

災害に強い光通信技術

国立研究開発法人情報通信研究機構 耐災害ICT研究センター 基盤領域研究室 室長

あわじ よしなり
淡路 祥成

国立研究開発法人情報通信研究機構 耐災害ICT研究センター 基盤領域研究室 主任研究員

じよ そこう
徐 蘇鋼

1. はじめに

光ファイバネットワークの第一の役割は遠距離・大容量の搬送能力を活かして大きなトラフィック・多数のユーザを収容することである。ところが、大規模災害によって情報通信網が影響を受けた際には、即応性、柔軟性の面で無線通信・衛星通信等が優位であるため、緊急通信手段としての役割は無線通信等に依存する。これに対して、光ファイバネットワークの耐災害性向上とは、「ただつながること」だけではなく、如何に多くのトラフィックを収容し影響を軽減、あるいは速やかに回復することに重点があると考えられる。無論、既設の光ファイバネットワーク設備も冗長構成やレステーションの手立てを講じており、研究開発の役割は次世代の耐災害性強化に向けて新しい技術の可能性を探索することにある。

情報通信研究機構 (NICT) では、光ファイバネットワークへの耐災害性付与を2つの側面に切り分け、

- (1) 大規模災害時に局所的な光ファイバネットワークの損壊の影響が全国に波及することを阻止する輻輳低減技術
- (2) 被災地で甚大な被害を受けた光ファイバネットワークを暫定的に再構成し、被災地近傍に大容量の光エントランスを設置する応急復旧技術

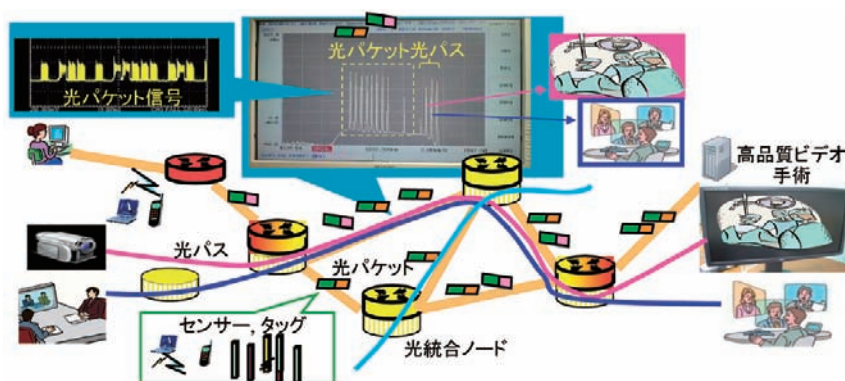
の2つの柱での研究開発に取り組んでいる^[1]。

2. 光パケット・光パス統合ネットワーク技術による広域輻輳低減

過去幾度かの大型地震の際に、回線交換型サービスに比べてパケット交換型サービスの方が疎通に優れ、緊急時

の通信手段として有効であった^[2]ということは経験知として一般的に知られている。有限の通信路の帯域を特定のパスで占有するのではなく、時間分割で効率的に共有するため、スループットが低下することはあっても全くつながらないという状況になりにくいという特性は定性的にも理解しやすい。このため、音声も含めて多くの通信サービスが実質的にIPトラフィックとして収容されるようになってきている。しかしながら、エンドユーザのトラフィックを集約して地域ノード間、或いは都市間にまとめて送出する部分は光ファイバネットワークが担っており、現状殆ど全ての光スイッチングにおいて回線交換型のROADM (Reconfigurable Optical Add-Drop Multiplexer) が主流である。来る5G時代を見据えて、地域網、幹線網が収容すべきトラフィックは益々増大することが予想されており、光スイッチングノード間での輻輳に対する懸念も深刻化していく。

