

**脳の仕組みを活かしたイノベーション創成型研究開発**  
**(脳の動作原理の活用による省エネで外乱に強いネットワーク制御基盤技術)**  
Novel and innovative R&D making use of brain structures  
(Noise-resistant network control basic technology with energy conservation  
by using operating principles of the brain)

**研究代表者**

村田 正幸 国立大学法人大阪大学大学院情報科学研究科  
Masayuki Murata Graduate School of Information Science and Technology, Osaka University

**研究分担者**

上田 昌宏<sup>†</sup> 若宮 直紀<sup>††</sup> YIN BEI WEN<sup>††</sup> 細田 一史<sup>††</sup>  
西原 基夫<sup>†††</sup> 田中 淳裕<sup>†††</sup> 下西 英之<sup>†††</sup> 小出 俊夫<sup>†††</sup> 芦田 優太<sup>†††</sup>  
千葉 靖伸<sup>†††</sup> 本吉 彦<sup>†††</sup> 平野 由美<sup>†††</sup> 西岡 淳<sup>†††</sup> 植田 啓文<sup>†††</sup>  
角丸 貴洋<sup>†††</sup> 山野 悟<sup>†††</sup> 戸沼 正光<sup>†††</sup>  
Masahiro Ueda<sup>†</sup> Naoki Wakamiya<sup>††</sup> Bei-Wen Ying<sup>††</sup> Kazufumi Hosoda<sup>††</sup>  
Motoo Nishihara<sup>†††</sup> Atsuhiko Tanaka<sup>†††</sup> Hideyuki Shimonishi<sup>†††</sup> Toshio Koide<sup>†††</sup> Yuta Ashida<sup>†††</sup>  
Yasunobu Chiba<sup>†††</sup> Gen Motoyoshi<sup>†††</sup> Yumi Hirano<sup>†††</sup> Jun Nishioka<sup>†††</sup> Hirofumi Ueda<sup>†††</sup>  
Takahiro Kakumaru<sup>†††</sup> Satoru Yamano<sup>†††</sup> Masamitsu Tonuma<sup>†††</sup>

<sup>†</sup>国立大学法人大阪大学大学院生命機能研究科 <sup>††</sup>国立大学法人大阪大学大学院情報科学研究科

<sup>†††</sup>日本電気株式会社

<sup>†</sup>Graduate School of Frontier Biosciences, Osaka University

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

<sup>†††</sup>NEC Corporation

**研究期間** 平成 23 年度～平成 24 年度

**概要**

省エネで信頼性の高い新世代の ICT インフラを実現するため、極めて低エネルギーで柔軟な「脳の仕組み」を応用した制御技術（変動している通信状況を環境情報として取得し、適応的かつ即時的にネットワーク経路を探索して、エネルギー消費が少ない経路制御を行う技術等）の研究開発を実施することにより、新世代の情報通信ネットワーク制御技術について、基本技術の確立を目指した。本稿では、その成果を述べる。

**1. まえがき**

ネットワークシステムの大規模化、複雑化に伴い、制御に必要な計算量や消費エネルギーは増大の一途を辿っている。また、予期せぬトラヒック変動や故障へ対処するためには、ネットワーク全体に新たな状況の情報を入力して再最適化を図る、あるいは、あらかじめあらゆる環境変動に備える複雑な制御を導入することが必要となるため、結果として、消費エネルギーのさらなる増大を招いてしまう。本研究開発では、脳や生体に見られる桁違いに低エネルギーで柔軟な仕組み、すなわち、大局的な情報交換による全体最適化を行わず、局所的な情報交換によって、予測困難な環境変動にも適応的に動作することが可能な自己組織的制御を応用することにより、省エネで外乱に強いネットワーク制御基盤技術の研究開発を行う。

具体的には、近年、脳や生体に共通して発見され、モデル構築もすでになされている、ゆらぎ制御を活用する。ゆらぎ制御は全体システム制御がプリプログラムされていなくともノイズを活かして環境変動に対して適応的に動作する自己組織型制御であり、全体システム制御を不要とするためにエネルギー消費の著しい低減が実現されるものである。このような特徴を有するゆらぎ制御を、情報通信ネットワーク分野における、第 3 層経路制御に適用することによって、制御に要する計算時間を著しく短縮し、かつ、高信頼、すなわちトラヒック変動や故障等が発生した場合にも、そのような新しい状況に対してネットワーク全体を

対象とした全体最適化を行わなくとも、状況に応じて最適解もしくはそれに近い解を探索することが可能なネットワーク制御基盤技術として確立する。

**2. 研究開発内容及び成果**

前記目標を達成するため、課題 1) 地球規模自己組織型省エネ・高信頼な第 3 層経路制御技術、また、ゆらぎ制御を大規模ネットワークに対して適用可能とするための理論的バックグラウンドを与えるため、課題 2) 階層化に基づくゆらぎ制御に関する研究開発にそれぞれ取り組んだ。

