



ダイナミック光パスネットワークの挑戦 —VICTORIES拠点活動の10年間—

国立研究開発法人産業技術総合研究所 電子光技術研究部門 副研究部門長

なみき しゅう
並木 周



1. はじめに

2017年の11月に開催された日本・デンマーク外交関係樹立150周年記念シンポジウムにご招待いただき、これまで10年間にわたって産業技術総合研究所（以下、産総研）が運営してきた「光ネットワーク超低エネルギー化技術拠点（VICTORIES）」という垂直融合型研究開発拠点の活動を紹介する機会をいただいた。VICTORIESは、文部科学省「先端融合領域イノベーション創出拠点形成プログラム」の2008年度採択課題であり、2017年度が最終年度にあたる^[1]。VICTORIESでは、国際交流も積極的に展開しており、その中で、世界の主要フォトニクス研究拠点の一つであるデンマーク工科大学とも交流を行ってきた。本稿では、VICTORIES10年間の活動を概説する^[2]。

2. VICTORIESプロジェクトの概要

産総研は、2008年に、世界に先駆けて、情報通信ネットワークがやがて消費電力の増大によって破たんしてしまうという警鐘を鳴らした^[3]。これを抜本的に解決する手段として、「ダイナミック光パスネットワーク」を提案し、情報通信関連企業10社（日本電信電話（株）、（株）富士通研究所、古河電気工業（株）、（株）トリマティス、日本電気（株）、富士通（株）、（株）フジクラ、（株）アルネアラボラトリ、住友電気工業（株）、北日本電線（株））と共に、同技術の創出に必要な、アプリケーションからデバイスまでの要素技術を垂直融合する「光ネットワーク超低エネルギー化技術拠点（通称VICTORIES）」を形成し、要素技術開発からイノベーション創出までの取組みを行った。

ネットワークのエネルギー問題は、IPルータなどの電気スイッチの消費電力が、処理する情報量の増大に応じて増大するという原理的な問題に起因する。我々は、光スイッチの消費電力が、電気スイッチと異なり、信号帯域にはほとんど依存しないことに着目し、光スイッチを全国規模に展開し、かつ、ユーザが使い易い仕組みを提供する「ダイナミック光パスネットワーク」構想を掲げた^[4]。

光スイッチを用いて、不便なく全国数千万加入を収容し、8Kなどの超高精細映像サービスまで柔軟に提供するために無数の光スイッチを敷設すると、各光スイッチに必要なポー

ト数が膨大になってしまう。光スイッチ技術の歴史は古く、既にいくつかの技術が商用化されているものの、ポート数の飛躍的増大はいかに研究開発資源を投入しても見通しが立ちにくい。そこで、我々は、異なる光スイッチ技術を組み合わせ、限られたポート数であっても、拡張性と柔軟性を両立する、多粒度多階層光パスを採用することとし、これに適する各種光スイッチの開発に取り組むこととした^[5]。ここでいう、多粒度多階層光パスとは、①ファイバパス、②波長パス、③サブ波長（ODU）パス、の3つの粒度・階層から構成され、それぞれを切り替えるスイッチ技術が必要である。既存の光スイッチ技術の最大の課題は、サイズと信頼性であり、これを解決するために、シリコンフォトニクスという新しいデバイス基盤技術の開発に取り組んだ。

3. 要素技術開発

3.1 シリコンフォトニクスによる光スイッチ

シリコンフォトニクスの特徴は、従来の石英をベースとした平面光導波路に比べて、格段に小型化が可能なため大規模化が容易であることや、熱光学効果及び熱伝導特性が良好で、省電力かつ高速な光スイッチを実現できるとい

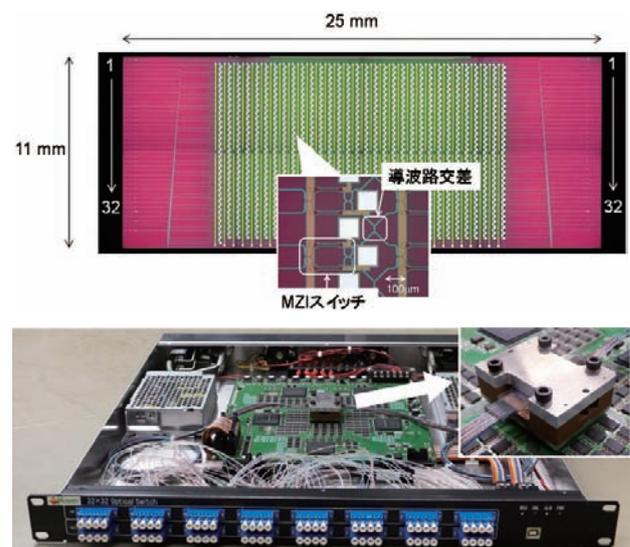


図1. シリコンフォトニクスによる32X32光スイッチチップ（上）とその実装（下）：MZスイッチ、導波路交差、薄膜ヒータを、それぞれ1024個、961個、2048個搭載。世界最大規模のSi光スイッチ。サイズは石英系32×32スイッチの1/46

