

波長伝達行列法を用いた波長ベースセキュアネットワーク設計技術に関する研究

Network design for wavelength based future network by using the wavelength transfer matrix method



小口 喜美夫 (Kimio OGUCHI, Dr. Eng.)

成蹊大学理工学部情報科学科 大学院理工学研究科教授

(Faculty of Science and Technology, Department of Computer and Information Science and Graduate School of Science and Technology, Professor, Seikei University)

電子情報通信学会 IEEE OSA 電気学会 ランニング学会 日本臨床救急医学会 臨床歩行分析研究会 DCCJ CineGridForum 会員

受賞: 2010年 電子情報通信学会 MVE賞 2008年 日本ITU協会 功績賞 2001年 2005年 ランニング学会 ベストプレゼン賞 2000年 日本電信電話株式会社平成12年度社長表彰 発明考案表彰 1998年 Best Paper Award of OECC'98 1998年 Best Paper Award of NOC'98 1997年 Best Paper Award of OECC'97

著書: 最新のNTT研究者が語る HIKARIビジョンへの挑戦 第11章 次世代フォトニックNWを支える光デバイス技術 (分担執筆) ビジネスコミュニケーション社 2002年 エルビウム添加光ファイバ増幅器 第3部 応用技術編 第1章 通信ネットワークシステムへの応用 (分担執筆) オプトロニクス社 1999年 光通信工学(2)光信号処理 (分担執筆) コロナ社 1998年 マルチメディア事典 光ファイバ伝送システム将来技術 (分担執筆) 産業調査会 1996年 研究専門分野: 光通信工学 情報通信工学

あらまし すべての通信ノード間で常にフルメッシュ接続が可能な通信ネットワークである光波長ルーティング技術を活用した新たな波長ベースセキュアネットワーク構成を検討するため、波長ルーティング機能の設計を簡易かつ容易とすることができる、斬新な波長伝達行列法を応用したネットワーク設計技術を確立することを目標とした。

本波長伝達行列法は、波長ルーティング機能を数式化したものであり、これまで確認された基本原理を応用展開し、今後複雑化・高機能化する通信ネットワーク、とりわけセキュアな波長ルーティングネットワークの実現に対して効率的な設計法となるよう検討を行った。その結果、これまで設計が困難であった波長の行き先や使用波長設計まで含むネットワーク設計が容易になると同時に、ソフトウェアにより一部設計を実現することが可能となり効率的な設計が可能となった。

1. 研究の目的、狙い

すべての通信ノード間で常にフルメッシュ接続が可能な通信ネットワークを実現するために、光波長ルーティング技術*1を活用した新たな波長ベースセキュアネットワーク構成を検討し、波長ルーティング機能の設計を簡易かつ容易とすることができる斬新な波長伝達行列法を応用したネットワーク設計技術を確立することが最終目標である。波長ルーティング機能を用いたフルメッシュ接続が可能な通信ネットワークイメージを図1に示す。図は、5ノードが光ルータで接続された例であり、論理レイヤではフルメッシュ接続、物理レイヤでは波長ルーティングのイメージが示されている。

本研究で用いる手法は、波長ルーティング機能を数式化したものであり報告者がこれまで提案したものである。本研究期間では、これまで確認された基本原理を応用展開し、今後複雑化・高機能化する通信ネットワーク、とりわけセキュアな波長ルーティングネットワークの実現に対して効率的な設計法となる検討を行った。これまで、光伝送技術や波長多重伝送技術(WDM: Wavelength Division Multiplexing)*2の設計については、リンク設計に対するツール検討は実施されてきたが、波長の行き先や使用波長設計まで含むネ

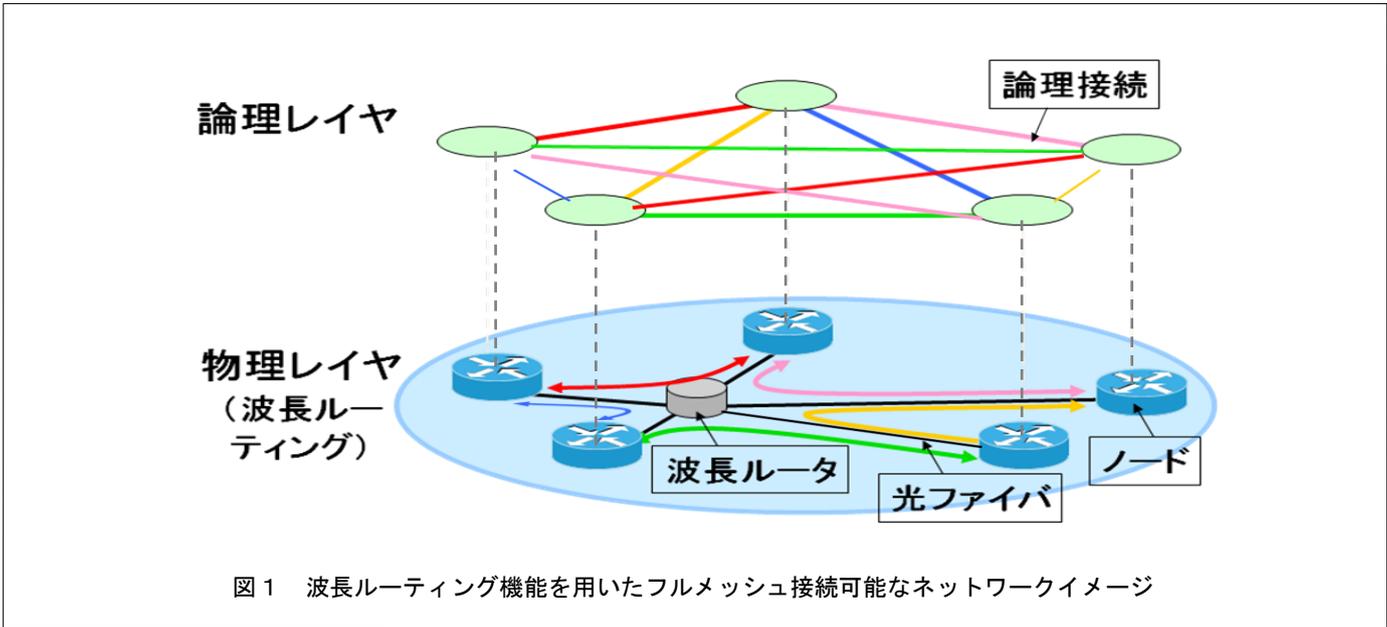


図1 波長ルーティング機能を用いたフルメッシュ接続可能なネットワークイメージ

ネットワーク設計技術（設計ツール）は検討が十分でないため、設計に困難さがあった。

本技術の実現により、通信ネットワークのエンドユーザはより低コストで高品質なブロードバンドサービスを受けることが可能となり、安心・安全・便利・快適な生活空間の実現につながる。さらに、学術的にも技術先導性が高いだけでなく、その手法が一般的ガイドラインとなりえる可能性がある。

2. 研究の背景、同じ分野の研究に関する国内外の研究動向

情報通信技術の発展により、いつでもどこでも（ユビキタス化）快適に通信を行うことが可能となってきた。また、パーソナルコンピュータ（PC）や各種端末機器類の性能が向上し、転送される情報容量もメガビットからギガビットに至るまで大きく増加（ブロードバンド化）している。

このようなユビキタス・ブロードバンド環境を実現するためには、すべての通信ノード間で常に自由に情報をやりとりできる、いわゆるフルメッシュ接続が可能な通信ネットワークが必要不可欠であり、そこにブロードバンド化が容易な光通信技術を導入すると大きな効果をもたらす。なかでも、WDM 技術や波長ルーティング技術は柔軟性、拡張性等に優れ、例えば

