

特別研究報告

題目

生物の環境変動に対する進化適応性を備えた
WDM ネットワーク設備増強手法の提案と評価

指導教員

村田 正幸 教授

報告者

井上 昂輝

平成 26 年 2 月 14 日

大阪大学 基礎工学部 情報科学科

生物の環境変動に対する進化適応性を備えた
WDM ネットワーク設備増強手法の提案と評価

井上 昂輝

内容梗概

波長分割多重 (WDM) を用いた WDM ネットワークにおいて、波長レベルでの信号処理を行い仮想網 (VNT) を構築し、その上に IP トラフィックを收容する IP over WDM ネットワークが広く検討されている。我々の研究グループでは、トラフィック変動への適応性を有する VNT の制御手法として、制御システムがゆらぎと確定的な振る舞いによって駆動され、それらの 2 つの振る舞いが VNT 上の通信品質の状態を示すフィードバック値によって制御されるアトラクター選択にもとづく VNT 制御手法を検討している。通信量の増大によって WDM ネットワークの物理資源量が不足する場合には物理設備を増強する必要がある。しかし、物理ネットワークと VNT 制御は密接に関係しており、アトラクター選択にもとづく VNT 制御の適応性を損なわないネットワーク設備増強が必要である。そこで本報告では、トラフィック需要増大に伴う物理設備量の増強を環境変動の 1 つとして捉え、様々な環境変動に対する進化適応性を備えた物理トポロジーを構築するためのネットワーク設備増強手法を提案し、その有効性を示す。本報告では、頑強性と可塑性を備えた生物の進化を説明する数理モデルを導入し、ネットワーク設備増強に応用する。頑強性とは、環境変動に対して安定して機能する性質であり、可塑性とは、環境が大きく変動した際に自身の状態を大きく変えることができる性質である。それらの性質は、生物の進化適応に不可欠な性質であることがわかっている。可塑性を備えた物理トポロジーを設計することによって、将来のトラフィック変動に対して設定できる VNT の多様性が増し、VNT 制御による環境変動への適応性の更なる向上が期待される。提案手法では、環境変動に対する適応度を尺度として、もっとも適応性が高まるポート追加位置を決定する。計算機シミュレーションによる評価では、ヒューリスティックな VNT 設計手法である I-MLTDA を用いて現在のトラフィック需要に最適な位置にポート追加を行う手法と比較した。12 ノード規模のネットワークを対象に計算機シミュレーションを行った結果、提案手法は比較手法と比べて適応可能な通信量が約 8% 増加することが明らかとなった。

主な用語

WDM (Wavelength Division Multiplexing)、光ネットワーク設計、アトラクター選択にもとづく仮想網制御、物理トポロジー設計、進化適応性、可塑性

目次

1	はじめに	6
2	IP over WDM ネットワーク	8
2.1	WDM 技術	8
2.2	仮想網制御	9
2.3	物理設備による制約	12
3	生物の進化モデル	14
3.1	数理モデル	14
3.2	数値例	16
4	進化適応性を備えたネットワーク設備増強手法	19
4.1	進化モデルの応用	19
4.2	ポート追加位置決定手法	20
5	性能評価	26
5.1	ポート追加位置の決定	26
5.2	仮想網制御性能の比較評価	32
6	おわりに	45
	謝辞	46
	参考文献	47

目 次

1	WDM 伝送システム	8
2	IP over WDM: ポイントポイント間通信	9
3	物理トポロジー	10
4	光パスの設定例	10
5	仮想網 (VNT)	11
6	IP over WDM ネットワーク	11
7	ノード構成	13
8	遺伝子活性抑制ネットワークの変異および淘汰	17
9	平均環境適応度、分散 V_{ip} 、分散 V_g の推移	18
10	分散 V_{ip} 、分散 V_g の分布	18
11	制御行列の変異および淘汰	21
12	ADD アルゴリズムによるポート追加位置決定手法	23
13	ポートを暫定的に追加した WDM ネットワークにおける環境適応度の試算	24
14	JPN12 モデル	27
15	ポート追加後の WDM ネットワーク上における平均環境適応度の推移	29
16	ポート追加後の WDM ネットワーク上における分散 V_{ip} 、分散 V_g の分布	30
17	想定トラヒック変動パターンの分布	31
18	アトラクター選択の VNT 制御への適用	34
19	最大ルータ利用率と活性度の関係	35
20	評価指標の概要	37
21	最大ルータ利用率の時間推移	39
22	VNT 制御有効期間の分布: $g = 0.005, v = 0.01$	40
23	VNT 制御有効期間の分布: $g = 0.005, v = 0.02$	40
24	VNT 制御有効期間の分布: $g = 0.005, v = 0.03$	41
25	VNT 制御有効期間の分布: $g = 0.005, v = 0.04$	41
26	VNT 制御有効期間の分布: $g = 0.005, v = 0.05$	42
27	VNT 制御有効期間の分布: $g = 0.005, v = 0.06$	42

表 目 次

1	JPN12モデルの都市人口	28
2	ポートを追加したノードごとの第29世代における平均環境適応度	32
3	トラヒック変動のパラメーター	33
4	VNT 制御有効期間の比較	43
5	VNT 制御有効期間の平均	43

1 はじめに

波長分割多重 (WDM: Wavelength Division Multiplexing) を用いたネットワークの通信形態として波長ルーティングを用いた光基盤ネットワークの構築が検討されている。波長ルーティングは、光基盤ネットワークを構成する OXC (Optical Cross-Connect) で光信号レベルでの交換を行うことで、波長のチャネル (以降、光パス) をノード間に構築する。波長ルーティングを用いることで、光基盤ネットワークでは光信号を電気信号に変換することなくデータ転送が可能になり、中継ノードでの電気処理が不要となる。複数の光パスを用いて仮想的なトポロジーである仮想網 (VNT: Virtual Network Topology) を構築し、その VNT 上に IP (Internet Protocol) トラフィックを収容する IP over WDM ネットワークが広く検討されている [1-17]。

近年のインターネットでは P2P ネットワーク、VoIP、動画配信サービスなどの新たなサービスが登場し、ネットワーク上でのトラフィック需要が増大するとともに、トラフィック変動が大きくなることが指摘されている [18, 19]。トラフィック需要の変化に適応し、IP トラフィックを効率的に光ネットワークに収容するための通信形態として、複数の光パスから構成される VNT の制御手法の研究がなされている。その一方で、インターネットが社会に普及するとともに、情報通信ネットワークの規模は拡大を続けている。その結果、光ネットワーク上に構築される VNT の規模も増大し、トラフィック需要の変動に対して VNT 全体を再構築することは困難になりつつある。我々の研究グループでは、トラフィック変動への適応性を有する VNT の制御手法として、制御システムがゆらぎと確定的な振る舞いによって駆動され、それら 2 つの振る舞いが VNT 上の通信品質を示すフィードバック値によって制御されるアトラクター選択にもとづく VNT 制御手法を検討している。トラフィック変動やリンク障害などのネットワーク環境の変化に対して適応的に動作すること [20]、および、より大きなトラフィック変動に対しても光パスの利用率が低減されることを明らかにしてきた [21-23]。

VNT 制御によってトラフィック変動への適応性が確保されるのに対し、トラフィック量増大によってリソース不足となる場合には物理設備を増強する必要がある。文献 [24] では、物理トポロジー設計と VNT 設計の複合問題として定式化し、ルータ間に要求される LSP (Label Switched Path) を収容するために必要な OXC 数をヒューリスティック手法により求め、物理トポロジーと VNT を算出している。文献 [25] では、物理リンクの単一故障が生じた際にも接続性を維持するための VNT 設計手法と物理ネットワーク設計手法を検討しており、複数のリング型経路から構成される VNT を対象として VNT 収容に必要なファイバ数を最小化している。文献 [26] では、トラフィック需要の候補をいくつか列挙し、それらの候補を VNT を用いて収容するために必要となる OXC 数およびファイバ数を算出する設備設計手法が検討されている。文献 [26] では、VNT はヒューリスティックな VNT 設計手法である

MLDA[9]を用いている。物理ネットワーク設計とVNT制御は相互に依存しており、物理ネットワーク上で用いられるVNT設計手法やVNT制御手法を考慮して物理ネットワークを設計する必要がある。アトラクター選択にもとづくVNT制御手法は環境変動に対する高い適応性を有しているが、アトラクター選択にもとづくVNT制御手法の振る舞いを考慮せずに物理ネットワークを設計した場合、多様なトラフィックを収容するVNTの候補数が減少し、その結果、適応性を損なう恐れがある。したがって、アトラクター選択にもとづくVNT制御の適応性を損なわないネットワーク設備増強が必要である。

本報告では、トラフィック需要増大に伴う物理設備量の増強を環境変動の1つとして捉え、様々な環境変動に対する進化適応性を備えた物理ネットワークを構築するためのネットワーク設備増強手法を提案し、その有効性を示す。提案手法では、頑強性と可塑性を備えた生物の進化を説明する数理モデルを導入し、ポート数増強の指針を得る。可塑性を備えた物理トポロジーを構築することで、設定できるVNTの多様性が増し、アトラクター選択にもとづくVNT制御による将来の環境変動に対する適応性が更に向上すると期待される。提案するポート追加位置決定手法では、ポート追加の候補となる1つのノードに暫定的にポートを追加して得られる物理ネットワーク上で、生物の進化モデルを応用したダイナミクスに従いVNT制御を行い、システムの適応性を試算する。これをポート追加の候補となるノードそれぞれに対して行うことで、もっとも進化適応性が高まるポート追加位置1箇所を決定する。その過程を繰り返すADDアルゴリズムによって、ポートを追加する。

本報告の内容は以下の通りである。まず2章では、本報告で対象とするIP over WDMネットワークについて詳しく説明する。次に3章では、本報告で着目する生物の進化モデルについて説明する。4章では、生物の進化モデルにもとづくネットワーク設備増強手法を述べる。5章では、性能評価で用いるシミュレーション環境とシミュレーション結果を述べる。最後に6章で本報告のまとめと今後の課題について述べる。

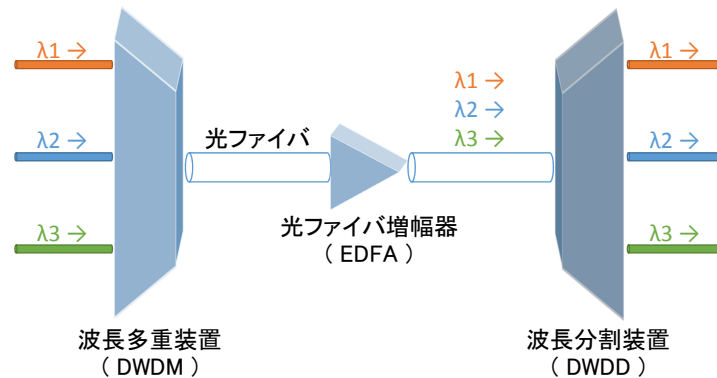


図 1: WDM 伝送システム

2 IP over WDM ネットワーク

本章では、本報告で対象とする光基盤ネットワークのモデルである IP over WDM ネットワークを説明する。

2.1 WDM 技術

WDM 伝送システムは、波長多重装置 (DWDM: Dense Wavelength Division Multiplexer)、波長分割装置 (DWDD: Dense Wavelength Division Demultiplexer)、光ファイバ増幅器 (EDFA: Erbium Doped Fiber Amplifier) により構成される。WDM 技術を用いた伝送システムを図 1 に示す。データを送信する場合、まず送信側においてデータを光信号に変換する。次に、波長多重装置によって各波長を多重化し、多重化された光信号をファイバに送り出す。光信号はファイバ内を伝播し、受信側に到達する。受信側では、多重化された光信号を波長分割装置によって各波長に分波し、電気信号に変換した後データを取り出す。このように、WDM 技術は 1 本の光ファイバ上において並列にデータを伝送することによって大容量通信を実現する。なお、ファイバ内では光信号が減衰して波形が劣化する。そのため、光信号を電気信号に変換することなく光のまま信号の増幅を行う光ファイバ増幅器を伝送路の途中に配置することによって光信号を増幅している。

IP over WDM ネットワークは、インターネットトラヒックの伝送に WDM 技術を利用したものである。様々な利用形態が議論されているが、その一つに図 2 のようにルータ間のポイントポイント間通信に WDM 技術を利用することで通信回線の大容量化を図っている。ポイントポイント間通信に WDM 技術を導入することで、通信回線は確実に大容量化されるが、光ファイバに流れるすべての IP トラヒックをルータが扱うことになり、ルータにおける電気処理がボトルネックとなる。そのため、WDM ネットワーク上において光パスを設定

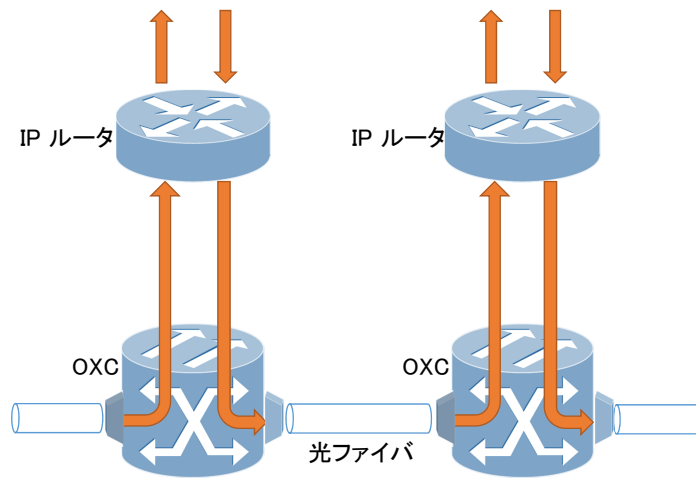


図 2: IP over WDM: ポイントポイント間通信

し、WDM ノードにおける電気処理によるコストを軽減することが考えられている。ここで光パスとは、ノードにおいて入力側の波長と出力側の波長をノード内の光スイッチによって連結させ、送信ノードから受信ノードまでの連結された一連の波長によって形成されるチャネルである。WDM ネットワーク内において、すべてのエンドノード間に光パスを設定することができれば、WDM ネットワーク内部において電気処理は不要になる。しかし、そのためには数多くの波長が必要となる。一方、WDM ネットワーク内部においても光パスの終端を許すとすれば、IP ルータ上での電気処理による経路制御が一部必要になる。しかし、IP は光パスによって構築される仮想的なトポロジー上で本来の経路制御などのプロトコル処理を行えばよいから、IP の変更が必要ないという利点は残される。

2.2 仮想網制御

たとえば、図 3 に示す 4 つのノードから構成されるネットワークを考える。ファイバにおいて利用可能な波長は λ_1 、 λ_2 の 2 波長とする。このとき、図 4 のようにノード N_2 において λ_2 を連結することによって、ノード N_1 、 N_3 間に波長 λ_2 を用いて光パスを設定する。図 4 のように光パスを設定した場合、ノード N_1 とノード N_3 は論理的に隣接しているため、IP は図 5 に示すネットワーク上で動作することになる。このように、光パスを利用して論理的に構成されるネットワークを仮想網 (VNT) と呼ぶ。また図 5 に対して、図 3 に示されるネットワークを物理トポロジーと呼ぶ。

