

採択番号 : 19302

研究開発課題名 : スマートコミュニティを支える高信頼ネットワーク構成技術の研究開発

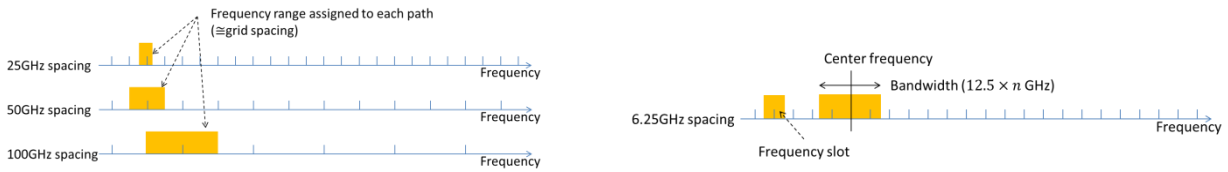
副 題 : 超高信頼性を達成する次世代インテリジェント光ネットワークアーキテクチャ

## (1) 研究開発の目的

## 【研究の背景】

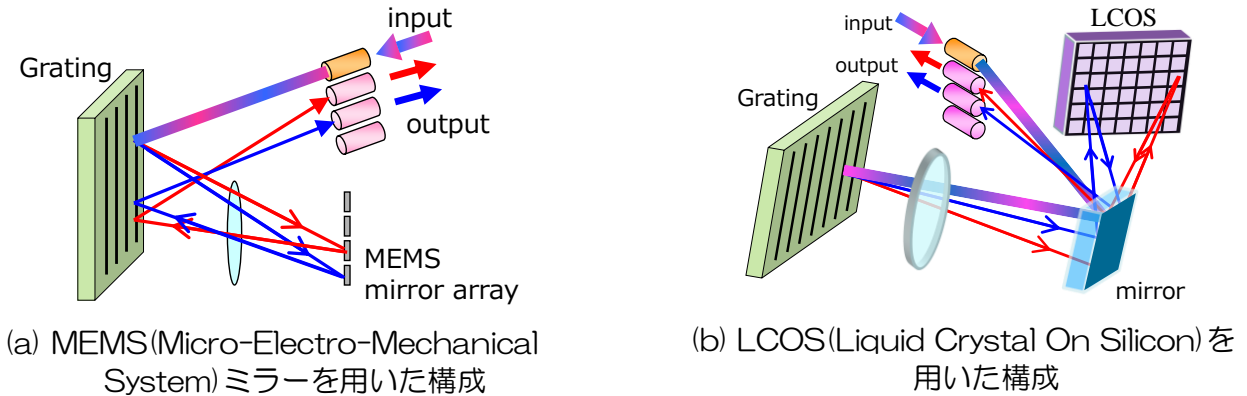
ネットワーク上の通信トラフィック総量は依然として年率 20-30%で増加し続けており、特にクラウド・モバイルセクターでは 60%程度の高い伸びを示している(Cisco 社の公開するデータによる)。データセンター間のライブマイグレーション、超高精細映像配信サービスやクラウドストレージなど、広帯域を要するサービスがあらゆる領域に普及しており、一方では IoT 時代の到来により、有線・無線ネットワーク全体を統合してのクラウドへの確たるコネクティビティが現代社会の必須要件となりつつある。通信拠点において光信号を中継し経路制御する際に、電気信号を介した電氣的処理を最小限に抑え、光信号のまま増幅・ルーティング処理を行うことを基本とする、光ファイバ通信ネットワーク(以下光ネットワークと総称する)は、その際だった通信容量と低消費電力とから、今後も引き続き、バックボーンからアクセスに至るまでのネットワーク基盤を構成すると期待されている。しかし一方では一本の光ファイバで達成する通信容量が非線形シャノン限界に迫っており(“Capacity Crunch”)、光ネットワークの容量を飛躍的に増加する上では複数の光ファイバを並列に使用する技術を開発するなど、ネットワーク全体のアーキテクチャ及び伝送技術の革新が求められている。実際、コア部分を複数とした光ファイバの開発や、これを前提とした空間分割多重(SDM)技術及びこれを用いた光ネットワークの検討が現在進められている。