GMPLS (Generalized Multi-Protocol Label Switching) 技術等が全国規模のコアネットワーク導入に検討されつつある。また、将来のアクセスネットワークへの適用として光波長多重パッシブ光ネットワーク (WDM-PON: Passive Optical Network)の検討が行われている。

一方、エンドユーザのネットワーク利用形態が変化し、LAN (Local Area Network: ローカルエリアネットワーク)、ホームネットワーク、アクセスネットワークにおいても広帯域性やサービスの柔軟性、拡張性が必要となってきた。現状のアクセスネットワークにおいて光ファイバを用いたファイバ・ツウ・ザ・ホーム (FTTH: Fiber-To-The-Home) ユーザ数の増加を考えると、この傾向はさらに強まると予測でき、この領域においても光波長多重技術や波長ルーティング技術の導入が必須となると考えられる。

さらに、インターネットを利用した各種サービスの大きな展開により、より安全なセキュアネットワーク構成が求められている。

関連の外部動向として一例を紹介する。本研究テーマの主要なアイデアである波長伝達行列に関してこれまで発表された論文は見当たらないが、波長ルーティング機能を利用した新たなネットワーク構成を提案する関連研究がある⁽¹⁾。

波長伝達行列法を用いた波長ベースセキュアネットワーク設計技術に関する研究

Network design for wavelength based future network by using the wavelength transfer matrix method

この研究では、光波長多重パッシブ光ネットワーク (WDM-PON) の新構造が提案され、ネットワークに接続された加入者装置 (ONU: Optical Network Unit) 間、もしくはONU-局側装置 (OLT: Optical Line Terminal) 間の光リンクを構成している。提案ネットワーク構造は、8 x 8周回型アレイ導波路回折格子 (AWG) を用いて8台のONUとOLTをそれぞれ通信する構成である。この構造では、複数のONU間とONU-OLT間の通信が光信号の混信なしで実現されているが、一部のONU間では直接光のままの通信が不可能である。それらのONU間の通信を行うためにはOLTを介して信号を一度光・電気変換し、さらに送出する光波長を変換する必要がある。また、提案されたネットワーク構造で使用される波長の設計は手作業により行われているため、新たな多波長ネットワーク構造を構成する際には使用波長の設計・配置を再度手作業により行う必要がある。また、ここで使われた波長数は8であったため、設計に大きな困難さがないように見られたが、波長数が増大した場合には、設計が困難となることは明らかである。

これまで柔軟性、拡張性、安全性等を考慮し、波長機能を利用する波長ルーティングネットワーク構成の検討は十分に行われていないだけでなく、ユーザ数の急激な変化や故障など、ダイナミックに変化するネットワーク構成に対応できる機能設計や、簡易に迅速に設計を実行できる手法の検討がなされていなかった。上述したように、これまで、光伝送技術や波長多重伝送技術の設計については、リンク設計 (いわゆる S/N 設計等) に対するツール検討は実施されてきたが、波長の行き先や使用波長設計まで含むネットワーク設計技術 (設計ツール) は検討が十分でないため、設計に困難さがあった。

以上の背景から、本研究では、すべての通信ノード間で常にフルメッシュ接続が可能な通信ネットワークを実現するために、『光波長ルーティング技術を活用し、かつセキュアなネットワーク構成』を検討し、さらに波長ルーティング機能の設計を簡易かつ容易とすることが可能な『波長伝達行列法を用いたネットワーク設計技術』を確立することを目的としている。

3. 研究の方法、研究の結果

本研究では、波長ルーティングネットワークの設計を容易とする『波長伝達行列法』と、『波長を用いたセキュアネットワーク構成』に特長がある。

波長伝達行列法は、波長毎の光信号の行き先 (波長ルーティング機能) を数式により記述可能としたものであり、多波長を用いるネットワーク構成や、急な構成変更の場合にも、複雑な波長設計・波長配置を容易に行うことができる特徴がある。また、本方法を例えば、光ファイバによるループバック接続³された新規構造の光ルータの設計や機能検証に適用すると、容易にその機能の検証が可能となる。また、本研究をさらに展開し、コンピュータ上で自動設計が可能となればさらにその応用範囲が広がると想定され、この分野での技術先導性が高い。

そこで本章では、本研究におけるキーとなる波長伝達行列法について、(1) その基本、またその応用である、(2) 波長群の制御、(3) ループバック構成を有する波長を用いたセキュアネットワーク構成、さらに、(4) 波長伝達行列法を実装したソフトウェア、の概要を記述する。

(1) 波長伝達行列法の基本機能

波長ルータが1台のみ含まれる簡単なネットワーク構成を例として、波長伝達行列法により、波長ルーティング機能を明確に表現できることを示す。

従来手法では、**図2** (4波長、4 x 4ポートの例; ここで一般的に $n \times m$ は入力 n ポート、出力 m ポートあることを示す) に示すような、入出力ポートと入出力波長の関係を元に波長・ポートの設計を実施してきた。

本研究の手法では、波長ルータであるアレイ導波路型回折格子 (AWG⁴) への入力光信号の集合である行列 (以後入力行列) を I とすると、AWG から出力される光信号の集合である行列 (以後出力行列) O は、AWG の波長伝達行列 L を用いて次のような演算式により定義される。

$$O = L \cdot I \quad (1)$$

図3 に示す 4 x 4 AWG と 4 つのノード (A から D) が接続されるネットワークにおいて、本手法の確認を

		アウトプットポート			
		1	2	3	4
インプットポート	1	λ_1	λ_2	λ_3	λ_4
	2	λ_2	λ_3	λ_4	λ_1
	3	λ_3	λ_4	λ_1	λ_2
	4	λ_4	λ_1	λ_2	λ_3

図2 波長ルータ (AWG) の波長入出力特性 (4 x 4 の例)

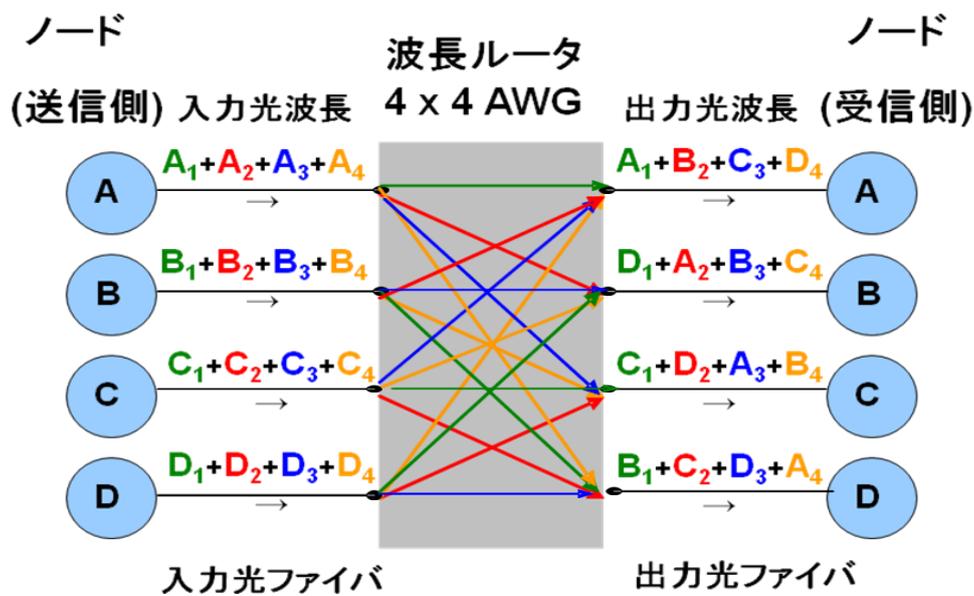


図3 4 x 4 AWGと4ノード(AからD)が接続されたネットワークにおける波長入出力特性

する。各ノードは、波長 λ_1 から λ_4 までの光信号を送受信可能であるとする。ここで、ノード X (X:A,B,C,D) が送信した波長 λ_a を X_a ($a : 1,2,3,4$) とすると、入力行列 I と AWG の波長伝達行列 L を(1)に代入し、