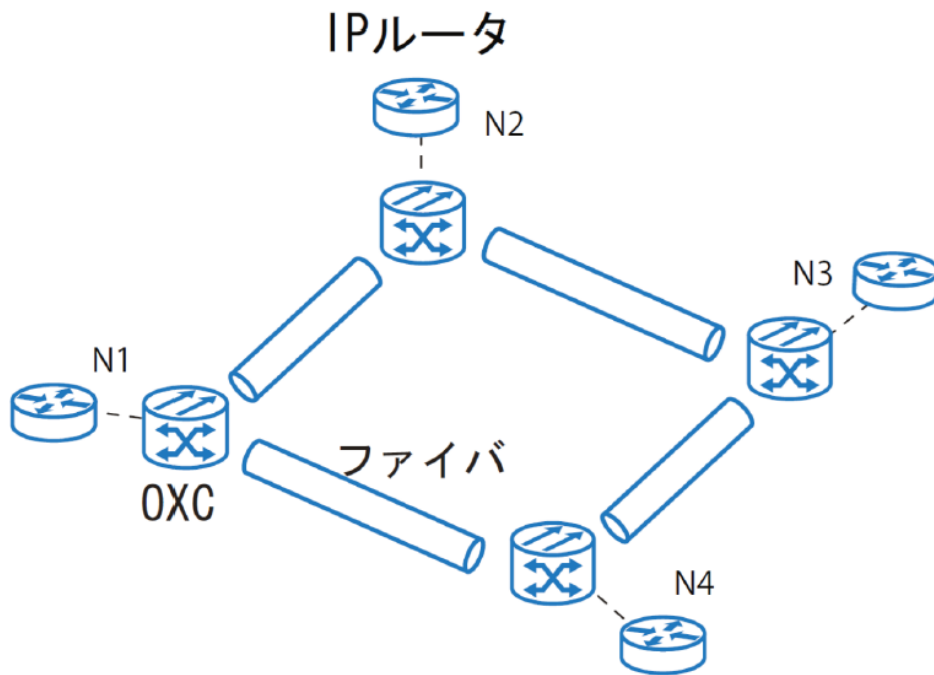


図 3: 物理トポロジー

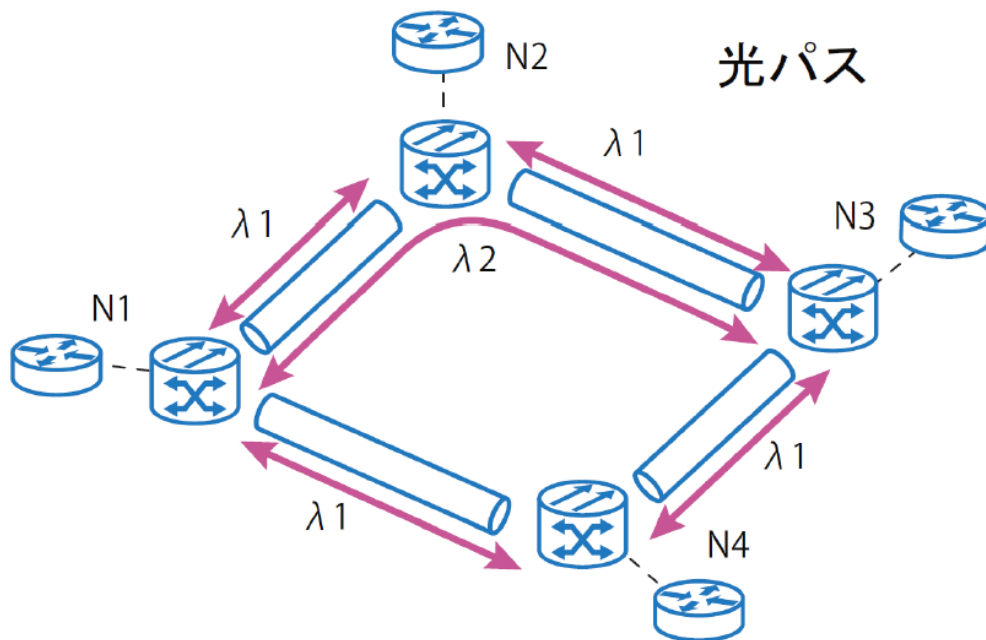


図 4: 光パスの設定例

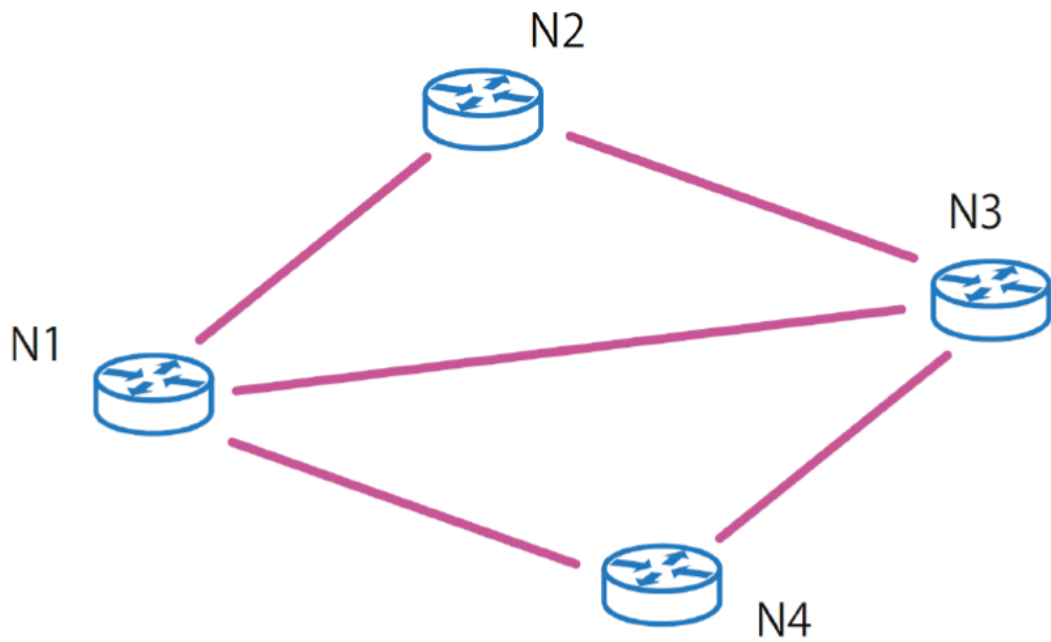


図 5: 仮想網 (VNT)

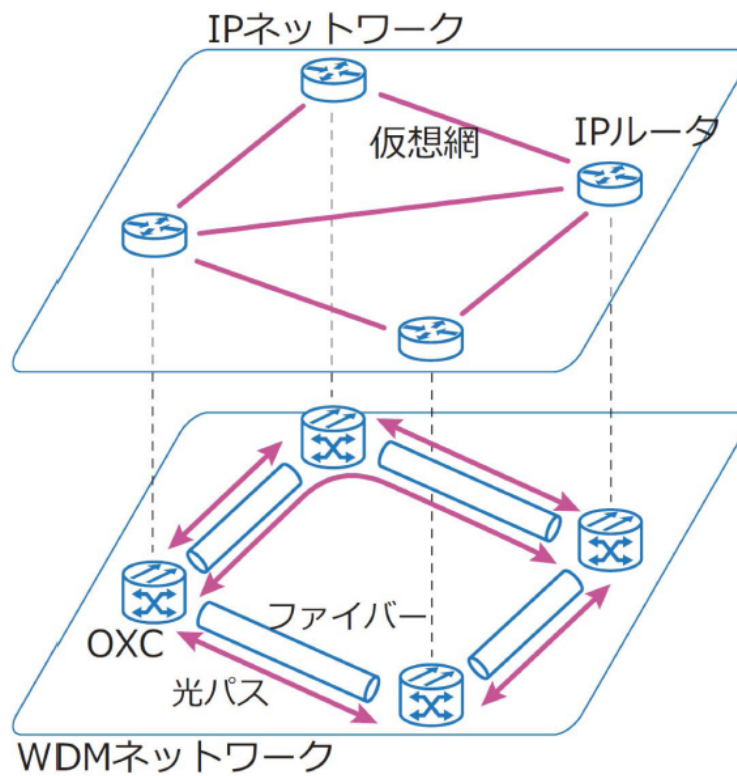


図 6: IP over WDM ネットワーク

2.3 物理設備による制約

本報告で想定する IP over WDM ネットワークを図 6 に、ノード構成を図 7 に示す。ネットワークは WDM で構成される光基盤ネットワーク (以降、WDM ネットワーク) と IP ネットワークの 2 つの層を持ち、WDM ネットワークは OXC と光ファイバからなる。IP ネットワークでは VNT 制御により、WDM ネットワークの OXC を経由する IP ルータ間に光パスが設定され、VNT が構築される。IP ルータ間にはトラヒック需要があり、IP ルータに設置された d_t 個のトランスミッターと d_r 個のレシーバーと光パスを介してトラヒックが転送される。波長数制約を考慮しない場合、 d_t 個のトランスミッターが設置された IP ルータを始点とする光パスは最大 d_t 本まで設定可能であり、 d_r 個のレシーバーが設置された IP ルータを終点とする光パスは最大 d_r 本まで設定可能である。本報告では、同一の IP ルータに設置されたトランスミッター数 d_t とレシーバー数 d_r は等しいものとし、トランスミッターとレシーバーをまとめてポートと表記することとする。トラヒック需要は時々刻々と変化するため、 $d(=d_t=d_r)$ 個のポートを用いてトラヒック需要に適した VNT を構築する必要がある。

しかしトラヒック需要が絶対的に増大した場合、VNT 再構築によってトラヒックを収容することが困難になり得る。そこで、IP ルータや OXC、光ファイバなどのネットワークの物理設備を増強することでトラヒック需要の増大に備えることが必要である。本報告ではネットワーク設備増強として IP ルータにポートを追加することを扱う。ポートを追加することで、ポート数制約による設定可能な光パス数の上限が緩和され、より大きなトラヒック需要を収容することが可能になる。

なお本報告では、IP ルータ間の経路は VNT をトポロジーとして最短経路制御にもとづいて転送されるものとしている。また、1 対の IP ルータ間に設定できる光パスは最大 1 本までとし、波長数制約は考慮しないものとする。

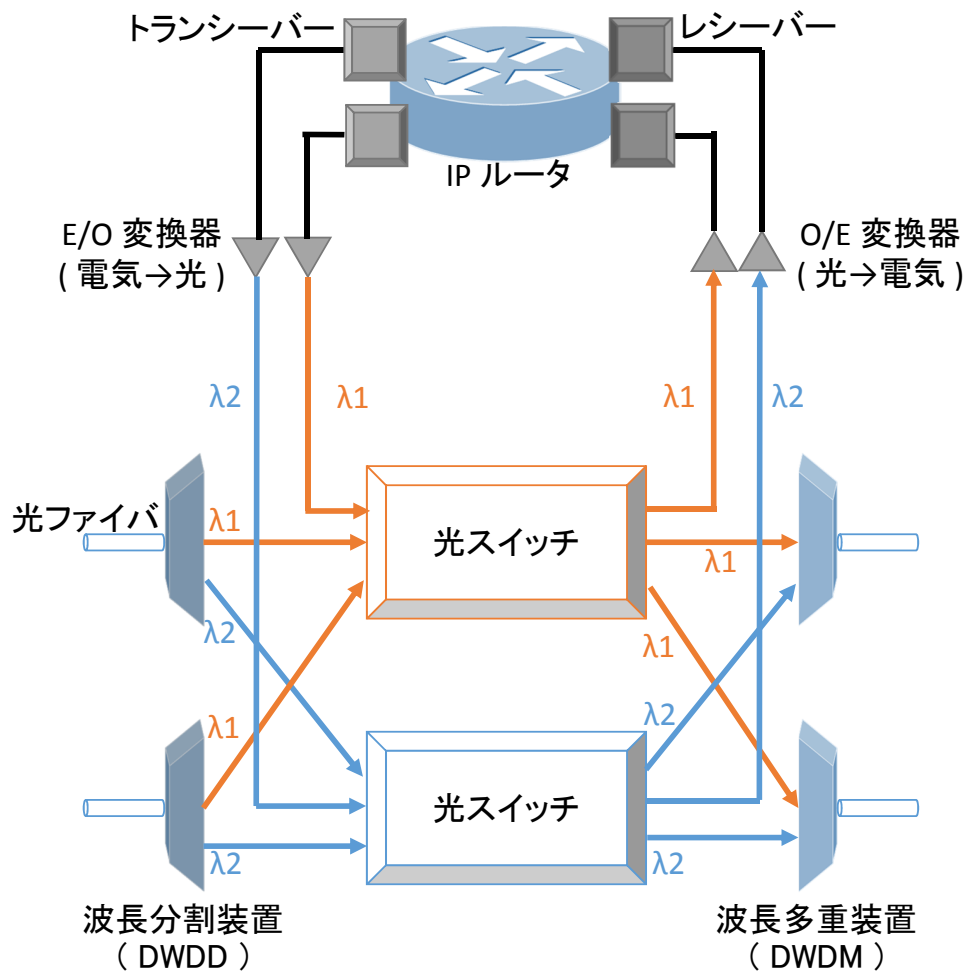


図 7: ノード構成

3 生物の進化モデル

本章では、本報告において着目する生物の進化モデル [27] について説明する。

生物は、頑強性 (robustness) と可塑性 (plasticity) を備えた進化によって環境に適応する。頑強性とは起こりうる外乱に対して自身の状態を保つことにより、正常に機能することができる性質である。生物は、遺伝子発現ダイナミクスの過程における環境変動に対する頑強性、および進化の過程で生じる遺伝子変異に対する頑強性を備える。

一方、可塑性とは環境変動を自身の状態変化に反映させることにより、環境が大きく変動した際に自身の状態を大きく変えることができる性質である。また、進化過程における遺伝子変異により自身の状態を変える性質を進化適応性と呼ぶ。可塑性と進化適応性はともに外部摂動に対する可変性および感受性を表している。

3.1 数理モデル

文献 [27] では、頑強性と可塑性を両立する生物の進化を数理モデルとして定式化している。モデルの対象要素として遺伝子、遺伝子型、表現型、環境適応度が用いられている。それぞれを以下で説明する。

■ **遺伝子 (gene)** M 個の遺伝子 i は、それぞれ遺伝子発現量 x_i ($-1 \leq x_i \leq 1$) を持つ。ある閾値 θ_i に対して $x_i > \theta_i$ となる場合、遺伝子 i が発現する。

■ **入力遺伝子 (input gene)** 遺伝子 $1, 2, \dots, k_{inp}$ は環境からの入力として、遺伝子発現ダイナミクスによらずに発現量が決定される。

■ **目的遺伝子 (target gene)** 遺伝子 $M - k + 1, M - k + 2, \dots, M$ は環境適応度の算出に用いられる。これら k 個の目的遺伝子が発現しているかどうかを環境への適応度を示す指標とする。

■ **遺伝子型 (genotype)** 遺伝子は相互に活性または抑制の作用を施し、その相互関係を表す遺伝子活性抑制ネットワーク J_{ij} を構築する。 J_{ij} は $\{1, -1, 0\}$ を成分とするマトリクスである。 $J_{ij} = 1$ の場合、遺伝子 i は遺伝子 j から発現活性を受ける関係にあり、 $J_{ij} = -1$ の場合、遺伝子 i は遺伝子 j から発現抑制を受ける関係にある。そして、 $J_{ij} = 0$ の場合、遺伝子 i は遺伝子 j から影響を受けない。このように、遺伝子発現ダイナミクスは遺伝子活性抑制ネットワークによって与えられる。