**2. 1. 地球規模自己組織型省エネ・高信頼な第 3 層経路制御技術**

本研究課題においては、単独で 1 万台規模のネットワーク環境での第 3 層経路制御において、現行インターネット等で使用されている経路制御技術に比較して、同 CPU での計算時間を 1000 分の 1 以下に抑え、かつトラヒック変動や故障等の異常事象に対して、自己組織的制御により停止せず適応的に動作し続けるとともに、経路制御における経路の収束時間を現状より短縮し、全体として実用上問題ない良好な解を導出できることを、実機 100 台以上（論理的台数を含む）での動作検証を含むシミュレーション等により示すことを目的とし、研究開発に取り組んだ。以降では、個別課題 (1) 自己組織型有線ネットワーク、および (2) 自己組織型無線ネットワークそれぞれに関する取り

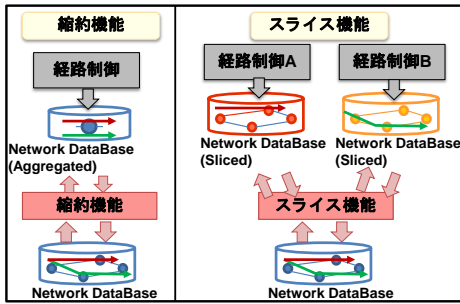


図 1：仮想スイッチシステムによるネットワーク仮想化

組みの成果を示す。

まず、有線ネットワークにおける省エネ・高信頼な経路制御技術の基盤を実現するため、平成 23 年度にドメイン内スライシング技術の確立、及び、仮想ネットワークプラットフォームの開発・実装を行った（図 1）。

ドメイン内スライシング技術は、共通の物理ネットワーク上でサービス毎に異なる経路制御ポリシーを動作させることで適応性を向上させる経路制御基盤構築の要素技術であり、異なるポリシー間で経路制御指示の衝突を回避するものである。本技術を研究開発し、実験により、ネットワークドメインを独立した複数の経路制御機構から制御可能となることを確認した。ドメイン内スライシング技術によってサービス毎にネットワークドメインを仮想化することで、経路制御の周期や、最適化指標、使用するネットワーク情報などの制御ポリシーをサービスに応じて適用することができ、サービス要件毎に必要な制御のみを行うことや、複数の経路制御による制御並列化によって経路制御の計算負荷や適応性の向上を図ることができる。

一方、仮想ネットワークプラットフォームは大規模ネットワークにおける階層化・集中制御型の経路制御プラットフォームであり、ネットワークドメインを一つのノードとして縮約し階層化 OpenFlow ネットワークを構築することで経路制御のスケーラビリティを向上させる。また、仮想ネットワークプラットフォームは大規模な仮想ホストのエミュレーションソフトウェアを含む。研究開発の結果、単一物理ホスト上で 1,000 台超の論理ホストを構成しつつ、単一物理ホスト当り 1Gbps 超のトラフィックを送受信可能なソフトウェアを実現した。さらに、性能評価を実施し、経路制御の階層化を行うことによって上位・下位の経路制御における負荷を抑制することが可能であることを確認した。仮想ネットワークプラットフォームによる経路制御の階層化によって、大規模ネットワークにおいて経路の収束時間を短縮することができる。

さらに、平成 24 年度は上記成果を発展・拡張し、ネットワークドメインの縮約・スライシングを行うネットワーク仮想化基盤である仮想スイッチシステムの開発を行った。仮想スイッチシステムによって物理ネットワークドメイン上に複数の階層化ネットワークを構築することができ、適応的経路制御の省エネ・ロバストという特徴を維持しながらもサービス指向の経路制御を行うことが可能である。また、物理ネットワークの情報をデータオブジェクトとして抽象化することでネットワークの仮想化・経路制御の複雑性を削減しており、ネットワークの知識のないユーザやオペレータであっても仮想化機能をブロックのように組み合わせるだけでニーズに合ったネットワークコントローラを構築可能である。適応的経路制御アルゴリズムや、今後の活動の成果を仮想スイッチシステム上に組み込むことで、本プロジェクトの成果をネットワークの専門家に限らない広範囲のユーザが活用可能となる。

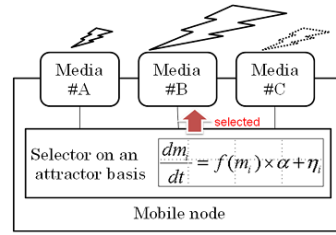


図 2：複数無線インタフェース選択制御

この仮想スイッチシステムによって、物理スイッチ 100 台からなるネットワークドメイン上に最大 100 の仮想ネットワークを作成してその性能を評価した。この評価によって、トポロジ変動等のネットワークの状態変化を 5 ミリ秒以下で検知可能であり、また、経路制御アプリケーションからの経路制御指示を 4 ミリ秒以下で物理ネットワークに反映可能であることを確認した。本結果は、開発した技術が、環境変動に対して適応的に経路制御を行うための情報収集・検知および経路制御設定が可能な経路制御基盤であることを表している。

