

# アトラクター重畳を用いた複数仮想網の制御手法

小泉 佑揮<sup>†</sup> 宮村 崇<sup>††</sup> 荒川 伸一<sup>†</sup> 塩本 公平<sup>††</sup> 村田 正幸<sup>†</sup>

<sup>†</sup> 大阪大学 大学院情報科学研究科

<sup>††</sup> 日本電信電話株式会社ネットワークサービスシステム研究所

E-mail: <sup>†</sup>{ykoizumi,arakawa,murata}@ist.osaka-u.ac.jp, <sup>††</sup>{miyamura.takashi,shiomoto.kohei}@lab.ntt.co.jp

**あらまし** 本稿では、単一の物理ネットワーク上に複数の仮想網を柔軟に收容するための仮想網制御手法を提案する。わずかな情報交換のみで複数の仮想網を柔軟に收容するために、複数の生物システムが同一の環境内で共生する様子をモデル化したアトラクター選択およびアトラクター重畳に注目する。提案手法は、アトラクター重畳を応用し、複数の仮想網の間で性能に関する情報のみを共有することで、それぞれの仮想網を独立して制御しながら、単一の物理ネットワーク上の資源を複数の仮想網間で柔軟に共有する。シミュレーション評価により、提案手法によって複数の仮想網を単一の物理ネットワーク上に柔軟に收容できることを示す。

**キーワード** 波長分割多重、波長ルーティングネットワーク、仮想網制御、アトラクター選択、アトラクター重畳

## Cooperation among Multiple Virtual Topologies Based on Attractor Superimposition

Yuki KOIZUMI<sup>†</sup>, Takashi MIYAMURA<sup>††</sup>, Shin'ichi ARAKAWA<sup>†</sup>, Kohei SHIOMOTO<sup>††</sup>, and  
Masayuki MURATA<sup>†</sup>

<sup>†</sup> Graduate School of Information Science and Technology, Osaka University

<sup>††</sup> NTT Network Service Systems Laboratories

E-mail: <sup>†</sup>{ykoizumi,arakawa,murata}@ist.osaka-u.ac.jp, <sup>††</sup>{miyamura.takashi,shiomoto.kohei}@lab.ntt.co.jp

**Abstract** In this paper, we propose a cooperation mechanism among multiple virtual topologies in wavelength-routed optical networks. It is based on *attractor selection* and *superimposition*, which models the biological systems that behave cooperatively and symbiotically only by sharing a small amount of information with each other. While our proposed method allows each virtual topology to be controlled in a distributed manner, it achieves the cooperation among those virtual topologies with sharing the activity, which indicates the condition of each virtual topology. Through simulations, we demonstrate that our proposed method coordinates all virtual topologies appropriately only by sharing the activity.

**Key words** Wavelength Division Multiplexing, Wavelength Routed Network, VNT Control, Attractor Selection, Attractor Superimposition

### 1. はじめに

波長分割多重 (WDM) ネットワークでは、波長ルーティングを用いて設定された光バスと OXC から構成される仮想的なトポロジ (仮想網) を構築することで、柔軟なネットワークインフラストラクチャーを提供することができる。トラヒックを波長ルーティングネットワーク上に効率的に收容するために、トラヒックに応じて仮想網を構築する仮想網制御に関する研究が数多くなされている [1-3]。文献 [4,5] では、与えられた単一のトラヒックデマンドマトリックスに対して、そのトラヒックを收容するために最適な仮想網を設計するための、最適化にもとづく方法、およびヒューリスティックな方法が提案されている。

VoIP やビデオオンデマンドなどに代表される新たなアプリ

ケーション技術が多数出現しており、Web や電子メールなどの従来のトラヒックに加え、様々な通信品質を要求するフローが波長ルーティングネットワーク上を流れている。これら多様なフローが同一のネットワーク上を流れると、要求通信品質の違いに起因するフローの競合により、互いの通信品質が劣化する。例えば、ビデオオンデマンドなどの多くの帯域を消費するフローにより、VoIP など低遅延通信のフローの性能が劣化することがある。したがって、これらフロー間の競合を解決し、多様なトラヒックを柔軟に收容することは重要な課題である。

フローの競合に対する解決策の1つとして、複数の仮想網を利用する方法が考えられる。複数の仮想網を構築し、要求通信品質が異なるサービスをそれぞれの仮想網に排他的に收容する

ことで、フロー間の競合による性能劣化を解消できる。WDM ネットワークでは、波長ルーティングを利用することで単一の WDM ネットワーク上に複数の仮想網を構築することができる。

