

## [奨励講演] 波長変換・波長群変換機能を有する 多階層光パスネットワークの二段階整数線形計画に基づく設計法

中野 一輝 山田 祥之 長谷川 浩 佐藤 健一

名古屋大学大学院 工学研究科 電子情報システム専攻 〒464-8603 愛知県名古屋市千種区不老町  
E-mail: {k\_nakano, yo\_yamad}@echo.nuee.nagoya-u.ac.jp, {hasegawa, sato}@nuee.nagoya-u.ac.jp

あらまし 本稿では波長群パスを導入した多階層光パスネットワークにおいて、波長変換・波長群変換の双方もしくは波長変換のみを考慮しながら準最適なコスト下限値を示す設計法を提案する。提案手法では、多階層光パスネットワークの設計問題を二段階の整数線形計画問題に分割することにより、計算時間の短縮を図っている。波長変換のみを考慮した提案手法により設計されたネットワークでは、変換を考慮しない設計法[柳生他'08]により設計されたネットワークと比べ最大30%程度のネットワークコスト（波長変換器のコストは除く）が削減される。これにより、一階層光パスネットワークに対して多階層光パスネットワークがコスト優位となる領域を広げている。

キーワード 多階層光パスネットワーク, 波長群, ネットワーク設計, 経路・波長群・波長割当,  
波長群・波長変換, 整数線形計画法

## [Encouragement Talk] Hierarchical Optical Path Network Design with Wavelength/Waveband Conversion based on Two-Stage ILP Formulation

Kazuteru NAKANO, Yoshiyuki YAMADA, Hiroshi HASEGAWA, and Ken-ichi SATO

Department of Electrical Engineering and Computer Science, Nagoya University  
Furo-cho, Chikusa-ku, Nagoya, 464-8603 Japan

E-mail: {k\_nakano, yo\_yamad}@echo.nuee.nagoya-u.ac.jp, {hasegawa, sato}@nuee.nagoya-u.ac.jp

**Abstract** In this paper, we propose design algorithms for hierarchical optical path networks with waveband/wavelength conversion or only with wavelength conversion. Although the design issue of networks with full waveband/wavelength conversion is free from the waveband/wavelength assignment, the cost minimization is hard to solve due to the degree of freedom in determination of waveband path location. Thus we firstly divide the original problem into sequential two-stage integer linear programming formulations that respectively concentrate on wavelength/waveband path accommodation. Numerical experiments elucidate that, without considering the cost of converters, the proposed algorithm achieves up to 30% cost reduction compared with a conventional algorithm without wavelength conversion [Yagy, et al., 08]. Over a broad range of traffic demand, hierarchical optical path networks designed by the proposed algorithm achieves lower cost than single layer optical path networks where existing algorithms failed to realize the cost reduction.

**Keyword** Hierarchical Optical Network, Waveband, Network Design, Routing and Waveband/Wavelength Assignment, Waveband/Wavelength Conversion, Integer Linear Programming

### 1. まえがき

ADSL や FTTH などのブロードバンドアクセスの急速な普及に伴い、バックボーンネットワークを流れるトラフィックは年率50%もの割合で急激に増加している。現在のバックボーンネットワークの各ノードにおける転送処理は電気技術をベースとしているが、転送処理のための膨大な電力消費量等が高速化のボトルネックとなりつつある。このため伝送される光信号の波長をラベルとし、光スイッチにより経路選択を行うことで、中継処理に伴う電氣的処理をカットスルーし、

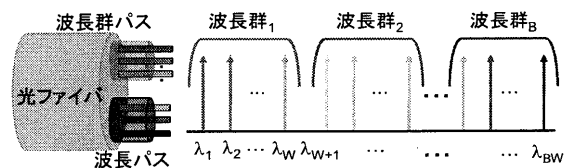


図1 多階層光パスの概念図

超高速処理・低消費電力を実現するフォトニックネットワーク技術が盛んに研究されている。現在、波長を転送単位(波長パス)とするフォトニックネットワー

クである“一階層光パスネットワーク”実現の一形態として、Reconfigurable Optical Add Drop Multiplexers (ROADMs) に基づいた一階層光パスネットワークが導入され始めている。しかし将来的には、既存のサービス(HTTP, FTP 等)に加え、新たなサービス(UltraHDTV, e-Science 等)の広汎な利用が見込まれており、更なるトラフィックの爆発的増加は避けられない。従来は波長分割多重(Wavelength Division Multiplexing: WDM)技術による同一ファイバ内への複数波長の収容によりネットワークの大容量化が実現されてきたが、収容波長数の更なる増加はノードにおいて必要となるスイッチポート数の増加、それに伴う光クロスコネクタの規模の拡大を引き起こし、ノードコストの急増を招く。これに対し複数波長を束ね“波長群パス”とし一括して経路選択処理を行うことでネットワーク大容量化と、ポート数削減とそれに伴うノードコストの低廉化を両立する、“多階層光パスネットワーク”が注目されている[1,2]。

