

WDM ネットワークにおける 階層型コーダリングトポロジ構成法

木谷 友哉[†] 船曳 信生^{††} 東野 輝夫[†]

本論文では、マルチホップ WDM (波長分割多重) ネットワークのための論理トポロジとして階層型コーダリングネットワークの構成法を提案する。対象とする MAN や LAN などのネットワークでは、低コストでネットワーク全体に流れる総トラフィック量や遅延の小さな論理トポロジを構築することが望まれる。MAN などの WDM ネットワークではリング構造の物理ネットワークがよく用いられることから、提案するトポロジではリング構造の規則的なトポロジであるコーダリングネットワークを拡張する。規則的なトポロジを基にすることでネットワーク直径 (全ノード間の最短ホップ数の最大値) の上限を理論的に保証する。同時に、階層的に拡張することでトポロジを構築するために必要な波長数を抑制する。提案したトポロジとコーダリングネットワークをネットワーク直径、構築に必要な波長数によって比較する。さらに、ネットワークトラフィックの統計量を与え、ヒューリスティックな光パスの設定法である HLDA (Heuristic Logical topology Design Algorithm) と比較し、提案手法の有効性を示す。

A Proposal of Hierarchical Chordal Ring Network Topology for WDM Networks

TOMOYA KITANI,[†] NOBUO FUNABIKI^{††} and TERUO HIGASHINO[†]

This paper presents a design method of **hierarchical chordal ring network topology (HCRN)** as a regular logical topology for multihop WDM networks. In order to minimize the traffic increase due to packet relays or hops on intermediate nodes in the multihop network, the network topology is hierarchically constructed in HCRN, so that more lightpaths are assigned to connections between nearby nodes than those for distant nodes, while the maximum hop between any pair of nodes is restrained. This hierarchical topology is also beneficial to reduce the number of required wavelengths through increasing their reuses by multiple lightpaths, which is important for cost-conscious metropolitan area networks. Through comparisons on the network diameter and the number of required wavelengths with the original chordal ring network topology and HLDA (Heuristic Logical topology Design Algorithm) for given traffic, we show the effectiveness of our proposed HCRN.

1. はじめに

波長分割多重 (WDM: Wavelength Division Multiplexing) 技術は、光ファイバ上に波長の異なる複数の光信号を並列的に伝送することで、超高速・大容量の通信を可能にする技術である⁸⁾。WDM 技術をベースとする WDM ネットワークでは、可変波長の送受信機を持つノード間が光ファイバで接続されており、送受信機間で同一波長を共有することでノード間通信

が可能となる。この同一波長による通信路は光パスと呼ばれており、ネットワークの論理的な隣接関係を表す。すなわち、WDM ネットワークでは、ノードの送受信波長の変更により任意の論理トポロジを構築できる^{3), 6), 9) - 12)}。

WDM ネットワークでは、個々の通信要求 (トラフィック) に応じて動的に論理トポロジを構成する方法 (シングルホップネットワーク) と、通信要求の統計量 (トラフィックの平均値など) に応じてあらかじめ静的に論理トポロジを与える方法がある (マルチホップネットワーク)。送受信機への波長の動的割当てはそのコストが高いことから、前者はバックボーンなどの基幹ネットワークで利用される。本論文では、MAN や LAN などの比較的安価に構築すべきネットワークへの WDM 技術適用を目的とすることから、後者を対象

[†] 大阪大学大学院情報科学研究科

Graduate School of Information Science and Technology, Osaka University

^{††} 岡山大学工学部通信ネットワーク工学科

Department of Communication Network Engineering, Okayama University

とする．この場合、すべての 2 ノード間では同時に光パスが構成できないため、中間ノードでの光パスの中継 (= 波長変換) が必要となる．その結果、論理トポロジ構成により 2 ノード間の中継ノード数 (= ホップ数) が異なるために、伝送効率を高めるためには、対象とする通信要求に対して適切な論理トポロジ構成を行う必要がある³⁾．さらに、WDM 技術で多重化できる波長数はそのコストに依存する．今回安価に構築すべき MAN や LAN を対象としていることから、必要とする波長数は可能な限り抑制するのが望ましい．異なる物理リンク (ノード間接続) で同一波長を再利用することにより、必要な波長数の抑制が可能であるが、複数の光パスが同一の物理リンクを使用する場合には波長の再利用ができない．そのため、必要波長数を抑制するための論理トポロジ構成も非常に重要となる．

静的な論理トポロジの設計において、与えられたトラヒックの統計量に応じてヒューリスティックに光パスを設定するアルゴリズムとして HLDA (Heuristic Logical topology Design Algorithm)¹¹⁾ などが提案されている⁵⁾．そのような方法では、トラヒックの統計量が多いノード間に優先的に光パスが張られ、トラヒックの少ないノード間はホップ数が非常に大きくなってしまふおそれがある．さらに、そのようにして構築されたトポロジでは、トラヒックの変動に対する性能の安定性が保てない．バックボーンネットワークと異なり MAN や LAN などのネットワークではトラヒックが局所的に偏ることがある一方、普段はトラヒックがほとんどないノード間に通信がないともいえない．そこで本論文では、論理トポロジに規則性を持たせて最悪性能を理論的に保証しつつ、トポロジ全体の平均性能も向上させることを目標とする．