う性能面だけでなく、CMOSの製造プロセスをそのまま活用できるため量産性にも優れた点にある。

VICTORIESでは、ファイバパスを切り替える光スイッチとして、小型な32x32マトリクススイッチの実現を目指した。32x32の小型光スイッチが実現できれば、これを複数用いて512x512の完全無閉塞型光スイッチシステムを構成でき、多粒度多階層型のダイナミック光パスネットワークを全国規模に展開するのに十分なポート数となる。

図1に、産総研の300mmウエハ用CMOSプロセス技術によって開発されたシリコンフォトニクススイッチチップを示す。同スイッチチップは、2000以上もの電極を有するが、フリップチップボンディング、LGAソケットなどを介して、FPGAによる制御回路基板に実装され、全ての光パス接続パターンにおいて良好な特性を示すことが確認された^[6]。

3.2 パラメトリック過程を用いた光信号処理

ダイナミック光パスネットワークは、原則、接続元から接続先までを光パスでダイナミックに結ぶ技術であるため、光

パスの長さや雑音などの条件によって光信号の品質を常に維持する必要がある。また、異なる接続元からの光信号と、別の接続元からの光信号が同じ波長である場合、同一の光ファイバ中を伝送させることができないため、システム全体の利用効率が低下する問題がある。

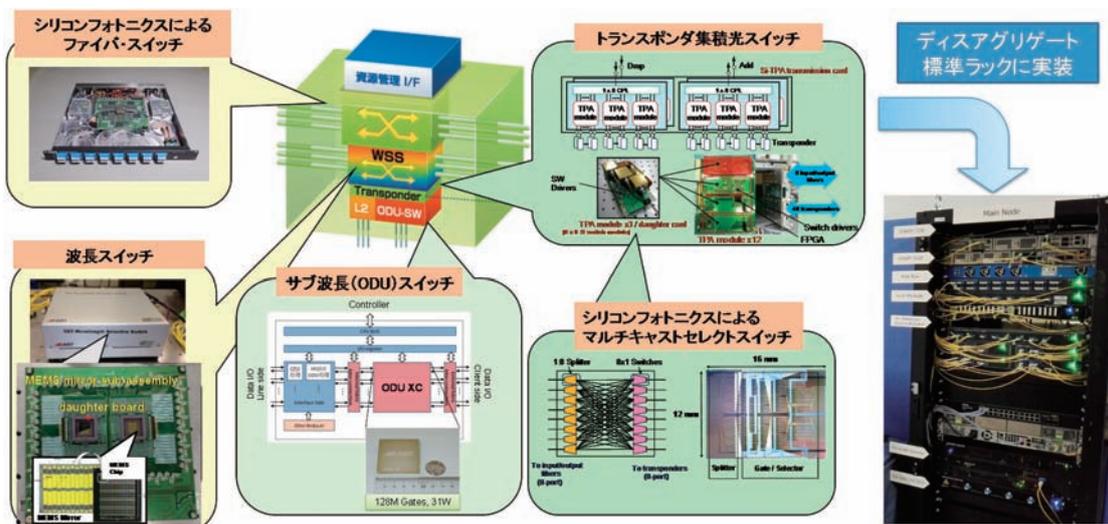
ファイバの非線形性の一つであるパラメトリック過程は、光信号の振幅位相情報を保持することが可能であるため、今般のコヒーレント光信号の信号処理に適している。VICTORIESでは、高非線形ファイバ中のパラメトリック過程を用いた様々な光信号処理技術に取り組んできた。その主な活動として、ファイバ非線形による光信号劣化を補償する技術と、限られた波長資源を有効活用する波長変換技術に取り組んだ^[7]。まず、非線形補償では、光ファイバの3次分散までを考慮し、非線形閾値10dBもの改善を達成した。次に、パラメトリック過程を2段カスケードすることによって、ガードバンドの無い、高品質な多波長一括波長変換器を開発した。図2に、その試作機の外観を示す。また、我々は、同装置を活用することで、WDMネットワークの利用効率が大幅に改善されることを示した^[8]。

