

# べき乗則に従う WDM ネットワークにおける論理トポロジー設計

石田 晋哉<sup>†</sup> 荒川 伸一<sup>††</sup> 村田 正幸<sup>†††</sup>

<sup>†</sup> 大阪大学 大学院情報科学研究科 〒 560-0043 大阪府豊中市待兼山 1-32

<sup>††</sup> 大阪大学 大学院 経済学研究科 〒 560-0043 大阪府豊中市待兼山町 1-7

<sup>†††</sup> 大阪大学 サイバーメディアセンター 〒 560-0043 大阪府豊中市待兼山町 1-30

E-mail: <sup>†</sup> s-isida@ist.osaka-u.ac.jp, <sup>††</sup> arakawa@econ.osaka-u.ac.jp, <sup>†††</sup> murata@cmc.osaka-u.ac.jp

あらまし 従来の WDM (Wavelength Division Multiplexing) を用いた光ネットワークの研究では、主に AS 内部の基幹ネットワークへの適用が考えられており、従って小規模な物理トポロジーによる性能の評価が行われてきた。しかし、GMPLS の標準化などにともない、今後 WDM 技術の適用範囲は拡大すると考えられる。そこで本稿では、大規模な物理トポロジーを対象とした WDM ネットワークの評価を行う。波長変換を行う場合、ならびに、波長変換を行わない場合に WDM ネットワークに必要な波長数の評価を行い、波長連続性が必要波長数に与える影響を明らかにする。

キーワード 波長分割多重, べき乗則, スケールフリーネットワーク, 大規模ネットワーク

## Power-Law Property in WDM Networks: Does the Wavelength Conversion or Wavelength Routing resolve it?

Shinya ISHIDA<sup>†</sup>, Shin'ichi ARAKAWA<sup>††</sup>, and Masayuki MURATA<sup>†††</sup>

<sup>†</sup> Graduate School of Information and Engineering Science, Osaka University  
Toyonaka, Osaka 560-0043, Japan

<sup>††</sup> Graduate School of Economics, Osaka University  
Mathikaneyama 1-7, Toyonaka, Osaka, 560-0043 Japan

<sup>†††</sup> Cybermedia Center, Osaka University  
Mathikaneyama 1-30, Toyonaka, Osaka, 560-0043 Japan

E-mail: <sup>†</sup> s-isida@ist.osaka-u.ac.jp, <sup>††</sup> arakawa@econ.osaka-u.ac.jp, <sup>†††</sup> murata@cmc.osaka-u.ac.jp

**Abstract** In traditional studies on WDM (Wavelength Division Multiplexing)-based optical networks, their proposals were evaluated with a relatively small number of nodes. This is because they mainly targeted on backbone networks. However, according to the GMPLS (Generalized Multi-Protocol Label Switching) standardization, the WDM technology would be deployed in the Internet and be used with large number of nodes. In this paper, we investigate the performance of WDM networks with the large number of nodes, having a *power-law relationship* that appears in outdegree distributions. We show the number of wavelengths necessary in WDM networks with/without wavelength conversion capability and reveals how the wavelength continuity condition affect the network performance.

**Key words** WDM (Wavelength Division Multiplexing), power-law, scale-free network, large scale network

## 1. はじめに

波長分割多重 (WDM: Wavelength Division Multiplexing) 技術は大容量通信を実現する光伝送方式であり、基幹ネットワークへの導入が進みつつある。WDM を用いた光ネットワークの研究では、主に基幹ネットワークへの適用を目的として、小規模なトポロジーによる評価が行われてきた [1-4]。

その一方で、近年のインターネットトポロジーに関する研究により、インターネットは AS (Autonomous System) およびルータレベルでべき乗則 [5] の性質をもつことが明らかになっている。べき乗則に従うネットワークでは、ネットワークのノードの出線数 (outdegree) が  $k$  本である確率  $P(k)$  について、 $P(k) \sim c \cdot k^{-\gamma}$  ( $c, \gamma$  は定数) という関係が成り立つ [5, 6]。このようなネットワークは、outdegree の分布の広がりが極めて大きいことから、スケールフリーネットワークと呼ばれている [7]。さらに、SDH (Synchronous Digital Hierarchy) によって構成されるネットワークにおいても、べき乗則の性質がみられることが報告されている [8]。この性質は *Preferential Attachment* (2.2 節参照) で説明されている [6]。