本論文では、物理トポロジとしては MAN において一般的なリング構造のネットワークを想定し、論理トポロジとしてはリング構造の規則的なトポロジであるコーダリングネットワーク (Chordal Ring Network) に注目する^{1),4)}．そのうえで、通信要求に対して伝送効率が高く必要とする波長数の抑制可能な方法として、階層型コーダリングトポロジ構成法を提案する．提案するトポロジでは隣接するノードをクラスタ化しトポロジを階層化する．ここでは、想定するネットワークのトラヒックの局所性に注目し、構築するトポロジの直径 (最大ホップ数) を小さく保ちつつクラスタ内のノード間に多く光パスを割り当てる．これにより、トポロジで使用する波長数が抑制可能となる．提案するトポロジとコーダリングネットワークをネットワーク直径、構築に必要な波長数によって

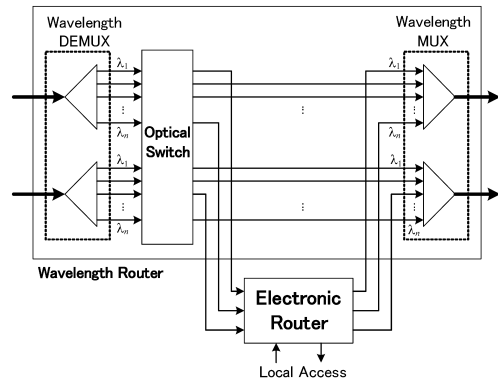


図 1 ノードアーキテクチャモデル

Fig. 1 Node architecture model.

比較する．さらに、トラヒック統計量を与え、HLDA により構築されたトポロジとネットワーク直径や平均ホップ数、ネットワーク全体に流れる総トラヒック量を比較し、提案手法の有効性を示す．

2. 対象とするネットワークモデル

WDM ネットワークにおいて、リングネットワークはネットワークの構成や管理、維持が容易である．また、総伝送路長が短くファイバや中継器のコストが安価であるため、MAN や LAN などのネットワークに有効である．MAN, LAN のために安価にネットワークを構築するためには、各ノードに設置する送受信機数は少ない方がよい．同一送受信機数のノードからなるネットワークの性能は、それを 3 にしたときに利得が最も大きくなることが知られている²⁾．そこで本論文では送受信機数は 3 とする．

本ネットワークの各ノードでは、そのノードを端点としない光パスの中継は光信号のまま入力ポートから出力ポートに送り出し、そのノードを端点とする光パスの信号はいったん電気信号に変換されて電気ルータに送られ、経路制御が行われる．逆に、電気ルータから送り出される信号は光信号に変換されて WDM ネットワークに送り出される．本論文で前提とするノードアーキテクチャのモデルを図 1 に示す．

ノードの送受信機数 (ノードの次数) が 3 であり、かつリング構造を持つ規則的なトポロジとして、コーダリングネットワークが提案されている．本論文で提案する論理トポロジは、コーダリングネットワークに基礎を置き、それを階層的に拡張することで設計する．高層ビルの建物内ネットワーク、キャンパス内ネットワークなどを想定した場合、ノード数は数百から数千になることも考えられ、階層化によってトポロジにスケラビリティを持たせることは重要である．

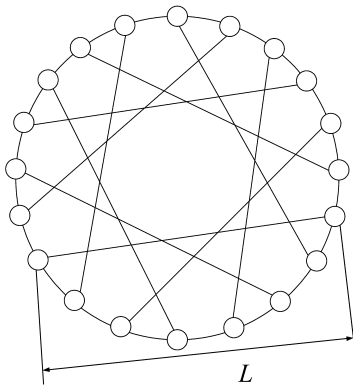


図2 コーダリングネットワーク ($N = 20, L = 7$)
Fig. 2 Chordal ring network topology ($N = 20, L = 7$).

近年, MAN や LAN などのノード数の多いネットワークが示すトラヒックが表す性質として“スモールワールド”と呼ばれる性質が注目を集めている^{7),13),14)}. そのため, 提案するトポロジではスモールワールドの特徴を考慮し設計を行うこととする. 以下, コーダリングネットワーク, スモールワールドについて述べる.

2.1 コーダリングネットワーク

コーダリングネットワークは, 各ノードが3つの送受信機を有していることを前提とした論理トポロジである. ここでは, リング上の隣接ノード間の辺と, 長さの等しい弧(コード)で接続された2ノード間に双方向の光パスが設定される(図2). このコードは, ノード数を N (N は偶数), リング上のノードの番号を0から $N-1$ としたとき, ノード番号 i が奇数のノードはノード $(i+L) \bmod N$ と, 偶数のノードはノード $(i-L) \bmod N$ との間で生成される. L (L は奇数) は弧長(chord length)と呼ばれる. 規則的な論理トポロジであるため, ルーティングが容易という利点もある.