複数の仮想網を制御する 1 つのアプローチとして、ヒューリスティックな方法などを用いて複数の仮想網を含めたネットワーク全体を集中制御する方法がある。しかし、複数の仮想網を制御するためには、それぞれの仮想網に対する多くの情報を収集する必要があり、仮想網の数に対してスケールしない。

一方、分散型の制御方式、すなわち 1 つの制御機構が 1 つの仮想網を制御する方法である。分散型制御は、それぞれの制御機構が 1 つの仮想網を制御するだけで良いため、仮想網の数に対するスケーラビリティが高い。しかし、複数の仮想網が単一の WDM ネットワーク上の資源を共有するため、それぞれの仮想網が利用する資源を適切に調整する方法が必要となる。調整機構がなければ、1 つの仮想網が利己的に WDM ネットワークの資源を占有し、他の仮想網が資源を利用できない状況が生じる。さらに、分散型の制御機構はスケーラビリティが高いが、仮想網間の資源利用を調整する機構が、それぞれの仮想網に関する詳細な情報を収集すると、スケーラビリティという分散型制御の利点を損なう。そこで、本稿では、それぞれの仮想網を単一の制御機構によって分散的に構築しつつ、制御機構間のわずかな情報交換により、WDM ネットワーク上の資源を柔軟に利用する複数仮想網制御手法を提案する。この目的を実現するために、生物界で観測される協調的な振る舞いに着目する。

生物の多くは十分な情報伝達手段を持たないため、わずかに得られる環境情報をもとに行動を決定していることが知られている。しかし、生物が互いに協調的に振る舞うことで同一環境内に共生する事例が多く観測されている [6]。本稿では、生物が限られた環境情報をもとに柔軟に振る舞う様子をモデル化した **アトラクター選択** に注目する [7,8]。例えば、文献 [8] では、細胞内の遺伝子ネットワークと代謝ネットワークの環境変化に対する柔軟な振る舞いがアトラクター選択で説明されている。アトラクター選択で駆動する生物システムは、わずかに得られる情報である活性度にもとづいてゆらぎを適切に制御し、周囲の環境に適した状態を選択することで、環境変化に対して柔軟に振る舞う。さらに、アトラクター選択で駆動する複数の生物システムが同一環境内に共存しているときは、それら複数のアトラクター選択が重畳される。すなわち、活性度を互いに共有しあうことで、それぞれのアトラクター選択システムがシステム全体の状態が良くなるアトラクターを選択する。このように、複数のアトラクター選択によって駆動する生物システムが同一環境内で協調的に振る舞う様子を **アトラクター重畳** と呼ぶ。

本稿では、アトラクター重畳の概念を応用することで、共有する WDM ネットワークの資源を複数の仮想網間で柔軟に共有することを可能にする複数仮想網制御手法を提案する。提案手法は、それぞれの仮想網を文献 [9] で提案したアトラクター選択にもとづく単一仮想網制御手法によって分散的に制御しつつ、アトラクター重畳の概念を応用して、それら複数の仮想網を制御する。このとき、それぞれの仮想網のコンディション

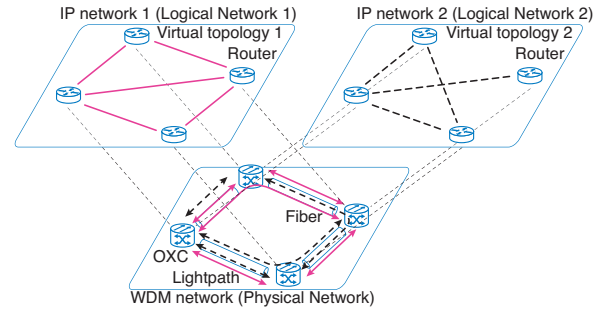


図 1 単一の物理ネットワーク上に構築した複数の仮想網の例

を表す指標である活性度のみを互いに共有することで、共通の WDM ネットワークの資源を複数の仮想網間で柔軟に共有する。シミュレーションによる評価では、はじめに、提案手法を用いずにそれぞれの仮想網を完全に独立して制御した場合は、利己的な資源占有によりトラフィックを適切に収容できないことを示す。一方、提案手法を用い、複数の仮想網間で活性度のみを共有することで、柔軟に複数の仮想網を制御できることを示す。

本稿の構成は以下の通りである。はじめに、2. 章で、対象とするネットワークとアトラクター重畳の概要を述べた後に、アトラクター重畳にもとづく複数仮想網制御手法を提案する。次に、3. 章で、シミュレーションにより、提案手法の協調的な振る舞いを示す。最後に、4. 章で本稿の結論を述べる。