多階層光パスネットワークでは、ネットワーク内に適切な波長群パス網を構築し通信要求に応じノード間を結ぶ必要な本数の波長パスを波長群パス網内に設定する。同一波長群・波長を有する波長群・波長パスが同一ファイバ内で共存できない本質的制約を満足しながら、波長群パス・波長パスに適切な経路及び波長群・波長を割り当て、ネットワークコストの最小化を図る。本問題は NP 完全となる計算量的に極めて困難かつ複雑な問題であり、この問題を解決すべく幾つかの発見的アルゴリズムが提案されている[3-6]。特に文献[5]では、各通信要求の始点ノード及び終点ノードの偏在を直積空間上の分布で表現し、収容可能なパスが集中する領域に逐次波長群パスを構築し波長パスを収容することで、理論上の下限値に近いネットワークコストが達成され、トラフィック需要が少ない一部の領域を除いて一階層光パスネットワークに比べてネットワークコストが低減されることが示されている。しかし、トラフィック需要が少ない場合には波長パス需要が局地的に集中する領域が少ないため、狙いとする高収容率波長群パスの構築が困難である。この領域における実現コストの更なる低減のためには、積極的に高収容率の波長群パスを設立するより、低収容率ながらも波長・波長群変換を有効に用いた波長割当問題の解決の必要性が示されている[7]。

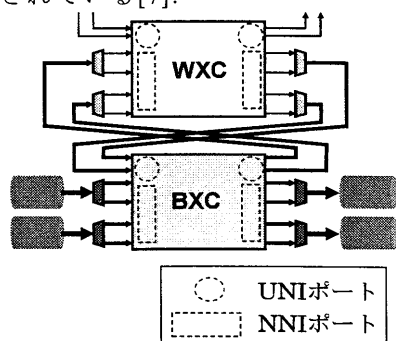


図2 多階層型 MG-OXC のノード構成

従来、波長群パス及び波長制約の緩和による波長群パス及びファイバ収容効率の向上とそれに伴うネットワークコストの削減の実現を目指し、波長変換器をノードに導入した多階層光パスネットワークの提案およ

び性能評価がなされている[8-10]。しかし、いずれにおいても用いられたパス配置決定アルゴリズムは簡素なものであり、十分に波長変換の効果を得ているとは言い難い。そのため、波長変換器の導入または電氣的再生処理に付随した波長変換及び近年検討されている波長群変換[11,12]という2種類の変換機能を最大限利用した場合におけるコスト下限の導出が重要な課題である。

本稿では、波長群変換・波長変換を導入した場合の多階層光パスネットワークのコストの準下限値を導出する設計法を提案する。提案設計法では、本来のネットワーク資源総量の最小化問題を波長群パス総量およびファイバ総量の独立した最小化問題に分割し、各々整数線形計画法(ILP: Integer Linear Programming)として定式化する。続いてこの二段階の問題を順次解くことで準最適解を得る。この結果、既存の設計法では一階層光パスネットワークに比べ、パス階層化によるコスト削減が困難であった通信需要が少ない領域においても、波長群変換・波長変換の導入によりコスト削減効果を楽しむことができることを明らかにする。

なお、本稿は奨励原稿執筆を期に[13]を基に加筆したものである。提案している二段階 ILP は、[13]発表後、超大容量階層化光パスクロスコネクタノードを実現するための、電氣的処理による波長クロスコネクタと、光信号の直接処理による波長群クロスコネクタのハイブリッド構成ノード[14-16]を用いたネットワーク設計法[17]等に発展している。

