HOKKAIDO UNIVERSITY

Title	トラヒック変動を考慮した光ネットワークの設計制御手法の研究
Author(s)	宮村, 崇
Degree Grantor	北海道大学
Degree Name	博士(工学)
Dissertation Number	甲第13088号
Issue Date	2018-03-22
DOI	https://doi.org/10.14943/doctoral.k13088
Doc URL	https://hdl.handle.net/2115/70610
Type	doctoral thesis
File Information	Takashi_Miyamura.pdf

Hokkaido University Collection of Scholarly and Academic Papers : HUSCAP

博士論文

トラヒック変動を考慮した
光ネットワークの設計制御手法の研究

2018年3月

北海道大学大学院情報科学研究科

宮村 崇

目 次

第 1 章　序論 **1**
1.1　研究の背景 1
1.2　ネットワークアーキテクチャの進展と課題 2
1.3　資源最適化のためのネットワーク設計制御手法の分類 . . . 6
1.4　ネットワーク設計制御手法の研究意義 8

第 2 章　マルチレイヤトラヒックエンジニアリング技術 **13**
2.1　概要 13
2.2　仮想バッファ方式による帯域制御技術 15
2.2.1　研究の背景 15
2.2.2　提案方式: V-WFQ ルータ 16
2.2.3　ハードウエア実装 17
2.2.4　V-WFQ ルータの性能評価 18
2.3　動的仮想トポロジ制御技術 22
2.3.1　動的仮想トポロジ制御技術とは 22
2.3.2　PCE アーキテクチャ 25
2.3.3　動的仮想トポロジ制御の実現方式 26
2.3.4　動的仮想トポロジ制御機能の実装 30
2.3.5　プロトタイプシステムによる性能評価 32
2.4　まとめ 39

第 3 章　光ネットワーク仮想化アーキテクチャ **44**
3.1　概要 44
3.2　研究の背景 44
3.3　関連研究 47
3.4　構成要素 48
3.5　要求条件 49
3.5.1　資源の要求と配分 49
3.5.2　資源の分離 50

3.5.3 仮想網間の独立性 50
3.5.4 物理網資源情報の提供 51
3.5.5 適応性および資源最適化 51
3.6 提案アーキテクチャ 52
3.6.1 設計目標 52
3.6.2 物理網アーキテクチャ 53
3.6.3 物理網マネージャ 53
3.6.4 仮想網エージェント 55
3.6.5 資源配分とトポロジ生成 55
3.7 資源管理モデル 57
3.7.1 アプローチ 57
3.8 インターフェイス 59
3.8.1 インターフェイス規定 59
3.8.2 基本オペレーション 60
3.9 アーキテクチャの実装と評価 62
3.9.1 評価の目的と範囲 62
3.9.2 提案アプローチの定性評価 62
3.9.3 構成要素の動作確認 64
3.9.4 広域網での実証実験 66
3.10 まとめ 73

第 4 章 ネットワークエッジ機能の仮想化を考慮した光集線網の設計手法 78

4.1 概要 78
4.2 研究の背景 78
4.3 関連研究 81
4.4 光集線網モデル 81
4.4.1 概要 81
4.4.2 問題の定義 82
4.5 提案手法 84
4.5.1 モデルの記述 84
4.5.2 定式化 86
4.6 性能評価 88
4.6.1 目的 88
4.6.2 VNF 最適配置の効果と VNF の設定割合 91
4.6.3 トラヒック変動に対する頑強性 94

4.6.4　サーバ数と最適配置の効果 94
4.7　まとめ 96

第 5 章　結論 **100**

研究業績リスト **105**

図 目 次

1.1 ネットワークアーキテクチャ 3
1.2 ネットワーク設計制御手法の分類 6
1.3 本論文の構成 9

2.1 マルチレイヤサービスネットワークアーキテクチャ 14
2.2 V-WFQ ルータのアーキテクチャ 17
2.3 提案方式のパケット処理フロー 18
2.4 V-WFQ と WFQ のメモリ量の比較 19
2.5 性能評価トポロジ 20
2.6 性能評価結果: QoS 制御の有効性 21
2.7 性能評価結果: 制御の安定性 22
2.8 動的仮想トポロジ制御による網構築コスト削減効果 25
2.9 PCE による動的仮想トポロジ制御制御 27
2.10 動的仮想トポロジ制御の処理概要 29
2.11 PCE-PCC 間のメッセージシーケンス例 32
2.12 ネットワークトポロジ 33
2.13 CPU 利用率 35
2.14 OSPF メッセージ量 35
2.15 パス制御タイマー T_1 を変化させた時の動的仮想トポロジ制御時間と OSPF 収束時間の評価 36
2.16 ネットワークの規模と動的仮想トポロジ制御時間と OSPF 収束時間の関係 38
2.17 LSP 数と動的仮想トポロジ制御時間の関係 38

3.1 複数仮想網を収容する光ネットワーク 48
3.2 IP レイヤと光レイヤで構成される物理網と VNT の関係 . . 53
3.3 インフラプロバイダと仮想網オペレータ間の相互作用 . . . 56
3.4 資源管理モデル 58
3.5 提案するシステムアーキテクチャ 60

3.6 実験網の構成 66
3.7 仮想網オペレーション用 GUI ツール 67
3.8 mSON を実現するソフトウエアアーキテクチャ 68
3.9 制御シーケンス 69
3.10 実証実験ネットワーク JGN-X 71
3.11 スケール性の評価 73

4.1 ネットワークエッジ仮想化を考慮した光集線網 80
4.2 光集線網における VNF 配置と共用型 P2MP 波長パス設計の例 83
4.3 論理トポロジと物理トポロジの関係 85
4.4 マルチリングネットワークトポロジ 88
4.5 トーラスネットワークトポロジ 89
4.6 トラヒック量に対するネットワークコスト 90
4.7 トラヒック量に対するネットワークコスト 90
4.8 ネットワークコストの比較 92
4.9 最大サーバ負荷の比較 92
4.10 異なるトラヒック変動に対するネットワークコスト 93
4.11 異なるトラヒック変動に対する最大サーバ負荷 93
4.12 サーバ数に対するネットワークコスト 95
4.13 サーバ数に対する最大サーバ負荷 95

表 目 次

2.1 各方式の帯域利用率と公平性 22

3.1 サーバ-アプリケーション間インターフェイス 61
3.2 3 つのアプローチの比較 63
3.3 処理時間の分析 72

第1章　序論

1.1　研究の背景

情報通信ネットワークの大容量化、高機能化にともない、情報通信ネットワークを活用したサービス・アプリケーションが多様化している。従来の音声通信サービス、WEB、電子メールなどのアプリケーションだけでなく、近年、SNS (social network service)、4K/8K 高精細映像配信サービス、IoT (internet of things)、モバイルデータ通信など利用用途が拡大している。利用用途の拡大に伴い、ブロードバンドサービスの加入者数が増加している。さらにブロードバンドサービスのアクセス方式についても、従来は光アクセスサービスである FTTH (fiber to the home) やアナログ回線を用いた高速通信 DSL (digital subscriber line) など固定アクセスが中心であったが、最近では 4G LTE (long term evolution) や WiFi など高速な移動体・無線アクセスへの転換が急速に進展している。

インターネットの利用状況について、2016 年時点の人口普及率は 83.5 %であり、端末別では「パソコン」が 58.6 %で最も多いが、次いで 57.9 %の「スマートフォン」となっている [1]。特にここ数年「スマートフォン」でのインターネット接続が急増している。ブロードバンドサービスの加入状況をみると、FTTH、高速通信 DSL などの固定系ブロードバンドサービスの加入者数が 3,869 万 (2016 年度末時点) である一方、移動系ブロードバンドサービスは 1 億 219 万加入となっている。移動系の加入者数については、年率 20 %弱の伸び率で増加傾向である。ブロードバンドサービス加入者数の増加に加えて、ネットワークサービス・アプリケーションの多様化に伴い、1 人あたりの利用帯域も増加傾向にあり、インターネットを流れる総トラヒック量は年率 50 %強のペースで増加を続けている [2]。

ブロードバンドサービスの普及によるトラヒックの増加に対応するため、ネットワークの高速化・大容量化が進展している。大容量トラヒックを広域で伝送するため、光伝送技術および光ネットワークの研究開発および実用化が進められている [3]。光ファイバ通信が実用化された当初

は 1 本の光ファイバに 1 波長の信号しか伝送できなかったが、1 本の光ファイバに複数波長の信号を多重する波長分割多重通信技術 (wavelength division multiplex, WDM) が 1990 年代に実用化され、飛躍的に伝送容量が拡大された。並行して、波長あたりの伝送速度の向上も進められており、1990 年代では実用化システムで波長あたり 10 Gbps であったが、2000 年代に入りデジタルコヒーレント技術が開発され、1 波長あたり 100 Gbps 超の伝送容量が実現可能となった。2017 年時点では 1 波長 200 Gbps、80 多重によりファイバあたり 16 Tbps の伝送容量を実現可能なシステムが商用網に導入されている。このように光ネットワークの大容量化は継続的に進展しているものの、大容量化のペースは平均で年率 40 %程度に留まっている。また、コアルータについても大容量化・高速化が進展しているものの、処理容量については年率 20 %程度の向上に留まっている [4]。

さらに、ネットワークの利用用途の拡大にともない、近年、総トラヒック量の増大だけでなくスパイクと呼ばれる短期的なトラヒックの急増など予期しないトラヒック変動が頻発している [5]。また、ネットワーク上に様々なサービスのトラヒックが重畳されることで地理的な交流トラヒックの変化が複雑化・予測困難化している [6]。交流トラヒックがネットワークの設計時点から変動すると、ネットワーク資源の枯渇や余剰が発生するだけでなく、輻輳や品質劣化の要因となる。

以上のように総トラヒック量は年率 50 %以上のペースで増加し続ける一方で、ネットワークの大容量化は年率 20〜40 %程度の改善に留まっており、総トラヒック量の伸びを下回っている。したがって、総トラヒック量の増加や予測困難なトラヒック変動に対応するためには光伝送装置、コアルータ、光ファイバなどネットワークの物理資源を増強せざるを得ず、ネットワークコストや消費電力が増大してしまうという問題が発生する。さらにネットワークのノード数・リンク数が増加するとネットワークサービスの信頼性が低下するという問題も発生する。つまり、ネットワークコスト、消費電力、信頼性の観点からより少ないネットワーク資源で要求されるトラヒック量に対応する必要がある。

1.2 ネットワークアーキテクチャの進展と課題

次にネットワークアーキテクチャの進展について概説する。図 1.1 に一般的な情報通信ネットワークのアーキテクチャを示す。情報通信ネットワークはコア網、メトロ集線網、アクセス網で構成される。

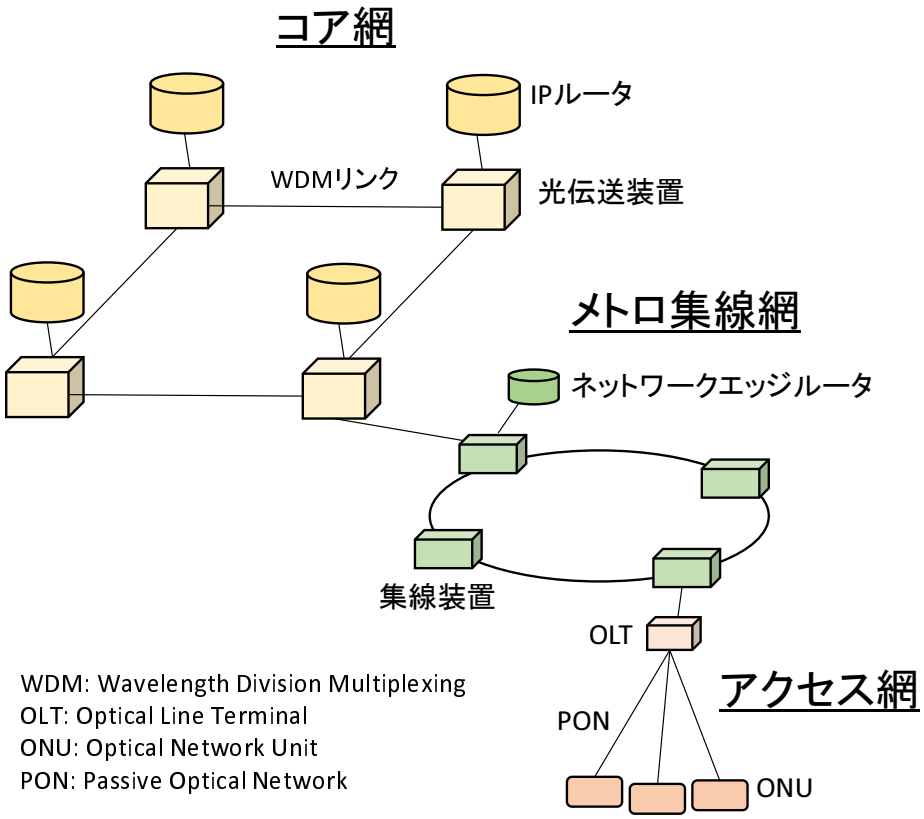


図 1.1: ネットワークアーキテクチャ

アクセス網は加入者とネットワーク間を接続する。FTTH では、ユーザ側の宅内に配備される ONU (optical network unit) とネットワーク側ビルに配備される OLT (optical line terminal) が光ファイバにより接続されている。波長および光ファイバを効率的に利用するため、1 波長を複数の ONU で共用する PON (passive optical network) [7] と呼ばれる接続方式が適用されている。PON では、ONU と OLT 間に受動光素子である光スプリッタで OLT からの光信号の分岐、ONU 側からの光信号の合波を実現している。そのため、OLT-ONU 間は P2MP (point-to-multipoint) 接続となる。メトロ集線網はアクセス網の OLT からのトラヒックを集約して、中継網へと転送する役割を果たしている。メトロ集線網により集約されたトラヒックはネットワークエッジルータにより、QoS (quality of service) や回線認証などネットワークエッジ機能の処理が実施される。コア網はバックボーン (基幹) 網とも呼ばれ、地理的に離れた IP ルータ間を

接続し、大容量のトラヒックを長距離転送する役割を果たす。

ここでネットワークアーキテクチャの進展について述べる。アクセス網では、2000 年代前半に DSL によるアナログ回線を用いた広帯域化が商用化された。その後、さらなる広帯域化を実現するため、PON による FTTH が導入された。当初、ATM (asynchronous transfer mode) 技術をベースにした B-PON が実用化された。B-PON では 100 Mbps クラスのスループットを実現可能である。現在では、広帯域化が進展し、1 Gbps クラスのスループットを実現可能な GE (gigabit Ethernet)-PON が既に商用化されている [7]。今後は 10 Gbps クラスの広帯域を実現する 10GE-PON [8] 等が導入される見込みである。アクセス網については PON をベースにした高速化が進む方向である。

メトロ集線網では、アクセス網からのトラヒックを集約するだけでなく、多数の OLT を同一のネットワークエッジルータに接続するための集線機能を提供する必要がある。ここで集線とは多数の入力回線をスイッチ等を介して、1 本もしくは少数の出力回線へと回線を束ねることである。従来はトラヒックの集約・集線には電気スイッチが用いられていた。地理的に離れた電気スイッチ間の接続にはトランスポンダと呼ばれる光伝送装置が用いられている。このようなアーキテクチャではメトロ集線網が大規模化すると、電気スイッチおよびトランスポンダの配備数が増加するため、ネットワークコストおよび消費電力が増大するという課題があった。そこで、大容量トラヒックを低消費電力で効率的に収容するため、中継ノードでの電気処理が不要な光集線網が提案されている [7, 8]。Carey らは動的再構成が可能な TDM (time division multiplexing)-WDM PON リング構成による光集線網を提案している [7]。Hattori らは光 TDM 技術により、メトロリング網の波長のパスを複数 OLT で共用するアーキテクチャを提案している [8]。集線網のトラヒックはバースト性が高く、収容対象の OLT 数が多いため、DBA (dynamic bandwitdth allocation) [8] 等の TDM 技術により複数 OLT で波長チャネルの帯域を共用するアーキテクチャが採用されている。ここで始点ノードから送出される波長チャネルを複数の OLT で共用するため、パストポロジとしては P2MP となる。

コア網についても、IP ルータによる電気的処理を極力削減して、省電力化と大容量化を実現する光ネットワークの導入が進められている。IP over WDM ネットワークでは、コア網のエッジに IP ルータを配備し、中継ノードを電気処理を行うことなく波長パスルーチングが可能な光クロスコネクト (optical cross-connect, OXC) で構成する。OXC 間は WDM

リンクで接続する。このような構成にすることにより、コア網での電気的処理を極小化しつつ、光ネットワークの特長を活かした省電力化・大容量化を実現することができる。また、中継ノードに OXC を配備することで、ルータ間に設定する波長パスの集合である論理トポロジをトラヒック需要に変化に追従して柔軟に再構成することが可能となる。論理トポロジの再構成を行うことで、ネットワーク資源の有効利用を実現することができる。

ネットワークの技術進展の方向性として上述の大容量化・効率化に加えて、近年、ネットワークサービスの高度化と多様なニーズへの柔軟な対応を実現する取り組みが進展している。本目的に向けて、ネットワーク仮想化技術 [11] およびネットワーク機能仮想化 (network functions virtualization, NFV) [12,13] の研究開発が進められている。ネットワーク仮想化技術は、同じネットワークインフラの上で、複数の仮想網を提供する技術である。通常のネットワークでも複数のサービス網が重畳されているが、サービス網単位でネットワークの設計・制御や機能追加を独立して実施することはできなかった。このため、サービス・アプリケーション毎に異なる交流トラヒックを考慮したネットワーク設計や、新たなサービスを提供するための機能追加などは実現できなかった。ネットワーク仮想化技術では仮想網に対して、ネットワーク設計・制御や機能追加をあたかも専用の物理的なネットワークを構築したように自由にカスタマイズ可能な柔軟性を提供する。サービス・アプリケーション毎に仮想網を構築することで、ネットワーク資源の最適利用や提供機能の最適化を実現できる。ネットワーク上のサービス・アプリケーションの多様化に対応するためには、ネットワーク仮想化技術に対応することが急務である。さらに NFV については、メトロ集線網のネットワークエッジ機能等を汎用サーバ上の仮想化機能 (virtual network function, VNF) として実現する研究が進められている [14,15]。従来の集線網では、エッジルータが収容するユーザは地理的条件等から固定的に決められているため、各エッジルータの収容ユーザ数、つまり処理すべきトラヒック量に偏りが生じやすく、ネットワーク全体のエッジルータ資源を有効に活用できないという課題があった。エッジルータが提供するネットワークエッジ機能を汎用サーバ上で実現することで、地域毎にトラヒック需要に偏りがある場合でもネットワーク全体の効率的な資源利用が期待できる。

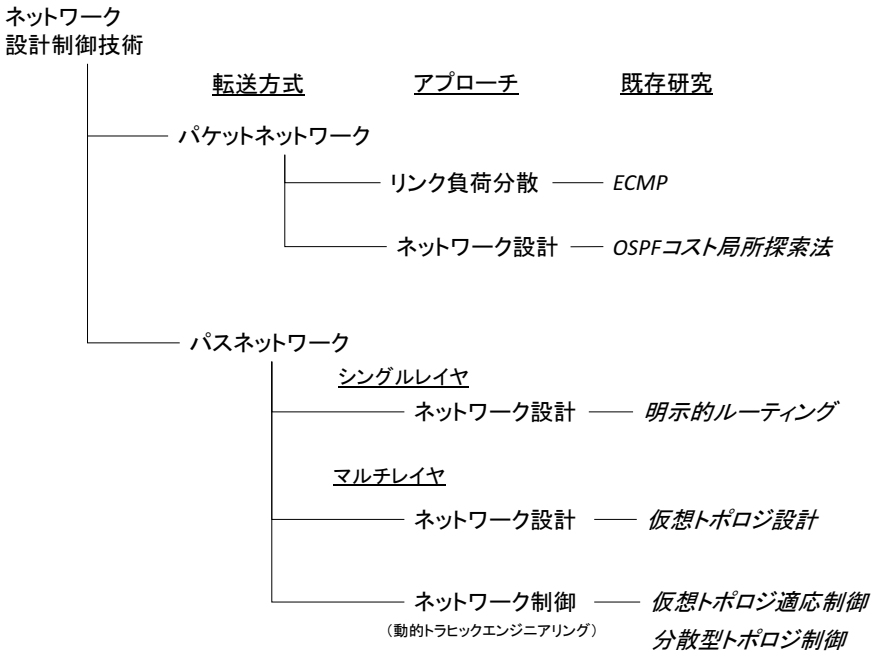


図 1.2: ネットワーク設計制御手法の分類

1.3 資源最適化のためのネットワーク設計制御手法の分類

ここではネットワーク資源最適化のためのネットワーク設計制御手法の分類を説明する。図 1.2 に分類を示す。ネットワーク設計制御手法はトラヒックエンジニアリング (traffic engineering, TE) とも呼ばれ、ネットワークの性能・品質・信頼性等を最大化するためにネットワーク資源の割当を設計・制御を実現する技術である [16]。ここでネットワークの設計・制御の対象としては、ネットワークのルーティングや波長・帯域の割当、ノード上の資源の配分などがある。ネットワークは転送方式により、パケットネットワークとパスネットワークがあり、それぞれにネットワーク設計制御手法が提案されている。

まず、パケットネットワークにおけるネットワーク設計制御手法について説明する。パケットネットワークの転送方式の特徴としては、リンクに付与されたリンクコストに基づき、送信元ノードから宛先ノードまでリンクコストの総和が最小となる経路上をパケットが転送される。このよう

な転送方式を最短コストルーティングと呼ばれる [17]。また、送信元と宛先ノード間で等コストの経路が複数存在する場合、トラヒックを負荷分散して転送することができる。これを等価コストマルチパス (equal-cost multipath, ECMP) ルーチングと呼ぶ [18]。このような最短コストルーティングが適用されるパケットネットワークにおけるネットワーク設計制御手法としては Fortz らによる OSPF コスト局所探索法 (OSPF weight setting using local search) がある [19]。OSPF コスト局所探索法では、ネットワーク内で発生する輻輳を回避し、網全体のスループットを最大化するリンクコストを局所探索法により算出する。

次にパスネットワークのネットワーク設計制御手法について説明する。パスネットワークでは、送信元ノードと宛先ノード間の中継経路を明示的に選択する明示的ルーチング (explicit routing) を利用することが可能であり、パケットネットワークより効率的な資源利用が可能である。ネットワーク内で発生する輻輳を最小化するパス経路の設計手法としては、Wang らによる explicit routing algorithm がある [16]。

さらに一般にネットワークのコア網は IP レイヤと WDM レイヤの多層 (マルチレイヤ) で構成されている。マルチレイヤネットワークのネットワーク設計制御手法としては、Mukherjee らの研究がある [20]。Mukherjee らは、数理計画法により IP/WDM ネットワークの資源最適化問題を定式化し、焼きなまし法 (simulated annealing) による仮想トポロジ設計のための発見的アルゴリズムを提案している。本技術は物理ネットワークと対地間のトラヒック需要が与えられた際の論理ネットワークの設計に適用される技術であり、運用開始後のトラヒック需要の変動は考慮されていないため、設計時からトラヒック需要が変化してしまうと設備余剰や性能劣化が発生するという課題がある。トラヒック需要の変動を考慮したネットワーク設計制御手法としては、動的トラヒックエンジニアリング (TE) と呼ばれる方式が提案されている。マルチレイヤでの動的 TE としては、集中制御をベースにした Gençata らによる仮想トポロジ適応制御が提案されている [21]。さらに自律分散型のマルチレイヤネットワークで実現可能な方式としては、Shiomoto らによる分散型トポロジ制御が提案されている [22]。従来研究では問題の定式化およびアルゴリズムの提案が中心であり、マルチレイヤネットワークの運用制御手法については言及されていない。

上述のマルチレイヤネットワークでは、Point-to-point 接続の波長パスを前提としている。光集線網で必要とされる P2MP 接続を考慮した光ネッ

トワークの設計手法としては、Köksal らにより光マルチキャストネットワークの最適化技術が提案されている [23]。しかしながら Köksal らの研究は WDM レイヤのみのシングルレイヤのネットワークしか考慮されていない。

1.4 ネットワーク設計制御手法の研究意義

ネットワーク上のトラヒック量は年率約 50%以上のペースで増加する一方、ネットワークの高速化・大容量化は年率 20〜40%前後に留まっている。そのため、トラヒック量の増大と予期しないトラヒック変動に対応するためには光伝送技術の導入による大容量化を図りつつ、ネットワークの物理資源の増強を図る必要があるが、コスト・消費電力の増大、品質・信頼性の低下という問題が発生する。問題を回避するためには、トラヒック需要等の環境変化に追従して限られた光ネットワーク全体の資源を有効活用し、性能・品質を最大化するネットワーク設計制御手法を確立する必要がある。

本論文は全 5 章で構成される。構成を図 1.3 に示す。

コア網については、前述の通りトラヒック需要変動に対応するネットワーク制御アルゴリズムの研究が進められており、机上での有効性の評価がなされている。しかし、実網に適用するためには、ネットワーク制御により動的にルーチングやトポロジを変更する制御手順やルーチングプロトコルやシグナリングの安定性などネットワーク運用制御技術の確立が必要である。2 章においてネットワーク運用制御技術を含むマルチレイヤトラヒックエンジニアリング技術について説明する。

さらにコア網において多種多様な複数のサービス網を効率的に収容するためには、ネットワーク仮想化への対応が急務である。ネットワーク仮想化については、パケット処理を対象としたネットワーク仮想化の研究が中心であり、WDM ネットワークを前提とした高速・広帯域を実現する技術は検討されていなかった。そこで、3 章では本研究では高速・広帯域を実現する光ネットワーク仮想化技術の確立に取り組む。

メトロ集線網は、多数の OLT からのトラヒックを集約してコア網に転送する役割を担っている。コア網と比較して、回線速度が低速であるため、輻輳によるユーザ品質の低下の影響が大きく、メトロ集線網における資源最適化を実現するネットワーク設計制御手法の確立はネットワークコストおよびユーザ品質の両面から重要な課題である。メトロ集線網

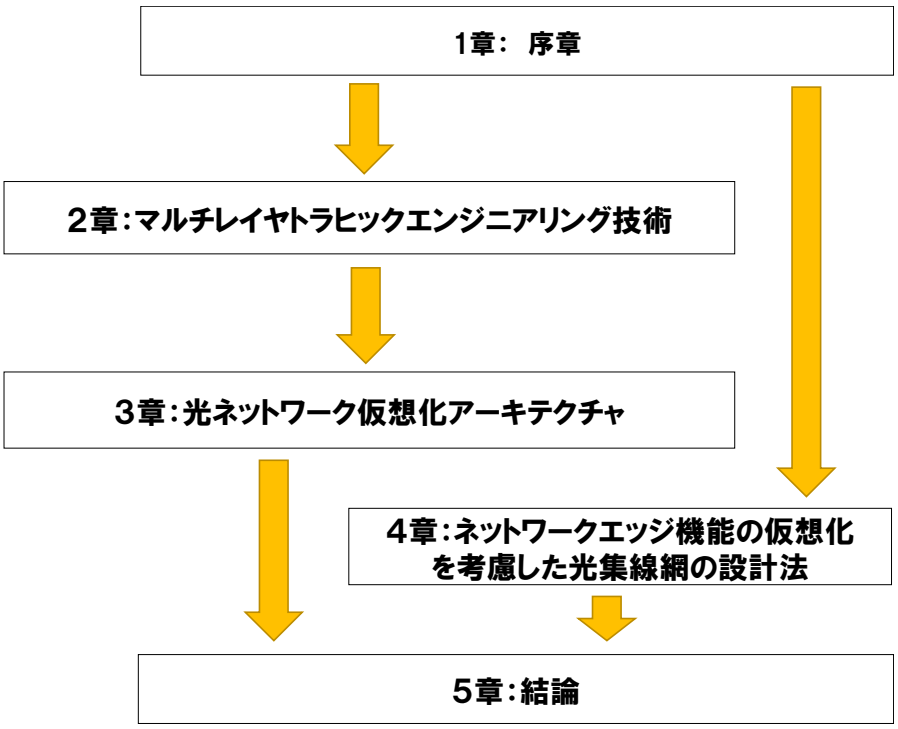


図 1.3: 本論文の構成

では、トラヒックのバースト性が高く、短い時間スケールでのトラヒック変動に対応する必要があり、コア網のようなネットワーク制御による適応的な対処法の適用は困難である。そこで、ネットワーク資源最適化のアプローチとしては、ネットワーク設計ベースのアプローチを選択する。今後の集線網としては、TDM-WDM 技術をベースにした光集線網アーキテクチャが有望であるが、従来のネットワーク設計法は新たなネットワークアーキテクチャに適用することができない。そこで 4 章ではネットワークエッジ機能の仮想化を考慮した光集線網の設計法の確立に取り組む。

以上の検討により、光ネットワークの特長を活かした大容量トラヒックの効率的な転送を実現するとともに、予測困難なトラヒック変動が発生した際のユーザ品質維持およびネットワーク資源利用効率の改善を実現する光ネットワークのネットワーク設計制御手法を確立する。

参考文献

[1] 総務省. “平成 29 年版　情報通信白書,” 2017 http://www.soumu.go.jp/johotsusintokei/whitepaper/h29.html

[2] 総務省，”我が国のインターネットにおけるトラヒックの集計・試算 (2017 年 5 月版),” 2017 http://www.soumu.go.jp/menu_news/s-news/02kiban04_04000213.html

[3] 宮本裕, 川村龍太郎,“大容量光ネットワークの進化を支える空間多重光通信技術,” NTT 技術ジャーナル, Mar. 2017.

[4] 将来のネットワークインフラに関する研究会, “将来のネットワークインフラに関する研究会 報告書,” Mar. 2013.

[5] 高野正次, 長谷川治久, “映像配信サービスの発展に対応するトラフィック管理技術,” NTT 技術ジャーナル, Jul. 2013.

[6] 植松　芳彦, 鎌村　星平, 杉山　隆太, 武田　知典, 宮村　崇, 笹山　浩二, “交流トラヒック推定技術の大規模サービス統合 IP 網への適用性,” 電子情報通信学会 論文誌 B, Vol.J98-B No.3 pp.255-265, Mar. 2015.

[7] 落合康二, 立田努, 藤本幸洋, 田中孝史, 吉原修, 太田憲行, 三鬼準基, “Gigabit Ethernet-PON（GE-PON）システムの開発,” NTT 技術ジャーナル，Vol.17，No.3，pp.75-80，Mar. 2005.

[8] IEEE P802.3av Task Force,“10Gb/s Ethernet Passive Optical Network,” http://www.ieee802.org/3/av/

[9] Kyota Hattori, Toru Homemoto, Masahiro Nakagawa, Naoki Kimishima, Masaru Katayama, Akira Misawa, “Optical Layer 2

Switch Network with Bufferless Optical TDM and Dynamic Bandwidth Allocation," IEICE Transactions on Electronics, Vol. E99.C No. 2 pp. 189-202, Feb. 2016.

[10] Daniel Carey, Nicola Brandonisio, Stefano Porto, Alan Naughton, Peter Ossieur, Nick Parsons, Giuseppe Talli, and Paul Townsend, "Dynamically Reconfigurable TDM-DWDM PON Ring Architecture for Efficient Rural Deployment," Proc. ECOC 2016, Sep. 2016.

[11] A. Nakao et al., "CoreLab: an emerging network testbed employing hosted virtual machine monitor," Proc. 2008 ACM CoNEXT Conference, Dec. 2008.

[12] ETSI, GS NFV001, "Network Functions Virtualisation (NFV); Use Cases," 1 V1.1.1, Oct. 2013. http://www.etsi.org/standards

[13] Rashid Mijumbi, Joan Serrat, Juan-Luis Gorricho, Niels Bouten, Filip De Turck, Raouf Boutaba, "Network Function Virtualization: State-of-the-Art and Research Challenges", Communications Surveys & Tutorials IEEE, vol. 18, pp. 236-262, Sep. 2015.

[14] Joon-Myung Kang, Hadi Bannazadeh, Hesam Rahimi, Thomas Lin, Mohammad Faraji, and Alberto Leon-Garcia, "Software-Defined Infrastructure and the Future Central Office,"Proc. IEEE International Conference on Communications Workshops (ICC) 2013, Jun. 2013.

[15] Akira Misawa, Konomi Mochizuki, Hideo Tsuchiya, Masahiro Nakagawa, Kyota Hattori, Masaru Katayama, Jun-ichi Kani, "Virtual Edge Architecture with Optical Bandwidth Resource Control, " IEICE Transactions on Communications, Vol. E99.B No. 8 pp. 1805-1812, Aug. 2016.

[16] Yufei Wang and Zheng Wang, "Explicit routing algorithms for Internet traffic engineering," Proc. INFOCOM 1999, Oct. 1999.

[17] J. Moy, "Request for Comments 2328: OSPF Version 2", IETF, Apr. 1998, https://www.ietf.org/rfc/rfc2328.txt

[18] D. Thaler and C. Hopps, “Request for Comments 2991: Multipath Issues in Unicast and Multicast Next-Hop Selection”, IETF, November 2000, https://www.ietf.org/rfc/rfc2991.txt

[19] B. Fortz and M. Thorup, “Internet trafiňĄc engineering by optimizing OSPF weights,” Proc. IEEE INFOCOM, Mar. 2000.

[20] B. Mukherjee. S. Ramamurthy, D. Banerjee. and A. Mukherjee. , “Some principles for designing a wide-area WDM optical network,” Networking, IEEE/ACM Transactions on, vol. 4, no. 5, pp.684-696, Oct. 1996.

[21] Aysegül Gençata and Biswanath Mukherjee, “Virtual-topology adaptation for WDM mesh networks under dynamic traffic,” Networking, IEEE/ACM Transactions on, vol.11, no.2, pp.236-247, Apr. 2003.

[22] K Shiomoto, E Oki, W Imajuku, S Okamoto, and N Yamanaka, “Distributed virtual network topology control mechanism in GMPLS-based multiregion networks,” IEEE Journal on Selected Areas in Comm., vol. 21, no. 8, pp. 1254-1262, Oct. 2003.

[23] F. Köksal and Cem Ersoy, “Multicasting for all-optical multifiber networks,” OSA Journal of Optical Networking, Vol. 6, No. 2, 219-238, Feb. 2007.