■ **表現型 (phenotype)** 遺伝子型によって与えられた発現ダイナミクスに従って、遺伝子の発現量 \mathbf{x} が決定される。その結果、遺伝子の発現パターンが表現型として得られる。

■環境適応度 (fitness) 環境への適応度は、遺伝子発現パターンを引数とする関数 $F(\text{phenotype})$ によって算出される。

3.1.1 遺伝子発現パターン

遺伝子発現量 x_i のダイナミクスは式 (1) で定式化される。

$$\frac{dx_i}{dt} = \gamma \left\{ f \left(\sum_j^M J_{ij} x_j \right) - x_i \right\} + \sigma \eta_i \quad (1)$$

第1項は遺伝子活性抑制ネットワーク J_{ij} によって制御される確定的振る舞いを表している (γ は定数)。第2項はゆらぎ項で、環境からのノイズを表している。 η_i は平均0の正規分布に従う乱数であり、分散 σ はノイズの強さを表すパラメーターである。

$f(z)$ は式 (2) で定義されるシグモイド関数である。 β はシグモイド関数の閾値近傍の傾きを表すパラメーターである。 δ は小さな正数であり、自発的な遺伝子発現量を表す。

$$f(z) = \frac{1}{1 + \exp(-\beta(z - \theta_i))} + \delta \quad (2)$$

入力遺伝子以外の遺伝子それぞれについて、式 (1) による発現量 x_i の更新を十分な時間繰り返す。その結果、発現量 x_i が閾値 θ_i を超えていれば、遺伝子 i が発現する。逆に、発現量 x_i が閾値 θ_i 以下であれば、遺伝子 i は発現しない。なお閾値 θ_i は、 $[0.1, 0.3]$ の一様分布に従う乱数により遺伝子ごとに個々の値が設定されている。

以上の発現ダイナミクスによって遺伝子発現パターンが決定される。

3.1.2 環境への適応度

システム状態の良さを表す指標として環境適応度を求める。環境適応度はより良い遺伝子型を後世に残すための選択および淘汰による進化の過程で用いられる。環境適応度は遺伝子発現パターンを引数とする関数 $F(\text{phenotype})$ によって与えられる。以降では、目的遺伝子の発現状態を用いて算出するものとする。具体的には、 k 個ある目的遺伝子のうち何個が発現したかによって求める。発現した目的遺伝子の個数を k' としたとき、 $F = k' - k$ と定義する。発現した目的遺伝子の個数が多いほど環境適応度は高い値をとる。

3.1.3 遺伝子活性抑制ネットワークの変異および淘汰

図8に示す遺伝子活性抑制ネットワークの変異および淘汰が世代ごとに行われる。各世代では N 個の個体が存在し、それぞれが異なる遺伝子活性抑制ネットワークを持つ。各個

体に対して、それぞれの遺伝子活性抑制ネットワークによって与えられるダイナミクスに従い、遺伝子発現パターンを決定する。得られた遺伝子発現パターンに従って環境適応度を算出し、より優れた個体の選択および変異、そして劣っている個体の淘汰を行う。ただし、同一の個体であっても式 (1) 中のゆらぎ項の振る舞いの違いによって、発現ダイナミクスの過程が異なりうる。そのため、同一の個体に対して遺伝子発現ダイナミクスによる遺伝子発現パターンの決定、そして環境適応度の算出を L 回行い、求めた環境適応度の平均をとる。

N 個の個体のうち平均環境適応度が優れた上位 N_s 個の個体を選択し、その他を淘汰する。選択された N_s 個の個体は自身の遺伝子活性抑制ネットワーク J_{ij} の成分 1 つをランダムに変化させた変異体をそれぞれ N/N_s 個ずつ生成する。このようにして、優れた個体を元に生成された変異体が計 N 個得られる。これらを次の世代の個体群として引き継ぐ。

3.2 数値例

このモデルの振る舞いをシミュレーションにより再現した。図 9 では、第 30 世代に環境変動を起こし適応性を観測した。なお、遺伝子数 $M = 64$ 、入力遺伝子数 $k_{inp} = 8$ 、目的遺伝子数 $k = 8$ 、 $N = 400$ 、 $N_s = N/4$ 、 $L = 100$ とした。また、式 (1) および式 (2) において、 $\gamma = 0.1$ 、 $\sigma = 0.02$ 、 $\beta = 7$ 、 $\delta = 0.01$ とした。第 30 世代の環境変動は入力遺伝子によって行う。第 0 世代から第 29 世代までは入力遺伝子の発現量を $\{1,1,1,1,0,0,0,0\}$ とし、第 30 世代以降は $\{0,0,0,0,1,1,1,1\}$ に切り替える。

分散 V_{ip} は、同一の遺伝子活性抑制ネットワークにおいて遺伝子発現ダイナミクスの過程を L 回試行した際の環境適応度のばらつきである。このばらつきは、発現ダイナミクスがノイズによって異なる振る舞いをすることから生じる。 V_{ip} が小さい時、システムは環境ノイズに対して頑強性を備える。また、分散 V_g は N 個の遺伝子活性抑制ネットワークそれぞれから得られる平均環境適応度のばらつきである。 V_g が小さい時、システムは遺伝子変異に対して頑強性を備える。

図 9 では、最初の約 5 世代をかけて V_{ip} および V_g が減少していき、環境適応度は上昇していく。第 30 世代に環境変動が起こった直後は環境適応度が低下するが、約 5 世代後には環境適応度が回復している。この時、分散 V_{ip} 、 V_g が一時的に増加しているが、環境変動に応じて分散 V_{ip} が大きくなることは、遺伝子発現パターンに多様性があり、システムが可塑性を有することを表している。また、分散 V_g の増加は、遺伝子変異による効果を大きく反映させていることを意味し、進化適応性を表している。そして、再び両分散が小さくなることで、新しい環境に適応し再び頑強性を備えていることがわかる。また、図 10 にも見られるように、適当なノイズレベルにより適応性を備えるとき $V_{ip} > V_g$ かつ、およそ $V_{ip} \propto V_g$ の関係が成り立つことが文献 [27] で述べられている。

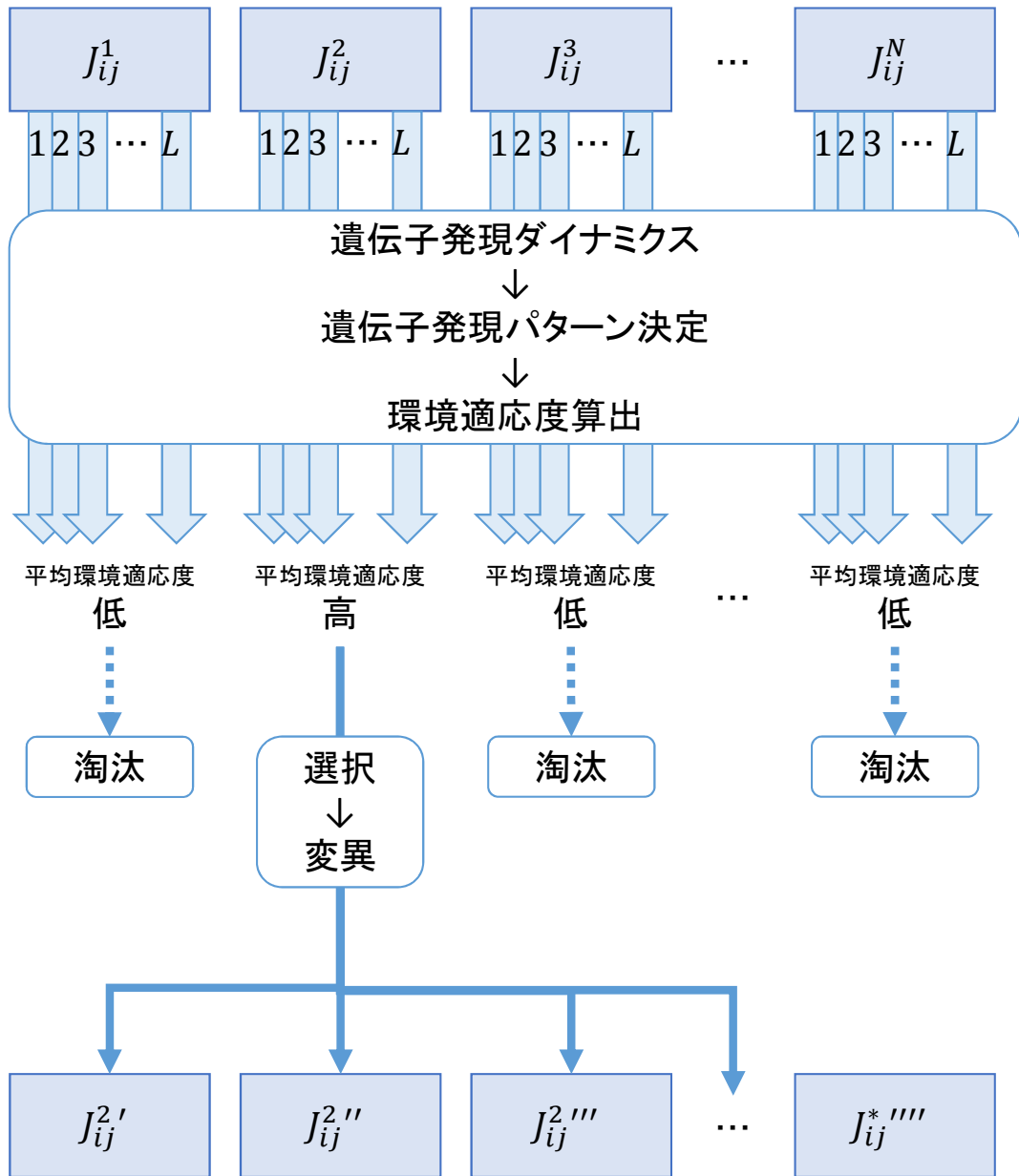


図 8: 遺伝子活性抑制ネットワークの変異および淘汰

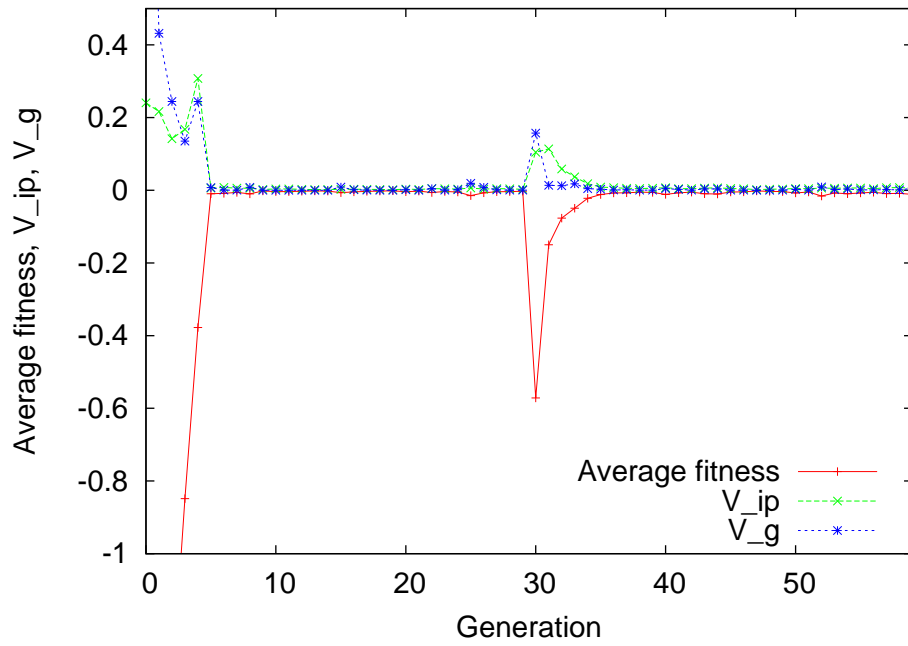


図 9: 平均環境適応度、分散 V_{ip} 、分散 V_g の推移

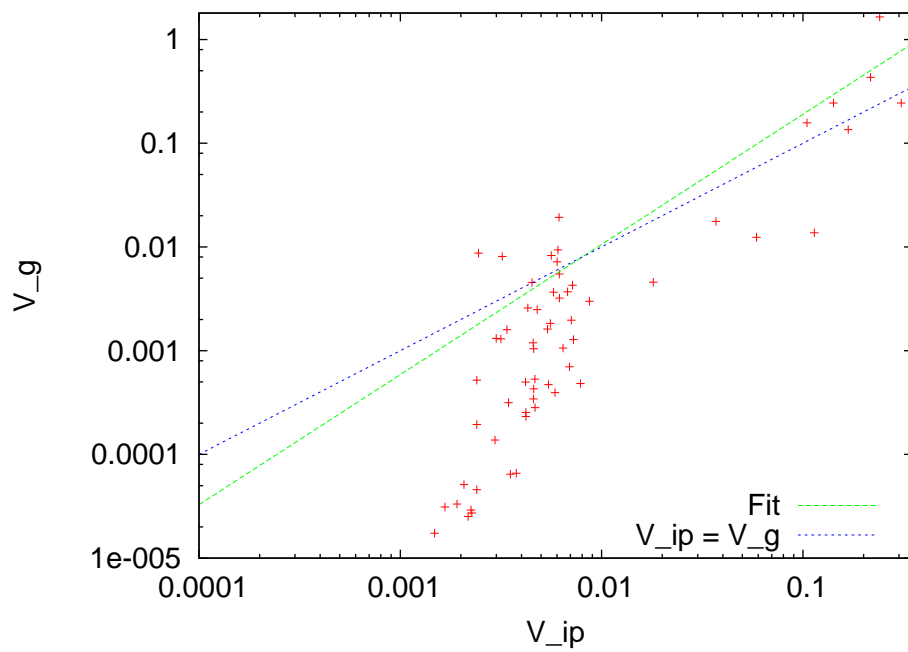


図 10: 分散 V_{ip} 、分散 V_g の分布

4 進化適応性を備えたネットワーク設備増強手法

本報告では、WDM ネットワーク設備増強として、ノードにおける IP ルータにポートを追加することを対象とする。提案する設備増強手法では、ポートを追加するノード集合を決定する。本章では、ポート追加位置の決定アルゴリズムを説明する。

4.1 進化モデルの応用

本節では、3章で述べた生物の進化モデルを WDM ネットワークの設備増強に対応付ける方法を説明する。

4.1.1 遺伝子発現量にもとづく光パス設定

対象とする WDM ネットワークのノード数を n とすると、設定できる光パスの候補数はノード対の組み合わせの総数に等しく、 n^2 個ある。遺伝子 i の発現量 $x_i (i = 1, 2, \dots, n^2)$ を光パス候補 $l_i (i = 1, 2, \dots, n^2)$ とそれぞれ 1 対 1 に対応させる。各世代で、 x_i は式 (1) で表される発現ダイナミクスに従って値を決定する。その結果、 x_i が閾値 θ_i を上回り、遺伝子 i が発現する場合は光パス l_i を設定する。 x_i が閾値 θ_i 以下で遺伝子 i が発現しない場合は光パス l_i を設定しない。

