

採択番号：176B02

課題名：大規模フラットネットワーク基盤技術の研究開発

個別課題名：課題 B 柔軟な高速可変性を活用する大規模フラットネットワークの検討

副題：大規模フラットネットワーク構築のための弾力性のある光パス設定制御

(1) 研究開発の目的

現在、データセンター内ネットワークや、さらに範囲を拡大したメトロエリアの Layer2 ネットワークの構築の重要性が高まっている。多数の Layer2 スイッチを経路のループに注意しながらツリー型などの階層的な物理構造で接続する伝統的な手法では、階層ごとの中継処理に伴う遅延の増大、物理的トポロジに起因するボトルネックリンクなどの存在、ループ回避のための Spanning Tree Protocol (STP) の冗長化によるリンク利用効率の低下などの問題が指摘されている。この問題に対し、フラットな Layer2 ネットワークが注目されている。このネットワークでは、IETF で規定されている TRILL (Transparent Interconnection of Lots of Links) に基づく Equal Cost Multi-Path や IEEE 標準の SPB (Shortest Path Bridge) に基づく VLAN タグによる複数パス経路の確保など、これまでの階層化トポロジ構造に拘束された手法とは異なり、複数のパスを柔軟に利用することによりネットワーク利用効率の向上と高速なパス設定・切替を可能としている。今後、このようなフラットネットワークの大規模化に対するニーズは容易に予測され、世界各国で積極的な研究開発競争が本格化しはじめている。「大規模化」には、特に、ネットワークの地理的な広域化という視点と、収容ノード数の増大という視点を挙げることができる。前者の地理的広域化に関して、ネットワークの能力を最大限に引き出すために、互いに遠方のノード間に対してマルチパスを提供する場合、長距離伝送による物理レイヤ信号劣化に加えて網資源利用の競合が強くなることによる光パス設定の接続性低下問題が存在する。そのため、高度なネットワーク制御により、地理的に大規模なネットワークに対して光パスを高い接続性で提供するという技術課題を解決する必要がある。一方、ノード数の増大に対しては、必然的に対地間の組合せが爆発的に増大することから、複数の対地間光パスを設定することで特定のリンク内のパスの多重度が極めて高くなり、その結果、当該リンクにおける輻輳が発生しやすくなるとともに、バースト的に発生する対地間通信の ON-OFF 状態の変化によりトラヒックの急激な変動も起こりやすくなるため、トラヒック変動に対する即時の対応が不可欠となる。このように、総パス設定数の爆発的増大に伴う急激なトラヒック変動に対して迅速に対処するとともに網全体の負荷バランスを達成する技術が必要不可欠である。

上記の技術課題を解決する光パス設定・変更制御技術の実現が本研究の大目標である。現状の実用性を重要視した研究開発の状況を鑑みるに、光回線交換方式に対しては波長連続性制約を考慮に入れつつ半固定的な経路の設定を行う経路選択技術の研究開発が主流であり、光パケット交換方式に対しても仮想的な転送経路を自在に変更することは困難である。現状の研究開発の主流が準静的な制御となっていることの主要因として、現在実現する光スイッチでは、ナノ秒オーダーの高速処理が不可能であったため、予め光パスを安全側に準備しておくなどのプロアクティブなアプローチに頼らざるを得ないという現状があった。もし、高速な交換能力を有する光スイッチが実現されれば、パス設定制御の高度化も新たなフェーズを迎えることになる。これまでの RWA (Routing and Wavelength Assignment) 問題は、その時点での最大効用の解を探索するというものが大部分であり、一部、その後のトラヒック

(28-1)

変動を予測して解を探索するという手法も存在している。ただし、そのような現状態における動的最適化制御と安全側を見据えたプロアクティブ型の制御は収容効率向上の面で有効であるが、当該制御のみでは、状態の変化に対する即応性という意味では不十分である。前述のとおり、頻繁に生じうる想定を超えた変化に対して、現状の対応状況を柔軟かつ迅速に修正するという劣悪状態からの強い修復能力を有する制御をも含めた技術開発は十分とはいえない。

以上の技術的背景の下、本研究では、現状態・将来状態に基づく最適化制御に加え、頻繁に発生しうる想定を超えた状態変化に対する即応的な修復能力を兼ね備えた、強い「弾力性」を有する接続性の高いパス設定制御の確立を具体的な目的とする。特に、高速に交換可能な光スイッチの能力を最大限に活用することにより、修復能力、すなわち解の適応的変更能力を高めることを目指す点に特徴がある。

(2) 研究開発期間

平成26年度から平成30年度（5年間）

(3) 実施機関

公立大学法人大阪府立大学（実施責任者 教授 戸出英樹）＜代表研究者＞
国立大学法人大阪大学（実施責任者 教授 渡辺尚）

(4) 研究開発予算（契約額）

総額45百万円（平成28年度 9百万円）
※百万円未満切り上げ

(5) 研究開発項目と担当

課題ア：弾力性のある光パスの波長／ファイバ割当方式の開発

1. 仮予約の概念を導入したプロアクティブ型経路設定・変更制御技術
（大阪府立大学／大阪大学）

2. 光パケット網と光回線網の専用周波数帯域の動的調整制御（大阪大学）

課題イ：トラフィックバランスと対地間公平性を実現する複数経路事前設定法
（大阪府立大学）

課題ウ：弾力性のある光パス設定方式のコントロール部構成法の開発と実証実験

1. 柔軟なコントロール部の設計とプロトタイプ実装（大阪府立大学／大阪大学）

2. 高速切り替え可能な光スイッチを用いた光パス設定制御の実証実験
（大阪府立大学／大阪大学）

(6) これまで得られた成果（特許出願や論文発表等）

		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	研究論文	1	1
	その他研究発表	37	16
	プレスリリース・報道	0	0
	展示会	0	0
	標準化提案	0	0