第2章　マルチレイヤトラヒックエンジニアリング技術

2.1　概要

ADSL (asymmetric digital subscriber line)、FTTH (fiber to the home) などアクセス回線速度の向上とブロードバンドサービスの加入者の増加により、バックボーンとなるコア網を流れるデータ系トラヒックが急増している。さらに IoT (internet of things) や 4K/8K 高精細動画配信サービス、4G/5G モバイル通信などネットワークの利用用途が多様化しており、トラヒックを予測することが非常に困難であり、予期しないトラヒック変動が発生した際の品質の安定性や頑強性がコア網に求められる。このような背景のもと、大容量トラヒックの効率的な転送と予期しないトラヒック変動に柔軟に対応可能なコア網を構築する技術の必要性がますます高まると予想される。

著者らは、こうした動向を踏まえて、多様なサービスを同時に収容できる新しいコアネットワークとして「マルチレイヤサービスネットワーク (multilayer service network, MLSN) [1, 2]」を提案している (図 2.1)。MLSN は、光のままでスイッチングを行う光クロスコネクトを代表とする光技術とパケット単位の処理を行う IP 技術を融合させた新しいネットワーク技術で、効率性と頑強性の高いネットワークを実現することを目指している。

MLSN において大容量トラヒックの効率的な転送と予期しないトラヒック変動が発生した際の転送品質およびネットワークの安定性向上を実現するマルチレイヤトラヒックエンジニアリング技術として、1) コアルータでの仮想バッファ方式による帯域制御技術 [3–5]、および 2) VNT (virtual network topology) を動的に再構成することで網リソース利用を最適化する動的仮想トポロジ制御技術を提案している [6–9]。

コアルータでの帯域制御技術では、従来多数のフローを収容するコアルータでは、ハードウエア実装の制約からフロー単位の帯域制御を適用

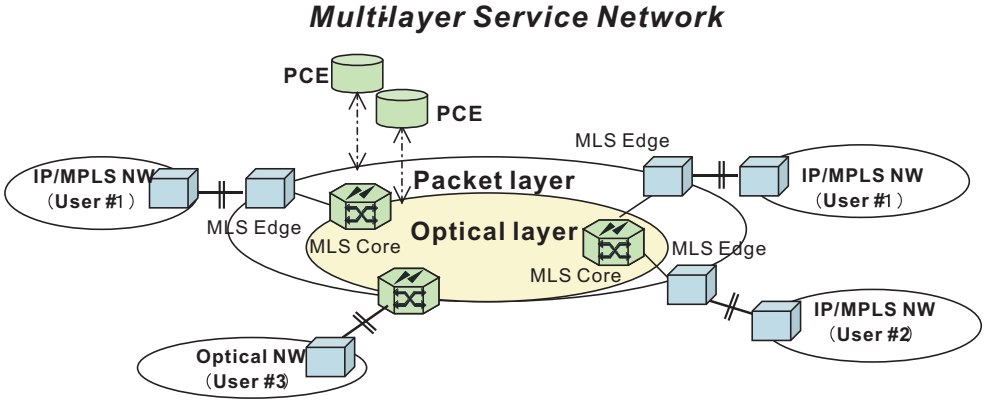


図 2.1: マルチレイヤサービスネットワークアーキテクチャ

することが困難であり、悪意のあるユーザのフローが網内に存在すると他のユーザのフローに帯域が割り当てられず、品質が低下するという課題がある。仮想バッファ方式によりコアルータでの帯域制御を実現する技術を提案する。

次に動的仮想トポロジ制御技術における VNT とは、エッジルータ間に設定された Optical LSP (label switched path) の集合であり、Optical LSP 上を IP トラヒックが転送される。Optical LSP とは GMPLS (generalized multi-protocol label switching) [10] で制御される光レイヤの波長パスのことであり、中継段のノードでは Optical LSP の波長に基づいて方路が決定される。最適な VNT は、エッジルータ間の交流トラヒックに依存するため、交流トラヒックの変動に応じて適切に VNT を再構成することで、MLSN 内の網リソースの利用効率を向上させることができる。例えば、これまでに著者らが提案したアルゴリズム [6] を適用することで、固定的に VNT を構築する場合と比較して、最大 40%程度、ネットワークコストを削減可能なことを確認している。最適な VNT の計算や VNT 再構成のためのアルゴリズムはこれまでに数多く提案されている。そこで、本研究では GMPLS ベースの MLSN のための動的仮想トポロジ制御を実現するシステムの設計と実装法について検討する。さらに動的仮想トポロジ制御技術の実現性を確認するために、PCE (path computation element) アーキテクチャに基づきプロトタイプシステムの開発を行った。プロトタイプシステムの実証実験の結果についても報告する。

2.2 仮想バッファ方式による帯域制御技術

2.2.1 研究の背景

インターネット接続を提供するネットワークでは、ネットワーク資源はベストエフォートサービスのもとで多数のユーザのフローで共有されている。悪意のあるユーザがネットワークに存在すると、そのユーザが帯域を占有してしまうことが可能である。ここでユーザとフローの関係について説明する。一般に各ユーザは 1 フローまたは複数のフローを用いて通信する。ネットワークにおいて悪意のあるユーザから通常ユーザを保護することは重要である。解決策の 1 つとして、ネットワーク資源を共有する全フローに公平に帯域を配分することで悪意のあるユーザの隔離 (isolation) を実現する方法がある。

公平な帯域割当を実現する方式としては大きく 2 種類ある。1 つはスケジュールベース方式で、もう一方は選択的パケット廃棄方式である。スケジュールベース方式 (例えば、WFQ (weighted fair queueing) [12] とその派生方式 [13–16]) は公平な帯域割当と QoS 保証に関して理想的な機構であることが知られている。しかし、このアプローチはフロー単位で独立した待ち行列 (queue) と状態を保持する必要がある。特に WFQ の計算複雑性は $O(\log(n))$ である (n は待ち行列内のフロー数)。フロー数に対するスケール性に課題があるため、多数のフローを収容するコアルータに適用するためにはハードウエア実装が非常に困難である。

選択的パケット廃棄方式としては Stoica らによる CSFQ (core-stateless fair queueing) [17] がある。CSFQ はコアルータにおいてフロー単位の状態を用いることなく、ほぼ理想的な公平性を実現することが可能である。コアルータでのフロー単位の状態保持を避けるために、CSFQ では分散アルゴリズムを採用している。エッジルータではフロー単位で到着レートの測定を行い、ラベルとしてパケットに測定したレート情報を付与し、コアルータではパケットに付与されたラベルのみで QoS 制御をするため、コアルータにおいてフロー単位の状態を保持することなく QoS 制御を実現可能である。CSFQ の課題は、エッジルータの機構が複雑であることと、ネットワーク内のすべてのルータが CSFQ を実装する必要があるため、既に運用されているネットワークに導入することは非常に困難であることである。さらにルータ単位でフローの重み (weight) を変更することができず、柔軟な帯域割当の実現が困難である。

近年、Cao らにより RFQ (rainbow fair queueing) [18] が提案されてい

る。RFQ は CSFQ とほぼ同等の性能で公平な帯域割当を実現可能な方式である。RFQ でも CSFQ と同様にエッジルータにおいて、フロー単位で到着レートを観測して、フローにラベルを付与する。コアルータでは待ち行列長とラベルの値のみを用いて到着パケットを選択的に廃棄する。CSFQ と比べてコアルータの実装は簡易化されるものの、エッジルータの実装が複雑であるという問題は解決されていない。さらに CSFQ と RFQ ともに IP パケットのヘッダの拡張が必要であり、導入するためにはインターネット全体に多大な影響を与えるため、実際のネットワークに適用することは非常に困難である。

本研究では、V-WFQ (virtual weighted fair queueing) と呼ばれる帯域制御技術を提案する [3–5]。V-WFQ は超高速パケットネットワークにおいて、簡易なハードウエア実装でフロー間の帯域の公平な割当と最低帯域保証を実現する。帯域割当の基本プロセスは、各ルータにおいてパケットの到着レートを測定し、推定された帯域の公平なシェアと比較してパケットの選択廃棄を行う。CSFQ や WFQ と異なり、IP パケットヘッダの拡張が不要であるため、既に運用されているコア網にも容易に導入することが可能である。

2.2.2 提案方式: V-WFQ ルータ

V-WFQ ルータのバッファアーキテクチャを図 2.2 に示す。提案方式は、(1) ネットワーク内の各ルータで入力レートを推定する、(2) 各フローの割当帯域を計算する、(3) FIFO (First In, First Out) バッファでの選択廃棄を適用する、という手順でパケット処理を実施する。V-WFQ では、フロー単位の待ち行列を用いることなく、FIFO バッファベースの仮想バッファ方式で、WFQ とほぼ同等の性能を実現する。

フロー単位でのバッファ管理とスケジューリングを避けるため、パケット到着時に FIFO バッファでの選択的パケット廃棄を利用する。提案方式は帯域割当の公平性を向上させるとともに超高速ネットワークのコアルータにおいても効率的なハードウエア実装を実現する。

V-WFQ ルータでのパケット処理フローを図 2.3 に示す。V-WFQ ルータでは、フロー単位で到着レートを測定する。パケット到着時に、V-WFQ ルータは出力リンクの混雑度に基づきフローの公平な割当帯域を算出する。この割当帯域と推定された到着レートを比較し、V-WFQ ルータはパケットを廃棄するかどうかを判定する。到着レートが割当帯域を超過し

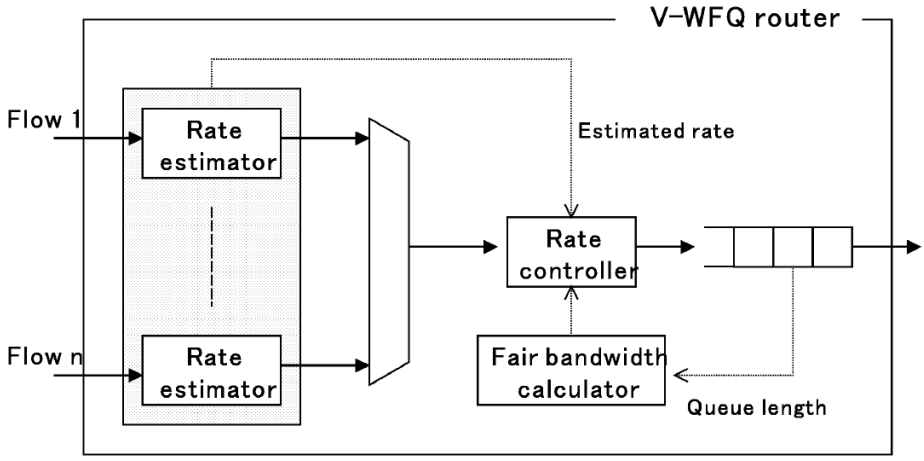


図 2.2: V-WFQ ルータのアーキテクチャ

ている場合、到着パケットに対して選択的パケット廃棄を実施する。パケットが廃棄されない場合は、出力リンクのバッファにパケットは書き込まれる。

2.2.3 ハードウエア実装

ここでは、ハードウエア実装コストの観点で V-WFQ と WFQ を比較する。VLSI では、ハードウエア実装のコストは必要となるチップサイズに大きく依存し、チップサイズを決定する要因としてはメモリ量が支配的である [20]。そこで、各方式のメモリ量を比較した。図 2.4 にメモリ量の比較結果を示す。V-WFQ で必要となるメモリ量は WFQ と比較して、圧倒的に小さいことが分かる。例えば、4000 フローの条件では、WFQ は 1560 Kbyte 必要となるが、V-WFQ ではわずか 11 Kbyte しか必要としない。したがって、V-WFQ は WFQ と比較してはるかに効率的なハードウエアで実現可能である。

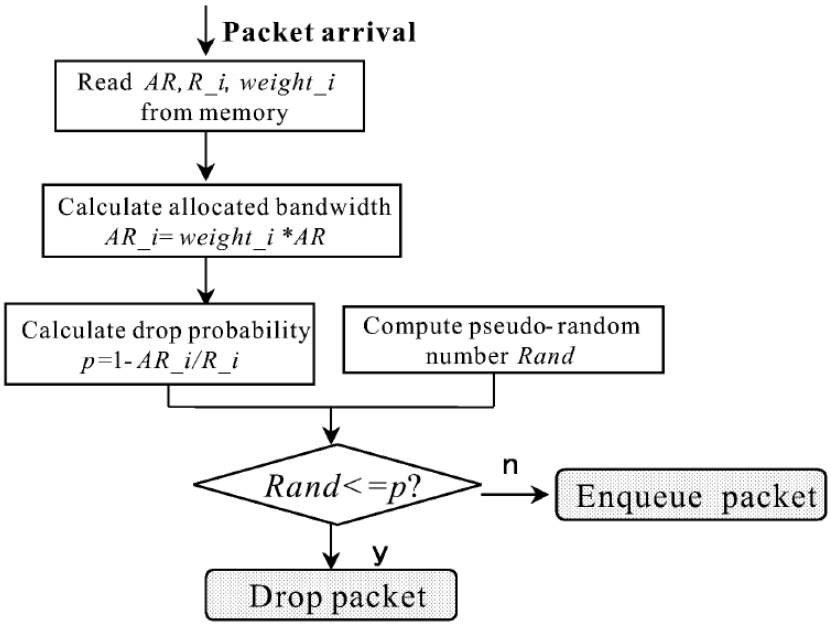


図 2.3: 提案方式のパケット処理フロー

2.2.4 V-WFQ ルータの性能評価

評価条件

網内の単一リンクで輻輳が発生した際の V-WFQ の性能を調査するために、図 2.5 に示すネットワークの条件で評価を実施した。2 ルータを接続するリンクで輻輳が発生していると仮定した。端末は 10 Mbps リンクにより各ルータと接続されている。2 ルータ間のリンクは m 本の TCP フローと n 本の UDP フローで共有されている。性能評価では V-WFQ と RED (random early discard) [21]、FRED (flow random early discard) [15]、DRR (deficit round robin) [22] および DropTail の性能を比較した。

RED は平均待ち行列長を観測し、平均待ち行列長がある閾値を超過すると到着パケットを確率的に廃棄する。バッファあふれが発生する前にパケットの廃棄を開始することで、RED は各フローに初期輻輳の発生を通知し、輻輳崩壊を回避している。しかし、RED ではフロー間の公平性を担保することができない。FRED はフロー単位の状態を保持することで、RED と比較して、帯域割当の公平性を向上させることができる。FRED では過去に多くのパケットが廃棄されたフローまたは待ち行列長が平均値

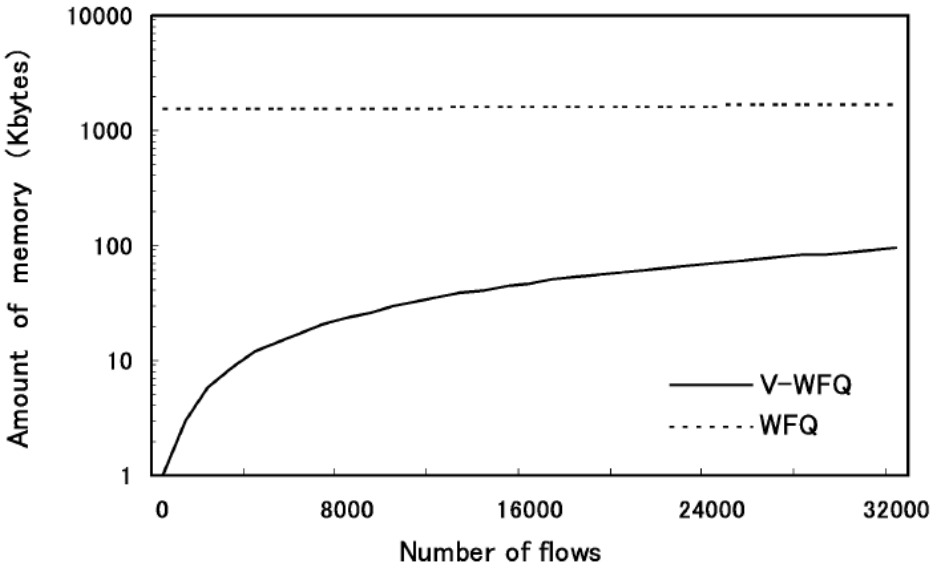


図 2.4: V-WFQ と WFQ のメモリ量の比較

を超過しているフローのパケットを確率的に廃棄する。DRR は、計算複雑度が $O(1)$ の WFQ の実現方式である。DRR 以外の方式は単純な FIFO バッファベースの方式であるが、DRR については複雑なフロー単位の待ち行列を必要とする方式である。したがって、DRR は他の方式と比較してより高い公平性を実現することができ、本評価での公平性のベンチマークとしての位置づけである。ここで、DRR については、V-WFQ とは異なり超高速なインターフェイスを持つコアルータでは実装が困難である。

全てのシミュレーションはオープンソースのネットワークシミュレータである ns-2 [23] を用いた。DRR、RED、および FRED のコードは ns-2 のパッケージのものを用いた。特に記載がない限り、シミュレーションでは以下の仮定とパラメータを用いた。

- 全ての TCP は同一時刻にパケットの送信を開始し、シミュレーション時間中は通信を継続している。TCP フローについては MSS (maximum segment size) を 1000 byte に設定し、TCP バージョンは Reno を用いた。
- TCP ホストは対向する端末に対してサイズ無限大のファイルを FTP (file transfer protocol) で送信した。

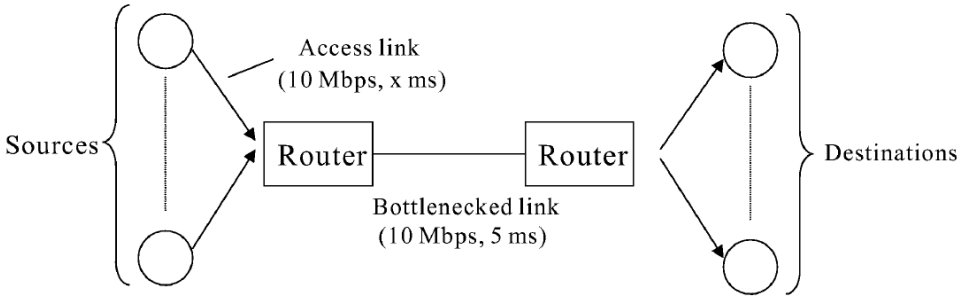


図 2.5: 性能評価トポロジ

- UDP ホストは CBR (constant bit rate) で k Kbps の速度でパケットを送信した。ここで k は可変であり、全ての UDP ホストは同時刻に通信を開始した。UDP フローのパケットサイズは 500 byte に設定した。
- 出力バッファのサイズは 128 Kbyte である。
- 全フローは同じ weight 値である。

QoS 制御の有効性: 単一の悪意のあるフロー

この実験では、単一の悪意のあるフローが存在する条件の下で、通常のフローに対して公平に帯域を割当可能か調査した。15 本の TCP フローと 1 本の UDP フローが 10 Mbps のボトルネックリンクを共有しており、UDP フローは 30 秒のシミュレーション中は常時 10 Mbps のレートでパケットを送信した。図 2.6 にスループットを示す。ここでスループットは理想状態では 625 Kbps となる。表 2.1 に各方式の帯域利用率と公平性の比較結果を示す。ここで公平性の指標としては ATM Forum で規定されている Fairness Index [24] を用いた。これらの結果から RED と DropTail については TCP フローに対して公平な帯域割当を実現できていないことが分かる。一方で DRR と V-WFQ については悪意のあるユーザの UDP フローの帯域を制限しつつ、各 TCP フローにほぼ理想的な公平さで帯域割当を実現できていることが分かる。

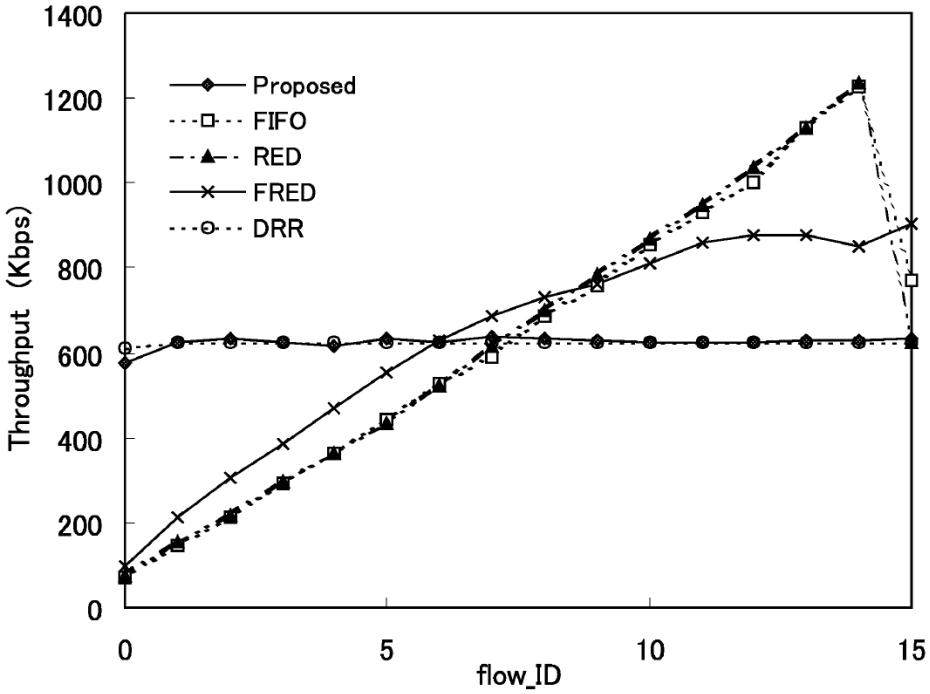


図 2.6: 性能評価結果: QoS 制御の有効性

制御の安定性

さらに制御の安定性を評価するために V-WFQ と DRR の待ち行列長の時間変化を調査した。結果を図 2.7 に示す。ここで DRR の待ち行列長はフロー単位の個別待ち行列の総和である。DRR については高い待ち行列長で安定する傾向がある一方で、V-WFQ の待ち行列長は大きく変動していることが分かる。V-WFQ は待ち行列長から各フローの公平な割当帯域を推定しているため、V-WFQ ルータの帯域制御は待ち行列長が長くならないと動作しないためである。ただし、平均待ち行列長については V-WFQ は DRR よりはるかに短い。これは、V-WFQ は RED と同様にバッファあふれが発生する前にパケット廃棄を開始し、これが各フローに対して初期輻輳の通知となっているためである。このため、DRR と比較すると各フローの遅延時間は大幅に短縮される。

表 2.1: 各方式の帯域利用率と公平性

	帯域利用率	公平性
V-WFQ	0.995	0.926
DRR	1.00	0.973
FRED	1.00	0.735
RED	1.00	0.0778
DropTail	1.00	0.0778

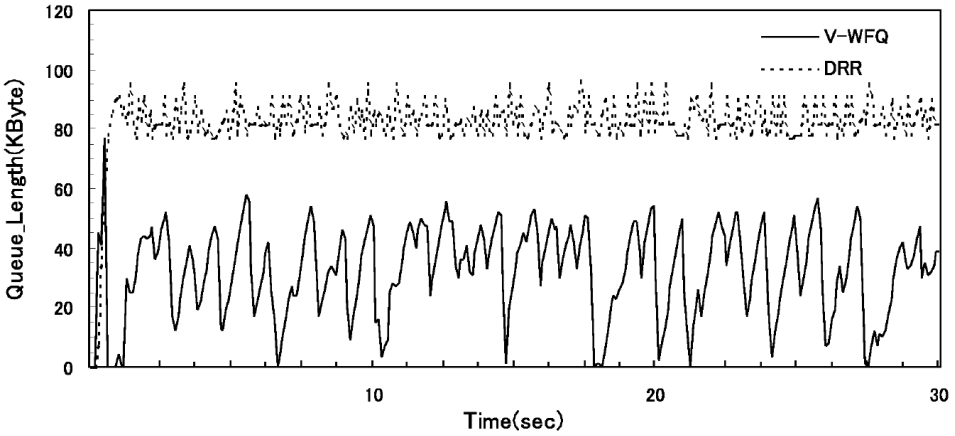


図 2.7: 性能評価結果: 制御の安定性

2.3 動的仮想トポロジ制御技術

次に本節では、動的仮想トポロジ制御技術の概要と関連研究について説明するとともに、IETF (Internet engineering task force) において標準化が進められている PCE について概説する。その上で実現方式を提案するとともにプロトタイプシステムによる性能評価により提案方式の実現性・有効性を評価する。

2.3.1 動的仮想トポロジ制御技術とは

動的仮想トポロジ制御を実現するためのキー技術としては、あるトラヒック行列に対して、最適な VNT を発見する経路計算アルゴリズムが挙

げられる。基本的に、動的仮想トポロジ制御では、混雑しているルート上に 1 ホップの Optical LSP を追加し、利用率の低い Optical LSP を削除することで、余剰な網資源の配備を最小化する。

動的仮想トポロジ制御のためのアルゴリズムは、大きく Partial reconfiguration [27, 28] と Full reconfiguration [6, 7, 26] の 2 つの計算方式に分類することができる。Partial reconfiguration では、現状の LSP 構成の情報を考慮して、変更対象となる LSP 数を一定以下とする条件で輻輳の緩和を図る。そのため、ネットワーク制御負荷の増大は抑えることができるものの、必ずしも網リソースを最適化することができない。一方、Full reconfiguration は、現状の LSP 構成は考慮せず、新たなトポロジを設計する。そのため変更対象となる LSP 数が増大するという問題はあるものの、Partial reconfiguration に比べて、トラヒック変動に対する耐性が大きいという利点がある。

Partial reconfiguration のアルゴリズムとして、Shiomoto *et al.* [28] が時間的に変動するトラヒック需要に対して分散制御により動的仮想トポロジ制御を実現する方式を提案している。また、Full reconfiguration としては、Mukherjee *et al.* [26] がアルゴリズムを最適化問題として定式化するとともに、Simulated annealing 法をベースとして近似解を求める発見的アルゴリズムを提案した。さらに [26] をベースとして、著者ら [6] はファイバや管路などの物理レイヤの故障に対してもルータ間の接続性を確保可能な Survivable 動的仮想トポロジ制御アルゴリズムを提案した。[6] では、物理レイヤのリソースの故障に対しても、パケットレイヤの迂回処理で故障回復可能な VNT を提供する。本論文では [6] のアルゴリズムをベースとして、PCE アーキテクチャに基づいた実装法の検討を行なう。

動的仮想トポロジ制御の分類

ここでは動的仮想トポロジ制御を実施する契機について整理する。動的仮想トポロジ制御の契機としては、

a) 一定の時間周期 (周期トリガー)、

b) 輻輳の検出 (輻輳トリガー)、

c) 故障の発生 (故障トリガー)

が考えられる。周期トリガーの場合、あらかじめ指定された時間間隔でトラヒック行列の変化を評価し、一定以上の変化があった場合に動的仮想ト

ポロジ制御を実施し、リソースを最適化する。次に輻輳トリガーの場合は、網内のリンク利用率の観測を常時行い、リンク利用率が一定以上となった場合に動的仮想トポロジ制御を実施して、輻輳の緩和を行う。輻輳トリガーについては、動的仮想トポロジ制御機能がサーバとして切り出されている場合には常時、リンク利用率を観測することが困難なため、周期トリガーと組み合わせて輻輳を検出する実装も考えられる。最後に故障トリガーでの動的仮想トポロジ制御については、a) 故障後のトラヒックパターンの変化により発生した輻輳の緩和、b) 故障発生時に Disconnected となったルータが発生した際にルータ間の Optical LSP の接続構成の変更を伴う故障回復を行う場合への適用が考えられる。動的仮想トポロジ制御により故障回復を行うことで、多重故障からの回復、予備リソースの削減などのメリットがある。本論文ではサーバ型 PCE による周期トリガーに基づく動的仮想トポロジ制御機能の実現を検討する。

網構築コストの削減効果

図.2.8 に今回実装した周期トリガーによる動的仮想トポロジ制御アルゴリズム [6] によるコスト削減効果の評価結果を示す。交流トラヒックの周期は 24 時間で、2 時間毎に動的仮想トポロジ制御を行った。ルータ間の平均トラヒック量を変化させて、MPLS-TE とマルチレイヤ TE の網構築コストを比較した。ここで縦軸の網構築コストは、固定トポロジ上で最小ホップルーチングを行った場合の値を 1 とした場合の相対値である。また、MPLS-TE とは VNT を動的に再構成しない固定トポロジ上において、Packet LSP の再最適化のみを行う TE 方式である。なお、評価条件の詳細は [7] を参照されたい。

動的仮想トポロジ制御を導入することにより、効率的にトラヒック変動に対応することができるため、約 20-30%網構築コストを削減できることが分かる。また、MPLS-TE と比較しても常時 10%以上の網構築コスト削減が実現されており、光レイヤを動的に再構成することにより効率的にトラヒック変動に対応可能なことを示している。

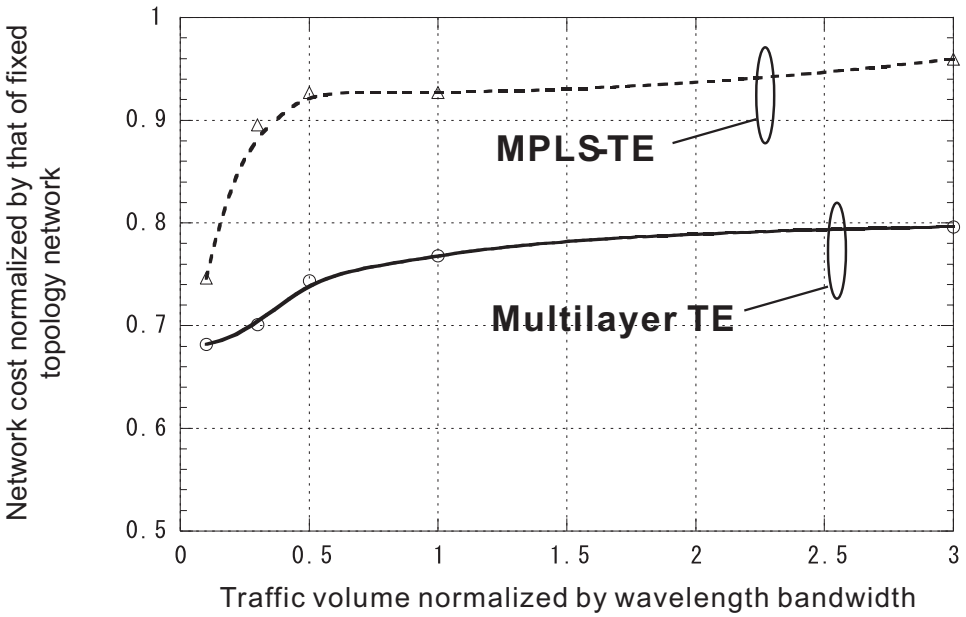


図 2.8: 動的仮想トポロジ制御による網構築コスト削減効果

2.3.2 PCE アーキテクチャ

PCE とは

制約条件付のパス経路計算は、MPLS/GMPLS ネットワークにおけるトラヒックエンジニアリングの主要な機能要素である。従来、パス計算機能はノードの一部の機能として実装されてきた。しかし、ネットワーク内でパスの再配置計算をする場合や、複数のドメイン (Area, AS, Layer) を考慮して高度なトラヒックエンジニアリングを行う場合、パス計算は複雑化する。そこで、効率的に上記機能を実現するためにパス計算に特化した機能ブロックをノードとは分離して、ネットワーク内におけるエレメント、PCE として位置付ける必要性が生じてきた。パス計算を要求するノードを PCC (path computation client) という。

IETF では PCE の必要性が議論され、2005 年 1 月に PCE の関連プロトコルを標準化するために、Routing Area に PCE Working Group (WG) が発足された。PCE WG では PCE アーキテクチャ[29] に関して基本的な要求条件と基本的なプロトコルの議論がスタートした。主に PCC からの要求に応じて PCE は制約付きのパス計算を実施し、計算結果を PCC 側

に返答する、という基本的な動作が規定されている。

PCE による動的仮想トポロジ制御機能

GMPLS ベースの MLSN において動的仮想トポロジ制御機能を実現するための PCE アーキテクチャの適用例を示す。図 2.9 にネットワーク構成を示す。PCE 自体はノード内に実装することも可能であるが、本論文ではノードとして独立に存在するサーバとして実現することを前提とする。

動的仮想トポロジ制御 を実現するためには、IETF で議論されているパス計算機能のみを提供する PCE アーキテクチャに加えて、さらに PCE に下記のパス制御 (LSP の設定・解放など) 機能を実装する必要がある。

- 網内の LSP 情報の取得と保持
- 動的仮想トポロジ制御のトリガー生成
- トラヒック交流情報の取得
- 動的仮想トポロジ制御アルゴリズムの実装
- PCE トリガーのパス制御

本論文で提案する PCE と IETF のおいて標準化中の PCE の主な差分点としては、PCE 内で網内の LSP 状態を管理するだけではなく、PCE 側がトリガーを生成してパスの追加・削除を行うパス制御機能を新たに PCE に具備している点があげられる。上記の要求条件については、Oki *et al.* [30] において標準プロトコルへの反映が進められている。

2.3.3 動的仮想トポロジ制御の実現方式

ネットワーク構成

次に、本検討で前提となる MLSN にもとづく GMPLS 網について説明する。図.2.1 に示すように GMPLS 網は、パケットレイヤ、光レイヤ、および物理レイヤの 3 レイヤで構成されている。パケットレイヤはラベルスイッチングが可能なルータで構成され、トラヒックの転送に先立って Packet LSP を設定する。光レイヤは OXC (optical cross-connect) システムと DWDM (dense wavelength division multiplexing) システムで構成さ

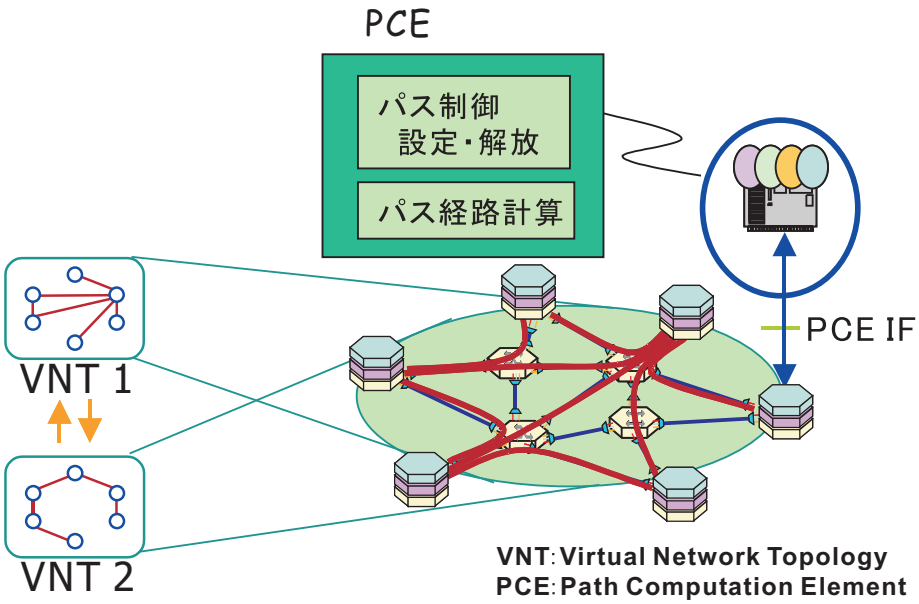


図 2.9: PCE による動的仮想トポロジ制御制御

れ、OXC システムは Optical LSP のスイッチングを行う。DWDM は、長距離区間の Optical LSP の伝送を行い、基本的に OXC 間に配備される。光レイヤは、上位レイヤに対して、複数の Optical LSP から成る VNT を提供することで、パケットレイヤのトラヒックを転送する。Optical LSP は基本的にパケットレイヤのルータでのみ終端される。マルチレイヤ GMPLS 網では、パケットと光の 2 レイヤを基本的に制御対象とする。

物理レイヤはファイバ・管路レベルのネットワークで、マルチレイヤ GMPLS 網では SRLG として物理レイヤのトポロジを扱うことで、物理レイヤの故障に対しても回復可能なプロテクションパスの設計が利用可能となる。各レイヤの LSP の経路計算及び LSP 設定・削除のトリガーの生成は、PCE で一元的に行う。PCE は OSPF-TE [31] 等のルーティングプロトコルで経路計算に必要なトポロジ情報等を収集し、PCEP [29] 等の PCE-ノード間プロトコルを用いて、経路計算結果をノードへと通知する。経路計算結果を受信した各ノードは GMPLS シグナリングを用いて、LSP の設定を行う。

動的仮想トポロジ制御の実現方式

GMPLS 網で動的仮想トポロジ制御を実現するためには、最適な VNT 計算アルゴリズムに加えて、実網でのトラヒック行列取得方法、現状の網構成からサービスへの影響を最小にした VNT 移行方法など動的仮想トポロジ制御方式を明確化する必要がある。

図. 2.10 に動的仮想トポロジ制御の開始から完了までの処理の流れを示す。大きく、A) 動的仮想トポロジ制御を行なうために必要な情報を定期的に収集する段階である定常状態、B) PCE 内でネットワークから収集した情報を元にアルゴリズムを計算するアルゴリズム計算フェーズ、最後に C) 実際に PCE から PCC にメッセージを送信して、LSP の設定・削除等を行なうパス制御フェーズに分けることができる。上記の処理はトラヒックエンジニアリングのための処理であり、ノードまたは外付けのサーバに機能追加する必要がある。ここでトラヒックエンジニアリングの要求条件は網運用者のポリシーに大きく依存するため、ノードとは独立に実現することで、ノードの実装に依存しない形でネットワークオペレーションの高度化を実現することができると考えられる。そこで本論文では、トラヒックエンジニアリングのための機能をサーバ型 PCE として実現するアーキテクチャを採用する。さらに、本論文でターゲットにしている動的仮想トポロジ制御を実現するためには複数 LSP の追加・削除の処理が必要となるが、サーバによる一元的な制御により、リソース競合を避けつつ安定的に動的仮想トポロジ制御を実現できると考えられる。以下、トラヒックエンジニアリングの各フェーズの実現方式について検討する。

まず、PCE は定期的に GMPLS 網からトラヒック行列の取得を行うとともに、タイマーを保持して動的仮想トポロジ制御開始の判定を行なう必要がある。ここでトラヒック行列とは、マルチレイヤ GMPLS 網のエッジに位置するルータ間のトラヒック需要を行列形式で表示したものであり、ルータ数が N のときに N^2 の要素で構成される。トラヒック行列取得方式としてはルータ間にメッシュに Packet LSP を設定して、直接的にトラヒック行列を取得する方式を用いた。

次に、動的仮想トポロジ制御を開始するトリガーとしては定期的に動的仮想トポロジ制御を実施する周期トリガーを採用する。今回実装を検討するマルチレイヤエンジニアリングの目的は網資源の効率化であるが、IP バックボーンのトラヒック変動には周期性があることが知られている [33]。そのため、周期トリガーにより一定時間間隔で VNT を再構成することで、

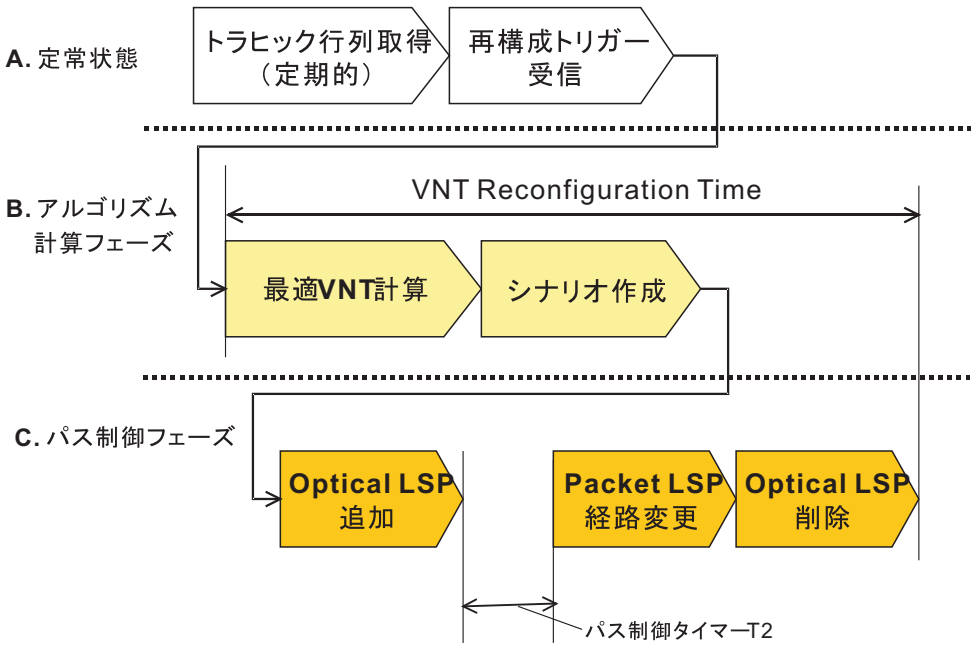


図 2.10: 動的仮想トポロジ制御の処理概要

適切に網リソースの効率的な利用が実現可能であると考えられる。

アルゴリズム計算フェーズでは、PCE は現状のトポロジ構成と交流トラヒック情報を用いて、最適な VNT を計算するとともに、計算前後の VNT の差分を抽出し、トポロジの移行手順を作成する。Full reconfiguration による VNT 計算方式では、a) 残余帯域を含むトポロジ情報の収集、b) エッジルータ間の交流トラヒック情報であるトラヒック行列の収集、が必要となる。さらに、現状の LSP 構成から計算された VNT へと移行するためには、c) 複数の LSP の設定・削除・経路変更等のパス制御、を行なう必要がある。また、再構成後の VNT への移行を実現するためには、TE リンクの情報に加えて、再構成開始時点に設定されている LSP の設定情報が必要となる。VNT の移行方法としては、Packet LSP 上を転送されるトラヒックの転送品質への影響を最小にする必要がある。VNT 移行中のサービス中断を最小にするため、ユーザトラヒックを転送する Packet LSP を収容している Optical LSP を削除する場合に、削除に先立って、Packet LSP の迂回処理を行なう。迂回先に十分な帯域がない場合は必要に応じて帯域の増設等を行い、make-before-break によりユーザトラヒックのパケット損失を最小にして、Packet LSP を迂回させる。収容してい