光ファイバの通信容量の最大化に貢献しているのが、最近 ITU-T 勧告 G.694.1 の第二版に追加して標準化された「フレキシブルグリッド」である。従来は各光パス(始点通信ノードと終点通信ノード間とを直結する光信号)には ITU-T で標準化された等間隔(一般に 50/100GHz 間隔)の周波数から適切なものが割り当てられており(図 1-1(a))、これは固定グリッドと呼ばれる。固定グリッドでは、グリッド間隔により光パスが占有できる周波数帯域が決まるが、フレキシブルグリッドでは各光パスに必要な最小限の周波数帯域を可変的に割り当て可能としている。すなわち光パスに割り当てる周波数帯域の指定にあたり、中心周波数を 6.25GHz の密なグリッドに配置し、割当帯域を 12.5GHz の倍数とする(図 1-1(b))。光周波数直交多重や多値変調方式、デジタルシグナルプロセッサによるコヒーレント受信の導入等により、現在の 10/40/100Gbps の光パスが 50GHz よりも狭い帯域で収容可能になるばかりでなく、想定される必要帯域が 75-87.5GHz/187.5-200GHz となる 400Gbps/1Tbps の大容量光パスを効率よく収容可能となる。また、光周波数直交多重のサブキャリア数や変調の多値数を変えることで、光パスの容量や使用する周波数帯域、さらには伝送可能距離までも自在に制御できるようになっている。この自由度の高さに鑑み、これら光パスは「エラスティック光パス」とも呼ばれる。



(a) 固定グリッド (従来型) (b) フレックsgivingグリッド (G694.1)

図 1-1 周波数割り当て法 (ITU-T にて標準化)



(a) MEMS (Micro-Electro-Mechanical System) ミラーを用いた構成

(b) LCOS (Liquid Crystal On Silicon) を用いた構成

図 1-2 波長選択スイッチの代表的な構成

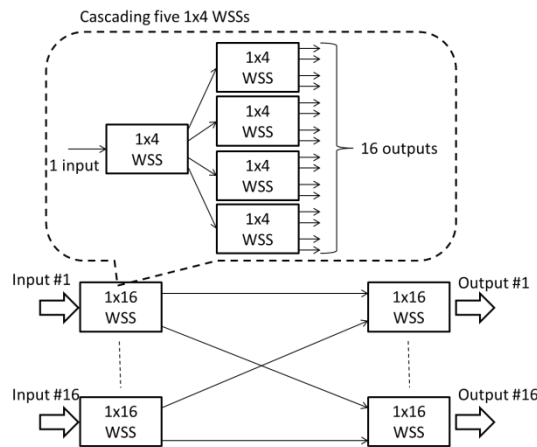


図 1-3 カスケードされた 1x4 波長選択スイッチを用いた 16x16 光クロスコネク

エラスティック光パスの導入をもってしても光ファイバ容量拡大ペースの鈍化は避けられず、中長期的にはより多数のファイバで構成されるリンクの導入が必須である。多数のファイバを相互接続するために、ノード装置（光ネットワークの場合、特に「光クロスコネク

スイッチの規模は依然として  $1 \times 20$  程度までに限られている（実験室レベル(NTT 研究所)では、平面光波回路とのハイブリッド光学系の導入により、定盤上に組まれた  $1 \times 95$  プロトタイプが実現されているが、量産性が依然として課題である）。一方で波長選択スイッチの出力ポート数（次数）は、ノードに接続される入出力ファイバ数（次数）以上となる必要があるため、従属にカスケード接続することで出力ポート数を増やす必要がある（図 1-3）。カスケード接続により波長選択スイッチ数はおおむねノードの入出力ファイバ数の二乗に比例して増加する。また、光パスがカスケード接続を通過する際には信号パワーが大きく損失することから、更なる増幅装置の追加が必須となって構成コンポーネント数を押し上げる（図 1-4）。更にトラフィックを収容する光パスが増加するため、ノードに具備される送信機・受信器の個数も増加する。よってコンポーネント数の増加は特にノード装置で著しく、最近はコスト低減を狙ったオープン化 (OpenROADM 等) の流れが見られる。すなわちノード装置を個別の機能ごとの部品に分割し、同一もしくは異なるベンダからの部品を要求に合わせて組み合わせる・更新することで、必要な能力を低コストで得ることを狙っている。しかし、ノード全体としてのバリデーションを経ないこと、部品ごとの信頼性のばらつき、および部品のコストと信頼性とのトレードオフが必ずしも明確でないことが課題である。