$$O = L \cdot I = \begin{pmatrix} \Lambda_1 & \Lambda_2 & \Lambda_3 & \Lambda_4 \\ \Lambda_2 & \Lambda_3 & \Lambda_4 & \Lambda_1 \\ \Lambda_3 & \Lambda_4 & \Lambda_1 & \Lambda_2 \\ \Lambda_4 & \Lambda_1 & \Lambda_2 & \Lambda_3 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} A_1 + A_2 + A_3 + A_4 \\ B_1 + B_2 + B_3 + B_4 \\ C_1 + C_2 + C_3 + C_4 \\ D_1 + D_2 + D_3 + D_4 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} A_1 + B_2 + C_3 + D_4 \\ D_1 + A_2 + B_3 + C_4 \\ C_1 + D_2 + A_3 + B_4 \\ B_1 + C_2 + D_3 + A_4 \end{pmatrix} \quad (2)$$

ただし、次の演算を定義する。

$$\Lambda_k \cdot \lambda_k = \lambda_k, \Lambda_k \cdot \lambda_l = 0 \quad (k \neq l) \text{ である。}$$

(2)式で表される出力行列結果の 1 行目が図3で一番上の出力ポート 1 に出力される波長に対応し、2 行目はポート 2 に対応する。これらの波長は、現実のハードウェアにおいても同様出力されている。

従って、本網構成の機能が提案の波長伝達行列により簡易に表現可能なことが確認できた。また波長数が

波長伝達行列法を用いた波長ベースセキュアネットワーク設計技術に関する研究

Network design for wavelength based future network by using the wavelength transfer matrix method

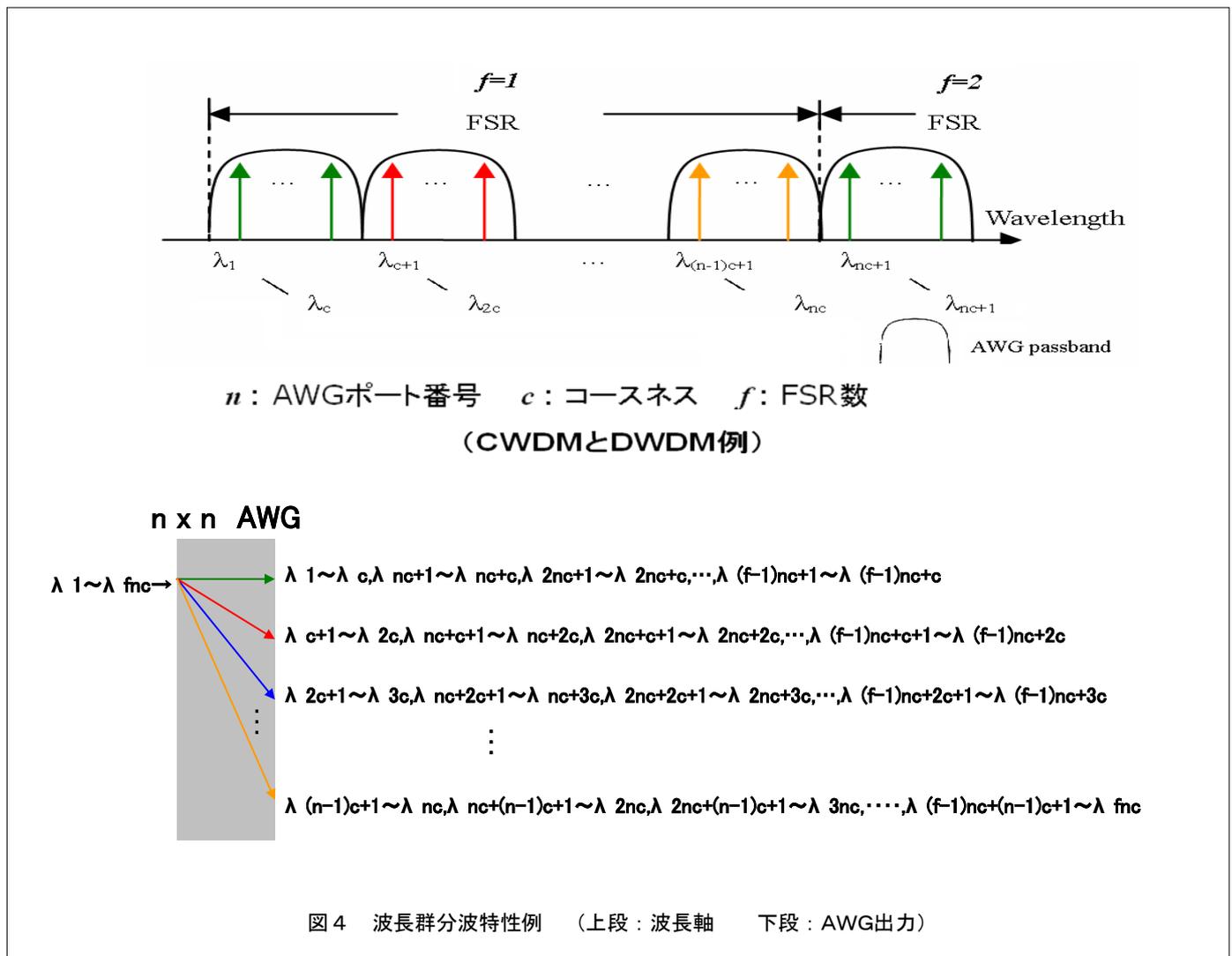
増加した場合、波長ルータが多段接続された場合であって基本的な手法は変わらず、ネットワークの大規模化・複雑化におけるメリットとなる。また、後述する光ファイバによるループバック接続された新規構造の光ルータの設計や波長機能確認においても簡易に実行可能であることは明らかである。

(2) 波長群制御

上述の基本構成では波長ルータの入出力波長特性は出力波長帯域が基本的に1波長のみを含む特性であったが、一般には複数の波長群をまとめて入出力することがある。例えば、波長帯域の広いフィルタを用いて波長間隔の狭い複数の波長を同時に入出力する場合である。このような機能特性に対してもネットワーク設

計が可能となるように、上述の基本機能を一般化するように検討した。具体的には、波長ルータ (AWG) へ入力する波長群と AWG のポート数とコースネス、および FSR (Free Spectral Range: フリースペクトルレンジ) の数をパラメタとし波長伝達行列の一般式を作成した。コースネスとはある AWG の一つの通過波長帯域を通る入力波長数を意味する。

図4 上段に、一般的な周回性 AWG の波長通過特性と入力する波長位置のモデルを示す。ここでは、波長間隔の狭い複数の DWDM (Dense WDM: 高密度 WDM) 信号が、DWDM より波長帯域の広い CWDM (Coarse WDM: 疎 WDM) フィルタで光分波される例を示した。図において、AWG のポート数を n 、コースネスを c 、FSR 数を f とする。例えば、波長 $\lambda_1 \sim \lambda_{nc}$



波長伝達行列法を用いた波長ベースセキュアネットワーク設計技術に関する研究

Network design for wavelength based future network by using the wavelength transfer matrix method

がある入力ポートから $n \times n$ 周回性 AWG を通過する時、**図 4** 下段に示されるように入力した波長（群）はルーティングされ、各群ごとに対応する出力ポートから出力される。

入力行列式と波長伝達行列を本波長群と波長ルータに対応し記述し、(1)式と同様の演算を行い、波長群の出力を得ることが可能となる。ここでは詳細の演算式を省略するが、文献(3)を参考されたい。実際の出力特性と同様の結果が得られることを確認している。