文献4)では, 弧長 L は式(1)のように与えることでネットワーク直径(= 任意の2ノード間の最短ホップ数の最大値)を最小にできることが示されている. 図2の例では, $L = 7$ ($\approx \sqrt{20} + 3$)となる.

$$L = \begin{cases} \sqrt{N} + 3 \text{ に最も近い奇数} \\ \quad (\sqrt{N} + 3 \geq \frac{N}{2}) \\ \frac{N}{2} \text{ 以下の最大の奇数} \\ \quad (\text{otherwise}) \end{cases} \quad (1)$$

2.2 スモールワールド

スモールワールドとは, ノードがクラスタ状に集まって接続されているにもかかわらず, ネットワーク

のノード間の平均ホップ数が小さいという特徴を持つグラフである^{13),14)}. 自然界や人工物, 社会における様々なネットワークはスモールワールドであり, インターネットや WWW (World Wide Web) といった通信の分野でもスモールワールドの性質が見られることが報告されている. 様々なネットワークにスモールワールドの特徴が現れるのは, スモールワールドが局所的な情報伝達効率と大域的な情報伝達効率の両方の点で, 非常に有効であるためといわれている⁷⁾.

本論文で提案するトポロジにもこのスモールワールドの特徴を取り入れ, 近くのノード間に多くのコードを張ることで現実のネットワークのトラヒックモデルを考慮する.

3. 階層型コーダリングトポロジ構成法の提案

3.1 トポロジ構成法の考え方

コーダリングネットワークでの論理トポロジ構成において, 鍵となるのがコードである. 文献4)では, すべての弧長が同じ長さのときには弧長を式(1)で与えることによりネットワーク直径が最小化されることを示している. すべての弧長を同一にした場合はルーティングが容易になる一方, 必要な波長数の抑制が十分ではない. なお, ここではルーティングは光パスの終端ノードで電氣的に行くと仮定しているため, 様々な長さの弧長があっても問題はない.

通常, ネットワークでは, 同一組織内での情報共有の必要性から物理的に近くに位置するノード間でのトラヒックが多いと考えられる. これは, 前章で述べたスモールワールドの性質である. そのため, 複数の近傍ノードから構成されるノードクラスタを形成し, その中のノード間でコードを集中的に配置するといった階層的なコードの配置が望ましいと考えられる. それを基に, 本論文では階層型コーダリングトポロジを提案する.

3.2 階層型コーダリングトポロジ構成法

提案する階層型トポロジでは, 各階層のクラスタ間通信にかかるホップ数, および, 階層間通信にかかるホップ数を定数にすることで, ネットワーク全体のホップ数をノード数の対数オーダーにする. これを以下の方法で実施する.

(1) 最上位層クラスタ(第1階層)の分割

まず, リング上の N 個のノードを m 個の最上位層クラスタに分割する. m を小さくすると最上位層クラスタ間のホップ数は小さくなるが, 階層数が増え階層間の移動に必要なホップ数が大きくなる. ここで

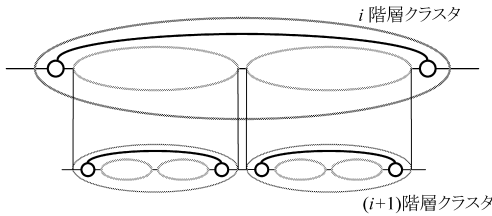


図3 ノードクラスタ
Fig. 3 Node cluster.

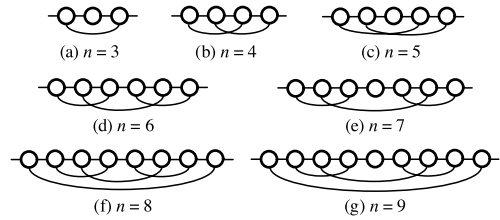


図4 最下位層のノードクラスタにおけるコードの接続
Fig. 4 Links inside a cluster in lowest level.

は、 m を変化させてトポロジを生成した結果に基づき、ノード数が 2,000 以下で最もホップ数が小さくなる 5 を最上位層クラスタ数 m とする。

(2) 第 i 階層クラスタ ($1 \leq i < H$) の構成

次に、第 i 階層の各クラスタについて、図 3 のようにクラスタの両端ノードをコードで接続する。両端ノード以外のノードは半分ずつクラスタ化し第 $(i+1)$ 階層のクラスタとする。このとき、接続先を持たない端数ノードが出ることを防ぐため、クラスタ化するノード数はできるだけ偶数になるように調整する。このように、第 i 階層クラスタは、両端のノードと 2 つの第 $(i+1)$ 階層クラスタから構成される。図 3 に示すように、第 i 階層クラスタの両端ノードから、その子クラスタとなる第 $(i+1)$ 階層クラスタの両端ノードまでのホップ数 $d_{i,i+1}$ はたかだか 3 となる。また同図より、両端ノード間のコードを使うことで、同一階層におけるクラスタは 2 ホップで横切ることができる。そのため、同じ第 i 階層クラスタを親に持つ 2 つの隣り合う第 $(i+1)$ 階層クラスタでは、それらの両端ノード間のホップ数 d_{i+1} はたかだか 3 となる。特に、最上位層 ($i = 1$) クラスタについては、隣り合う最上位層クラスタがリング上で隣接するため、最上位層クラスタ数が 5 のときは最も離れた (2 クラスタ分離れた) 最上位クラスタ間の両端ノード間のホップ数 d_1 はたかだか 5 となる。