## 2. アトラクター重畳にもとづく複数仮想網制御

本章では、本稿で想定するネットワークとアトラクター選択およびアトラクター重畳の概念を述べた後に、アトラクター重畳を用いた複数仮想網制御手法を提案する。

### 2.1 想定するネットワークと仮想網制御

本稿では、WDM 技術にもとづく波長ルーティングネットワークと IP ネットワークの 2 層で構成されるネットワークを想定する。仮想網制御は、波長ルーティングにより光パスを設定し、光パスと IP ルーターから構成される仮想網を構築する。IP ネットワークは構築された仮想網上にトラフィックを転送する。図 1 に示すように、単一の物理ネットワーク上に複数の仮想網を構築し、サービスをそれぞれの仮想網上に排他的に収容する。以降、仮想網とそれを利用する IP ネットワークの組を論理ネットワーク、WDM ネットワークを物理ネットワークと呼ぶ。それぞれの論理ネットワークでは、アトラクター選択にもとづく仮想網制御により仮想網を構築する。それら複数の論理ネットワークをアトラクター重畳にもとづいて制御する。

### 2.2 生物界で観測される協調的な振る舞い

本章では、提案手法の鍵となる概念であるアトラクター選択とアトラクター重畳の概要を述べる。

#### 2.2.1 アトラクター選択

アトラクター選択で駆動するシステム（以降、アトラクター選択システムと表記する）の振る舞いは、以下の式で表される。

$$\frac{d\mathbf{x}}{dt} = \alpha \cdot \mathbf{f}(\mathbf{x}) + \eta \quad (1)$$

$\mathbf{x} = (x_1, \dots, x_i)$  はシステムの状態である。アトラクター選択は、

2つの挙動で構成される。1つは関数  $f(\mathbf{x})$  で表されるアトラクターを持つ制御構造であり、もう1つは  $\eta$  で表されるゆらぎ、すなわちランダムな振る舞いである。これら2つの挙動は、システムのコンディションを示す活性度  $\alpha$  で制御される。活性度はシステムのコンディションが良いほど大きな値になる。システムのコンディションが良く  $\alpha$  が大きい場合は、 $f(\mathbf{x})$  がシステムの挙動  $\mathbf{x}$  に与える影響が  $\eta$  に比べて相対的に大きくなるため、 $f(\mathbf{x})$  が支配的にシステムを制御する。そのため、 $\mathbf{x}$  は  $f(\mathbf{x})$  で定義される解空間上の均衡点であるアトラクターに安定的に収束する。反対に、コンディションが悪く  $\alpha$  が小さい場合は、 $\eta$  が支配的にシステムを制御する。このとき、ゆらぎがランダムにシステムの状態を変化させ、コンディションが良くなるアトラクターを探索する。このようにして、アトラクター選択システムは、活性度に応じてアトラクターを持つ制御構造とゆらぎを適切に使分けすることで、環境変化に対する柔軟な振る舞いを実現している。アトラクター選択に関しては、文献 [7, 8] で議論されている。紙面の都合上、本稿ではアトラクター選択の詳細な説明は割愛する。

### 2.2.2 アトラクター重畳

複数のアトラクター選択システムが同一の系内に共存している場合、それらのシステムは協調的な振る舞いを示す。この協調的な振る舞いは、互いに活性度を共有し合い、**共通活性度**を用いてそれぞれのアトラクター選択システムを駆動することで実現している。それぞれのアトラクター選択システムは、自身の  $f(\mathbf{x})$  で定義されるアトラクターを選択する。この振る舞いは互いに独立かつ分散的であるものの、共通活性度を利用しているため、系内の全てのアトラクター選択システムのコンディションが良くなるアトラクターに収束する。例えば、あるアトラクター選択システムが、現在の環境に適したアトラクターに収束しコンディションが良いが、他のアトラクター選択システムのコンディションが悪い場合を考える。このときは、共通活性度は低いいため、コンディションの良いアトラクター選択システムも、他のアトラクター選択システムのコンディションが良くなるまで、ゆらぎによって新たなアトラクターを探索し続ける。最終的に、全てのアトラクター選択システムのコンディションが良くなるアトラクターに収束した時点で共通活性度が高くなり、系内の状態が安定する。このように、同一の系内に共存する複数のアトラクター選択システムは、非常に少ない情報、すなわち活性度を共有することで、協調的な振る舞いを示す。この概念を**アトラクター重畳**と呼ぶ。提案手法は、共通活性度を利用した協調的な振る舞いを応用することで、物理ネットワーク上の資源を複数の論理ネットワークで柔軟に共有する。

