー内には、図4-3¹⁸に示すようにCPU/GPU/TPU、メモリ、ストレージ、NIC（Network Interface Card）等からなる演算ボードが多数配置されているが、不稼働で待機している部品が多数存在するため、利用効率が低下して低消費電力化を妨げてきた。これに対し、サーバーラック内でCPU/GPU/メモリ/ストレージをそれぞれ別々に集合することによって利用効率を飛躍的に向上させるディスアグリゲーション化（リソース分担型アーキテクチャ）への移行が進み始めている。これを実現するためには、機能を独立させ最適に再分割された装置群を高速で切り替えてデータ転送することが必要であり、PCIe（Peripheral Component Interconnect Express）スイッチまたは光インターコネクト技術をはじめとする光通信技術が重要になる。なお、PCIeはPCIe-6.0まで標準化が進んでおり、データ転送速度は1レーン当たり64 GT/s（Giga-Transfer per Second）である¹⁹。

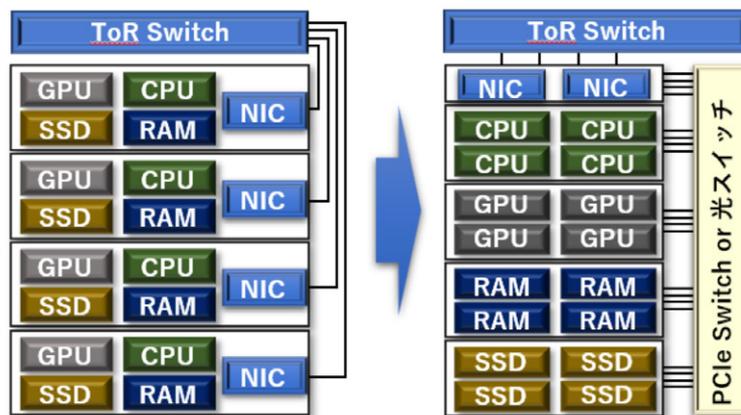


図4-3 ディスアグリゲーション化によるリソース分担型アーキテクチャ

3) サーバーラック内の光配線技術

現在は、各サーバーからToRスイッチまでは電気配線で接続されてデータ転送が行われているが、さらなる広帯域化・低遅延化のためには高速の光配線で接続することが期待される。このため、ToRスイッチを外して各サーバーラックから光信号で直接Leafスイッチに接続し、スイッチ階層を削減する方式が考えられ（図4-4²⁰）、PCIe-6.0標準化の中でPCI-SIG（PCI-Special Interest Group）として議論が始まっている。

17 LightCounting社 Report “Cloud Datacenter Optics Report,” July 2024, pp.7～8.

18 高橋亮「データセンターネットワークの最新動向」電子情報通信学会誌 Vol.106 No2. 2023年2月 p.104

19 <https://pcisig.com/pci-express-6.0-specification>（2024年9月10日アクセス）

20 高橋亮「データセンターネットワークの最新動向」電子情報通信学会誌 Vol.106 No2. 2023年2月 p.100

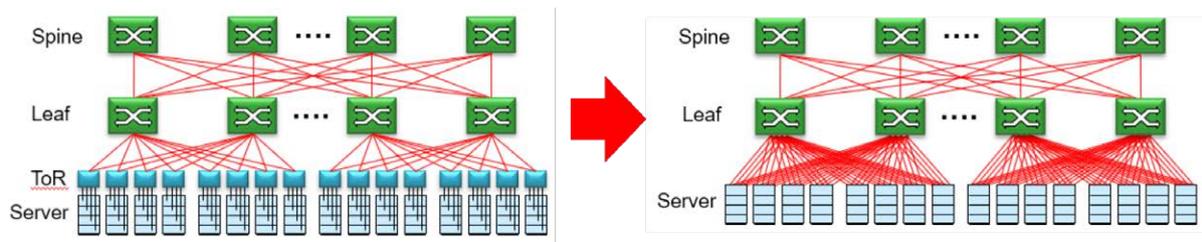


図4-4 ToRスイッチ階層削減での光配線による直接接続

4) 光スイッチ技術の適用

サーバーラック内の光スイッチ技術の導入として注目されるのはGoogleであり、サーバー間ネットワークとAIクラスターに光スイッチによる光リンク技術を採用し、広帯域化、低遅延化、サーバー間およびCPU/GPUの接続性向上とともに、消費電力の大幅な低減を達成している^{21, 22}。具体的には、6000台の光トランシーバーによる三次元トラスネットワークを構築し、4096個のTPUV4を接続した大規模なAIクラスターシステムになっている。

5) メモリ主導型コンピューティング

現在、サーバー内のDRAM（Dynamic Random Access Memory）で構成される主記憶（メインメモリ）と不揮発性メモリ（フラッシュメモリ）からなるストレージ（SSD：Solid State Drive）のアクセス速度は4桁以上異なるので、CPU・GPUで処理したDRAM上のデータをストレージに入出力するには大きな遅延時間が生じている。これに対して、このようなデータ移動をできるだけ避けるメモリ主導型コンピューティングが提案され、DRAMに近い速度の不揮発メモリ（SCM：Storage Class Memory）を主記憶に使う検討が進められている。SCMの候補としては、FeRAM（Ferroelectric Random Access Memory：強誘電体メモリ）、MRAM（Magnetoresistive Random Access Memory：磁気抵抗メモリ）等があるが、DRAMに比べてまだ集積度が低く容量が小さいため、本格的な適用には高集積化の研究開発が必要である。

4

4.3 スイッチ装置と光トランシーバー

次の4.4節で、メガデータセンターにおける光技術への期待、特に、超高速大容量化、低動作遅延化、低消費電力化への光インターコネクション技術への期待について述べるが、その前にスイッチ装置と光トランシーバーの基本的な構成と技術の現状に関して解説する。

スイッチ装置はメガデータセンターにおいてデータ転送の鍵を握るものであり、Spineスイッチ、Leafスイッチ、ToRスイッチ（図4-4参照）で使われている。図4-5に示すように、スイッチ装置は19インチ幅の箱に納められ、その中央には超高速に経路切り替え処理を行うスイッチASICが配置され、実用化されているシステ

21 L. Poutievski, et al., "Jupiter evolving: transforming Google's datacenter network via optical circuit switches and software-defined networking," SIGCOMM'22, August 2022, p. 22-26.

22 N. P. Jouppi, et al., "TPU v4: An Optically Reconfigurable Supercomputer for Machine Learning with Hardware Support for Embeddings: Industrial Product," ISCA '23, June 17-21, 2023.