(3) 最下位層クラスタ (第 H 階層) の構成

階層化を順次実施した結果、クラスタ内のノード数が 9 以下になったときには、クラスタ内でコードを張る接続先のないノードが増加するため、このクラスタを最下位層クラスタとして図 4 に示すようにコードを張る。最下位層クラスタ内のノード間のホップ数 d_H は、図 4 よりたかだか 3 となる。

このようにして階層的にクラスタ化を行うことで、任意の 2 ノード間の通信は、同じクラスタに属するまで順次階層を上がっていくリンクを使用することで実現できる。すべての階層において同一クラスタ内での通信、階層間の通信は一定ホップ数で行えるため、任

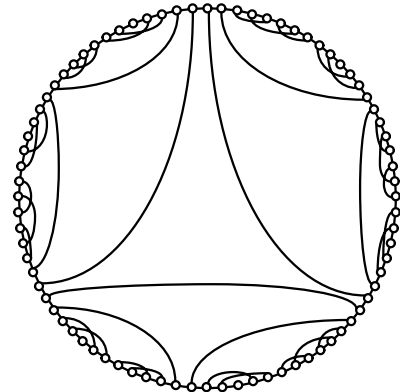


図5 階層型コーダリングネットワーク ($N = 80, H = 3$)
Fig. 5 Hierarchical chordal ring network topology ($N = 80, H = 3$).

意の 2 ノード間のホップ数はトポロジの階層数 H に依存する。トポロジの階層数 H は、最上位層において $N/5$ のクラスタを両端の 2 ノードを省いて半分に分割していき、9 ノード以下になるまでの分割数である。このとき、第 i 階層クラスタのノード数を a_i とおくと、各階層のノード数は、

$$\begin{aligned} a_H &\leq 9 \\ a_i &= 2a_{i+1} - 2 \quad (1 \leq i < H) \\ a_1 &= \frac{N}{5} \end{aligned} \tag{2}$$

で表され、式 (2) を

$$\begin{aligned} a_H &\leq 9 \\ a_1 &= \frac{N}{5} = 2^{H-1}(a_H + 2) - 2 \end{aligned} \tag{3}$$

と変形することで、階層数 H は

$$H = \lceil \log_2 (N - 10) - \log_2 55 - 1 \rceil \simeq \log_2 N \tag{4}$$

と求められる。 H はノード数 N の対数となり、ネットワーク全体のホップ数も対数のオーダーとなる。

図 5 に、ノード数 $N = 80$ 、最上位層クラスタ数 3、3 階層の場合の階層型コーダリングトポロジの例を示す。紙面の都合上、この図では最上位層クラスタ数

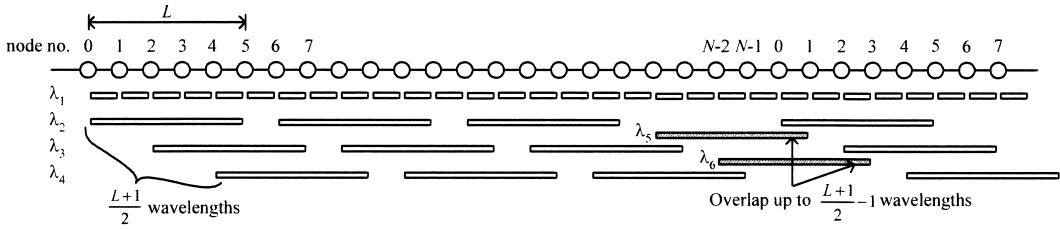


図 6 コーダルリングネットワークにおける光パスへの波長の割当て
 Fig. 6 Wavelength assignment to lightpaths in chordal ring network.

を 5 ではなく 3 としてある .

4. 静的トポロジ構成法との性能比較

提案する階層型コーダルリングネットワークの定性的な性能評価のために、そのネットワーク直径、構築に必要な波長数を求め、従来のコーダルリングネットワークと比較する。ここで、ネットワーク直径とは、ネットワークにおける全ノードペアの最短ホップ数の最大値を意味する。また、本論文で設定する光パスはすべて双方向リンクである。この場合、1 双方向リンクあたり 2 波長が必要であるが、対象とする MAN が光ファイバの双方向リング構造であり、各リングが 1 方向のデータ伝送を扱うものとして、各リングのファイバあたりの必要な波長数を使用波長数として算出している。

4.1 コーダルリングネットワーク

従来のコーダルリングネットワークのネットワーク直径、必要波長数を求める。そのノード数 N を偶数、弧長 $L = \sqrt{N} + 3$ とする。

4.1.1 ネットワーク直径

コーダルリングネットワークでは、リング上を経由した場合のホップ数が L 以上のノード間はコードを経由することにより $(L - 1)$ ホップのショートカットが可能となる。可能な限りコードを使うことでホップ数の削減が可能である。 N が十分大きいとき、ショートカット可能な最大回数は $(N/2)/(L+1)$ であり、それにショートカット間のリング上の移動を加えることで、ネットワーク直径を求めることができる。求めたネットワーク直径 $Net.dia.$ を式 (5) に示す。

$$Net.dia. = \left\lceil \frac{N/2}{L+1} \right\rceil \times 2 \approx \sqrt{N} - 4 + \frac{4}{\sqrt{N}+4} \tag{5}$$