(7) 具体的な実施内容と成果

課題ア-1 仮予約の概念を導入したプロアクティブ型経路設定・変更制御技術 (大阪府立大学・大阪大学)

エラスティック光ネットワークにおいて、特定の経路に対し、パス集約を利用した動的な周波数資源割当・変更制御として提案した「仮予約型経路設定・変更制御」のさらなる改良を図った。研究代表者らがすでに基本コンセプトを提案している周波数スロットの「仮予約」周波数資源帯域に対するマージンが不足したと判断される状況下で仮予約帯域を拡張可能であるならば、その仮予約帯域を瞬時に増大させ、他のパスの周波数資源帯域が枯渇している状況下で当該パスの仮予約帯域に相応の余裕がある場合には、その帯域を減少させるといった、仮予約する周波数資源帯域の変更制御の詳細設計と計算機シミュレーション評価を行った。これにより、 10^{-4} から 10^{-3} の接続棄却率の負荷領域で、変更制御なしの仮予約方式に対して1桁の接続棄却率の低減を達成した。従来のFirstFitによるアプローチと比較した場合、2桁程度の低減率に達することも確認できた。さらに副次的な効果として、上記の負荷において、トランスポンダ数の削減率が、FirstFitの値を基準として、変更制御なしの仮予約方式では60%程度、新提案方式では、75%程度削減できることの知見を得た。

課題ア-2 光パケット交換網と光回線交換網の専用周波数帯域の動的調整制御

光パケット交換網と光回線交換網の周波数境界制御に関して、前年度までの成果をもとにより詳細に検討を行った。特に、メタヒューリスティック手法で算出する解を、ボトルネックリンク、あるいはリンクごとに算出し評価を行った、更に、機械学習を用いた簡易型の境界制御手法を考案し、ファイバごとに周波数境界制御を行う方式との比較評価も行った。機械学習を用いた制御に関しては、学習の速度が制御周期と比べて遅いことが問題であることが明らかになった。一方で、境界の利用状況について精査した結果、交換方式の違いによりトラヒック量に対する必要周波数スロット数が大きくことなることに着目することで、更なる棄却率改善の可能性があることが分かったため、前年度の方式の改良を行った。具体的には、境界に対して最もOPS領域に近いOCS専用周波数スロットの利用状況をチェックし境界移動の判定に用いる手法である。これにより、従来の提案方式と比較しても多くの負荷領域で50%以上の棄却率改善効果が得られることを確認した。

また、空間分割多重型のエラスティック光ネットワークを対象とし、空間チャンネルも考慮した資源割当手法として、異なるコア間を流れるパケット同士のクロストークの影響を低減する方式についても検討を進め、クロストークが発生する割合を半減しつつ、棄却率も改善可能であるとの知見が得られた。

課題イ 弾力性のある複数経路決定・選択制御の研究開発

トラヒックバランスと対地間公平性を実現する複数経路事前設定法 (大阪府立大学)

光パスを網内の負荷バランスや各対地経路間の品質の公平性を同時に考慮に入れて空間的に並列に提供する方式として、主として高速スイッチングとの親和性を鑑み、ヒューリスティック手法を提案・評価した。ヒューリスティック手法として、光パス/光パケット交換統合網への適用性も考慮に入れて、光パケット交換網に適用可能な経路選択方式であるTwo Best First Hop (TBFH)方式をベースとして、プライマリ・セカンダリ次ホップ候補から高速に次ホップを選択する処理を繰り返すことにより特定のノード対間の経路を迅速に設定する手法を設計・評価した。これにより、25ノードから100ノードのネットワーク規模で、経路算出時間をK-Shortest Paths法よりも1桁から2桁程度低減させることを実証した。また、TBFHのプライマリ・セカンダリ次ホップを活用して、過負荷状況に陥った場合には

OPS レベルで他の次ホップへオフローディングする、OPS-to-OPS オフローディング方式を規定し、その負荷分散効果を明らかにし 1.5 桁程度のパケットロス率低減効果を実証し、パケット順序逆転問題の面からも提案方式の有効性を明らかにした。

さらに、OPS-OCS 統合網において、OCS パス利用後に当該光パスを解放せずに保存した上で OPS 網のパケットを当該保存パスを通じてオフローディングする、OPS-to-OCS オフローディング手法を提案・評価し、保存期間を 10 秒に設定すると、 10^{-4} から 10^{-3} のパケットロス率となる負荷領域で、オフローディングなしの場合に比較して、提案方式のパケットロス率を一桁以上低減できることを実証した。

課題ウ-1 柔軟なコントロール部の設計とプロトタイプ実装 (大阪府立大学・大阪大学)

課題ア及びイの制御を実装する上で、望ましい制御部のあり方を検討した。OpenFlow を考慮に入れた集中制御に加えて、ノードレベルで高速な切り替え判断を行うことが可能な分散制御についても実現法を検討した。集中・分散制御の双方を考慮に入れて、OCS NW Manager、OPS NW Manager、RWA や RSA 処理部、PathDB などを含む機能モジュール構成、情報収集・通知の手順などを詳細に検討し、次年度以降の実証実験に向けての基礎的な知見を得た。