ムでは大容量のデータ信号を25.6 Tbit/s (800 Gbit/s × 32) で処理している²³。このスイッチ装置のフロントパネルのポートには32個の光トランシーバーが抜き差し可能な形（プラグブル）で装着されており、光トランシーバーとスイッチASICの間は最大数十cmの電気配線で接続されている。光トランシーバーの故障時には活線状態で抜き差しする事ができるので、交換も容易で高信頼度・保守性を有しているのが特徴である。また、標準化により光トランシーバーを構成している光デバイスを自由に選択することができ、光の波長、伝送距離、光強度などをそのシステムに合わせて最適化できる自由度も有している。

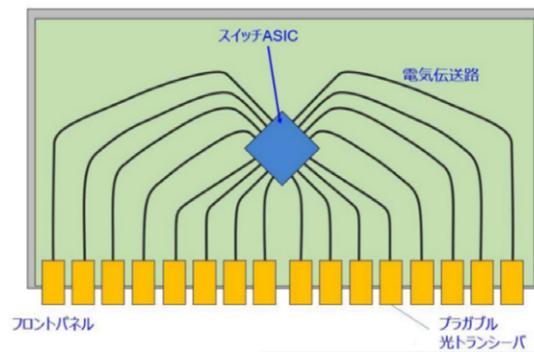


図4-5 スイッチ装置内の構成：スイッチASICとプラグブル光トランシーバー

光トランシーバーは、送信側で電気信号を光信号に変換し光信号を光ファイバー内へ伝送する送信機（トランスミッター）と、光ファイバーから伝送されてきた光信号を受信側で電気信号に変換する受信機（レシーバー）の、両方の機能を持っている。送信側は入力電気信号を増幅するドライバーICとTOSA（Transmitter Optical SubAssembly）で構成され、TOSAの中には情報・データの電気信号を光信号に変換する光デバイスと光信号を光ファイバーに結合するためのレンズが搭載されている。受信側はROSA（Receiver Optical SubAssembly）、光から生成された電流信号を特定の振幅の電圧信号に変換するTIA、デジタル信号処理により強力な誤り訂正を行うDSP（Digital Signal Processor）、受信信号からデータ列を抽出しクロックタイミング信号を復元するCDR-IC（Clock Data Recovery）で構成されている。ROSAの中には、光ファイバーを伝搬した光信号を電気信号に復号する受光器と集光するレンズが配置されている。

現在、主に用いられているQSFP-DD（Quad Small Form Factor Double Density）光トランシーバー²⁴、と、OSFP（Octal Small Form-factor）光トランシーバー²⁵を図4-6に示す。以前のCFP（Centum Form-factor）光トランシーバー、現在研究開発が活発になっている次世代OSFP-XD（Octal Small Form-factor Extra Dense）光トランシーバーを含め、それぞれのサイズ比較を表4に纏めた。CFP光トランシーバーに比べると、現在主流のものは幅約20 mm、長さ約100 mm、高さは約10 mmと大幅にコンパクトになり、スイッチ装置のフロントパネルに32本差し込むことができるようになった。光トランシーバーの伝送速度は市場では400 Gbit/sが主流で、800 Gbit/sが本格導入され始めており、スイッチ装置の情報処理能力はそれぞれ12.8 Tbit/s（400 Gbit/s × 32）、25.6 Tbit/s（800 Gbit/s × 32）に相当する。

23 那須秀行「次世代ネットワークスイッチ装置用CPO外部光源」日本オプトメカトロニクス協会 光技術コンタクト 2023年4月号 p.35

24 QSFP-DDホームページ：https://qsfp-dd.com（2024年9月1日アクセス）

25 OSFPホームページ：https://osfpmsa.com（2024年9月1日アクセス）

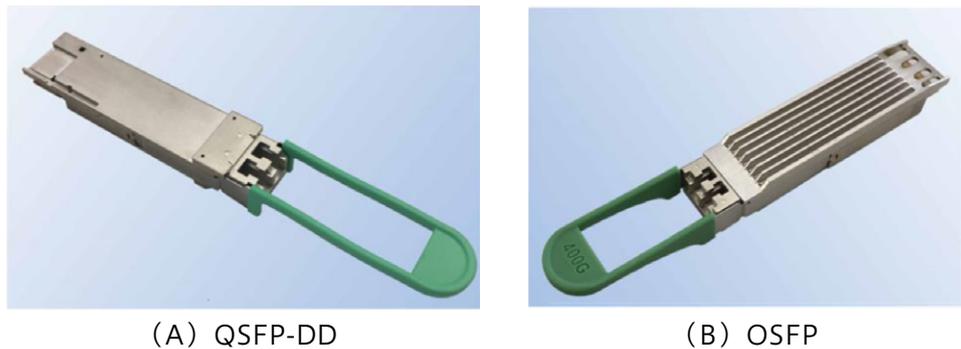


図4-6 光トランシーバー

表4 光トランシーバーのサイズ比較

種類	以前 (2009年～)	現在主流 (2017年～)		次世代 (2022年～)
	CFP	QSFP-DD	OSFP	OSFP-XD
幅 (mm)	82	18.4	23	23
長さ (mm)	145	78～93	100	109～125
高さ (mm)	13.6	8.5	13	15.5

現在主流および次世代の光トランシーバーの内部では、光トランシーバーの変調速度が100 Gbit/sを超えるようになった2016年頃からは、5章で述べる「変調光信号を発生する光デバイス」が4素子搭載されてきた。現在主流の400Gイーサネット仕様の400 Gbit/s光トランシーバーでは、100 Gbit/sで光を変調する光デバイスが並列に4素子搭載されて、波長多重（出力の光ファイバーは1本）または空間多重（出力の光ファイバーは4本）で他のスイッチ装置と接続している。なお、光通信システムネットワークにおける光トランシーバーの市場売上では、データセンターが70%近くを占めており²⁶、光デバイスの高性能化技術とともにビジネス面でもデータセンターが牽引していると言える。

メガデータセンター内の100 Gbit/sの超高速光通信では、広帯域化の技術革新が必要になり、従来の光強度のON-OFFのみの2値の光変調（NRZ：Non-Return Zero）ではなく、「0、1、2、3」の4値を使う多値強度変調技術PAM4（Pulse Amplitude Modulation 4）が採用されている（図4-7）。デジタル通信において、物理信号として一度に送信できるデータの最小量をシンボルと呼ぶが、PAM4変調方式ではアイ開口が3つ形成されており、シンボルレート（Baudレート：ポーレート）の2倍の伝送レートを実現できる。つまり、1シンボルでNRZの2倍の伝送レートを実現できるので、同じ変調周波数帯域を有する光デバイスで、2倍の情報量を伝送できる。一方、PAM4のアイパターンの開口度の縦方向の大きさはNRZの1/3であり、信号雑音比はNRZに比べ約一桁低下し雑音の影響を受けやすいので、誤り訂正機能が導入されている。この強力な誤り訂正をデジタル信号処理で行うために、デジタルICのDSP（Digital Signal Processor）が光トランシーバー内に配置されている²⁷。

²⁶ LightCounting社 Report “Ethernet Optics and Highlights from CIOE and ECOC,” October 2024, p.4.

²⁷ <https://community.fs.com/jp/article/nrz-vs-pam4-modulation-techniques.html>（2024年8月27日アクセス）

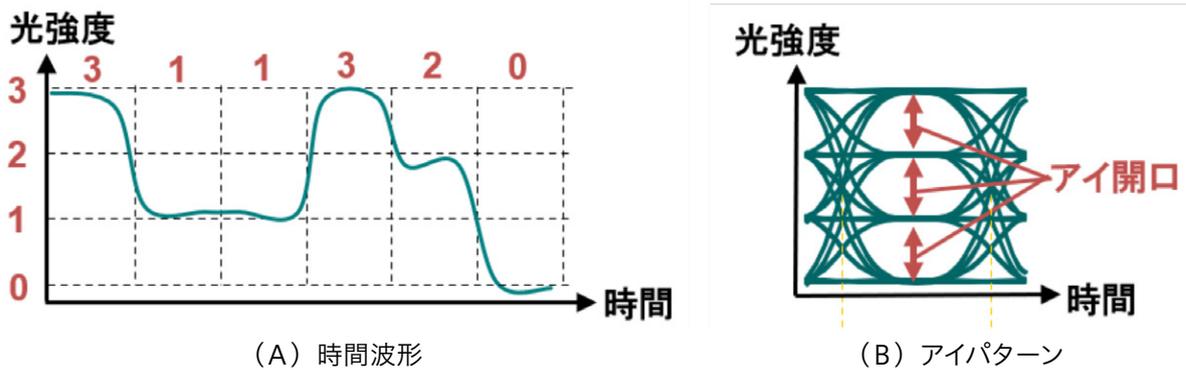


図4-7 PAM4 (Pulse Amplitude Modulation 4) 変調方式

4.4 光トランシーバーと光デバイスへの期待

4.2節で述べた、「サーバーラック内の光配線技術、光スイッチ技術の適用」は、メガデータセンターにおける光技術への期待の側面であるが、ここでは「光トランシーバーと光デバイス」にフォーカスして、これらへの期待を下記に整理する。