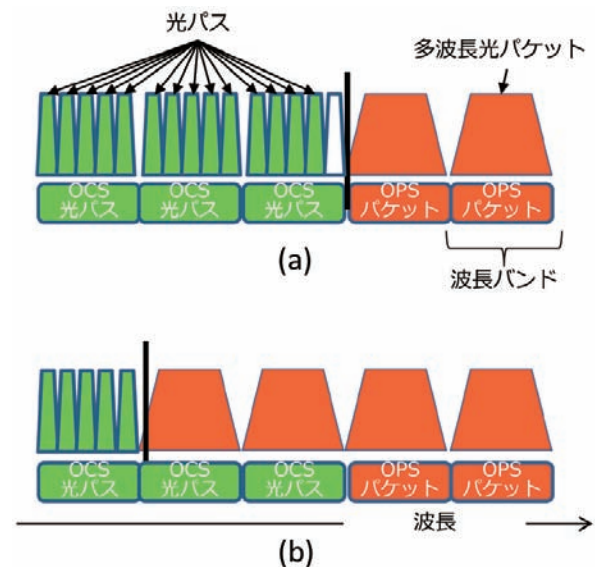
NICTでは、かねてから次世代型の光スイッチング方式の先駆けとして光パケット交換の研究開発を行っている^[3,4]。近年、主流となっている考え方は、光パケット交換方式は光回線交換方式に置き換わるものではなく、サービスの種類によって適応的に使い分けられた方が望ましいというものであり、具体的には、同じ光ファイバを波長分割多重によって、回線交換用途 (光パス) と光パケット交換用途で共有する光パケット・光パス統合型 (Optical Packet and Circuit Integrated: OPC) ネットワークの研究開発を推進してきた (図1)。同様の考え方は大規模災害発生時にも応用が可能であり、平時にQoS保証型のサービスとして光パスに割り当



■ 図1. OPCネットワークのはたらき



■ 図2. OPCIノード外観



■ 図3. 動的な波長領域境界制御

てられていた波長帯域を、緊急時に光パケットに切り替えることで、大幅な輻輳低減効果が得られることが実証されている^[5]。このような輻輳低減機能は光ファイバネットワークのデータ層 (D-Plane) で利用するだけでなく、そこにオーバーレイしたL2以上のネットワークでの様々な輻輳低減方式に実質的な利用可能リソースの増加をもたらすため、むしろ複合的に用いた方が波及的な効果が得られる。

図2はOPCIノードのプロトタイプである。左側のラックは商用のROADMと同等であり、右側のラックに光パケット送受信装置及びスイッチが実装されている。実証実験用のテストベッドではOPCIノードを3～4基用いてリングネットワーク構成を行った。光パスとして、10Gbpsを14チャンネル、光パケットとして100Gbpsを1チャンネル設立可能である^[6]。ここでの光パケットは10波長使用の多波長フォーマットを採用している。波長間隔は全て100GHzである。原理実証にあたっては、光パケット、光パスそれぞれに占有する波長帯域を割り当てるとともに、双方のスイッチング方式に切り替え可能な共有帯域を設けた。いわば、光パケット波長領域と光パス波長領域の境界線を、サービス要求やトラフィック集中に応じて動的に変更できるということである。

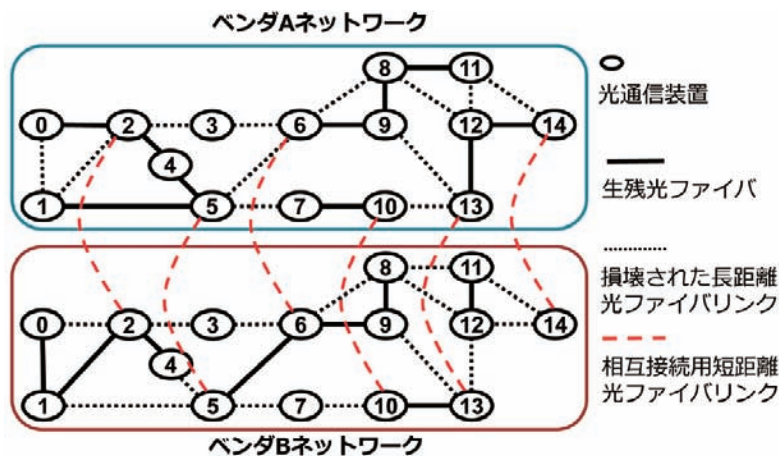
大規模災害が発生した際には、光パケットは急激に増加するトラフィックを収容し、複数のノードに振り分ける役割を担い、トラフィック負荷の増加に応じて利用率が上昇する。このような高負荷時において、リソースに不足が生じる場合には、波長領域の境界線を強制的に動かし、光パケット用の波長リソースを一時的に増加して対応する。図3は動

的境界制御の概念図である。平時には短波長側3つの波長バンドが光パスに、長波長側2つの波長バンドが光パケットに割り当てられているが、緊急時に動的な境界制御を行うと、波長バンド数は、例えば図3 (b) のように光パス1、光パケット4のように変化する。このような動的な割当て変更によって、eメールやSNSなどのベストエフォート型のサービスを用いた、迅速な安否確認、状況確認等を支える。同時に、政府チャネルなど特定の重要通信要求に対しては帯域保証型の光パスを用いることで、錯綜した状況下でニーズの異なるサービスを両立することが可能となる。