4.1.2 必要波長数

まず、リング上で物理的に隣接する 2 ノード間の光パス（論理通信リンク）に 1 波長を使用する。次に、コードに対応する光パスを実現するためには、始点ノードから終点ノードまでの物理リンク上の経路に同

一波長を割り当てる。同一物理リンクを通る光パスにはすべて異なる波長を割り当てなければならないため、図 6 より $(L + 1)/2$ 波長必要である。特に、ノード数 N が $(L + 1)$ の整数倍になっていない場合には、最大で $(L + 1)/2 - 1$ 本の波長がノード 0 付近で重なるため、その分の波長も必要になる。これから、コーダルリングネットワークでの必要波長数の最小値 W_{Cmin} 、最大値 W_{Cmax} は、

$$W_{Cmin} = 1 + \frac{L + 1}{2} = \frac{\sqrt{N}}{2} + 3$$

$$W_{Cmax} = 1 + L = \sqrt{N} + 4 \tag{6}$$

となる。このように、従来のコーダルリングネットワークではネットワーク直径や必要波長数が $O(\sqrt{N})$ となる¹⁵⁾。

4.2 階層型コーダルリングネットワーク

次に、提案する階層型コーダルリングネットワークの性能を導出する。

4.2.1 ネットワーク直径

3.2 節で示したように、最上位層クラスタ間の移動にかかるホップ数 d_1 はたかだか 5、第 i 階層クラスタ ($1 \leq i < H$) において、両端ノードからその子クラスタとなる第 $(i + 1)$ 階層クラスタの両端ノードまでのホップ数 $d_{i,i+1}$ はたかだか 3、最下位層クラスタにおいてそのクラスタの両端ノードから最も離れたノードへのホップ数 d_H はたかだか 3 である。提案するトポロジのネットワーク直径は、すべての階層において最も移動を必要とする場合のホップ数であり、

$$Net.dia. = d_1 + 2 \left(\sum_{i=1}^{H-1} d_{i,i+1} + d_H \right)$$

$$= 6H + 3 \tag{7}$$

で表される。トポロジの階層数 H は式 (4) で求められるため、ネットワーク直径は、

$$Net.dia. \approx 6 \log_2 N \tag{8}$$

となる。

4.2.2 必要波長数

まず、リング上で物理的に隣接する 2 ノード間の光

表 1 各トポロジの性能 (最高次数の項と係数)

Table 1 Coefficients for highest terms of performance indices.

	コーダリングネットワーク	階層型コーダリングネットワーク
ネットワーク直径	\sqrt{N}	$6 \log_2 N$
必要波長数	$\frac{1}{2}\sqrt{N}$	$\log_2 N$

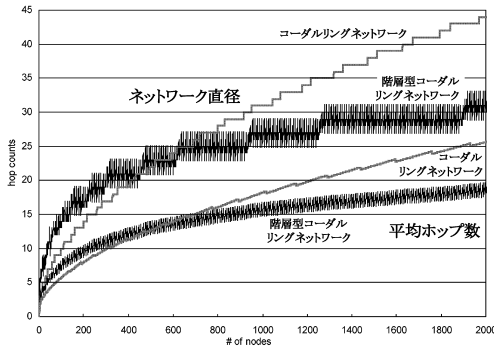


図 7 各トポロジのネットワーク直径と平均ホップ数

Fig. 7 Network diameter and average number of hops in each topology.

パス (論理通信リンク) に 1 波長を使用する。最下位層を除く各階層では、クラスタの両端ノード間のコードに 1 波長使用する。最下位層では、図 4 の (a) から (e) のように、最大で 9 個のノードのコードを接続するために最大で 3 波長使用する。提案するトポロジでは、同一階層においてクラスタ間にまたがるコードがないため、各クラスタで同じ波長を使用することができる。よって、階層数を H とした場合、式 (4) より階層型コーダリングネットワークでの必要波長数 W_H は、

$$W_H = 1 + (H - 1) + 3 \approx \log_2 N \quad (9)$$

となる。

4.3 考 察

以上の各トポロジのネットワーク性能の評価式について、式中の最も次数の高い項を表 1 にまとめる。また、実際にトポロジを構成して各トポロジのネットワーク直径と平均ホップ数を求めた結果を図 7 に、必要波長数を求めた結果を図 8 にそれぞれ示す。

表 1 より、提案するトポロジのネットワーク直径、必要波長数は $O(\log N)$ であり、基にしたコーダリングネットワークの $O(\sqrt{N})$ に比べて、 N が大きくなるほど良い性能を示し、スケーラビリティがあることが分かる。また、その最大次数の項の係数も小さく抑えられていることから、実際にトポロジを構成した

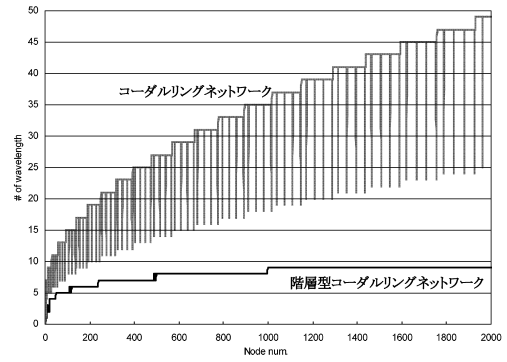


図 8 各トポロジを構成するのに必要な波長数

Fig. 8 Number of required wavelengths in each topology.