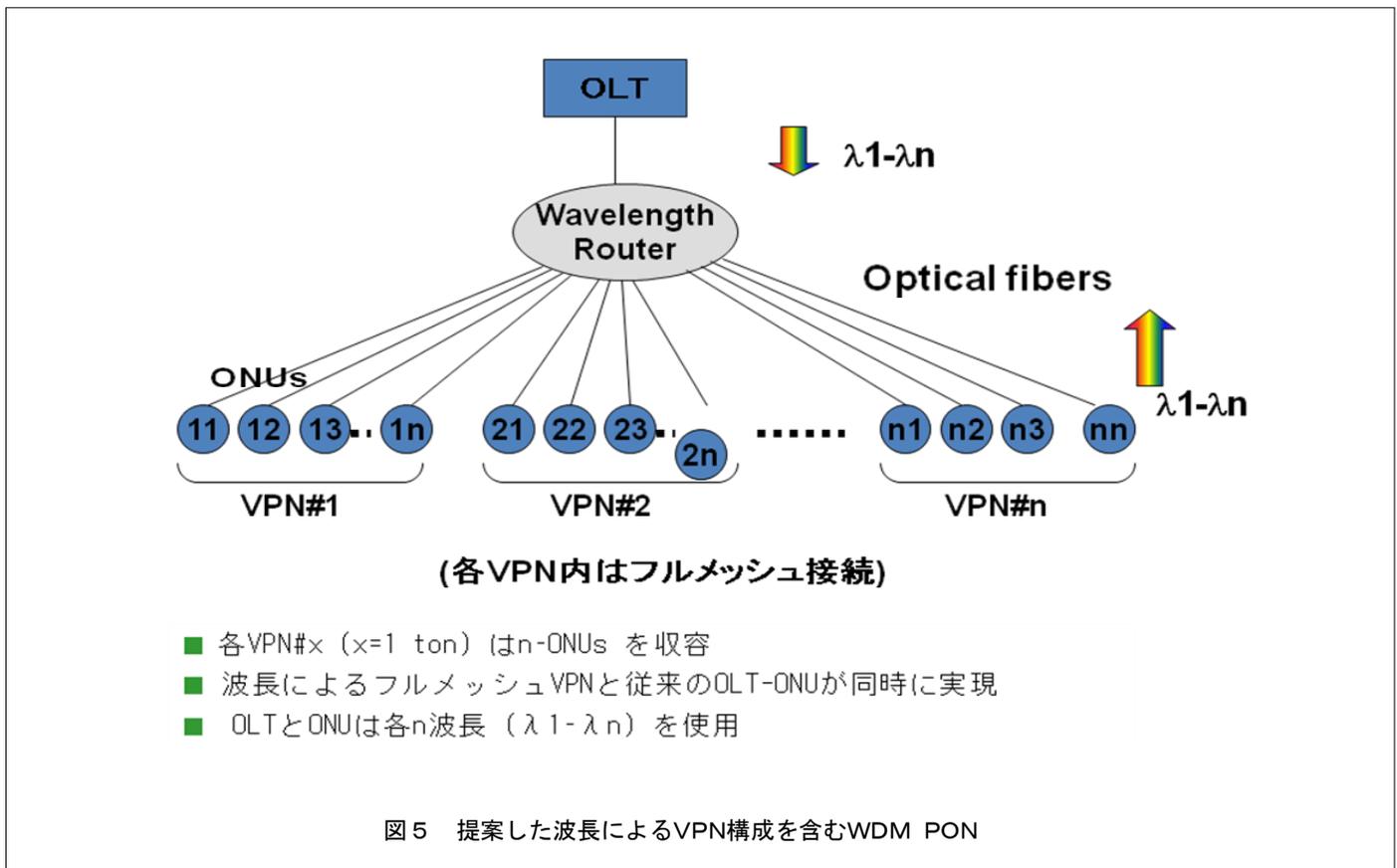
(3) ループバック構成を有する波長を用いたセキュアネットワーク構成

WDM-PON (Wavelength Division Multiplexing-Passive Optical Network) は伝送容量の容易な増加、サービス多重が可能といった特長から次世代 PON として着目されている。PON は本来複数のユーザ (ONU: Optical Network Unit) が伝送路を共用し、下り信号がすべてのユーザに分配されてしまうため、セキュリティの点に課題があった。このため、波

長を使い、物理レイヤで実現する光 VPN^{*5} (Virtual Private Network: 仮想プライベートネットワーク) 構成が着目されてきている。

波長を用いたセキュアネットワーク構成では、波長により VPN を構成すると物理レイヤで VPN が構成でき、ここに属さないノードには光信号が到達できない。これまでの検討²⁾では、全ての接続を光レベルで実現することは困難であった。そのため、本研究では、WDM-PON システムにおいて波長を使い光 VPN を実現し、さらに特定の ONU グループ内では、波長によるフルメッシュ接続を可能とする、新たな波長フルメッシュネットワークを提案しこの問題を解決している。また、そのネットワークの波長特性の検証を、波長伝達行列法により行った。

図 5 に提案した波長による VPN 構成を含む WDM-PON の概略を示す。これまでの PON と同様スター状構成であるが、従来のスプリッタではなく波長ルータを OLT-ONU 間に設置している。特長は、各 VPN#x (x=1 to n) は n 台の ONU を収容、波長によ



波長伝達行列法を用いた波長ベースセキュアネットワーク設計技術に関する研究

Network design for wavelength based future network by using the wavelength transfer matrix method

るフルメッシュ VPN と従来の OLT-ONU 接続が同時に実現、OLT と ONU は各 n 波長 ($\lambda_1 - \lambda_n$) を使用、である。

図 6 に具体的なネットワーク構成を示す。ここでは、4VPN グループ (16ONU) 構成を実現するために 1 x 4 スプリッタ、4 台の 4x4 AWG、ループバック接続用光ファイバを使用している。ここでは、各 AWG の上流側 3 ポートは光ループバック接続に使用し、他のポート (図中の 4u) は OLT 接続に使用している構成となっている。