次に、入力遺伝子について説明する。入力遺伝子として遺伝子 $n^2 + 1, n^2 + 2, \dots, n^2 + n$ の計 n 個を与え、それぞれノード N_1, N_2, \dots, N_n に対応させる。ノード N_i にポートが追加されている場合、入力遺伝子の発現量 x_{n^2+i} を 1 に設定し、ポートが追加されていない場合は x_{n^2+i} を 0 に設定する。

4.1.2 環境適応度の設定

文献 [27] においては、生物システムの環境適応度を求める方法として、目的遺伝子の発現状態を用いた適応度の算出を行っている。しかし、本報告においては、WDM ネットワークの環境適応度をネットワークの通信品質にもとづいて算出する。目的遺伝子を用いない代わりに、遺伝子発現量にもとづいて設定された光パスからなる VNT 上に想定トラフィックを収容させた時の最大ルータ利用率を用いる。ルータ利用率とは、各ノードの IP ルータがフォワーディングしているトラフィックの総量をルータの処理能力で割った値である。また、全ノードにおけるルータの処理能力は均一とし、ルータ利用率の最大値、すなわち最大ルータ利用率を環境適応度として用いる。最大ルータ利用率が小さい時はネットワーク全体で負荷が低く抑えられているため、システムの状態が良い。一方、最大ルータ利用率が大きい時

は、あるノードでネットワーク負荷が高くなっており、システムの状態は悪い。すなわち、最大ルータ利用率が小さいほど、WDM ネットワークの環境適応度は良いものとする。

4.1.3 制御行列の変異および淘汰

式 (1) において、遺伝子発現量 x_i のダイナミクスは行列 J_{ij} による制御とゆらぎ項 $\sigma\eta_i$ の振る舞いによって決定される。ここで J_{ij} は $(n^2 + n) \times (n^2 + n)$ の行列であり、 i 行目に着目すると、 $1, 2, \dots, n^2$ 列は遺伝子 $1, 2, \dots, n^2$ から遺伝子 i への活性抑制などの作用を表しており、 $n^2 + 1, n^2 + 2, \dots, n^2 + n$ 列は入力遺伝子からの遺伝子 i への活性抑制などの作用を表している。この活性抑制に従ったダイナミクスとゆらぎによって遺伝子発現量 x_i の値が決定し、光パス l_i を設定するか設定しないかを決定する。

より環境に適した制御行列 J_{ij} を得るために、世代ごとに制御行列 J_{ij} の変異および淘汰を行う。1 世代における制御フローを図 11 に示す。以下にその手順を示す。

1. J_{ij} の成分から一部をランダムに選び、その値を変化させた変異体を N 個作成する。
 - (a) N 個それぞれの変異体に対して以下を L 回試行する。
 - i. 式 (1) に従うダイナミクスにより遺伝子発現量を算出する。それに従い光パスを設定する。
 - ii. 設定された VNT 上で、トラヒック需要を収容させた時の最大ルータ利用率を算出し、環境適応度とする。
 - (b) N 個の変異体につき L 回試行して得られた環境適応度の平均値を求める。
2. もっとも平均環境適応度が良い値を示した変異体を次の世代に引き継ぐ J_{ij} とする。

4.2 ポート追加位置決定手法

4.1 節で述べた進化モデルの応用を用いて、進化適応性を備えた WDM ネットワークを構築するためのポート追加を行う。ポート追加位置を決定する手法を説明する。

4.2.1 ADD アルゴリズム

ポートを追加するノード集合を求める際に、ノード集合の全組合せに対する性能を試算すると組合せ数が爆発的に増大する。そこで本報告では、ヒューリスティックな手法として ADD アルゴリズム [28] を用いる。ADD アルゴリズムでは、ポートを追加する候補となるノードそれぞれに対して暫定的にポートを追加した場合のシステムの適応性を試算し、最も

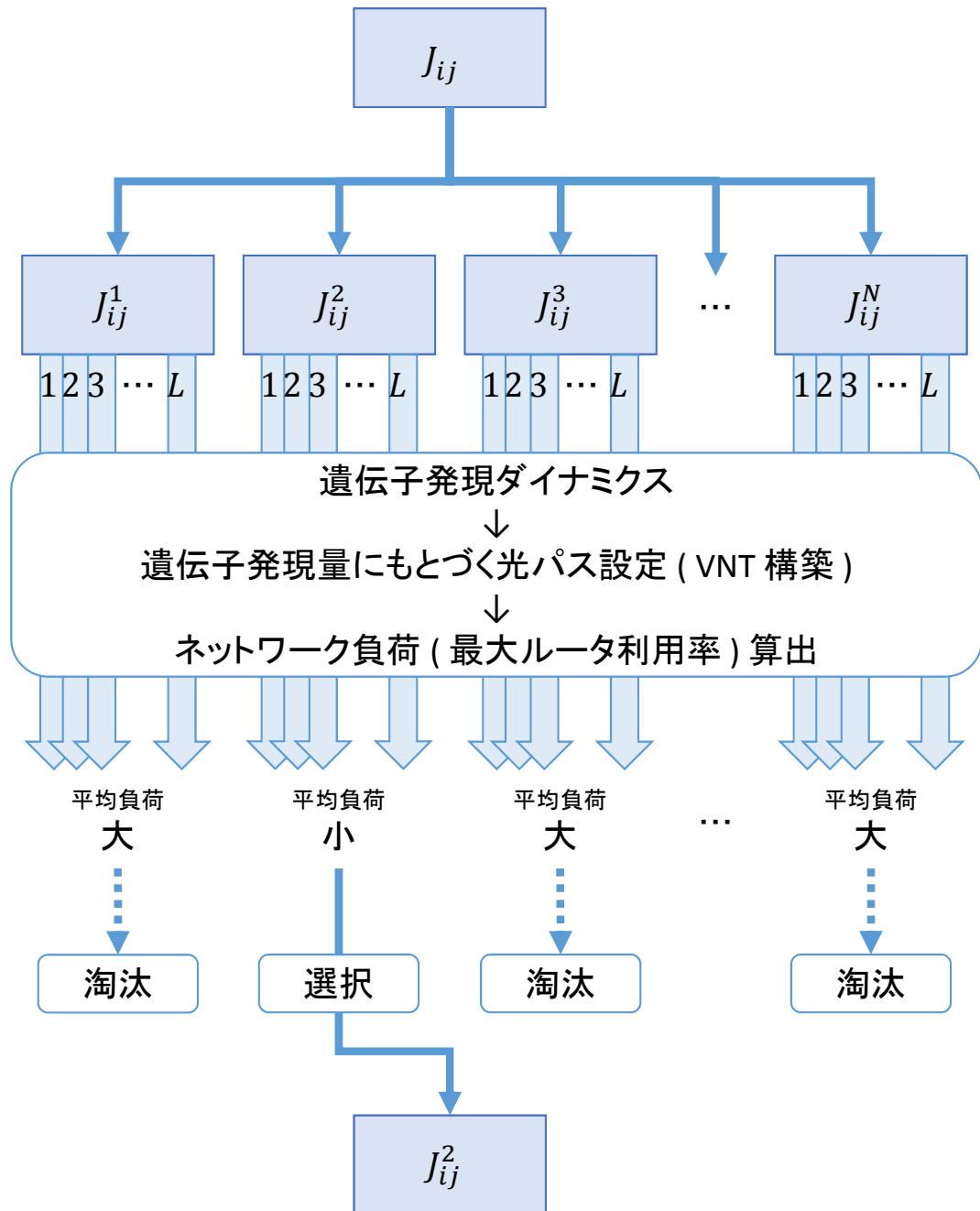


図 11: 制御行列の変異および淘汰

適応性の高いポート追加候補1箇所を確定する。これを既定のポート追加数に達するまで繰り返すことで、ポートを追加するノード集合を求める。図12に示した処理を規定のポート追加数だけ繰り返すことによって、ポート追加位置を決定する。以下にその手順を示す。

1. ポートを追加する候補ノードそれぞれに対して以下を行う。
 - (a) そのノードにポートを暫定的に追加し、複数の想定トラヒック変動に対して以下を行い、環境適応度の推移を求める。例として、図13にノード $N1$ にポートを暫定的に追加した時の処理を示す。
 - i. 図11に示した制御行列 J_{ij} の変異および淘汰を複数世代繰り返す。
 - ii. ある世代で想定トラヒック変動を与える。
 - iii. 再び、制御行列 J_{ij} の変異および淘汰を複数世代繰り返す。
2. 適応性判定アルゴリズムにより、ポートを追加するノード1箇所を確定する。1.へ。

4.2.2 適応性判定アルゴリズム

暫定的にポートを追加した WDM ネットワークは、そのポート追加位置によって適応性が異なる。適応性の優劣の判定方法を述べる。

求めた環境適応度の推移をもとに、適応性の判定を行う。システムが進化適応性を備えている場合、世代が進むに従って環境適応度が良くなっていき、想定トラヒック変動を与えた直後に環境適応度が一時的に悪くなるものの、数世代後には再び環境適応度が回復するという推移が期待される。また、想定トラヒック変動を与えた際に環境適応度の分散 V_{ip} および V_g も併せて増加し、新たなトラヒック需要に適応するに従って、両分散が再び減少していくことが期待される。より多くの想定トラヒック変動に対して、このように環境適応度が推移する様子が観測されるポート追加位置は適応性を備えていると判断できる。

ただし、全世代に渡って環境適応度が推移する様子を観測し、理想通りの挙動をしているかどうかを判定することは困難である。さらに、どのノードにポート追加を行った場合が最も理想に近いかという優劣を判定することも困難である。そこで、なんらかの比較が容易な判定基準を設ける必要がある。例えば、以下の判定基準が考えられる。

- 想定トラヒック変動を与える直前の環境適応度に比べて一定の程度まで環境適応度が回復するのに要した世代数を尺度とする。回復に要した世代数が小さいほど環境変動に素早く適応でき、優れている。

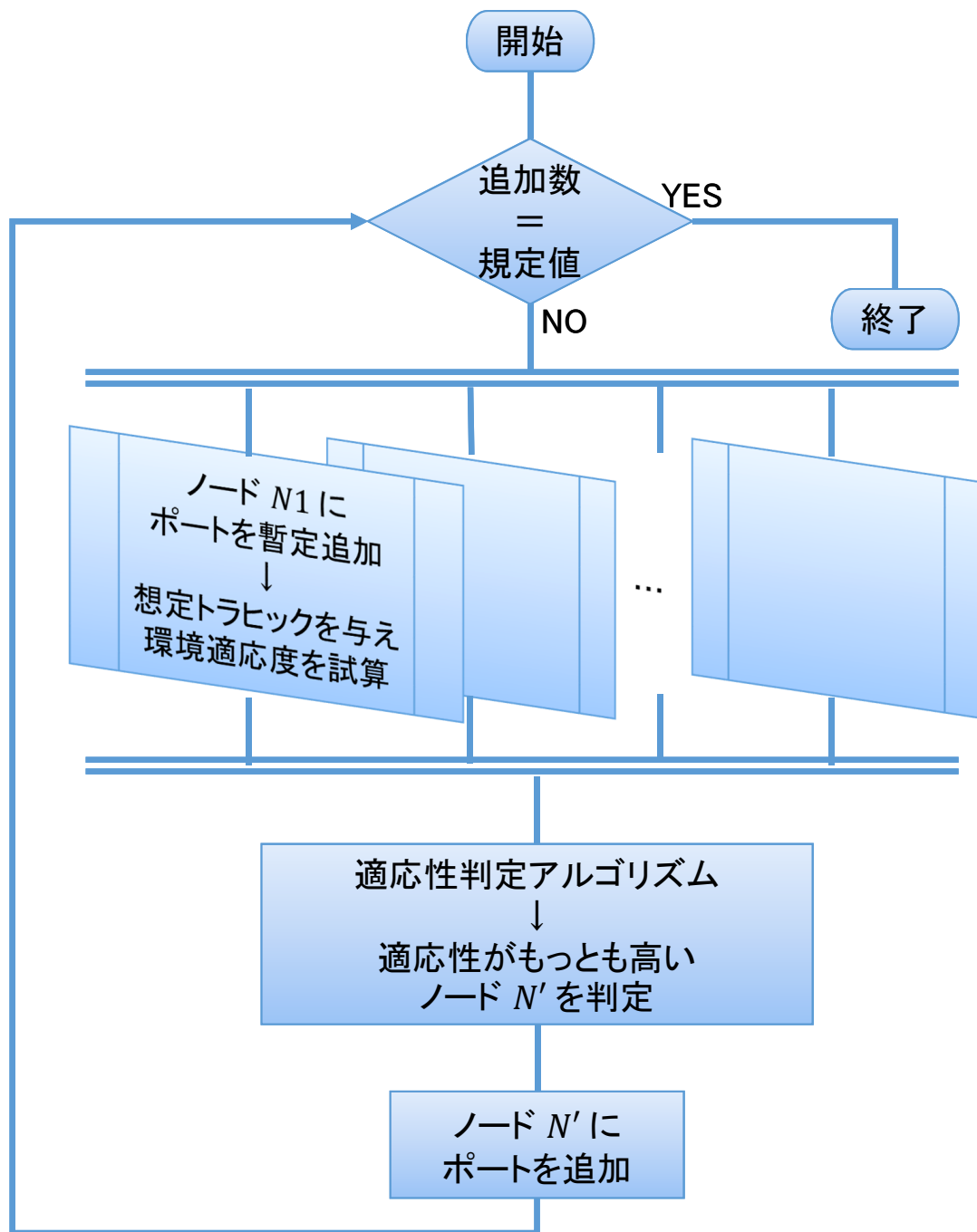


図 12: ADD アルゴリズムによるポート追加位置決定手法

- 想定トラフィック変動を起こした世代の分散 V_{ip} の値を尺度とする。分散が大きいほど高い可塑性を示し、適応性の観点でも優れている。
- 想定トラフィック変動を起こした世代から一定世代後の環境適応度を尺度とする。新たな環境に対してより良い適応度を示すほど優れている。

しかし、これらの基準がすべてではなく、優劣判定の尺度となりうる指標は他にも数多く存在する。また、より多くの想定トラフィック変動に対して尺度が良い値を示すポート追加が望まれるが、その判断の仕方も複数考えられる。例えば、以下の方法が考えられる。

- 尺度の平均値、最頻値、中央値、最悪値、最良値などを用いる。
- 尺度の目標値としてある閾値を設ける。その閾値条件を満たす想定トラフィック変動のパターン数を用いる。

以上のように、適応性判定アルゴリズムには様々な方式が考えられ、状況により用いる判定アルゴリズムを選択する必要がある。

5 性能評価

本章では、まず4章で述べたネットワーク設備増強手法によりポート追加位置を求める。そして、ポート数が増強されたWDMネットワーク上で、アトラクター選択にもとづくVNT制御 [20] のトラヒック変動に対する適応性をシミュレーションにより評価する。