### 2.3 アトラクター選択にもとづく仮想網制御

提案手法は、それぞれの論理ネットワークをアトラクター選択で制御しつつ、アトラクター重畳を用いて複数の論理ネットワークを柔軟に制御する。そこで、はじめに、本章でアトラクター選択を用いた仮想網制御を述べ、次章でアトラクター重畳を用いた複数仮想網制御を述べる。

まず、提案手法で用いる細胞内の遺伝子ネットワークと代謝ネットワークにおけるアトラクター選択を簡単に述べた後に、

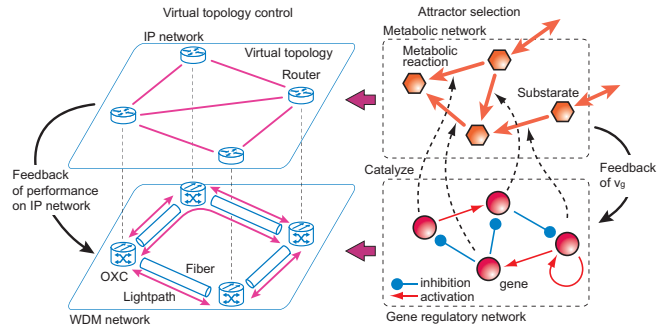


図2 遺伝子・代謝ネットワークと仮想網制御

そのアトラクター選択を仮想網制御に適用する方法をを説明する。紙面の都合上、アトラクター選択にもとづく仮想網制御に関しては、提案手法の概要と [9] から拡張した点を述べる。

#### 2.3.1 細胞におけるアトラクター選択

本稿では、文献 [8] で示されている細胞内のアトラクター選択に着目する。この文献では、図2右部に示すように、遺伝子ネットワークと代謝ネットワークの2つの層から構成される細胞の振る舞いをアトラクター選択を用いて説明している。遺伝子ネットワーク内のそれぞれの遺伝子  $i$  は、発現レベルと呼ばれる値  $x_i$  を持ち、 $x_i$  のダイナミクスは以下の式で表される。

$$\frac{dx_i}{dt} = \alpha \cdot \left( \zeta \left( \sum_j W_{ij} x_j \right) - x_i \right) + \eta \quad (2)$$

第一項の  $\zeta \left( \sum_j W_{ij} x_j \right) - x_i$  は、アトラクターを持つ制御構造であり、式 (1) の  $f(\mathbf{x})$  に相当する。関数  $\zeta(z)$  はシグモイド関数  $1/(1+\exp(-\mu z))$  である。このアトラクターを持つ制御構造は、遺伝子間の活性と抑制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。第二項の  $\eta$  はゆらぎである。このように、遺伝子ネットワークはアトラクター選択で駆動している。一方、代謝ネットワークでは、代謝反応によって細胞の成長には必要な基質を生成している。これらの代謝反応は、対応する遺伝子の発現レベル  $x_i$  によって制御される。代謝によって生成される基質量が細胞の成長速度を決めるため、その濃度が活性度  $\alpha$  として遺伝子ネットワークにフィードバックされる。

#### 2.3.2 アトラクター選択の仮想網制御への応用

細胞内では、遺伝子ネットワークがアトラクター選択によって駆動し、代謝反応ネットワークを制御する。そこで、アトラクター選択にもとづく仮想網制御では、図2に示すように、遺伝子ネットワークを仮想網制御に適用し、代謝ネットワークをIPネットワークに対応づける。これにより、仮想網制御はIPネットワークからのフィードバックを用い、IPネットワークの状態が良くなる仮想網を構築する。

提案手法では、全ての光パスの候補  $i$  に遺伝子を設置し、その発現レベル  $x_i$  で、光パス  $i$  の設定および削除を決定する。 $x_i$  は  $[0, 1]$  の実数であるので、 $x_i > 0.5$  のときに光パス  $i$  を設定し、それ以外は設定しない。このようにして、 $x_i$  を仮想網に変換する。

提案手法では、アトラクター選択によって現在の環境に適したアトラクターを選択し、そのアトラクターにおける発現レベル  $x_i$  を仮想網に変換する。したがって、適切に仮想網を構築す

るためにはアトラクターを適切に定義する必要がある。式 (2) におけるアトラクターは、制御行列  $W_{ij}$  によって決まる。式 (2) から解空間上のアトラクターの位置に影響を与えないゆらぎ  $\eta$  と活性度  $\alpha$  を除くと、遺伝子ネットワークのダイナミクスは、ホップフィールドネットワークと同じ式である [10]。ホップフィールドネットワークは、パターンを記憶しそれを想起する連想記憶として利用できることが知られている。記憶されたパターンはアトラクター選択におけるアトラクターに相当する。そこで、ニューラルネットワークの知見を利用し、適切な仮想網を式 (2) のアトラクターとして定義するために、以下の式で表されるヘブ則を利用する。

$$W_{ij} = \begin{cases} 0 & \text{if } i = j \\ \sum_s (2x_i^s - 1) \cdot (2x_j^s - 1) & \text{otherwise,} \end{cases} \quad (3)$$