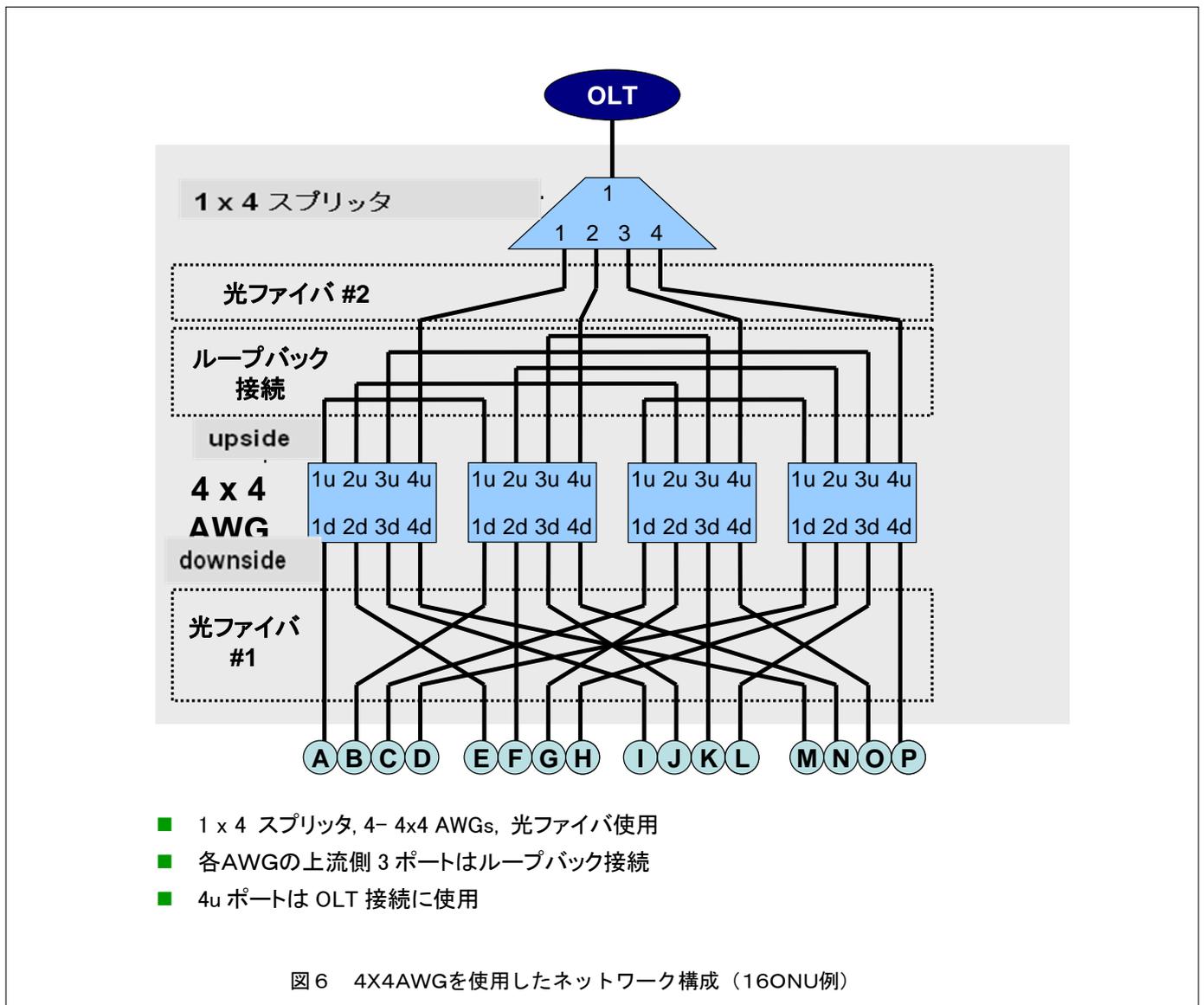
図 7 に各ノード接続の論理ネットワークトポロジを示す。OLT-ONU 接続では、OLT は特定の波長により

各 VPN と接続 (例: VPN#1 へは λ_4)、各 VPN は OLT と TDM (Time Division Multiplexing: 時分割多重) 技術により接続している。一方、ONU-ONU 接続では、各 VPN では 3 波長によりフルメッシュ接続を実現 (VPN 内が 4 ノードのため)、また、他の VPN への接続は OLT 経由により実現している。

提案のネットワーク構成の波長機能特性を波長伝達行列法により記述すると、上り方向については次式で現される。

$$O_{OLT} = L_S \cdot L_{F2} \cdot L_A \cdot L_{F1} \cdot I_{ONU} \quad (3)$$

ここで L_S 、 L_{F2} 、 L_A 、 L_{F1} はそれぞれ 1 x 4 スプ



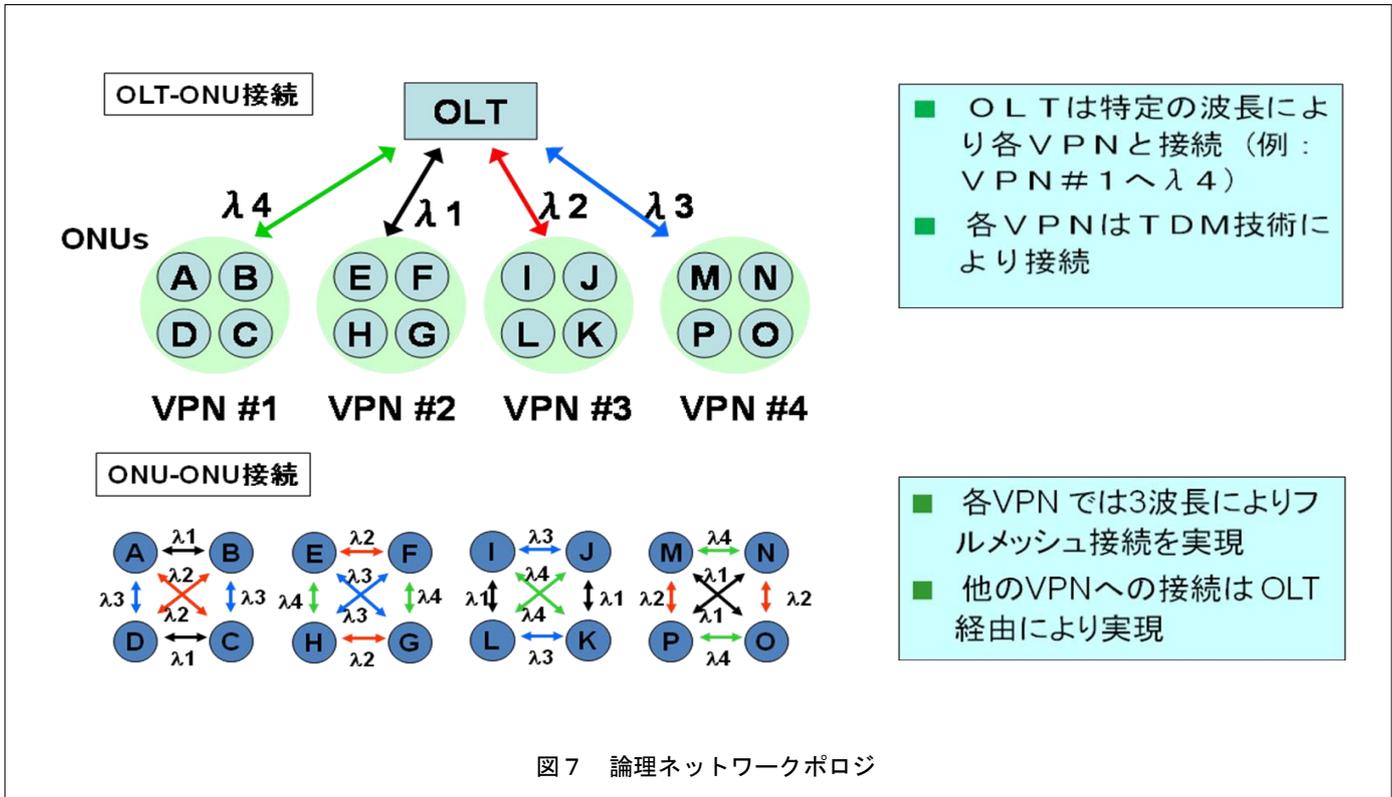


図7 論理ネットワークポロジ

リッタ、スプリッタと AWG の接続光ファイバ、4x4 AWG、AWG と ONU 接続用光ファイバの波長伝達行列であり、 I_{ONU} 、 O_{OLT} はそれぞれ ONU からの入力、OLT への出力である。下りについても同様記述が可能である。

計算の結果、図6に示す構成のような光ファイバのループバック接続を有する複雑なネットワーク構成であっても、容易にその機能検証が可能であり、また、提案システムが正しく動作することを確認できる。さらに、実際のデバイスパラメータを用いてネットワーク規模の検証を行い、2.4 Gbit/s では8VPN グループ構成が、1.25 Gbit/s では16VPN グループ構成が実現できる可能性^③が明らかとなった。

以上のことから、波長を使いセキュリティの高い光VPNを実現し、かつ特定のONUグループ内では、波長によるフルメッシュ接続を可能とするネットワークの実現が可能であることが判明した。