る Packet LSP が全て迂回されてから Optical LSP を削除する。

最後に、パス制御するトリガーは一元的に PCE 側で生成する。そのため、PCE はプロトコルによりパス制御の指示を PCC 側に伝達する必要がある。今回の動的仮想トポロジ制御を実現するために必要なプロトコルへの要求条件としては、

- Optical LSP と Packet LSP を制御対象とできること
- LSP の追加・削除の指示ができること
- 'make-before-break' による LSP の経路変更の指示が可能なこと
- PCE からの要求が PCC 側で実行されたか確認可能なこと

と整理することができる。上記の機能により、安定的に動的仮想トポロジ制御を実現可能となる。

2.3.4 動的仮想トポロジ制御機能の実装

ここでは、実現方式の実装法について検討する。まずトポロジ情報の収集については、GMPLS 拡張の OSPF-TE を用いて収集する。PCE は少なくとも一つの GMPLS ルータと OSPF の隣接関係を確立し、Opaque LSA (link-state advertisement) の情報を受信することで、残余帯域を含むトラヒックエンジニアリングのためのトポロジ情報データベースを作成する。

次にトラヒック行列の収集法としては、エッジルータ間にメッシュで Packet LSP を設定し、各エッジルータにおいて Packet LSP 単位の転送バイト数のカウントを行なう。PCE は定期的に SNMP により各エッジルータにポーリングすることで直接的にトラヒック行列を取得する。そのため、Packet LSP 数が増加した際の、定常状態における PCE サーバ側の処理負荷を評価する必要がある。

VNT 移行手順であるが、まず現状の LSP 構成と計算により得られた LSP 構成の差分を抽出する必要がある。現状の LSP 構成については、独自 IF を規定してルータの LSP データベースから直接収集する方式を採用した。VNT の計算が完了すると、計算により得られた LSP 構成と現状の PCE サーバ内の LSP データベースの情報を比較して、差分を抽出するとともに、LSP の追加・削除・経路変更の順番である移行シナリオを作成

する。Hitless transition を実現するために、まず現状の LSP データベースに含まれていない Optical LSP を新規に追加し、次に経路変更が必要な Packet LSP について、順次 'make-before-break' により経路変更を行なう。全ての Packet LSP の経路変更が完了した時点で不要になった Optical LSP を削除する。図 2.11 に以上の処理概要を示す。具体的な GMPLS 網上での LSP 変更手順について、LSP の設定/削除/経路変更を行なうため、PCE は設定/削除などを要求する処理の情報と対象となる LSP を識別可能な情報 (Tunnel ID/LSP ID/端点となるルータのアドレス等の LSP) を含むメッセージを PCC(ルータ) に送信する。ここで PCE-PCC プロトコルについては、プロトタイプ作成時点では標準化で採用予定の PCE-PCC のベースプロトコル自体が未確定であったため、文献 [29,30] で規定されているメッセージ種類と情報要素を参考として、CORBA ベースで独自プロトコルを規定し、PCE に実装した。LSP 設定/削除要求メッセージを受信した PCC は GMPLS シグナリングに従って、LSP の設定/削除等のパス制御を実行する。今回の実装では、リソース競合による LSP 設定失敗等の問題発生を防ぐために、PCE は LSP を 1 本ずつシーケンシャルに設定・削除等の制御を行う。連続する 2 本の LSP 設定時間間隔はタイマー値により制御し、基本的には現在設定中の LSP の制御が完了後、次の LSP の制御を行う。逐次的な LSP 制御方式を採用しているため、制御対象となる LSP が増大した際の動的仮想トポロジ制御時間の増大が懸念されるため、実験を通じて評価を行う。

動的仮想トポロジ制御を実現する際の主要な課題の 1 つとして、ネットワークの安定性を維持しつつ再構成に要する時間を極小化することが挙げられる。通常の GMPLS では、Optical LSP を追加/削除する度に、該当 LSP に関わる情報がルーティングプロトコルにより網内に配布される。そのため、動的仮想トポロジ制御中は常時プロトコルメッセージが交換される状態であり、ネットワークとしては安定的な状態ではないため、その時間を極小化する必要がある。したがって、LSP の設定/削除の間隔はプロトコルオーバーヘッドを考慮して、注意深く決定する必要がある。安定的に動的仮想トポロジ制御を実行するために、2 つのパス制御タイマー T_1 と T_2 を採用した。T_1 と T_2 はそれぞれ、i) 同一レイヤの連続する 2 つの LSP の設定/削除の時間間隔、ii) 新規に追加した Optical LSP 上に Packet LSP を追加する時間間隔、を指定する。Packet LSP を新規に追加された Optical LSP 上に設定するためには、該当 Optical LSP の情報がルーティングプロトコルで各ルータに配布されている必要がある。

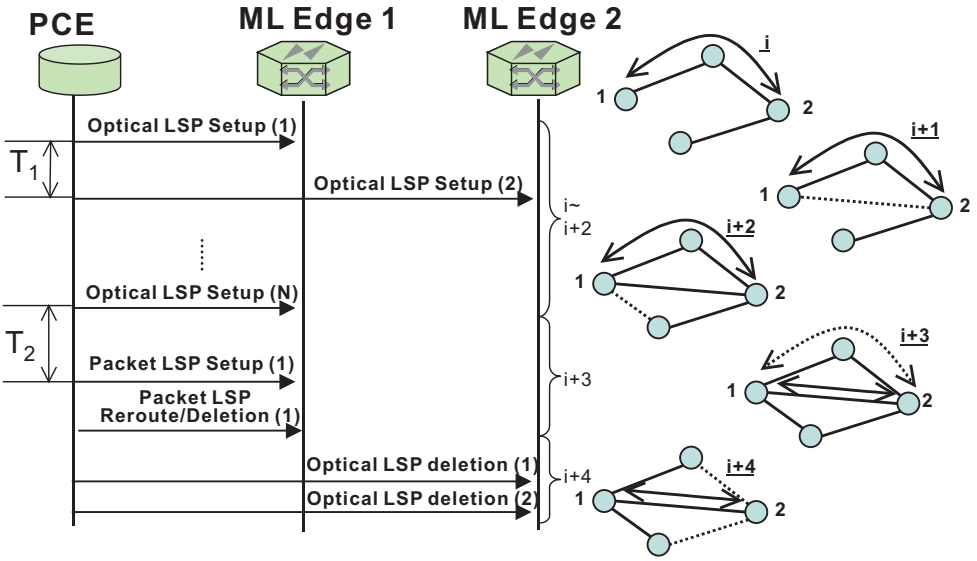


図 2.11: PCE-PCC 間のメッセージシーケンス例

したがって、T_2 は基本的に OSPF 収束時間に設定されている必要がある。

2.3.5 プロトタイプシステムによる性能評価

評価の目的と条件

PCE によるトラヒックエンジニアリング機能の実現性とスケール性を定量的に評価するために、プロトタイプシステムを用い、8 ノードから 16 ノードのラダー型トポロジのネットワークによる実験を行なった。図 2.12 に評価に用いたトポロジと初期状態での Optical LSP の構成の一例を示す。図中の E はエッジルータ、X は OXC を表す。また、初期状態の Packet LSP については最短 Hop ルーチングにもとづいて VNT 上に収容されている。ネットワークは PCE と Optical LSP のスイッチングを行なう OXC と Optical LSP と Packet LSP の終端を行なうルータで構成されている。

エッジルータ間の交流トラヒックについては、周期変動を示すトラヒックモデルにもとづいて生成させた。トラヒックの周期は 500 s、動的仮想トポロジ制御の周期はトラヒックの周期より短い 180 s で設定した。な

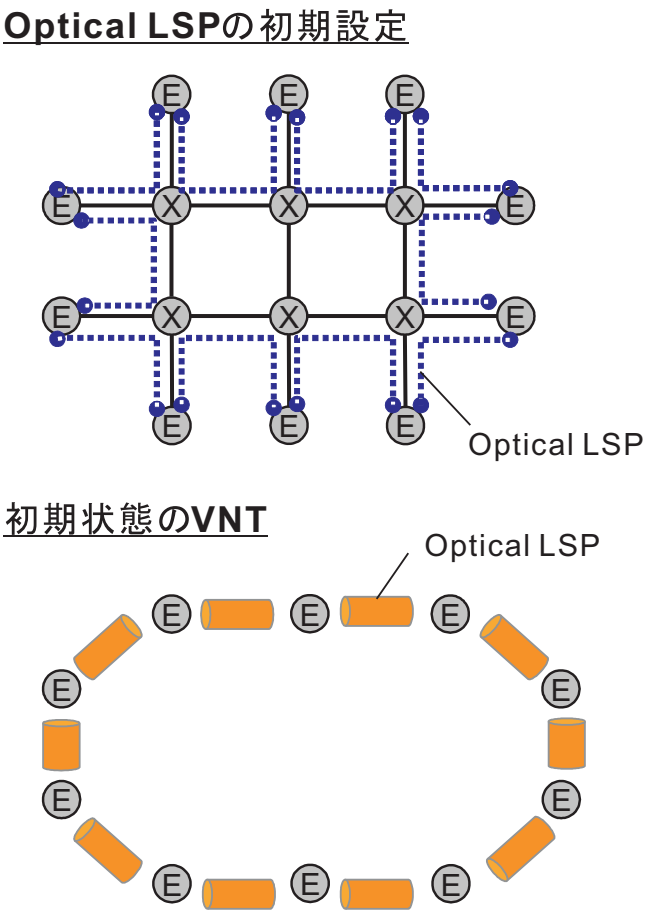


図 2.12: ネットワークトポロジ

お、トラヒックモデルの詳細については、文献 [6,7] を参照されたい。次に実験で用いた PCE のスペックは以下の通りである。

- CPU: Pentium III 1.0 GHz
- Main memory: 1 GByte
- OS: RedHat 9.0

制御プレーンは 1 サブネットで実現し、PCE および各ノードは 10 Mbps の Ethernet を用いてハブに接続されている。OSPF については PCE が DR (designated router) となる設定で試験を実施した。また、初期状態の LSP 構成は各エッジルータ間に 1 本ずつフルメッシュで Packet LSP を設定し、Optical LSP はエッジルータ間がリング接続となるように設定した。

さらに本評価の目的は以下の 3 点を確認することである。

1) サーバ型 PCE による一元的な制御

2) GMPLS 制御プレーンへの影響

3) Full reconfiguration のスケール性

まず、1 点目についてはサーバ型 PCE に動的仮想トポロジ制御に関わる機能を集中配備し、一元的にパス制御の指示を行う。定常状態においてはトラヒック行列取得のための Packet LSP のトラヒック量取得のための処理、さらに動的仮想トポロジ制御中においては、アルゴリズムの計算およびパス制御のためのメッセージ生成などによる負荷により、CPU 使用率やメモリ消費量が増大によるサーバの安定性への影響を評価する必要がある。次に 2 点目の GMPLS 制御プレーンでは、動的仮想トポロジ制御時の Optical LSP の追加・削除に伴い、OSPF-TE の広告が発生し、GMPLS ノードのプロセッサ負荷が増大し、ルーチングの収束時間やシグナリングの処理時間への影響を評価する必要がある。最後に Full reconfiguration では網規模が拡大するにつれて、変更対象となる LSP 数が増大する。特に今回の実装法では PCE サーバが逐次的かつ一元的に網内のパス制御のトリガーを生成するため、網規模の拡大につれて、制御対象となる LSP 数が増加するため、トータルの動的仮想トポロジ制御に要する時間が現実的な時間内で完了するかを評価する。

PCE サーバの安定性

まず、VNT を動的に再構成する際の、制御プレーンと PCE への影響を評価するために、16 ノードのネットワークにおいて、実験中に 5 分間隔で 3 回、動的仮想トポロジ制御を実行し、PCE の CPU 利用率と OSPF のメッセージ量を測定した。図 2.13, 2.14 はそれぞれ、PCE の CPU 利用率と OSPF のメッセージ量を表す。PCE の CPU 利用率については、再配置実行中でも最大 CPU 利用率は約 15 %であり、問題のない処理負荷であることが分かる。さらに、定常状態では、PCE が各ノードにポーリングし、網内の Packet LSP のトラヒック量を収集しているが、PCE のプロセッサ処理負荷としては非常に低いことが分かる。

また、OSPF メッセージ量については、再配置開始直後と完了直前に大幅にメッセージ量が増加していることが分かる。これは、Optical LSP

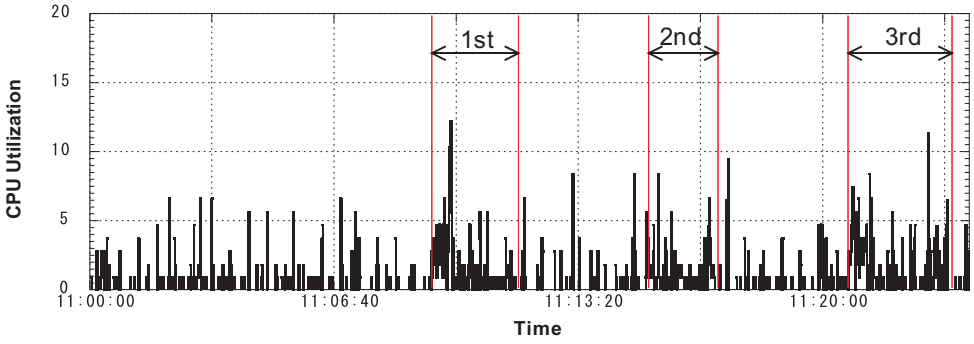


図 2.13: CPU 利用率

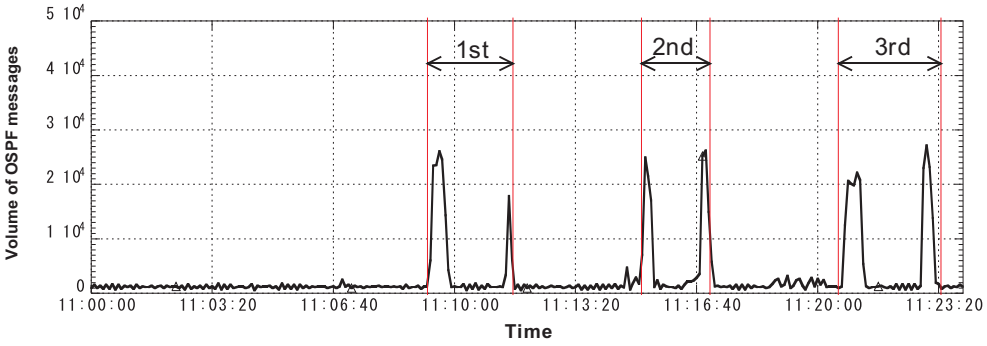


図 2.14: OSPF メッセージ量

の設定・削除にともなう TE リンクの Up/Down の広告である。動的仮想トポロジ制御に伴い OSPF のメッセージ量が増大するものの、PCE および各 GMPLS ノードのプロセッサの処理負荷は安定運用に問題のないレベルであることを確認した。

GMPLS 制御プレーンへの影響

次に動的仮想トポロジ制御時における LSP の追加・削除に伴う GMPLS 制御プレーンへの影響を評価するため、同一レイヤの LSP の設定間隔であるパス制御タイマー T_1 を 0.1 s から 5 s まで変化させて、OSPF の収束時間と動的仮想トポロジ制御時間を評価した (図 2.15)。パス制御タイマーの値が小さいほど、一定時間間隔に追加・削除される LSP 数が増大するため、GMPLS 制御プレーンの負荷が増大し、OSPF 収束時間が増大すると考えられる。さらに、GMPLS シグナリングの処理時間も増加する

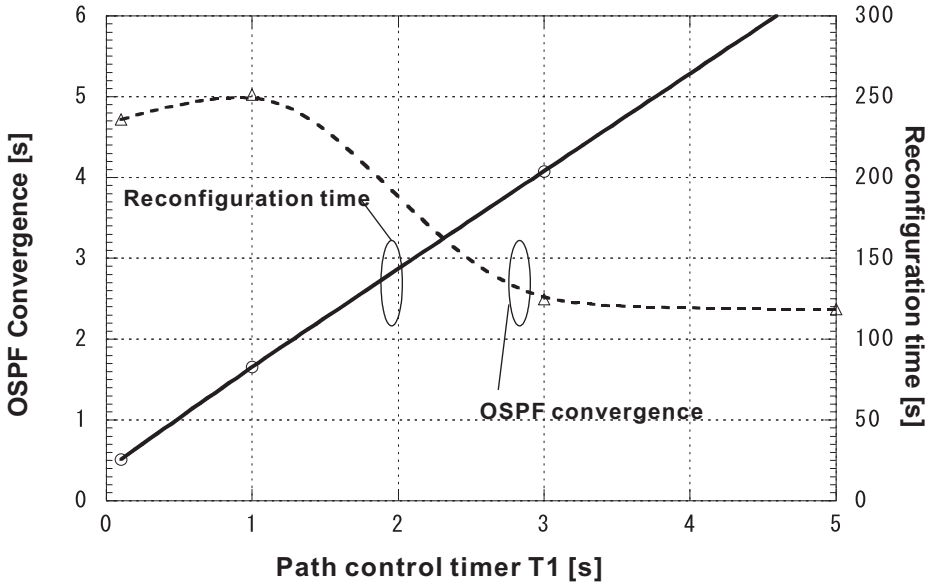


図 2.15: パス制御タイマー T_1 を変化させた時の動的仮想トポロジ制御時間と OSPF 収束時間の評価

ため、動的仮想トポロジ制御時間に影響が生じると考えられる。

OSPF 収束時間については、パス制御タイマーが 5.0 s から 1.0 s にかけて増加しているものの、1.0 s から 0.1 s ではほぼ一定値に収束していることが分かる。パス制御タイマーが 0.1 s の場合に OSPF 収束時間が増加していないのは、OSPF の広告は一定時間間隔 (本実験では 1.0 s) で発生するため、複数の LSP に関わる広告が 1 メッセージに集約されて広告されたため、一定時間内に処理すべき OSPF メッセージ量がタイマー値 1.0 s と比べて増加しなかったためと考えられる。また、タイマー値が 3.0 s から 1.0 s にかけて収束時間が増加しているが、タイマー値を 1.0 s にすることで一定時間内に各ノードが受信する OSPF のメッセージ量が増加し、受信メッセージ量が各ノードのプロセッサ処理能力を上回り、前回の広告タイミングでの OSPF メッセージの処理が完了する前に次に広告タイミングでの OSPF メッセージを受信してしまい、徐々に処理すべき OSPF メッセージが蓄積されたため収束時間が増大したものと考えられる。しかしながら、いずれのタイマー値においても、OSPF の処理としては一定時間後に収束しており、制御プレーンの安定性には特に問題は見られなかった。さらに、動的仮想トポロジ制御時間については、パス

制御タイマーの値にほぼ比例した結果であることが分かる。これは、パス制御タイマーの短縮による各ノードの処理負荷の増加が僅かなものであったため、パス制御フェーズの時間短縮が直接、トータルの動的仮想トポロジ制御時間短縮につながったためである。

動的仮想トポロジ制御のスケール性

最後にノード数を変化させて、OSPF の収束時間と動的仮想トポロジ制御時間を測定した (図 2.16)。ここで動的仮想トポロジ制御時間とは、動的仮想トポロジ制御実行のトリガーを PCE が受信してから、最適な VNT を計算し、最終的にネットワーク側で動的仮想トポロジ制御が完了するまでの時間である (図 2.10 参照)。

各指標はノード数が増加するにつれて、大きくなっている。基本的に、動的仮想トポロジ制御時間は追加/削除する LSP の数に依存する。提案方式では、定期的に VNT 全体が再構成されるために、ネットワークの規模に再構成対象の LSP 数が依存している。例えば、16 ノードのネットワーク条件では網内の LSP 数は約 70 であり、約 1/3 の LSP が定期的に再構成の対象となっている。本評価ではパス制御タイマー T1 の値は 1.0 s であり、16 ノード時の動的仮想トポロジ制御時間は約 125 s であった。ここで、本実装では Hitless transition を採用しており、動的仮想トポロジ制御時間中サービスが中断している訳ではない点に注意されたい。

これまでに最大 16 ノード構成のネットワークでの性能評価を実施した。ここでは、実験で収集したデータをもとに大規模網への動的仮想トポロジ制御の適用性について考察する。図 2.17 に LSP 数を増加させたときの動的仮想トポロジ制御時間の推定値を示す。アルゴリズム計算時間やシナリオ作成に要する時間はノード数に大きく依存するが、これまでの実験から動的仮想トポロジ制御時間全体に占める割合はごく僅かであることを確認している。動的仮想トポロジ制御時間はパス制御の時間に大きく依存しており、基本的には設定・削除対象となる LSP 数に比例する。動的仮想トポロジ制御を実行中は常時ルーティングプロトコルによる LSP 設定・削除の広告が発生しており、可能な限り動的仮想トポロジ制御時間を短縮することが望ましい。さらに大規模なネットワークで動的仮想トポロジ制御を実行するためには、i) 制御プレーンの処理能力の向上、ii) シーケンシャルではなく、複数の LSP を同時に設定・削除を行なうパス制御の並列化等の対策を実施する必要がある。

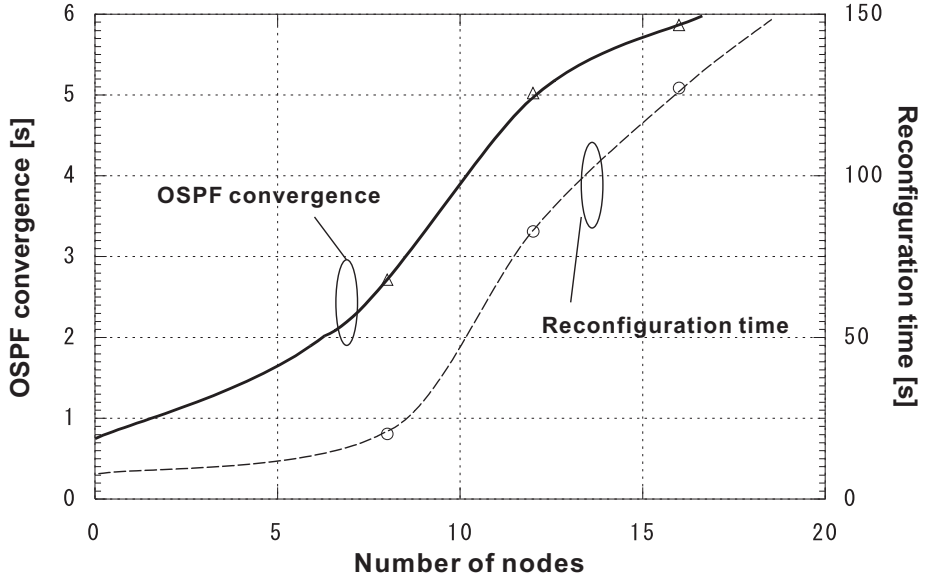


図 2.16: ネットワークの規模と動的仮想トポロジ制御時間と OSPF 収束時間の関係

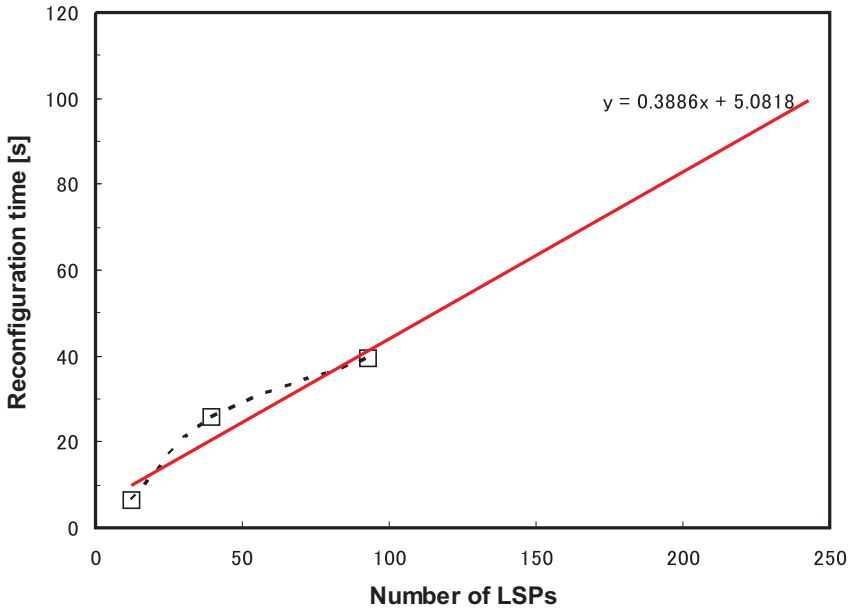


図 2.17: LSP 数と動的仮想トポロジ制御時間の関係

2.4　まとめ

本章では、仮想バッファ方式によるコアルータでの帯域制御技術、およびPCEアーキテクチャに基づく動的仮想トポロジ制御機能の実現方式の提案及び実装法の検討を行なった。コアルータでの帯域制御技術ではハードウエア実装についての定量評価を行い、コアルータでの実現性を確認するとともに、シミュレーションによる評価で多数のフローが存在するコアルータでも適切に帯域制御可能なことを示した。

動的仮想トポロジ制御では、検討した方式に基づきプロトタイプ試作を行うとともに、実験を通じて提案方式の実現性と適用領域を定量的に評価した。本試作では動的仮想トポロジ制御機能をPCEサーバとして、ネットワークから独立して実現することで、既存のプロトコル及びノード実装へのインパクトを最小にしつつ、高度な制御機能を提供可能なことを確認した。

参考文献

[1] T. Kurimoto, T. Miyamura, M. Aoki, I. Inoue, N. Matsuura, H. Kojima and S. Urushidani,"A proposal of multi-layer service network architecture," *IEICE Techinical Report*, **PS2003-6**, September 2003 (in Japanese).

[2] M. Tatipamula, Z. Ali, I. Inoue, T. Miyamura, S. Urushidani, and S. Asano,"Design and Architectural Concepts for Border Model based IP/Optical Multi- Layer Service Networks," IEICE Tran. Commun., vol. E88-B, no. 10, pp.3832-3840, 2005.

[3] T. Miyamura, T. Kurimoto, K. Nakagawa P. Dhananjaya, M. Aoki and N. Yamanaka, "A New Queueing Mechanism for Achieving Fair Bandwidth Allocation in High-speed Networks", Proc. of APCC 2001, E84-B, 473-476, 2001.

[4] T. Miyamura, T. Kurimoto, K. Nakagawa P. Dhananjaya, M. Aoki and N. Yamanaka, "Active queue control scheme for achieving approximately fair bandwidth allocation," Communications, 2002. ICC 2002. IEEE International Conference on, Year: 2002, Volume: 2, Pages: 1269 - 1273 vol.2, May 2002.

[5] T. Miyamura, T. Kurimoto, K. Nakagawa P. Dhananjaya, M. Aoki and N. Yamanaka, "A Buffer Management Mechanism for Achieving Approximately Fair Bandwidth Allocation in High-Speed Networks," IEICE Trans. Commun. ,Vol.E85-B No.8 pp.1434-1441, Aug 2002.

[6] R. Hayashi, T. Miyamura, T. Kurimoto, M. Aoki, and S. Urushidani, "Simulation of a Dynamic Multi-layer Optimization Algorithm with SRLG Consideration," *Proc. OECC/COIN2004*, 14B2-4, July 2004.

[7] R. Hayashi, T. Miyamura, E. Oki, K. Shiomoto, and S. Urushidani, "Performance and Demonstration of Multilayer Coordination Technologies," *Proc. WTC2006*, May 2006.

[8] T. Miyamura, T. Kurimoto, R. Hayashi, I. Inoue, K. Shiomoto, and S. Urushidani, "Demonstration of PCE-Controlled Dynamic Traffic Engineering for GMPLS-Based Multilayer Service Network," it Proc. ECOC2005, vol. 2, pp. 269-270, September 2005.

[9] 宮村　崇, 林　理恵, 大木　英司, 塩本　公平, 漆谷　重雄, "PCE によるマルチレイヤトラヒックエンジニアリング機能の実装と評価," 電子情報通信学会 論文誌 B, Vol.J90-B No.4 pp.331-340, Apr. 2007.

[10] E. Mannie *et al.*, "Generalized Multi-Protocol Label Switching (GMPLS) Architecture," IETF, `draft-ietf-ccamp-gmpls-architecture-02.txt`, March 2002.

[11] N. Yamanaka , T. Kurimoto, T. Miyamura, Michihiko Aoki, "MSN Type-X: Next Generation Internet Backbone Switch / Router Architecture," Communications, 2002. ICC 2002. IEEE International Conference on, Vol.4, pp.2095 - 2099, May 2002.

[12] A. Parekh, "Generalized Processor Sharing Approach to Flow Control in Integrated Services Networks," Massachusetts Institute of Technology, Feb. 1992.

[13] S. J. Golestani,"A Self-Clocked Fair Queueing Scheme for Broadband Applications", Proc. of IEEE INFOCOMM, 2, pp.636-645, 1994.

[14] S. Suri and G. Varghese, "Leap Forward Virtual Clock: A New Fair Queueing Scheme with Guaranteed Delays and Throughput Fairness," Proc. of IEEE INFOCOM, 3, 557-565 1997.

[15] M. Schreedhar and George Varghese, "Efficient Fair Queueing using Defficit Round Robin," Proc. of SIGCOMM'95, Sept. 1995.

[16] M. Katevenis, S. Stefanos and C. Courcoubetis, "Weighted Round-Robin Cell Multiplexing in a General-Purpose ATM Switch Chip," IEEE J. Select. Areas Commun., 9, pp.1265-1279, 1991.

[17] I. Stoica, S. Shenker and H. Zhang, "Core-Stateless Fair Queueing: Achieving Approximately Fair Bandwidth Allocations in High-speed Networks", Proc. of ACM SIGCOMM'98, Sept. 1998.

[18] Z. Cao, Z. Wang and E. Zegura, "Rainbow Fair Queueing: Fair Bandwidth Sharing Without Per-Flow State", Proc. of IEEE IMFOCOMM 2000, 2000.

[19] B. Braden et al., "Recommendations on Queue and Congestion Avoidance in the Internet", IETF RFC2309, April 1998.

[20] M. Grossglauser and S. Keshav, "On CBR Service", Proc. of IEEE INFOCOM, pp.129-137, 1996.

[21] S. Floyd and V. Jacobson, "Random Early Detection Gateways for Congestion Avoidance," IEEE/ACM Transactions on Networking, 1(4), 397-413 1993.

[22] D. Lin and R. Morris, "Dynamics of Random Early Detection," Proc. of SIGCOMM'97, Oct. 1997.

[23] UCB/LBNL/VINT, "Network Simulator - NS (Version 2)," `http://www-mash.cs.berkley.edu/ns/`.

[24] R. Jain et al., "Throughput Fairness Index: An Explanation," ATM Forum 99-0045, 1999.

[25] B. Vandalore, R. Jain, R. Goyal and S. Fahmy, "Design and Analysis of Queue Control Functions for Explicit Rate Switch Schemes", Proc. of IEEE ICCCN, 780-786 1998.

[26] B. Mukherjee. S. Ramamurthy, D. Banerjee. and A. Mukherjee. , "Some principles for designing a wide-area WDM optical network," Networking, IEEE/ACM Transactions on, vol. 4, no. 5, pp.684-696, Oct. 1996.

[27] Aysegül Gençata and Biswanath Mukherjee, "Virtual-topology adaptation for WDM mesh networks under dynamic traffic," Networking, IEEE/ACM Transactions on, vol.11, no.2, pp.236-247, April 2003.

[28] K. Shiomoto, *et al.*, "Distributed Virtual Network Topology Control Mechanism in GMPLS-Based," IEEE Journal on Selected Areas in Comm., vol. 21, no. 8, Oct 2003, pp. 1254 - 1262.

[29] J.P. Vasseur *et al.*, draft-ietf-pce-pcep-01.txt, February 2006.

[30] E. Oki *et al.*, draft-ietf-pce-inter-layer-req-01.txt, February 2006.

[31] K. Kompella and Y. Rekhter, "OSPF Extensions in Support of Generalized Multi-Protocol Label Switching (GMPLS)," IETF, **RFC4203**, October 2005.

[32] Y. Zhang, M. Roughan, N. Duffield, A. Greenberg, "Fast Accurate-Computation of Large-Scale IP Traffic Matrices from Link Loads", *Proc. ACM Sigmetrics 2003*, June 2003.

[33] A. Lakhina *et al.*, "Structural Analysis of Network Traffic Flows," ACM SIGMETRICS Performance Evaluation Review 2004, Vol. 32, Issue 1, pp.61 -72.