現状のインターネットおよび SDH ネットワークのトポロジーがべき乗則に従うことを考慮すると、WDM ノードを配置していく場合、同様にべき乗則の性質を持ったトポロジーが生成されると考えられる。この場合、outdegree が大きい少数のノードでは光パス設定のための波長帯域の要求が集中するため、光ファイバに多くの波長が必要となる可能性が高くなる。

しかし、先にも述べたように、WDM 技術に基づく光交換ネットワークに関する研究では、高々数十ノードの既存のバックボーンネットワークや、100 ノード程度のランダムに生成されたネットワークを物理トポロジーとして用いて性能評価がなされてきた。このため、ノード数が非常に多く、さらに物理トポロジーがべき乗則に従う場合の WDM ネットワークの特性は未だ明らかになっていないのが現状である。

本稿では、大規模な WDM ネットワークにおいて必要となる波長数を明らかにする。ランダムネットワークおよびスケールフリーネットワークのそれぞれに対して、波長変換を行う場合と行わない場合の結果を示す。その上で、波長連続性が必要波長数に与える影響を明らかにする。

本稿の構成は以下の通りである。まず、2 章において、トポロジー生成ツールを用いてランダムネットワークおよびスケールフリーネットワークを生成し、物理トポロジーの特性を示す。次に、3 章において波長変換を仮定した時の必要波長数を示し、波長変換を行わない場合の結果と比較する。さらに 4 章では、光パスの経路を負荷に応じて選択する経路選択方式を用いた時に、必要波長数の出現分布がどのように変わるのかを明らかにする。最後に 5 章で本稿のまとめと今後の課題を述べる。

## 2. トポロジーの性質

本章では、ランダムネットワークのトポロジー生成モデルである ER (Erdős-Rényi) モデル [9] ならびに、スケールフリーネットワークのトポロジー生成モデルである BA (Barabási-Albert)

モデル [6] について、その生成モデルおよび物理トポロジーの基本的特性を述べる。これらの物理トポロジーに基づいて次章以降で WDM 技術を適用した際の論理トポロジーの性質を述べる。なお、トポロジー生成ツールには BRITE [10] を用いている。

### 2.1 ER モデル

ER モデルはランダムネットワークを生成するモデルの一つである。ネットワークの規模 (ノード数) が固定であること、各ノードペア間のリンク接続確率が一定であることが特徴である。ER モデルでは、ネットワークのトポロジー生成に以下の 2 つのパラメータを用いる。

$N$ : ノード数 ( $N > 0$ )。

$p$ : ノード間を接続する確率 ( $0 < p < 1$ )。

上記の 2 つのパラメータを用い、次の 2 つのステップによりトポロジーを生成する。

Step 1:  $N$  個のノードを配置する。

Step 2: 全てのノードペア間に確率  $p$  でリンクを張る。

このようなモデルに従い生成した物理トポロジーの各ノードの outdegree の累積密度分布を図 3.3 に示す。ノード数は 1000、ノードペア間の接続確率は 0.002 である。曲線が上に凸の弧を描き、急な上昇していることから、各ノードの outdegree の分散は小さく、指数分布に従うことが分かる。

### 2.2 BA モデル

BA モデルでは、ER モデルと異なり、ネットワークの成長過程が表現されている (*Incremental Growth*)。また、outdegree  $k_i$  が大きい程、ノード  $i$  へリンクが接続される確率  $\Pi(k_i)$  が高くなるように接続確率を与えている (*Preferential Attachment*)。BA モデルでは、これら 2 つの特徴が以下のようにして表現されている。