ここでも詳細の演算式を省略するが、文献^④を参考されたい。実際の出力特性と同様の結果が得られることを確認している。

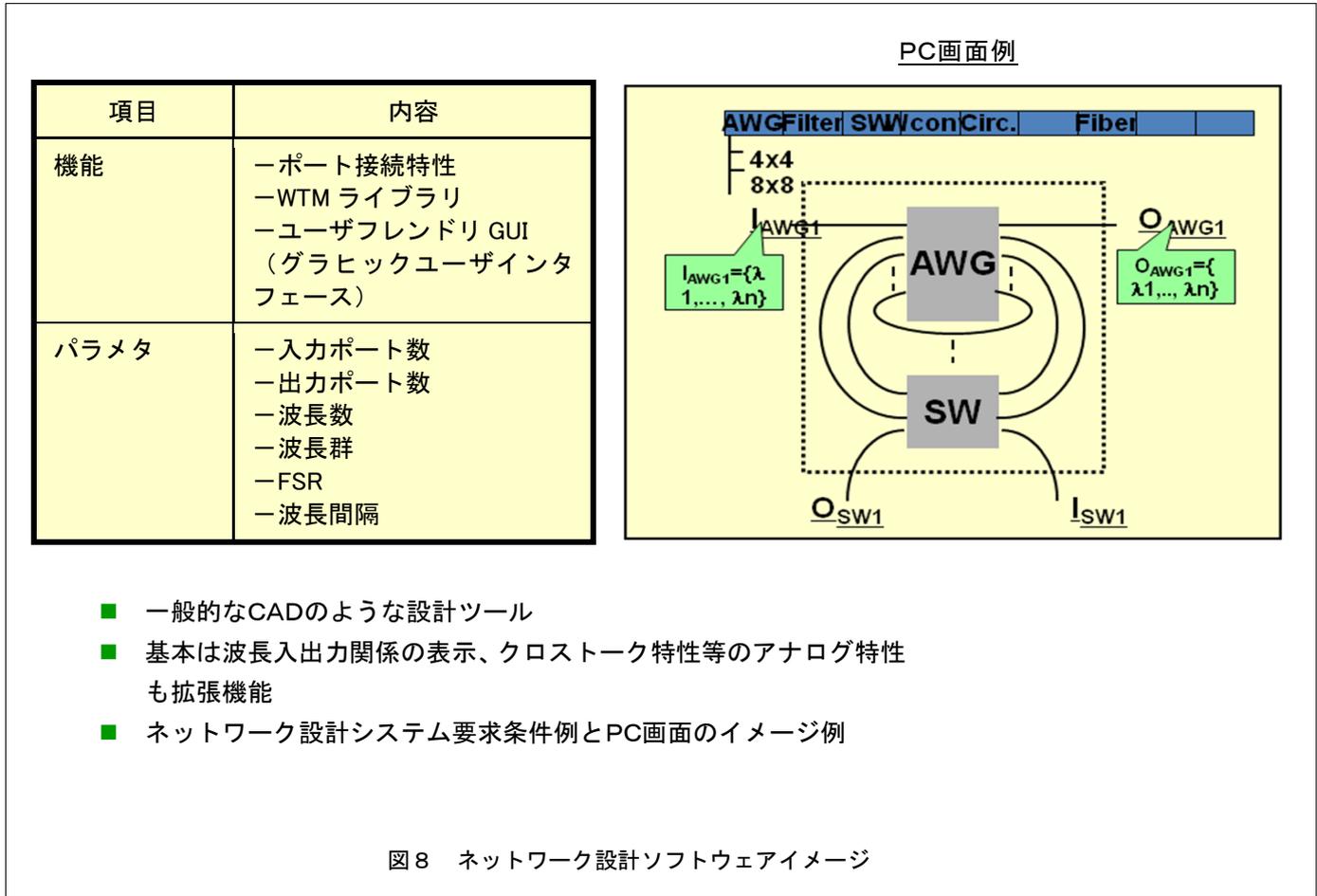
(4) 波長伝達行列法を実装したソフトウェア

波長伝達行列法を用いた波長設計用ソフトウェア（設計ツール）の検討を行った。まずはユーザインタフェースとしての要求条件を明らかとし、学内で波長伝達行列法を実装したソフトウェア試作によりその機能性、有効性を明らかとした。

図8にネットワーク設計用ソフトウェアイメージを示す。左図は必要機能とパラメータの主要な内容である。一般的なCAD (Computer Aided Design) のような設計ツールが望ましい。基本は波長入出力関係の表示であるが、クロストーク特性等のアナログ特性も拡張機能として要求される。右図はPC画面のイメージ例である。

波長ルーティングネットワークは、その規模、複雑さに依存せず、様々な属性を有する個々の機能ブロック（ネットワークエンティティ）の組み合わせから構築されている^⑤。その中で、一般に、波長に関する振る舞い（上記ネットワークエンティティにおける入出力特性）は、いわゆるデジタル的としてプログラム実装^⑤した。しかしながら、現実のネットワークを考

波長伝達行列法を用いた波長ベースセキュアネットワーク設計技術に関する研究
 Network design for wavelength based future network by using the wavelength transfer matrix method



慮した場合には、アナログ的な振る舞いも考慮する必要がある。本研究では、波長フィルタにより構成したルーティングデバイスや、光クロストーク⁶⁾に着目し、波長伝達行列法の拡張機能を検討した。

図9に実装した波長ルーティング機能設計ツールの画面例を示す。Visual C++により設計ツールを実現した。左図は、ユーザ入力スクリーン例であり、デバイスタイプ、接続リンクとポート番号、各ポートの波長数などを入力する。右図は、8 x 8 AWGの基本出力特性例である。各波長に色を割り当て、波長特性のビジュアル化が可能となっている。また、波長とポートの関係を示すテキスト形式による出力特性も表示可能となっている。式(1)と同様な結果が得られている。