第3章　光ネットワーク仮想化アーキテクチャ

3.1　概要

通信のブロードバンド化やサービスの多様化の急速な進展にともない、ネットワークが社会インフラとして幅広い分野に活用されてきている。多様なサービスに対応して様々なネットワーク技術が導入されており、今後もこうした多様化の傾向はますます進行すると考えられる。さらに、故障や災害などによる通信ネットワークの機能停止が発生した場合でも、その影響範囲を極力限定することと、復旧を速やかに行うことが求められる。そのため、通信インフラの制約を受けずに迅速にサービスを展開する拡張性と、災害などに起因する故障に対しても強い復元力がネットワークに要求される。本章では、多様なサービスへの柔軟な対応と故障や予期しないトラヒック変動などの環境変化への頑強性を向上させるため、光ネットワーク上での多様なサービス網の展開を可能とするネットワーク仮想化アーキテクチャを提案する [1–5]。提案するアーキテクチャについて説明するとともに、システム設計とプロトタイプ実装による実証実験により提案アーキテクチャの有効性と実現性を確認する。

3.2　研究の背景

既存のネットワーク上に新しいネットワーク技術・プロトコル・サービスを展開するための仕組みとしてネットワーク仮想化技術 [6–9] が注目されている。米国を中心とした PlanetLab の活動がアプリケーション層の仮想化技術として挙げられる。また、米国の GENI プロジェクトでは、既存の技術にとらわれない新たなネットワークアーキテクチャの研究開発と検証を実施するために、テストベッド基盤にネットワーク仮想化技術を導入している。

ネットワーク仮想化は、同じ物理インフラ網の上で、複数の異なる要求条件を持つ仮想網を提供する技術と見ることができる。最近、ルータベンダにおいて IP ネットワークベースの仮想化ルータが提案されている [10,11]。しかし、ネットワーク仮想化技術が数多く提案されているものの、複数の仮想網にネットワーク資源の配分をどのように行うかについてはほとんど検討されていない。さらに、仮想網が IP パケットネットワーク上で多重化されるため、仮想網間の相互作用によりトラヒックパターンに大きな変化が現れ、ネットワークの安定性低下の一因となる。しかし、仮想網間の干渉を回避して仮想網に隔離 (isolation) を提供する手段については既存研究では言及されていない。したがって、ネットワーク仮想化において、他の仮想網に干渉することなく仮想網間に公平にネットワーク資源を配分する技術は重要な研究課題である。さらに新たなネットワークサービスは 10 Gbps 以上の広帯域と低遅延・低ジッターを必要とする。しかし、既存のパケットベースのネットワーク仮想化技術ではこのような要求条件を満足することができない。つまり既存研究では今後のネットワークサービスが要求する性能と隔離を仮想網に対して提供することができない。

上述の考察に基づき、本章では、WDM (wavelength division multiplex) 技術に基づいた光ネットワークの上に展開するネットワーク仮想化アーキテクチャを提案する [1–5]。提案アーキテクチャでは、高性能を実現するために仮想網が IP レイヤ以下の波長や TDM (time division multiplexing) といった伝送技術を直接利用可能とする。これにより仮想網に対してパケットベースのネットワーク仮想化技術では実現できない高性能なサービスと完全な隔離を提供することができる。ここで高性能と隔離については、波長等の各物理リンクリソースを仮想網間で共用せずに特定の仮想網に占有的に割り当てることで実現する。また、環境変化に対する頑強性を担保するための適応性も重要な要求条件の 1 つである。適応性については、動的な資源管理と仮想トポロジ最適化を仮想網に対して提供する。さらに波長を単位とした帯域保証が実現できるため、パケットを単位とした現状の品質管理技術の限界を打ち破るブレークスルーが期待できる。さらに仮想網間の資源配分を、障害などを含めた環境変動に適応的に行うことができれば、頑強性の強いネットワークインフラが実現できる。

このような環境変化への仮想網の適応性を担保しつつ、光ネットワークの特長を活かした高性能な仮想化アーキテクチャを実現するためには

以下の課題を解決する必要がある。

1. 適応性の実現手段である仮想網トポロジ最適化を実施するためには、プロトコル依存の物理網の複雑な仕組みを理解する必要がある。

2. 多数の仮想網が適応性を実現しつつ、物理資源の枯渇や仮想網間の資源競合を回避する仕組みが必要である。多数の仮想網を収容するためにはスケーラブルな調停の仕組みを確立する必要がある。

3. 既存の光ネットワークの制御プロトコルはネットワーク仮想化をサポートしていない。既存プロトコルを運用するネットワークからの移行を考慮したソフトウエア設計を実現する必要がある。

本研究では上記の課題を解決するアーキテクチャを提案するとともに、ソフトウエア実装と実験網による評価を実施し、アーキテクチャを実証する。1 については、仮想網に対して物理網の複雑性を隠ぺいしつつ、動的なトポロジ制御を可能とする仕組みとインターフェイスを検討する。2 については、物理網側が集中制御により仮想網の最適化や調停を実施すると、仮想網数に対するスケール性が問題となる。そこで、物理網は仮想網が利用する資源量の上限を規定し、各仮想網が上限の範囲で分散的に制御することで資源の調停を実現する。これらを実現する重要な技術は仮想化資源モデルである。提案する仮想化資源モデルでは、新たに各物理リソースに「利用権限」を付与し、柔軟な資源管理を実現する。

本研究の貢献は次の通りである。1) 仮想網間の完全な隔離と高性能を実現する資源管理モデルの提案、2) 提案する資源管理モデルに基づき光ネットワーク資源の仮想化機能を提供する物理網マネージャの設計と実装、3) 仮想網が簡単に光ネットワーク資源を利用することができるインターフェイスの規定、そして、4) 提案アーキテクチャとインターフェイス設計の有効性を広域ネットワークによる実験実証で確認、の 4 点である。

本章の構成は以下の通りである。まず、3.3 で関連研究を紹介するとともに提案アーキテクチャの位置づけを明確化する。次に 3.4 でアーキテクチャの構成要素を規定し、3.5 でアーキテクチャの要求条件を整理する。3.6 で要求条件を実現するアーキテクチャを提案する。3.7 と 3.8 はそれぞれ資源管理モデルとインターフェイスを説明する。3.9 でアーキテクチャに実装および評価結果を提示する。最後に 3.10 で本章のまとめを述べる。

3.3 関連研究

ここでは、ネットワーク仮想化技術についての関連研究を紹介する。近年、北米を中心にネットワーク仮想化を提供するためのネットワークアーキテクチャの研究開発が活発に実施されている。

PlanetLab [6] はネットワーク仮想化技術に関する著名なテストベッドとして知られている。PlanetLab は IP 網上に物理的に構築されたオーバーレイネットワークを開発・運用している。PlanetLab では、仮想化資源は Linux PC サーバの集合であり、ソフトウエアベースで仮想化を実現しており、ネットワークの性能 (遅延、スループットなど) は制限されてしまう。

性能問題を解決するため、Turner らはハードウエア技術による性能改善を提案している [7]。彼らは Linux PC サーバとネットワークプロセッサを組み合せ、パケット処理機能など性能にクリティカルなサービスをネットワークプロセッサ上に実装した。彼らのアプローチはスケールし既存技術と比較してはるかに高い性能を達成可能なものの、彼らの技術は既存のパケット網上での仮想網の構築に留まっている。これは、異なる複数の仮想網が同じパケット網を共有し、その性能は既存のパケット網技術に制約されることを意味している。

CABO [8] はネットワーク仮想化技術の主要なテストベッドの 1 つで、アンダーレイネットワークの資源の一部を仮想ノードまたは仮想リンクとしてユーザに提供している。しかし、CABO は主に新たなネットワークアーキテクチャのコンセプトを提示しているのみで、低位レイヤに対する仮想化を実現する技術については言及していない。

PlanetLab や CABO といった既存の研究プロジェクトでは、共通のパケット網上に複数の仮想網を収容しているため、他の仮想網からの干渉によりネットワークの性能および安定性が劣化してしまう。提案アーキテクチャでは光ネットワークインフラの資源を波長チャネル単位でスライスし、その一部を各仮想網に排他的に割り当てるため、原理的に他の仮想網からの干渉を回避することができる。さらに環境変化に対する頑強性と資源利用効率の向上を実現することができる。以上が、提案アーキテクチャの主要な利点である。

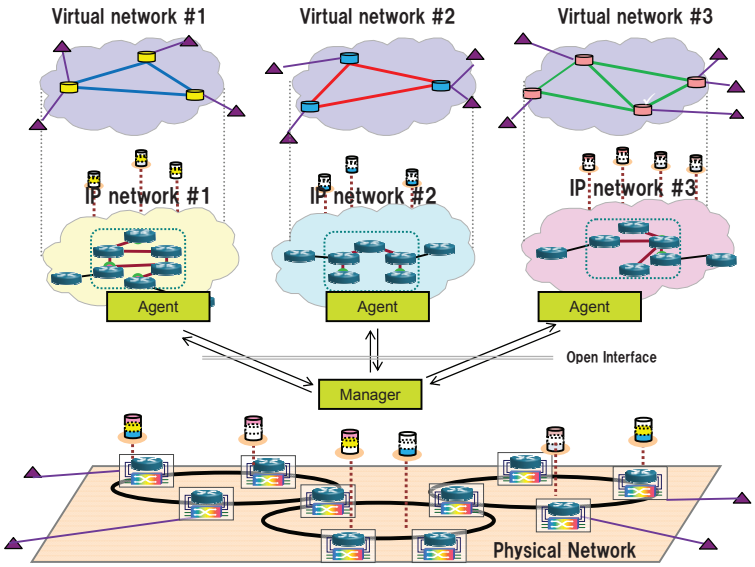


図 3.1: 複数仮想網を収容する光ネットワーク

3.4 構成要素

光ネットワーク仮想化アーキテクチャを提示する前に提案モデルの用語を紹介するとともに要求条件を規定する。仮想網の概念を説明するにあたって、まずビジネス参照モデルの概要を説明する。インフラプロバイダーと仮想網運用者の 2 種類のプレイヤーを考える。インフラプロバイダーは実際の物理網リソースの構築と管理を行うとともに、プロバイダーの資源の一部を用いて仮想網を生成する。仮想網は論理的な存在であり、物理網リソースを直接的に制御・管理することはできない。ネットワーク仮想化技術は各仮想網に対して、特定の目的で完全にカスタマイズ可能で物理網リソースを準備することなく占有的に利用可能な彼ら自身のネットワークを構築することを可能とする。

仮想網は仮想ノードと仮想リンクで構成され、物理網は物理ノードと物理リンクで構成される。ここで、物理リンクは波長、TDM、Ethernet な

どIPレイヤ以下の伝送資源に対応する。物理ノードは光クロスコネクト (optical cross-connect, OXC) やTDMクロスコネクト、L2スイッチ、IPルータなどである。仮想ノードと仮想リンクは物理ノードおよび物理リンクの部分集合として定義される。単一の物理ハードウエア上で複数の仮想ノードを生成する方法については多くの既存研究がある [6,7,9]。そこで、本研究では共用された物理インフラ上での仮想リンクの生成方法の確立に取り組む。物理リンクについては、波長チャネルなどのインターフェイス単位で物理リンク資源をスライスする (したがって、インターフェイス単位では特定の仮想網に占有的に資源が割当られる)。仮想網は割り当てられた資源を組み合せて自身のトポロジを構築する。

最後に、2つの制御構成要素を導入する。物理網マネージャと仮想網エージェントである (図3.1)。サービス制御機能の容易な導入と柔軟な変更のため、垂直分離型のアーキテクチャを採用する。物理網マネージャは物理網上に配備され、仮想化された物理資源を管理する。各仮想網はそれぞれ仮想網エージェントを運用する。各仮想網エージェントはトラヒック需要を推定し、適切なトポロジを計算する。物理網マネージャは仮想網が仮想化資源を容易に操作可能とするために簡易なインターフェイスを提供する。各構成要素の詳細については後述する。

3.5 要求条件

光ネットワーク仮想化技術の要求条件について検討する。光ネットワークに仮想化技術を導入する動機は多様な仮想網に対して高性能と完全な隔離を提供することである。さらにインフラプロバイダーは有限の物理リソースを効率的に配分することで資源の枯渇を避けるように考慮すべきである。それと同時に各仮想網は需要変動に柔軟に対応するため物理網リソースを動的に制御する能力を保持すべきである。さらに仮想網の運用オーバーヘッドの発生などネットワーク仮想化を導入することによる追加的なコストを削減することが重要である。上述の考察に基づき、要求条件をまとめる。

3.5.1 資源の要求と配分

仮想網は自網の構築に必要な資源を物理網に要求する。資源の要求は運用開始時点である初期トポロジ構築と運用中の環境変化に適応するた

めの再最適化の 2 つのタイミングがある。初期トポロジ構築では、仮想網は将来的なトラヒック需要の見積もりを行い、トポロジ構築に必要な資源を物理網に要求する。さらに運用開始後に、環境変化により性能が低下すると、性能回復のため仮想網はトポロジの再最適化を行なう。この再最適化を仮想網トポロジ最適化と呼ぶ。物理網は運用中の仮想網に対する資源の配分/返却を行なう機能を提供する。

仮想網の資源要求を受信した物理網は配分ポリシーに従って仮想網への資源を配分の可否を判断する。基本的に物理網は自身の効用や他の仮想網への影響を考慮して、資源要求の受付を判定する機能を有する。ネットワーク仮想化は、仮想網が物理網に対して、利用可能な網資源のうち、使用したい物理網資源を指定する機能を提供する。使用したい物理網資源を仮想網に使用させた場合には、その網資源はその仮想網により使用中であると管理され、他の仮想網が使用することができないようにする機能を提供する。

3.5.2 資源の分離

従来技術で構築された仮想網は IP パケットネットワーク上で多重されているため、仮想網間の相互作用によりトラヒックパターンに大きな変化が現れ、ネットワークの安定性低下の一因になっていた。提案するネットワーク仮想化技術は仮想網間の相互干渉を最小化するための資源の分離を実現する。その上で仮想網間の資源配分を、障害などを含めた環境変動に適応的に行うことができれば、環境変化に対して頑強なネットワークサービスが実現できる。ネットワーク仮想化技術は、仮想網が使用する物理網の資源は相互に排他的となるように、分離することができる機能を提供する。

3.5.3 仮想網間の独立性

仮想網は物理網及び他の仮想網の運用制御技術・ポリシーとは独立に、アーキテクチャ、プロトコル、アドレス体系を選択可能であるべきである。特に網資源の識別子は仮想網に対して物理網特有の複雑な情報を隠蔽するとともに、資源の配分に関わる操作は極力レイヤに依存しない形で実現する。さらに仮想網の資源利用状況に関する情報を他の仮想網に対して隠蔽可能とする。

このため提案するネットワーク仮想化技術では、仮想網が使用する物理網の網資源を識別するID (identification) を、他の仮想網と独立に割り当て、その識別子を用いて運用できる機能を提供する。仮想網はIDのみを用いて配分を要求する資源を指定可能となる。

3.5.4 物理網資源情報の提供

提案するネットワーク仮想化技術は、各仮想網が利用可能な物理網の資源情報を提供する。また、各仮想網が物理網全域の資源を一様に利用するとは限らず、局所的な物理網情報の提供を要望する仮想網も存在すると考えられる。また、物理網としても運用やサービス提供上、特定の資源を仮想網に提供したくない状況もあると考えられる。そこで各仮想網が利用可能な物理網資源の範囲を指定でき、かつ資源単位で配分の許可を与える機能を提供する。

さらに、物理網の資源利用効率の観点から仮想網間の資源共有も考慮する必要がある。前述のように仮想網間の独立性を担保することを考えると、資源共有は時間軸上でなされるべきである。ネットワーク仮想化は、物理網の同一の網資源を、複数の仮想網に対して利用可能であるかの許可を与える機能を提供する。ある仮想網が利用した場合には、他の仮想網からは、その網資源は利用中であることを通知する。

また、仮想網はネットワーク仮想化により自網を構築するにあたって、極力物理網特有の情報を必要としない形で運用可能なことが望ましい。複数レイヤで構成されている物理網は仮想網の要件に応じて、仮想網が必要としないレイヤの情報は抽象化するなどして隠蔽し、必要なレイヤの資源情報のみを提供可能すべきである。

3.5.5 適応性および資源最適化

物理網の資源を配分する際には、資源の効率的運用を目指すべきである。そのためには、仮想網間に配分する資源の最適化機能が必要となる。最適化機能の目的は物理網資源の利用効率向上、収益など物理網の効用最大化である。そのためには、物理網は自網の各資源がどの仮想網が利用しているかという配分資源情報や各仮想網上のリンク負荷などの性能指標や輻輳・故障などの環境変化についての情報を取得する機能を持ち、さらに仮想網に配分した資源の再割当てをする機能を有する。ここで資

源の再配分については運用中の仮想網が利用している資源を返却させる場合、仮想網の運用への影響が懸念される。配分済みの資源の返却については仮想網への影響を極力少なくする仕組みで実現される。

また、仮想網は運用中の環境変化により性能が低下した場合、環境変化に適応し、性能を回復させる機能を有する。そのために仮想網はルーチングやトポロジを再構成する必要がある。物理網は、仮想網がトポロジを動的に再構成するための機能を提供する。

3.6 提案アーキテクチャ

ここで、アーキテクチャと設計について述べる。複数の仮想網が物理資源の一部を利用して占有的に利用可能なネットワークトポロジを構築可能な物理網を実現する。提案アーキテクチャの概念は以下のとおりである。

- 予期しない環境変化に対する適応性を実現するため仮想網エージェントは自由に論理トポロジである VNT (virtual network topology) を構築可能である。同時に物理網マネージャは各仮想網に対して割り当てる物理資源量の上限を制御する能力を持つ。
- 仮想網に物理資源が割当られると、その物理資源は性能の干渉から保護されるとともに、セキュアな仮想網オペレーションのために必要なセキュリティ機構が提供される。

3.6.1 設計目標

まず、構成要素の設計目標を規定する。提案する設計では、既存の技術とソフトウエア資産を有効活用するために、GMPLS (generalized multi-protocol label switching) 制御プレーン [18, 19] を用いて提案アーキテクチャを実装する。しかし、既存の GMPLS 制御プレーンはネットワーク仮想化をサポートしていない。そこで、本研究では、新たに仮想化された光ネットワークの資源管理を実現する機能をサポートする物理網マネージャを設計する。

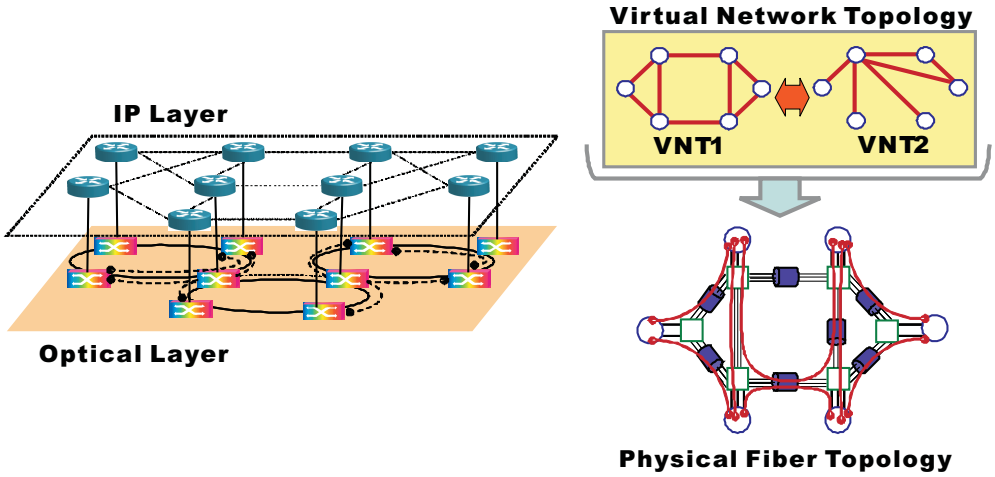


図 3.2: IP レイヤと光レイヤで構成される物理網と VNT の関係

3.6.2 物理網アーキテクチャ

物理網は IP ルータと OXC で構成される (図 3.2)。ここで、本論文では IP レイヤを上位レイヤとして主に考慮するが、同様の議論は他のパケットまたはフレームベースのプロトコルにも拡張可能である。エッジの IP ルータの各ポートは OXC ポートに接続される。波長パスは 2 つのエッジ IP ルータ間に構築され、その中継経路は OXC を設定することにより決定される。波長パスは IP レイヤのネットワークでは IP リンクとして扱われる。波長パスの集合は VNT を構成し、VNT は上位レイヤのトラヒック需要を効率的に転送するために必要なルータ間の接続性を提供し、また、数百 Kbps から 10 Gbps 超の広帯域までの幅広い帯域を提供することができる。提案アーキテクチャでは、インフラプロバイダは各仮想網に対して VNT を**スライス** [6] として提供する。VNT 上の各仮想ノードおよび仮想リンクは物理網上のルータおよび波長パスに対応する。トラヒック需要等の要求条件に基づき適切な VNT を設計するアルゴリズムについては、[13–17] を参照されたい.

3.6.3 物理網マネージャ

物理網マネージャが提供する主要な機能は、

- 物理網の監視制御機能

- 仮想資源管理機能

である。物理網の監視制御機能はネットワークトポロジやトラヒック情報などのネットワークの状態情報を収集し、波長パスの制御を実施する。ネットワークの状態情報の収集のために、物理網マネージャは GMPLS OSPF (open shortest path first)-TE [19] と SNMP (simple network management protocol) をサポートする。OSPF-TE は物理網トポロジの収集のために、SNMP は物理インターフェイス上のトラヒックカウンタの取得とトラップによるインターフェイスのアップ・ダウン検出のために用いられる。波長パスを制御するために、物理網マネージャは単に GMPLS ルータに対してパスの追加・削除を指示するだけである。波長パスはノード間で GMPLS シグナリングを送受信することで確立される。

次に仮想資源管理機能は資源を配分する機構と仮想網エージェントが網リソースに対して制御をするためのインターフェイスを提供する。仮想資源管理機能は ID マネージャ、資源仮想化機構、仮想網エージェントコントローラで構成される。トポロジ情報のアドレッシング方式 (例えば、MAC アドレス、IP アドレス、unnumbered link identifier など) は採用されるプロトコルやネットワーク機器に大きく依存するため、仮想網エージェントのトポロジ制御アルゴリズムの実装が複雑化になるという問題が生じる。この問題を回避するため、ID マネージャは物理情報を統一的な論理情報に変換する機能を提供する。

次に資源仮想化機構は、物理網資源を論理的に分割した上で各仮想網が利用可能な資源量の上限を規定することにより資源競合を回避する手段を提供する。仮想網は物理網マネージャにより指定された利用可能資源の範囲で物理網資源を自由に組み合わせて、VNT を自由に構築することができる。利用可能な資源量の上限は過去の帯域需要や占有した資源量に基づいて計算される。この資源量の上限を計算するアルゴリズムについては本研究の範囲外である。仮想網エージェントコントローラは新たな仮想網の追加・削除を管理する。セキュリティのため、仮想網エージェントコントローラは新たな仮想網が追加される際に認証を実行する。

物理網インフラの複雑性を考慮せずに仮想網の運用を実現するためには、複雑な物理網情報を隠蔽する必要がある。物理網マネージャは、ID マネージャと XML ベースインターフェイスを組み合わせて複雑性を隠蔽する。物理網マネージャは複雑なオペレーションを隠蔽し、物理網オペレーションの知識がなくても単純なインターフェイスを通して、物理網資源を自由に制御することができる。仮想網は XML (extensible markup

language) ベースのメッセージを送信することで波長パスを確立することができる。

3.6.4 仮想網エージェント

トポロジ生成と最適化機能は仮想網エージェントに配備される。仮想網エージェントは物理網マネージャから利用可能な網資源の情報を受信し、指定された資源の範囲で論理網トポロジを構築する。仮想網エージェントはトラヒック需要変動や網内の故障に応じて、複数の波長パスで構成されるパケットレイヤの網トポロジである VNT を動的に再構成する。与えられたトラヒック行列に対して、各仮想網の要件を満足しつつ網資源消費を最小化する最適な VNT を計算する。著者らは既存アルゴリズムとほぼ同等の最適性を維持しつつ、多様な網状態変化に対する適応性を実現するアルゴリズムを開発している。詳細については、文献 [13–15] を参照されたい。

3.6.5 資源配分とトポロジ生成

ここで物理網資源を配分する機構について説明する。図 3.3 は物理網と仮想網間での資源配分とトポロジ生成の手順例を示す。ネットワーク仮想化は物理網インフラに対して適用され、物理網の資源は論理的に分割される。資源の一部は N 個の仮想 (サービス) 網 (1,. . ., N) に割り当てられる。提案アーキテクチャの基本的なアイデアは次の通りである。

- 物理網インフラは集中制御的な方法で各仮想網に対する資源割当量を制御する。
- 各仮想網は自身のトポロジ生成のみに責任を持つ。

ネットワーク仮想化サービスを開始する前に、顧客は必要とする帯域、品質、端末の位置等のパラメータを申告する (*Step 1*). 各仮想網は論理的な存在であるが、同時に複数の波長パスの集合で構成された網トポロジを占有的に利用する。資源の競合や枯渇を回避するために、インフラプロバイダーは各仮想網に対して利用可能な物理資源の集合を設定する。したがって、各仮想網によって占有される資源の上限を制御可能である。物理網マネージャの仮想化資源管理機能は占有される資源量を推定し、各

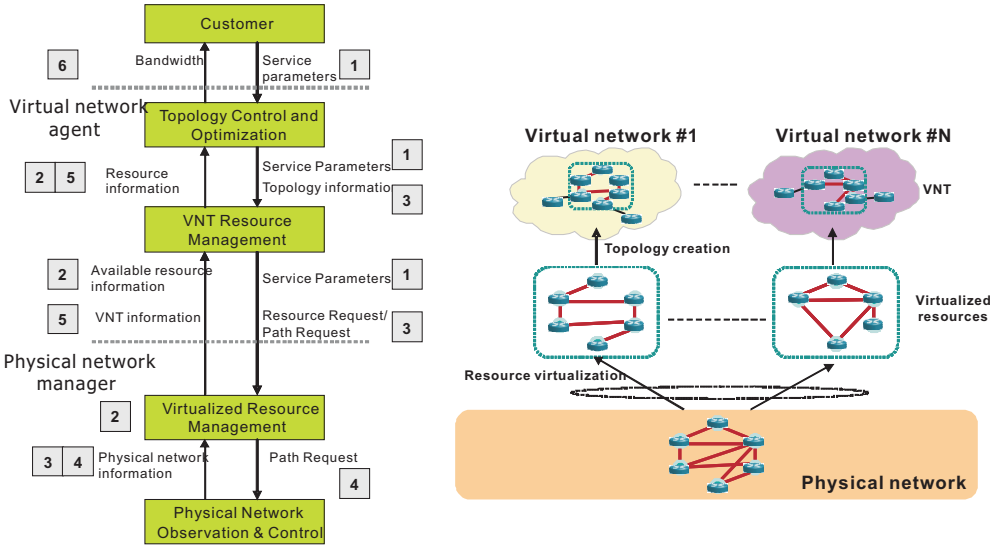


図 3.3: インフラプロバイダと仮想網オペレータ間の相互作用

仮想網に対して利用可能な資源を設定する。推定は過去または現在のトラヒック量や契約等にも基づいて実施する。物理網マネージャは単に仮想網エージェント内の VNT 資源管理機能に対して利用可能な資源の情報を通知するだけである (*Step 2*)。この機能は仮想化資源を管理するとともに、物理網マネージャへのインターフェイスとなる。ここで、物理網オペレーションの複雑性を回避するために、物理網マネージャは複雑な物理網情報を用いることなく物理網資源を簡単に操作するために機構を提供する。

資源情報を受信した後、仮想網オペレータは利用可能な資源を組み合わせて自身の VNT を構築する。仮想網エージェントのトポロジ制御・最適化機能により初期 VNT を計算し、VNT 情報を VNT 資源管理に転送する。ここで、波長パスの確立やトポロジ情報収集等の実際のネットワーク制御は仮想網側の機能では実行されないことに注意されたい。VNT 資源管理機能は、資源割当と波長パス設定を仮想化資源管理機能に要求する (*Step 3*)。要求に基づき、物理網マネージャ側の物理網の監視制御機能は実際のネットワーク制御を実行する (*Step 4*)。物理網上で波長パスの集合が設定されると、仮想化資源管理機能は仮想網に対して確立された VNT 情報を通知する (*Step 5*)。この段階で、仮想網エージェントは物理網の実際の帯域を利用することができので、仮想網オペレータは顧客に

対して帯域情報を通知する (*Step 6*)。このようにして、初期 VNT が物理網上に構築される。

さらに仮想網エージェントは、ネットワークの環境変化に追従するために VNT を動的に再構成する。VNT 資源管理機能は物理網から提供される情報に基づき、性能を観測し、性能劣化を検出すると VNT 再構成を開始する。トポロジ制御・最適化機能で新たな VNT が計算される。新たな VNT に再構成するのに十分な資源が利用可能であれば、仮想網エージェントは物理網マネージャに対して、新たな VNT に移行するためにパスの設定・削除を要求する。しかし、現在の資源量が十分でない場合は、仮想網エージェントの VNT 資源管理機能は物理網マネージャに対して追加の資源配分を要求する。物理網マネージャの仮想化資源管理機能は残余資源量と他の仮想網のトラヒック需要情報に基づいて要求の受け入れ可否を判断する。要求が受け入れられると、追加資源が仮想網エージェントに配分され、物理網上に計算された新たな VNT が構築される。

3.7 資源管理モデル

ここでは、効率的な資源利用と競合回避を実現するための仮想化資源管理と制御のためのモデルを提案する。提案モデルの基本的なアイデアは、GMPLS ルーチングプロトコルで広告される資源に対して 1 つの簡単な属性を追加し、各仮想網の資源利用を管理する。提案モデルを記述した後、資源制御と管理を実現するアプローチを議論し、提案アプローチの利点を明確化する。

3.7.1 アプローチ

上述の提案アーキテクチャを具体化するため、GMPLS OSPF-TE により広告される既存のリンク状態データに対して新たな属性を付加することによりネットワーク仮想化を実現する仮想化資源管理機構を提案する。本機構は、提案アーキテクチャにおいて**カーネル**の役割を果たす。**カーネル**は仮想網に対して物理網の複雑性を隠蔽するとともに、仮想網が直接的に物理網資源を操作することを可能とするための幾つかのインターフェイスを提供する。図 3.4 に仮想化資源管理機構を示す。仮想化資源管理機構がいわゆる計算機の OS の**カーネル**に相当し、物理網資源を仮想化し、各仮想網に割り当てる資源量を決定する。上述の通り、トポロジ情報

収集は GMPLS OSPF-TE を通じて物理網監視制御機能により実行される。収集された情報は仮想化資源管理機構に通知される。ここで物理網資源を識別するアドレッシング方式はネットワークレイヤと使用される制御プロトコルに依存する。例えば、GMPLS OSPF-TE では、各リンク資源はローカルとリモートリンク識別子の組により識別される (図 3.4)。物理網の複雑性を回避するため、仮想化資源管理機構は新たにネットワークレイヤとは独立な論理リンク ID を付与する。論理リンク ID を用いて、インフラプロバイダは物理網トポロジ情報を仮想網に通知する。

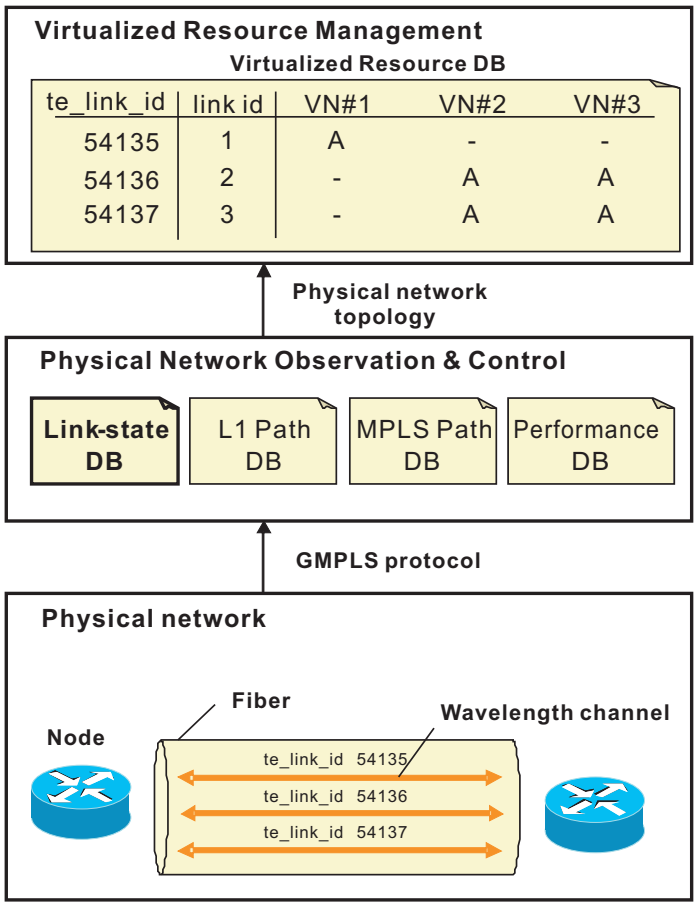


図 3.4: 資源管理モデル

仮想化資源管理機構は仮想網による資源利用を規制するための機能を提供する。この目的のため、データベース上の資源に 1 つの属性を付与する (この場合、「資源」は例えば波長チャネルに対応する)。ここで、各

資源に付与される属性は特定の仮想網に対する**使用権**を規定し、これは特定の仮想網に対して資源を閲覧することが可能であり、かつ利用可能であることを意味する。利用可能な資源は特定の仮想網により利用される。加えて、仮想化資源管理機構は**占有**という状態をトレースしている。そしてこれは特定の仮想網によって占有的に利用されているという状態を意味する。この例では物理網は 2 ノードと 3 波長チャネルを持つ 1 ファイバリンクで構成されている。資源は 3 仮想網により共有されている。リンク ID 1 を持つ波長チャネルは仮想網 1 に占有的に割当られている。他の 2 つの仮想網はこの資源を閲覧することも利用することもできない。他の波長チャネル (リンク ID 2 と 3) は残りの仮想網 2 と 3 が利用することができる。これらの資源は 2 つの仮想網により共有され、実際の資源の利用は仮想化資源管理機構により決定される。基本的に共有資源は FIFO (first-in first-out) ベースで仮想網に対して分配される。

資源に付与される属性は資源配分に深く関連するため、インフラプロバイダによって統一的な方法で注意深く決定されるべきである。適切に資源に対して属性を付与することで各仮想網の過度な資源利用を制限することができる。資源への属性の付与方法は、各仮想網の資源利用についての仮定やサービスの契約に大きく依存する。仮想化資源管理機構は、過去と現在のトラヒック需要等を考慮して各仮想網に配分する適切な資源量を計算する。

このような方法で、インフラプロバイダは、資源に付与する属性を適切に設定することで各仮想網の資源利用を制御し、間接的な方法で資源競合を回避する。提案アプローチは仮想網間の不必要な通信を回避し、既存の GMPLS プロトコル群の拡張を必要としないため、システム全体の頑強性が向上する。

3.8 インターフェイス

3.8.1 インターフェイス規定

プロトタイプの管理システムの API (application-program interface) を記述する。適応的なネットワーク制御を可能とするため、物理網マネージャは仮想網エージェントに対して次のインターフェイスを提供する。インターフェイスを表 3.1 に示す。仮想網エージェントは物理網と仮想網双方の残余帯域情報を含む網トポロジ情報および各仮想網のトラヒック行

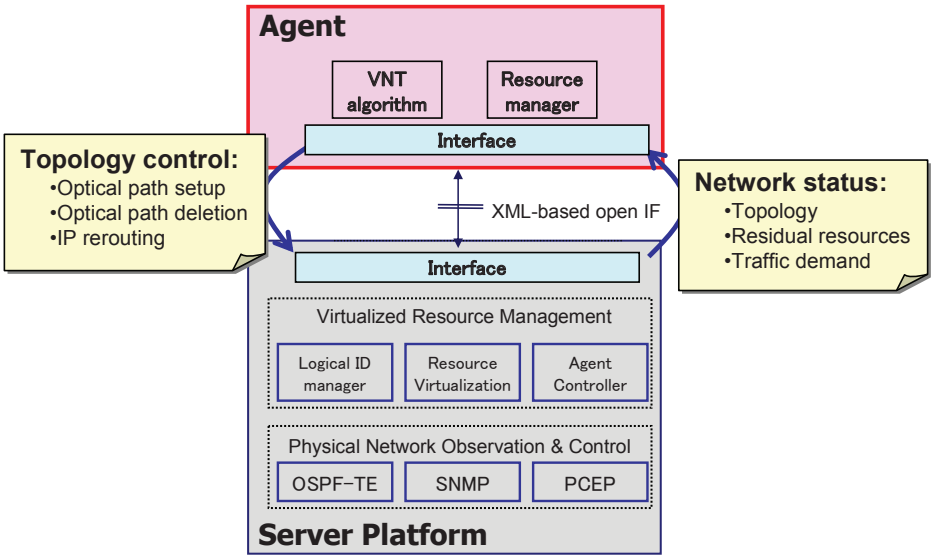


図 3.5: 提案するシステムアーキテクチャ

列等の網状態情報を API を通じて取得する。さらに仮想網エージェントは L1/MPLS パスの設定・削除等のネットワークの構成変更を要求する。仮想網エージェントのシステム設計を容易にするため、物理網マネージャは IP アドレスや GMPLS 関連パラメータなどのプロトコル依存の情報を隠ぺいする。上述の API を組み合わせることで、仮想網エージェントは GMPLS 関連の制御機能を持つことなく適応的なネットワーク制御を実行することができる。

3.8.2 基本オペレーション

最後に、API による初期 VNT の構築と再構成を例として基本オペレーションを示す。初期状態において、仮想網エージェントは *Network status information collection* を用いて物理網トポロジ情報を取得する。ここで、

表 3.1: サーバ-アプリケーション間インターフェイス

No.	API name	Description
1	*Network status information collection*	Collect information about network topology with residual resources, optical paths and packet layer routing.
2	*Traffic information collection*	Collect information about measured traffic matrix.
3	*Resource allocation*	Request initial resource reallocation to a service network, and request additional resources by service networks.
4	*L1/MPLS path control*	Request the establishment or deletion of Layer 1 or MPLS paths.
5	*Status change notification*	In case of network status changes (e.g., failure or congestion), the server notifies network status changes to an agent.
6	*Utility*	Send Logs.

