フォトニックデータセンタ実現に向けた高速光スイッチ技術

多数の電気ルータ・スイッチを用いて構成されている現在の大規模データセンタでは，消費電力，遅延時間，データ処理能力などに大きな問題を抱えています．近年，これらの問題を解決するため，光技術を導入したフォトニックデータセンタの研究が活発に行われています．本稿では，NTT先端集積デバイス研究所が取り組んでいる光の高速性と電気の機能性を適材適所に融合した光電子融合型光パケットルータとそのキーデバイスの1つである高速光スイッチについて紹介します．

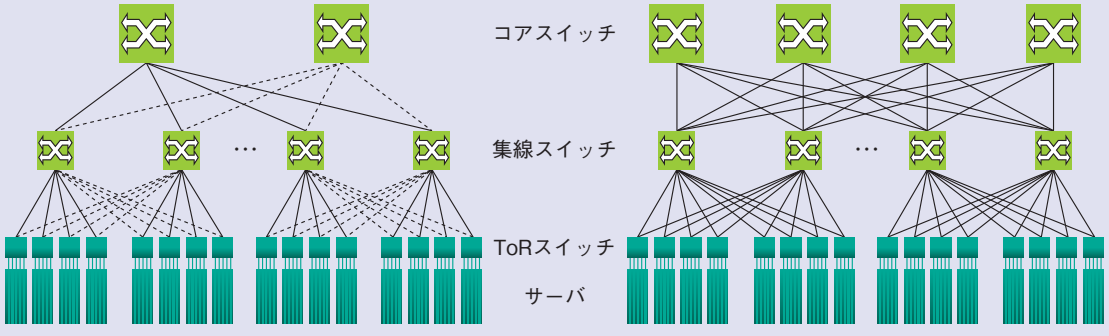
瀬川（せがわ）　徹（とおる）　/村中（むらなか）　勇介（ゆうすけ）
高橋（たかはし）　亮（りょう）

NTT先端集積デバイス研究所

データセンタネットワークの課題

SaaS（Software as a Service），PaaS（Platform as a Service），IaaS（Infrastructure as a Service）などのクラウドサービスの普及とともに，データセンタの利用が急速に拡大しており，世界中のデータセンタIPトラフィックは，年率23％で成長し2018年には8.6ゼタバイト（ZB, 10^{21}バイト）に達するといわれています[(1)]．そのため，データセンタの規模は拡大を続け，数10～数100万台のサーバおよびそれらを接続するネットワーク機器の消費電力や，サーバ間の遅延時間の問題，ネットワーク機器の処理能力不足などさまざまな問題に直面しています．

これらの問題を緩和するため，近年，データセンタ内ネットワークでは大きな変革が進んでいます．従来のデータセンタでは，**図1**(a)に示すように，多数の電気スイッチ・ルータが階層構造のファットツリー型に接続されたイーサネットワークが用いられてきました．そのため，STP（Spanning Tree Protocol）の制約により，集線スイッチとコアスイッチ間に複数の回線を敷設することが禁じられており，ネットワークの負荷状況によって大きな遅延時間が生じる問題がありました．現在では，図1(b)に示すファブリック型のネットワークへの移行が進められています．このネットワークでは，STPの使用を廃止し，IS-IS（Intermediate System to Intermediate System）などL3のプロトコルを用いることによって，複数のコアスイッチと集線スイッチの間に多数の経路を設けることが可能となり，負荷を分散（ロードバランス）することで，遅延時間が短縮し処理能力が向上します[(2)]．しかし，大量のネットワーク機器による膨大な消費電力や，大量かつ複雑な配線の問題，ネットワークの規模を容易に変化させる拡張性等に問題が残ります．近年，これらの課題を解決するため，光技術を導入したフォト