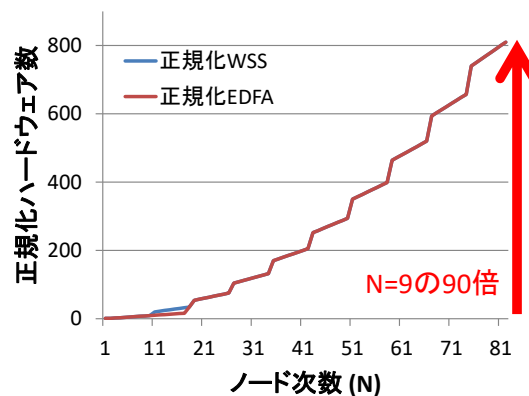


図 1-4  $N \times N$  ノードにおける必要ハードウェア数の変化 (N=1 の値で正規化)

電気処理に基づくネットワークにおいては、大容量データ転送の効率を向上させる「Software Defined Network (SDN)」が一つのトレンドとなっている。これは、データが経由する通信装置(スイッチ・ルータ)において、小さな転送単位(フレーム・パケット)の全てについて独立して宛先検索をするのではなく、宛先情報を一時的に記憶して一連のフレームを特定し、これを連続した流れ(フロー)として転送することで効率化するものである。電気処理ネットワークの通信トラフィックを受け入れる光ネットワーク側に於いても、このアナロジーとして「Transport SDN」が研究のトレンドとなっている。光ネットワークではそもそも波長をラベルとしてデータを連続的に転送しており、SDN 的なコンセプトは転送を効率化するものではなく、動的にネットワーク資源（通信容量）を割り当てることにより時々刻々変化する通信トラフィックに適応することで、常時の全体最適の達成を目指すものといえる。しかし、光ネットワークでは、電気処理に頼る他のネットワークと違い、資源の再割当は容易ではない。例えば、光ネットワークで各所に用いられる増幅器では、光パスの追加・削除時に増幅率が変動してしまうが、増幅器を通る光パスの本数により変動率が異なる。故にネットワーク全体での信号パワーの整合性を取りつつ緩やかな制御を実施する必要がある。さらに光パスの設立・削除を指示するシグナリングでの通信遅延に加え、光ノード装置では光パスの信号が他ポートへ漏洩しないように切り替えるため、信号の迂回処理に時間を要する。これらの要因により、電気ネットワーク側のアジリティに呼応する高速な動的制御は困難なものとなっている。

## 【研究の動機】

「研究の背景」にて前述したように、膨大なデータ伝送を担い、かつ現在の情報通信社会の基盤である光ネットワークは、他のいかなるネットワークをも上回る高い信頼性を有する必要がある。現在の光ネットワークにおける信頼性は、通信拠点に置かれる光クロスコネクトノード、あるいは拠点間を結ぶ光ファイバリンクのうち何れか一つのみが故障する場合を仮定し、この故障によってもネットワーク全体での通信が断絶しないだけの冗長性を持たせることで確保している。これは従来、光ファイバ容量が相対的に通信トラフィックに比べて大きく、単一もしくはごく少数の光ファイバでリンクが構成され、これを接続するノードも単純な構成であったことに起因している。すなわち、ノードやリンクの部分的な故障をあえて完全な故障と区別する必要が小さかったためである。しかし、トラフィック増加につれてネットワーク全体がより多数のコンポーネントから構成される複雑なシステムと化すことで、コンポーネントレベルの故障の確率は高まり、かつネットワーク全体では複数のコンポーネントが同時に故障するケースが多くなる。さらにノードのオープン化の流れは、ノード全体としての信頼性の担保を一層難しくする。

さらに、光ネットワークが本格的に運用されるようになった現在、経年劣化により特性が劣化したコンポーネントと特性の良好な新規コンポーネントとの混在、さらにはこれらの一定期間(四半期～1年)での定期的な更新、各リンクの長さや光ファイバ本数の不均一などの要因から、すでに光ネットワーク内は伝送特性や通信容量、故障率が異なる非一様な構造を有している。特に伝送時の劣化の累積により、光信号の到達距離には一定の限界があるため、ネットワーク上では連結されている拠点間であっても光パスが設立できない場合が存在する。また、例えばIoTでの通信と、キーTV局から地方TV局への無圧縮・高精細映像配信とでは必要な通信容量に大きな開きがあり、遅延時間・品質への要求も異なる。このようにネットワーク自体が不均一な大規模システムであり、かつサービスも多様化していることに鑑みれば、ネットワークの「ソフトウェア化」・「仮想化」による自在な適応を目指すのが自然な流れであり、前述のTransport SDNも適応性を与える一つ的手段と見なせる。