$x_i^s$  は、アトラクターとして定義する  $s$  番目の仮想網に対応する発現レベルである。この式により、想定する仮想網を式 (2) のアトラクターとすることができる。提案手法の特徴は、少ない情報量、すなわち活性度のみで柔軟に仮想網を構築することであり、現在の環境に適した仮想網をどのように選択するか注目している。 $W_{ij}$  定義に用いる仮想網の設計には既存研究を利用することができる。

活性度  $\alpha$  は、仮想網上に収容したサービスのコンディションを表す指標である。平均エンド・エンド間遅延、スループット、リンク利用率など、サービスの目的に応じた任意の指標を利用することができる。本稿では、文献 [5] をはじめとして多くの既存研究で仮想網制御の性能指標として利用されている最大リンク利用率を用いる。最大リンク利用率を  $u_{\max}$  とし、活性度を  $\alpha = 1/(1 + \exp(u_{\max} - \zeta))$  と定義する。これは、最大リンク利用率が閾値  $\zeta$  を超えると  $\alpha$  が低下する関数である。

次章では、それぞれの論理ネットワーク内で本章のアトラクター選択にもとづく仮想網制御によって仮想網を構築しつつ、物理ネットワークの資源を柔軟に共有するための、アトラクター重畳にもとづく複数仮想網制御を説明する。

#### 2.4 アトラクター重畳にもとづく複数仮想網制御

2.2 章で述べた通り、アトラクター重畳では共通活性度が重要な役割を果たす。したがって、共通活性度を適切に定義することがアトラクター重畳にもとづく複数仮想網制御を実現する上で重要な課題である。本稿では、それぞれの論理ネットワークで仮想網を構築するアトラクター選択の活性度に関する重み付き平均によって共通活性度  $A$  を以下の通りに定義する。

$$A = \frac{\sum_k \beta_k \alpha_k}{\sum_k \beta_k}, \quad (4)$$

ここで、 $\alpha_k$  は論理ネットワーク  $k$  を制御するアトラクター選択の活性度であり、 $\beta_k$  は  $\alpha_k$  に対する重みである。

重み  $\beta_k$  を決めるために、複数の論理ネットワークを制御する際の 2 つの目的を考える。1 つは、論理ネットワークの状態が悪い場合は、ゆらぎによって新たな仮想網を構築することである。もう 1 つは、ある論理ネットワークによる利己的な資源の占有を防ぐことである。これは、それぞれの論理ネットワークが、

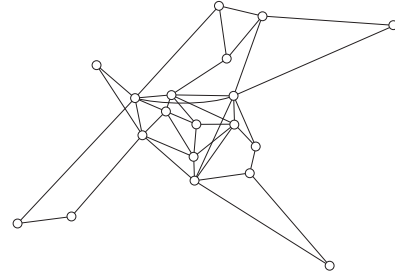


図3 European Optical Network Topology トポロジ

自身が利用している物理ネットワーク上の資源が他の論理ネットワークに必要である可能性を考慮することで実現できる。

1 つ目の目的を実現するためには、論理ネットワーク  $k$  を制御するアトラクター選択の活性度  $\alpha_k$  が低いときは、他の論理ネットワークの状態によらず、 $A$  を低く設定する必要がある。もし、 $A$  が高いと、ゆらぎが働かないためコンディションが悪いアトラクターに停滞してしまう。したがって、 $\alpha_k$  が低い場合は、ゆらぎによる新たなアトラクターの探索を適切に動作させるために重み  $\beta_k$  の値を大きくし  $A$  を低く設定する。

2 つ目の目的を反映するためには、 $\alpha_k$  が高いときに、 $\alpha_k$  が  $A$  に大きな影響を与えないように、 $\beta_k$  を小さくする必要がある。つまり、論理ネットワーク  $k$  のコンディションが良く  $\alpha_k$  が高くても、他の論理ネットワーク  $j$  の  $\alpha_j$  が低い場合は  $A$  を低くし、論理ネットワーク  $k$  もゆらぎによって新たな仮想網を構築する。これにより、論理ネットワーク  $j$  が適切な仮想網を構築するために必要な物理ネットワークの資源を論理ネットワーク  $k$  が利用している場合でも、利己的な資源の占有を防ぐことができる。以上より、重み  $\beta_k$  は、 $\alpha_k$  に対する減少関数  $\beta_k = (1 - \alpha_k)^n$  とする。それぞれの論理ネットワーク上で仮想網を制御するアトラクター選択がこの共通活性度を利用することで、複数の論理ネットワークで物理ネットワークの資源を柔軟に共有する。