1) 光トランシーバー・光デバイスの超高速化・低消費電力化

今後も増え続けるデータ通信量に対応して、メガデータセンターにおけるスイッチ装置の光トランシーバーの伝送速度は、400 Gbit/sから、800 Gbit/s、1.6 Tbit/s、3.2 Tbit/sへと、約3年毎に2倍のペースで増大していく²⁸。現在、適用が始まりつつある800 Gbit/s光トランシーバーでは、100 Gbit/s変調の光デバイスを8素子搭載する「100 Gbit/s × 8ch」構成であるが、今後の第2世代の「200 Gbit/s × 4ch」に移行していくために、200 Gbit/s高速変調動作の光デバイスの研究開発が盛んになっている。この200 Gbit/s光デバイスは、「200 Gbit/s × 8ch」を基本構成とする1.6 Tbit/s光トランシーバー用で使用されることになり、その後は光デバイスに対する高速化の要求は400 Gbit/s動作などへ移ると予想される。このような光デバイス自体の変調速度の増大は、ビットレート当たりの消費電力 (pJ/bit) の低減につながり、光トランシーバー、スイッチ装置、データセンターネットワークの消費電力低減に貢献できる。また、4.3節で述べた「サーバーラック内の光配線技術、光スイッチ技術の適用」などのメガデータセンター内の光技術の適用範囲の拡大を加速していくと期待される。

2) 光の特長である並列性を利用した大容量化

光デバイスの大きな特長は、光の並列動作での多チャンネル化により大容量化を図れる点である。光トランシーバー内部のTOSAにおいては、光の変調速度が100 Gbit/sを超え始めた2016年頃から4素子のInP系化合物半導体光デバイスが集積され、例えば「100 Gbit/s × 4ch」で400 Gbit/sの光信号を形成するようになった。また、最近では「100 Gbit/s × 8ch」構成で800 Gbit/sの光トランシーバーを実現しており、並列性の利用が進展している。今後も並列性を利用した大容量化が進展すると期待される。

一方、既存の集積回路製造プロセス技術が利用できるシリコンフォトニクスを用いた光変調器では、材料特性の点でInP系化合物半導体の変調器に比べて高速変調が難しいが、光・電子素子の多チャンネル集積化

28 LightCounting社 Report “Cloud Datacenter Optics Report,” July 2024 p.40.

が容易なことを活かして「100 Gbit/s × 16ch」で1.6 Tbit/sを実現するように、さらに並列性を活用する方向性が示されている。

3) LPO (Linear-drive Pluggable Optics) 光伝送技術による低消費電力化

データセンター内の超高速情報伝送において、電気配線技術では高速化に伴う消費電力と伝送損失増加の問題が顕著になるのに対し、光通信技術では光ファイバーの伝送損失が圧倒的に小さく、システムの低消費電力化に対して有利である。しかし、光トランシーバーの消費電力は、2000年代の10 Gbit/sの時は約1 Wであったが、最近の400 Gbit/s、800 Gbit/sといった高速化に伴って20W程度に急増し、スイッチ装置にプラグブル光トランシーバーを32台フル搭載すると数百W級になり、スイッチ装置全体の消費電力の約30%～40%を占めるようになってきている^{29,30}。

PAM4変調方式が採用された400 Gbit/s以降の光トランシーバーでは、高速化に伴って消費電力はさらに増大している。その理由は、高度な強力な誤り訂正を行うDSPとともに、受信信号からデータ列を抽出しクロックタイミング信号を復元するCDR (Clock Data Recovery) 回路の消費電力が大きく、光トランシーバーの33%～70%ほどになっているためであり³¹、これらの消費電力の削減がシステムの低消費電力化の鍵になっている。そのため、2023年のOFC国際会議での議論に端を発し、2023年のECOC国際会議、2024年のECOCおよびOFC国際会議で大きな議論となった『LPO技術』が注目されている。このLPO技術は、光トランシーバー内部からDSPとCDRを排除してリニアドライブ化を行うものであり、低消費電力化とともに、コストの大幅な削減、低遅延化への貢献が期待されている。LPOの標準化はまだ議論の最中であり、各種の方式 (Half Retiming方式、Linear Receiver Optics等) が提案されている。ビット誤り率の悪化、光デバイスのリニアな周波数特性等の課題もあるので、メガデータセンター内では短距離系から適用されるといった議論が多くなっている。相互運用性 (インターオペラビリティ) の確保の観点なども含めいくつかの課題が残るかもしれないが、2030年代には光トランシーバーの主流になっていく可能性もある。

4) CPO 光配線技術によるスイッチ装置内の超高速化・低消費電力化

図4-5に示したように、現在のスイッチ装置ではフロントパネルのスロットに差し込まれた光トランシーバーからスイッチASICまでの間は最大数十cmの電気配線で接続されている。実用化されているシステムでは、25.6 Tbit/s (800 Gbit/s × 32: 7 nm CMOS) のデータ信号を処理しているが、今後も51.2 Tbit/s (1.6 Tbit/s × 32: 5 nm CMOS)、102.4 Tbit/s (3.2 Tbit/s × 32: 3 nm CMOS)、204.8 Tbit/s (6.4 Tbit/s × 32: 2 nm CMOS) といったようにASICの処理速度が高速化していくと、スイッチ装置内の電気配線起因による高速信号の劣化が大きな課題になる。

これに対して、ASICの極近傍に光トランシーバーを配置して電気配線は数cm以下に短尺化するとともに、スイッチ装置前面のフロントパネルまで光ファイバーで接続し、高周波信号劣化を抑圧するCPO (Co-Packaged Optics) 技術が注目されている (図4-8)³²。

29 <https://www.fibermall.com/ja/blog/what-is-lpo-optical-module.htm> (2024年5月30日アクセス)

30 <https://community.fs.com/jp/article/what-is-the-lpo-transceiver.html> (2024年5月30日アクセス)

31 武智勝「ECOC2024報告: 通信用光トランシーバー関連」電子情報通信学会LQE研究会LQE2024-47 2024年11月

32 那須秀行「次世代ネットワークスイッチ装置用CPO外部光源」日本オプトメカトロニクス協会 光技術コンタクト 2023年4月号 p.36

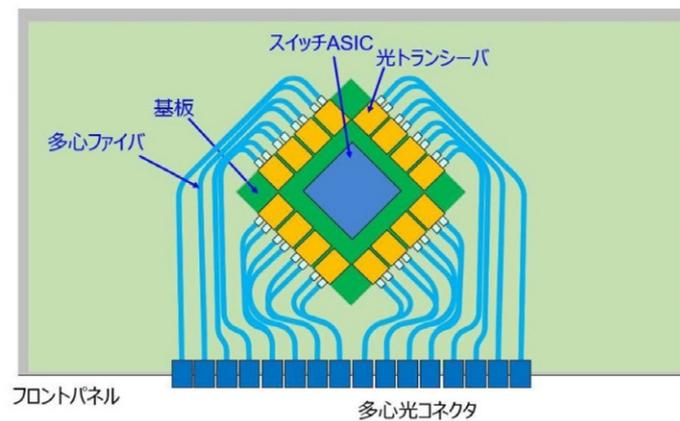


図4-8 スイッチ装置内 CPO (Co-Packaged Optics) 光配線技術

この技術についても、2023年のOFC国際会議での議論に端を発し、2023年のECOC国際会議、2024年のECOCおよびOFC国際会議で大きな議論となっている。電気配線による伝送損失を減少し広帯域化を実現できるだけでなく、電気配線による波形歪を補正する信号再生のCDRやDSP等が不要になるので、消費電力低減の観点（約50%）でも期待されている。ただし、このCPOには下記のような課題もあり、注意が必要である。