5.1 ポート追加位置の決定

本節では、提案手法によるポート追加位置と比較手法によるポート追加位置を求める。

5.1.1 評価環境

まず、評価に用いる物理トポロジーを説明する。対象とするネットワークとして、日本の地理情報が考慮されたJPNM(ジャパンフォトニックネットワークモデル)を用いる。ここでは、12ノードで構成されているJPN12モデルを用いる。JPN12モデルの物理トポロジーとノード番号を図14に示す。各ノードはOXCとIPルータで構成されており、ノード間はOXCを端点として光ファイバで接続されている。IPルータにポートを追加することによって、そのノードを端点として設定できる光パス数の上限が緩和される。初期状態での各ノードのポート数は、物理トポロジーの次数に2を加えた値とする。ポート追加位置決定手法により12ノード中の3ノードを選択し各ノードに4個ずつ、計12個のポートを追加する。

次に、評価に用いるトラヒック需要モデルを説明する。まず、トラヒック需要の初期値設定について述べる。都市人口を用いたグラビティモデルの分布に従って各ノード間のトラヒック需要の初期値を設定する。ノード*i*からノード*j*への初期トラヒック需要 Δ_0^{ij} を式(3)により定義する。ただしノード*i*に対応する都市の人口を P_i とし、定数*G*の値は 1.46×10^{-14} とする。JPN12モデルにおける各ノードに対応する都市人口を表1に示す。

$$\Delta_0^{ij} = G \times P_i \times P_j \quad (3)$$

次に、トラヒック需要の変動モデルについて述べる。トラヒック需要の変動モデルとして、式(4)により定義される幾何ブラウン運動モデル [29] を用いる。このモデルでは、各ノード間のトラヒック需要がそれぞれ独立に変動する。

$$\Delta_t = \Delta_0 \cdot \exp\left(\left(g - \frac{1}{2}v^2\right)t + v \cdot W_t\right) \quad (4)$$

Δ_t はタイムステップ t のトラヒック需要、 W_t は平均 W_{t-1} 、分散 1 の正規分布に従う乱数である。パラメーター g はトラヒック需要の平均的な増加度合いを表し、パラメーター v はトラヒック需要のランダム変動の大きさを表す。

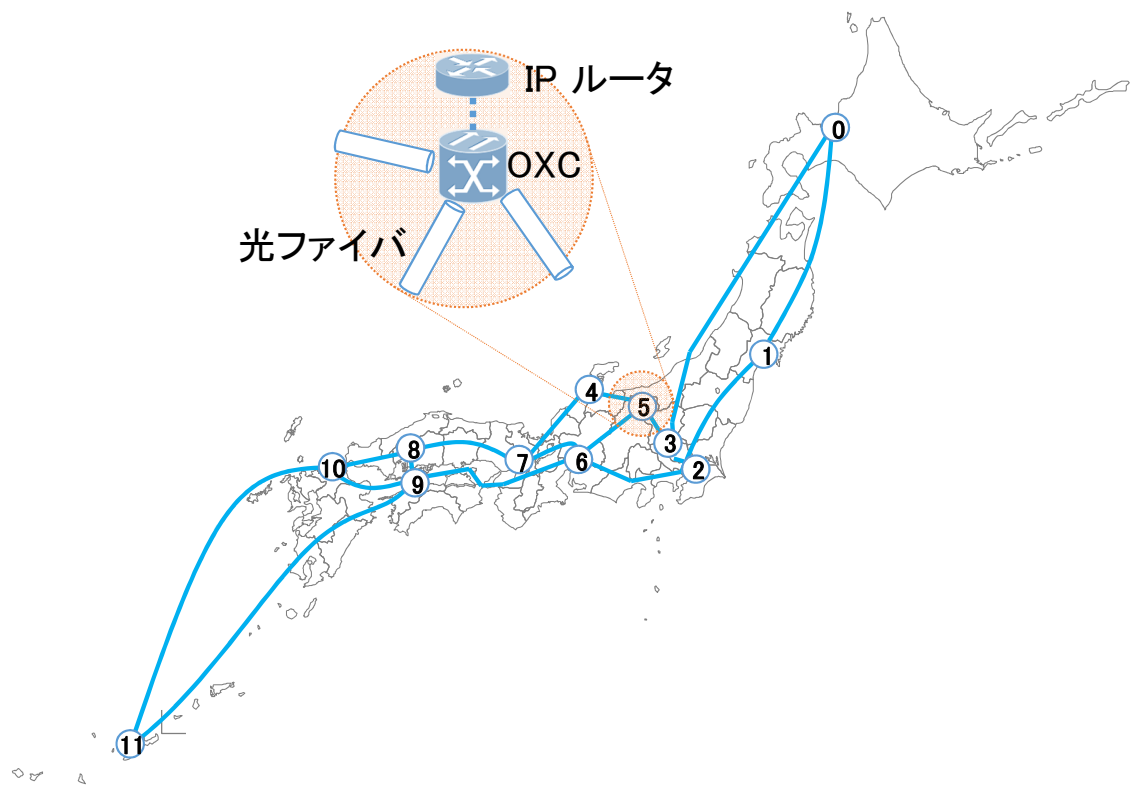


図 14: JPN12 モデル

表 1: JPN12 モデルの都市人口

No.	都市名	都市人口
ノード 0	札幌	5506419
ノード 1	仙台	9335636
ノード 2	東京	24967992
ノード 3	八王子	18499168
ノード 4	金沢	3069349
ノード 5	長野	4526899
ノード 6	名古屋	15111223
ノード 7	大阪	20903173
ノード 8	広島	7563428
ノード 9	松山	3977282
ノード 10	博多	13203965
ノード 11	那覇	1392818

5.1.2 提案手法によるポート追加位置の決定

5.1.1 項で述べた評価環境において、提案手法によるネットワーク設備増強を行う。ここでは、制御行列 J_{ij} の変異および淘汰を計 30 世代行うものとし、途中の第 15 世代目で想定トラヒック変動を与える。また、適応性判定アルゴリズムとして、より多くの想定トラヒック変動に対して最後の第 29 世代における環境適応度が良い場合に、そのポート追加位置が優れているとする方針を用いる。以下では、想定トラヒック変動および適応性判定アルゴリズムの詳細を説明する。

想定トラヒックは、第 0 世代から第 14 世代までは人口のグラビティモデルに従って得られる Δ_0 とし、第 15 世代においてトラヒックが変動するものとする。具体的には式 (4) に従って Δ_{15} に変動させる。それ以降はトラヒックに変動は生じないものとし、最後の第 29 世代まで Δ_{15} とする。式 (4) 中のパラメーターを $g = \{0.005\}$, $v = \{0.01, 0.02, 0.03, 0.04\}$ のように変化させ、それぞれのパラメーターセットにつき想定トラヒックを 8 パターンずつ生成する。すなわち、計 32 パターンのトラヒック変動を生成する。暫定的にポートを追加した後、32 パターンのトラヒック変動パターンに対して 30 世代分の進化過程をシミュレートし、環境適応度の推移を求める。

次に、適応性判定アルゴリズムを説明する。まず、32 パターンの想定トラヒックのうち、ある 1 つの想定トラヒックを例に適応性の試算方法を説明する。ポートを暫定的に追加した WDM ネットワーク上で、制御行列 J_{ij} の変異および淘汰による平均環境適応度の推移を図

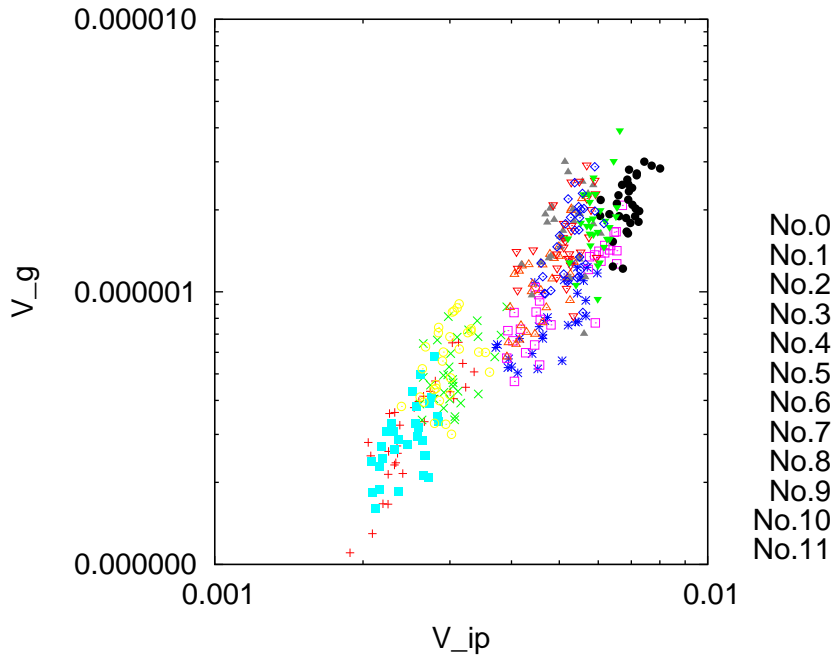


図 16: ポート追加後の WDM ネットワーク上における分散 V_{ip} 、分散 V_g の分布

グラムを見比べて判定するのではなく、機械的に優劣を判定できるように第 29 世代の平均環境適応度の中央値がもっとも小さい WDM ネットワークがもっとも適応性が高いとする。表 2 に第 29 世代の平均環境適応度の中央値を示す。こちらからもノード 1 にポートを追加した場合が最も適応性が高いと判断される。そして、そのノードを最良のポート追加箇所とみなし、そのノードにポート追加を行い、ADD アルゴリズムの次ループへ移る。

5.1.3 比較手法によるポート追加位置の決定

提案手法が環境変動に対して適応性を備えているかを評価するために、比較評価を行う。比較手法として、現在のトラフィック需要に適した VNT を構築できるようにポートを追加する手法を説明する。

比較手法では、I-MLTDA (Increasing Multi-hop Logical Topology Design Algorithm)[30] を取り入れた ADD アルゴリズムによってポート追加位置を決定する。I-MLTDA とはトラフィック需要とホップ数の情報を用いて、最適な VNT を構築するヒューリスティックな VNT 制御手法である。I-MLTDA では、 $\Delta^{sd} \times (H^{sd} - 1)$ が最大となるノード s, d 間から優先的に光パスを設定する。ただし、 Δ^{sd} はノード s からノード d へのトラフィック需要、 H^{sd} はノード s からノード d へパケットを送る際に利用する最小ホップ数とする。比較手法によりポートを追加した WDM ネットワーク上では、ポート追加直後には、トラフィック需要に対して

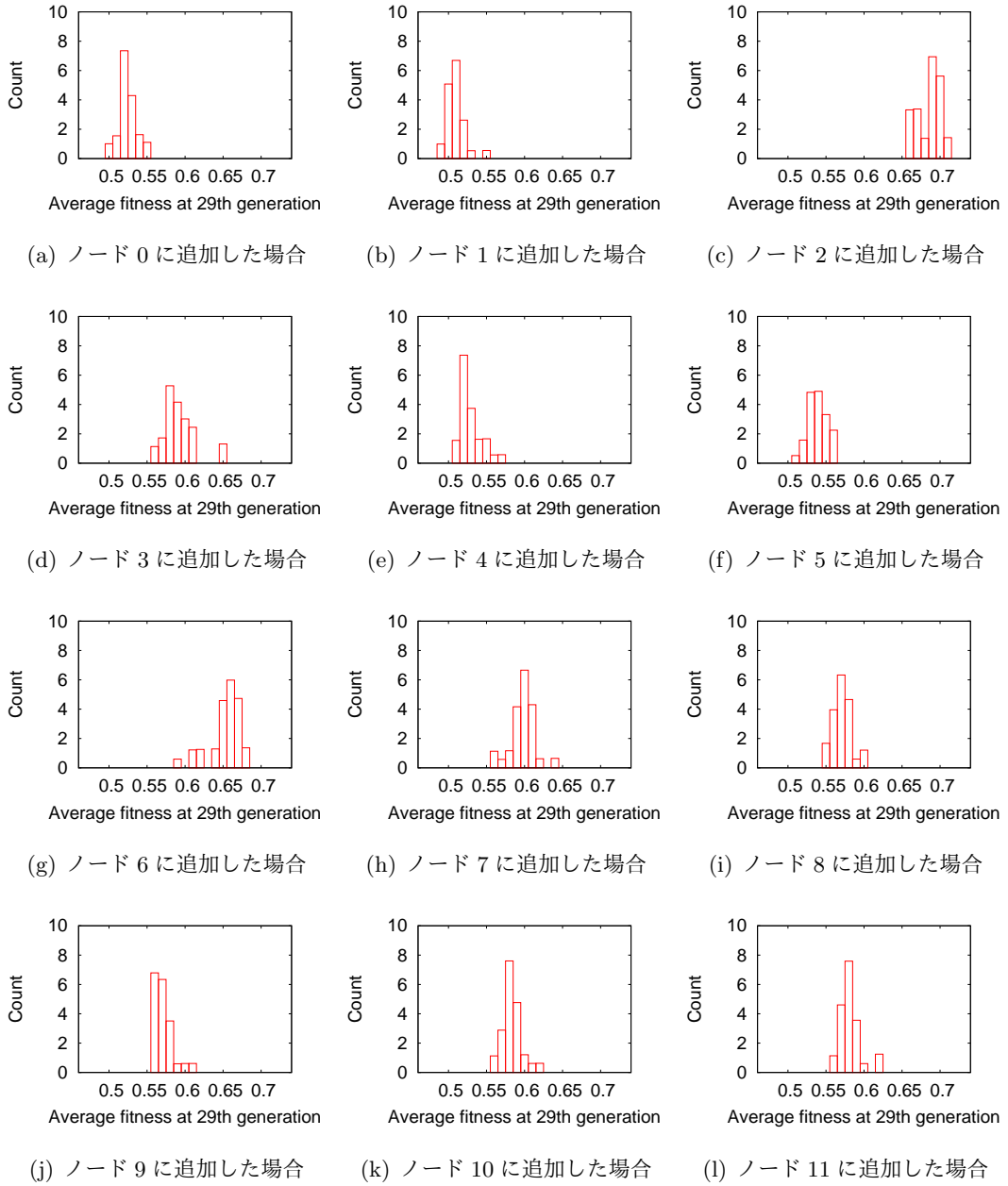


図 17: 想定トラフィック変動パターンの分布

表 2: ポートを追加したノードごとの第 29 世代における平均環境適応度

追加したノード	平均環境適応度の中央値
ノード 0	0.526868267161411
ノード 1	0.511616223009336
ノード 2	0.693410526833726
ノード 3	0.592030623263458
ノード 4	0.529537216633037
ノード 5	0.542768871041793
ノード 6	0.662187708995820
ノード 7	0.603003076853726
ノード 8	0.575329133904207
ノード 9	0.575450533551682
ノード 10	0.587357027538891
ノード 11	0.583841595064546

より適した VNT が設定されると期待される。

以下に示す ADD アルゴリズムを既定のポート追加数に達するまで行い、ポート追加位置を決定する。

1. ポートを追加する候補となるノードそれぞれに対して以下を行う。
 - (a) そのノードにポートを暫定的に追加し、初期トラヒック需要 Δ_0^{ij} に対して I-MLTDA による VNT 設定を行い最大ルータ利用率を算出する。
2. 算出された最大ルータ利用率が最も小さい場合に適応性が最良とみなし、その候補ノードにポート追加を行う。1. へ。