図9は単純な基本ネットワーク構成であったが、複雑化したネットワークにおける設計ツールの機能確認もあわせて実行した。

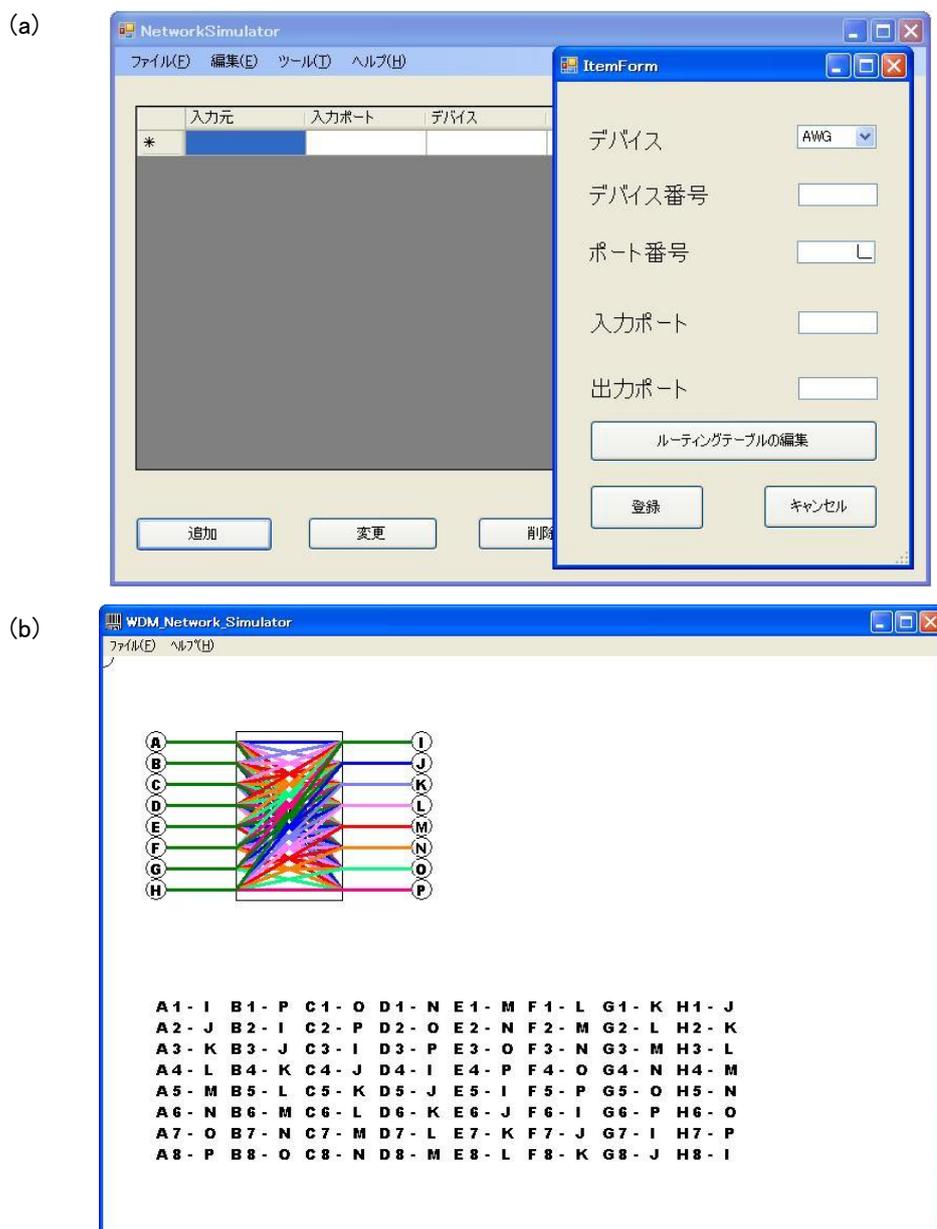
図10は、AWG多段構成ネットワークの例である。

ループバック接続を有する 32x32AWG の3段接続構成であり、入力が5ノード、出力が32ノード構成である。使用した波長数は32である。これまでこのような複雑化する入出力ポートと波長の関係は、専門家が長時間かけ検討してきた。

図11に、図10に示したネットワークのプログラム実行結果を示す。明らかなように、波長特性のビジュアル化が可能である。また、他画面においてテキスト形式による出力特性も表示可能であった。ユーザによるパラメタ入力に時間が取られたが、プログラム実行は1秒以内であった。熟練度によるが、従来手法に比べ2桁以上短時間で実行可能と判断される。

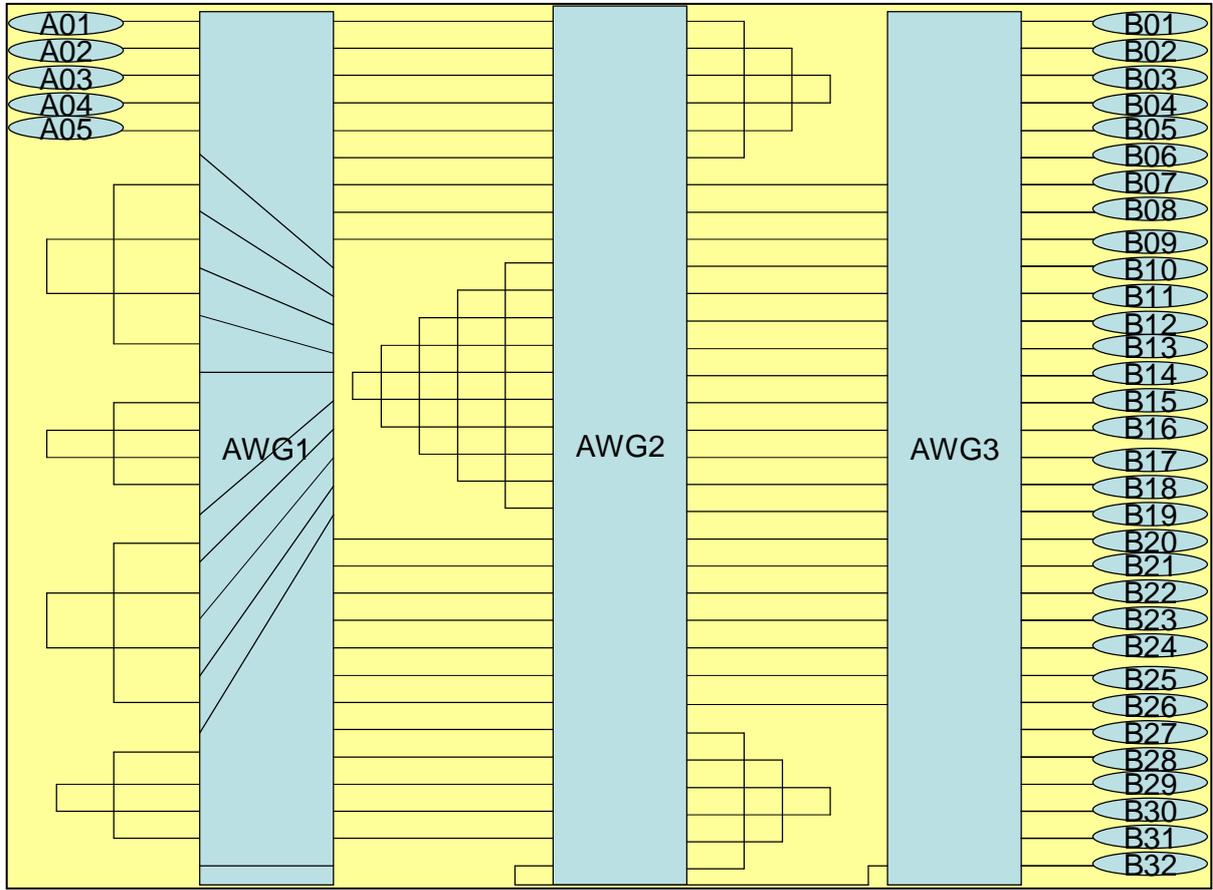
全体をまとめると、波長ルーティングネットワークにおいて、その波長機能特性を波長伝達行列法により計算することにより、光ファイバのループバック接続や迂回路を有する複雑なネットワーク構成であっても容易にその機能検証が可能であり、また、正しく動作

波長伝達行列法を用いた波長ベースセキュアネットワーク設計技術に関する研究
 Network design for wavelength based future network by using the wavelength transfer matrix method



- Visual C++による波長ルーティング機能設計ツール
- ユーザ入力画面例 ((a)図)
 - デバイスタイプ
 - 接続リンクとポート番号
 - 各ポートの波長数
- 8 x 8 AWG の基本出力特性例 ((b)図)
 - 波長特性のビジュアル化
 - テキストによる出力特性