(a)　従来のファットツリー型　　(b)　現在のファブリック型

図1　データセンタネットワーク

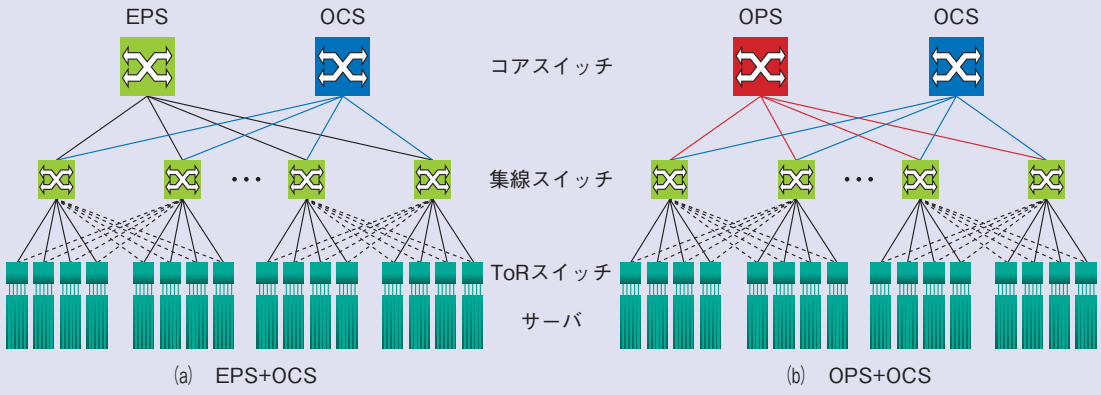


図2　フォトニックデータセンタネットワーク

ニックデータセンタの研究が活発に行われています．

本稿では，フォトニックデータセンタに向けた研究動向，およびNTT先端集積デバイス研究所が現在取り組んでいる光電子融合型光パケットルータとそれを用いたトーラス型データセンタネットワークについて，さらにそのキーデバイスの1つである高速光スイッチについて紹介します．

フォトニックデータセンタへの期待

光技術を導入したフォトニックネットワークは，データ粒度に応じて，光回線交換（OCS: Optical Circuit Switching），光フロー交換（OFS: Optical Flow Switching），光バースト交換（OBS: Optical Burst Switching），光パケット交換（OPS: Optical Packet Switching）などに分類されます．OCSでは波長単位で通信回線を占有するため，一定の遅延時間とパケットロスのない高信頼の通信が可能であるため，極めて大容量のデータ転送に適しています．一方OPSでは，光パケット単位での転送が可能であるため，比較的小さな容量のデータ転送に適しています．さらにOCSとは異なり，1つの波長帯域に目的地の異なる複数の光パケットを多重（時間統計多重効果）できるため，帯域利用効率を最大限に高めながら，大きなトラフィック変動に対応することが可能です．

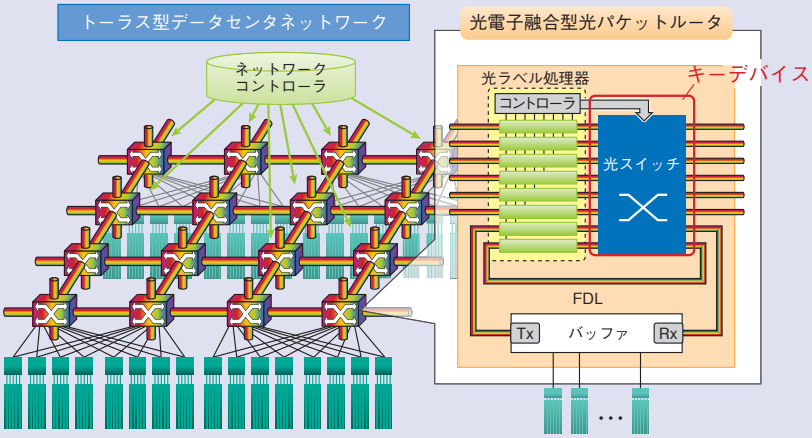


図3　提案するトーラス型データセンタネットワークと光電子融合型光パケットルータ

近年，このようなOCS/OPSの光技術を導入したフォトニックデータセンタネットワークの研究が活発化しています．例えば**図2**(a)に示すように，従来の電気パケット交換（EPS: Electronic Packet Switching）とOCSを併用したネットワークが提案されています[3]．そこでは，サーバ間に発生した大容量データをOCSにより転送し，EPSへの負荷を低減させることで遅延短縮や処理能力向上が可能となります．一方，EPSの代わりにOPSを導入することで，大幅な低遅延と消費電力の削減，および処理能力向上が期待されます．例えば，図2(b)に示すOPSとOCSをハイブリッド構成にするネットワーク[4]が提案されています．しかし，このようなEPS/OCSやOPS/OCSのハイブリッド構成では，2種の異なるネットワークおよびそれぞれの制御が別途必要となります．