5.2 仮想網制御性能の比較評価

本節では、提案手法によるポート追加を行った WDM ネットワークと比較手法によるポート追加を行った WDM ネットワークにおけるアトラクター選択にもとづく VNT 制御の適応性を比較評価する。

表 3: トラヒック変動のパラメーター

パラメーターセット	g	v
1	0.005	0.01
2	0.005	0.02
3	0.005	0.03
4	0.005	0.04
5	0.005	0.05
6	0.005	0.06

5.2.1 評価環境

評価に用いる環境を説明する。物理トポロジーは 5.1.1 項で述べたものと同じとし、提案手法によるポート追加位置はノード $\{1, 5, 0\}$ 、比較手法によるポート追加位置はノード $\{3, 6, 7\}$ と求まった。トラヒック変動パターンとして、表 3 に示したパラメーターセットそれぞれに対して式 (4) に従うトラヒック変動を 1000 パターンずつ生成する。なお、ここではトラヒック Δ_t は 1 タイムステップごとに変動するものとする。これらのトラヒック変動パターンに対して、提案手法と比較手法によるポート追加を行った WDM ネットワーク上でアトラクター選択にもとづく VNT 制御を行い、その性能を比較評価する。

次に、アトラクター選択にもとづく VNT 制御手法 [20] を説明する。アトラクター選択にもとづく VNT 制御手法では、式 (5) に表されるダイナミクスにより求まる遺伝子発現量 x_i の値により光パス l_i の設定状態を決定する。システムの状態 \mathbf{x} を WDM ネットワークにおける VNT の設定状態とし、システムのコンディションの良さを表す活性度 α として、IP ネットワークの通信品質を用いる。VNT の設定状態はアトラクターを持つ制御構造とゆらぎの 2 つの振る舞いによって駆動される。図 18 に示すように、IP ネットワークの通信品質を示すフィードバック値によってそれら 2 つの振る舞いを制御する。

$$\frac{dx_i}{dt} = \alpha \left\{ \varsigma \left(\sum_j W_{ij} x_j \right) - x_i \right\} + \eta \quad (5)$$

第 1 項の $\varsigma \left(\sum_j W_{ij} x_j \right) - x_i$ は、アトラクターを持つ制御構造であり、関数 $\varsigma(z)$ は式 (6) で定義されるシグモイド関数である (μ はパラメーター)。このアトラクターを持つ制御構造は、遺伝子の相互作用によって決まり、その相互作用は制御行列 W_{ij} で表される。第 2 項の η はゆらぎ項である。閾値を 0 とし、 $x_i \geq 0$ のときは光パス l_i を設定し、光パス $x_i < 0$ のときは設定しないように VNT を構築する。なお、 x_i の値域は $[-1, 1]$ とする。

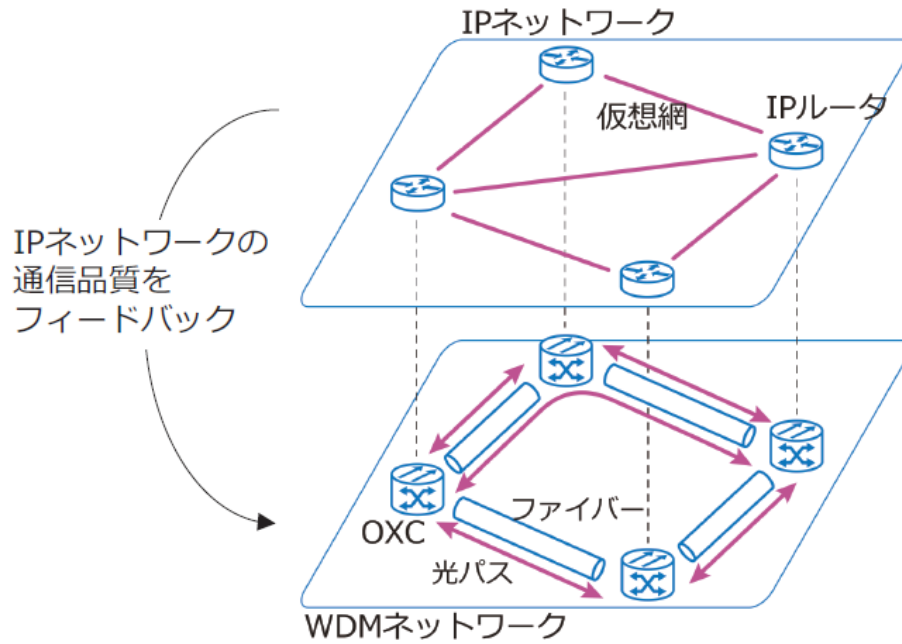


図 18: アトラクター選択の VNT 制御への適用

$$\varsigma(z) = \tanh\left(\frac{\mu}{2}z\right) \quad (6)$$

IP ネットワークの通信品質を表す指標として、文献 [20] では最大リンク利用率が用いられている。しかし、ポート追加位置決定手法を評価する際はポート数増強による影響を反映させやすくするため、最大ルータ利用率を指標として用いる。すなわち本評価では、活性度 α を最大ルータ利用率 L_{max} を用いて式 (7) のように定義する。

$$\alpha = \frac{\gamma}{1 + \exp(\delta \cdot (L_{max} - \theta))} \quad (7)$$

γ は定数であり、 α の値域は $[0, \gamma]$ となる。 θ 、 δ は定数であり、 α は θ 付近で急激に 0 に近づき、そのときの傾きはパラメーターによって定まる。最大ルータ利用率 L_{max} が θ より大きい場合は、IP ネットワークの通信品質が悪いとみなし、 α を急激に 0 に近づけ、ゆらぎによりシステムは新たなアトラクターを探索する。一方、 L_{max} が θ よりも小さい場合は、IP ネットワークの性能が良いとみなし、アトラクターに収束するように制御を行う。ここでは、 $\gamma = 1$ 、 $\theta = 0.5$ 、 $\delta = 50$ とし、その場合の活性度は図 19 のように定義される。

アトラクター選択にもとづく VNT 制御は以下の手順で行う。

1. 定期的に IP ネットワークのルータ利用率を計測する。

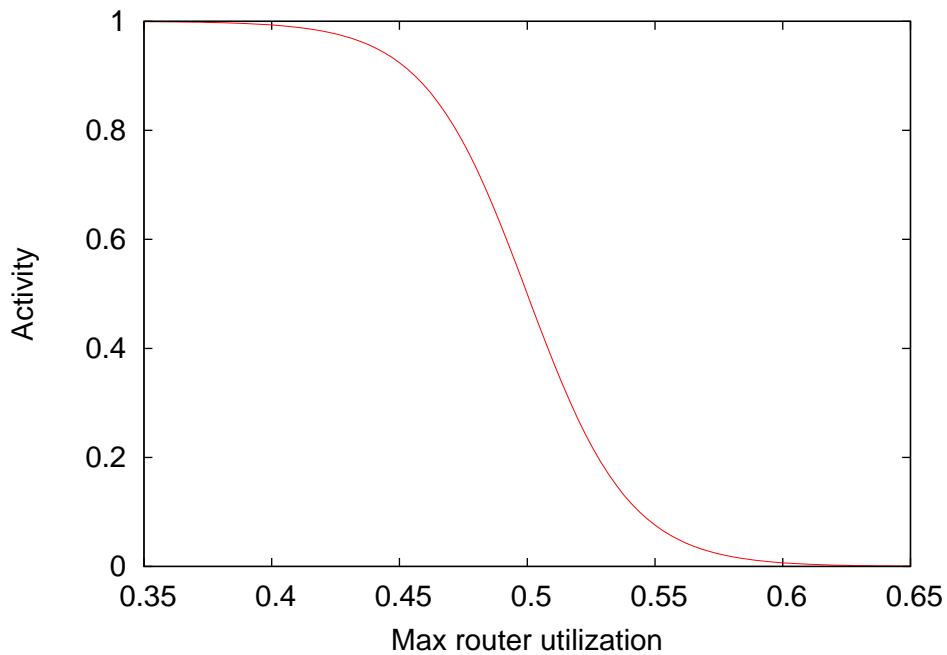


図 19: 最大ルータ利用率と活性度の関係

2. 計測したルータ利用率から活性度を決定する。アトラクター選択にもとづく VNT 制御手法ではこの活性度により IP ネットワークの通信品質を判断する。
3. 活性度をもとに、アトラクター選択の確定的な振る舞いとゆらぎによる制御を決定し、システムの状態を制御する。
4. 決定されたシステムの状態をもとに VNT を構築する。
5. IP ネットワークではその VNT を使いトラヒックの伝送を行う。VNT の構造やトラヒック需要の変動によりルータ利用率が変化する。
6. 再びルータ利用率を計測し、制御を行う。

5.2.2 評価指標

評価指標として、VNT 制御有効期間を用いる。VNT 制御有効期間とは、タイムステップ 0 で開始したアトラクター選択にもとづく VNT 制御において活性度が著しく低下し、最大ルータ利用率を低く抑えることが不能となるまでのタイムステップ数とする。ただし、1 タイムステップとは幾何ブラウン運動モデルに従うトラヒック変動の 1 周期を表すものとする。

る。アトラクター選択にもとづく VNT 制御では、VNT の再構築を 1 タイムステップにつき最大 400 回行う。最大ルータ利用率が 0.5 以下に抑えられているときは活性度が 0.5 を上回り、VNT の設定状態が安定していると判断する。VNT の再構築を 10 回行って VNT 設定状態が安定していれば、その VNT 設定状態に収束したとみなし、VNT 再構築を打ち切る。逆に、400 回の VNT 再構築を行っても最大ルータ利用率を 0.5 以下に抑えられる VNT の設定状態に収束できない場合もある。しかし、図 19 に見られるように、最大ルータ利用率が 0.5 の近傍である場合は、最大ルータ利用率が 0.5 を上回っていたとしても活性度は 0 に漸近せず、制御行列による確定的振る舞いによる効果が残される。また、最大ルータ利用率が 0.5 の近傍であれば、許容されるネットワーク負荷であるとみなす。ここでは、閾値として活性度が約 0.1 となる最大ルータ利用率の値 0.544 を用い、5 タイムステップ連続で最大ルータ利用率が閾値 0.544 を超えた時、VNT 制御が機能しなくなったと判断する。VNT 制御有効期間は、増大するトラフィックに対して VNT 制御が機能しなくなるまでの時間を表している。図 20 のように、トラフィック増大に対してポート追加を行った後、より長い期間最大ルータ利用率を閾値以下に抑えられた場合に、VNT 制御有効期間は大きくなる。図 20 ではポート追加位置 A よりもポート追加位置 B にポートを追加した場合の方が VNT 制御有効期間は大きく、より適応性の高い WDM ネットワークが構築されたとみなす。

5.2.3 評価結果

はじめに、例としてあるトラフィック変動に対して VNT 制御を行った際の最大ルータ利用率の推移を図 21 に示す。図 21(a) および図 21(b) は、パラメータセット 6 ($g=0.005$, $v=0.06$) から得られる乱数列の異なる 2 パターンのトラフィック変動に対してアトラクター選択にもとづく VNT 制御を行った際の最大ルータ利用率の時間推移を示している。ただし、それぞれのトラフィック変動をパターン A、パターン B とする。横軸はタイムステップを表しており、1 タイムステップごとに最大で 400 回の VNT 再構築を行った時の最大ルータ利用率を縦軸にプロットしている。同じパラメータセットであっても、トラフィック需要の変動パターンは同一ではなく、VNT 制御による適応度合いも異なる。

まず、図 21(a) について説明する。制御開始時 (タイムステップ 0) では、提案手法および比較手法の両方が最大ルータ利用率を極めて低く抑えられていることがわかる。比較手法では、既知のトラフィック需要に対して準最適な VNT を与える I-MLTDA にもとづきポート追加を行った。比較手法によりポートを追加した場合、初期トラフィック需要 Δ_0 に対して I-MLTDA によって算出された VNT を設定したとすると、最大ルータ利用率は約 0.468 となることが比較手法を実行する過程でわかっている。しかし、アトラクター選択にもとづく VNT 制御を実行したところ最大ルータ利用率は約 0.395 となっており、より最大ルータ利用