4-1) スイッチASIC近傍は90°C～100°C以上の高温になるため、光デバイスは高温で安定動作する必要があり、光変調器、半導体レーザには以下のような研究開発が求められる。

- ・光変調器：動作温度に敏感な現状のInP系化合物半導体に対して、温度特性が小さい新材料系の光変調器の適用が重要になる。
- ・半導体レーザ：現状の量子井戸型InP系半導体レーザは85°C～90°Cまでは高信頼で安定動作をするが100°C以上では難しくなるため、高温動作に優れる量子ドットレーザ等の新しいInP系半導体が必要になる。

4-2) 光デバイスを高温のASIC近傍に配置すると、故障した際に、今までのフロントパネルで抜き差ししていたプラグブル光トランシーバ方式が活用できなくなり、保守性に優れていたスイッチ装置自体の破綻にもなりかねない。

4-3) スイッチ装置内での新しい構成の光ファイバ配線になるので、実用性・コストを含めた技術の成熟度が鍵になる。

上記課題の解決に向けて、InP系半導体レーザはフロントパネルに装着してそこから光ファイバでASIC近傍の光変調器モジュールまで持っていく方式（ELS方式：External Laser Source）も検討されており、OIFのCPO-Collaboration標準化で議論が進んでいる。一部の企業（Broadcom、Intel）では独自にCPO開発を進めているが、全体的には当面は光トランシーバをフロントパネルに装着する現状の構成を維持していく方向になっている。一方で、204.8 Tbit/s（6.4 Tbit/s × 32：2 nm CMOS）が実現される2030年代には、スイッチ装置内に光配線が適用される『パラダイムフト』が起きてInP系化合物半導体に比べて高温で安定に動作する光変調器デバイスによるゲームチェンジが起きる可能性もある。

5) 光電融合技術

光電融合技術は光と電気の機能を融合した技術であり、光通信・コンピューティング技術の超高速・大容量化、低消費電力・小型化などが期待される。この技術を積極的に活用して代表的な例としてNTTのIOWNがあり、オールフォトニクス世界の実現に向けて研究開発が進められている。ここでは、ボード間、チップ間、チップ内といった短距離にも積極的に光配線によるデータ転送を導入していく計画であり、データ

センターの消費電力の問題の解決策として期待される。この光電融合技術には、これまで日本が得意としてきたInP系化合物半導体技術、欧米が得意のシリコンフォトニクス技術とともに、異なった材料・デバイスをモノリシック集積していく異種材料集積技術の開発が重要になる。

4

データセンター内における
超高速光通信技術の動向

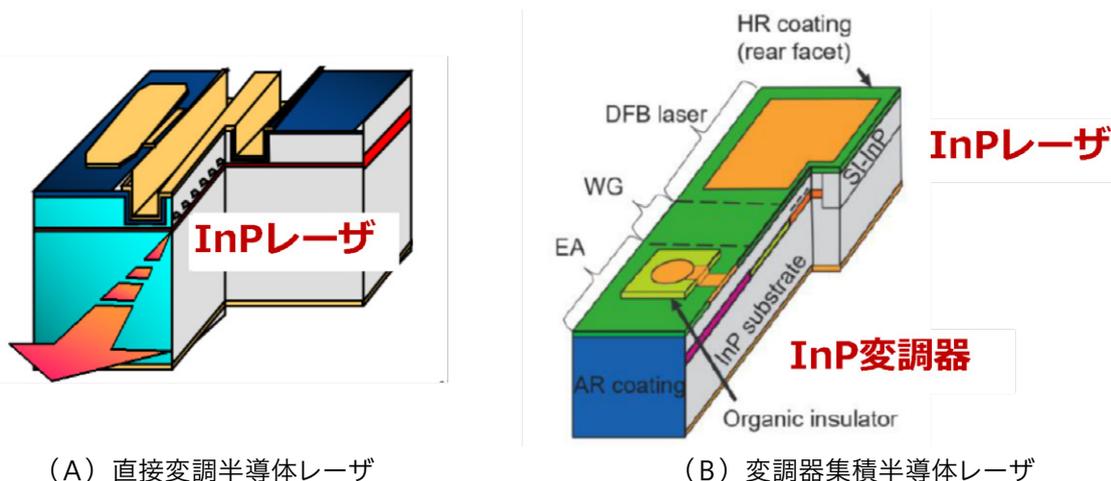
5 | 光デバイスの技術動向

5.1 光デバイスの種類

光信号発生の光デバイスは、光通信波長である $1.3\ \mu\text{m}$ ～ $1.5\ \mu\text{m}$ 帯に対応したレーザ光を発生する化合物半導体のInP系のデバイスであり、1980年代から伝統的な材料系を用いている。この光デバイスは光通信における高速化の鍵を握るものであり、その変調速度は光通信システム導入時（1980年代）の100 Mbit/sから現在の400～800 Gbit/sへと約一万倍に高速化してきた。これにより、急激なデータ通信量増大におけるボトルネックの解消に貢献し、メガデータセンター内の超高速データ転送の核心となるスイッチ装置の超高速動作にも対応してきた。

光デバイスは直接変調半導体レーザと変調器集積半導体レーザの2種類に大別できる(図5-1)^{33, 34}。直接変調半導体レーザ(図5-1(A))は注入する電流をON-OFFして変調光信号を発生する光デバイスである。このレーザは、InP系のp/n接合に挟まれた光を出す活層層内で光系と電子系の共振現象である緩和振動が生ずるため、変調速度がこれによって制限されるが、50 Gbit/sの変調光信号を出すことができる。変調器集積半導体レーザ(図5-1(B))は、InPレーザ部から発生したレーザ光をモノリシック集積されたInP系変調器部に注入し、ここで変調光信号を生成する光デバイスである。この変調器部においては、p/n接合に挟まれた光吸収層に逆方向電圧を印加し、この電圧をON-OFFしてシャッターの様に光をON-OFFしている。この変調器集積半導体レーザは、変調器部の素子容量を小さくすることで変調速度を向上させることができるので超高速変調動作に優れており、最近の変調速度100 Gbit/s以上の超高速化では主流になっている。それぞれの光デバイスの大きさとしては、直接変調半導体レーザが長さ $150\ \mu\text{m}$ 、幅 $200\ \mu\text{m}$ 、厚さ $100\ \mu\text{m}$ 程度であり、変調器集積半導体レーザは長さ $500\ \mu\text{m}$ 、幅 $200\ \mu\text{m}$ 、厚さ $100\ \mu\text{m}$ 程度である。このように、光デバイスの寸法はサブmmであるため、4.3節で述べたTOSA内に光デバイスを4～8素子搭載でき、並列化による超高速化が可能になっている。

- 33 大野修平 他「直接変調型DFBレーザのuncooled動作による106 Gb/s × 4 λ PAM4信号の2 km伝送」電子情報通信学会総合大会2022年3月c-3/4-040
- 34 浅倉秀明 他「93 GHz帯域を有するEA-DFBレーザを用いた420 Gbps PAM8動作」電子情報通信学会総合大会2023年3月c-3/4-050