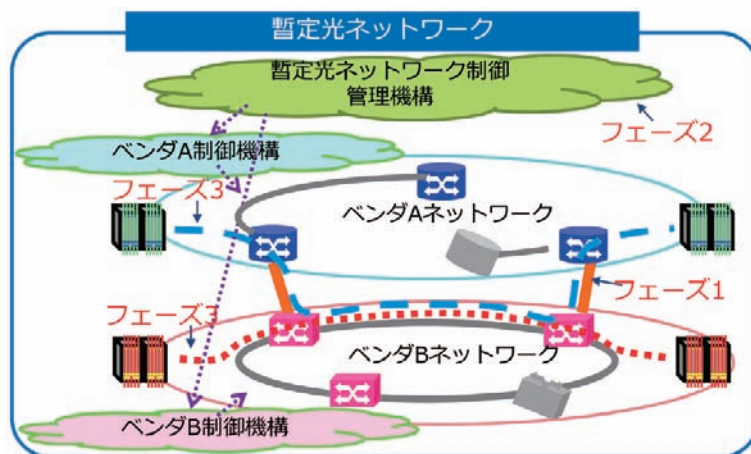
3. 暫定光ネットワーク設立による光エントランス応急復旧

大規模災害後の応急復旧の需要に関しては、ITU-T等で検討されてきていた^[7-9]。速やかに通信を復旧させるためには、まず生残通信資源を効率的に利用することが現実的なアプローチだと考えられる。一方、生残通信資源中、異なるベンダの製品が存在し、生残異種ベンダ通信装置をスムーズに相互接続及び利用することが鍵となっている。

光ネットワークにおいて、データ層及び制御管理層で異種ベンダ装置間の相互接続は、ITU-T、IETF、OIFなどの標準化組織をはじめ、業界、学界の重要課題として検討されてきている^[10-12]。一方、異種ベンダ光通信装置間での相互接続問題はまだ解決されておらず、通信事業者は、平時においては安定な通信サービスをユーザに提供するために、それぞれのベンダの光通信装置を用いてベンダごとに光ファ



■図4. 異種ベンダ装置間相互接続による暫定光ファイバネットワーク構成の概念図



■図5. 異種ベンダ光通信装置間の相互接続ガイドライン

イバネットワークを構築及び運用している。異なる種類のデータ層間では、光电変換を用いて電気レイヤでの相互接続が行われ、制御管理システムはベンダ独自に開発され、異種ベンダ制御管理システム間の相互接続は困難である。NICTはKDDI総合研究所と連携し、災害後生残異種ベンダ光通信装置を効率的に相互接続し、暫定光ネットワークを素早く設立する方法を創出及び実証してきた^[13-17]。図4は異種ベンダ装置間相互接続による暫定光ファイバネットワーク構成の概念図である。適切な場所で短距離光ファイバリンクによる相互接続を行うことにより、生残光通信装置間に迂回経路を形成することができ、本来のシステム修復を待たずに、高速大容量光パスを設立することができる。また、短距離光ファイバリンク相互接続は比較的に低コストであるため、低コストかつ速やかに通信を復旧することが可能となる。

相互接続手順について、3つのフェーズに分けてガイドラインを説明する(図5)。

フェーズ1：暫定光ネットワーク設計

まず通信事業者はネットワーク損壊情報を収集し、ダメージを受けた光ファイバリンクやノードの修復コストの分析及び最適化計算を行い、相互接続ポイントを決定する^[15-17]。