物理網マネージャは資源に付与された使用権属性の指定にしたがって、部分的なトポロジ情報のみを通知する。次に、仮想網エージェントは *Traffic information collection* を用いてリンク状態情報を要求する。リンク状態情報はトラヒック行列を計算に利用する。情報収集が完了すると、仮想網エージェントはトラヒック行列を計算するとともに最適な VNT を計算する。この段階で、仮想網エージェントは VNT の構築に必要となる資源量を算出する。次に利用可能な資源利用をコミットするために、仮想網エージェントは物理網マネージャに対して *Resource allocation* を送信する。そして、物理網上に計算した最適な VNT を構築するために、仮想網エージェントは *L1/MPLS path control* を用いて L1 と MPLS パスの確立を要求する。これにより初期 VNT の構築が完了する。もし物理網状態に何らかの変化が発生すると、物理網マネージャは *Status change notification* を用いて変化を仮想網エージェントに通知する。このメッセージを受信すると、仮想網エージェントは必要であれば性能を維持・回復するために

再構成を実施する。このような手順で、サービス網のオペレータは自身の仮想網を運用する。

3.9 アーキテクチャの実装と評価

3.9.1 評価の目的と範囲

提案アーキテクチャの実現性と有効性を確認するため、上述の設計に基づいてプロトタイプシステムを実装するとともに、実網での実証実験を実施した。本評価の目的と評価の範囲は以下の通りである。

1. 提案アーキテクチャの機能分担の有効性を確認するための定性評価
2. 設計の妥当性を確認するためのプロトタイプ実装と実験網での動作確認
3. ネットワークの安定性や環境変化への頑強性を評価するための、自己組織化型 VNT をアプリケーションとして広域実験網での実証実験

3.9.2 提案アプローチの定性評価

提案アーキテクチャの機能分担の有効性を確認するための机上での定性評価を実施する。ネットワーク仮想化技術には環境変化への適応性を実現するためのトポロジ最適化機能を提供しつつ、完全な隔離と可制御性を担保するには過度な帯域利用を制限する資源割当機能が必要である。ここで、トポロジ最適化機能は環境変化への迅速な反応を達成すべきであり、資源割当機能は多数の仮想網を収容するための安定性とスケール性を担保する必要がある。

実現には 3 つのアプローチが考えられる。1 番目のアプローチは分散アプローチ (distributed approach) である。分散アプローチでは完全な物理網資源のビューが全ての仮想網に提供され、全資源を仮想網間で融通して利用する。資源利用に関する制限は仮想網には課されない。したがって、各仮想網は独立して動作することができるが、安定性のためには他の仮想網と協調した振る舞いが要求される。2 番目のアプローチは集中アプローチ (centralized approach) である。集中アプローチでは資源制御管理機能はインフラプロバイダー側に配備される。インフラプロバイダー

表 3.2: 3 つのアプローチの比較

Approach	**Isolation**	**Controllability**	**Responsiveness**	**Scalability**
Distributed	−	−	+	+
Centralized	+		−	−
Proposed	+	+		+

*表において”+”と”−”はそれぞれ良い能力、悪い能力を示している。印がないものは平均的な能力であることを示す。

は各仮想網のトポロジ生成と再最適化に責任を持つ。3 番目のアプローチは本提案のハイブリッドアプローチ (hybrid approach) である。提案アプローチでは、インフラ側は資源配分のみに責任を持ち、トポロジ最適化機能は各仮想網にオフロードする。

3 つのアプローチの定性的な評価を表 3.2 にまとめる。3 つのアプローチを隔離 (isolation)、可制御性 (controllability)、即応性 (responsiveness)、そしてスケール (scalability) の観点で評価した。ここで、本研究において実装容易性や性能は機能配備とは関連性が低いため、本評価の指標からは除外している。分散アプローチは、集中制御的な機構を持たないためスケール性と即応性には優れるものの、隔離や可制御性を実現することができない。次に集中アプローチは、他の仮想網への影響を最小化するための全ての制御を集中的に実施するために隔離に優れている。しかし、インフラ側に集中的に機能を配備するため、スケール性と即応性を実現することができない。提案アプローチは 2 つのアプローチの利点を合わせた性質を持つ。性能の隔離を実現するために、インフラは資源割当の権限を保持する。したがって、各仮想網は性能を維持するために必要な帯域を利用することができ、同時にインフラと仮想網の双方が資源配分とトポロジ再最適化に関する可制御性を保持している。資源制御のオーバーヘッドは主にトポロジ制御にあり、特に収容する仮想網数に大きく依存する。提案アプローチではトポロジ制御機能は仮想網オペレータにオフロードされているため、優れた即応性とスケール性を達成することができる。

最後に提案アーキテクチャの利点をまとめる。主な特長と利点は次のようにまとめられる;

- 各波長資源はインフラプロバイダにより、同時には 1 つの仮想網に占有的に割り当てるため、仮想網間の予期しない資源競合を引き起

こすことなく完全な隔離を実現可能

- 環境変化が発生した際のインフラ網の頑強性を実現するために仮想網への資源割当と VNT を動的に最適化する
- 資源競合を解決するために、提案アプローチは仮想網同士、およびインフラ網と仮想網間の両方において直接の相互作用を必要しないため制御オーバーヘッドとネットワークの安定性向上を達成可能

3.9.3 構成要素の動作確認

提案した設計に基づき関連システムの実装を行うとともに、実験網においてネットワーク仮想化の基本機能の実証を行った。物理網マネージャは CentOS 5.3 ベースの Linux サーバでカーネルバージョンは 2.6.18 を用いた。物理網マネージャと仮想網エージェント間の通信プロトコルには、実装の容易性を考慮して CORBA (common object request broker architecture) を採用した。評価で用いた実験網は商用利用されている 4 台の IP ルータと 4 台の OXC、物理網マネージャ、仮想網エージェント、トラヒック生成装置で構成している (図 3.6)。

ルータは以下の機能を持つ。

- GMPLS 機能
- 仮想ルータ機能

光ネットワークは GMPLS により制御されている。ファイバトポロジは GMPLS OSPF-TE により広告される。物理網マネージャは、ルータと GMPLS OSPF-TE の隣接関係を構築し、VNT 計算のためのファイバトポロジ情報を取得する。L1 パスの設定・削除はルータ間の RSVP (resource reservation protocol)-TE により実行される。物理網マネージャが新たな L1 パスの設定を決定すると、そのためのルータコンフィグを設定する。ルータは GMPLS インスタンスと IP/MPLS インスタンスを持たなくてはならない。仮想ルータ機能はルータが複数のルーチングインスタンスを保持することを可能とする。もし、あるユーザが L1 パスを共有した場合、仮想リンクは複数の IP/MPLS インスタンスに割りつけられる。

次に OXC は光スイッチと OXC マネージャで構成されている。OXC 自体は IP/MPLS インスタンスを持つ必要がなく、GMPLS インスタンスのみを持つ。ルータや他の OXC とは GMPLS OSPF-TE と RSVP-TE によ

り通信する。OXC コントローラは光スイッチを制御している。この実験網では全光型光スイッチが用いられた。

仮想網エージェントのプロトタイプ実装は図 3.7 に示す GUI (graphical user interface) を提供する。仮想網エージェントのシステムも CentOS ベースの Linux サーバで構成されているが、GUI システムは Windows PC 上で動作している。GUI を通して、仮想網のオペレータは配分された資源や VNT、トラヒック状態などネットワークマップ上で様々な情報を閲覧することができる。さらに単純なマウス操作のみで L1 と MPLS パスの設定や変更、さらには VNT 再構成といった機能を実施することができる。実証実験は、マルチレイヤで構成された GMPLS ベースのネットワークにおいて、オペレータがいかに容易に VNT を構築し、最適化できるかを示すことを主眼としている。

GUI を用いて、まず各仮想網に対して資源を配分するオペレーションを示す。図 3.7 において、GUI の右下は配分された資源、つまり光ネットワーク上の波長リンクの一部を示している。資源配分を完了した後、手動で波長リンクに沿って線を引くことで L1 パスを設定することができる。この操作に対応して、IP リンクが GUI の上部の IP レイヤの部分ネットワークトポロジビュー上に瞬時にあらわれる。IP リンクに沿って MPLS パスを描くことで、MPLS パスを開通できる。配分資源と IP レイヤの部分ネットワークのビューの双方において、経路変更はドラッグ&ドロップで実行可能である。最後に、VNT 上での完全自律型の再構成機能を実証する。ここで、トラヒック生成装置からパケットをルータに送信する。トラヒック行列の変化に追従して VNT が再構成されることを確認する。

VNT 再構成が昼夜のトラヒック増減を模擬したトラヒック変動が実験網上に発生した際に VNT 再構成が実行されたことを確認した。環境変化への適応性を実現するため、仮想網エージェントは仮想リンク上のリンク利用率が閾値を超過したことを検出し、輻輳が緩和されるまで仮想リンク内の MPLS パスを順次、利用率の低いリンクに経路変更した。仮想網数については、9 仮想網を物理網上に生成して、ネットワークの安定性に問題ないことを確認した。

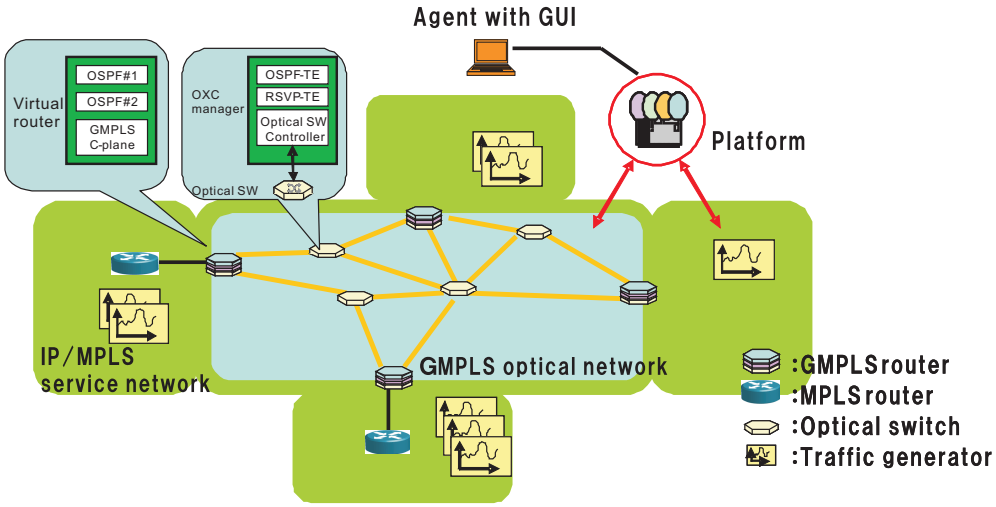


図 3.6: 実験網の構成

3.9.4 広域網での実証実験

評価の目的

最後に広域網での実証実験の結果について報告する。クラウドコンピューティングや IoT 等の急速な普及により、サービス網に対してコア網が可制御性や環境変動への適応性を提供することが求められる。最近、コア網を対象としたネットワーク仮想化技術に関する研究プロジェクトが開始された [20,21]。GEYSERS [21] は計算機資源と組み合わせて、GMPLS ベースの光ネットワークの動的なプロビジョニングを実現するためのアーキテクチャの確立を目指している。しかし、彼らの研究はサービスデリバリープラットフォームに焦点をあてており、予期しない環境変化が発生した際の適応性、特にトポロジ再構成については検討していない。ここでのポイントは IP/MPLS レイヤと L1 で構成されるマルチレイヤのコア網において、いかに環境変化に対する頑強性と適応性を実現するかという点である。実現するアーキテクチャについては本章記載の通りである。また、ソフトウエアによるトランスポート網制御アーキテクチャとしては、著者らの研究グループにより SDTN (Software Defined Transport Network) が提案されている [5, 22, 23]。

ここでは、頑強性と適応性を実現する技術として、mSON (managed self-organizing network) [13, 14] をアプリケーションとした関連システム

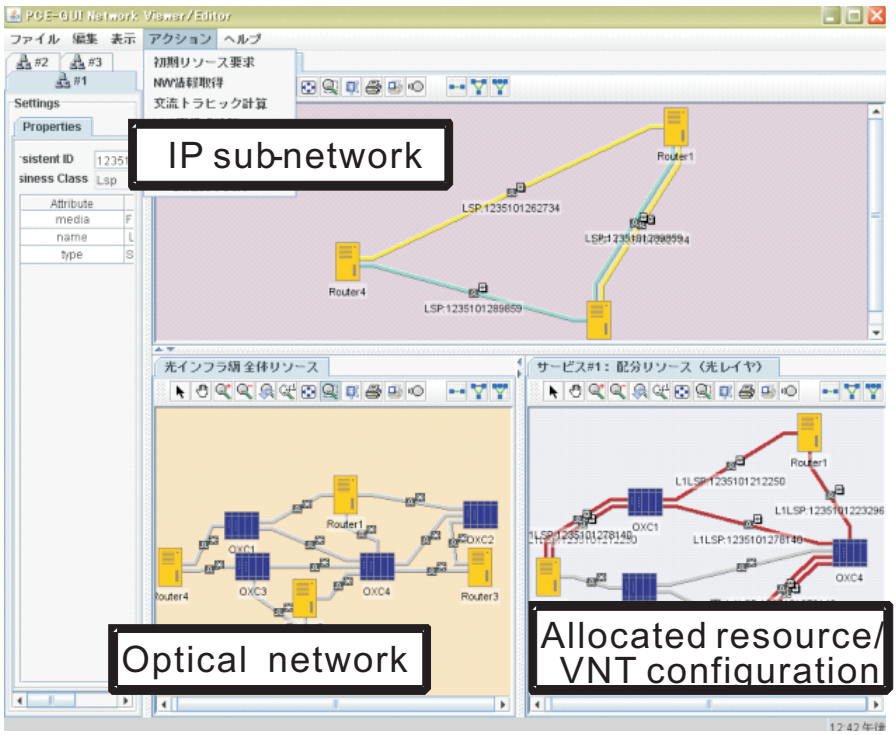


図 3.7: 仮想網オペレーション用 GUI ツール

の設計と実装について述べる。mSON の基本アイデアは、生物システムに着想を得た自己組織化技術を VNT 制御に組み入れることである。このことにより、最小限の集中制御で頑強性や適応性を実現することができる。既に資源管理機構のための自己組織化制御アルゴリズムの開発を完了している。mSON の概念を実証するためには、次の課題を明らかにする必要がある。

- mSON を実現するためには、既存のコア網にどのような機能構成要素を加える必要があるか?
- 制御のスケール性と即応性の観点でどのアーキテクチャ上の構成要素がボトルネックとなるか？

ここでは、新たに mSON のための物理網マネージャ(SDTN controller)を新たに開発し、頑強な自己組織化型 VNT 制御のためのプロトタイプシステムによる実証実験を実施する。本研究の貢献は、既存コア網に対す

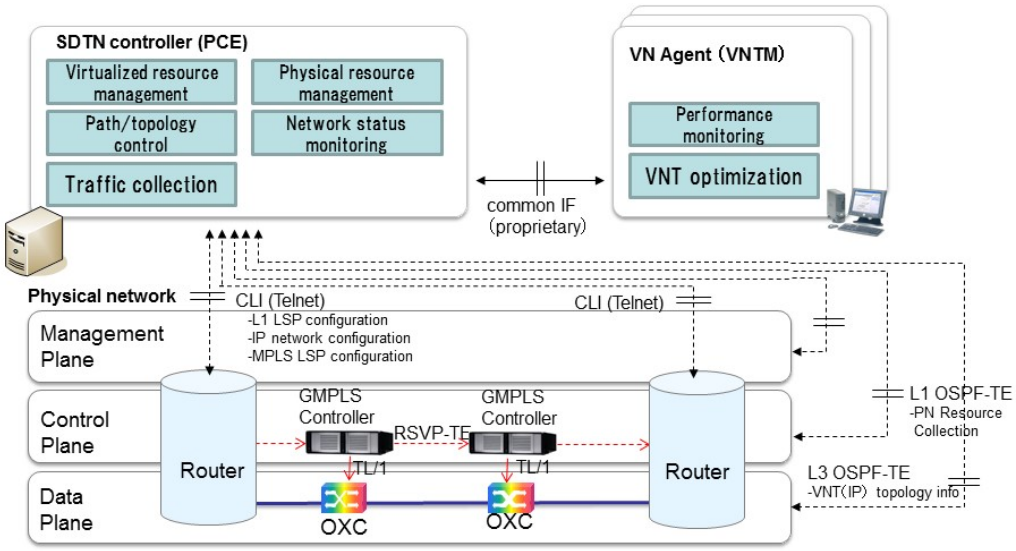


図 3.8: mSON を実現するソフトウエアアーキテクチャ

る追加機能を明確化した点と広域テストベッド網での実験を通して提案するシステム設計の実現性を実証した点にある。

システム設計と実装

提案アーキテクチャに基づいた mSON のシステム設計を提示する。提案する設計アプローチは既存コア網に対して拡張を最小にして実装することである。

まず、最初にネットワークおよび mSON について説明する。既存の GMPLS ルータと OXC は、自己組織化型 VNT 制御を実装するのに十分なプログラマビリティと可制御性を提供していない。この課題に対処するため、標準化団体 IETF において PCE アーキテクチャが提案されている [25]。物理網上の MPLS と L1 の LSP は GMPLS 技術により制御され、トポロ

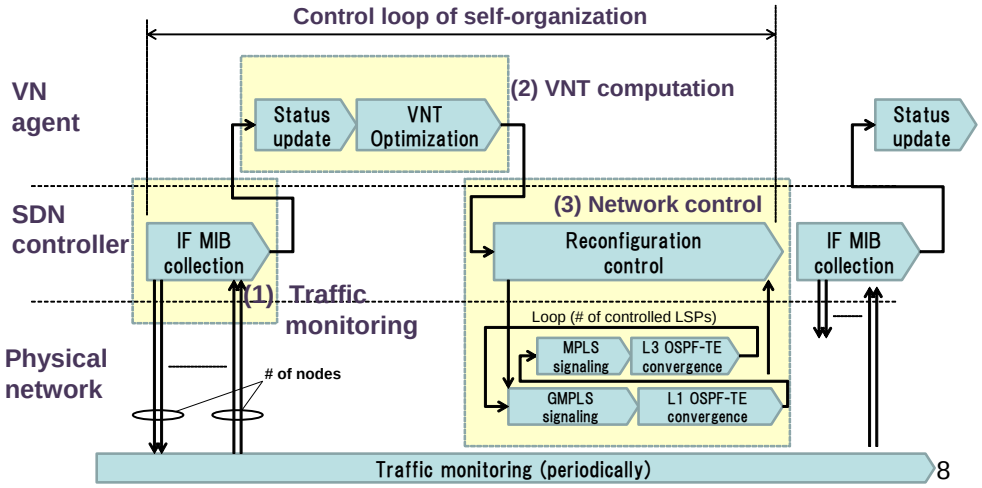


図 3.9: 制御シーケンス

ジ最適化や資源管理など先進的なトラヒックエンジニアリング機能は物理網マネージャを含む網外に配備されるサーバベースで実装している。

次に、mSON の概要について説明する。mSON は仮想網ユーザが、十分な環境変化への適応性を担保しつつ、高性能な仮想網の構築を可能とする。システム全体は、物理網、物理網マネージャ (SDTN controller)、仮想網、仮想網エージェントである (図 3.8)。物理網マネージャと仮想網エージェントは IETF PCE アーキテクチャにおける PCE と VNTM (VNT manager) に対応する。

さらに、制御サーバへの要求条件を整理した上で設計アプローチを検討する。要求条件を整理すると次のようになる。

1) 輻輳や故障などのネットワーク状態変化を検出できること

2) ネットワーク状態変化に対応して VNT を最適化できること

3) LSP を追加･削除することで現在の VNT から新たに計算された VNT へ移行できること

4) IP ベースの仮想網のオペレーションに必要なルータコンフィグ (例えば新たに追加された論理リンクに対して IP アドレスを付与、など) を更新可能なこと

提案するシステム設計は、IETF PCE アーキテクチャをベースにしており、要求条件 3) は仮想網エージェントに実装され、他の 3 つの要求条件については物理網マネージャに実装されている。本設計の妥当性については今回の実証実験の中で検証する。

最後に制御サーバの設計を示す。物理網マネージャは IP ルータの仮想ルータ機能と組み合わせてネットワーク仮想化機能を提供する。仮想網エージェントはネットワーク性能を維持するために更新された情報を用いて最適な VNT を計算する。VNT の再構成は、ベンダ依存型の CLI (command line interface) を通じて LSP 設定・削除コマンドを送信することで実行される。VNT 再構成の完了は L1/L3 OSPF-TE により物理網マネージャに通知される。これが自己組織型 VNT 制御の基本サイクルである (図 3.9)。予期しないイベントに対する適応性は基本的には本制御サイクルの持続時間によって決定される。この点については、著者らによる世界初の実証実験で評価する。

予期しないネットワーク変化に適応するために、各仮想網はルーチングとトポロジの決定について可制御性を保持すべきである。新たな環境に対して最適な VNT を計算するために、計算負荷が低い自己組織化制御アルゴリズム [13] を採用した。採用したアルゴリズムは網内の論理リンクの最大リンク利用率のみで動作可能である。仮想網エージェントは定期的に物理網マネージャからリンク負荷を含むネットワーク状態情報を収集し、観測されたリンク負荷に基づいて新たな VNT を計算する。このようにして、物理網マネージャと VNT エージェントは、頑強かつ安定なネットワーク仮想化サービスのための自己組織化型 VNT 制御機能を提供する。

JGN-X での実証実験

観測されたトラヒック情報をもとに輻輳回避を実現する世界初の自己組織化型 VNT 制御の実証実験を JGN-X [26] 上で実施した (図 3.10)。本実験の目的は次の通りである。

1. 予期しないトラヒック変化を示す商用トラヒックに対する適応性を実証する。

2. さらに、提案するシステム設計の妥当性を検証する。特にスケール性と適応性を向上させるためのアーキテクチャ上の改善点を抽出するための機能配備を検証する。

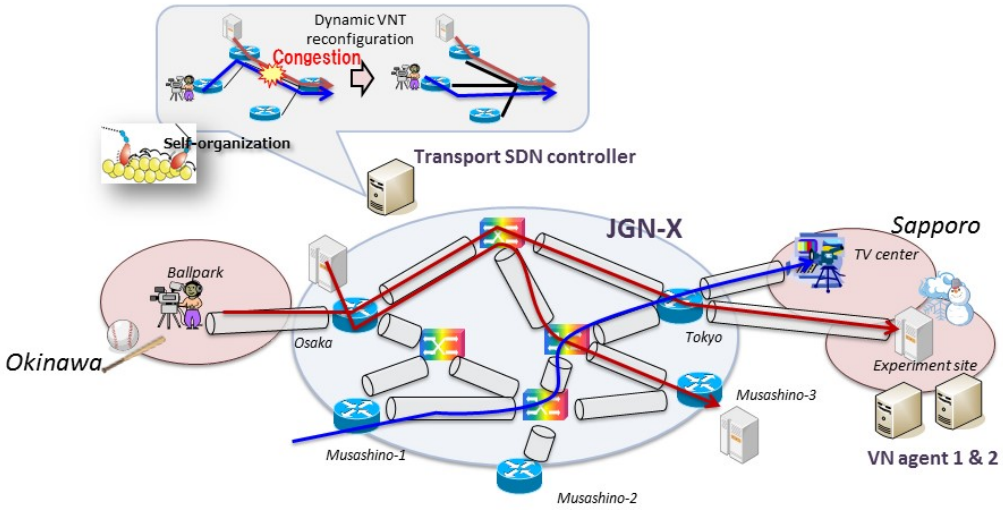


図 3.10: 実証実験ネットワーク JGN-X

2 つの仮想網が物理網上に構築され、各仮想網には仮想網エージェントが接続されている。上述の 2 つの目的に対応して 2 つの実験を実施した。実験では GMPLS で制御される 5 台の商用 IP ルータと 4 台の OXC で構成される物理網を用いた。

最初の実験では、JGN-X 上に動的に構築された 2 仮想網に対して、仮想網エージェントにより自己組織化型 VNT 制御を実施した。大容量の背景トラヒックを重畳した HDTV 放送トラヒックに対する mSON の適応性を調査した。放送トラヒックは沖縄から札幌まで伝送された (距離は約 2200km)。背景トラヒックの変動により、JGN-X 上のリンクに輻輳を発生させた。各仮想網の最適化の周期を 180 秒に設定した (図 3.9 の control loop に対応)。物理網マネージャにより輻輳が検出され、仮想網エージェントによる mSON の機構を用いて適切に輻輳が緩和された。しかし、現行のプロトタイプシステムでは約 1 時間の時間を要した。

表 3.3: 処理時間の分析

Phase	**Process**	**Time**
(1) Traffic monitoring	IF MIB collection	2.9 s
(2) VNT computation	Status update	<< 0.1 s
	VNT optimization	<< 0.1 s
(3) Network control	GMPLS signaling (per LSP)	16.6 s
	MPLS signaling (per LSP)	5.5 s
	L1 OSPF-TE convergence	7.4 s
	L3 OSPF-TE convergence	5.3 s

2 番目の実験では、提案するシステム設計の性能上のボトルネックを調査するために各制御フェーズにおける処理時間を評価した。結果を表 3.3 に示す。LSP 設定削除のための MPLS/GMPLS signaling および残余帯域とトポロジ情報を更新するための OSPF convergence がボトルネックであることを確認した。さらに、シミュレーションベースの実験と組み合わせて、提案するシステム設計のスケール性を評価した (図 3.11)。100 ノードのネットワークでは、1 つの VNT 再構成の処理に約 20 分を要する。この処理時間は輻輳に対するオンライン制御としては禁止的である。処理時間のうち、90 %以上をネットワーク制御に要していた。OSPF convergence 時間については、SNMP 等の集中型の情報収集機構を採用することで短縮することができる。一方で、シグナリングの処理時間は物理ノードの転送テーブルやクロスコネクト設定の変更を含んでいるため、高速化は難しい。しかし、中継ノードが異なる複数 LSP の設定・削除を同時並行的に実施することで、性能を改善することが可能である。このような改善を実装することで、VNT 再構成時間は数分にまで短縮できる。

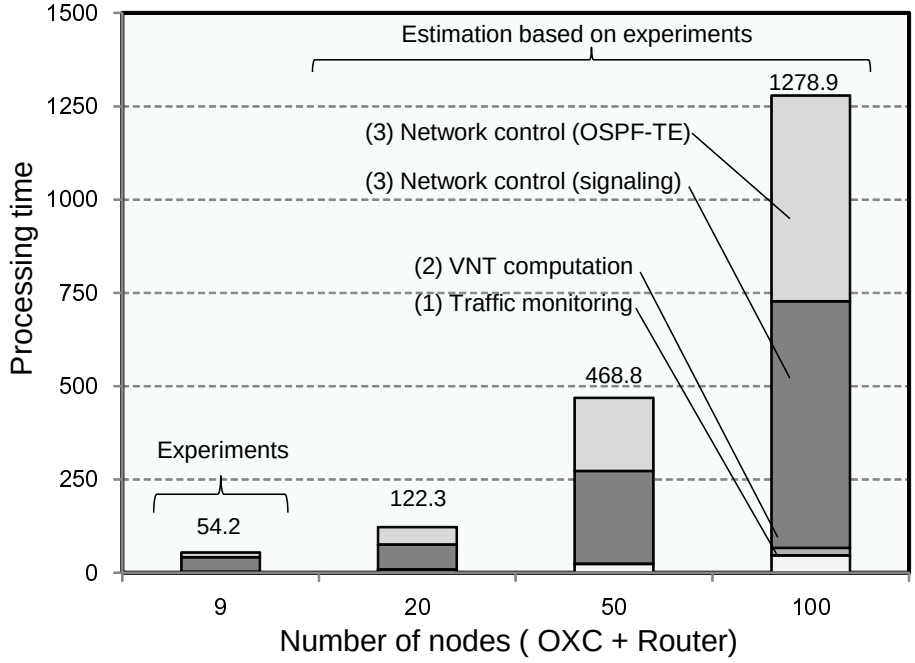


図 3.11: スケール性の評価

3.10 まとめ

本章では、光ネットワークの上に展開するネットワーク仮想化アーキテクチャを提案した。提案アーキテクチャでは、高性能を実現するために仮想網が光ネットワークの資源を利用可能とするとともに、環境変化に柔軟に適応するため各仮想網が独立して VNT と呼ばれる論理トポロジを動的に最適化することを可能とした。これにより仮想網に対してパケットベースのネットワーク仮想化技術では実現できない高品質と高性能なサービスを提供することができる。

提案アーキテクチャの特長と利点は次のようにまとめられる; 1) 各波長資源はインフラプロバイダーにより、同時には 1 つの仮想網に占有的に割り当てるため、仮想網間の予期しない資源競合を引き起こすことなく完全な隔離を実現可能、2) 環境変化が発生した際のインフラ網の頑強性と資源利用効率を改善するために仮想網への資源割当と仮想網トポロジ構成は動的に再最適化する、3) 資源競合を解決するため、提案アプローチでは仮想網同士、およびインフラ網と仮想網間の両方において直接の

相互作用を必要しないため制御オーバーヘッドとネットワークの安定性向上を達成可能である。

提案アーキテクチャの実現性と有効性を評価するため、ソフトウエアによる設計・実装と実験網による実証実験を実施した。設計では、既存の GMPLS プロトコルへの機能追加を行うことなく、ネットワーク仮想化を実現するサーバ設計を提案した。さらに仮想網オペレータが、高性能な光ネットワークを自由にかつ容易に運用制御することを可能とするための XML ベースのインターフェイスを規定した。提案した設計については、ソフトウエアに実装するとともに、実験網による動作確認を実施し、有効性を確認した。

さらに提案アーキテクチャにおいて予期しない環境変化に対する頑強性向上の効果を確認するため、アプリケーションとして自己組織化型 VNT 制御アルゴリズムを実装し、広域実験網 JGN-X 上での実証実験を実施した。複数仮想網が独立して、観測されたトラヒックに基づき自己組織化型のネットワーク制御を安定して実行できることを確認した。さらにスケール性と即応性を改善するために、物理網マネージャに、1) 集中的なトポロジ情報収集する機構、2) LSP 制御を同時並行的に実施する機構を組み込んだ。以上の評価結果から、提案アーキテクチャに実現性を確認するとともに、環境変化に対して頑強な高性能なネットワーク仮想化サービスを提供可能なことを実証した。

参考文献

[1] Takashi Miyamura, Shohei Kamamura, Kohei Shiomoto, “Policy-based resource management in virtual network environment,” 2010 International Conference on Network and Service Management (CNSM), pp. 282-285, Oct. 2010

[2] T. Miyamura, A. Masuda, K. Shiomoto, “High-performance network virtualisation for multilayer GMPLS networks,” International Journal of Communication Networks and Distributed Systems, Volume 6, Issue 3, Apr. 2011.

[3] Takashi Miyamura, Shin’ichi Arakawa, Yuichi Ohsita, Kohei Shiomoto, Shohei Kamamura, Masayuki Murata,” Dynamic resource allocation mechanism for managed self-organization,” Network Operations and Management Symposium (APNOMS), 2011 13th Asia-Pacific, Sep. 2011.

[4] Takashi Miyamura, Yuichi Ohsita, Shohei Kamamura, Daisaku Shimazaki, Yuki Koizumi, Shin’ichi Arakawa, Kohei Shiomoto, Masayuki Murata, ” Management of Managed Self-Organizing Network in Network Virtualization Environment,” World Telecommunications Congress (WTC), 2012, Mar. 2012.

[5] Takashi Miyamura, Daisaku Shimazaki, Shin’ichi Arakawa, Yuki Koizumi, Shohei Kamamura, Koji Sasayama, Kohei Shiomoto, Masayuki Murata, “Experimental demonstration of adaptive virtual network topology control mechanism based on SDTN architecture,” Proc. Optical Communication (ECOC 2013), 39th European Conference and Exhibition on, Sep. 2013.

[6] ”PlanetLab”, http://www.planet-lab.org/

[7] J. Turner, et. Al., "Supercharging PlanetLab - A High Performance, Multi-Application, Overlay Network Platform,"in Proc. of ACM Sigcomm 2007, Kyoto, Japan, August 2007.

[8] Nick Feamster, Lixin Gao and Jennifer Rexford, "How to lease the internet in your spare time", ACM SIGCOMM Computer Communication Review, Volume 37 , Issue 1, pp. 61-64, January 2007.

[9] A. Nakao et al., "CoreLab: an emerging network testbed employing hosted virtual machine monitor," in Proc. of 2008 ACM CoNEXT Conference, Madrid, Spain, December 2008.

[10] "Cisco IOS Software", http://www.cisco.com/

[11] "JUNOS Software", http://www.juniper.net/

[12] S. Urushidani, et. al.,"Implementation and evaluation of layer-1 bandwidth-on-demand capabilities in SINET3", in Proc. of IEEE ICC 2009, Dresden, Germany, June 2009.

[13] Yuki Koizumi, Takashi Miyamura, Shin'ichi Arakawa, Eiji Oki, Kohei Shiomoto, Masayuki Murata, "Adaptive Virtual Network Topology Control Based on Attractor Selection," IEEE JLT, Volume: 28, Issue: 11, Nov. 2010.

[14] Yuki Koizumi, Takashi Miyamura, Sin'ichi Arakawa, Eiji Oki, Kohei Shiomoto, and Masayuki Murata, "Stability of virtual network topology control for overlay routing services," OSA Journal of Optical Networking, vol. 7, pp. 704-719, Jul. 2008.

[15] Yuichi Ohsita, Takashi Miyamura, Shin'ichi Arakawa, Shingo Ata, Eiji Oki, Kohei Shiomoto, Masayuki Murata, "Gradually Reconfiguring Virtual Network Topologies Based on Estimated Traffic Matrices," IEEE/ACM Transactions on Networking, Volume: 18, Issue: 1, Jan. 2010.

[16] K. Shiomoto, E. Oki, W. Imajuku, S. Okamoto, and N. Yamanaka, "Distributed virtual network topology control mechanism

in GMPLS-based multi-layer/region networks," IEEE Journal of Selected Areas in Communications, vol. 21, no. 8, pp. 1254-1262, October 2003.

[17] J. Wey et al, "Network control and management for the next generation Internet," IEICE Trans. Commun., vol. E83-B, no. 10, October 2000, pp. 2191-2209

[18] E. Mannie (Ed.), "Generalized Multi-Protocol Label Switching (GMPLS) Architecture," IETF, RFC 3945, October 2004.

[19] K. Kompella and Y. Rekhter (Ed.), "OSPF Extensions in Support of Generalized Multi-Protocol Label Switching (GMPLS)," IETF, RFC 4203, October 2005.

[20] X. Hesselbach, E. Grasa, S. Figuerola, "Create your own IP network using other people's routers: The Manticore II project," Terena TNC, Malaga, Spain, 2009.

[21] L. M. Contreras, Victor Lopez, Oscar Gonzalez De Dios, Alejandro Tovar, Fernando Munoz, Amanda Azanon, Juan Pedro Fernandez-Palacios, and Jesus Folgueira, "Toward cloud-ready transport networks ," IEEE Commun. Mag., pp. 48-55, Sep. 2012.

[22] Akeo Masuda, Akinori Isogai, Takashi Miyamura, and Kohei Shiomoto, "Experiments of operating mutiple virtual networks over IP-optical network," Proc. ECOC 2011, Sep. 2011.

[23] Akeo Masuda, Akinori Isogai, Takashi Miyamura, Kohei Shiomoto, and Atsushi Hiramatsu, "Application-defined control of virtual networks over IP-optical networks," Proc. CNSM, pp. 1-6, Oct. 2011.

[24] E. Mannie, IETF, RFC 3945, October 2004.

[25] E. Oki, IETF, RFC 5623, September 2009.