際にも良い性能を示す。図 7 より、実際にトポロジを構成した際の性能は、ネットワーク直径、平均ホップ数とともにノード数 600 前後から階層型コーダリングネットワークが優れていることが分かる。さらに、図 8 は、階層型コーダリングトポロジを実現するために必要な波長数がコーダリングネットワークに比べて非常に小さく抑えられていることを示している。たとえば、コーダリングネットワークでは、WDM 技術として比較的安価に実装可能な 8 波長を用いた場合には 40 ノード程度のネットワークしか構築できないが、提案する階層型コーダリングトポロジでは 1,000 ノードまでのネットワークが構築できることが明らかとなった。これは、提案する階層型コーダリングネットワークがノードをクラスタ化し階層化することにより多くの光パスで波長を有効に再利用しているためと考えられる。

5. 動的トポロジ構成法との性能比較

本章では、提案する階層型コーダリングネットワークを実際のネットワークトラヒックに適用したときの性能評価を行う。比較対象として、文献 11) で提案されている HLDA (Heuristic Logical topology Design Algorithm) により構成された論理トポロジを用いる。HLDA は、与えられたトラヒックの統計量に応じてヒューリスティックに光パスを設定するアルゴリズムである。

5.1 HLDA (Heuristic Logical topology Design Algorithm)

HLDA では、ネットワーク全体に流れる総トラヒック量を最小化するため、トラヒック量の多いノード間から優先的に光パスを割り当てていく。HLDA のアルゴリズムを以下に示す。

Step.1 全 2 ノード間 (i, j) のトラヒック量 P_{ij} を

求める．

Step.2 すべてのノード間でトラヒックが到達可能となるように、物理的に隣接しているノード間に光パスを張り、その間の P_{ij} を 0 にする．

Step.3 P_{ij} が最大のノードペアを求め、そのノード間の最短パスに光パスを張れる波長があるならば、光パスを張る．そして、光パスが張れても張れなくても、 P_{ij} は 0 とする．

Step.4 すべての P_{ij} が 0 なら Step.5 へ進み．そうでないなら、Step.3 へ戻る．

Step.5 まだ、光パスが張れるなら、波長数の制約により張れなくなるまで、ランダムに張る．

5.2 シミュレーションによる評価実験

提案するトポロジによる光パス割当て、HLDA による光パス割当てのそれぞれを行うシミュレーションプログラムを作成し、評価実験を行った．与えるトラヒック行列は、ランダムモデル、サーバ・クライアントモデル、スモールワールドモデルの 3 種類である．ノード数 N を 50 刻みに 1,000 までとし、それぞれの N について上記の 3 種類の例題をそれぞれ 3 つずつ作成した．HLDA が使用する波長数の上限は、提案するトポロジが使用する波長数と同じとする．

ランダムモデルのトラヒック行列は、各ノード間のトラヒック量を 0 から 1 までの一様乱数により与えたものである．サーバ・クライアントモデルのトラヒック行列は、ランダムモデルと同様にトラヒック行列を作成し、5%のノードをサーバとして選び、それらのノードを端点に持つトラヒックを 10 倍にしたものである．スモールワールドモデルのトラヒック行列は、サーバ・クライアントモデルと同様にして作成したトラヒック行列に対して、各ノードの近傍 5%のノード間のトラヒックを増加させたものである．このとき隣接ノードとのトラヒックは 10 倍し、遠くなるごとに線形に倍率を減少させた．

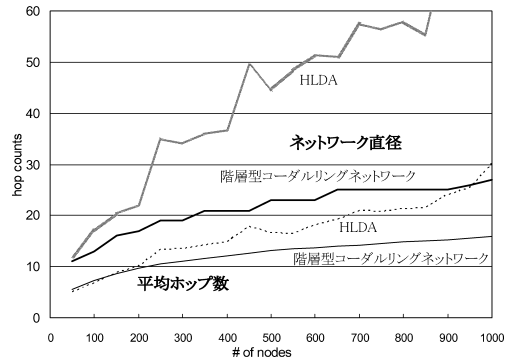
評価項目として、それぞれのトポロジのネットワーク直径 d_{max} 、平均ホップ数 \bar{d} 、ネットワークに流れる総トラヒック量 Q を導入する． Q は、ノード i, j 間のホップ数を $hop(i, j)$ 、ノード i, j 間のトラヒック量を T_{ij} としたとき、