図9 波長ルーティング機能設計ツール例

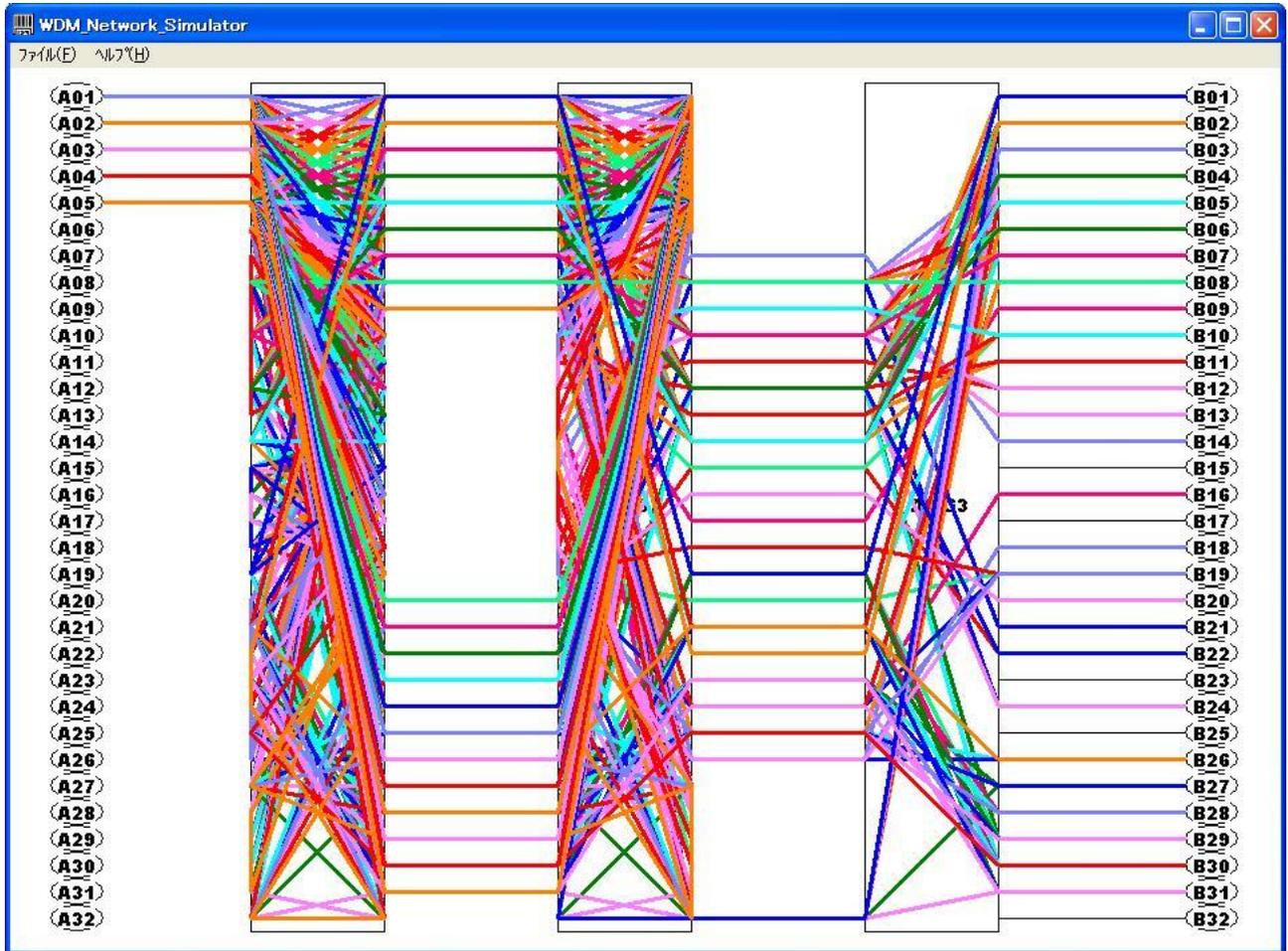


- ループバック接続を有する 32X32AWGの3段接続構成
- 複雑化する入出力ポートと波長の関係

図10 AWG多段構成ネットワーク例

することを確認した。さらに、同手法を実装した波長設計用ソフトウェアの検討では、ユーザが各種デバイスパラメータを入力するパラメータ設定部の要求条件を明らかとし、試作によりその機能を実現した。同時に、新たな WDM-PON 構成の検討では、特定の ONU グループ内で、波長によるフルメッシュ接続を可能とするセキュア光 VPN ネットワークの実現が可能であることを示し、その設計においても波長設計用ソフトウェアにより容易に機能確認が可能であった。

4. 将来展望、将来における応用分野
社会的波及効果と発展性：今後なお一層の増加が予測されているファイバ・ツウ・ザ・ホーム (FTTH) システムにおいて、なお一層の使用帯域やサービス数の増大が求められた場合に、波長多重技術の導入が有効な方法と考えられ、現在積極的に技術検討がなされている。また、韓国においては、波長多重 PON (WDM-PON) の一部導入 (約 20 万加入) が実施され、台湾においても現場試験の実施が検討されている。



波長特性のビジュアル化とテキストによる出力特性が可能

図11 波長ルーティング機能設計ツール実行例

その際のネットワーク構成の設計や波長管理手法に本研究成果を導入すると、容易にかつ簡易に実現できるだけでなく、故障時等のネットワーク構成の急な変更の際にも迅速に対応できる効果がある。その結果、低コストなブロードバンドサービスを受けることができるだけでなく、波長によるセキュアネットワークの構成も可能であり高品質なサービスとなり社会的に大きな効果をもたらすと考えられる。

学術的波及効果と発展性：波長ルーティングネットワークにおいて、波長数にかかわらず複雑な波長設計・配置を容易に行うことが可能となる新規手法の確立となる。今後の他のネットワーク設計研究者の研究に対して波及効果が大きいと考える。また、今後世界の中で進展すると考えられる波長ルーティングネットワークの設計手法の一般的ガイドラインとなりえる。

波長伝達行列法を用いた波長ベースセキュアネットワーク設計技術に関する研究

Network design for wavelength based future network by using the wavelength transfer matrix method

用語解説

- *1 光波長ルーティング：光波長をあて先アドレスに対応させ、途中の光ノードにおいて信号の行き先を光波長に応じて制御する方法
- *2 WDM：Wavelength Division Multiplexing、光波長多重伝送、一本の光ファイバ上に複数の光波長を多重し効率的な信号伝送を行う多重法の一つ
- *3 ループバック接続：信号がもとの方向に折り返すように接続する方法
- *4 AWG：Array Waveguide Grating、アレイ型導波路回折格子、光合分波器でありガラス基板上に作成された平面導波路型の回折格子
- *5 VPN：Virtual Private Network、仮想プライベートネットワーク、仮想的に専用回線を実現する技術

- (5) 牧瀬 聖、毛利 元一、寺田 昌平、埴 大、小口 喜美夫、“波長ルーティングネットワーク用シミュレーションツールの検討 (Simulation tool for wavelength routing networks) ”、電子情報通信学会、2008 年総合大会、B-12-030、北九州学術研究都市、(2008.3).
- (6) Tomoki Sakai, Dai Hanawa, Kimio Oguchi, Kazuto Noguchi, and Tadashi Sakamoto, "Software Simulator Prototype for Wavelength Routing Network Design", *Proc. of 33th International Conf. on Telecommunications and Signal Processing*, pp.363-366, Baden bei Wien, Austria, (Aug. 17-20, 2010).

参考文献 関連文献

- (1) K Oguchi,“ New notations based on the wavelength transfer matrix for functional analysis of wavelength circuits and new WDM networks using AWG-based star coupler with asymmetric characteristics,” *J. Lightwave Technology*, **Vol.14, No.6**, pp. 1255-1263, (June 1996).
- (2) Chang-Joon Chae, Milan Kahnel, and Rodney S. Tucker, “WDM passive optical network for broadband access and flexible customer networking”, *5th Chitose Institute of Science and Technology*, (October 19-20, 2004).
- (3) Kimio Oguchi, ”Network design method for wavelength routing network”, *Proc. of OECC2009, ThH3, Hong Kong*, (July 13 – 17, 2009).
- (4) Kimio Oguchi, Kohei Okada, Shohei Terada, and Kunio Tojo, ”New Optical VPN Configuration using Wavelength Routers in a WDM-Passive Optical Network”, *IEEE International Conference Computer Communication and Networks (ICCCN) 2007*, Session MP4, Optical networking I, Paper 4, Oafu, HI, (Aug. 13-16, 2007).

]

この研究は、平成18年度SCAT研究助成の対象として採用され、平成19年度～21年度に実施されたものです。