[26] JGN-X, NICT, www.jgn.nict.go.jp

第4章　ネットワークエッジ機能の仮想化を考慮した光集線網の設計手法

4.1　概要

ネットワーク仮想化技術 (network functions virtualization, NFV) により、従来は専用装置で実現されていたネットワークエッジ機能を汎用サーバ上の仮想化機能 (virtual network function, VNF) として実現する研究が進められている。NFV によりネットワークエッジ機能を網内のサーバ上に自由に配置することが可能となり、ネットワーク資源利用の効率化やトラヒック需要変動への耐性を高めることができる。メトロ集線網はアクセス網の OLT (optical line terminal) と VNF を収容するサーバ間の接続性を提供するが、OLT の配置や物理トポロジなどメトロ集線網の情報を考慮して、VNF 配置を決定しないと、ネットワーク資源利用効率やサービス品質の低下といった問題が発生する。VNF 配置を考慮したメトロ集線網の設計手法の確立はネットワークコスト、サービス品質の面からも重要な課題である。VNF 配置を考慮したネットワーク設計問題については数多くの研究がなされているが、光集線網特有の条件を考慮した設計問題については検討されていなかった。そこで本論文では、VNF 配置を考慮した光集線網の設計手法を提案する [1–4]。提案手法によりネットワークコストを最大約 21%、最大サーバ負荷を最大約 60%削減可能となるとともに、トラヒック変動に対する頑強性が向上することが分かった。

4.2　研究の背景

4K/8K 高精細映像配信サービス、IoT (internet of things)、モバイルデータ通信の普及により、大容量トラヒックを効率的かつより省電力に転

送することが求められている。メトロ集線網はアクセス網の多数の OLT からのトラヒックを集約して、コア網へと転送する役割を果たしている [5]。メトロ集線網により集約されたトラヒックはエッジルータにより、QoS や回線認証などネットワークエッジ機能の処理が実施される [6]。メトロ集線網は多数の装置で構成されているため、ネットワークコスト、消費電力およびサービス品質の観点でもメトロ集線網の資源最適化は重要な課題である。

大容量トラヒックを低消費電力で効率的に転送するため、中継ノードでの電気処理が不要な光集線網の研究開発が進められている。メトロ集線網のトラヒックはバースト性が高く、かつ収容対象の OLT 数が多いため、大容量トラヒックを効率的かつ省電力で効率的に転送するためには、複数 OLT で波長パスの資源を共用することが有効である。WDM リング網上の波長パスを TDM 技術により複数 OLT 間で共用する光集線網アーキテクチャの研究が進められている [7,8]。Carey ら [7] は動的再構成が可能な TDM-WDM PON (passive optical network) リング構成による光集線網を提案している。Hattori ら [8] は TDM 技術により、メトロ集線網の同一波長のパスを複数 OLT で共用するアーキテクチャを提案している。それぞれ DBA (dynamic bandwitdth allocation) [9] 等の TDM 技術により複数 OLT で波長パスの帯域を共用するアーキテクチャを採用している。ここで、図 4.1 に示す通り同一宛先の複数 OLT からのトラヒックで波長資源を共用するため、パストポロジとしては P2MP (point-to-multipoint) となる。

ネットワーク仮想化技術 (NFV) [10] により、ネットワークエッジ機能等を汎用サーバ上の仮想化機能 (VNF) として実現する研究が進められている [11,12]。従来のメトロ集線網では、エッジルータが収容するユーザは地理的条件等から固定的に決められているため、各エッジルータの収容ユーザ数、つまり処理すべきトラヒック量に偏りが生じやすく、ネットワーク全体のエッジルータ資源を有効に活用できないという課題があった。エッジルータが提供するネットワークエッジ機能を汎用サーバ上で実現することで、地域毎にトラヒック需要に偏りがある場合でもネットワーク全体の効率的な資源利用が期待できる。ここでメトロ集線網は網内の OLT と VNF を収容する各サーバとの接続性を提供する。したがって、VNF を収容するサーバの選択 (以下、VNF 配置と呼称する) はネットワークの資源利用効率に大きく影響する。つまり、トラヒック需要に加えて接続先の OLT の位置関係を考慮して VNF 配置を適切に設計しな

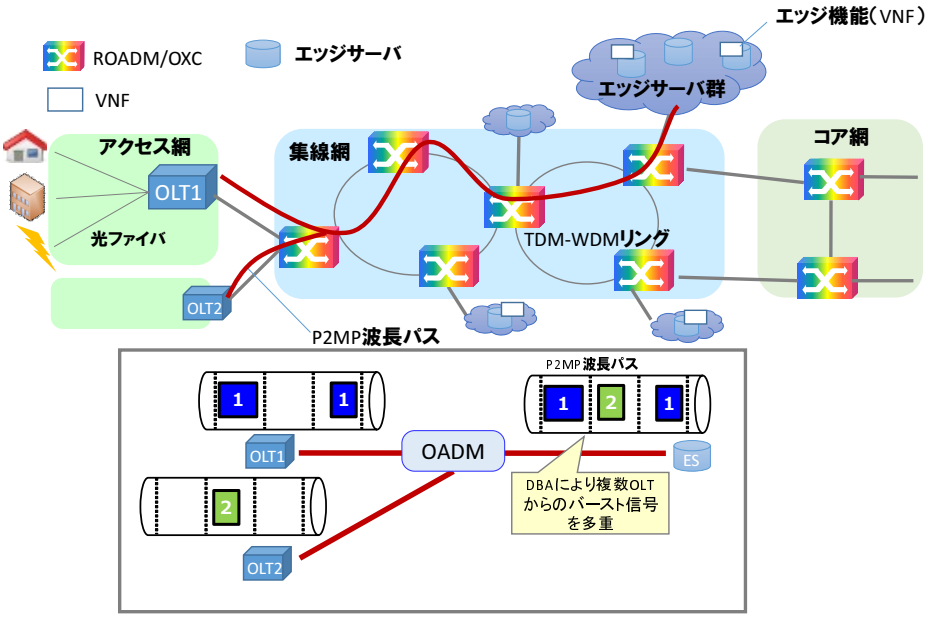


図 4.1: ネットワークエッジ仮想化を考慮した光集線網

いと、ネットワークの資源利用効率の低下、サービス品質低下、および消費電力の増大といった問題が発生する。

ネットワーク資源の効率的利用およびトラヒック需要変動を考慮した光集線網および VNF 配置の設計手法は重要な課題である。光集線網およびネットワークエッジ仮想化に関する従来研究 [7,8,11,12] では網アーキテクチャおよびシステム構成の研究であり、ネットワークの設計手法については言及していない。前述の通り、ネットワークの効率的な資源利用のためには、VNF 配置と物理網設計 (ここではメトロ集線網の設計) を独立して実施するのではなく、両者を統合して最適設計することが重要である。物理網と VNF 配置の統合設計としては、Lin ら [13] らによりゲーム理論を応用した設計が提案されている。しかし、[13] では、物理網として point-to-point 接続の波長ネットワークしか考慮しておらず、光集線網の重要な特徴である P2MP 波長パスを考慮していない。前述の通り多数の OLT を収容するメトロ集線網において、効率的にネットワークの資源を利用するためには、P2MP 波長パスの活用が重要である。

そこで本論文ではネットワークエッジ機能の仮想化を考慮した光集線網の設計手法について提案する。提案手法では、ネットワーク全体の資源利用効率と各地域のトラヒック需要を考慮して VNF を配置するサーバ

選択を決定するとともに、サーバ-OLT 間の P2MP 波長パスの経路を最適化する。提案手法ではネットワーク資源最適化を整数計画問題として定式化しており、VNF 配置と P2MP 波長パスの経路の最適解を算出することが可能である。トラヒック需要と光集線網上の網資源を考慮して網資源の配分を決定するため、トラヒック需要変動がある場合でも網全体の資源を有効に利用可能である。性能評価により、提案手法の有効性を定量的に評価するとともに、トラヒック需要変動に対する頑強性についても評価する。

4.3 関連研究

関連する研究としては、P2MP (point-to-multipoint) パス最適化に関する研究と VNF 配置最適化に関する研究がある。光 P2MP パスネットワークの最適化については数多くの研究がなされているが [15, 16]、波長パスの信号を中継ノードで分岐する光マルチキャスト網を扱っており、本稿で前提とする P2MP 波長パスを TDM 技術で帯域共用をする共用型 P2MP 波長パスモデルは扱っていない。また、これらの研究では VNF 配置など始点ノードを複数候補から選択する問題は扱っていない。

VNF 配置最適化はとしては Addis ら [17] の研究があるが、パケット網上での VNF chaining の経路最適化であり、アンダーレイネットワークとして P2MP パスは考慮されていていない。その他の VNF 配置最適化の研究も、IP 網上に VNF 等の仮想リソースをマッピングする研究 [13, 18, 19] が主であり、P2MP 波長パスを前提とした最適化の研究はなされていない。著者が知る限りでは、共用型 P2MP 波長パス網上での VNF 配置を最適化する問題はこれまでに研究されていない。

4.4 光集線網モデル

4.4.1 概要

本論文が前提とする光集線網モデルを図 4.2 に示す。光集線網では、従来のエッジルータが提供していたネットワークエッジ機能はエッジサーバ (edge server, ES) 上の VNF として実現されており、各 ES は複数の VNF を収容可能である。各 OLT に対してネットワークエッジ機能を提供する VNF が 1 つまたは複数生成される。光集線網は VNF を収容する

ES と対応する OLT 間の接続性を提供する必要がある。中間ノードでの同期が不要な OADM (optical add-drop multiplexer) モジュールで構成される TDM-WDM リング網を導入する。OLT は PON のトラヒックを集約して、ネットワークエッジ機能を提供する VNF が収容されている ES に波長パスを用いてトラヒックを転送する。光集線網における OADM は、入力された波長パスの信号のパススルー、ドロップ、分岐する役割を担う。ES では、受信されたトラヒックに対して、送信元の OLT 毎に対応する VNF に振り分けた上で、ネットワークエッジ機能の処理を適用し、コア網へとトラヒックを転送する。光集線網では、ES と該当 ES に収容される複数 OLT 間は同一波長の P2MP パスで接続される。各 OLT は独立にトラヒックを生成するため、OLT 側からのバースト信号の競合が発生する。バースト信号の競合を回避するため、DBA が ES および OLT に具備されている。本論文では、DBA による帯域共用を実現する P2MP パスを共用型 P2MP 波長パスと呼ぶ。

ネットワークエッジ機能を仮想化することで、各 OLT の接続先の ES をネットワーク上の複数の候補から選択可能となるため、ネットワーク設計の自由度が向上する。図 4.2 において、例 1 では 2 組の ES-OLT はそれぞれ共用型 P2MP 波長パスで接続されており、3 リンクのネットワーク資源と 2 ES を占有している。一方、例 2 では各 OLT に対応する VNF は同一の ES に収容され、ES-OLT 間は同一の共用型 P2MP 波長パスで接続されている。この例では、2 リンクと 1 ES を占有しており、消費するネットワーク資源は例 1 よりも少ないものの、サーバ資源の利用に偏りがある。このように ES-OLT 間を接続する共用型 P2MP 波長パスと ES への VNF 配置を適切に設計することは、ネットワーク資源の効率的利用やトラヒック需要変動への頑強性向上の観点から重要な課題である。

4.4.2 問題の定義

ここで本論文で解決したい問題について定義する。各 OLT からのトラヒック量は 1 波長の容量と比較すると十分に小さいため、複数の OLT で同一の波長パスを共用することで効率的に波長資源を利用することが重要である。トポロジ、リンク容量等の物理ネットワークの特性を考慮して、効率的に OLT 間で波長パスを共用できるように VNF 配置を決定しないと波長パスの利用効率が低下するという問題が発生する。波長パスの利用効率の低下はネットワークコストや消費電力の増大といった問題を

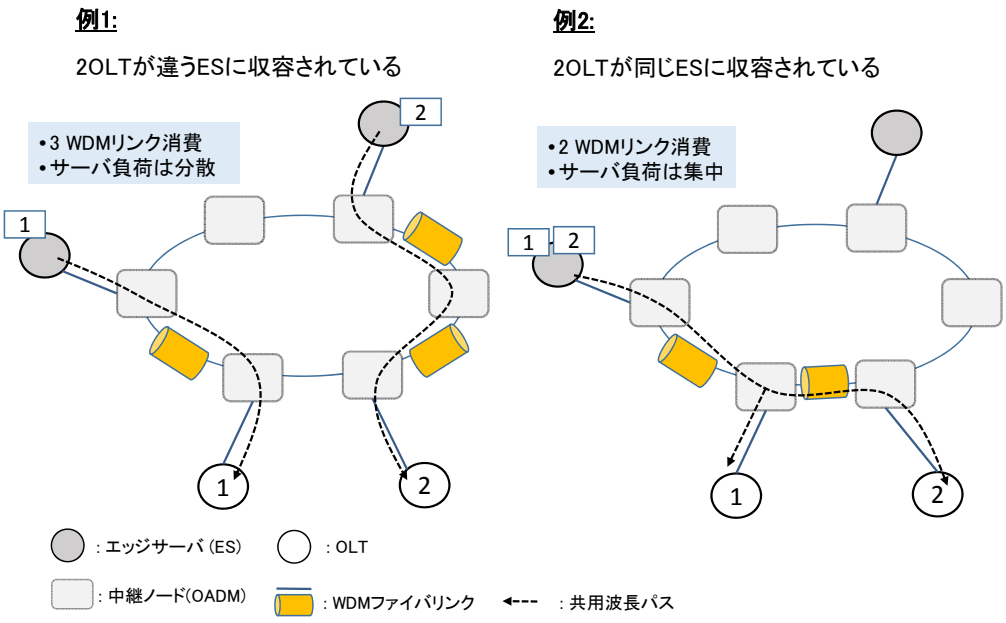


図 4.2: 光集線網における VNF 配置と共用型 P2MP 波長パス設計の例

生じさせる。そこで本論文では、波長パスの利用効率を最大化する VNF 配置および経路設計手法を提案する。

ES、OLT、OADM、および WDM リンクで構成される物理ネットワークと、各 OLT のトラヒック需要が与えられているという条件のもとで、ネットワークコストおよび ES の最大負荷を最小化する共用型 P2MP 波長パスの経路および VNF 配置を決定する。ここでネットワークコストは占有した WDM リンクの総和と定義し、ES の負荷とは各 ES に収容されている VNF のトラヒック需要の合計と定義する。ここで ES の最大負荷の最小化は突発的なトラヒック需要変動に対する頑強性向上の観点で重要である。メトロ集線網の特性として、トラヒックのバースト性が高いため、ネットワークの論理構成 (ここでは VNF 配置) を動的に変更してト

ラヒック変動に対応するアプローチは現実的でない。本論文では、各 ES に残余資源を十分に配備することでトラヒック変動に対する頑強性を向上させる。これにより、瞬時的にトラヒック量が変動してもサービス品質への影響を最小化できる。

図 4.3 の例では、光集線網は 3 ES、3 OLT、6 OADM および WDM リンクで構成されている。光集線網設計は大きく論理トポロジ設計と物理トポロジ設計で構成されている。論理トポロジ設計では、主に各 VNF を収容する ES を選択する問題を解決する。

ここでは 3 VNF を収容する ES を選択する。VNF 配置が決まると ES と OLT の論理的な接続構成が決まることとなる。次に物理トポロジ設計では、ES と OLT を接続する共用型 P2MP 波長パスの経路を設計する。ネットワークコストおよび ES 最大負荷を最小化するためには、トラヒック需要と物理ネットワークの特性を考慮して、VNF 配置と共用型 P2MP 波長パスの経路を設計する必要がある。ここで VNF の設定粒度として、例に示した各 OLT に対して 1 VNF のみ生成されるモデル（Non-bifurcation, NB）に加えて、1 OLT に対応する VNF を任意に分割して複数の ES に配置できるモデル（Bifurcation, BF）も考慮した設計手法を検討する。

4.5 提案手法

4.5.1 モデルの記述

まず、定式化のアプローチおよびネットワークモデルについて説明する。定式化のアプローチについて、上述の通り従来の P2MP パス最適化の定式化 [15] では、本研究が前提とする始点ノードの候補が複数ある VNF 配置問題には対応できない。始点ノード候補が複数存在する場合の P2P (point-to-point) パス経路最適化としては著者らに提案された Content-Aware Routing [21] がある。そこで [21] を拡張して VNF 配置および共用型 P2MP 波長パス経路の最適化を整数計画問題として定式化する。

次にネットワークモデルについて記述する。まず、定式化において変数の添字が複雑になるので以下の仮定を置く。

- m と n は物理ネットワーク内の物理リンクの端点を示す。
- i と j は論理および物理ネットワークの始点・終点ノードを示す。

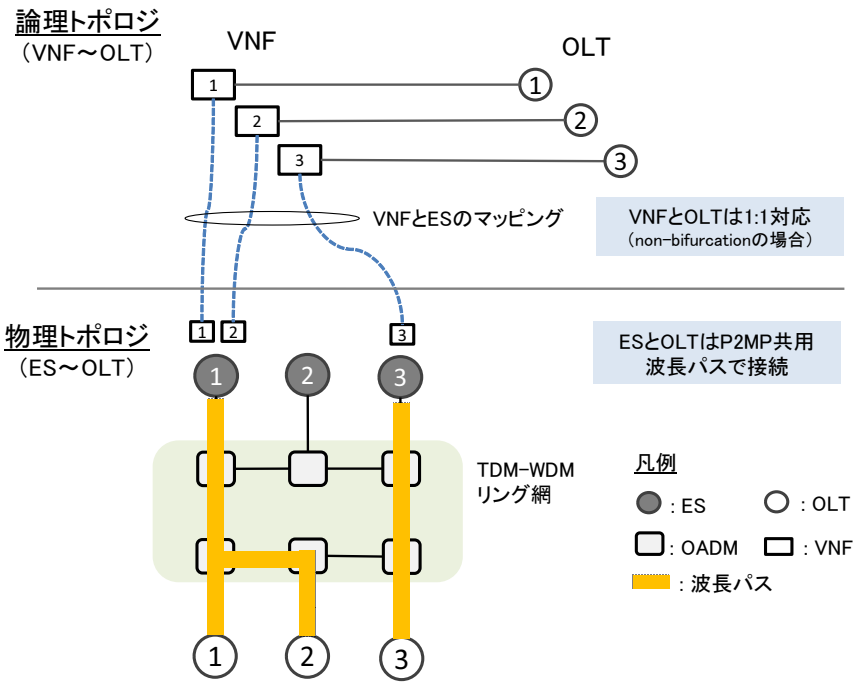


図 4.3: 論理トポロジと物理トポロジの関係

定数および変数については以下のように定義する。

定数の定義:

- E: 物理リンクの集合
- V: 物理ノードの集合
- V_{olt}: OLT の集合
- V_{es}: ES の集合
- V_{in}: OADM の集合
- V_{vnf}: VNF の集合
- E_{λ}: 物理リンクの最大波長数
- D_j: OLT j のトラヒック需要
- C_{λ}: 波長チャネルの容量 (Gbps)

- C_{es}: 各 ES の容量

変数の定義:

- l_{ij}: 論理リンク ij 上を流れるトラヒック量で 0 以上の実数
- c^{i}_{mn}: ES i を始点とする P2MP 波長パスが要求するリンク mn における波長数で 0 以上の整数
- p^{ij}_{mn}: ノード i からノード j への P2MP 波長パス上の論理的な P2P パス経路で 0 以上の整数
- x^{k}_{ij}: VNF k に関わるノード i からノード j のトラヒック経路

ネットワークをグラフ $G = (V, E)$ としてモデル化する。物理トポロジ設計について、共用型 P2MP 波長パスの経路と各物理リンクで占有する波長数は変数 c^{i}_{mn} と p^{ij}_{mn} により決定される。論理トポロジ設計に関して x^{k}_{ij} は VNF k の配置を表現する変数であり、

$$x^{k}_{ij} = \begin{cases} 1 & \text{OLT } j \text{ に対応する VNF } k \text{ が} \\ & \text{ES } i \text{ 上に配置されている。} \\ 0 & \text{上記以外} \end{cases}$$

で定義される。ただし、上記のケースは OLT と VNF が 1 : 1 対応の場合 (NB モデル) である。VNF を任意に分割可能な場合 (BF モデル) は、x^{k}_{ij} は 0 以上、1 以下の実数として定義され、x^{k}_{ij} の値は ES i 上に収容される VNF のトラヒック割合に相当する。また、変数 c^{i}_{mn} は共用型 P2MP 波長パスが各物理リンクで占有する波長数であり、0 以上の整数として定義される。変数 p^{ij}_{mn} については、共用型 P2MP 波長パスの経路を表現し、0 以上の整数として定義される。変数の値は物理ノード ij 間のパスがリンク mn を通過しない場合は 0、通過する場合は占有する波長数に相当する。

4.5.2 定式化

光集線網設計手法を整数計画問題として定式化する。提案手法では論理トポロジと物理トポロジを同時最適化する。目的関数はネットワークコストと各 ES 負荷の最大値の重み付け総和の最小化として定式化する。

目的関数:

$$\min \left(\sum_{k} \sum_{mn} c_{mn}^{k} + \alpha \cdot \max_{i} \sum_{k} \sum_{j} D_j \cdot x_{ij}^{k} \right) \tag{4.1}$$

制約条件: 物理トポロジ設計

$$\sum_{h} p_{mh}^{ij} - \sum_{h} p_{hn}^{ij} = \begin{cases} -\lceil l_{ij} \rceil & h \in V_{es} \\ \lceil l_{ij} \rceil & h \in V_{olt} \\ 0 & h \in V_{in} \end{cases}, \tag{4.2}$$

$$p_{mn}^{ij} \leq c_{mn}^{i}, \quad \forall i \in V_{es},\ \forall j \in V_{olt} \tag{4.3}$$

$$\sum_{h} c_{mh}^{i} - \sum_{h} c_{hn}^{i} \leq 0, \quad h \in V_{in} \tag{4.4}$$

$$c_{im}^{i} \geq \sum_{j} l_{ij}, \quad \forall i \in V_{es} \tag{4.5}$$

$$\sum_{i} c_{mn}^{i} \leq E_{\lambda}, \tag{4.6}$$

制約条件: 論理トポロジ設計

$$\sum_{k} \sum_{i} x_{ij}^{k} = 1, \quad \forall j \in V_{olt} \tag{4.7}$$

$$D_j \cdot x_{ij}^{k} \leq l_{ij} \cdot C_{\lambda}, \quad \forall i \in V_{es},\ \forall j \in V_{olt} \tag{4.8}$$

$$\sum_{k} \sum_{j} D_j \cdot x_{ij}^{k} \leq C_{es}, \quad \forall i \in V_{es} \tag{4.9}$$

式 (4.1) の第 1 項は占有した物理リンクの総和、第 2 項は ES 負荷の最大値である。式 (4.2) は物理ネットワークにおける ES-OLT 間のフロー保存則である。ここでパス p_{mn}^{ij} は実際に物理ネットワーク上に設定されるものではなく、[20] で定義される概念フローである。実際の P2MP 波長パスの経路および占有する波長数の計算には変数 c_{mn}^{i} が用いられる。式 (4.3)、(4.4)、(4.5) および (4.6) は P2MP 波長パスが占有する波長数に関する制約式である。式 (4.7) は VNF の ES への配置位置を決定するものであり、総和は 1 となる。式 (4.8) と式 (4.9) は論理トポロジ上のリンクと ES の容量に関する制約式である。

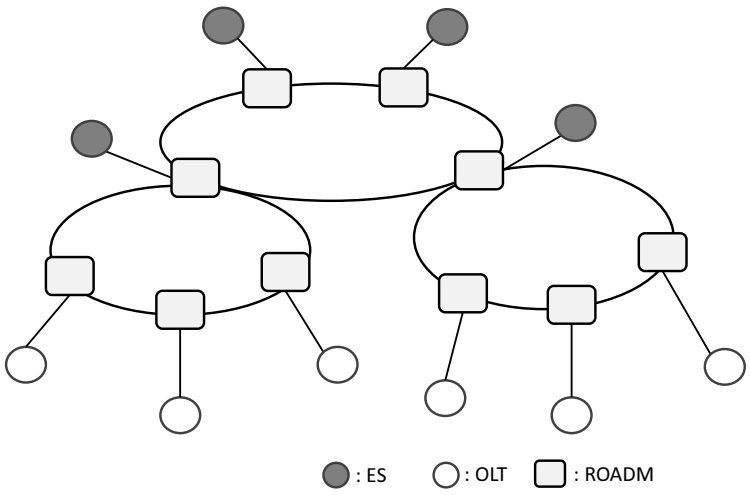


図 4.4: マルチリングネットワークトポロジ

4.6 性能評価

4.6.1 目的

提案手法の有効性と適用領域を明確化するため性能評価を実施する。評価には GLPK [22] を用いた。図 4.4、4.5 に示す通り、性能評価ではメトロ集線網で一般的なマルチリングトポロジとリング以外の代表的なトポロジとしてトーラストポロジを用いた。性能評価の目的は以下の通りである。

- VNF 最適配置の効果： VNF を最適配置することによるネットワークコストおよび最大 ES 負荷低減の効果の確認
- 適切な VNF の設定割合： NB モデルと BF モデルを比較評価し、1 OLT に割り当てる VNF の適切な割合を明確化
- トラヒック変動に対する頑強性： ネットワークエッジ機能を仮想化することによるトラヒック変動に対する頑強性の向上を確認
- サーバ数と最適配置の効果: VNF 配置の候補となるサーバ数と各設計手法の性能の関係を確認

性能評価で用いたパラメータについては、以下の通りである。

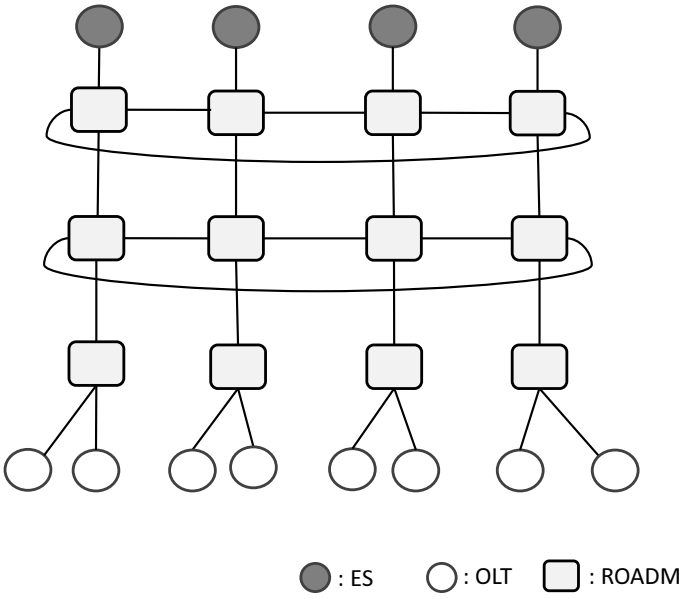


図 4.5: トーラスネットワークトポロジ

- 物理リンクの最大波長数 E_λ: 16
- 波長チャネルの容量 C_λ: 100 (Gbps)
- ES の容量 C_{es}: 500 (Gbps)

また、OLT j のトラヒック需要 D_j については、Zipf 分布 [23]

$$f(x) = b \cdot x^{-\beta} \quad (x = 1, \ldots, 6) \tag{4.10}$$

でトラヒックを生成した。

ここで式（4.1）におけるパラメータ α について説明する。α は提案手法の目的関数においてネットワークコストと最大サーバ負荷のつの指標の重みを決定するパラメータである。提案手法において α の値が増加させると、より最大サーバ負荷を最小化する方向となり、α の値を減少させるとネットワークコストを最小化する方向に最適化される。α の値とネットワークコストおよび最大サーバ負荷の関係について事前に評価を実施し、最大サーバ負荷の上昇を抑えつつ、適切にネットワークコストを削減可能な値として、本性能評価では α を 0.5 に設定した。

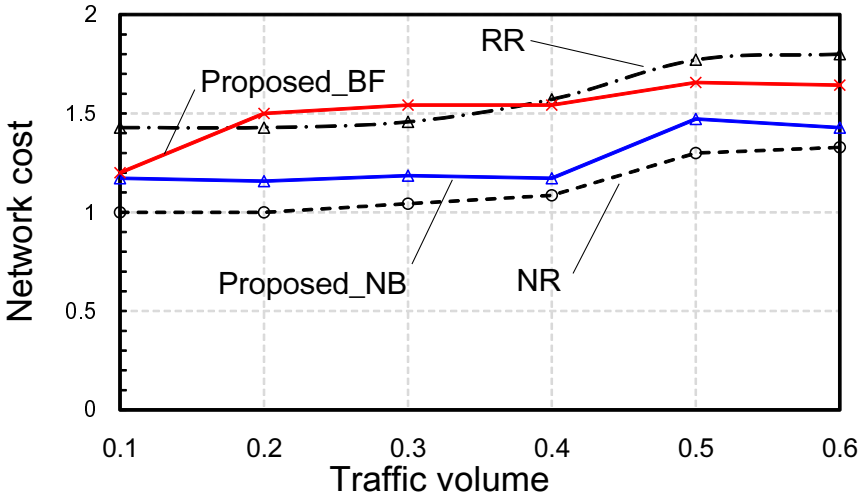


図 4.6: トラヒック量に対するネットワークコスト

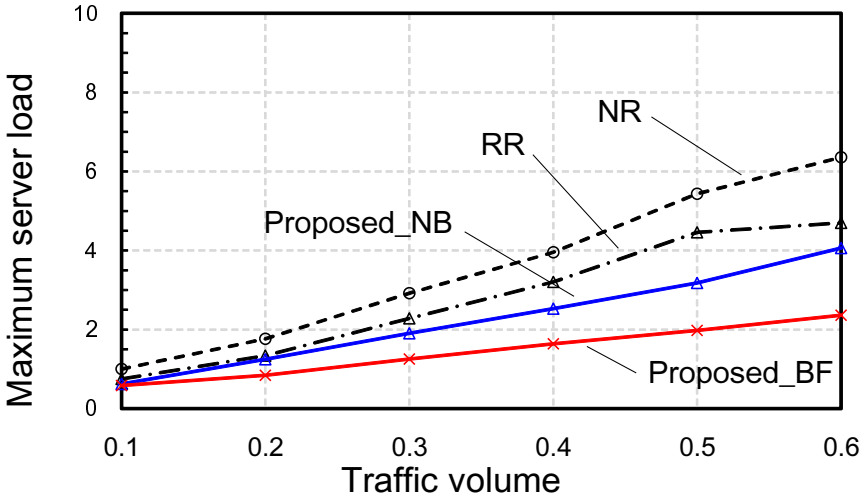


図 4.7: トラヒック量に対するネットワークコスト

4.6.2 VNF 最適配置の効果と VNF の設定割合

まず、提案手法の有効性として、VNF 最適配置の効果と適切な VNF 設定割合について調査した。各 OLT の平均トラヒック需要を 0.1〜0.6 (波長チャネルの容量で規格化) と変化させて、従来手法と提案手法 (NB 法、BF 法) を比較した。ここで、従来手法としては [21] にて提示されているサーバ選択手法として、最も近いサーバに VNF を配置する手法 (NR 法) と複数のサーバをラウンドロビンで選択する手法 (RR 法) の 2 方式を用いた。NR 法はサーバ負荷を考慮せず、OLT から最短のサーバを常に選択するため、ネットワークコストのベンチマークとしての位置づけられる。

図 4.6、4.7 に結果を示す。図 4.6 はネットワークコスト、図 4.7 は最大サーバ (ES) 負荷を比較評価した。各グラフとも縦軸は、トラヒック量が 0.1 の時の NR 法の値を 1 とした相対値である。ネットワークコストについては、OLT に最も近い ES に VNF を配置する NR 法が 4 方式の中では最小のネットワークコストとなるが、ES 負荷を考慮して VNF 配置を設計していないため、ES 最大負荷が最も高くなっていることが分かる。ネットワークコストについては提案手法のうち BF 法は従来手法の RR 法とほぼ同等であり、NB 法については RR 法と比較して最大約 21%の削減を実現している。NB 法についてはネットワークコスト最小となる NR 法と比較して、わずか約 13%の増加に留まっている。

一方、最大サーバ負荷について、NR 法と比較して NB 法は約 37%、BF 法は約 60%の負荷削減を実現している。RR 法について、NB 法と比較してやや上回る負荷であることが分かる。RR 法ではトラヒック需要を考慮せずにラウンドロビンに従って VNF 配置を決定するため、トラヒック需要に偏りがある条件では各サーバの負荷に偏りが発生する。このため、NB 法と比較して最大サーバ負荷が上回る結果となった。

BF 法については、各 OLT に対応する VNF を分割可能であり、かつトラヒック割合の任意に変更可能なため、理論的にも最もサーバ資源を有効利用できる方式であり、本評価により定量的に有効性が実証できた。以上の考察から、ES の容量がボトルネックとなっている場合では BF 法の適用が適切であるが、ES の容量がボトルネックでない場合はネットワーク資源をより効率的に利用可能な NB 法の適用が妥当であると結論できる。

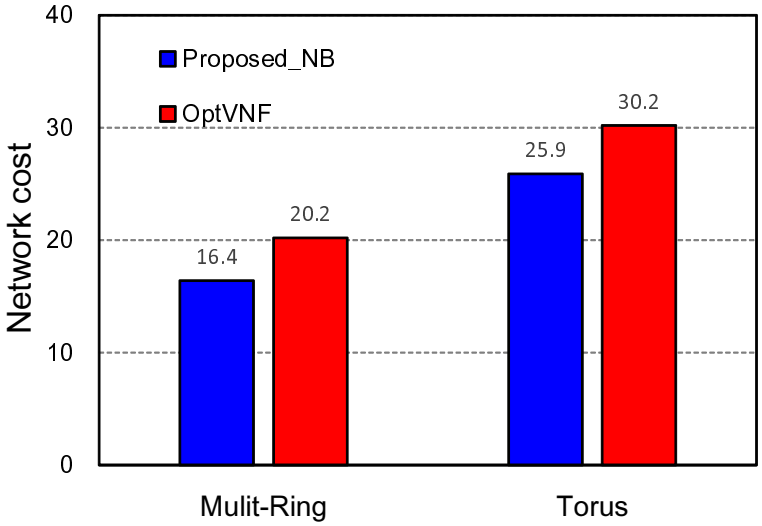


図 4.8: ネットワークコストの比較

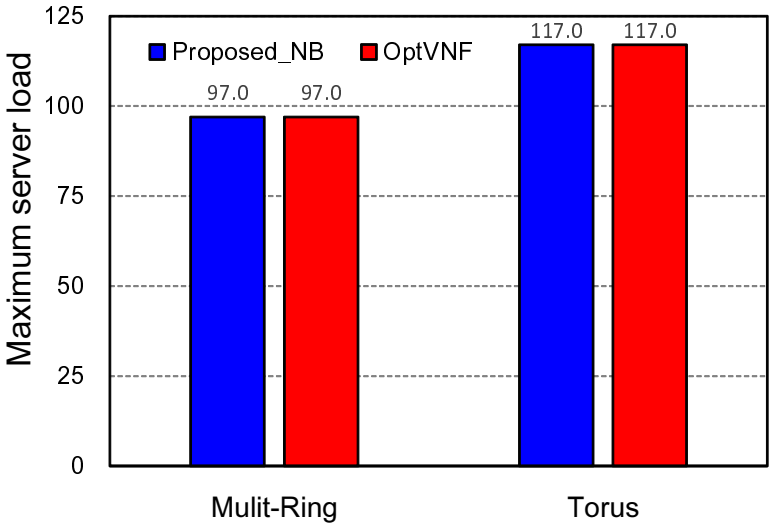


図 4.9: 最大サーバ負荷の比較

さらに、物理ネットワークの設計と VNF 配置を同時設計する提案手法のアプローチの有効性を確認するため、両者を独立に設計する手法 (OptVNF 法) との性能比較を実施した。結果を図 4.8、4.9 に示す。評価結果からほぼ同等のサーバ利用効率を達成しつつ、提案手法は従来手法と比較して、

20%弱ネットワークコストを削減できている。また、マルチリングトポロジ、トーラストポロジの双方で同等の性能改善を実現できており、提案手法はトポロジに依存することなく有効性であることが分かる。以上の評価結果から物理ネットワークの特性を考慮して VNF を配置することで、より効率的にネットワーク資源を活用できることを実証した。

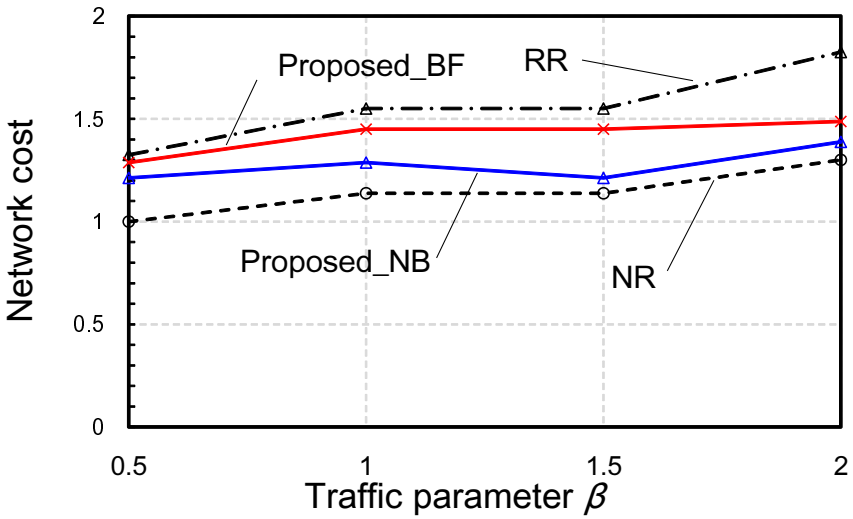


図 4.10: 異なるトラヒック変動に対するネットワークコスト

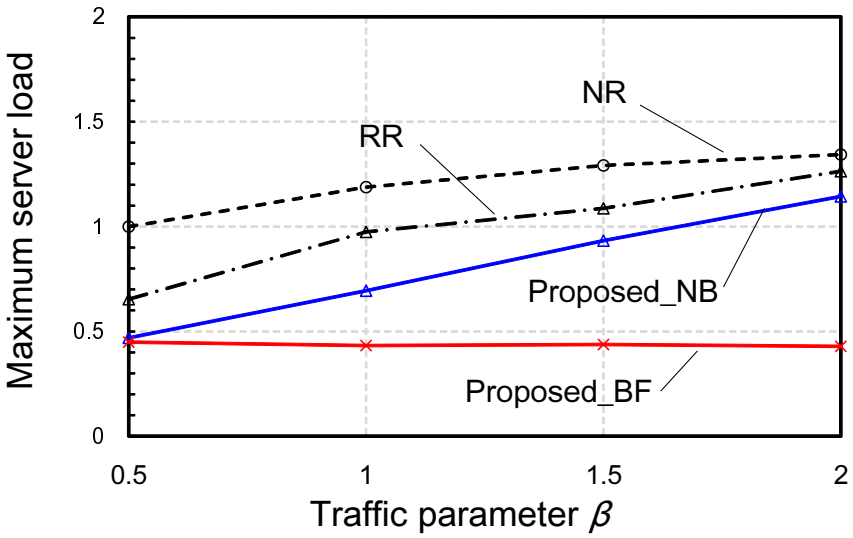


図 4.11: 異なるトラヒック変動に対する最大サーバ負荷

4.6.3　トラヒック変動に対する頑強性

さらに、トラヒック変動に対する頑強性について評価した。トラヒックモデルに使用している Zipf 分布におけるパラメータ β を変化させて、各方式の性能を評価した。ここで、Zipf 分布のパラメータ β は式 (4.10) で定義され、パラメータ β が大きいほど、トラヒックの分散は大きくなる。つまり、各 OLT のトラヒック需要のばらつきが大きくなる傾向となる。各評価ともトラヒック需要の平均値は 0.5 で固定した。

図 4.10、4.11 に結果を示す。パラメータ β を増加させると従来手法 (NR 法、RR 法）はネットワークコスト、最大サーバ負荷とも上昇していることが分かる。提案手法のうち NB 法については特に最大サーバ負荷がトラヒック変動の影響を受けやすいものの、BF 法についてはネットワークコスト、最大サーバ負荷ともにほとんど影響を受けていないことが分かる。上記の評価からトラヒック変動に対する頑強性を担保するためには、BF 法のように VNF を分割した上で各 ES に最適配置させる手法が有効である。

4.6.4　サーバ数と最適配置の効果

さらに、VNF 配置の候補となるサーバ数と各設計手法の性能の関係を評価した。定性的にも明らかなように VNF を配置可能なサーバ数の選択肢が少ないほど最適化の効果は少ないと考えられる。一方で、サーバ数が OLT と同等になるほど十分な数が配備される場合も、ラウンドロビン等の簡易な VNF 配置手法で十分な負荷削減効果が得られると考えれる。そこで、サーバ数に関する提案手法の有効性を評価した。トラヒック需要を 0.4 で固定し、サーバ数を 2、4、6 と変化させて、各手法の性能を評価した。図 4.12、4.13 に結果を示す。各手法ともサーバ数が増加するに従って、ネットワークコスト、最大サーバ負荷も低減する傾向がある。特にネットワークコストについてはサーバ数が増加するにしたがって、RR 法を除く各手法の性能差が狭まる傾向にある。これは、サーバ数が十分に多い条件では、VNF 配置の自由度が高く OLT からのホップのみを考慮したサーバ配置でネットワーク資源を効率的に利用できるためだと考えられる。また、最大サーバ負荷については、サーバ数を 6 まで増加させると RR 法と提案手法のうち NB 法でほぼ性能差がないことが分かる。

このことから、1 OLT に対して 1 VNF を生成するモデルでは、サーバ数が十分に多いという条件下ではホップ数を考慮して VNF を分散配置す

る発見的な手法でも十分に効率的な設計ができる可能性が高い。VNF を分割可能な BF 法については RR 法と比較して、約 50%負荷の削減を実現しており、サーバ資源を有効利用したい場合には 1 OLT に対して複数 VNF を割当可能な BF 法に適用が妥当と考えられる。

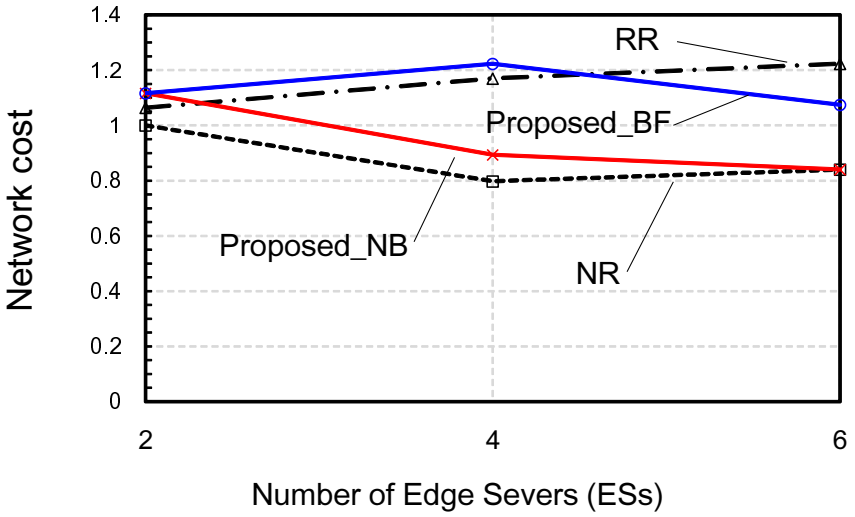


図 4.12: サーバ数に対するネットワークコスト

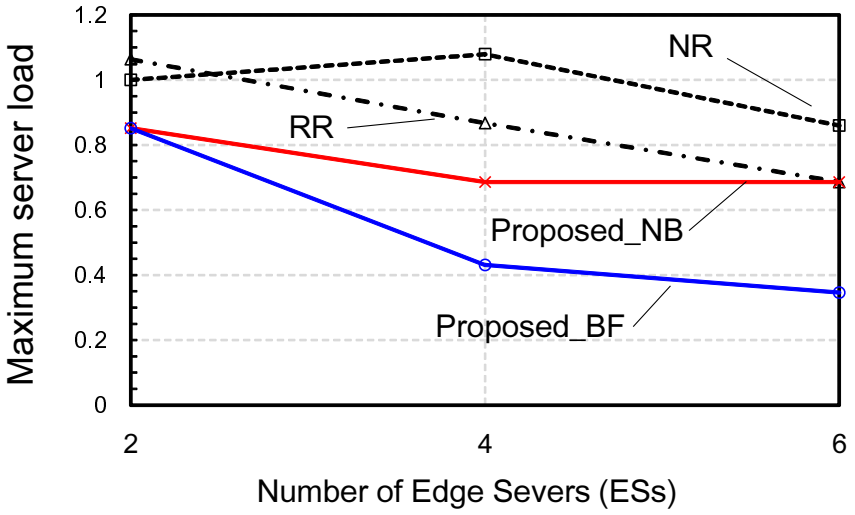


図 4.13: サーバ数に対する最大サーバ負荷

4.7　まとめ

本章では、ネットワークエッジ機能の仮想化を考慮した光集線網の設計手法を提案するとともに有効性を評価した。光集線網の特長である同一波長のパスを TDM 技術を用いて複数 OLT 間で共用する共用型 P2MP 波長パスをモデル化するとともに、ネットワークエッジ機能を仮想化した場合の VNF 配置と P2MP 波長パス経路の同時最適化問題として定式化した。提案手法は物理ネットワークの特性を考慮して VNF 配置を決定する設計手法により、波長パスおよびサーバの資源利用効率の向上を実現する。性能評価により、ネットワークコストを最大約 21%、最大サーバ負荷を最大約 60%削減可能なことが分かった。サーバ容量がボトルネックとなっている場合では BF 法が有効であるが、サーバ容量がボトルネックでない場合はネットワーク資源をより効率的に利用可能な NB 法の適用が妥当である。また、トラヒック変動に対する頑強性を担保するためには、BF 法のように VNF を分割した上で各 ES に最適配置する手法が有効である。

参考文献

[1] Takashi Miyamura, Akira Misawa, and Jun-ichi Kani, “Design of Optical Aggregation Network with Carrier Edge Functions Virtualization,” Proc. APNOMS 2017, Sep. 2017.