(A) 直接変調半導体レーザー

(B) 変調器集積半導体レーザー

図 5-1 光通信システム用 InP 系化合物半導体光デバイス

5.2 光デバイス技術の高速動作への課題

メガデータセンター内のスイッチ装置の超高速動作に対応するため、光デバイスは 400 Gbit/s まで高速変調動作を達成してきた。今後、メガデータセンター内のさらなる高速化（800 Gbit/s、1.6 Tbit/s、3.2 Tbit/s、6.4 Tbit/s）、および LPO や CPO などの革新的な方式への対応が必要になり、以下に示す 3 つの光デバイス技術の課題がある。

1) 光デバイスの超高速・大容量動作

5.3 節で詳述するが、現時点でメガデータセンター内のスイッチ装置用に実用化・適用されている超高速光デバイスの多数は InP 系化合物半導体光デバイスで、一部にシリコンフォトニクスが用いられている。最先端の 400 Gbit/s ~ 800 Gbit/s の光トランシーバーに用いられている光デバイスは、100 Gbit/s（PAM4 変調方式を使っているためポーレートは 50 GBaud）の変調速度であるが、最近では 200 Gbit/s（100 GBaud）の変調速度の光デバイスも適用され始めている³⁵。

スイッチ装置の今後のさらなる高速化・大容量化として、まずは 3.2 Tbit/s（400 Gbit/s × 8 : 200 GBaud）、6.4 Tbit/s（800 Gbit/s × 8 : 400 GBaud）の PAM4 変調が期待され、光デバイスの変調周波数帯域としてはそれぞれ最低限 100 GHz、200 GHz が必要になる。しかし、最近の光デバイスの研究開発に関する学会・国際会議発表では、これまで主流であった InP 系光デバイスの変調帯域に関する報告は 100 GHz 強で飽和してきており、高速変調の限界に達する可能性がある。このため、新たな技術の模索も必要になってきている。シリコンフォトニクスの変調器は材料物性的に高速変調特性では InP には及ばないので、Mach-Zehnder (MZ) 変調器ではなくマイクロリング型変調器の研究開発が盛んになっているが、温度依存性の対応を含めまだ多くの技術課題がある。

2) 光デバイスの高温安定動作

4.4 節で述べたように、スイッチ装置内部の約 50 cm の電気配線に起因する高速信号劣化を抑制する技術として CPO が提案され、2030 年代におけるメガデータセンターのスイッチ装置の構成コンセプトを大きく変

35 LightCounting社 Report “Cloud Datacenter Optics Report,” July 2024 pp.44 ~ 52.

える『技術のパラダイムシフト』として期待されている。これを実現するためには、高温になるスイッチASICに隣接する光デバイスの高温での安定動作が必須になる。CPO光配線技術は、204.8 Tbit/s (6.4 Tbit/s × 32: 2 nm CMOS)のスイッチASICを使うときに適用される可能性が高く、光トランシーバーとしては「800 Gbit/s (400 GBaud) × 4ch」が要求され、これに対応する光デバイスが求められる。すなわち、従来よりも高温で安定して動作する変調帯域の広い光変調器 (200 GHz) とInP系半導体レーザ、およびその融合技術などの研究開発が課題になる。

3) 小型化・低消費電力化対応

5.1節で述べたように、光デバイスのサイズはサブmm程度で小さいため、光トランシーバー (幅は約20 mm) 内のTOSA (幅は約数mm) に光デバイスを4~8素子搭載でき、光の特長である並列性を活かすことができた。しかし、上記1) 2) の課題に対しては光デバイスの構造を大きく変える必要もあると考えられるが、光通信技術の優位性を保つためには小型化の維持は重要である。また、メガデータセンターの消費電力の増大を避けるためには、光デバイスの低消費電力化を進めることは必要であり、OSFP-XD等の超高速光トランシーバーにおいても、10 W級の低消費電力動作を実現することが必須である。

5.3 光デバイスの国際会議状況と日本の存在感

まず、国際会議における光デバイスの位置付けに関して説明をする。光通信システム、光デバイスに関する主要な国際会議である、ECOC (欧州光通信国際会議)、OFC (光ファイバー通信国際会議) では、システム関連の発表 (アーキテクチャー、システム、ネットワーク) と、ハードウェア技術であるデバイス関連の発表がほぼ同数であり、そのデバイス関係の発表論文数の内訳の一例 (ECOC2023国際会議) を図5-2に示す。光デバイスはデバイスの論文発表数の約50%を占め、最も研究開発が盛んで重要な技術分野であることが分かる。



図 5-2 ECOC2023 国際会議でのデバイス関係の発表論文数の内訳

次に、光通信システム用の光デバイスに関する日本の技術的貢献について述べる。3章で述べたように、光通信システム用の光デバイスは日本が強みを持つ技術の一つであり、1980年代から日本が席卷してきたInP系化合物半導体光デバイス技術は、現在も国際会議論文数、およびInP系超高速光デバイスでの市場における製造国・地域別データで世界トップシェアを有している。

国際会議における光デバイス論文数の国・地域別割合の一例として、図5-3にECOC (欧州光通信国際会議) における2023年10月開催のデータ (B) と、その10年前の2013年のデータ (A) を示す。ここでは、招

待講演と口頭講演でのデータを示している。ポスター講演の発表数はカウントしていない。ここから、2013年、2023年共に、日本の論文数が全体の約1/3を占めており、日本が国別でトップの論文発表数を有していることが分かる。さらに、光デバイスの最先端技術の結集であるメガデータセンター用InP系超高速光デバイスの変調器集積半導体レーザー（図5-1（B）参照）の市場における製造国・地域別データにおいても、日本は高いシェアを有している（図5-4）³⁶。

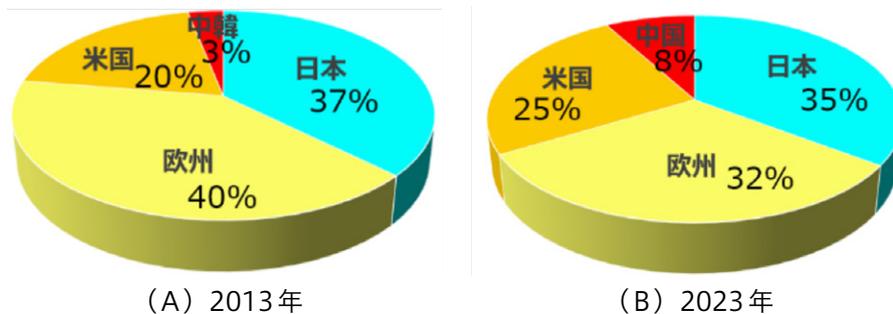


図5-3 ECOC 欧州光通信国際会議での光デバイスの発表論文採択数

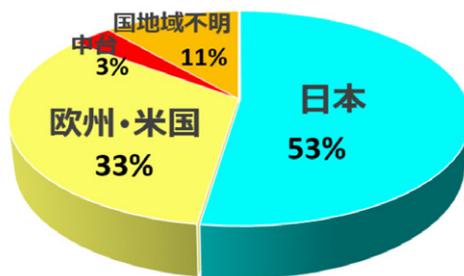


図5-4 InP系超高速光デバイス（変調器集積半導体レーザー）の製造国・地域別データ（2023年）

このように、日本は光通信システム用の光デバイスに関し、1980年代から国際的に中心的役割を担ってきた。この要因としては、デジタル的技術要素（設計、プロセス、装置）が多いシリコンの半導体集積回路技術に比べて、InP系化合物半導体光デバイス技術はアナログ的でノウハウ・人材起因の側面が多く、これまでの光デバイスの基本概念・設計・材料プロセス技術は伝統的に日本の大学・企業研究所が中心に推進し、強みとなる技術を維持してきたことがある。また、InP系化合物半導体の光物性・デバイス物理を理解して進める大学と企業との連携が継続して行われ、大学の修士・博士課程を修了した学生が企業の研究所に入り、光デバイスの知識と人材が産学で引き継がれてきたことも大きな要因と考えられる。