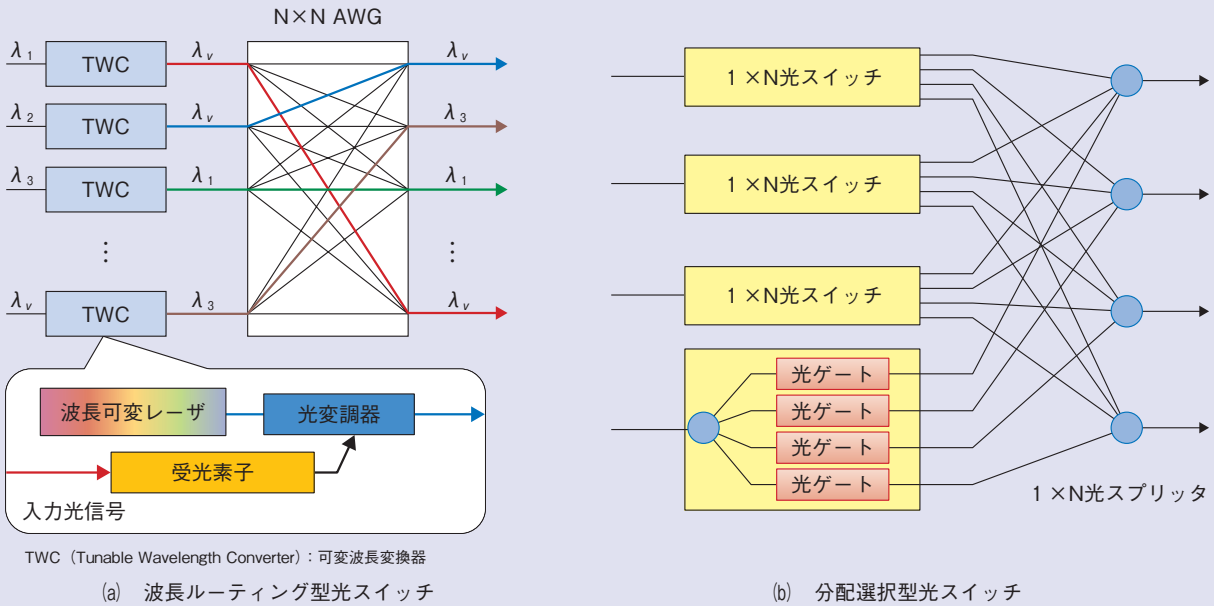
私たちは，光電子融合型光パケットルータとフォトニックデータセンタネットワークの検討を行っています．そこでは従来の階層型ではなく，**図3**

に示すフラットなトーラス型ネットワークを採用することで，強固な冗長性と優れた拡張性が期待できます．さらにOpenFlow技術を用いて，光パケットルータ内の光スイッチを制御することにより，1つの統合ネットワーク上でOPS，OCS，さらには仮想OCS方式のデータ転送を実現します[5]．各ノードに配置された光電子融合型光パケットルータは，主に光ラベル処理器，光スイッチ，バッファで構成され，バーストモードの100 Gbit/s（25 Gbit/s×4 λ）光パケット信号を光の状態のまま，パケット単位で高速に転送します．しかし，このような高速バースト光パケットの処理は，通常市販されている部品や装置では実現困難です．そのため，私たちはさまざまな光・電子デバイス技術を独自に提案し，光の高速性と電気の機能性を適材適所に融合することで大幅な低電力性と低遅延性を両立した高機能光電子融合型光パケットルータの実現を目指しています．

高速光スイッチ技術

光パケットルータの実現には光パケットごとにデータを転送できるN入力N出力（N×Nと表します）の光スイッチが不可欠です．光パケットのデータレートが100 Gbit/sの場合，転送されるパケット長は通常のイーサネットで最大100 ns程度と小さく，それよりも一桁以上小さいガードバンド（パケットとパケットの間に入れる時間）内で高速に切り替えることが必要です．また，光スイッチには，低消費電力，低損失，小型，大規模，高信頼などの基本的な特性とともに，多重化された大容量光パケットの転送を可能とするため，信号のデータレート，変調フォーマット，波長，偏波に対し無依存であることが求められます．現在までに2×2光スイッチをクロスバー構成等で多段接続した光スイッチ，フェーズドアレイ型光スイッチ，波長ルーティング型光スイッチ，分配選択型光スイッチなど，さまざまな光スイッチが提案されてきました．ここでは，その中でも有望な波長ルーティング型光スイッチと分配選択型光スイッチについて紹介します．