### 3. 性能評価

#### 3.1 評価条件

本章では提案手法をシミュレーションにより評価する。物理トポロジには、図3に示す 19 ノードの European Optical Network を用いる。本評価では、単一の物理ネットワーク上に 2 つの論理ネットワークを収容する。それぞれの論理ネットワークでは、ランダムに生成した 50 のトポロジをアトラクターとするアトラクター選択で仮想網を構築する。2 つの論理ネットワークの任意の仮想網の組み合わせが構築できないようにするために、物理ネットワーク上の各ノードのトランスミッタとレーザパ数を 14 とする。各ファイバは十分な数の波長を持つものとする。それぞれの論理ネットワークに収容するトラヒックは対数正規分布にしたがいランダムに生成し、その経路は構築された仮想網上の最短経路とする。提案手法が柔軟に複数の仮想網を収容できることを評価するために、それぞれの論理ネットワーク上のトラヒックを変動させることで、環境変化を発生させる。トラヒック変動は、ランダムにトラヒックを再生成することで発生させる。論理ネットワーク 1 上では時刻  $1000n$  に、論理ネッ

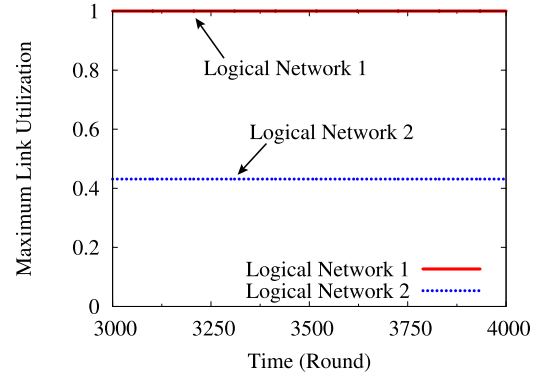
トワーク 2 では時刻  $1000n + 500$  に  $n$  回目のトラフィック変動を発生させる。本評価では、時刻 1 ごとに、アトラクター選択にもとづく仮想網制御によって仮想網を再計算する。

### 3.2 アトラクター重畳にもとづく複数仮想網制御の動作例

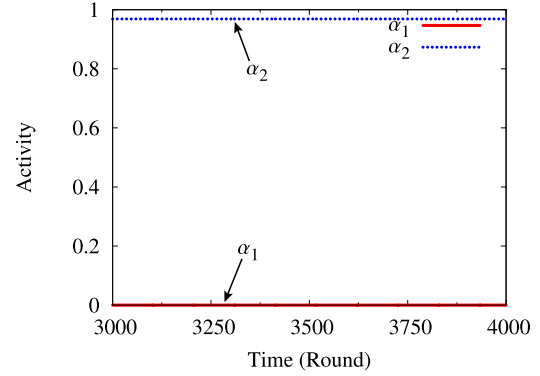
提案手法の動作を示すために、それぞれの論理ネットワークの最大リンク利用率、最大リンク利用率を変換した活性度と共通活性度、光パスの設定および削除を決定する発現レベルの 3 つの指標の時間変化を評価する。本章の評価では、共通活性度の重みを  $\beta_k = (1 - \alpha_k)^4$  とする。 $\beta_k$  が提案手法の振る舞いに与える影響は次章で評価する。

はじめに、比較のために、提案手法を用いない場合の評価をする。すなわち、すなわち共通活性度を用いず、それぞれの論理ネットワークがアトラクター選択にもとづく仮想網制御で完全に独立して仮想網を構築する場合の結果を示す。図 4 にそれぞれの論理ネットワークに構築された仮想網上の最大リンク利用率と活性度を示す。図の横軸は時間を、縦軸はそれぞれの指標を示している。論理ネットワーク 2 上の活性度  $\alpha_2$  は高いものの、 $\alpha_1$  は低く、その値はほぼ 0 である。このとき、論理ネットワーク 1 が他の仮想網を構築するために必要な物理ネットワーク上の資源であるトランスミッターとレシーバーの大部分は、論理ネットワーク 2 に占有されている。しかし、論理ネットワーク 2 はコンディションが良く  $\alpha_2$  が高いため、現在のアトラクターに留まり論理ネットワーク 2 上の仮想網は変化しない。そのため、論理ネットワーク 2 が利用している資源は開放されず、論理ネットワーク 1 はトラフィックを適切に収容できる仮想網を構築できず、最大リンク利用率を低下させることはできない。このように、それぞれの論理ネットワークが完全に独立して仮想網を構築した場合、利己的に物理ネットワーク上の共有資源を占有することにより、他の論理ネットワークが適切な仮想網を構築できない問題が生じる。