[2] 宮村 崇, 三澤 明, 可児 淳一, “ネットワークエッジ機能の仮想化を考慮した光集線網の設計法, 電子情報通信学会論文誌 B, Vol.J101-B,No.1, Jan. 2018.

[3] Takashi Miyamura, Akira Misawa, and Jun-ichi Kani, “Decomposition-based VNF Placement Algorithm in TDM-WDM-based Optical Aggregation Network,” Proc. NOMS 2018, (採択決定).

[4] Takashi Miyamura, Akira Misawa, and Jun-ichi Kani, “Highly Efficient Optical Aggregation Network with Network Edge Functions Virtualization,” International Journal of Network Management, (投稿中).

[5] Naoaki Yamanaka, Hidetoshi Takeshita, Kazumasa Tokuhashi, Takehiro Sato, “Next Generation Green Metro/Access Network Architecture using Time-slot-based Optical Aggregation Network for Multi-service Access,” Cyber Journals: Multidisciplinary Journals in Science and Technology, Vol. JSAT Vol. 3, No. 2, pp. 7-12, February 2013.

[6] 黒川 章, 江崎 修司, 平松 淳, 堀越 博文, “次世代ネットワーク（NGN）を支えるネットワーク基盤技術,” 電子情報通信学会　通信ソサイエティマガジン, Vol. 2010 (2010) No. 13 pp. 10-21, June 2010.

[7] Daniel Carey, Nicola Brandonisio, Stefano Porto, Alan Naughton, Peter Ossieur, Nick Parsons, Giuseppe Talli, and Paul Townsend,

"Dynamically Reconfigurable TDM-DWDM PON Ring Architecture for Efficient Rural Deployment," Proc. ECOC 2016, pp.692-694, Sep 2016.

[8] Kyota Hattori, Toru Homemoto, Masahiro Nakagawa, Naoki Kimishima, Masaru Katayama, Akira Misawa, "Optical Layer 2 Switch Network with Bufferless Optical TDM and Dynamic Bandwidth Allocation," IEICE Transactions on Electronics, Vol. E99.C (2016) No. 2 pp. 189-202.

[9] IEEE P802.3av Task Force, "10Gb/s Ethernet Passive Optical Network," http://www.ieee802.org/3/av/

[10] Rashid Mijumbi, Joan Serrat, Juan-Luis Gorricho, Niels Bouten, Filip De Turck, Raouf Boutaba, "Network Function Virtualization: State-of-the-Art and Research Challenges", IEEE Communications Surveys & Tutorials, vol. 18, pp. 236-262, 2016, ISSN 1553-877X

[11] Joon-Myung Kang, Hadi Bannazadeh, Hesam Rahimi, Thomas Lin, Mohammad Faraji, and Alberto Leon-Garcia, "Software-Defined Infrastructure and the Future Central Office," 2013 IEEE International Conference on Communications Workshops (ICC), Jun 2013.

[12] Akira Misawa, Konomi Mochizuki, Hideo Tsuchiya, Masahiro Nakagawa, Kyota Hattori, Masaru Katayama, Jun-ichi Kani, "Virtual Edge Architecture with Optical Bandwidth Resource Control," IEICE Transactions on Communications, Vol. E99.B No. 8 pp. 1805-1812, Aug 2016.

[13] Tachun Lin, Zhili Zhou, Massimo Tornatore, Biswanath Mukherjee, "Demand-Aware Network Function Placement,", IEEE Journal of Lightwave Technology, vol. 34, pp. 2590-2600, 2016.

[14] Y. Wang and Z. Wang, "Explicit routing algorithms for internet traffic engineering," Proc. IEEE International Conference on Computer Communications and Networks (ICCCN), 1999.

[15] F. Köksal and Cem Ersoy, "Multicasting for all-optical multifiber networks," OSA Journal of Optical Networking, Vol. 6, No. 2, 219-238, 2007.

[16] Y. Hachisuka, H. Hasegawa, and K. Sato, “Impairment-aware multicast tree design for hierarchical optical path networks,” Photonics in Switching 2012 (PS 2012), Th-S33-O08, Corsica, Sep 2012.

[17] Bernardetta Addis, Dallal Belabed, Mathieu Bouet, Stefano Secci, “Virtual Network Functions Placement and Routing Optimization,” CloudNet 2015 - IEEE 4th International Conference on Cloud Networking, Niagara Falls, ON, Canada. IEEE, pp.171-177, Oct 2015.

[18] N. M. Mosharaf Kabir Chowdhury, Muntasir Raihan Rahman, Raouf Boutaba, “Virtual Network Embedding with Coordinated Node and Link Mapping,” INFOCOM 2009: 783-791, Apr 2010.

[19] Mari Otokura, Kenji Leibnitz, Yuki Koizumi, Daichi Kominami, Tetsuya Shimokawa, and Masayuki Murata, “Application of evolutionary mechanism to dynamic virtual network function placement,” The IEEE 24th International Conference on Network Protocols (ICNP), Workshop: Control Operation and Application in SDN protocols (CoolSDN Workshop), Nov 2016.

[20] Rudolf Ahlswede, Ning Cai, Shuo-Yen Robert Li, and Raymond W. Yeung, “Network Information Flow,” IEEE Transactions on Information Theory, Vol.46, No.4, pp.1204-1216, Jul 2000.

[21] Shigeyuki Yamashita, Daiki Imachi, Miki Yamamoto, Takashi Miyamura, Shohei Kamamura, and Koji Sasayama, “A New Content-Oriented Traffic Engineering for Content Distribution:CAR (Content Aware Routing)” IEICE Trans. Commun., vol. E98-B, no.4, pp. 575-584, Apr. 2015.

[22] “GNU Linear Programming Kit,” https://www.gnu.org /software/glpk/

[23] L. Breslau, P. Cao, L. Fan, G. Phillips, and S. Shenker, ”Web Caching and Zipf-like Distributions: Evidence and Implications”, Proc. INFOCOM’99, pp.126-134, Mar 1999.

第5章　結論

ネットワークの利用用途拡大および新たなアプリケーションの出現に起因するトラヒック量の増大や予測困難なトラヒック変動に対応するためには、ネットワーク資源を効率的に利用して要求されるトラヒックや品質条件等に対応する設計制御手法の確立が急務である。本研究では光ネットワークの設計制御手法として、1) マルチレイヤトラヒックエンジニアリング技術、2) 光ネットワーク仮想化アーキテクチャ、3) 光集線網の設計手法、を提案した。

第2章では、仮想バッファ方式によるコアルータでの帯域制御技術、およびPCEアーキテクチャに基づくマルチレイヤトラヒックエンジニアリング技術の実現方式及び実装法を提案した。コアルータでの帯域制御技術ではハードウエア実装についての定量評価を行い、コアルータでの実現性を確認するとともに、シミュレーションによる評価で多数のフローが存在するコアルータでも適切に帯域制御可能なことを示した。マルチレイヤトラヒックエンジニアリング技術では、検討した方式に基づきプロトタイプ試作を行うとともに、実験を通じて提案方式の実現性と適用領域を定量的に評価した。本試作ではマルチレイヤトラヒックエンジニアリング技術を実現する機能をPCEサーバとして、ノードから独立して実現することで、既存のプロトコル及びノード実装へのインパクトを最小にしつつ、高度なネットワーク制御を実現可能なことを確認した。

第3章では、光ネットワークの上に展開するネットワーク仮想化アーキテクチャを提案した。提案アーキテクチャでは、高性能を実現するために仮想網が光ネットワークの資源を直接利用可能とするとともに、環境変化への柔軟な適応を実現するために各仮想網が独立して論理トポロジの動的な最適化を可能とした。これにより仮想網に対してパケットベースのネットワーク仮想化技術では実現できない高品質と高性能なネットワークサービスを提供することができる。提案アーキテクチャの実現性と有効性を評価するため、ソフトウエアによる設計・実装と実験網による実証実験を実施した。設計では、既存のGMPLSプロトコルへの機能

追加を行うことなく、ネットワーク仮想化を実現するサーバ設計を提案した。さらに仮想網オペレータが、高性能な光ネットワークを自由かつ容易に運用制御することを可能とするためのXMLベースのインターフェイスを規定した。提案した設計については、ソフトウエアとして実装するとともに、実験網による動作確認を実施し、有効性を確認した。さらに提案アーキテクチャにおいて予期しない環境変化に対する頑強性向上の効果を確認するため、アプリケーションとして自己組織化型VNT制御アルゴリズムを実装し、広域実験網JGN-X上での実証実験を実施した。複数仮想網が独立して、観測されたトラヒックに基づき自己組織化型のネットワーク制御を安定して実行可能なことを確認した。さらにスケール性と即応性を改善するために、物理網マネージャに、1) 集中的なトポロジ情報収集機構、2) LSP制御を同時並行的に実施する機構を組み込んだ。以上の評価結果から、提案アーキテクチャに実現性を確認するとともに、環境変化に対して頑強な高性能なネットワーク仮想化サービスを実現可能なことを実証した。

第4章では、ネットワークエッジ機能の仮想化を考慮した光集線網の設計手法を提案した。メトロ集線網は、多数の回線終端装置からのトラヒックを集約してコア網側のエッジルータに転送する役割を担っている。さらにこの回線終端装置からのトラヒックはバースト性が高いため、適切にネットワーク設計をしないと、網資源の利用効率やユーザ品質の低下といった問題が発生する。メトロ集線網におけるネットワーク資源最適化のための設計手法の確立はネットワークコストおよびユーザ品質の両面から重要な課題である。メトロ集線網では、トラヒックのバースト性が高く、短い時間スケールでのトラヒック変動に対応する必要があり、コア網のようなネットワーク制御による適応的な対処法の適用は困難である。そこで、ネットワーク資源最適化のアプローチとしては、ネットワーク設計ベースのアプローチを選択した。今後の集線網としては、TDM-WDM技術をベースにした光集線網アーキテクチャが有望であるが、従来の設計手法では新たなネットワークアーキテクチャに適用することができない。そこで光集線網の設計法を提案した。光集線網の特長である同一波長のパスをTDM技術を用いて複数OLT間で共用する共用型P2MP波長パスをモデル化するとともに、ネットワークエッジ機能を仮想化した場合のVNF配置とP2MP波長パス経路の同時最適化問題として定式化した。提案手法では単にTDM-WDM技術特有の制約条件を考慮するだけでなく、需要変動への柔軟性の向上に資するネットワークエッジ機能仮想化

に対応可能とする。数値実験により有効性と適用性を定量評価を実施し、ネットワークコストを最大約 21%、最大サーバ負荷を最大約 60%削減可能なことを明らかにした。

以上の検討により、大容量トラヒックの効率的な転送とトラヒック変動に対する頑強性の向上を実現する光ネットワークの設計制御手法を確立した。提案した設計制御手法を情報通信ネットワークに適用することで、ネットワークコストおよび網全体の消費電力削減に寄与できる。さらにブロードバンドサービスの利用用途拡大にともない発生する予期しないトラヒック変動に対しても、ネットワークの頑強性を維持するとともにユーザ品質の低下を最小化することが期待できる。第 4 章で提案した光集線網の設計手法では、トラヒック需要が与えられた際の最適な波長パスの経路およびネットワークエッジ機能の配置位置を算出する。第 4 章では、ネットワークの論理構成を動的に変更することを考慮していなかったが、中長期的にトラヒック需要が大きく変動した場合には、運用中にネットワークエッジ機能を収容するサーバの移行など論理構成を変更することが有効である。今後は、第 2 章、第 3 章で提案したコア網でのネットワーク制御技術を応用して、メトロ集線網における運用中の論理構成の変更を実現するネットワーク制御技術の確立に取り組んでいく。

謝辞

本論文を作成するにあたり、懇切なる御指導と御鞭撻を賜りました北海道大学大学院情報科学研究科 可児淳一客員教授（日本電信電話株式会社 NTT アクセスサービスシステム研究所 光アクセス基盤プロジェクト 光アクセス基盤 SE グループ 特別研究員 · グループリーダ）に謹んで深謝の意を表します。また、有益な御指導と御助言を賜りました北海道大学大学院情報科学研究科 山本強教授、大鐘武雄教授、齊藤晋聖教授に謹んで深謝の意を表します。

本論文は、筆者が NTT ネットワークサービスシステム研究所において取り組んできた研究成果をベースにしたものです。現職での研究推進業務にあたりながら、著者の研究活動にご理解いただき、本論文をまとめる機会を与えていただきました、NTT ネットワークサービスシステム研究所 企画担当 川端明生 主席研究員に深謝いたします。また、山中直明グループリーダ（現慶応義塾大学教授）、漆谷重雄グループリーダ（現国立情報学研究所教授）、塩本公平グループリーダ（現東京都市大学教授）、笹山浩二グループリーダ（現国立情報学研究所教授）、青木道宏主任研究員（現愛知工業大学教授）、三澤明主幹研究員（現千歳科学技術大学教授）、大木英司主任研究員（現京都大学教授）、井上一郎主席研究員（現 NTT アドバンステクノロジ）、栗本崇主任研究員（現国立情報学研究所准教授）には、本研究の機会を与えていただくとともに、多くの御指導、及び御激励をいただきました。ここに謹んで感謝の意を表します。さらに、林理恵主任研究員、鎌村星平主任研究員には、研究業務を進めていく上で多くの御協力をいただきました。ここに心から感謝申し上げます。その他、筆者が本研究遂行時に在籍した研究グループの皆様を中心として多くの方々に、御助言や励ましをいただくとともに、実証実験等でいろいろとお世話になりました。皆様に心から御礼申し上げます。

本論文の第 3 章で述べた光ネットワーク仮想化アーキテクチャの研究は、その一部を総務省 戦略的情報通信研究開発推進事業（SCOPE）の委託研究「管理型自己組織化技術に基づく多様なサービスを収容する光

ネットワーク制御技術の研究開発」を受託する形で行いました。3 年間に渡り共同研究を行い、多くの御協力をいただきました、大阪大学 村田正幸教授、荒川伸一准教授および電気通信大学の関係者の皆様に厚く御礼申し上げます。

最後に、著者が博士前期課程において御指導を賜り、最適化理論・トラヒック分野の研究に強い興味を持つきっかけを提供して頂いた大阪大学 石井博昭名誉教授、兵庫県立大学 米山寛二教授、NTT マルチメディアネットワーク研究所 高橋敬隆主幹研究員（当時）に御礼申し上げるとともに、これまで大阪から応援してくれた両親、ならびに、論文をまとめるにあたり献身的にサポートしてくれた妻 有希子に心より感謝します。

研究業績リスト

主著

本論文

1. T. Miyamura, T. Kurimoto, K. Nakagawa P. Dhananjaya, M. Aoki and N. Yamanaka, “A Buffer Management Mechanism for Achieving Approximately Fair Bandwidth Allocation in High-Speed Networks,” IEICE Trans. Commun., Vol.E85-B No.8 pp.1434-1441, Aug. 2002.
2. 宮村　崇, 林　理恵, 大木　英司, 塩本　公平, 漆谷　重雄, “PCE によるマルチレイヤトラヒックエンジニアリング機能の実装と評価,” 電子情報通信学会 論文誌 B, Vol.J90-B No.4 pp.331-340, Apr. 2007.
3. T. Miyamura, A. Masuda, K. Shiomoto, “High-performance network virtualisation for multilayer GMPLS networks,” International Journal of Communication Networks and Distributed Systems, Volume 6, Issue 3, Apr. 2011.
4. Takashi Miyamura, Akira Misawa, and Jun-ichi Kani, “Highly Efficient Optical Aggregation Network with Network Edge Functions Virtualization,” International Journal of Network Management, (投稿中).

レター

1. 宮村 崇, 三澤 明, 可児 淳一, “ネットワークエッジ機能の仮想化を考慮した光集線網の設計法, 電子情報通信学会 論文誌 B, Vol.J101-B, No.1, Jan. 2018.

国際会議 (査読付)

1. T. Miyamura, T. Kurimoto, K. Nakagawa, P. Dhananjaya, M. Aoki, N. Yamanaka, “Active queue control scheme for achieving approximately fair bandwidth allocation,” Proc. IEEE ICC 2002, Vol. 2, pp. 1269-1273, Apr. 2002.
2. T. Miyamura, T. Kurimoto, M. Aoki, ”Enhancing the network scalability of link-state routing protocols by reducing their flooding overhead,” Proc. IEEE HPSR 2003. pp. 263-268, Jun. 2003.

3. T. Miyamura, T. Kurimoto, M. Aoki, S. Urushidani, “A multi-layer disjoint path selection algorithm for highly reliable carrier services,” Proc. IEEE GLOBECOM 2004. Vol.3 pp. 1974-1978, Nov. 2004.

4. Takashi Miyamura and Akira Misawa, “A stochastic-based fair allocation scheme for adaptive OVPN services,” Communications, Internet, and Information Technology, 531-536, Nov. 2004.

5. Takashi Miyamura Takashi Kurimoto Michihiro Aoki Akira Misawa, “An Inter-area SRLG-disjoint Routing Algorithm for Multi-segment Protection in GMPLS Networks,” Proc. ICBN 2004, Apr. 2004.

6. T. Miyamura, T. Kurimoto, A. Misawa, S. Urushidani, “A disjoint path selection scheme based on enhanced shared risk link group management for multi-reliability service,” Proc. IEEE GLOBECOM 2005, Vol. 4, Nov. 2005.

7. Takashi Miyamura, Takashi Kurimoto, Rie Hayashi, Ichiro Inoue Kohei Shiomoto, and Shigeo Urushidani, “Demonstration of PCE-controlled dynamic traffic engineering for GMPLS-based multilayer service network,” Proc. ECOC 2005, Vol.2, Sep. 2005.

8. Takashi Miyamura, Eiji Oki, Ichiro Inoue, Kohei Shiomoto, “Enhancing Bandwidth on Demand Service Based on Virtual Network Topology Control,” Proc. IEEE NOMS Workshops 2008, pp. 201-206, Apr. 2008

9. Takashi Miyamura, YuichiOhsita, Shin’ichi Arakawa, Yuki Koizumi, Akeo Masuda , Kohei Shiomoto and Masayuki Murata, “Network Virtualization Server for Adaptive Network Control,” 20th ITC Specialist Seminar, May 2009.

10. Takashi Miyamura, Kohei Shiomoto, “Network on demand service with price-based resource control,” Network Operations and Management Symposium Workshops (NOMS Wksps), 2010 IEEE/IFIP, Year: , pp. 205-208, Apr. 2010.

11. Takashi Miyamura, Shohei Kamamura, Kohei Shiomoto, “Policy-based resource management in virtual network environment,” 2010 International Conference on Network and Service Management, pp. 282-285, Oct. 2010

12. Takashi Miyamura, Shin’ichi Arakawa, Yuichi Ohsita, Kohei Shiomoto, Shohei Kamamura, Masayuki Murata, “Dynamic resource allocation mechanism for managed self-organization,” Network Operations and Management Symposium (APNOMS), 2011 13th Asia-Pacific, Sep. 2011.

13. Takashi Miyamura, Yuichi Ohsita, Shohei Kamamura, Daisaku Shimazaki, Yuki Koizumi, Shin'ichi Arakawa, Kohei Shiomoto, Masayuki Murata, "Management of Managed Self-Organizing Network in Network Virtualization Environment," World Telecommunications Congress (WTC), 2012, Mar. 2012.

14. Takashi Miyamura, Daisaku Shimazaki, Shin'ichi Arakawa, Yuki Koizumi, Shohei Kamamura, Koji Sasayama, Kohei Shiomoto, Masayuki Murata, "Experimental demonstration of adaptive virtual network topology control mechanism based on SDTN architecture," Proc. Optical Communication (ECOC 2013), 39th European Conference and Exhibition on, Sep. 2013.

15. Takashi Miyamura, Akira Misawa, and Jun-ichi Kani, "Design of Optical Aggregation Network with Carrier Edge Functions Virtualization," in Proc. APNOMS 2017, Sep. 2017.

16. Takashi Miyamura, Akira Misawa, and Jun-ichi Kani, "Decomposition-based VNF Placement Algorithm in TDM-WDM-based Optical Aggregation Network," in Proc. NOMS 2018, (採択決定).

国内学会

1. 宮村 崇, 栗本 崇, 青木 道宏, 山中 直明, "MPLS over ATM 網での負荷分散方式の一検討," 電子情報通信学会ソサイエティ大会講演論文集 2000 年通信ソサイエティ大会講演論文集 (2), 40, 2000-09-07, Sep. 2000.

2. 宮村 崇, 栗本 崇, 青木 道宏 , 山中 直明,"MPLS の Explicit Routing を用いた負荷分散方式に関する一検討," 電子情報通信学会技術研究報告. SSE, 交換システム 100(154), 25-30, 2000-06-23, Jun. 2000.

3. 宮村 崇, 栗本 崇 , 青木 道宏 , 山中 直明, "公平性を実現する帯域制御方式の検討," 電子情報通信学会総合大会講演論文集 2001 年. 通信 (2), 14, 2001-03-07, Mar. 2001.

4. 宮村 崇, 栗本 崇 , 中川 健治, Dhananjaya Prasad , 青木 道宏 , 山中 直明, "スケーラブルな QoS 制御方式の提案," 電子情報通信学会技術研究報告. NS, ネットワークシステム 101(121), 55-60, 2001-06-15, Jun. 2001.

5. 宮村 崇, 栗本 崇 , 青木 道宏, "Flooding 負荷削減による OSPF の Fast Convergence の検討," 電子情報通信学会ソサイエティ大会講演論文集 2003 年 通信 (2), 276, 2003-09-10, Sep. 2003.

6. 宮村 崇, 栗本 崇, 青木 道宏, "OSPF における効率的な Flooding 方式の検討," 電子情報通信学会総合大会講演論文集 2003 年 通信 (2), 133, 2003-03-03, Mar. 2003.

7. 宮村 崇, 栗本 崇, 青木 道宏, 三澤 明, “GMPLS における Inter-area LSP 設定方式の検討 (B-6. ネットワークシステム),” 電子情報通信学会総合大会講演論文集 2004 年 通信 (2), 155, 2004-03-08, Mar. 2004.

8. 宮村 崇, 栗本 崇, 青木 道宏, 漆谷 重雄, “マルチリージョン網におけるプロテクションパス設計法の検討,” 電子情報通信学会技術研究報告. NS, ネットワークシステム 104(18), 1-4, 2004-04-16, Apr. 2004.

9. 宮村 崇, 三澤 明, “光 VPN サービスにおける公平性を考慮したリソース管理法の検討,” 電子情報通信学会技術研究報告. CQ, コミュニケーションクオリティ 104(188), 47-51, 2004-07-09, Jul. 2004.

10. 宮村 崇, 栗本 崇, 三澤 明, 漆谷 重雄, “マルチリライアビリティサービスを実現する経路選択法,” 電子情報通信学会技術研究報告. IN, 情報ネットワーク 104(659), 77-82, 2005-02-11, Feb. 2005.

11. 宮村 崇, 栗本 崇, 三澤 明, 漆谷 重雄, “マルチリライアビリティを実現するパス選択方式の検討,” 電子情報通信学会総合大会講演論文集 2005 年 通信 (2), 137, 2005-03-07, Mar. 2005.

12. 宮村 崇, 林 理恵, 大木 英司, 井上 一郎, 塩本 公平, 漆谷 重雄, “GMPLS 網における仮想トポロジ再構成機能の実装と評価,” 電子情報通信学会ソサイエティ大会講演論文集 2005 年 通信 (2), 94, 2005-09-07, Sep. 2005.

13. 宮村 崇, 栗本 崇, 三澤 明, 漆谷 重雄, “マルチリライアビリティサービスを実現する経路選択法,” 電子情報通信学会技術研究報告. IN, 情報ネットワーク 104(659), 77-82, 2005-02-11, Feb. 2005.

14. 宮村　崇, 林　理恵, 大木英司, 井上一郎, 塩本公平, 漆谷重雄, “PCE によるマルチレイヤトラヒックエンジニアリング機能の実装と評価,” 電子情報通信学会技術研究報告. PN, フォトニックネットワーク, PN2005-33, pp.75-80, Aug. 2005.

15. 宮村 崇, 林 理恵, 大木 英司, 塩本 公平, 漆谷 重雄, “仮想トポロジ再構成による故障回復機能の実装と評価,” 電子情報通信学会総合大会講演論文集 2006 通信 (2), 19, 2006-03-08, Mar. 2006.

16. 宮村 崇, 大木 英司, 井上 一郎, 塩本 公平, “仮想ネットワーク制御技術を用いた帯域オンデマンドサービス,” 電子情報通信学会技術研究報告. NS, ネットワークシステム 108(91), 35-40, 2008-06-12, Jun. 2008.

17. 宮村 崇, 増田 暁生, 塩本 公平, “マルチレイヤ網仮想化のための資源管理アーキテクチャ,” 電子情報通信学会技術研究報告. NS, ネットワークシステム 110(4), 53-58, 2010-04-08, Apr. 2010.

18. 宮村 崇, 大下 裕一, 大木 英司, 荒川 伸一, 鎌村 星平, 塩本 公平, 平松 淳, 村田 正幸, “動的リソース制御による管理型自己組織化ネットワークの検

討," 電子情報通信学会ソサイエティ大会講演論文集 2011 年 通信 (2), 333, 2011-08-30, Aug. 2011.

19. 宮村 崇, 鎌村 星平, 塩本 公平, "IEEE/IFIP International Conference on Network and Service Management(CNSM2010) 報告," 電子情報通信学会技術研究報告. ICM, 情報通信マネジメント 110(374), 63-68, 2011-01-13, Jan. 2011.

20. 宮村 崇, 大下 裕一, 鎌村 星平, 荒川 伸一, 塩本 公平, 村田 正幸, "管理型自己組織化のための動的リソース制御技術の検討," 電子情報通信学会技術研究報告. ICM, 情報通信マネジメント 111(30), 59-64, 2011-05-05, May. 2011.

21. 宮村 崇, 小泉 佑揮, 大下 裕一, 荒川 伸一, 鎌村 星平, 塩本 公平, 平松 淳, 村田 正幸, "管理型自己組織化のための動的リソース制御の性能評価," 電子情報通信学会総合大会講演論文集 2012 年 通信 (2), 65, 2012-03-06, Mar. 2012.

22. 宮村 崇, 荒川 伸一, 小泉 佑揮, 島崎 大作, 鎌村 星平, 笹山 浩二, 塩本 公平, 村田 正幸, "管理型自己組織化による仮想網トポロジ再構成の実証実験," 電子情報通信学会総合大会講演論文集 2013 年 通信 (2), 453, 2013-03-05, Mar. 2013.

23. 宮村 崇, 三澤 明, 可児 淳一, "ネットワークエッジ機能の仮想化を考慮した光集線網最適化の検討," 電子情報通信学会技術研究報告. PN, フォトニックネットワーク 117(186), 69-74, 2017-08-28, Aug 2017.

共著

本論文

1. Michihiro Aoki, Miki Hirano, Nobuaki Matsuura, Takashi Kurimoto, **Takashi Miyamura**, Masahiro Goshima, Keisuke Kabashima, Shigeo Urushidani, "A Large-Scale IP and Lambda Integrated Router Architecture," IEICE Trans. Commun. Vol.E86-B No.8 pp.2302-2309, Aug. 2003.

2. Mallik Tatipamula, Zafar Ali, Ichiro Inoue, **Takashi Miyamura**, Shigeo Urushidani, Shoichiro Asano, "Design and Architectural Concepts for Border Model Based IP/Optical Multi-Layer Service Networks," IEICE Trans. Commun. Vol.E88-B No.10 pp.3832-3840, Oct. 2005.

3. Rie Hayashi, **Takashi Miyamura**, Daisaku Shimazaki, Eiji Oki, Kohei Shiomoto, "Latest Trends in Traffic Matrix Modeling and Its Application to Multilayer TE," IEICE Trans. Commun. Vol.E90-B No.8 pp.1912-1921, Aug. 2007.

4. Rie Hayashi, **Takashi Miyamura**, Eiji OKI, Kohei Shiomoto, “QoS Control Mechanism Based on Real-Time Measurement of Elephant Flows,” IEICE Trans. Commun. Vol.E90-B No.8 pp.2081-2089, Aug. 2007.

5. 橋本　仁, 五十嵐　秀平, 行松　健一, 村山　秀胤, **宮村　崇**, 塩本　公平, “パス再設定トラヒック量を制限可能な動的 MPLS-TE 手法の提案と評価,” 電子情報通信学会 論文誌 B, Vol.J91-B No.6 pp.645-654, Jun. 2008.

6. Yuki Koizumi, **Takashi Miyamura**, Sin’ichi Arakawa, Eiji Oki, Kohei Shiomoto, and Masayuki Murata, “Stability of virtual network topology control for overlay routing services,” OSA Journal of Optical Networking, vol. 7, pp. 704-719, Jul. 2008.

7. Yuichi Ohsita, **Takashi Miyamura**, Shin’ichi Arakawa, Eiji Oki, Kohei Shiomoto, and Masayuki Murata, “Estimation of current traffic matrices from long-term traffic variations,” IEICE Trans. Commun. Vol.E92-B, No.01, pp. 171-183, Jan. 2009.

8. Eiji Oki, Nattapong Kitsuwan, Shunichi Tsunoda, **Takashi Miyamura**, Akeo Masuda, Kohei Shiomoto, “Scalable Network Emulator Architecture for IP Optical Network Management,” IEICE Trans. Commun. Vol.E93-B No.7 pp.1931-1934, Jul. 2010.

9. 鎌村 星平, **宮村　崇**, 塩本 公平, “先端 IP ネットワーク制御 [I] : IP/MPLS 網トラヒックエンジニアリングの最新技術動向 (イントラドメイン編),” 電子情報通信学会誌 93(6), 479-484, 2010-06-01, Jun. 2010.

10. Yuki Koizumi, **Takashi Miyamura**, Shin’ichi Arakawa, Eiji Oki, Kohei Shiomoto, Masayuki Murata, “Adaptive Virtual Network Topology Control Based on Attractor Selection,” IEEE JLT, Volume: 28, Issue: 11, Nov. 2010.

11. Yuichi Ohsita, **Takashi Miyamura**, Shin’ichi Arakawa, Shingo Ata, Eiji Oki, Kohei Shiomoto, Masayuki Murata, “Gradually Reconfiguring Virtual Network Topologies Based on Estimated Traffic Matrices,” IEEE/ACM Transactions on Networking, Volume: 18, Issue: 1, Jan. 2010.

12. Shohei Kamamura, **Takashi Miyamura**, Yoshihiko Uematsu, Kohei Shiomoto, “Scalable Backup Configurations Creation for IP Fast Reroute,” IEICE Trans. Commun. Vol.E94-B No.1 pp.109-117, Jan. 2011.

13. Yuki Minami, Yuki Koizumi, Shin’ichi Arakawa, **Takashi Miyamura**, Kohei Shiomoto, and Masayuki Murata, “Benefits of virtual network topology control based on attractor selection in WDM networks,” International Journal on Advances in Internet Technology, vol. 4, pp. 79-8, Sep. 2011.

14. Shin'ichi Arakawa, Yuki Minami, Yuki Koizumi, **Takashi Miyamura**, Kohei Shiomoto, and Masayuki Murata, "A managed self-organization of virtual network topology controls in WDM-based optical networks," Journal of Optical Communications, vol. 32, pp. 233-242, Dec. 2011.

15. Yuichi Ohsita, **Takashi Miyamura**, Shin'ichi Arakawa, Shohei Kamamura, Daisaku Shimazaki, Kohei Shiomoto, Atsushi Hiramatsu, and Masayuki Murata, "Aggregation of Traffic Information for Hierarchical Routing Reconfiguration," Computer Networks, Vol. 76, pp. 242-258, Jan. 2015.

16. 植松　芳彦, 鎌村　星平, 杉山　隆太, 武田　知典, **宮村　崇**, 笹山　浩二, "交流トラヒック推定技術の大規模サービス統合 IP 網への適用性," 電子情報通信学会 論文誌 B, Vol.J98-B No.3 pp.255-265, 2015 Mar.

17. Shigeyuki Yamashita, Daiki Imachi, Miki Yamamoto, **Takashi Miyamura**, Shohei Kamamura, Koji Sasayama, "A New Content-Oriented Traffic Engineering for Content Distribution: CAR (Content Aware Routing)," IEICE Trans. Commun. Vol.E98-B No.4 pp.575-584, Apr. 2015.

18. Shohei Kamamura, Rie Hayashi, Hiroki Date, Hiroshi Yamamoto, **Takashi Miyamura**, Yoshihiko Uematsu, Kouichi Genda Recommendation-based Bandwidth Calendaring for Packet Transport Network IEICE Trans. Commun. Vol. E100-B No. 1 pp. 122-130, Jan. 2017.

国際会議

1. M. Aoki, N. Yamanaka, T. Kurimoto, **T. Miyamura**, and J. Nishikido, "Next generation carriers Internet backbone node architecture (MSN Type-X)," Proc. HPSR 2002, pp. 156-160, May 2002.

2. N. Yamanaka, T. Kurimoto, **T. Miyamura**, and M. Aoki, "MSN Type-X: next generation Internet backbone switch/router architecture," Proc. ICC 2002, Vol. 4, pp. 2095-2099, Apr. 2002.