一方、最近の国際的な変化として、経済安全保障に係わる半導体のサプライチェーンの確保や半導体産業の強化などの視点から、米国、欧州、中国、台湾などが光通信用の光デバイスの開発に注力している。米国や欧州は、変調速度では劣るが集積化・低コスト化で有利なシリコンフォトニクスに対し、ここ数年間で大規模なウエハー生産設備投資を含めて多くの資金を投入し推進してきた。また、中国や台湾では、メガデータセンター用の光デバイス（400～800 Gbit/s）に比べ、数世代遅い変調速度の光デバイス（10 Gbit/s～25

36 QYResearch「グローバルEML（電界吸収変調レーザー）市場洞察、2030年までの予測」2025年1月、<https://www.qyresearch.co.jp/news/7792/about-us> 資料を元にCRDSにて作成

Gbit/s) を用いたアクセス系、無線・モバイル系の光通信システムにおいて、低コスト化を武器に大きなシェアを有しており、今後はこれらの技術の高度化によりメガデータセンター用の最先端光デバイス技術でも日本の脅威になる可能性がある。

5.4 光デバイスの今後の研究開発動向

表5に、InP系、シリコンフォトニクス、光デバイスとして用いる新材料系のベンチマーキングを示す^{37, 38, 39, 40, 41}。伝統的なInP系化合物半導体光デバイスは「100 GHzの壁」を越えて「Beyond 100 GHz」を実現する研究開発が進み、今後5年～10年間も光通信システム用の最先端の光デバイスとして利用されると考えられる。また、シリコンフォトニクスや新材料系は発光しないので、光源としてのInP系化合物半導体レーザの利用は継続し今後共高性能化が進んでいく。一方、高温で超高速動作する光変調器に関しては、2030年代に向けて、これまで光デバイスに適用されてこなかった高機能高性能の材料の検討や、新材料を含めた新たな技術の模索が始まっている。2023年からの国内学会、国際会議、研究会、展示会での発表、学会誌を含めた専門雑誌記事などの公開情報と、国内のアカデミア・産業界の有識者へのヒアリング調査を通じて把握し整理した技術の方向性を以下にまとめる。

1) InP系半導体

1980年代から日本がリードしてきた光通信波長1.3 μm～1.5 μm帯に対応したInP系光デバイスは、5.1節で説明したように直接電流変調型（直接変調半導体レーザ）とレーザにEA変調器を集積した集積型（変調器集積半導体レーザ）に大別される（図5-1参照）。この数年間は、超高速化を目指して後者の変調器集積半導体レーザが主流になっている。その理由は、InP系光変調器の素子容量を低減することで超高速変調動作が可能になるためであり、最近の変調速度100 Gbit/s（50 GBaud）のスイッチ装置への適用と共に、200 Gbit/s（100 GBaud）の光デバイスも実用化され始めている。

InP系変調器集積半導体レーザは、① InP基板上にInP系光変調器とInP半導体レーザをMOCVD(Metal Organic Chemical Vapor Deposition) 結晶成長技術でモノリシック集積可能、② 小型、③ 低消費電力

- 37 電子情報通信学会ソサイエティ大会 2023年9月 名古屋大：Sessions as C-3/4 光エレクトロニクス/レーザ・量子エレクトロニクス、TK-3 Japan Prize 受賞特別記念講演「長距離大容量光データ通信の開拓」、CI-1 光技術がSDGsに貢献できるか、B-10B 光通信システムB。
- 38 49th European Conference on Optical Communication 2023 (ECOC2023), Glasgow, Scotland, Oct. 2023: Sessions as M.A.2 Microring Resonators, Tu.C.2 Emerging Modulator Materials, We.A.4 Advanced Modulator Design, We.B.4 Lasers & Sources, We.B.6 High Speed Transceivers for Short Reach, We.C.4 Modulators & Neural Networks, We.C.6 High Speed Devices for Datacomms, We.D.4 Integration of III-V Devices, Th.B.4 Lasers and Detectors.
- 39 電子情報通信学会 総合大会 2024年3月 広島大学：Sessions as BI-1 データセンターネットワーク周辺最新技術動向と次世代短距離向け光通信システムの展望、BI-2 ミリ波・テラヘルツ通信の最新動向、BI-6 データセンターの進化とそれを支えるフォトニクス技術、C-3/4 光エレクトロニクス/レーザ・量子エレクトロニクス。
- 40 電子情報通信学会 ソサイエティ大会 2024年9月 日本工業大学：Sessions as BI-6 データセンターを支えるフォトニクス、C-3/4 光エレクトロニクス/レーザ・量子エレクトロニクス OPE/LQE、B1-1-01 データセンターnetwork・次世代短距離光通信システム、BCI-2 B5G 6G。
- 41 50th European Conference on Optical Communication 2024 (ECOC2024), Frankfurt, Germany, Sept. 2024: Sessions as Tu1C: Novel Opportunities for Integrated Photonics & Transceivers, Tu1G: Novel Modulators, Tu3G: Heterogeneous Laser Integration, Tu4G: Progress of Silicon Photonic and Plasmonic Technology, W3G: Integrated Light Sources, W4D: 50G PON, Th1G: Devices for High-Speed Transmission, Th2G: Resonator-Based Modulators

動作といった特長を有している。一方、光変調器と半導体レーザーの特性の温度係数が異なるため、0°C～85°CなどのWTR（Wide Temperature range）動作では、光変調器の動作バイアス電圧の制御の必要性や、85°Cを越すようなCPO環境下での高速動作に課題があり、これらへの対応が必要になる。

今後のメガデータセンターでの光通信システムの1.6 Tbit/s（200 Gbit/s × 8 : 100 GBaud 変調）、3.2 Tbit/s（400 Gbit/s × 8 : 200 GBaud 変調）、6.4 Tbit/s（800 Gbit/s × 8 : 400 GBaud 変調）といった超高速動作の要求に対し、現時点ではInP光変調器の変調周波数帯域は100 GHz前後（CR時定数による律速）であるが、新しい素子コンセプト、電極構造の見直し、長さ辺りの変調効率の向上などの検討により、さらなる広帯域化が期待されている。

2) シリコンフォトニクス

シリコンフォトニクスによる光変調器はInP系に比べて高速変調に難があるが、シリコンの集積回路プロセス技術による高精度で安定した加工、低コストチップ製造といった特長を活かして、光変調器・受光素子と電子素子を多数集積できる。このため、欧米はここ10年間近く技術開発や生産設備に大きな投資をしてきた。しかし、光源であるInP系レーザーからのレーザー光をどのように低損失でSi基板上のSi光導波路に導入するかといった大きな課題もある。数年前からは、光変調器としてMZ変調器を採用したものが製品化されている。