次に、提案するアトラクター重畳にもとづく複数仮想網制御手法を評価する。図 5 に、先ほどと同様、最大リンク利用率と活性度を示す。論理ネットワーク 2 では、時刻 3500 にトラフィック変動により最大リンク利用率が悪化している。最大リンク利用率の悪化は、活性度の低下として  $\alpha_2$  に反映される。これに伴い、共通活性度  $A$  が式 (4) にしたがって低下する。 $A$  の低下により、両論理ネットワーク上でゆらぎによるランダムな仮想網の構築が行われる。これは、図 5 の最大リンク利用率および活性度が時刻 3500 以降に振動していることから確認できる。時刻 3500 では論理ネットワーク 1 にトラフィック変動は生じていないため、論理ネットワーク 1 は仮想網を再構築する必要はない。しかし、論理ネットワーク 2 が必要な資源を占有している可能性があるため、論理ネットワーク 1 でもゆらぎにより、新たなアトラクターすなわち仮想網を構築する。時刻 3560 で両論理ネットワークが共にトラフィックを収容可能な仮想網を構築し、最大リンク利用率が低下している。このように、アトラクター重畳の概念を応用することで、複数の論理ネットワークを柔軟に制御することができる。



(a) 最大リンク利用率



(b) 活性度

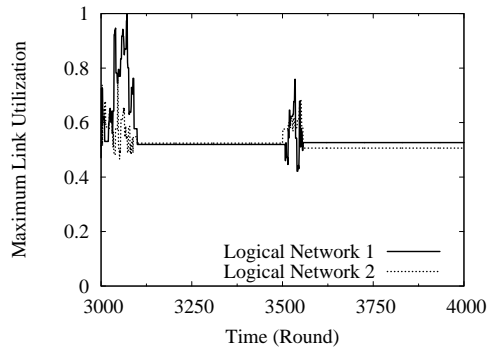
図 4 最大リンク利用率と活性度の時間変化 (提案手法を用いない場合)

### 3.3 共通活性度がアトラクター重畳にもとづく複数仮想網制御に与える影響

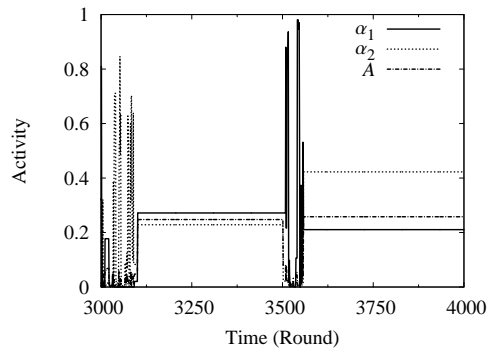
共通活性度は、提案手法にとって非常に重要なパラメータであるため、本章では、共通活性度がアトラクター選択にもとづく仮想網制御に与える影響を評価する。本章の評価では、式 (4) における共通活性度定義の重みを  $\beta_k = 1 - \alpha_k$  とする。これ以外の評価条件は乱数の系列も含め前章の評価と同じものを用いる。図 6 に最大リンク利用率と活性度の時間変化を示す。図 5 の場合と同様に、時刻 3500 に論理ネットワーク 2 上に発生させたトラフィック変動により論理ネットワーク 2 上の最大リンク利用率が上昇し、 $\alpha_2$  が減少している。しかし、共通活性度  $A$  が十分に低下していないため、論理ネットワーク 2 では、ゆらぎが適切に働かず、新たな仮想網の構築が行われていない。これは、最大リンク利用率が全く変化していないことから確認できる。このような現象が生じる要因は、比較的高い値である  $\alpha_1$  が共通活性度  $A$  に与える影響が強く、 $A$  が十分に低下しないためである。図 5 と図 6 の結果は、高い値である  $\alpha_k$  が  $A$  に与える影響を軽減するために、重み  $\beta_k$  は  $\alpha_k$  に対する減少関数かつ凸関数が適していることを示唆している。

## 4. おわりに

本稿では、アトラクター重畳を用いた複数仮想網の制御手法を提案した。アトラクター重畳は同一の環境内にアトラクター選択で駆動する複数の生物システムが共存する場合に、それらの生物システムが非常に少ない情報、すなわち活性度のみを用