## 2. 準備

### 2.1. 多階層光パスネットワーク

多階層光パスネットワークは、波長パス及び波長群パスという粒度が異なる2種類の光パスにより構成される。図1に波長パス、波長群パス、光ファイバの包含関係を示す。また、図2に多階層型 MG-OXC(Multi-Granular Optical Cross-Connect)ノード構成を示す。多階層光パスネットワークのノードは波長パスのルーティングを行う波長クロスコネクタ(Wavelength Cross-Connect, WXC)部と波長群パスのルーティングを行う波長群クロスコネクタ(Waveband Cross-Connect, BXC)部から構成される。WXCとBXCとをスタックして構成する多階層型 MG-OXC 構成では必要に応じて波長群パスに収容される波長パスを任意に組み替えることが可能であり、トラフィック需要に対する柔軟性を有する。また本稿では、各クロスコネクタにおいて通信粒度が小さくなる方向へのインタフェースを UNI(User Network Interface)、大きくなる方向へのインタフェースを NNI(Network Network Interface)と呼ぶ。

次節以降では全ポートに波長/波長群変換が実装された状況における最適化を行うことで階層化光パスネットワークにおける最大のネットワークコスト削減効果を見積もる。

## 3. 二段階 ILP による波長群変換・波長変換を考慮した多階層光パスネットワーク設計法

### 3.1. 二段階 ILP 定式化によるフロー設計

多階層光パスネットワーク設計では適切なファイバ配置を求めるだけでなく、波長群パスの始点・終点

やいずれの波長パスを收容するかについて任意性があり、一階層光パスネットワークで Source Formulation による記述とそれに続く最適化を実現した文献[18,19]の手法を直接適用できない。これは、一階層光パスネットワークが始点と終点が固定された波長フローおよびリンク上に定義されるファイバ網の最適化を図っているのに対し、本稿では始点と終点が最適化の要素となる波長群フローを扱うためである。波長群パスは仮想的なノード間の直接接続(virtual fiber として扱われる)を提供し、波長パスはファイバに間接的に提供されるため、波長群フロー・波長フロー設計問題を波長パス・波長群パス各々の二段階の最小化問題に分割し、パス粒度毎の準最適解を現実的な計算時間で算出することを目指す。以下に概要を示す。

<二段階 ILP による VWP 型多階層光パスネットワーク設計アルゴリズム>

#### Step1. 波長群パス始/終点および波長パス收容の最適化

トポロジ内の全ノード間に枝を設定した完全グラフの各枝に、端点のノード間に1本の波長パスを通す際に WXC で必要となる NNI ポートのコストと、このノード対間に最短ホップ数で波長群パスを1本接続した場合に BXC の UNI/NNI ポートに要するコストの和を対応づける。続いてこの完全グラフ上で、与えられた波長パス接続要求を全て收容し、かつコストの総和を最小とする最適波長フロー決定問題を解くことにより、波長パスの波長群パスへの收容情報を得る。

#### Step2. 波長群パス経路およびファイバ網の最適化

トポロジ上の枝に、1本の波長群パスをこのノード対間に通す際に BXC で必要となる NNI ポートのコストと、このノード対間に1本のファイバを接続した場合に要するコストの和を対応づける。Step1 で得た波長群パスの接続要求に対して、これを收容可能な最適波長群フロー決定問題を解くことにより、波長群パスのファイバへの收容情報を得る。

以上二段階の最適化の結果を総合し、波長パス・波長群パスのフローとファイバ敷設結果を得る。

### 3.2. フロー情報からのパス配置決定

3.2 節の結果得られたフロー情報からパス情報を得る手続きを以下に示す。

<フロー情報からのパス情報の抽出手法>

#### Step1 初期化

送信ノードからの抽出フロー各々について、接続されているリンク上のフロー流量に基づき矛盾のない適切な次ノードを割り当てる。以降では経路末端となっているノードをフローの終端ノードと呼ぶ。

#### Step2 逐次次ノード探索

各フローに現在割り当てられている終端ノードについて、そのノードで drop されるものについては経路を確定し、以降の探索から除外する。全てのフローが除外されるまで、Step1 と同様な手続きにより次ノードを探索し、終端ノードを更新する。経路の異なる複数のフローからそのノードで drop されるものを選ぶ場合には、ランダムに選択する。

**Remark** 同一ノードに2つ以上のノードから特定のフローが流入し、かつ drop/送出の先が複数ある場合に限

り上記手法が出力する結果には任意性があるが、多くの試行においては一意に結果が決定する。

### 3.3. 波長変換のみを考慮した多階層光パスネットワーク設計法

3.1-3.2 節の結果得られたパス情報について、ホップ長の長い波長群パスから波長群番号を優先的に割り当て、衝突により既存ファイバが不足する場合は適宜増設することで、波長変換のみを考慮した多階層光パスネットワークを設計する。