波長ルーティング型と分配選択型のそれぞれの構成図を**図4**に示します．波長ルーティング型光スイッチは，入力信号光の波長を変換する可変波長変換器とN×Nアレイ導波路回折格子（AWG）で構成されます．N×N AWGは，入力される波長によって出力ポートが決まるため，入力信号光の波長を可変波長変換器により所望の波長に変換することで，任意の出力ポートへの光スイッチ動作を実現します．この光スイッチは，AWGの波長間隔を小さくすることで，損失増加なくポート数Nを増大できるため，大規模化に適するという特長があります．可変波長変換器は，波長可変レーザ，光変調器，および受光素子により構成される重要な部品です．波長変換動作は，入力信号光を受光素子により電気信号に変換し，波長可変レーザからの出力



TWC（Tunable Wavelength Converter）：可変波長変換器

(a)　波長ルーティング型光スイッチ　　(b)　分配選択型光スイッチ

図4　波長ルーティング型光スイッチと分配選択型光スイッチの構成

光をその電気信号を用いて変調することで実現されます．

一方，分配選択型光スイッチは，1×N光スプリッタと光ゲート素子で構成される光スイッチです．入力信号光は，1×N光スプリッタで等しく分配され，所望の出力ポートに接続される光ゲートの通過・遮断によって光スイッチ動作を行います．この光スイッチは，ポート数Nの増加とともに分岐損失が増大するため大規模化には課題がありますが，光信号を電気信号に変換する必要はなく，ASK（Amplitude Shift Keying）やPSK（Phase Shift Keying）などの多様な変調フォーマット，波長・偏波で多重化した信号を光のまま転送できる特長を有します．また，光ゲートの通過・遮断といったデジタル的な制御で動作する点も特長です．このように，波長ルーティング型と分配選択型にはそれぞれ優れた特長があり，私たちは2つの光スイッチの研究開発を進めています．

波長ルーティング用の波長可変レーザとして，半導体リング共振器を用いた波長可変レーザを提案しました．その素子写真を**図5**に示します．本素子は，波長可変レーザと光変調器を1チップ集積しています．この波長可変レーザは，波長変化時の駆動電流が小さく，電流注入に伴って発生するジュール熱に起因した緩やかな発振波長変動を抑制可能であるため，高速な波長可変光源として有望です．本素子では，並列配置したリング共振器を用いており，発振波長を選択するための波長フィルタと同時にレーザキャビティを構成するループミラーとして機能します．この構成により，光出力の増大・安定化とともに波長選択性能の向上が可能となります．光変調器は，InGaAlAs系多重量子井戸を用いた電界吸収光変調器（EAM）を採用しており，広い波長範囲で高消光比動作が可能です．本素子とチャネル間隔100 GHzのAWGを用いて，25 Gbit/sバーストモード光パケット信号の生成とエラーフリー転送を確認しました[6]．