3. M. Hirano, M. Aoki, N. Matsuura, T. Kurimoto, **T. Miyamura**, M. Goshima, and S. Urushidani, "A scalable switch architecture for ultra-large IP and lambda switch routers," Proc. ICT 2003, vol. 2, pp. 1656-1661, Mar. 2003.

4. R. Hayashi, **T. Miyamura**, K. Shiomoto, and S. Urushidani, "Impact of Traffic Correlation on the Effectiveness of Multilayer Traffic Engineering," Proc. APCC 2005, pp. 936-940, Oct. 2005.

5. Y. Ohsita, **T. Miyamura**, S. Arakawa, S. Ata, E. Oki, K. Shiomoto, and M. Murata, "Gradually Reconfiguring Virtual Network Topologies Based on Estimated Traffic Matrices," Proc. IEEE INFOCOM 2007, pp. 2511-2515, May 2007.

6. Yuki Koizumi, **Takashi Miyamura**, Shin'ichi Arakawa, Eiji Oki, Kohei Shiomoto, and Masayuki Murata, "On the stability of virtual network topology control for overlay routing services," Proc. IEEE BROADNETS 2007, pp. 810-819, Sep. 2007.

7. K. Shiomoto, E. Oki, D. Shimazaki, and **T. Miyamura**, "Multi-layer traffic engineering experiments in MPLS/GMPLS networks," IEEE BROADNETS 2007, pp. 291-293, Sep. 2007.

8. Yuichi Ohsita, **Takashi Miyamura**, Shin'ichi Arakawa, Eiji Oki, Kohei Shiomoto, and Masayuki Murata, "Estimating current traffic matrices accurately by using long-term variations information," Proc. BROADNETS 2008, pp. 404-411, Sep. 2008.

9. Masashi Hashimoto, Ken-ichi Yukimatsu, **Takashi Miyamura**, Kohei Shimoto, "Partial traffic engineering for guaranteeing network quality," Proc. APSITT 2008, pp. 104-108, Apr. 2008.

10. Daisaku Shimazaki, **Takashi Miyamura**, Ichiro Inoue, and Kohei Shiomoto, "Advanced operation with MPLS traffic engineering for IP over GMPLS-based optical network, Proc. COIN 2008, pp. 1-2, Oct. 2008.

11. Yuki Koizumi, **Takashi Miyamura**, Shin'ichi Arakawa, Eiji Oki, Kohei Shiomoto, and Masayuki Murata, "Application of Attractor Selection to Adaptive Virtual Network Topology Control," Proc. BIONETICS 2008, Nov. 2008.

12. Shohei Kamamura, **Takashi Miyamura**, Cristel Pelsser, Ichiro Inoue, and Kohei Shiomoto, "Minimum Backup Configuration-Creation Method for IP Fast Reroute," Proc. IEEE GLOBECOM 2009, Dec. 2009.

13. Yuki Koizumi, **Takashi Miyamura**, Shinichi Arakawa, Eiji Oki, Kohei Shiomoto, and Masayuki Murata, "Robust virtual network topology control based on attractor selection," Proc. ONDM 2009, Feb. 2009.

14. Shohei Kamamura, **Takashi Miyamura**, Cristel Pelsser, Ichiro Inoue, and Kohei Shiomoto, "Scalable backup configurations creation for IP fast reroute," Proc. DRCN 2009, pp. 312-318, Oct. 2009.

15. Shunichi Tsunoda, Nattapong Kitsuwan, Eiji Oki, **Takashi Miyamura**, and Kohei Shiomoto, "Protocol proxy scheme for emulating OSPF for IP+optical network management," Proc. APCC, pp. 73-77, Oct. 2010.

16. Yuki Minami, Shin'ichi Arakawa, Yuki Koizumi, **Takashi Miyamura**, Kohei Shiomoto, and Masayuki Murata, "Adaptive Virtual Network Topology Control in WDM-Based Optical Networks," Proc. INTERNET 2010, pp. 49-54, Sep. 2010.

17. Kohei Shiomoto, **Takashi Miyamura**, and Akeo Masuda, "Resource management of multi-layer networks for network virtualization," Proc. WTC, Sep. 2010.

18. Eiji Oki, Nattapong Kitsuwan, Shunichi Tsunoda, **Takashi Miyamura**, Akeo Masuda, and Kohei Shiomoto, "Scalable network emulator architecture to support IP+optical network management," Proc. IEEE/IFIP NOMS 2010, pp. 902-905, Apr. 2010.

19. Yuki Koizumi, **Takashi Miyamura**, Shin'ichi Arakawa, Kohei Shiomoto, and Masayuki Murata, "Cooperation among multiple virtual topologies based on attractor superimposition," Proc. ONDM 2010, Feb. 2010.

20. Shohei Kamamura, **Takashi Miyamura**, and Kohei Shiomoto, "IP fast reroute control using centralized control plane architecture," Proc. CNSM 2010, pp. 274-277, Oct. 2010.

21. Shohei Kamamura, Tomonori Takeda, **Takashi Miyamura**, Yoshihiko Uematsu, and Kohei Shiomoto, "Sticky 1+1 path protection method by dynamic disjoint path discovery," Proc. ONDM 2011, pp. 1-6, Feb. 2011.

22. Shohei Kamamura, **Takashi Miyamura**, and Kohei Shiomoto, "Relaxed maintenance protection architecture by dynamic backup path configuration," Proc. OFC/NFOEC 2011, Mar. 2011.

23. Ryota Takahashi, Simon Tembo, Ken-ichi Yukimatu, Shohei Kamamura, **Takashi Miyamura**, and Kohei Shiomoto, "Dispersing Hotspot Traffic in Backup Topology for IP Fast Reroute," Proc. IEEE ICC, Jun. 2011.

24. Akeo Masuda, Akinori Isogai, **Takashi Miyamura**, and Kohei Shiomoto, "Experiments of operating mutiple virtual networks over IP-optical network," Proc. ECOC 2011, Sep. 2011.

25. Shohei Kamamura, Yuki Koizumi, **Takashi Miyamura**, Shin'ichi Arakawa, Kohei Shiomoto, and Masayuki Murata, "Control and visualization system for managed self-organization network," Proc. CNSM 2011, pp. 1-4, Oct. 2011.

26. Yuichi Ohsita, **Takashi Miyamura**, Shin'ichi Arakawa, Kohei Shiomoto, and Masayuki Murata, "Hierarchical Dynamic Traffic Engineering Considering the Upper Bounds of Link Utilizations," Proc. IEEE GLOBECOM 2011, pp. 1-6, Dec. 2011.

27. Akeo Masuda, Akinori Isogai, **Takashi Miyamura**, Kohei Shiomoto, and Atsushi Hiramatsu, "Application-defined control of virtual networks over IP-optical networks," Proc. CNSM, pp. 1-6, Oct. 2011.

28. Shohei Kamamura, Yuki Koizumi, **Takashi Miyamura**, Shin'ichi Arakawa, Kohei Shiomoto and Masayuki Murata, "Attractor Selection-based Virtual Network Topology Control with Dynamic Threshold Reconfiguration for Managed Self-organization Network," Proc. SAN 2012, Sep. 2012.

29. Yuki Koizumi, Shin'ichi Arakawa, Shohei Kamamura, Daisaku Shimazaki, **Takashi Miyamura**, Atsushi Hiramatsu, and Masayuki Murata, "Adaptability of virtual network topology control based on attractor selection against multiple node failures, " Proc. OECC/PS 2013, pp. 1-2, Jun. 2013.

30. Shin'ichi Arakawa, **Takashi Miyamura**, Yuki Koizumi, Daisaku Shimazaki, Shohei Kamamura, Koji Sasayama, Kohei Shiomoto, Masayuki Murata, "A managed self-organization method for controlling multiple virtual network topologies," Proc. OECC/PS, pp. 1-2, Jun. 2013.

31. Hiroki Mihara, Daiki Imachi, Miki Yamamoto, **Takashi Miyamura**, Koji Sasayama, "Content aware routing: A content oriented traffic engineering," IEEE GLOBECOM 2013, pp. 1416-1421, Dec. 2013.

国内学会

1. 栗本 崇, **宮村　崇**, 青木 道弘, 山中 直明, "帯域共用サービス提供における遅延品質評価," 電子情報通信学会ソサイエティ大会講演論文集 2000 年 通信ソサイエティ大会講演論文集 (2), 29, 2000-09-07, Sep. 2000.

2. Prasad Dhananjaya, 中川 健治, **宮村　崇**, 栗本 崇, 青木 道宏, 山中 直明, "高速動作可能な QoS 制御アルゴリズムについて," 電子情報通信学会技術研究報告. IT, 情報理論 101(304), 19-24, 2001-09-07, Sep. 2001.

3. 栗本 崇, 青木 道宏, **宮村　崇**, 漆谷 重雄, "マルチレイヤネットワークにおけるプリエンプションに関する検討," 電子情報通信学会総合大会講演論文集 2003 年 通信 (2), 40, 2003-03-03, Mar. 2003.

4. 栗本 崇, 樺島 啓介, 青木 道宏, **宮村　崇**, 漆谷 重雄, "GMPLS と既存 Etnernet スイッチを用いたネットワーク構築法の検討," 電子情報通信学会ソサイエティ大会講演論文集 2003 年 通信 (2), 146, 2003-09-10, Sep. 2003.

5. 栗本 崇, **宮村　崇**, 青木 道宏, 井上 一郎, 松浦 伸昭, 小島 久史, 漆谷 重雄, "マルチレイヤサービスネットワークアーキテクチャの提案," 電子情報通信学会技術研究報告. PN, フォトニックネットワーク 103(281), 25-30, 2003-08-26, Aug. 2003.

6. 林 理恵, **宮村　崇**, 栗本 崇, 青木 道宏, "動的マルチレイヤ経路最適化アルゴリズムの性能評価とシステム実現方式の検討," 電子情報通信学会総合大会講演論文集 2004 年 通信 (2), 91, 2004-03-08, Mar 2004.

7. 栗本 崇, **宮村　崇**, 小島 久史, 青木 道宏, “マルチレイヤサービスネットワークにおける IP 収容に関する検討,” 電子情報通信学会総合大会講演論文集 2004 年 通信 (2), 153, 2004-03-08, Mar. 2004.

8. 林 理恵, **宮村　崇**, 栗本 崇, 青木 道宏, 漆谷 重雄, “トラヒック変動と SRLG を考慮した動的マルチレイヤ最適化アルゴリズムの性能評価,” 電子情報通信学会技術研究報告. IN, 情報ネットワーク 103(651), 29-34, 2004-02-06, Feb. 2004.

9. 林 理恵, **宮村　崇**, 栗本 崇, 三澤 明, “マルチレイヤネットワークにおけるスケーラブルなトラヒック情報の収集及び作成方法の性能評価,” 電子情報通信学会技術研究報告. CS, 通信方式 104(171), 19-24, 2004-07-02, Jul. 2004.

10. 栗本 崇, **宮村　崇**, 小島 久志, 井上 一郎, 大木 英司, 塩本 公平, 漆谷 重雄, “マルチレイヤサービスネットワークにおける故障復旧方式の検討,” 電子情報通信学会技術研究報告. NS, ネットワークシステム 104(516), 13-18, 2004-12-10, Dec. 2004.

11. 大木 英司, **宮村　崇**, 塩本 公平, 井上 一郎, 漆谷 重雄, “PCE によるインターレイヤトラヒックエンジニアリングとプロトコル要求条件,” 電子情報通信学会ソサイエティ大会講演論文集 2005 年 通信 (2), 343, 2005-09-07, Sep. 2005.

12. 林 理恵, **宮村　崇**, 塩本 公平, 漆谷 重雄, “エレファントフローのリアルタイム測定によるネットワーク品質制御技術の検討,” 電子情報通信学会技術研究報告. NS, ネットワークシステム 105(405), 37-40, 2005-11-10, Nov. 2005.

13. 五十嵐 秀平, 橋本 仁, 行松 健一, 村山 秀胤, **宮村　崇**, 塩本 公平, 漆谷 重雄, “ダイナミックトラフィック環境下において再パス設定負荷を軽減する MPLS-TE 手法の提案と評価,” 電子情報通信学会技術研究報告. PN, フォトニックネットワーク 105(471), 7-12, 2005-12-08, Dec. 2005.

14. 林 理恵, **宮村　崇**, 大木 英司, 塩本 公平, 漆谷 重雄, “マルチレイヤトラヒックエンジニアリングによる網構築コスト削減の評価,” 電子情報通信学会技術研究報告. NS, ネットワークシステム 105(470), 53-56, 2005-12-08, Dec. 2005.

15. 林 理恵, **宮村　崇**, 島崎 大作, 大木 英司, 塩本 公平, “交流トラヒックモデルの動向とマルチレイヤ TE への適用,” 電子情報通信学会技術研究報告. PN, フォトニックネットワーク 106(281), 7-12, 2006-10-05, Oct. 2006.

16. 大下 裕一, **宮村　崇**, 荒川 伸一, 阿多 信吾, 大木 英司, 塩本 公平, 村田 正幸, “トラヒックマトリクス推定との協調による段階的な VNT 再構成,” 電子情報通信学会技術研究報告. PN, フォトニックネットワーク 106(281), 67-72, 2006-10-05, Oct. 2006.

17. 大下 裕一, **宮村　崇**, 荒川 伸一, 阿多 信吾, 大木 英司, 塩本 公平, 漆谷 重雄, 村田 正幸, “IP・光マルチレイヤ TE におけるトラヒックマトリクス推定の影響,” 電子情報通信学会技術研究報告. PN, フォトニックネットワーク 106(208), 7-12, 2006-08-15, Aug. 2006.

18. 林 理恵, **宮村　崇**, 大木 英司, 塩本 公平, “エレファントフローのリアルタイム測定による網品質制御技術,” 電子情報通信学会技術研究報告. PN, フォトニックネットワーク 106(281), 1-6, 2006-10-05, Oct. 2006.

19. 大下 裕一, **宮村　崇**, 荒川 伸一, 阿多 信吾, 大木 英司, 塩本 公平, 村田 正幸, “段階的 VNT 再構成時におけるトラヒック推定精度向上のための検討,” 電子情報通信学会技術研究報告. PN, フォトニックネットワーク 106(546), 37-40, 2007-02-27, Feb. 2007.

20. 三浦 康太, 橋本 仁, 行松 健一, **宮村　崇**, 塩本 公平, “IP/MPLS 網における高信頼トポロジ設計法の検討,” 電子情報通信学会総合大会講演論文集 2007 年 通信 (2), 71, 2007-03-07, Mar. 2007.

21. 鎌村 星平, **宮村　崇**, 林 理恵, 松崎 隆一, 塩本 公平, “信頼性を考慮した下位レイヤパスの収容変更による VNT 設計,” 電子情報通信学会総合大会講演論文集 2007 年 通信 (2), 72, 2007-03-07, Mar. 2007.

22. 鎌村 星平, **宮村　崇**, 井上 一郎, 塩本 公平, “既存網からの移行を考慮した高信頼 VNT 設計手法の提案, 電子情報通信学会技術研究報告. NS, ネットワークシステム 107(88), 55-60, 2007-06-07, Jun. 2007.

23. 小泉 佑揮, **宮村　崇**, 荒川 伸一, 大木 英司, 塩本 公平, 村田 正幸, “オーバーレイネットワークの安定収容のための VNT 制御手法,” 電子情報通信学会技術研究報告. PN, フォトニックネットワーク 107(250), 33-38, 2007-10-04, Oct. 2007.

24. 鎌村 星平, **宮村　崇**, 井上 一郎, 塩本 公平, 福田 亜紀, 橋本 仁, 行松 健一, “IP 網におけるマルチパスルーチングの性能評価,” 電子情報通信学会総合大会講演論文集 2008 年 通信 (2), 64, 2008-03-05, Mar. 2008.

25. 福田 亜紀, 橋本 仁, 行松 健一, 鎌村 星平, **宮村　崇**, 塩本 公平, “IP 網における最適ルーチング設計法の性能評価,” 電子情報通信学会総合大会講演論文集 2008 年 通信 (2), 80, 2008-03-05, Mar. 2008.

26. 小泉 佑揮, **宮村　崇**, 荒川 伸一, 大木 英司, 塩本 公平, 村田 正幸, “トラヒック変動に対する適応性を備えたアトラクター選択に基づく仮想網制御手法,” 電子情報通信学会技術研究報告. PN, フォトニックネットワーク 108(183), 1-6, 2008-08-01, Aug. 2008.

27. 大下 裕一, **宮村　崇**, 荒川 伸一, 大木 英司, 塩本 公平, 村田 正幸, “トラヒックの長期変動から現在のトラヒックマトリクスを推定する手法,” 電

子情報通信学会技術研究報告. PN, フォトニックネットワーク 108(183), 7-12, 2008-08-01, Aug. 2008.

28. 鎌村 星平, **宮村　崇**, 塩本 公平, 福田 亜紀, 橋本 仁, 行松 健一, “IP 網における高速故障復旧技術の ISF テーブルエントリ数評価,” 電子情報通信学会ソサイエティ大会講演論文集 2008 年 通信 (2), 16, 2008-09-02, Sep. 2008.

29. 藤原 貴之, **宮村　崇**, 大木 英司, 塩本 公平, “ネットワークコスト最小化に適した TE 方式の比較評価,” 電子情報通信学会ソサイエティ大会講演論文集 2008 年 通信 (2), 15, 2008-09-02, Sep. 2008.

30. 福田 亜紀, 橋本 仁, 行松 健一, 鎌村 星平, **宮村　崇**, 塩本 公平, “ノード次数と必要 MRC 数の関係性についての検討,” 電子情報通信学会技術研究報告. NS, ネットワークシステム 108(203), 131-134, 2008-09-04, Sep. 2008.

31. 鎌村 星平, **宮村　崇**, 井上 一郎, 塩本 公平, 福田 亜紀, 橋本 仁, 行松 健一, “IP 網における高速故障復旧技術 (IP-FRR) の特性評価,” 電子情報通信学会技術研究報告. NS, ネットワークシステム 108(457), 273-276, 2009-02-24, Feb. 2009.

32. 鎌村 星平, **宮村　崇**, ペルサー クリステル, 井上 一郎, 塩本 公平, “IP Fast Reroute のためのスケーラブルコンフィグレーション生成アルゴリズムの提案,” 電子情報通信学会技術研究報告. NS, ネットワークシステム 109(129), 67-72, 2009-07-09, Jul. 2009.

33. 大木 英司, キットスワン ナッタポン, 角田 俊一, **宮村　崇**, 増田 暁生, 塩本 公平, “スケーラブルネットワークエミュレータアーキテクチャ, 電子情報通信学会技術研究報告. PN, フォトニックネットワーク 109(311), 13-17, 2009-11-20, Nov. 2009.

34. 大下 裕一, **宮村　崇**, 荒川 伸一, 塩本 公平, 村田 正幸, “トラヒックマトリクスの取りうる範囲を考慮したマルチレイヤトラヒックエンジニアリング,” 電子情報通信学会技術研究報告. PN, フォトニックネットワーク 108(417), 101-106, 2009-01-22, Jan. 2009.

35. 福田 亜紀, 橋本 仁, 行松 健一, 鎌村 星平, **宮村　崇**, 塩本 公平, “MRC 網における OSPF 最適リンクコスト設定法適用の検討と評価 電子情報通信学会技術研究報告. NS, ネットワークシステム 108(457), 269-272, 2009-02-24, Feb. 2009.

36. 大下 裕一, 小泉 佑揮, **宮村　崇**, 荒川 伸一, 増田 暁生, 塩本 公平, 村田 正幸, “ネットワーク仮想化による複数サービスの資源最適化のための動的トポロジ制御サーバの設計,” 電子情報通信学会技術研究報告. PN, フォトニックネットワーク 108(476), 93-98, 2009-03-02, Mar. 2009.

37. Shohei Kamamura, **Takashi Miyamura**, Ichiro Inoue, Kohei Shiomoto, “A scalable backup configurations creation for IP-FRR,” 電子情報通信学会総合大会講演論文集 2009 年 通信 (2), ”S-9”-”S-10”, 2009-03-04, Mar. 2009.

38. 鎌村 星平, **宮村　崇**, Pelsser Cristel, 井上 一郎, 塩本 公平, “Minimum backup configuration creation method for IP Fast Reroute,” 電子情報通信学会ソサイエティ大会講演論文集 2009 年 通信 (2), ”S-69”-”S-70”, 2009-09-01, Sep. 2009.

39. 小泉 佑揮, **宮村　崇**, 荒川 伸一, 塩本 公平, 村田 正幸, “アトラクター選択に基づく仮想網制御手法の環境変化に対する適応性の評価,” 電子情報通信学会技術研究報告. PN, フォトニックネットワーク 109(221), 47-52, 2009-10-01, Oct. 2009.

40. 鎌村 星平, **宮村　崇**, 武田 知典, 植松 芳彦, 塩本 公平, “ドメイン間リンク故障時のドメイン内代替経路への高速切替法,” 電子情報通信学会総合大会講演論文集 2010 年 通信 (2), 123, 2010-03-02, Mar. 2010.

41. 鎌村 星平, 武田 知典, **宮村　崇**, 植松 芳彦, 塩本 公平, “動的パス制御による 1+1 パスプロテクション常時化方式の提案,” 電子情報通信学会技術研究報告. NS, ネットワークシステム 110(93), 1-6, 2010-06-17, Jun. 2010.

42. 鎌村 星平, **宮村　崇**, 植松 芳彦, 塩本 公平, “IP Fast Reroute 制御アーキテクチャの一検討,” 電子情報通信学会技術研究報告. NS, ネットワークシステム 110(126), 13-16, 2010-07-08, Jul. 2010.

43. 高橋 良太, 行松 健一, 鎌村 星平, **宮村　崇**, 塩本 公平, “資源利用効率を考慮した IP 網高速故障復旧技術の検討,” 電子情報通信学会技術研究報告. NS, ネットワークシステム 109(398), 25-28, 2010-01-21, Jan. 2010.

44. 大下 裕一, 南 勇貴, **宮村　崇**, 荒川 伸一, 塩本 公平, 村田 正幸, “アトラクタ選択による動的トポロジ制御サーバの実装と評価,” 電子情報通信学会技術研究報告. PN, フォトニックネットワーク 109(455), 107-112, 2010-03-01, Mar. 2010.

45. 角田 俊一, キットスワン ナッタポン, 大木 英司, **宮村　崇**, 塩本 公平, “光 IP ネットワーク制御実験に向けたスケーラブルネットワークエミュレータの実装,” 電子情報通信学会総合大会講演論文集 2010 年 通信 (2), 467, 2010-03-02, Mar. 2010.

46. 小泉 佑揮, **宮村　崇**, 荒川 伸一, 塩本 公平, 村田 正幸, “アトラクター重畳を用いた複数仮想網の制御手法,” 電子情報通信学会技術研究報告. PN, フォトニックネットワーク 110(193), 7-12, 2010-08-26, Aug. 2010.

47. 鎌村 星平, **宮村　崇**, 植松 芳彦, 塩本 公平, “Backup FIB Reduction Method using Shared Backup FIB for IP Fast Reroute,” 電子情報通

信学会ソサイエティ大会講演論文集 2010 年 通信 (2), ”S-107”-”S-108”, 2010-08-31, Aug. 2010.

48. 鎌村 星平, 小泉 佑揮, **宮村　崇**, 荒川 伸一, 塩本 公平, 村田 正幸, “管理型自己組織化ネットワークのための管理システムの提案 電子情報通信学会技術研究報告. NS, ネットワークシステム 111(43), 133-136, 2011-05-12, May. 2011.

49. 鎌村 星平, 小泉 佑揮, 島崎 大作, **宮村　崇**, 荒川 伸一, 大木 英司, 塩本 公平, 平松 淳, 村田 正幸, “管理型自己組織化ネットワークの有効性評価,” 電子情報通信学会ソサイエティ大会講演論文集 2011 年 通信 (2), 334, 2011-08-30, Aug. 2011.

50. 大下 裕一, **宮村　崇**, 荒川 伸一, 塩本 公平, 村田 正幸, “大規模ネットワークのための階層型トラヒックエンジニアリング,” 電子情報通信学会技術研究報告. PN, フォトニックネットワーク 110(431), 25-28, 2011-02-21, Feb. 2011.

51. Yuki Minami, Yuki Koizumi, Shinichi Arakawa, **Takashi Miyamura**, Kohei Shiomoto, Masayuki Murata, “On the benefits of virtual network topology control based on attractor selection model in changing environments,” 電子情報通信学会技術研究報告. PN, フォトニックネットワーク 110(431), 121-124, 2011-02-21, Feb. 2011.

52. 磯貝 彰則, 増田 暁生, 鎌村 星平, **宮村　崇**, 塩本 公平, “光 IP 連携サーバを利用した光 IP 統合網と仮想網の制御方式について 電子情報通信学会技術研究報告. NS, ネットワークシステム 111(91), 15-20, 2011-06-16 Jun 2011

53. 杉山 隆太, **宮村　崇**, 植松 芳彦, 塩本 公平, “耐障害性を考慮したリンク帯域設計の実用性検討 : 大規模へ向けた計算時間の高速化と誤差を含む入力値への適用化 電子情報通信学会技術研究報告. NS, ネットワークシステム 111(91), 21-26, 2011-06-16 Jun 2011

54. 杉山 隆太, **宮村　崇**, 植松 芳彦, 平松 淳, “サービス統合 IP 網に向けた Gravity モデルにおける交流トラヒック推定法 電子情報通信学会ソサイエティ大会講演論文集 2011 年 通信 (2), 22, 2011-08-30 Aug 2011

55. 小泉 佑揮, **宮村　崇**, 荒川 伸一, 鎌村 星平, 島崎 大作, 塩本 公平, 村田 正幸, “アトラクター構造の動的再構成による自己組織化制御の収束時間の改善 電子情報通信学会ソサイエティ大会講演論文集 2011 年 通信 (2), 336, 2011-08-30 Aug 2011

56. 水元 宏治, 荒川 伸一, 小泉 佑揮, 島崎 大作, **宮村　崇**, 鎌村 星平, 塩本 公平, 平松 淳, 村田 正幸, “計算量を削減した自己組織型仮想網制御手法の提案と評価 (仮想ネットワーク) 電子情報通信学会技術研究報告. NS, ネットワークシステム 111(468), 17-22, 2012-03-01 Mar 2012

57. 荒川 伸一, 小泉 佑揮, 島崎 大作, **宮村　崇**, 鎌村 星平, 塩本 公平, 平松 淳, 村田 正幸, “複数 VNT 制御のための自己組織化管理手法の提案と評価 (フォトニックネットワーク関連技術, 一般) 電子情報通信学会技術研究報告. PN, フォトニックネットワーク 111(475), 25-30, 2012-03-05 Mar 2012

58. 鎌村 星平, 森 弘樹, 島崎 大作, **宮村　崇**, 塩本 公平, 平松 淳, “1000 ノード光ネットワークエミュレータの構成方法に関する検討 (B-6. ネットワークシステム, 一般セッション) 電子情報通信学会総合大会講演論文集 2012 年 通信 (2), 63, 2012-03-06 Mar 2012

59. 植松 芳彦, 増田 暁生, **宮村　崇**, 平松 淳, “フレキシブル仮想光トランスポート制御技術 (エレメント管理, 管理機能, 理論・運用方法論, 及び一般) 電子情報通信学会技術研究報告. ICM, 情報通信マネジメント 111(488), 119-124, 2012-03-08 Mar 2012

60. 島崎 大作, 鎌村 星平, **宮村　崇**, 小泉 佑揮, 荒川 伸一, 塩本 公平, 平松 淳, 村田 正幸, “光パスネットワーク再構成アルゴリズムの検討 (B-12. フォトニックネットワーク, 一般セッション) 電子情報通信学会総合大会講演論文集 2012 年 通信 (2), 493, 2012-03-06 Mar 2012

61. 植松 芳彦, 増田 暁生, **宮村　崇**, 平松 淳, “フレキシブル仮想光トランスポート制御技術 (サービス品質, クラウド,SDN(Software-Defined Network), コンテンツ配信, 一般) 電子情報通信学会技術研究報告. CS, 通信方式 112(9), 113-118, 2012-04-12 Apr 2012

62. 三原 大輝, 井町 大輝, 山本 幹, **宮村　崇**, 塩本 公平, 平松 淳, “コンテンツ指向型トラヒックエンジニアリング手法の提案 電子情報通信学会技術研究報告. NS, ネットワークシステム 112(85), 55-60, 2012-06-14 Jun 2012

63. 鎌村 星平, 小泉 佑揮, 島崎 大作, **宮村　崇**, 荒川 伸一, 塩本 公平, 平松 淳, 村田 正幸, “管理型自己組織化ネットワークにおける資源使用量を適正化する仮想網制御法の提案 電子情報通信学会技術研究報告. NS, ネットワークシステム 112(85), 73-78, 2012-06-14 Jun 2012

64. 水元 宏治, 荒川 伸一, 小泉 佑揮, 島崎 大作, **宮村　崇**, 鎌村 星平, 塩本 公平, 平松 淳, 村田 正幸, “計算量を削減した自己組織型仮想網制御手法の評価 電子情報通信学会技術研究報告. PN, フォトニックネットワーク 112(87), 37-42, 2012-06-14 Jun 2012

65. 植松 芳彦, 増田 暁生, **宮村　崇**, 平松 淳, “将来網に向けたフレキシブル仮想光トランスポート制御技術 電子情報通信学会技術研究報告. IN, 情報ネットワーク 112(230), 67-72, 2012-10-03 Oct 2012

66. 鎌村 星平, 小泉 佑揮, 島崎 大作, **宮村　崇**, 荒川 伸一, 塩本 公平, 平松 淳, 村田 正幸, “管理型自己組織化ネットワークにおける資源使用量適正化方

式 (B-6. ネットワークシステム, 一般セッション) 電子情報通信学会ソサイエティ大会講演論文集 2012 年 通信 (2), 23, 2012-08-28 Aug 2012

67. 小泉 佑揮, **宮村　崇**, 荒川 伸一, 鎌村 星平, 島崎 大作, 塩本 公平, 平松 淳, 村田 正幸, “アトラクター構造が自己組織化制御の環境変化に対する適応性および収束時間に与える影響の評価 電子情報通信学会技術研究報告. PN, フォトニックネットワーク 111(475), 31-36, 2012-03-05 Mar 2012

68. 島崎 大作, 磯貝 彰則, 鎌村 星平, 増田 暁生, **宮村　崇**, 植松 芳彦, 塩本 公平, 平松 淳, “管理型自己組織化仮想網制御のためのリソース管理モデル 電子情報通信学会技術研究報告. ICM, 情報通信マネジメント 111(488), 125-130, 2012-03-08 Mar 2012

69. 杉山 隆太, 武田 知典, **宮村　崇**, 植松 芳彦, “サービス統合 IP 網における交流トラヒック推定精度の評価 電子情報通信学会技術研究報告. NS, ネットワークシステム 112(8), 83-86, 2012-04-12 Apr 2012

70. 鎌村 星平, 島崎 大作, **宮村　崇**, 笹山 浩二, “大規模故障後の効率的な通信路復旧を実現する波長パス設定順序決定法の検討 (網設計マルチレイヤ) 電子情報通信学会技術研究報告. NS, ネットワークシステム 112(463), 613-616, 2013-02-28 Feb 2013

71. 島崎 大作, 鎌村 星平, **宮村　崇**, 小泉 佑揮, 荒川 伸一, 笹山 浩二, 村田 正幸, “アトラクタ選択法を用いた光パストポロジ決定アルゴリズムの検討 (網設計マルチレイヤ) 電子情報通信学会技術研究報告. NS, ネットワークシステム 112(463), 629-632, 2013-02-28 Feb 2013

72. 鎌村 星平, 島崎 大作, **宮村　崇**, 植松 芳彦, 笹山 浩二, “大規模故障に対する中継網の復旧工程最適化法の提案 電子情報通信学会技術研究報告. NS, ネットワークシステム 113(129), 191-196, 2013-07-11 Jul 2013

73. 鎌村 星平, 島崎 大作, **宮村　崇**, 笹山 浩二, “大規模故障時のトラヒック復旧を効率化するパス設定順序決定法の検討 (B-6. ネットワークシステム) 電子情報通信学会総合大会講演論文集 2013 年 通信 (2), 1, 2013-03-05 Mar 2013

74. 森 弘樹, 鎌村 星平, 島崎 大作, **宮村　崇**, 植松 芳彦, 笹山 浩二, “仮想光トランスポート制御技術における物理資源割当方式の検討 (B-6. ネットワークシステム) 電子情報通信学会総合大会講演論文集 2013 年 通信 (2), 26, 2013-03-05 Mar 2013

75. 島崎 大作, 森 弘樹, 鎌村 星平, **宮村　崇**, 笹山 浩二, “大規模故障復旧制御シミュレータの検討 (B-6. ネットワークシステム) 電子情報通信学会総合大会講演論文集 2013 年 通信 (2), 29, 2013-03-05 Mar 2013

76. 森 弘樹, 鎌村 星平, 磯貝 彰則, 島崎 大作, **宮村　崇**, 植松 芳彦, 笹山 浩二, “仮想光トランスポート制御技術における論理 IP 網への物理資源割当

変更方式 (B-6. ネットワークシステム, 一般セッション) 電子情報通信学会ソサイエティ大会講演論文集 2013 年 通信 (2), 43, 2013-09-03 Sep 2013

77. 鎌村 星平, 島崎 大作, **宮村　崇**, 笹山 浩二, 小泉 佑揮, 荒川 伸一, 村田 正幸, “交流トラヒック演算の高速化による光パス復旧効率化方式の検討 (B-6. ネットワークシステム, 一般セッション) 電子情報通信学会ソサイエティ大会講演論文集 2013 年 通信 (2), 44, 2013-09-03 Sep 2013

78. 小泉 佑揮, 荒川 伸一, 鎌村 星平 [他], 島崎 大作, **宮村　崇**, 平松 淳, 村田 正幸, “アトラクター選択にもとづく仮想網制御の複数ノード障害に対する適応性 電子情報通信学会技術研究報告. PN, フォトニックネットワーク 112(471), 1-6, 2013-03-04 Mar 2013

79. 荒川 伸一, **宮村　崇**, 小泉 佑揮, 島崎 大作, 鎌村 星平, 笹山 浩二, 塩本 公平, 村田 正幸, “自己組織化管理にもとづく複数 VNT 制御の性能評価 電子情報通信学会技術研究報告. PN, フォトニックネットワーク 112(471), 13-18, 2013-03-04 Mar 2013

80. 植松 芳彦, 武田 知典, 杉山 隆太, 鎌村 星平, **宮村　崇**, 笹山 浩二, “交流トラヒック推定技術の大規模サービス統合 IP 網への適用性 電子情報通信学会総合大会講演論文集 2013 年 通信 (2), 99, 2013-03-05 Mar 2013

81. 荒川 伸一, **宮村　崇**, 小泉 佑揮, 島崎 大作, 鎌村 星平, 笹山 浩二, 塩本 公平, 村田 正幸, “自己組織化管理に基づく複数 VNT 制御の実証実験 電子情報通信学会総合大会講演論文集 2013 年 通信 (2), 454, 2013-03-05 Mar 2013

82. 山本　宏, 北村　圭, 横田昌宏, 伊達拓紀, 鎌村星平, **宮村　崇**, 植松芳彦, “マルチキャリア光伝送方式における可用性の基本傾向　～NetroSphere 構想実現に向けて～,” 電子情報通信学会技術研究報告. NS, ネットワークシステム 、NS2016-31 pp.19-22 Jun 2016

83. 山本 宏, 伊達 拓紀, 鎌村 星平, 林 理恵, **宮村　崇**, 源田 浩一, 植松 芳彦, “帯域の異なる呼が混在する環境での棄却率推定方式の精度評価 電子情報通信学会総合大会講演論文集 2016 年 通信 (2), ”S-104”, 2016-03-01 Mar 2016

84. 源田 浩一, 山本 宏, 伊達 拓紀, 鎌村 星平, 林 理恵, **宮村　崇**, 植松 芳彦, “B2B2X クラウドサービス基盤のリソース制御の検討 電子情報通信学会総合大会講演論文集 2016 年 通信 (2), 60, 2016-03-01 Mar 2016

85. 伊達 拓紀, 山本 宏, 鎌村 星平, 林 理恵, **宮村　崇**, 植松 芳彦, 源田 浩一, 行田 克俊, “マルチレイヤ構成を考慮したステートフル障害管理の提案 電子情報通信学会総合大会講演論文集 2016 年 通信 (2), 84, 2016-03-01 Mar 2016

86. 林 理恵, 鎌村 星平, 伊達 拓紀, 山本 宏, **宮村　崇**, 源田 浩一, 植松 芳彦, 行田 克俊, “トランスポート SDN が創る光ネットワーク基盤の将来像 電子情報通信学会総合大会講演論文集 2016 年 通信 (2), 82, 2016-03-01 Mar 2016

87. 鎌村 星平, 山本 宏, 伊達 拓紀, 林 理恵, **宮村　崇**, 植松 芳彦, 源田 浩一, 行田 克俊, “IP 伝送統合トランスポートの環境適応型ネットワークデザイン 電子情報通信学会総合大会講演論文集 2016 年 通信 (2), 83, 2016-03-01 Mar 2016

88. 横田 昌宏, 北村 圭, **宮村　崇**, 前田 英樹, “Beyond 100G 光トランスポート網の信頼性向上に関する提案 電子情報通信学会総合大会講演論文集 2016 年 通信 (2), 315, 2016-03-01 Mar 2016