## 【前回プロジェクトでの成果】

直近の日米間のコラボレーションにおいて、我々は光クロスコネクトノードの各入力ファイバ中の光パスを、同じ出力ファイバへルーティングされるものをまとめてグループ化し(フレキシブル波長群)、グループ毎に光スイッチでルーティングする新たなノードアーキテクチャ「フレキシブル波長群ノード」を提案している(図 1-5/1-6)。従来想定されていた、電気ネットワークの階層構造のアナロジーとして定義されてきた波長群(図 1-7)は、固定的な帯域を持ち固定グリッド上のパスを一定数収容するものであったが、周波数領域を自在に分割し利用するエラスティック光パスネットワークには不適であった。これに対し、フレキシブル波長群は任意にグループ化された光パスにより定義されることからエラスティック光パスを制限なく収容可能であることが特長である。

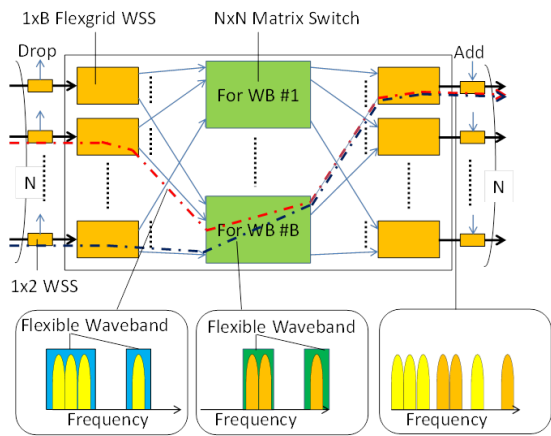


図 1-5 フレキシブル波長群ノード(基本形)

従来型光クロス接続ノードでは、波長選択スイッチが、個別の光パス単位への分波と所望の出力ファイバへのルーティング双方を担当していた。このためノードの大規模化がコンポーネント数の急増に直結していた。一方で、フレキシブル波長群ノードでは波長選択スイッチはフレキシブル波長群の分波を担当するのみであり、ルーティングを光スイッチが担当するため、大規模光スイッチの利用および光スイッチの高速な切替速度を享受することが可能である。また、大規模光スイッチの分割により、更なるコスト削減を図ったアーキテクチャ(図 1-8)を提案済みである。このような多数並列された小規模な光スイッチは、例えばシリコンフォトニクス技術により高集積での実現が期待され、提案アーキテクチャは一層コンパクトかつコスト効率の良いものとなると考えられる。

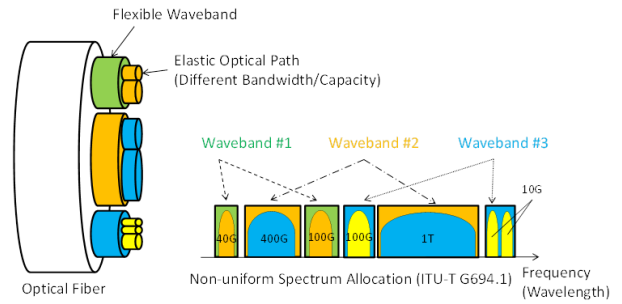


図 1-6 光ファイバ・フレキシブル波長群・光パスの階層構造

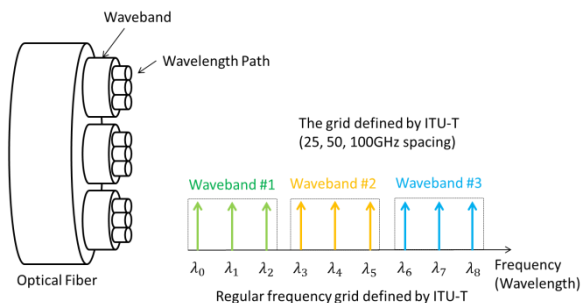


図 1-7 電気ネットワークの階層構造にならった旧来の波長群

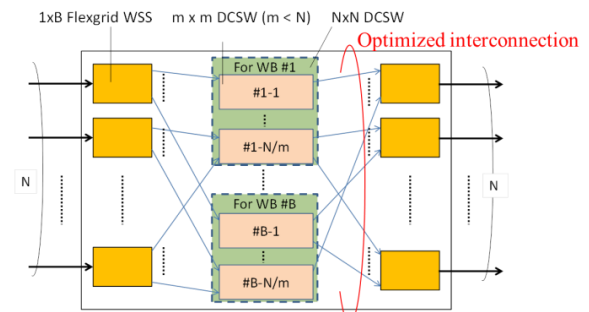


図 1-8 フレキシブル波長群ノード(発展形)