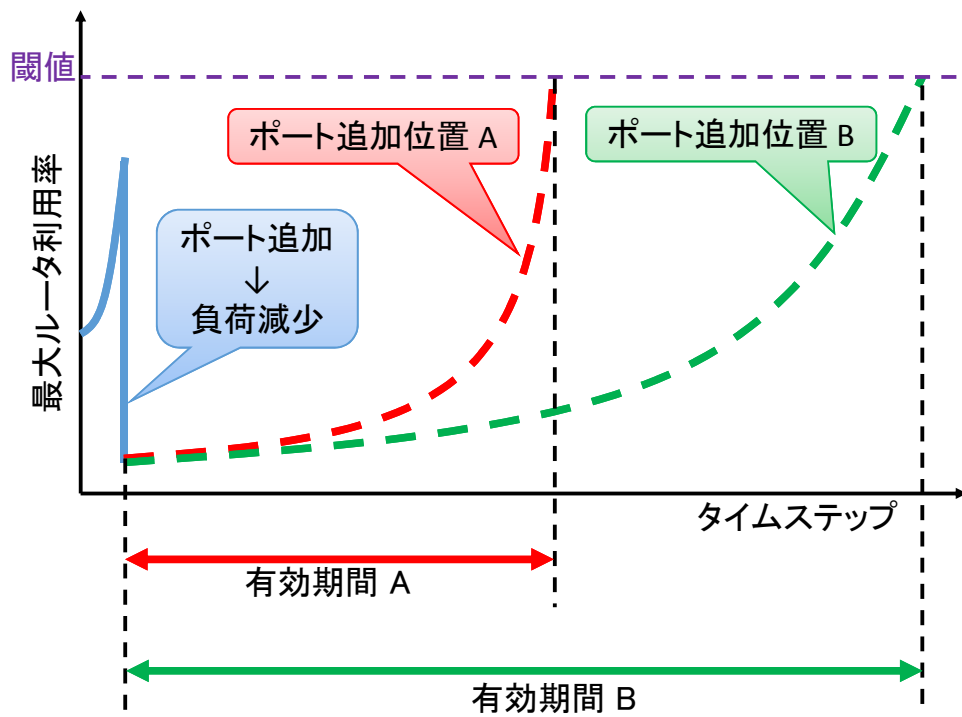


図 20: 評価指標の概要

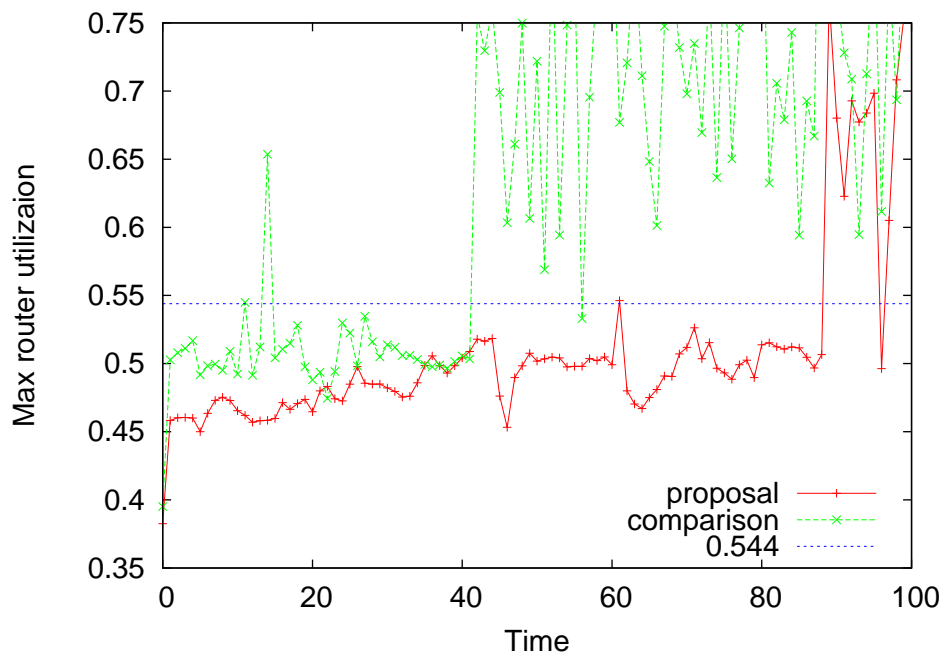
率を低く抑える VNT が発見され、I-MLTDA により算出した VNT より良い VNT が構築されていることがわかる。比較手法によりポート追加を行った場合、タイムステップ 15 あたりで最大ルータ利用率が閾値 0.544 を一時的に超えているが、次のタイムステップでは再び良好なアトラクターが発見され、最大ルータ利用率を閾値以下に抑えられている。そして、およそタイムステップ 40 まで最大ルータ利用率を閾値以下に抑えられている。これは、アトラクター選択にもとづく VNT 制御が機能しており、トラヒック変動に適した VNT を構築できていることを示している。しかし、それ以降では最大ルータ利用率が閾値を上回り、大きく振動している。これは、最大ルータ利用率が大きくなり活性度が 0 に漸近し、ゆらぎによる確率的振る舞いが制御システムを支配することで新たな VNT の探索を行うが、最大ルータ利用率を低く抑える VNT を発見できず、結果としてランダムに近い VNT が構築されているためであり、アトラクター選択にもとづく VNT 制御によるトラヒックの収容が機能しなくなったことを示している。一方、提案手法によりポート追加を行った場合、タイムステップ 60 あたりで一時的に閾値を上回っているが、およそタイムステップ 90 まで最大ルータ利用率を閾値以下に抑えられている。タイムステップ 90 以降では最大ルータ利用率が振動し、VNT 制御が機能しなくなっている。評価指標である VNT 制御有効期間は、一時

的に閾値を上回る場合を除くために5回連続で閾値を上回ったタイムステップとしている。提案手法と比較手法をVNT制御有効期間の観点から比較すると、提案手法ではおよそ95、比較手法ではおよそ45となっており、提案手法によりポート追加を行った場合の方がより長い期間にわたりトラフィック変動に適応できていることがわかる。

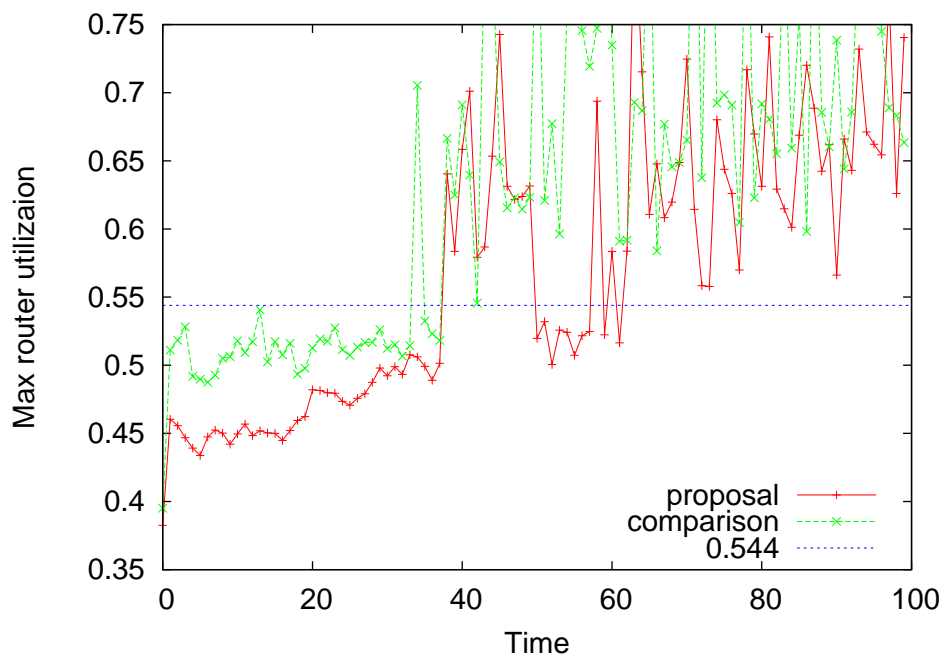
次に、図21(b)について説明する。提案手法によりポート追加を行った場合も、比較手法によりポート追加を行った場合も、およそタイムステップ40までは最大ルータ利用率を閾値以下に抑えられているが、およそタイムステップ40を境にVNT制御が機能しなくなっている。このトラフィック変動パターンに対しては、提案手法によるポート追加と比較手法によるポート追加に大きな差がないことを示している。

次に、様々なトラフィック変動パターンに対する有効性を説明する。パラメーターセットごとに、1000パターンのトラフィック変動に対するVNT制御有効期間の分布を求める。図22、図23、…、図27にVNT制御有効期間の分布を示す。1つのトラフィック変動パターンに対して、提案手法によるポート追加を行った場合のVNT制御有効期間を横軸、比較手法によるポート追加を行った場合のVNT制御有効期間を縦軸として、その座標をプロットしている。幾何ブラウン運動モデルにおけるランダム変動の大きさを表すパラメーター v が大きくなるに従って、トラフィック変動パターンの多様性が増す。図22、図23、…、図27を見ると、パラメーター v が大きくなるに従って、VNT制御有効期間のばらつきが大きくなっていることがわかる。同じパラメーターセットであっても、トラフィック変動パターンが異なれば、提案手法によるポート追加を行った場合のVNT制御有効期間および比較手法によるポート追加を行った場合のVNT制御有効期間も異なるが、ほとんどのトラフィック変動パターンに対して提案手法によるポート追加を行った場合の方が、比較手法によるポート追加を行った場合よりもVNT制御有効期間が大きいことがわかる。よって、様々なトラフィック変動パターンに対して、より長い期間にわたり最大ルータ利用率を低く抑えることが可能なWDMネットワークが構築されたといえる。

また、どちらの手法によってポート追加を行った場合に、より多くのトラフィック変動パターンに対してVNT制御有効期間を大きくすることができたかを集計した。パラメーターセットごとにVNT制御有効期間の大小関係によりトラフィック変動パターンを分類した度数分布を表4に示す。それぞれのパラメーターセットについて1000通りのトラフィック変動パターンのうち、提案手法によるポート追加を行った場合のVNT制御有効期間が比較手法によるポート追加を行った場合のVNT制御有効期間より上回っているパターン数、VNT制御有効期間が等しいパターン数、比較手法によるポート追加を行った場合の方がVNT制御有効期間が上回っているパターン数を記している。表4を見ると、どのパラメーターセットにおいても全トラフィック変動パターン中の95%以上のパターンに対して、提案手法の方が優れていることがわかる。また、パラメーターセット5およびパラメーターセット6につい