フェーズ2：暫定光ネットワーク設立

フェーズ1の結果に基づき暫定光ネットワークの設立を行う。具体的には下記内容が含まれる^[13-15]。

データ層：

- (1) 可能な範囲で最小限の、ノードまたは光ファイバリンク修復
- (2) 可能な範囲で最小限の、異種ベンダ光通信装置間に短距離光ファイバリンク設置

制御管理層：

- (1) 通信装置と制御機構間の制御層ネットワークの疎通を確保
- (2) 異なるネットワークを統合的に制御管理する暫定光ネッ



トワーク制御管理システムを構築

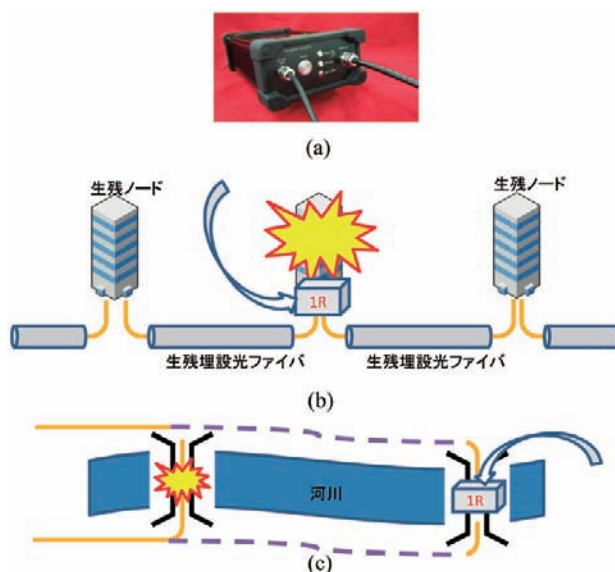
本来、異種ベンダ光通信装置間に光ファイバを直接接続しても、相互に通信は保証されていない。光信号フィルタリング装置を利用することにより、本来相互接続できない異種ベンダ光通信装置は、同じ光ネットワーク中に共同に光信号を送ることができる。また、制御管理層においては、機器間での制御命令翻訳機能が実装されている。

フェーズ3：暫定光ネットワークの光パス制御

相互接続された異種ベンダ光ネットワークにまたがる光パスの制御を行う^[1, 13]。実証実験では、異なる2つのベンダ製品のROADM及びOTU-2e (10Gbps) OTNトランスポンダを用いた応急復旧技術の実証に成功した。

4. 暫定光ネットワークでの物理的復旧リソース

上記の暫定光ネットワーク設立において、生残設備だけでなく、物理的に光リンクを応急復旧して使用可能なリソースを増やす支援ツールとして、軽量で可搬な小型の光増幅器 (EDFA: Erbium-doped fiber amplifier) が検討されている^[7, 8]。図6 (a) に示した可搬EDFAはIP68準拠の耐水性や、米国軍事規格MIL-STD-810Gに準拠した耐衝撃性、耐振動性、熱サイクル耐性を備えた筐体の実装され、2~4系統(1~2ペア) のテープファイバで接続可能である。停電地域でも運用可能なように、バッテリー駆動である。このような可搬EDFAは、例えば倒壊あるいは機能喪失した局舎に容易に移送が可能であり、生残した埋設光ファイバを応急に再接続する際に信号増幅を行い、伝搬損失を



■ 図6. 暫定光ネットワークでの物理的復旧リソース

補償するなどという使い方図6 (b) の他に、図6 (c) のような迂回ルート設立にも適用可能である。

このような物理的復旧支援ツールを投入することで、暫定光ネットワークで選択可能なリソースを増やすことが可能となる。

5. レジリエントな自動アドレッシング管理

IPネットワークの規模が拡大する中、通信事業者にとってネットワークアドレッシングにおける日常的な管理負荷が増えつつある。災害からの復旧の際に、短時間かつ広範囲に渡ってアドレッシングを含むIPネットワークの再設定が必要な時に、ネットワーク設定の自動化は非常に重要となる。NICTでは、Inter-AS (Autonomous System) hierarchical automatic number allocation protocol (HANA) と呼ばれる、階層化されたIPネットワーク全体のアドレッシング自動化技術の研究開発を行ってきた^[18-23]。

IPネットワークの自動アドレス設定機能のみならず、ネットワークの変化に応じて、広範囲のリネンバリングを回避できるように、IPネットワークアドレス空間の配分及びアドレス設定を含むアドレッシングを自動調整し、ネットワーク中のアドレッシングを正しく維持する機能が求められる。図7は災害発生 (a) から、IPネットワークの応急復旧 (b)、IPネットワークの完全復旧 (c) までのIPネットワークの変化を示している。

(1) 複数のアドレッシングサーバが併存する自律分散アドレッシング管理

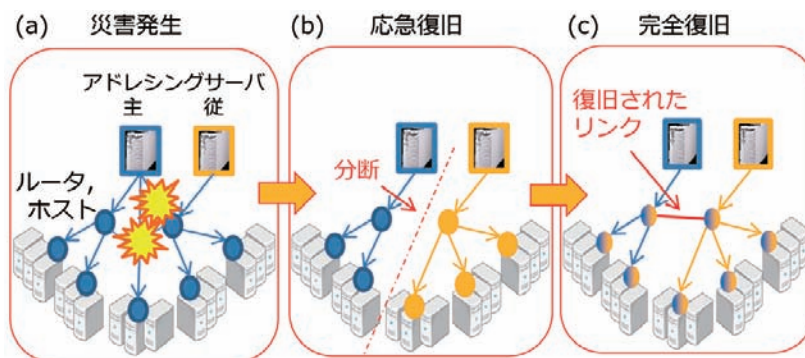
アドレッシング機能を維持するために、複数のアドレッシングサーバが併存し、ネットワークが分断されても、それぞれのサーバが自律的にアドレッシング管理を行う。