$$Q = \sum_i \sum_j T_{ij} \times hop(i, j) \tag{10}$$

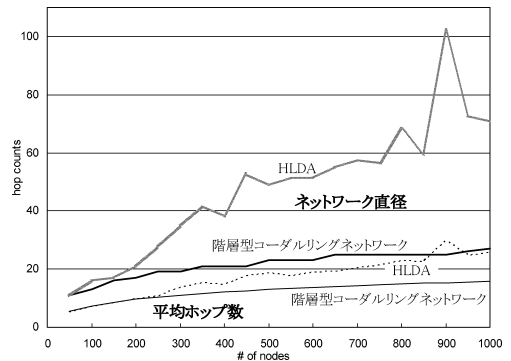
で与えられる．

5.3 各トポロジの評価結果

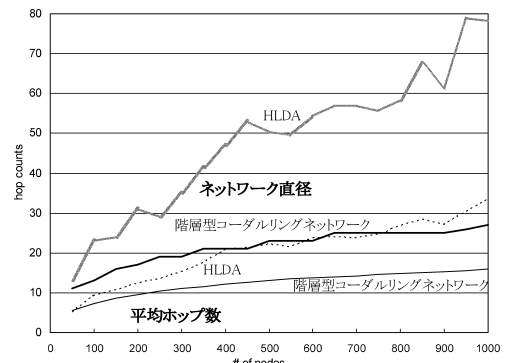
前節で作成したトラヒック行列を用いて実験を行った結果を図 9、図 10 に示す．図 9 は、各トラヒックモデルでトポロジを作成したときのネットワーク直径



(a) ランダムモデル



(b) サーバ・クライアントモデル



(c) スモールワールドモデル

図 9 各トポロジのネットワーク直径と平均ホップ数

Fig.9 Network diameter and average number of hops in hierarchical CRN and HLDA.

と平均ホップ数である．図 10 は、ネットワークに流れる総トラヒック量 Q を HLDA の結果を 1 として示したものである．

すべてのトラヒックモデルにおいて、ノード数が 100 以上のときには提案するトポロジが HLDA より良い性能を示す．その理由としては、ノード数が小さいときは HLDA が使用できる波長数が比較的多いため多くのノード間に光パスが張られるが、ノード数が大きいときは使用できる波長数が相対的に小さくなりトラ

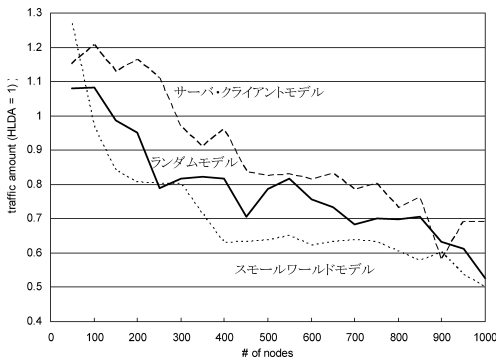


図 10 各トポロジのネットワーク内総トラフィック量 (HLDA = 1)
Fig. 10 Ratio of network traffic amount in hierarchical CRN and HLDA (HLDA = 1).

ヒック量の多い部分に十分な量の光パスを張ることができないためと考えられる。

ネットワーク直径に注目すると、HLDA ではトラフィック量の多いノード間を優先的に接続するためトラフィック量の少ないノード間のホップ数は非常に大きくなってしまふ。また、与えるトラフィック行列に依存してネットワーク直径は変動する。対して提案するトポロジは、与えたトラフィック行列に依存せずネットワーク直径は安定して小さい。

次に、ランダムモデルとサーバ・クライアントモデルの平均ホップ数と総トラフィック量に注目する。HLDA において、ランダムモデルではネットワーク全体に均等に光パスが張られるため、平均ホップ数は比較的小さい。サーバ・クライアントモデルではサーバ間に優先的に光パスが張られるため、ネットワーク全体の総トラフィック量は他のモデルに比べて小さい。また、サーバの位置が分散していると考え平均ホップ数はランダムモデルとよく似た傾向を示す。提案するトポロジは規則的なトポロジであるため、トラフィックモデルやトラフィック量に影響されず一定の性能を提供し、ネットワーク直径などの上限を保証できる。

最後にスモールワールドモデルの平均ホップ数と総トラフィック量に注目する。HLDA では、近傍ノード間のトラフィック量が大きいため近傍ノード間に光パスを集中して張る。その結果、近傍ノード間の光パスで波長数を消費してしまい、長い光パスが張れず平均ホップ数が悪化している。一方、提案するトポロジは近傍ノード間の結合を密にしたトポロジであるためスモールワールドに適している。これらの理由から 2 つのトポロジの性能に大きな差ができ、図 10 に示される実験結果ではノード数が 400 以上のとき提案するトポロジの総トラフィック量が HLDA の約 60% になっている。

6. む す び

本論文では、マルチホップ WDM ネットワークにおいて光パスを与えるための規則的論理トポロジ構成法として、階層型コーダリングトポロジ構成法を提案した。本トポロジは、従来の代表的な規則的トポロジであるコーダリングネットワークを、ネットワーク直径、必要波長数を抑制するために階層的な構造に拡張している。各ネットワーク性能の評価式を導出し、提案する階層型コーダリングネットワークがコーダリングネットワークに比べ優れていることを示した。また、トラフィックの統計量からヒューリスティックに光パスを設定するアルゴリズム HLDA により構築された論理トポロジと比較しても、ネットワーク内のノードの平均ホップ数、ネットワーク直径、ネットワーク全体に流れるトラフィック総量について、提案するトポロジが優れていることを示した。