## 【研究の概要および目的】

### (1) 高信頼ノード装置アーキテクチャの開発

研究の背景・動機で述べたように、通信トラフィックの急増に伴う通信ノード大規模化は、ハードウェアコストの急速な増加と、コストダウンを意図するオープン化の要求とを生んだ。一方で、コンポーネント数の増加と、オープン化とで想定されるノード装置の信頼性の低下に 대응する必要が発生している。そこで本研究では、前回プロジェクトの成果である「フレキシブル波長群ノード」が、小規模な波長選択スイッチと光スイッチの集積として実現されており、コストダウンとオープン化の要求に極めてマッチしていることから、このフレキシブル波長群ノードのコンセプトを推し進め、内部構造に冗長性を導入して高信頼化することを目指す。これにより、比較的低廉な、小規模かつ信頼性にややかけるコンポーネントで構成されていても、求められる高度な信頼性をノード装置全体として達成する。

なお、小規模コンポーネントのみにより高いルーティング性能と冗長性とを得るためには、ネットワーク最適化との連携が必要である。そこで装置としてのハードウェアに、ネットワーク最適化という「インテリジェンス」を加味することで、一層のハードウェア規模削減によるコストダウンと、更なる高信頼化を達成することも本研究の狙いの一つである。

### (2) ネットワーク高信頼化

高信頼化されたノード装置を持ってしても、掘削工事によるリンク切断や、大規模災害による複数のノード・リンク故障を担保することはできない。ネットワークレベルでの高信頼化を達成する上では、予備資源を確保し冗長性を得ることが必要であるが、予備資源の確保には多大なコストが必要である。そこで、以下の2つのネットワーク資源の適応的再配分により、資源量が許す範囲内での究極的な信頼性を達成する。

1. 正常運用時に、ネットワークの使用状況の将来予測を行い、資源再配分（光パスの追加・削除およびその経路制御）を行って、ネットワーク内の未使用資源（光ファイバ内での未使用の周波数領域等）を生み出す。この未使用資源を予備資源として利用し、信頼性を向上させる。また、高速な制御が必ずしも得意ではない光ネットワークの特性に鑑み、機械学習を用い通信トラフィックの変動予測を様々な時間スケールで実施し、これを元に遅延を加味した先行タイミングでの適正な資源再配分を行う。
2. 障害時には、影響を受ける光パスを可能な限りその予備へと切り替える。この予備光パスは事前に予約するものの、予約済みの予備光パスもまた障害の影響を受けている場合には、別の経路を通る新たな予備パスを割り当てる。以上は一般的な手段であるが、本研究では中途での信号再生による、光パスの伝送可能距離を超えた長距離での迂回、予備資源が不足した場合における通信容量の削減も導入することで光パスの断を極力避ける。

また、本研究では将来想定される超大容量トラフィックに鑑み、空間分割多重技術を用いたネットワークでの高信頼化についても、そのあるべき姿について検討を行う。

(3) サービスレベルアグリーメントに基づくコネクション制御

限りあるネットワーク資源で実現できる冗長性には限界があることから、個々の光パス（コネクション）が要求するサービスレベル（許容故障時間等）を満足させつつ、ネットワーク側の収益を最大化するための予測及び制御手法を確立する。

光パスの平均故障時間の推定には多くの計算を要することから、計算結果を教師データとした機械学習（深層学習ニューラルネットワーク）を行うことで高速に近似値を推定し、また得られた近似推定値をネットワークの制御にフィードバックして、サービスレベルを満足する範囲内でネットワーク側の収益を最大化する。