3.3 多粒度多階層光ノード

図3に、VICTORIESで開発した各種スイッチ技術を示す。ファイバパスと、波長選択スイッチの自由度を向上するマルチキャストセレクトスイッチは、シリコンフォトニクス技術によって実現した。サブ波長スイッチは、ODUクロスコネクタ技術であり、電気スイッチであるが、時間分割多重によるパススイッチであり、IPルータに比して大幅に省電



■図2. 高効率パラメトリック過程による全光一括波長変換器の試作機概観。標準ラック準拠



■図3. VICTORIESで開発した多粒度多階層型光ノード技術

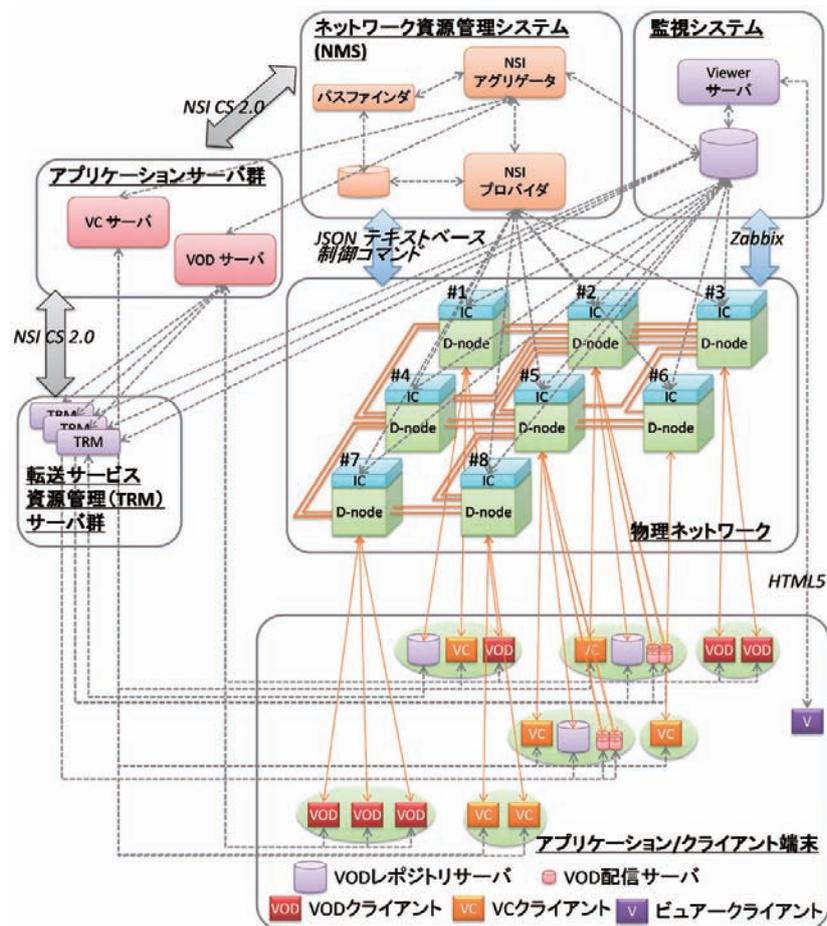


力が可能となっている。VICTORIESでは、これらの開発した要素技術をブレードと呼ばれる標準ラック用筐体にそれぞれ収納し、ディスクアグリゲート・光ノードを構成できるようにした(図3右)。

3.4 大規模ダイナミック光パスネットワークテストベッド構築

上記多粒度多階層型光スイッチノードを大小8基構築し、これらをユーザのリクエストに応じて最適制御する資源管

理を実装し、産総研つくばキャンパスに、大規模ダイナミック光パスネットワークテストベッドを構築した^[9]。資源管理は、産総研が主導して制定された世界標準NSI-CS2.0^[10]に準拠したものを開発した。図4に全体のブロック図を示す。同テストベッドには、4K超高精細映像コンテンツを配信するVODシステム、4Kテレビ会議システムを実装し、実運用を行っている。また、図5に示すように、2014年10月には、NHK放送技術研究所と共同で、世田谷とつくばをダイナミ



■ 図4. 産総研つくばキャンパスに敷設した大規模ダイナミック光パスネットワークテストベッド



■ 図5. 173km離れた地点間の72Gbps 8K非圧縮リアルタイム映像による遠隔合奏公開実験の様子 (NHK放送技術研究所のご協力による)