(a) 最大リンク利用率



(b) 活性度

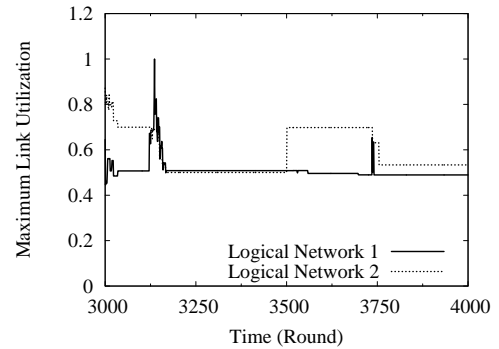
図5 最大リンク利用率と活性度および共通活性度の時間変化 ( $\beta_k = (1 - \alpha_k)^4$ )

いた相互作用により、協調的に振る舞う様子をモデル化したものである。複数仮想網の制御にアトラクター重畳を応用することで、それぞれの論理ネットワークはアトラクター選択にもとづく仮想網制御により分散的に仮想網を構築しつつ、共通活性度を利用して論理ネットワークの協調的な振る舞いを促し、ネットワーク全体でも柔軟な制御を実現した。シミュレーション評価により、提案手法を用いない場合は、それぞれの論理ネットワークが利己的に物理ネットワーク上の資源を利用するため、他の論理ネットワークがトラフィックを収容可能な仮想網を構築できない状況が発生することを示した。一方、提案手法を用いた場合は、共通活性度によりそれぞれの論理ネットワークが協調的に振る舞うため、ネットワーク全体を柔軟に制御することができることを示した。

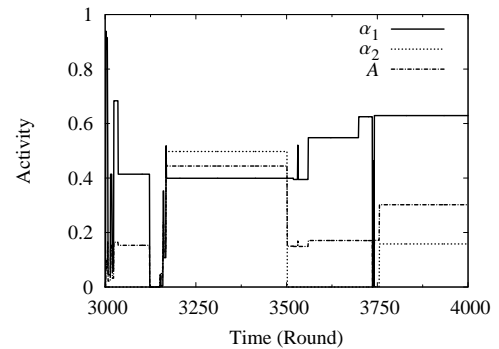
提案手法では、共通活性度を適切に定義することが重要な課題の1つである。本稿では、それぞれの論理ネットワークの活性度に対する重み付き平均を共通活性度としたが、それぞれの論理ネットワークの活性度の積を取るなどの方法も考えられる。今後は、複数の仮想網の協調的な振る舞いに加え、性能を向上させるための共通活性度の定義方法を調査する予定である。

## 謝 辞

本研究の一部は、文部科学省グローバル COE プログラム (研究拠点形成費)、および総務省戦略的情報通信研究開発推進制度の補助によるものである。ここに記して謝意を表す。



(a) 最大リンク利用率



(b) 活性度

図6 最大リンク利用率と活性度および共通活性度の時間変化 ( $\beta_k = 1 - \alpha_k$ )

## 文 献

- [1] N. Ghani, S. Dixit, and T.-S. Wang, "On IP-over-WDM integration," *IEEE Communications Magazine*, vol. 38, pp. 72–84, Mar. 2000.
- [2] M. Kodialam and T. V. Lakshman, "Integrated dynamic IP and wavelength routing in IP over WDM networks," in *Proceedings of IEEE INFOCOM*, pp. 358–366, Apr. 2001.
- [3] J. Comellas, R. Martinez, 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./Apr. 2003.
- [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, no. 5, pp. 684–696, 1996.
- [5] 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.
- [6] K. Kaneko, *Life: An introduction to complex systems biology*. Understanding Complex Systems, New York: Springer, 2006.
- [7] A. Kashiwagi, I. Urabe, K. Kaneko, and T. Yomo, "Adaptive response of a gene network to environmental changes by fitness-induced attractor selection," *PLoS ONE*, vol. 1, p. e49, Dec. 2006.
- [8] C. Furusawa and K. Kaneko, "A generic mechanism for adaptive growth rate regulation," *PLoS Computational Biology*, vol. 4, p. e3, Jan. 2008.
- [9] Y. Koizumi, T. Miyamura, S. Arakawa, E. Oki, K. Shiimoto, and M. Murata, "Adaptive virtual network topology control based on attractor selection," *IEEE/OSA Journal of Lightwave Technology*, vol. 28, pp. 1720–1731, June 2010.
- [10] J. J. Hopfield, "Neural networks and physical systems with emergent collective computational abilities," *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, vol. 79, pp. 2554–2558, Apr. 1982.