(2) 研究開発期間

平成30年度から令和3年度（36ヶ月）

(3) 実施機関

国立大学法人東海国立大学機構 <代表研究者>  
国立大学法人香川大学

(4) 研究開発予算（契約額）

総額45百万円（令和2年度 15百万円）  
※百万円未満切り上げ

(5) 研究開発項目と担当

研究開発項目1：高信頼かつスケーラブルな光クロスコネクトノード

1-1 高信頼化フレキシブル波長群ノードアーキテクチャ（国立大学法人東海国立大学機構）

1-2 高信頼化フレキシブル波長群ネットワーク設計法及び拡張法（国立大学法人東海国立大学機構）

研究開発項目2：複合型冗長化に基づく超高信頼光NW

2-1 経済的で超高信頼な大規模光ネットワーク設計法（国立大学法人香川大学）

2-2 縮退資源再割当てによる故障救済率向上（国立大学法人香川大学）

2-3 空間分割多重光ネットワーク高信頼化への拡張（国立大学法人香川大学）

2-4 複数時間スケールにおけるトラフィック変動予測と動的ネットワーク制御への応用（国立大学法人東海国立大学機構）

(6) 特許出願、外部発表等

		累計（件）	当該年度（件）
特許出願	国内出願	0	0
	外国出願	0	0
外部発表等	研究論文	4	2
	その他研究発表	38	13
	標準化提案	0	0
	プレスリリース・報道	0	0
	展示会	0	0
	受賞・表彰	6	4



(7) 具体的な実施内容と成果

研究開発項目1：高信頼かつスケーラブルな光クロスコネクタノード

研究開発項目1-1：高信頼化フレキシブル波長群ノードアーキテクチャ

- 複数光ファイバを束ねての一括切り替えを行う joint-switching とフレキシブル波長群とを融合した光クロスコネクタノードの更なる容量拡大を実現した。複数の波長選択スイッチを単一のマルチコアファイバに割り当てることで、従来波長選択スイッチの次数により制限されていた、ファイバあたりのコア数を増加させることに成功した。21 コアファイバプロトタイプを構成しての伝送実験（図 1-1-1）では、400Gbps 信号が複数ノードを経由可能であること、およびその際のノード全体の容量が 2.15Pbps（400Gbps/波 × 64 波/コア × 84 コア/ファイバ）に達することが実証された。

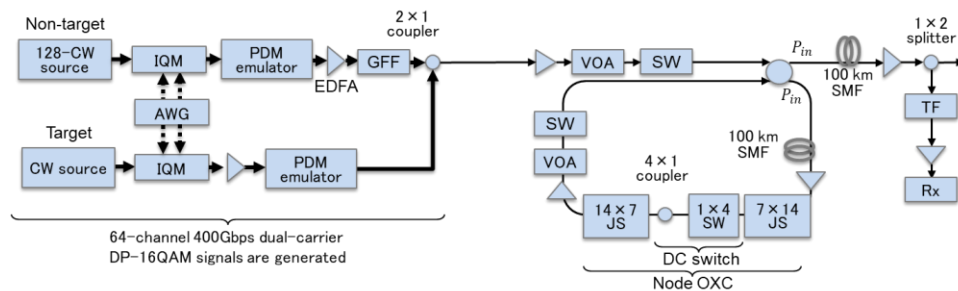


図 1-1-1. 伝送実験

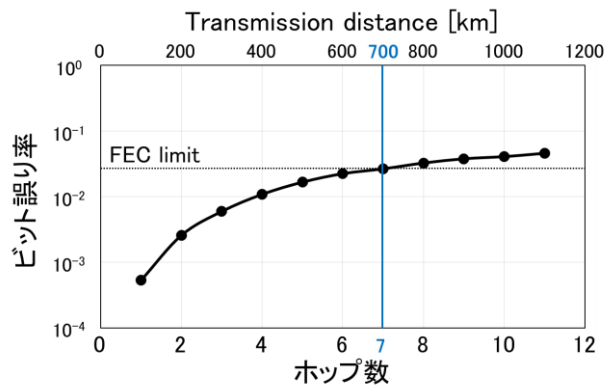


図 1-1-2. 測定結果

- より多くのコア数を擁するマルチコアファイバを用いた場合のハードウェア規模の削減を、ネットワーク全体で評価すべく数値シミュレーションを実施した（項目1-2に詳細を記載）。既存の構成2種と比べてハードウェア規模が大幅に減少すること、すなわち高信頼化が達成できていることが明らかとなった。



研究開発項目 1-2：高信頼化フレキシブル波長群ネットワーク設計法及び拡張法

- 項目 1-1 で提案した新たなノードでは、複数光ファイバ（コア）間で同一となる、フレキシブル波長群への光パスのグループ化を行う。多数のコアや多数の光ファイバ（20程度）に対応できるようアルゴリズムのプログラム実装を改善した。波長選択スイッチ数及び組み合わせる光スイッチ数と規模の関連性を様々なネットワーク形状を用いた数値シミュレーションで明らかにした。特にファイバ中のコア数が 10 を超える領域において、波長選択スイッチの次数をより抑えられることが明らかとなった。これは、波長選択スイッチの更なる削減及び波長群のルーティングに用いられる光スイッチの削減に直結する成果である。