(2) 異なるアドレッシングサーバ間でのアドレス空間配分の一致性管理

災害発生後に、異なるアドレッシングサーバが、分断されたネットワークにおいて独自にクライアントのアドレッシング管理を行う際に、クライアントでのリネンバリングを避けるために、クライアントのアドレッシングを災害発生前と同様に維持する。復旧時には、変更されたアドレッシング情報を全てのサーバに更新・共有し整合性を維持する。

(3) 異なるアドレッシングサーバ間でのアドレス空間重複配分の回避

また (2) の状況下では、可能な限りサーバごとに異なるアドレス空間を管理することが望ましい。つまり、災害発生前にサーバ間は協調し、各々のサーバが異なるアドレス空間を管理するという、サーバ間での自律協調的な仕組みが必要である。これにより、分断されたネットワークに新規加



■図7. 災害発生時のIPネットワークでの自動アドレッシング管理

入したクライアントがある場合、復旧時に、これらの新規クライアント間のアドレッシングを重複なく統合することができる。

6. おわりに

NICTでは、光ネットワークの高度化・高機能化に関する研究開発だけでなく、将来の光通信インフラにおいては、あらかじめ高い耐災害性が付与されていることが望ましいという戦略に基づき、様々な研究開発の取組みを行っている。

リソースの制御が柔軟に行える次世代の光スイッチング方式である光パケット交換を取り入れた弾力的な光ネットワークにおける、ダイナミックな波長領域境界制御による抜本的な輻輳低減技術、及び生残した光ファイバ・光通信機器を糾合して被災地近傍に大容量の光エントランスを緊急に設立する暫定光ネットワーク技術の2本の柱に基づいた研究開発は、多くのユーザが頼れる強靱な光通信インフラ実現に重要な役割を果たすと期待される。

引用文献

- [1] Y. Awaji, et al, J. Opt. Commun. Netw. 9, A280-A289 (2017).
- [2] Ministry of Internal Affairs and Communications, "Information and Communications in Japan," White Paper, 2011, http://www.soumu.go.jp/main_sosiki/joho_tsusin/eng/whitepaper.html
- [3] H. Harai, IEICE Transactions on Communications vol.E95-B, pp.714-722 (2012).
- [4] ITU-T, "Future Networks : Objectives and Design Goals" Y. 3001 (2011).
- [5] H. Furukawa, et al, Photonic Networks and Devices (NETWORKS), NW1C.1, July 2013.
- [6] H. Furukawa, et al, Optics Express vol. 19, pp. B242-B250 (2011).
- [7] ITU-T, "Requirements for network resilience and recovery," ITU-T FG-DR&NRR, Version 1.0 (05/2014).
- [8] ITU-T, "Disaster relief systems, network resilience and recovery (DR&NRR) : promising technologies and use cases," FG-DR&NRR-O-075 (2014).
- [9] ITU-T, "Technical report on telecommunications and disaster mitigation," ITU-T FG-DR&NRR, Version 1.0 (06/2013).
- [10] T. Tsuritani, et al, ECOC2008, We.1.B.1.
- [11] S. Okamoto, et al, ECOC2009, 3.2.4.
- [12] L. Liu, et al, J. Lightwave Technol., vol.31, no.4, pp.506-514, 2012.
- [13] S. Xu, et al, ECOC2013, We.4.E.6.
- [14] S. Xu, et al, OFC2014, W2A.57.
- [15] S. Xu, et al, IEICE Trans. Commun., vol. E99-B, no. 2, pp. 370-384, 2016.
- [16] S. Xu, et al, Design of Reliable Communication Networks (DRCN), 2015, p.6.
- [17] S. Xu, et al, Design of Reliable Communication Networks (DRCN), 2016, pp. 55-61.
- [18] K. Fujikawa, Asia Workshop on Future Internet Technologies, 2011, pp. 124-131.
- [19] K. Fujikawa, et al, Symp. on Applications and the Internet (SAINT), 2012.
- [20] Y. Song, et al, Global Communications Conf., 2011, p. 5.
- [21] S. Xu, et al, Global Communications Conf., 2013, p. 7.
- [22] K. Fujikawa, et al, IEICE Tech Rep., vol. 114, no. 286, pp. 57-62, 2014.
- [23] K. Fujikawa, et al, IEICE Trans. Inf. Syst., vol. E99-D, no. 6, pp. 1553-1562, 2016.