なお、3.1 節の ILP に於いて、波長群パスのファイバへの收容問題を、波長群番号の連続性を考慮した ILP に置き換えることでより効率の良いネットワークを設計することが可能であるが、より長い計算時間が必要である。詳細は[13]を参照されたい。

## 4. 数値実験

本節では数値実験により、波長変換・波長群変換を考慮した多階層光パスネットワークにおいて準下限コストおよび波長変換を考慮した多階層光パスネットワークにおける波長群変換のコスト削減効果について述べる。5x5 格子型ネットワークにおいて、波長パス需要を一様ランダムに発生させてネットワークを設計し、得られたコストについて試行 10 回の平均を算出した。ILP Solver として CPLEX を用いた。計算時間短縮の為、Step1 において計算時間を2日間に制限し、また Step2 において計算時間を1日間(平均波長パス需要>1)もしくは2日間(平均波長パス需要≤1)に制限した上での暫定解を用いた。各変換器を導入した場合のネットワークの実現コストの下限を見積もるため、波長および波長群変換のコストを0として評価を行っている。

図4に波長変換を考慮した提案手法、および波長群変換・波長変換を考慮しない従来法[5]により構築したネットワークにおける、一階層光パスネットワークのコストで規格化した多階層光パスネットワークの正規化コストを示す。各部分のコスト(ポート、ファイバ等)の詳細については[5]を参照されたい。提案手法と従来法の差は波長パス需要が少ない領域ほど大きく、最大30%程度である。この結果、多階層光パスネットワークが一階層光パスネットワークより優位なコストを示す領域を拡張している。ただし、本検討は各変換器の

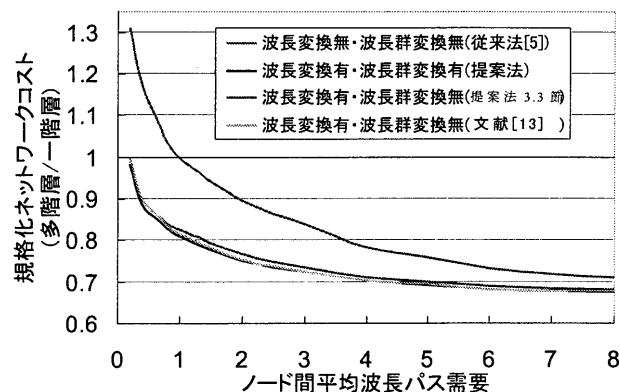


図3 波長群変換・波長変換を用いたネットワークのコスト比較

コストを0と仮定した場合の結果であり、実際には各変換器導入によるコストの増分が加わるため、差はより小さくなる。提案手法において波長群変換を用いる場合と用いない場合の差はほとんど零であり、波長変換を十分に用いれば波長群変換による効果はほぼ得られないといえる。また、波長群割当を考慮した提案手法は、3.3節で述べた文献[13]の別手法に比べ計算時間が短く、若干のコスト差は見られるもののほぼ同程度のコスト削減効果を達成している。

## 5. むすび

本稿では、波長変換・波長群変換を考慮した多階層光パスネットワークの最適設計を与える整数線形計画問題を、フロー粒度毎に二段階に分割することで現実的な計算時間を達成し、かつ多階層光パスネットワークの準最適な下限コスト値を示す設計法を提案した。同時に、波長変換を考慮し波長群変換を用いない場合に向けたパス情報抽出と割り当てを提案した。数値例により、提案手法を用いることで波長変換・波長群変換を考慮しない設計法[5]により設計されたネットワークに比べ、最大30%程度のネットワークコスト削減を実現することを示した。これにより、多階層光パスネットワークが一階層光パスネットワークに対して優位となる領域が非常に広範囲であることを示した。また、波長変換を十分に用いた場合には、波長群変換のコスト削減効果はほぼ得られないことを示した。