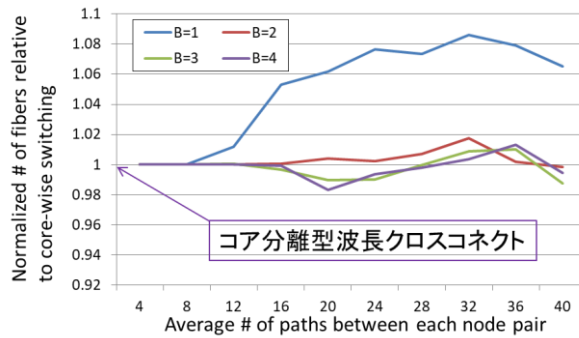


図1-2-1 21コアマルチコアファイバを用いたネットワークにおける正規化光ファイバ数

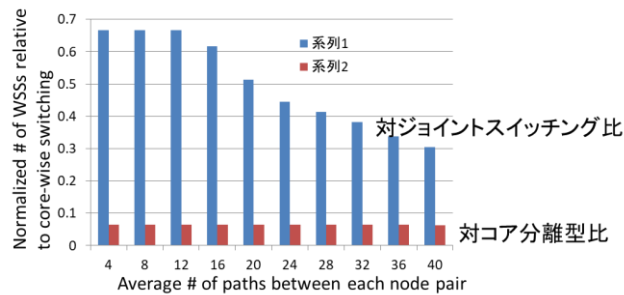


図1-2-2 14コアマルチコアファイバを用いたネットワークにおける波長選択スイッチ数比

## 研究開発項目2：複合型冗長化に基づく超高信頼光ネットワーク

### 研究開発項目2-2 縮退資源再割当てによる故障救済率向上

- 様々な条件におけるEONにおける多重故障に対するSP-FB方式の効果をまとめた。

### 研究開発項目2-3 空間分割多重光ネットワーク高信頼化への拡張

- SCNにおいてSP-FB機能をプログラミング実装し、多重故障による耐性を向上が可能かどうかをシミュレーションにより検証した。SCNにおいてもSP-FBにより多重故障耐性の向上が可能であることを、特定の条件下におけるシミュレーションにより確認した。
- SCNにおけるSP-FBのハードウェア的な実現可能性を検証するため、テストベッドを構築し、Cバンドにおいてネットワーク実験を実施した。コア選択スイッチプロトタイプを用いてテストベッドを構築し、SDMレイヤにおける空間チャンネルのFB、ならびにSDMレイヤとWDMレイヤにまたがった波長チャンネルのFBの検証実験を実施し、ペナルティなしの切り替えに成功した。

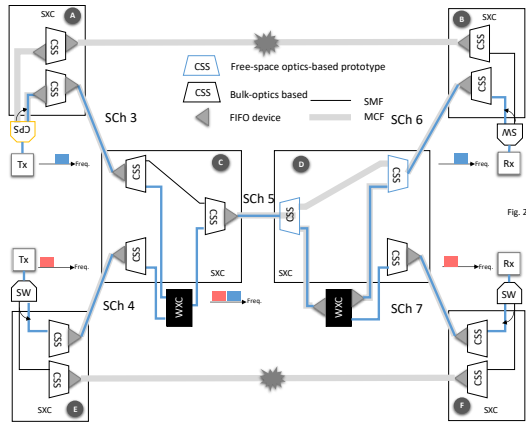


図 2-3-1. SCN における SP-FB 実験系

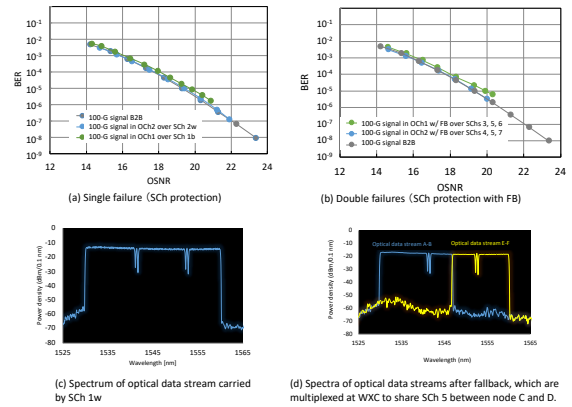


図 2-3-2. SP-FB 実験結果

研究開発項目 2-4 複数時間スケールにおけるトラフィック変動予測と動的ネットワーク制御への応用 (国立大学法人名古屋大学)