Step 1: 初期ノードとして  $m_0$  個のノードを配置する。

Step 2: ネットワークのノード数が  $N$  未満である場合、Step 3 へ。ノード数が  $N$  であればトポロジー生成を終了する。

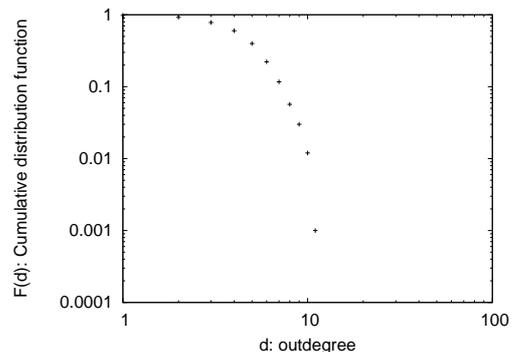


図 1 ER モデルにより生成されたトポロジーにおける outdegree の累積密度分布

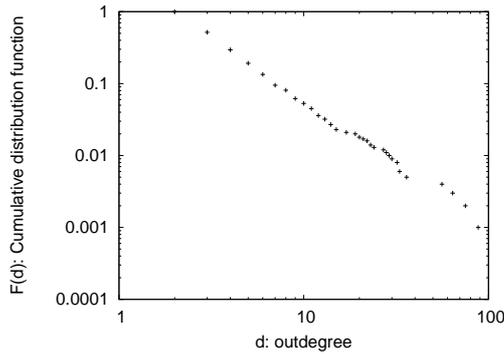


図2 BAモデルにより生成されたトポロジーにおける outdegree の累積密度分布

Step 3: ノードを1個追加する (*Incremental Growth*) .

Step 4: 追加したノードから式 (1) の確率に従い, 他の  $m (\leq m_0)$  個の相異なるノードへリンクを接続する (*Preferential Attachment*) . Step 2 へ .

$$\Pi(k_i) = k_i / \sum_j k_j \quad (1)$$

図2は1000ノードになるまでBAモデルでトポロジーを生成した場合の各ノードの outdegree の累積密度分布である.  $m_0$  および  $m$  の値を2としている. この図が示すように, BAモデルによって生成されたトポロジーでは, 両対数グラフにおいて直線を描くというべき乗則の特徴がみられる.

### 3. スケールフリーネットワークにおける必要波長多重数の評価

物理トポロジーがスケールフリーネットワークで構成されている WDM ネットワークを考えると, 各ノードの outdegree に大きなばらつきがあることがネットワークの性能 (棄却率やスイッチ規模など) に大きな影響をおよぼすと考えられる. そこで, 本章では, ネットワーク内の各ファイバにおいて必要となる波長の多重数の分布をシミュレーションにより求める.

#### 3.1 シミュレーションモデル

物理トポロジーは, 2.章で示した2つのモデルに基づき生成し, それぞれのトポロジーに対して波長変換が可能な場合と不可能な場合の2通りについて調べる. また必要波長数の評価のために, 以下のことを仮定する. 1) 波長数は無限とする (光パス設定要求の棄却は起こらない). 2) ネットワークの各リンクに設置される光ファイバは, 高々1本とする. 3) リンク伝搬遅延時間およびノードにおける処理遅延時間は0とする. 4) 波長変換機能をもつノードでは, 任意の波長から任意の波長に対して波長変換可能とする. 5) 光パスの設定要求は, 各ノードペアに対して一様にランダムに到着する (到着率  $\lambda$  のポアソン過程に従う). 6) 光パスの保持時間は平均  $1/\mu$  の指数分布に従う. 7) 光パスの経路はホップ数に関して最短経路を選択する. 8) 光パスの波長割り当ては First-Fit 方式により行う.