謝辞 本研究はNEDOグリーンITプロジェクトの一環である。

## 文 献

- [1] L. Noirie, C. Blaizot, and E. Dotaro, "Multi-granularity optical cross connect," *ECOC*, pp. 269-270, Oct. 2000.
- [2] K. Sato, and H. Hasegawa, "Prospects and Challenges of Multi-Layer Optical Networks," *IEICE Trans. Commun.*, vol.E90-B, no. 8, pp. 1890-1902, Aug. 2007.
- [3] X. Cao, V. Anand, Y. Xiong, and C. Qiao, "A Study of Waveband Switching With Multilayer Multigranular Optical Cross-Connects," *IEEE JSAC*, vol. 21, no. 7, pp. 1081-1094, Sep. 2003.
- [4] P.-H. Ho, H. T. Mouftah, and J. Wu, "A Scalable Design of Multigranularity Optical Cross-Connects for the Next-Generation Optical Internet," *IEEE JSAC*, vol. 21, no. 7, pp. 1133-1142, Sep. 2003.
- [5] I. Yagyu, H. Hasegawa, and K. Sato, "An Efficient Hierarchical Optical Path Network Design Algorithm based on a Traffic Demand Expression in a Cartesian Product Space," *IEEE JSAC*, vol. 26, no. 6, Part Supp., pp. 22-31, Aug. 2008.
- [6] Y. Yamada, H. Hasegawa, and K. Sato, "Hierarchical Optical Path Network Design Algorithm Considering Waveband Protection," *IEEE JLT*, vol. 27, Issue 24, pp. 5736-5748, 2009.
- [7] 中野一輝, 山田祥之, 長谷川浩, 佐藤健一, "波長パス需要数が少ない領域における多階層光パスネットワークのコスト解析," 電気関係学会東海支部連合大会, O-453, Sep. 2009.
- [8] X. Cao, C. Qiao, V. Anand, and J. Li, "Wavelength Assignment in Waveband Switching Networks with Wavelength Conversion," *IEEE GLOBECOM*, vol.3, pp. 1943-1947, Nov. - Dec. 2004.
- [9] X. Cao, V. Anand, J. Li, and C. Xin, "Waveband Switching Networks with Limited Wavelength Conversion," *IEEE Commun. Letters*, vol. 9, pp. 646-648, Jan. 2005.
- [10] 鈴木基志, 高橋耐志, 原井洋明, 小関健, "階層型光ネットワークにおける波長変換の部分導入及びそのコスト削減効果," 電子情報通信学会論文誌, B vol. J88-B, pp. 1411-1421, Aug. 2005.
- [11] J. Yamawaku, E. Yamazaki, A. Tanaka, T. Morita, and K. Suzuki, "Virtual Grouped-Wavelength-Path Switching based on QPM-LN Waveband Converter and Supercontinuum Wavelength-Bank Source," *OFC/NFOEC*, vol. 6, no. OFE2, Mar. 2005.
- [12] 山崎悦史, 犬塚史一, G. Weichenberg, 高田篤, 山湧純, 盛岡敏夫, 古賀正文, "トランスペアレント波長群一括変換による輻輳回避機能とバーチャル波長群パス設定機能の実証," *Technical report of IEICE. OCS*, pp.55-60, May. 2006.
- [13] 中野一輝, 山田祥之, 長谷川浩, 佐藤健一, "波長変換・波長群変換機能を有する多階層光パスネットワークの設計法," 電子情報通信学会技術研究報告, PN2009-89, 2010年3月.
- [14] R. Izmailov, S. Ganguly, T. Wang, Y. Suemura, Y. Maeno, and S. Araki, "Hybrid Hierarchical Optical Networks," *IEEE Communication Magazine*, November 2002.
- [15] S. Yao, C. Ou, and B. Mukherjee, "Design of Hybrid Optical Networks with Waveband and Electrical TDM Switching," in *Proc. GLOBECOM'03*, December 2003.
- [16] H.C. Le, H. Hasegawa, and K. Sato, "Cost Evaluation of Hybrid-Hierarchical Optical Cross-connects based Optical Path Networks," in *Proc. ICCE 2010*, August 2010.
- [17] H.C. Le, H. Hasegawa, and K. Sato, "Hybrid Hierarchical Optical Path Network Design Algorithm with 2-stage ILP Optimization" in *Proc.ACP2010*, Dec. 2010.
- [18] M. Tornatore, G. Maier, and A. Pattavina, "WDM Network Optimization by ILP based on Source Formulation," *IEEE INFOCOM*, vol. 3, pp. 1813-1821, Jun. 2002.
- [19] B. Jaumard, C. Meyer, and B. Thiongane, "Comparison of ILP Formulations for the RWA Problem," *Optical Switching and Networking*, vol. 4, Issues 3-4, pp. 157-172, 2007, (ISSN: 1573-4277).