ク光パスネットワーク回線で結び、72Gbps 8K非圧縮リアルタイム伝送による、遠隔合奏に成功した^[11]。この時、テストベッド全体の消費電力は実測値として、およそ6kWであった。このテストベッドは、最大96Tbpsのトラフィックまで収容可能であるが、情報量が最大となってもノード部分の電力はほとんど不変であり、その超低エネルギー性が実際に示されたことになる。

3.5 テレセッション

ダイナミック光パスネットワークの特徴は、超低エネルギーであるだけでなく、絶対安定な超広帯域性、超低遅延性、そして、データプレーンを物理的に隔離でき、量子暗号との互換性による、高いセキュリティ性にある。VICTORIESでは、ダイナミック光パスネットワークの実用普及を促進するために、ノード装置のディスアグリゲーション化(図3右参照)を推進し、東京都内の実フィールドに、ディスアグリゲート方式によるテストベッドを構築した。そのアプリケーションとして、4Kの非圧縮映像によるテレセッションシステムを実装し運用している。テレセッションとは、遠隔合奏できるほど高精細で低遅延な、複数地点間で切り替え可能な双方向映像伝送システムであり、ダイナミック光パスネットワークの特徴を生かした代表的なユースケースと言える^[12]。近年、4K映像機器は民生用にまで普及し始めており、比較的安価にシステムを構築できるため、今後普及が期待される。さらに、5Gモバイルの進展にも後押しされ、図5に示したような8Kによるテレセッションも普及が視野に入る。

テレセッションは、遠隔合奏に限らず、医療、教育、産業、防災、防犯、介護などの応用分野が考えられ、喫緊の課題である少子高齢化対策に有力なソリューションを提供していく。

4. おわりに

本稿では、2008年から10年間、産総研が情報通信関連企業10社と共同で取り組んだVICTORIESの活動概要を紹介した。また、本拠点における、光スイッチ、光伝送、光ノード、資源管理、アプリケーションと複数の技術レイヤーを串刺しした垂直融合型技術開発の様子を紹介した。ダイナミック光パスネットワークは、ポスト5G時代において、ま

すます重要となる、広帯域と低遅延の両立を実現する重要な技術として、実用普及が期待される。

参考文献

- [1] <http://www.aist-victories.org/>
- [2] 技術の詳細は、並木周他、「超低エネルギーダイナミック光パスネットワーク」、電子情報通信学会誌、第99巻、第6号、pp. 563-580、2016を参照のこと
- [3] T. Asami and S. Namiki, "Energy consumption for IT equipment," Proc. of ECOC 2008, Paper Tu.4.A.3.
- [4] S. Namiki et al., "Ultrahigh-Definition Video Transmission and Extremely Green Optical Networks for Future," IEEE JSTQE, VOL. 17, NO. 2, pp.446-457, MARCH/APRIL 2011.
- [5] K. Ishii, et al., "Energy consumption and traffic scaling of dynamic optical path networks," Proc. of SPIE vol. 8646, 86460A, 2013.
- [6] 池田和浩他、「多ポートシリコン光スイッチ」応用物理学会(フォトリクス分科会) 会誌フォトリクスニュース、第3巻、第2号、pp. 51-54、2017.
- [7] S. Namiki et al., "Multi-Channel Cascadable Parametric Signal Processing for Wavelength Conversion and Nonlinearity Compensation," J. Lightwave Technol., VOL. 35, NO. 4, pp. 815-823, FEBRUARY 15, 2017.
- [8] K. Ishii, et al., "Analysis and Demonstration of Network Utilization Improvement Through Format-Agnostic Multi-Channel Wavelength Converters," J. OPT. COMMUN. NETW., VOL. 10, NO. 2, pp. A165-A174, FEBRUARY 2018.
- [9] J. Kurumida, et al., "First demonstration of ultra-low-energy hierarchical multi-granular optical path network dynamically controlled through NSI-CS for video related applications," Proc ECOC 2014, PD.1.3.
- [10] G. Roberts, et al., "NSI Connection Service v2.0," GFD. 212, Jun. 2014.
- [11] T. Kurosu, et al., "What is the True Value of Dynamic Optical Path Switching?" Proc. OECC2015, Post-deadline paper. また、実際の遠隔合奏の様子は、https://www.youtube.com/watch?time_continue=682&v=Eh61X3HwMIgから視聴可能。
- [12] テレセッションの紹介ビデオは、<https://www.youtube.com/watch?v=MVlxqG80YtU>から視聴可能。