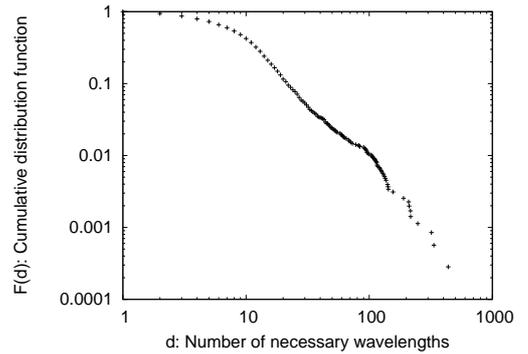


図3 必要波長数の分布: BAモデル, 波長変換あり

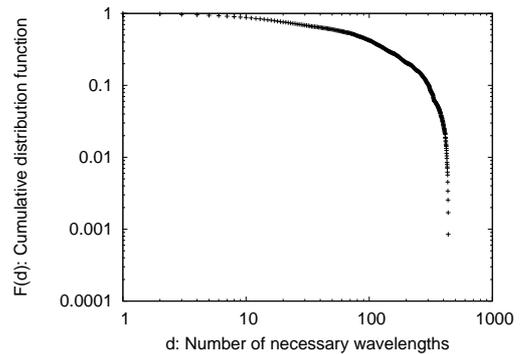


図4 必要波長数の分布: BAモデル, 波長変換なし

以降のシミュレーションによる評価では, ネットワーク内のノード数を1000, ERモデルにおけるノードペア間の接続確率を0.002, BAモデルにおいてStep4で追加するリンク数を2とする. また, 光パス設定要求の到着率  $\lambda$  を1/秒, 光パスの平均保持時間  $1/\mu$  を1.0秒とする.

#### 3.2 スケールフリーネットワークでの必要波長多重数

スケールフリーネットワークを物理トポロジーとする WDM ネットワークにおいて, 必要とされる波長多重数の累積密度分布を図3, 4に示す. 図3は波長変換が可能な場合の結果であり, 図4は波長変換が不可能な場合の結果である.

図3を見ると, 波長変換が可能な場合の必要波長多重数はべき乗則に従っていることが分かる. 波長変換が可能である場合に, First-Fit方式により波長を割り当てると, 番号の小さい波長から順に割り当てられる. このため, 各リンクにおいて要求される波長多重数は, そのリンクを経由する光パスの数にほぼ一致する. よって, 各リンクを経由する光パスの数もまた, べき乗則に従うことになる.

一方, 図4では, 波長変換が可能である場合よりも, 高 degree ノードが発生する確率が大幅に上昇している. 図3, 4のプロットの右下部, つまり, 必要波長多重数が最大の部分に注目すると, 双方であまり差がないことから, 必要波長多重数の上限がこの付近に存在することが分かる. 波長の変換が不可能になると, 各ノードにおいて波長の連続性を満たすために波長多重数が増加するが, その値が上限に近づくため, 結果として図4のような, 必要波長多重数の最大値付近で発生確率の急激な上昇がみられる分布になったと考えられる. 実際に使用されている

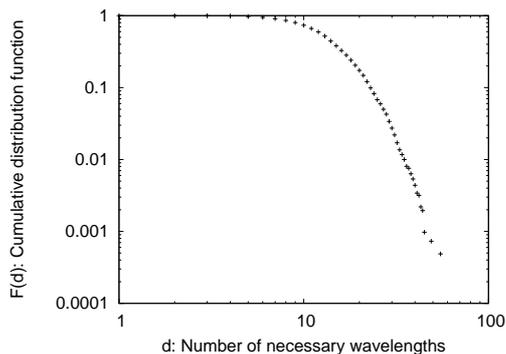


図5 必要波長数の分布: ER モデル, 波長変換あり

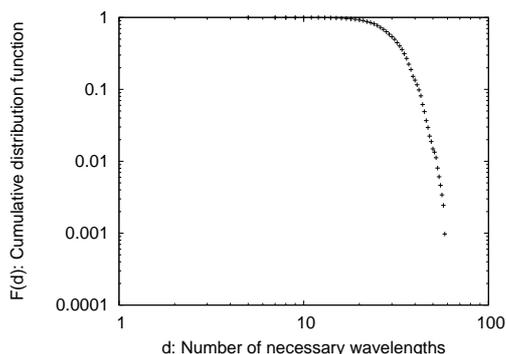


図6 必要波長数の分布: ER モデル, 波長変換なし

波長数は光パスの数と一致する。各リンクを経由する光パスの数は先に述べたように、図4とほぼ一致するため、波長変換が不可能な場合では、双方の図の曲線で囲まれる範囲に当たる波長資源が使われずに空き波長として存在することになる。このことから、物理トポロジーがスケールフリーであるWDMネットワークに対する、波長連続性の制約による影響は非常に大きいと言える。