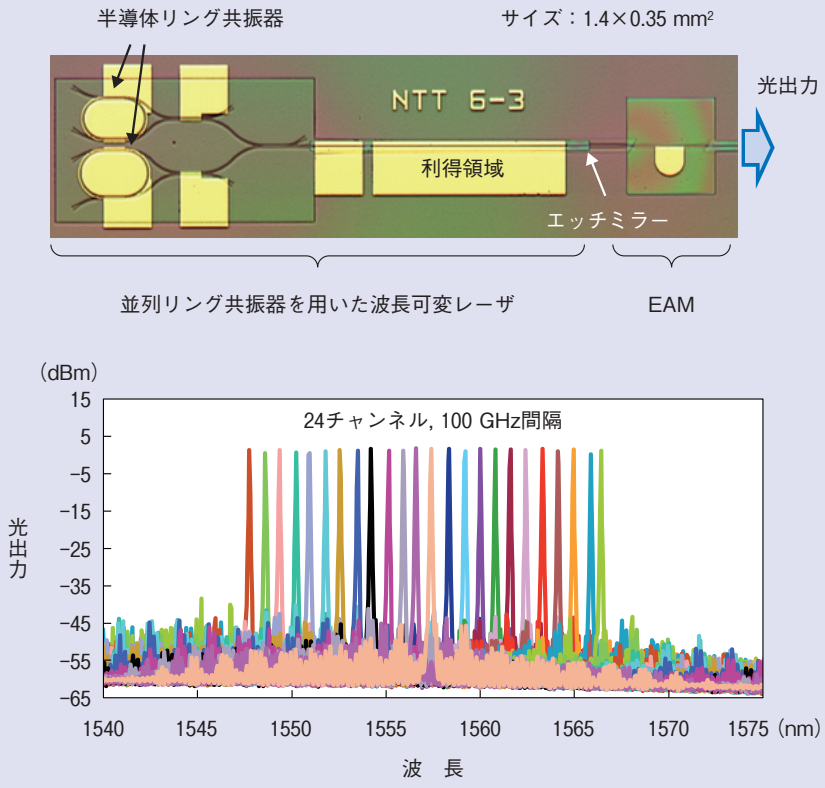


図5　波長可変レーザとEAMを1チップ集積した素子の写真と発振スペクトル

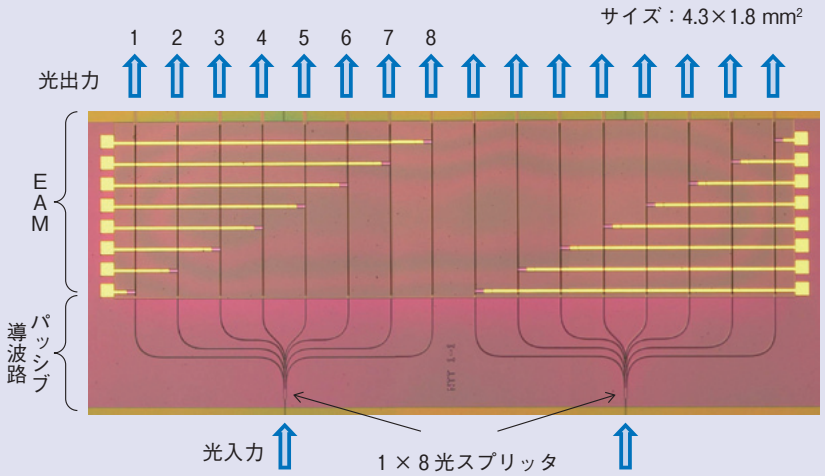


図6　EAMを用いた1×8光スイッチの2アレイ素子

一方，分配選択型光スイッチとして，光ゲートにEAMを用いた光スイッチを提案しました．1×8光スイッチの2アレイ素子を**図6**に示します．従

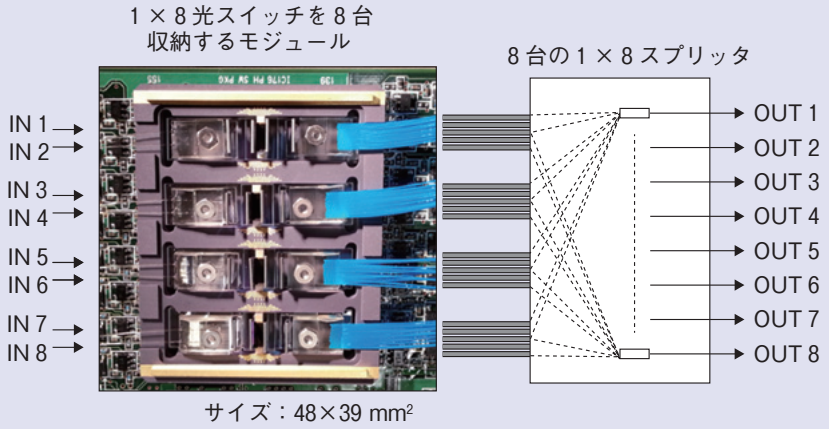


図7　分配選択型8×8光スイッチ

来，分配選択型光スイッチの光ゲートとして，原理的に生じる分岐損失を補償するために半導体光増幅器（SOA）を用いる構成が一般的でした．しかし，SOAは，四光波混合や相互利得変調等の非線形光学効果の影響により，特にWDM（Wavelength Division Multiplex）光の信号品質を劣化させる課題がありました．また，SOAは，その動作に数100 mAの電流を必要とし，駆動回路の消費電力が大きいという課題がありました．採用したEAMは，非線形効果の影響はなく，また，素子に流れる電流が微小なため，駆動回路の消費電力を極めて小さくすることが可能です．**図7**に示すように1×8光スイッチを8台収納する小型モジュールを試作し，8×8分配選択型光スイッチを構成しました．10 ns以下のスイッチング時間，40 dB以上の高消光比，3 W以下の消費電力といった優れた特性を示し，さらに，25 Gbit/s光パケット信号のエラーフリー転送を確認しています(7)．本素子は低電力性・高速性・広帯域性において優れており，さまざまな光信号フォーマットに対応可能なため，大容量光パケットを転送する光スイッチとして極めて有望です．

今後の展開

現在，高速光スイッチの大規模化（16×16など）を検討するとともに，光ラベル処理，光スイッチングおよび光バッファリングの3つの機能を統合した光電子融合型パケットルータのプリプロトタイプの作製を進めています．今後，作製したプリプロトを用いてトーラス型データセンタネットワークを構築・実証し，環境にやさしいグリーンなデータセンタネットワーク実現に向け，研究開発を推進していきます．

■参考文献

(1) http://www.cisco.com/web/JP/solution/isp/ipngn/literature/Cloud_Index_White_Paper.html
(2) Z. Kerravala: “A Data Center Fabric Is Critical to a Next-Generation Unified Data Center,” Cisco Systems, Inc. Analyst Reports, 2011.
(3) N. Farrington, G. Porter, S. Radhakrishnan, H. H. Bazzaz, V. Subramanya, Y. Fainman, G. Papen, and A. Vahdat: “Helios: A hybrid electrical/optical switch architecture for modular data centers,” ACM SIGCOMM 2010, pp.339-350, 2010.