(a) トラフィック変動パターン A



(b) トラフィック変動パターン B

図 21: 最大ルータ利用率の時間推移

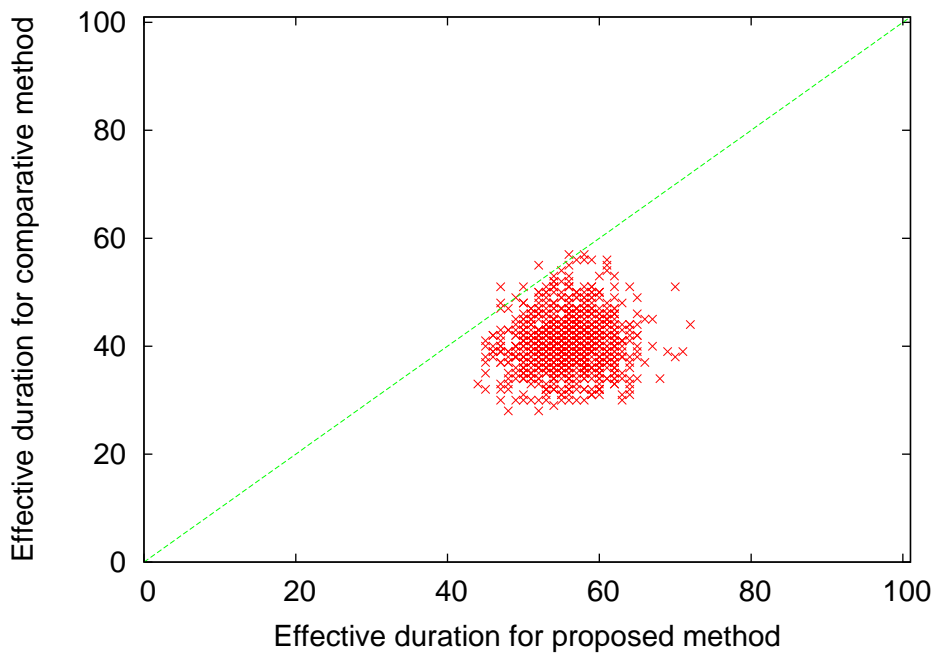


図 22: VNT 制御有効期間の分布: $g = 0.005, v = 0.01$

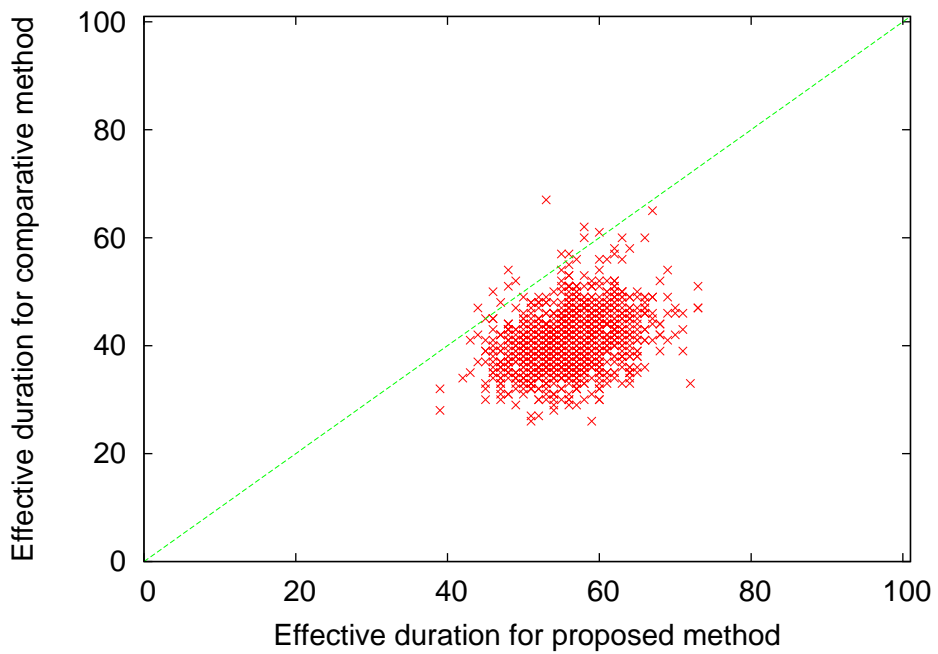


図 23: VNT 制御有効期間の分布: $g = 0.005, v = 0.02$

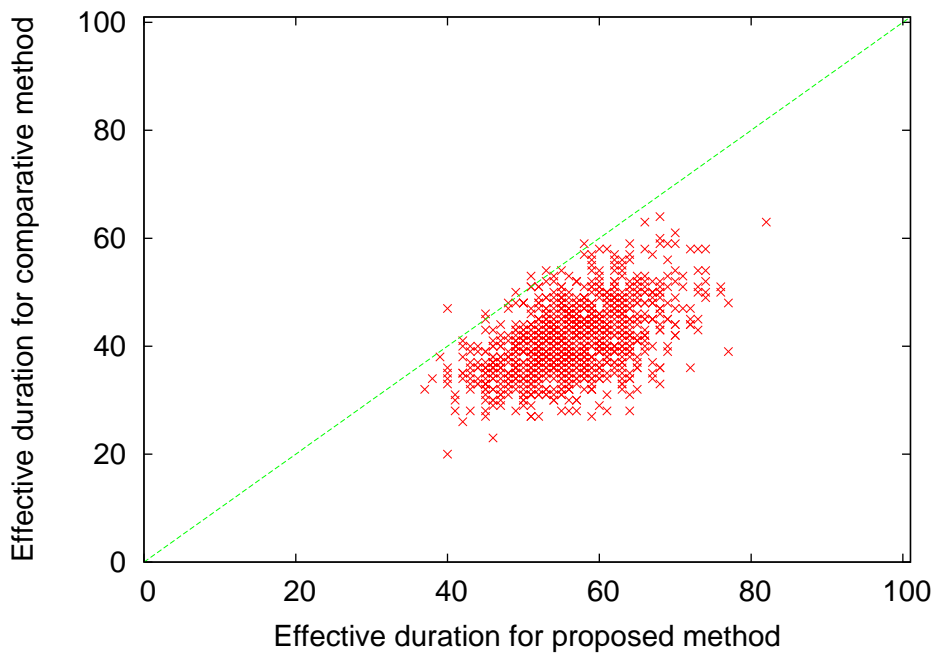


図 24: VNT 制御有効期間の分布: $g = 0.005, v = 0.03$

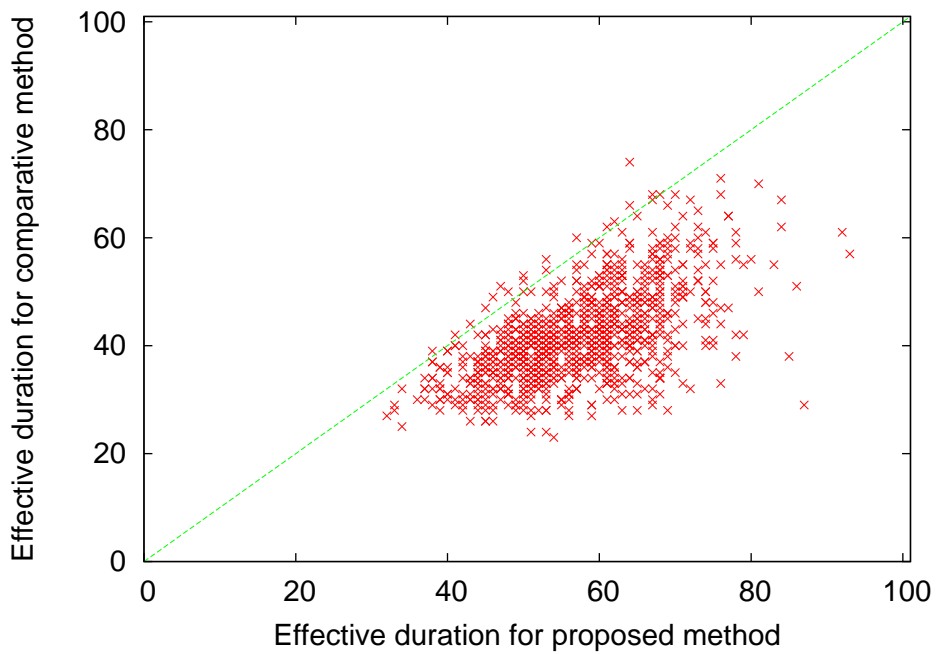


図 25: VNT 制御有効期間の分布: $g = 0.005, v = 0.04$

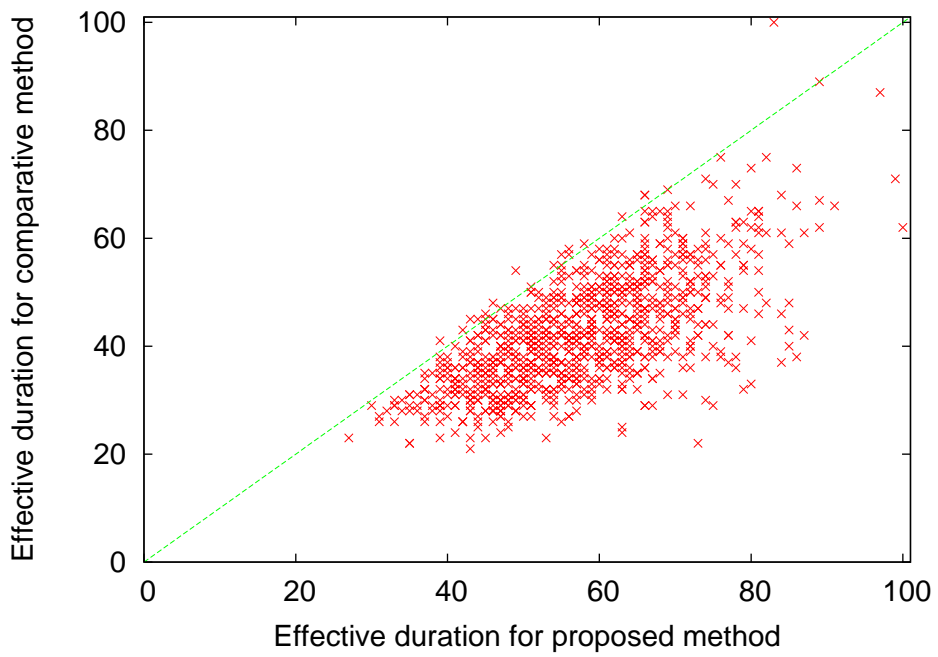


図 26: VNT 制御有効期間の分布: $g = 0.005, v = 0.05$

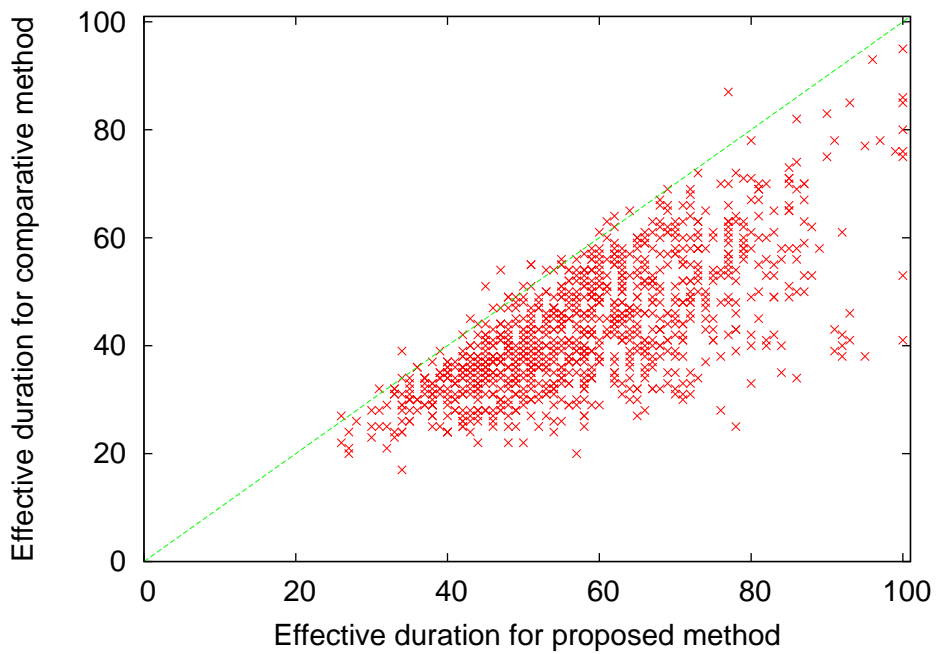


図 27: VNT 制御有効期間の分布: $g = 0.005, v = 0.06$

表 4: VNT 制御有効期間の比較

パラメーターセット	Prop.>Comp.	Prop.=Comp.	Prop.<Comp.
1	993	2	5
2	987	1	12
3	990	4	6
4	979	4	17
5	978	6	16
6	967	14	19

表 5: VNT 制御有効期間の平均

パラメーターセット	Prop.	Comp.
1	55.883	40.52
2	56.034	40.985
3	56.31	41.229
4	57.266	41.756
5	57.663	42.316
6	58.353	43.312

ては、ポート追加位置を決定する際に想定トラヒックとして与えなかった。しかし想定トラヒックとして用いたパラメーターセット 1、2、3、4 と同様に、比較手法によるポート追加を行った場合よりも長期間にわたり最大ルータ利用率を低く抑えることができていることがわかる。よって、想定トラヒックよりも変動性の大きいトラヒック変動に対しても提案手法は有効である。

また、それぞれのパラメーターセットにおいて、1000 通りのトラヒック変動パターンに対する VNT 制御有効期間の平均を求めた。その結果を表 5 に示す。どのパラメーターセットにおいても、提案手法によるポート追加を行った場合の方が比較手法によるポート追加を行った場合よりも、平均 VNT 制御有効期間が約 15 タイムステップ大きいことがわかる。幾何ブラウン運動モデルにおいてタイムステップ dt が経過すると、通信量は平均して $\exp(g \cdot dt)$ 倍になる。ここでは、 $g = 0.005$ としているので、タイムステップ 15 が経過すると通信量は平均して $\exp(0.005 \cdot 15) \approx 1.077$ 倍になる。よって、提案手法によりポート追加を行った場合の方が約 8% 増のトラヒック量まで適応可能であることがわかる。

以上の結果から、提案手法によるネットワーク設備増強を行った WDM ネットワーク上では、トラヒック変動に対してアトラクター選択にもとづく VNT 制御が適応性を有するこ

とがわかる。

6 おわりに

本報告では、トラヒック需要の増大に適応するためのネットワーク設備増強手法を提案した。提案したネットワーク設備増強手法では、生物の可塑性および進化適応性を表現する進化モデルを応用して、WDM ネットワークにおいてポート追加を行うべきノード集合を求めている。提案手法により求めたノード集合にポートを追加した WDM ネットワークでは、アトラクター選択にもとづく VNT 制御が機能することにより、より多様なトラヒック需要増大に対して適応できることが明らかとなった。

本報告では、12 ノードの物理トポロジーを対象として評価を行った。今後は、より大規模なネットワークにおける適応性の評価が必要である。また、ポートの追加だけでなく、物理リンクの追加をするように提案手法を拡張し評価をする予定である。

謝辞

本報告を終えるにあたり、特別研究全般に関して広くご指導頂きました大阪大学大学院情報科学研究科の村田正幸教授、ならびに日頃より親密かつ熱心にご指導を頂きました大阪大学大学院情報科学研究科の荒川伸一准教授に心より御礼申し上げます。また、本報告を進めるにあたり、お力添えを頂きました東京大学大学院総合文化研究科の金子邦彦教授、ならびに大阪大学大学院情報科学研究科の小泉佑揮助教にありがたく御礼申し上げます。そして、本報告に関して適切な助言を頂きました大阪大学大学院情報科学研究科の山下裕一助教、ならびに大阪大学大学院経済学研究科の小南大智助教に御礼申し上げます。最後に、様々な助言をくださり、熱く議論くださったシン・ルー氏、水元宏治氏、大場斗士彦氏をはじめ、村田研究室の皆様に御礼申し上げます。

参考文献

- [1] J. Li, G. Mohan, E. Tien, and K. Chua, “Dynamic routing with inaccurate link state information in integrated IP-over-WDM networks,” *Computer Networks*, vol. 46, pp. 829–851, Dec. 2004.
- [2] T. Ye, Q. Zeng, Y. Su, L. Leng, W. Wei, Z. Zhang, W. Guo, and Y. Jin, “On-line integrated routing in dynamic multifiber IP/WDM networks,” *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, vol. 22, pp. 1681–1691, Nov. 2004.
- [3] S. Arakawa, M. Murata, and H. Miyahara, “Functional partitioning for multi-layer survivability in IP over WDM networks,” *IEICE Transactions on Communications*, vol. 83, pp. 2224–2233, Oct. 2000.
- [4] N. Ghani, S. Dixit, and T. Wang, “On IP-over-WDM integration,” *IEEE Communications Magazine*, vol. 38, pp. 72–84, May 2000.
- [5] M. Kodialam and T. Lakshman, “Integrated dynamic IP and wavelength routing in IP over WDM networks,” in *Proceedings of IEEE INFOCOM*, vol. 1, pp. 358–366, Apr. 2001.
- [6] J. Comellas, R. Martínez, J. Prat, V. Sales, and G. Junyent, “Integrated IP/WDM routing in GMPLS-based optical networks,” *IEEE Network Magazine*, vol. 17, pp. 22–27, Mar. 2003.
- [7] Y. Koizumi, S. Arakawa, and M. Murata, “An integrated routing mechanism for cross-layer traffic engineering in IP over WDM networks,” *IEICE Transactions on Communications*, vol. 90, pp. 1142–1151, May 2007.
- [8] 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. 684–696, Oct. 1996.
- [9] R. Ramaswami and K. Sivarajan, “Design of logical topologies for wavelength-routed optical networks,” *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, vol. 14, pp. 840–851, June 1996.

- [10] Z. Zhang and A. Acampora, "A heuristic wavelength assignment algorithm for multihop WDM networks with wavelength routing and wavelength re-use," *IEEE/ACM Transactions on Networking*, vol. 3, pp. 281–288, June 1995.
- [11] F. Ricciato, S. Salsano, A. Belmonte, and M. Listanti, "Off-line configuration of a MPLS over WDM network under time-varying offered traffic," in *Proceedings of IEEE INFOCOM*, vol. 1, pp. 57–65, June 2002.
- [12] G. Agrawal and D. Medhi, "Lightpath topology configuration for wavelength-routed IP/MPLS networks for time-dependent traffic," in *Proceedings of GLOBECOM*, pp. 1–5, Nov. 2006.
- [13] A. Gençata and B. Mukherjee, "Virtual-topology adaptation for WDM mesh networks under dynamic traffic," *IEEE/ACM Transactions on Networking*, vol. 11, pp. 236–247, Apr. 2003.
- [14] A. Soule, A. Nucci, R. Cruz, E. Leonardi, and N. Taft, "Estimating dynamic traffic matrices by using viable routing changes," *IEEE/ACM Transactions on Networking*, vol. 15, pp. 485–498, June 2007.
- [15] Y. Ohsita, T. Miyamura, S. Arakawa, S. Ata, E. Oki, K. Shiimoto, and M. Murata, "Gradually reconfiguring virtual network topologies based on estimated traffic matrices," *IEEE/ACM Transactions on Networking*, vol. 18, pp. 177–189, Feb. 2010.
- [16] B. Ramamurthy and A. Ramakrishnan, "Virtual topology reconfiguration of wavelength-routed optical WDM networks," in *Proceedings of GLOBECOM*, vol. 2, pp. 1269–1275, Nov. 2000.
- [17] S. Gieselmann, N. Singhal, and B. Mukherjee, "Minimum-cost virtual-topology adaptation for optical WDM mesh networks," in *Proceedings of IEEE ICC*, vol. 3, pp. 1787–1791, June 2005.
- [18] Y. Liu, H. Zhang, W. Gong, and D. Towsley, "On the interaction between overlay routing and underlay routing," in *Proceedings of IEEE INFOCOM*, vol. 4, pp. 2543–2553, Mar. 2005.
- [19] Y. Koizumi, T. Miyamura, S. Arakawa, E. Oki, K. Shiimoto, and M. Murata, "Stability of virtual network topology control for overlay routing services," *Journal of Optical Networking*, vol. 7, pp. 704–719, July 2008.

- [20] Y. Koizumi, T. Miyamura, S. Arakawa, E. Oki, K. Shiimoto, and M. Murata, “Adaptive virtual network topology control based on attractor selection,” *IEEE Journal of Lightwave Technology*, vol. 28, pp. 1720–1731, June 2010.
- [21] Y. Minami, S. Arakawa, Y. Koizumi, T. Miyamura, K. Shiimoto, and M. Murata, “Adaptive virtual network topology control in WDM-based optical networks,” in *Proceedings of INTERNET*, pp. 49–54, Sept. 2010.
- [22] K. Mizumoto, S. Arakawa, Y. Koizumi, D. Shimazaki, T. Miyamura, S. Kamamura, K. Shiimoto, A. Hiramatsu, and M. Murata, “A distributed control of virtual network topologies by using attractor selection model,” in *Proceedings of NOLTA*, Oct. 2012.
- [23] 大場斗士彦, 荒川伸一, 小泉佑揮, 村田正幸, “WDM ネットワークにおける自己組織型仮想網制御のアトラクター決定手法の提案と評価,” 電子情報通信学会技術研究報告 (PN2012-79), Mar. 2013.
- [24] Y. Xin, G. N. Rouskas, and H. G. Perros, “On the physical and logical topology design of large-scale optical networks,” *IEEE Journal of Lightwave Technology*, vol. 21, pp. 904–915, Apr. 2003.
- [25] A. Narula-Tam, E. Modiano, and A. Brzezinski, “Physical topology design for survivable routing of logical rings in WDM-based networks,” *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, vol. 22, pp. 1525–1538, Oct. 2004.
- [26] Y. Fukushima, H. Harai, S. Arakawa, and M. Murata, “Planning method of robust WDM networks against traffic changes,” in *Proceedings of The 8th Working Conference on Optical Network Design and Modeling (ONDM 2004)*, pp. 695–714, Feb. 2004.
- [27] K. Kaneko, “Evolution of robustness and plasticity under environmental fluctuation: Formulation in terms of phenotypic variances,” *Journal of Statistical Physics*, vol. 148, pp. 687–705, Sept. 2012.
- [28] A. A. Kuehn and M. J. Hamburger, “A heuristic program for locating warehouses,” *Management Science*, vol. 9, pp. 643–666, July 1963.
- [29] Y. d’Halluin, P. Forsyth, and K. Vetzal, “Wireless network capacity management: A real options approach,” *European Journal of Operational Research*, vol. 176, pp. 584–609, June 2007.

- [30] D. Banerjee and B. Mukherjee, “Wavelength-routed optical networks: Linear formulation, resource budgeting tradeoffs, and a reconfiguration study,” *IEEE/ACM Transactions on Networking*, vol. 8, pp. 598–607, Oct. 2000.