この技術では100 Gbit/sの変調速度（50 GBaud）まで実用化をされているが、Si材料の特性から100 GBaud（200 Gbit/s）が限界で、高速化でInPには勝てない可能性もある。しかし、光デバイスの高並列・高集積が可能な点を活かして、8chから16chまで拡大していく方向性があり、200 Gbit/s × 16chで3.2 Tbit/sの実現を目指した研究開発が行われている。また、高速化にはマイクロリング変調器、SiGe材料での変調器も有望である。これらでは、温度依存性の課題の克服とともに、InP系半導体レーザーとの集積化が重要になる。最近では、高速化のために、MZ変調器とマイクロリング変調器を組み合わせるなどの検討も行われている。シリコンフォトニクスは、光配線技術をボード間、チップ間、チップ内といった短距離のデータ転送に積極的に導入していくときの光電融合技術の核となる可能性もあり、今後もこの技術の進展には注目しておく必要がある。

3) 新材料系

InP系を凌駕する変調速度を求めて、これまで光デバイスに適用されてこなかった材料や高機能・高性能が期待される新材料に関する発表が国内外の学会で活発化している。なお、この報告書では従来から知られている材料でも光デバイスに適用されてこなかったものと新しい材料を含めて「新材料系」と呼ぶ。InP、Si、GaAsなどの半導体では、電圧印加による屈折率変化の指標である「ポッケルス係数」が小さいが、以下に示すように大きなポッケルス係数を有する材料もある。表5ではポッケルス係数の強度を表す「電気光学利得（pm/V）」で比較をした。電気光学利得は、屈折率の3乗と電気光学定数の積である。このような材料では、光導波路の屈折率を電圧で大きく変化させて入射光の効率的な変調ができるため、材料探索と光デバイスへの適用研究が行われている。まだ基礎研究レベルが多いが、変調速度でInPに勝るとともに、より高温動作できる新たな変調器を目指した研究開発が期待される。

それぞれの新材料系には一長一短があり、2030年代に向けて今後も新たな材料の探索と光デバイスとしての技術的な筋の良さ（特性の安定性、作りやすさなど）の見極めが重要になる。表5に示したように、新材料系の光デバイスはまだサイズが大きく、データセンターなどのデータコム系で採用するには、小型化の取り組みが必要である。そのため、新材料系光デバイスの最初に狙うところは、サイズやコストの観点ではなく、性能重視のデジタルコヒーレント光伝送技術を使うテレコム系の基幹ネットワークへの適用の可能性がある。

今後、新材料系光デバイスがデータコム系に用いられるためには、小型化など多くの課題を解決するための新しいコンセプトや材料の研究開発が重要であり、日本のアカデミアの積極的な取り組みが期待される。以下、代表的な新材料系の状況について述べる。

①強誘電体：薄膜 LiNbO₃ (TFLN : Thin film LiNbO₃)

SiO₂/Si上に薄膜のLN (Lithium Niobate : LiNbO₃) を形成することにより、基本横モードのスポットサイズを小さくできるので (約1/40)、内部光密度を増大させて変調効率を高くすることができる。このため、長さが数cmの従来のLN変調器に比べて変調器長を大幅に短縮でき (数mm)、また高速変調 (160 Gbaud) も可能でシリコンフォトニクスとの親和性もある。ただし、電気光学利得は360程度と他の材料系と比べると低いので、さらなる小型化 (長さを短縮) は難しい点もあり、データコム系に向けてはデバイス構造などでの新しいコンセプトが求められる。まずは、コヒーレント伝送のテレコム系 (基幹伝送系) で採用されるとみられている。

②有機材料：EOポリマー (有機電気光学ポリマー光変調器)、シリコンポリマー Hybrid 材料

有機材料は大きい電気光学利得を有するので、小型・低電圧光変調器の新材料として期待されている。EOポリマーは低損失特性 (挿入損 1.5 dB) が特徴であるが、電気光学利得が700程度であり、薄膜LNと同様に短い変調器長にすることが課題である。SOH (Silicon Organic Hybrid) はさらに大きな電気光学利得 1200~2000と高速変調 (192 Gbaud) が可能であり、シリコンフォトニクスとの親和性にも優れている。また、有機材料の温度特性が小さく高温動作に対しても期待されている。

③ペロブスカイト：PZT (チタン酸ジルコン酸鉛:PbZrTiO₃)、PLZT (ランタンドープジルコン酸チタン酸鉛:PbLaZrTiO₃)、BTO (BaTiO₃)

ペロブスカイトの電気光学利得は極めて大きいですが、一方で誘電率 ϵ が大きく超高速化の妨げとなる面があるので、変調器のSiO₂クラッド上に薄膜化して実効的な ϵ を下げるなどの工夫が必要になる。この材料は元素の組合せの多様性を含めて魅力的であり、InPやSiのプラットフォームとの親和性を高めていくことが重要である。

以上のように、新材料系では、今後の研究開発の推進によりInP系の光デバイスと同等のサイズで、InP系よりも高速な動作を実現できる可能性を持っている。ここに挙げた材料以外にも有望な新材料系はあると考えられるので、今後も材料探索と光デバイスとしての性能や安定性に関する評価など技術的な筋の良さの見極めを行っていくことが重要である。

4) 異種材料集積技術

上記の2) シリコンフォトニクスと3) 新材料系はレーザ光を出すことはできないので、レーザ光を出すInP系化合物半導体光デバイスとの集積技術が必須である。このような異種材料の集積技術を進展させることにより、InP系とともに新たな超高速動作の光デバイス開発において日本の優位性を堅持できると考えられる。特に、東工大 (当時、現在東京科学大) の荒井教授が提案されたメンブレン (薄膜) 型光デバイス^{42, 43}は、SiO₂ (SiN) と空気などの低屈折率の材料でInP系を挟むことにより、コア層への高い光閉込めと低容量化により高変調効率の直接変調レーザ・高速の光変調器などの低消費電力の光デバイスを実現した画期的な概念である。その後NTT研究所の松尾氏のグループがさらに発展展開されており⁴⁴、日本国での産学連携の好例と言える。このメンブレン型光デバイスは、Si基板上集積での親和性を含め、今後のチップ間、チップ内と、短距離のデータ転送に積極的に光配線を導入していく基本技術となりえる。また、シリコンフォトニクス回路上に集積できることから、スポットサイズ変換器集積を含め、高密度に光デバイスを集積化する技術として期待

42 東京工業大学 荒井・西山研究室「メンブレンDFBレーザ@東京工業大学 荒井滋久/西山伸彦研究室」：
<http://www.pe.titech.ac.jp/AraiLab/research/membrane.html>

43 T. Okamoto and S. Arai, "Continuous wave operation of optically pumped membrane DFB laser," Electron. Lett., vol. 37, no. 24, Nov. 2001, pp. 1455-1457.

44 開達郎他「データセンターネットワークの最新動向」電子情報通信学会誌 Vol.108 No.1 2025年1月 pp.50-56

されている。

これまで光デバイスの今後の研究開発動向について述べてきたが、以下にまとめる。現時点では高速化、小型化、低消費電力化（電圧、光損失等）などの点で、量産化されているInP系や市場適用されているシリコンフォトニクスがリードしている。一方、これまで光デバイスに適用されてこなかった高機能高性能の材料や新材料（新材料系）は、最近の研究開発により高速変調動作を示すようになってきた。この新材料系はInP系のサブmmサイズに比べまだサイズが大きく、データコム系のメガデータセンター内部への適用はまだ困難であるが、新たな材料の探索とともにデバイス構造の革新などによるサイズの縮小を図っていくことが期待される。

メガデータセンター内のスイッチ装置に用いる光トランシーバーの超高速化には、今後も光デバイスの技術革新が必要であり、新材料の探求、プロセス技術、高性能光デバイス構造などの技術基盤に関する研究開発を、アカデミアと産業界との連携で推進していくことが重要である。