- 令和元年度に提案した、仮想的に発生させた通信需要を教師信号として用いた強化学習による、ネットワークの動的制御アルゴリズムの検討を推し進めた。異なるチャンネル容量・周波数帯域幅の光パスが共存し、かつダイナミックにこれらを制御する複雑な状況における制御方式を編み出すに至った。この方式では、異なる周波数帯域幅を持つ光パスに対して、その帯域幅を周波数間隔とするグリッドを独立に定義し(図 2-4-1)、各々のグリッド上で密な配置を行う。また、グリッド間の関係を考慮することで、強化学習に基づく各グリッド位置でのパス収容効率の評価を精度良く行う。これにより、各周波数グリッド位置におけるネットワーク形状の同一性を最大限に活用しつつ、グリッド間の関係もあわせて考慮可能な効率的な手法となっている。数値実験により、様々な光パスが混合する条件下においても、ネットワーク容量を大きく改善できることを明らかにしている(図 2-4-2)。図 2-4-2 では、データセンター等が接続されたノードを想定し、特定のノードに通常のノードに数倍 ( $I=1,2,3,4$ ) するトラフィックが集中したとして評価を行っている。集中度が高いほど、提案法は、リンクの混雑度のみを考慮する従来型の制御アルゴリズムに比べて性能が向上することが明らかとなった。

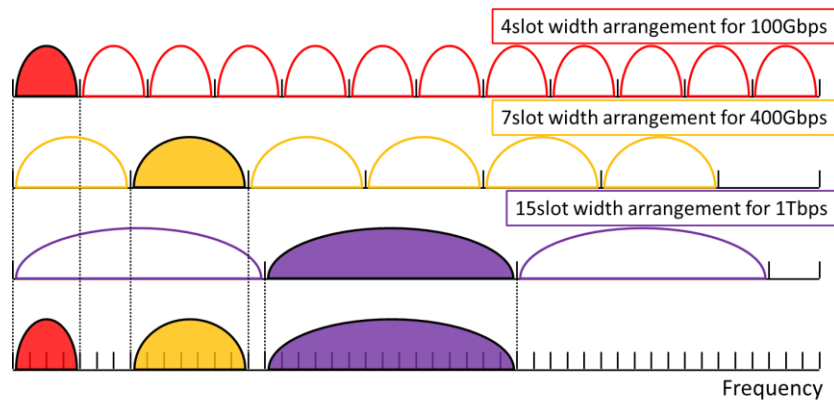


図 2-4-1 周波数帯域幅毎に独立のグリッドを定義した例

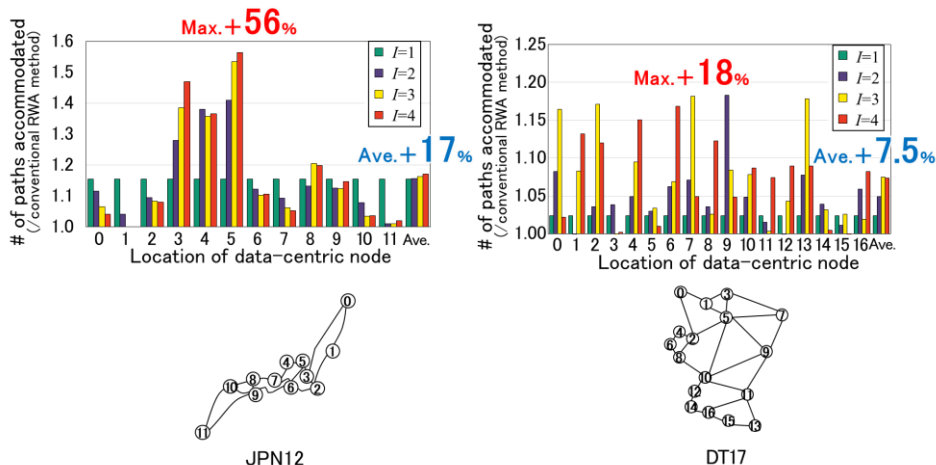


図 2-4-2 データ集中ノードの位置に関する収容可能トラフィック量の変動(対従来比・データ集中度 $I=1,2,3,4$ )

(8) 外国の実施機関

ジョージワシントン大学(米国)