また、本成果をより広域なネットワークへ適用するために必要な要素技術として、ドメイン間フェデレーション技術の研究開発に取り組んだ。ドメイン間フェデレーション技術は、ドメイン内の制御方式に関わらず、ドメイン間に跨ってトラヒックの混合を回避する技術であり、ネットワークドメインを跨った仮想ネットワーク結合を可能とする。そのため、広域クラウドサービスのように、物理的な広域ネットワークインフラ上に複数の仮想ネットワークが存在する場合においても、ユーザ毎に独立した経路制御が可能となる。本技術をシミュレーションによって評価することにより、ネットワークを跨って 20 以上のネットワークドメインに最大 100 の仮想ネットワークを構築した場合でもトラヒックの独立性を担保できることを確認した。したがって、有線ネットワークについては、ゆらぎ制御による省エネ・高信頼な第 3 層経路制御技術を実機実装するための要素技術が揃ったため、今後、本プラットフォームへのゆらぎ経路制御アルゴリズムの実装と、実機 100 台以上（論理台数を含む）での、計算時間（1000 分の 1 以下）、収束時間の削減、ならびに、高信頼性（80%以上の確率で最適解を導出）の検証を行う。

一方、無線ネットワークについては、大規模な有線統合ネットワーク環境を想定し、エンド間での経路制御における、動的クラスタリングと複数無線インタフェース選択でのゆらぎ制御による省エネ、高信頼化を目的として、自己組織型無線ネットワークの研究開発を進めた。平成 23 年度は、ゆらぎ制御に基づいた省エネ型無線ネットワーク制御アルゴリズムを創出し、計算機シミュレーションによるエネルギーコスト削減効果検証、ソフトウェア試作を用いた実機による動作検証によって、創出したアルゴリズムの有効性を確認した。

具体的には、省エネ型無線ネットワーク制御アルゴリズムについて、まず端末側で動作するゆらぎ制御として、複数無線インタフェースを有する通信端末が、リアルタイムの無線品質情報を基にし、環境変動に適応して最適な経路を選択する無線インタフェース選択制御アルゴリズムを創出した（図 2）。次に、コアネットワーク側で動作するゆらぎ制御として、複数ドメインが相互接続されるネットワークにおいて、端末の移動性に関する情報を基に、環境変動に適応して最適なドメイン構成を動的に選択制御する、無線ネットワークドメインの動的クラスタリング制御アルゴリズムを創出した（図 3）。本アルゴリズムでは、端

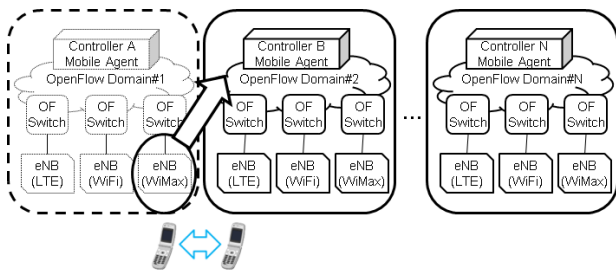


図 3 : 動的クラスタリング制御

末の移動性に伴って発生するドメイン間ハンドオーバーの発生頻度に相当する情報を考慮している。無線端末が、動的クラスタリングによって決定される帰属先ドメインにおいて、無線インタフェースを選択することにより、エンド間の通信経路が定められる。

さらに、平成 24 年度は、環境変動に適応可能な無線ネットワーク制御機構を確立した。具体的には前年度の成果を拡張し、端末の無線インタフェース選択、および無線ネットワークのドメイン変更にゆらぎ制御を適用した複数無線インタフェース選択制御方式、および動的クラスタリング制御方式を確立した。端末の複数無線インタフェース選択制御方式においては、要素技術となる無線インタフェース選択制御アルゴリズムについて、リアルタイムの無線品質情報に加えて、端末の移動、省電力化の指標として、通信端末のクリティカルな環境条件であるバッテリー使用量をゆらぎ制御のパラメータとして追加し、ゆらぎ制御に複数パラメータを導入できるように拡張した。動的クラスタリング制御方式においては、OpenFlow ネットワークに対応拡張した。