表5 InP系、シリコンフォトニクス、新材料のベンチマーキング

分類		長さ (mm)	帯域 (GHz)	変調 (GBaud)	電圧 (Vpp)	挿入損 (dB)	電気光学利得 (pm/V)	状況
InP系	直接変調レーザ	0.2	108	128	0.5	0	0	MP
	変調器集積レーザ	0.5	105	200	0.6	1~2	0	MP
	InP/Si集積変調器	0.2	90	256	1.7	4	0	R&D
シリコン フォトニクス	MZ変調器	1~2	100	112	2~3	2~4	0	MP
	マイクロリング変調器	1~2	110	130	2~3	3~4	0	MP
	SiGe変調器	0.2	110	100	4	6~8	0	R&D
新材料 変調器	薄膜LiNbO ₃	6~7	110	160	1~2	1~2	360	R&D
	BaTiO ₃	2.5	100	120	3.5	2	10000	R&D
	PLZT/PZT	1~2	90	150	0.5	2	4000~9000	R&D
	EOポリマー	8	70	60	2	1.5	700	R&D
	シリコンポリマー	1~2	70	192	2	4	1200~2000	R&D

6 | まとめ

近年、社会の多様なニーズの下、インターネットやSNSの普及などのデジタル化の進展により、膨大な量のデータをクラウド上で分析・解析し、各種のサービスを提供する高性能なメガデータセンターが世界各地に構築され、サイバー空間とフィジカル空間が高度に融合したサイバーフィジカルシステムが中核の一部を担っている。また、機械学習、大規模言語モデルなどのAI技術の進展が著しく、それに伴いデータ収集・処理の高速化含め、通信速度と計算量は急激に増加している。

このような背景から、メガデータセンター内の処理能力の向上・大規模化への要請が急速に増し、データセンター内のデータ通信については、従来の電気配線では高速化に伴い電気損失と消費電力が急増し適用限界になっており、ここ数年間で、電気配線から、超高速動作が特長の光通信技術による光配線への質的な転換が進んでいる。

そのデータセンター内における光通信システム導入の現状を把握するとともに、今後のハードウェア構築の動向、光通信システムでコア技術となる光デバイスの研究開発の方向性について把握することを目的に、文献情報、学会情報、有識者の情報などの調査を行い、以下の知見を得た。

1) データセンター内における超高速光通信技術の動向

①現状

- ・ここ数年間でサーバーラック上部まで光配線技術が導入され、電気配線から光配線へと急激に置換（高速光切替スイッチ階層（Spine、Leaf、ToR）によるデータ転送）
- ・生成AIなどに対応するメガデータセンターでは、独自のアーキテクチャーによるGPU/TPU構成のAI/MLクラスターが主流

②今後の動向

- ・消費電力の低減に向けて、サーバー構成のディスアグリゲーション化により効率的運用への移行
- ・ネットワーク帯域拡大のために、サーバーラック内にも積極的に高速光配線技術を活用してToRの削除、およびGoogleのトラス型TPUv4に代表される光スイッチ・光リンク技術などの導入

③光トランシーバーおよび光デバイスへの期待

- ・光トランシーバー、光デバイスのさらなる高速化・低消費電力化
- ・光の特長である並列性を活かした大容量光通信技術への対応
- ・デジタル処理を削減して低消費電力化に有利なLPOおよび光デバイスとスイッチASICを近接して実装するCPOへの対応

2) 光デバイスの技術動向

①現状

- ・メガデータセンター内の超高速動作に対し光の優位性を活かし400 Gbit/sまで高速変調動作を達成
- ・光デバイスは日本の強み技術であり、InP系化合物半導体光デバイスの開発が光通信システムに大きく貢献し、現在でも光デバイスの国際会議論文採択数、InP系超高速光デバイスでの市場における製造国・地域別データと共に、世界トップシェアを保持
- ・経済安全保障、化合物半導体産業の強化などの視点から、米国、欧州、中国、台湾などが光通信用光デバイスに注力中。米国や欧州は動作速度では劣るが集積化、低コスト化の利点を活かすシリコンフォトリソグラフィの大型プロジェクトや試作・生産施設の充実などを推進し、中国や台湾はメガデータセンターに比べ2～4世代遅れのアクセス系光通信向け光デバイスの低コスト化に秀でて約50%のシェアを有し、

最先端光デバイスにおいても今後脅威になる可能性有り。

②課題

- ・メガデータセンター内のさらなる高速化（800 Gbit/s ⇒ 1.6 Tbit/s ⇒ 3.2 Tbit/s ⇒ 6.4 Tbit/s）への対応、LPO、CPO等革新的な方式への対応に向けた光デバイスの超高速動作、高温安定動作、低消費電力化・小型化

③2030年代に向けた研究開発の方向性

- ・InP系半導体光デバイス（レーザ光源として普遍・不可欠）：メガデータセンターでの光通信システムの超高速・大容量化、低消費電力化などの要求に伴い（400 Gbit/s ⇒ 800 Gbit/s ⇒ 1.6 Tbit/s ⇒ 3.2 Tbit/s ⇒ 6.4 bit/sT等）、InP系光デバイスのさらなる超高速変調技術、低消費電力技術の推進
- ・シリコンフォトニクス光変調器：シリコンの集積回路プロセス装置での低コストチップ製造
- ・InPを凌駕する新材料を用いた光変調器：大きなポッケルス係数を有し変調速度でInPに勝る材料の探索とデバイス化技術（それぞれの材料系には一長一短があり、光デバイスとしての技術的な筋の良さ（特性の安定性、作りやすさなど）の見極めが重要）
- ・異種材料集積技術：シリコンフォトニクス、新材料光デバイス、Si集積回路、InPレーザなどの異種材料からなるチップの集積化技術開発

作成メンバー

総括責任者	魚崎 浩平	上席フェロー	ナノテクノロジー・材料ユニット
リーダー	魚見 和久	フェロー	ナノテクノロジー・材料ユニット
メンバー	馬場 寿夫	フェロー	ナノテクノロジー・材料ユニット
メンバー	眞子 隆志	フェロー	ナノテクノロジー・材料ユニット
協力	木村 康則	上席フェロー	システム・情報科学技術ユニット
協力	高島 洋典	フェロー	システム・情報科学技術ユニット
協力	平池 龍一	フェロー	システム・情報科学技術ユニット

調査報告書

CRDS-FY2024-RR-08

AI時代を牽引する光デバイス技術

令和 7 年 3 月 March 2025

ISBN 978-4-88890-958-7

国立研究開発法人科学技術振興機構 研究開発戦略センター
Center for Research and Development Strategy, Japan Science and Technology Agency

〒102-0076 東京都千代田区五番町7 K's 五番町

電話 03-5214-7481

E-mail crds@jst.go.jp

<https://www.jst.go.jp/crds/>

本書は著作権法等によって著作権が保護された著作物です。
著作権法で認められた場合を除き、本書の全部又は一部を許可無く複写・複製することを禁じます。
引用を行う際は、必ず出典を記述願います。
なお、本報告書の参考文献としてインターネット上の情報が掲載されている場合には、本報告書の発行日の1ヶ月前の日付で入手しているものです。
上記日付以降の情報の更新は行わないものとします。

This publication is protected by copyright law and international treaties.
No part of this publication may be copied or reproduced in any form or by any means without permission of JST, except to the extent permitted by applicable law.
Any quotations must be appropriately acknowledged.
If you wish to copy, reproduce, display or otherwise use this publication, please contact crds@jst.go.jp.
Please note that all web references in this report were last checked one month prior to publication.
CRDS is not responsible for any changes in content after this date.

FOR THE FUTURE OF
SCIENCE AND
SOCIETY



CRDS

<https://www.jst.go.jp/crds/>