提案するトポロジは階層型であるために上位階層のリンクにトラフィックが集中する傾向がありポトルネットワークリンクが発生する。今後はフロー制御などにより、リンクに流れるトラフィックの分散について検討を行う予定である。

参 考 文 献

- 1) Arden, B.W. and Lee, H.: Analysis of Chordal Ring Network, *IEEE Trans. Comput.*, C-30, No.4, pp.291-295 (1981).
- 2) Coelho, R.M.F., Rodrigues, J.J.P.C. and Freire, M.M.: High Performance Optical Internet Backbones with Mesh Topologies, *Proc. 11th IEEE Int. Conf. on Networks (ICON2003)*, pp.355-359 (2003).
- 3) Dutta, R. and Rouskas, G.N.: A survey of virtual topology design algorithms for wavelength routed optical networks, *Optical Network Magazine*, Vol.1, pp.73-89 (2000).
- 4) Freire, M.M. and da Silva, H.J.A.: Performance comparison of wavelength routing optical networks with chordal ring and mesh-torus topologies, *Proc. 1st IEEE Int. Conf. on Networking (ICN '01)*, LNCS 2093, pp.358-367 (2001).
- 5) Kato, J., Arakawa, S. and Murata, M.: A Design Method for Logical Topologies with Stable Packet Routing in IP over WDM Network, *IEICE Trans. Commun.*, Vol.E86-B, No.8, pp.2350-2357 (2003).
- 6) Kato, M. and Oie, Y.: Reconfiguration Algorithms Based on Meta-Heuristics for Multihop WDM Lightwave Networks, *Proc. IEEE*

- ICC2000*, pp.1638–1644 (2000).
- 7) Marchiori, M. and Latora, V.: Harmony in the small-world, *Physica A*, Vol.285, pp.539–546 (2000).
 - 8) Mukherjee, B.: *Optical Communication Networks*, McGraw-Hill (1997).
 - 9) Mukherjee, B., Banerjee, D., Ramamurthy, S. and Mukherjee, A.: Some principles for designing a wide-area WDM optical network, *IEEE/ACM Trans. Networking*, Vol.4, No.5, pp.684–696 (1996).
 - 10) Park, S.W. and Kim, Y.C.: A Virtual Topology for WDM Multihop Lightwave Networks, *Proc. IEEE INFOCOM '95*, pp.701–707 (1995).
 - 11) Ramaswami, R. and Sivarajan, K.N.: Design of logical topologies for wavelength-routed all-optical networks, *Proc. IEEE INFOCOM '95*, pp.1316–1325 (1995).
 - 12) Ramaswami, R. and Sivarajan, K.N.: Design of logical topologies for wavelength-routed optical networks, *IEEE J. Selected Areas in Commun.*, Vol.14, pp.840–851 (1996).
 - 13) Watts, D.J. and Strogatz, S.H.: Collective dynamics of ‘small world’ networks, *Nature*, Vol.393, pp.440–442 (1998).
 - 14) Watts, D.J.: Networks, Dynamics and The Small World Phenomenon, *American J. Sociology*, Vol.105, No.2, pp.493–527 (1999).
 - 15) 天野英晴：並列コンピュータ，昭晃堂 (1996).

(平成 17 年 2 月 2 日受付)

(平成 17 年 4 月 1 日採録)



木谷 友哉 (学生会員)

平成 14 年大阪大学基礎工学部情報科学科卒業。平成 16 年同大学大学院情報科学研究科情報ネットワーク学専攻博士前期課程修了。現在、同後期課程在学中。WDM ネットワークの波長割当て問題、ネットワークシステムの設計効率化に関する研究に従事。電子情報通信学会会員。IEEE Student Member。



船曳 信生 (正会員)

昭和 59 年東京大学工学部計数工学科卒業。同年住友金属工業 (株) 入社。平成 3 年ケースウエスタンリザーブ大学大学院修士課程修了。平成 6 年大阪大学基礎工学部情報工学科講師。平成 7 年同助教授。平成 12 年カリフォルニア大学サンタバーバラ校客員研究員。平成 13 年岡山大学工学部通信ネットワーク工学科教授。工学博士。組合せ最適化、ネットワークプロトコル、ネットワークセキュリティ、画像処理、教育工学等に関する研究に従事。IEEE、電子情報通信学会各会員。



東野 輝夫 (フェロー)

昭和 54 年大阪大学基礎工学部情報工学科卒業。昭和 59 年同大学大学院基礎工学研究科博士後期課程修了。同年同大学助手。現在、同大学大学院情報科学研究科教授。工学博士。モバイルコンピューティング、分散システム、通信プロトコル等に関する研究に従事。情報処理学会フェロー。電子情報通信学会、ACM 各会員。IEEE Senior Member。