(4) J. Perelló, S. Spadaro, S. Ricciardi, D. Careglio, P. Shuping, R. Nejabati, G. Zervas, D. Simeonidou, A. Predieri, M. Biancani, H.S. Dorren, S. Lucente, J. Luo, N. Calabretta, G. Bernini, N. Ciulli, J. Sancho, S.Iordache, M. Farreras, Y. Becerra, C. Liou, I. Hussain, Y. Yawei, L. Lei, and R. Proietti: “All-Optical Packet/Circuit Switching-based Dat a Center Network for Enhanced Scalability, Latency and Throughput,” IEEE Network, Vol.27, No.6, pp.14-22, 2013.
(5) R. Takahashi, S. Ibrahim, T. Segawa, T. Nakahara, H. Ishikawa, Y. Suzaki, Y.-C. Huang, K. Kitayama, and A. Hiramatsu: “A Torus Datacenter Network Based on OPS/OCS/VOCS Enabled by Smart Flow Management,” OFC 2015, W3D.4, LosAngels, U.S.A., March 2015.
(6) T. Segawa, W. Kobayashi, T. Nakahara, and R. Takahashi: “Wavelength-routed switching using a parallel-ring-resonator tunable lasers integrated with InGaAlAs EAM,” IEICE Trans. Electron., Vol.E97-C, No.7, pp.719-724, 2014.
(7) T. Segawa, M. Nada, M. Nakamura, Y. Suzaki, and R. Takahashi: “An 8 × 8 broadcast-and-select optical switch based on monolithically Integrated EAM-gate array,” ECOC 2013, We.4.b.1, London, U.K., Sept. 2013.

（左から）瀬川　徹/ 村中　勇介

新たなブレークスルー技術の創出に向け，デバイス・サブシステムレベルからアプローチできる点がデバイス研究の醍醐味だと感じています．光パケット処理用の部品はまだほとんど市販されていませんが，少しでも早く多くのユーザに利用してもらえるよう研究を進めます．

◆問い合わせ先
NTT先端集積デバイス研究所
光電子融合研究部
TEL　046-240-3214
FAX　046-240-4219
E-mail　sende-kensui@lab.ntt.co.jp