### 3.3 ランダムネットワークでの必要波長数

次に、ランダムネットワークにおいて行ったシミュレーション結果を図5, 6に示す。前者が波長変換が可能な場合、後者が波長変換を用いない場合の結果である。必要とされる波長の多重数がスケールフリーネットワークと比べて1桁ほど少ないのは、図に見られるように、outdegreeの分散が小さく、各ノードとも他のノードと平均的に接続されているためであると考えられる。光パスが少数のノードを集中して経由することがないため、極めて大きな波長多重数を要求されるリンクが存在しないためである。

一方、波長変換が可能である場合では、10波長以上の多重が必要なリンクの発生確率はスケールフリーネットワークと比べて高い。図5では、ネットワーク内の約8割のリンクで必要とされる波長多重数が10~60波の範囲に存在する。このように、ある程度均等に波長資源が存在するため、波長変換が行えず、波長連続性の制約を受ける場合でも、もともと上限に近い波長数を有するリンクが多く存在するため、その影響はスケールフリーネットワークほど大きなものにはならない(図6)。

## 4. 最短ホップ経路探索以外のルーティングを用いた場合の必要波長多重数の調査

## 5. ま と め

WDM技術に関する従来の研究では、物理トポロジーがスケールフリーである場合は考慮されていない。しかし、現在のインターネットの形状や、今後のWDM技術の普及を考慮すると、将来、WDMネットワークもまたスケールフリーネットワークを構成すると考えられる。本稿では、大規模なスケールフリーネットワークを物理トポロジーにもつWDMネットワークにおいて、物理トポロジーのもつべき乗則に従うという特性がネットワークの性能に及ぼす影響についてシミュレーションにより調査した。

シミュレーションの結果より、物理トポロジーにおいて各ノードのoutdegreeがべき乗則に従うWDMネットワークでは、各リンクを通過する光パスの数がべき乗則に従うことが分かった。また、波長の変換が可能である場合は、各リンクにおいて必要となる波長数もまた、べき乗則に従うことが分かった。また、波長変換を行わない場合は、大部分のリンクにおいて必要となる波長多重数が大幅に増加する一方で、波長資源の利用率が低下することが示された。

## 謝 辞

本研究の一部は、通信・放送機構(TAO)および文部科学省科学研究費基盤研究(A)(14208027)によって行われている。ここに記して謝意を表す。

## 文 献

- [1] R. Dutta and G. N. Rouskas, "A survey of virtual topology design algorithms for wavelength routed optical networks," *Optical Network Magazine*, vol. 1, pp. 73-89, Jan. 2000.
- [2] J. Bannister, J. Touch, A. Willner, and S. Suryaputra, "How many wavelength do we really need? a study of the performance limits of packet over wavelength," *Optical Networks Magazine*, vol. 1, pp. 11-28, Apr. 2000.
- [3] R. Ramaswami and K. N. Sivarajan, "Design of logical topologies for wavelength-routed optical networks," *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, vol. 14, pp. 840-851, June 1996.
- [4] B. Mukherjee, D. Banerjee, S. Ramamurthy, and A. Mukherjee, "Some principles for designing a wide-area WDM optical network," *IEEE/ACM Transactions on Networking*, vol. 4, pp. 684-695, Oct. 1996.
- [5] M. Faloutsos, P. Faloutsos, and C. Faloutsos, "On power-law relationships of the Internet topology," in *Proceedings of ACM SIGCOMM '99*, vol. 29, (Cambridge, Massachusetts, USA), pp. 251-262, Oct. 1999.
- [6] A.-L. Barabási and R. Albert, "Emergence of scaling in random networks," *SCIENCE*, vol. 286, pp. 509-512, Oct. 1999.
- [7] A. L. Barabási and E. Bonabeau, "Scale-free networks," *Scientific American*, vol. 288, pp. 60-69, May 2003.
- [8] J. Spencer and L. Sacks, "On power-laws in SDH transport networks," in *Proceedings of IEEE ICC 2003*, (Anchorage, Alaska, USA), May 2003.
- [9] M. E. J. Newman, *Random Graphs as Models of Networks*, ch. 2, pp. 35-68. Berlin: WILEY-VCH, 1 ed., Nov. 2002.
- [10] A. Medina, A. Lakhina, I. Matta, and J. Byers, "BRIT: Universal topology generation from a user's perspective," Tech. Rep. BUCS-TR-2001-003, Boston University, Apr. 2001.