ネットワークシミュレータ上に構築した大規模ネットワーク環境で行った検証により、端末 10 万台規模(論理的台数を含む)の大規模ネットワーク環境、および、端末の 100km/h 程度の高速移動に両方式が対応できることを確認した。また、電波状況が急激に変動する環境下において、ビット誤り率の低い無線インタフェースへ失敗なく適応的に切り替えられること、すなわち、変動環境下における 80%以上の確率での最適解導出の実現性が確認できた。さらに、端末のエネルギーコストとして、異種無線ネットワーク間ハンドオーバーによる端末の無線インタフェース切り替えコストを 1/1000 以下に削減できることを確認した。

## 2. 2. 階層化に基づくゆらぎ制御に関する研究開発

第 3 層経路制御技術の研究開発における到達目標を達成するため、本研究課題においては、その理論的裏付けとして、(1)脳や生体における階層構造や適応制御構造の抽出、数理モデル化、および解析、ならびに、(2)階層化ゆらぎ経路制御の研究開発に取り組んだ。(1)においては、複雑ネットワーク解析や統計熱力学などにおける指標を導入した生体データ解析手法を構築し、さらに、細胞内・細胞間の階層的な生体ネットワークにおけるダイナミクスや適応性の解析を行った。(2)においては、1 万台規模のネットワーク環境において、現行インターネット等で使用されている従来の経路制御技術と比較して、250 分の 1、さらに階層化により約 2500 分の 1 の計算量削減効果が得られること、ならびに、簡略化したモデルでの評価により、30%のノードが同時に故障した直後における経路の存在率は、従来手法が約 36%、ゆらぎ経路制御は約 82%であることを確認した。また、階層型ゆらぎ経路制御においては、

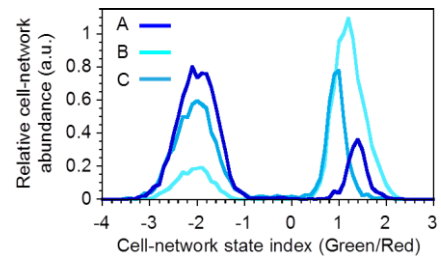


図 4 : 3 つの異なる環境 A、B、C における細胞の状態分布

ドメイン内経路制御がドメイン間経路制御の良さを考慮することで収束時間が向上することを明らかにした。以降ではそれぞれの詳細を述べる。

まず、脳や生体における階層構造や適応制御構造の抽出、数理モデル化、および解析においては、階層化に基づくゆらぎ制御により省エネ・高信頼な第 3 層経路制御を実現するため、平成 23 年度は、脳や生体のデータ抽出、及びデータ解析手法の構築に取り組んだ。具体的には、まず、複雑ネットワーク解析で用いられる次数やクラスタ係数などの指標に加えて、統計熱力学で用いられるエネルギー、エントロピーなどの指標を加えた 40 指標による生体データ解析手法を開発した。

また、生体ネットワークの適応制御のモデル化のために、細胞を題材に、細胞内の遺伝子ネットワーク、細胞間相互作用ネットワークなどの大自由度複雑系について、高精度でのデータ取得に取り組んだ。高自由度ネットワークの平均値ダイナミクスと一細胞一遺伝子レベルの確率分布の取得を行い、その結果、ネットワークダイナミクスの観点から適応メカニズム解明へつながる基礎データが得られた。また、一細胞の確率分布から疑似ポテンシャルを描くことにより、統計力学の手法を用いてそのダイナミクスを解析する、生体データ解析手法を確立した。

さらに、脳や、細胞、免疫系といった生体ネットワークには自己組織的な次元圧縮 (コアース化)、緩い結合による階層構造、ゆらぎの利用、自己再構成などのシステムの詳細によらない普遍的な性質があることを明らかにし、これに基づいて、階層的な適応制御のモデル化のために、コアース化を行う上位層と、実際の制御を行う下位層の 2 層モデルを構築した。本モデルでは、上位層により生成された拘束条件を下位層に投入することで階層間が緩く結合する。このモデルの下では、下位層は与えられた拘束条件に基づき、温度により変化する確率過程 (ゆらぎ) により状態遷移を行う。上位層は、下位層を離散化して観測し、状態間結合のエントロピーに基づいてその主要なパターンを抽出する。さらに、階層的にエントロピーを計算して、下位層の各ノードの温度を決定する。このモデルに基づいて脳や生体のデータを分析することにより、階層的な適応制御の理論的な解析が行えるようになる。

平成 24 年度においては、平成 23 年度の研究成果を踏まえ、脳や生体における階層構造や適応制御構造の抽出、数理モデル化、及び解析に取り組んだ。具体的には、生体ネットワークについて、その適応制御のモデル化のために、細胞を題材に、細胞内の遺伝子ネットワーク、細胞間相互作用ネットワークなどの大自由度複雑系について、人工的な生体適応システムの再構成に取り組んだ。細胞内の遺伝子ネットワークについて、細胞内に二状態安定になるような人工遺伝子ネットワークを構築し、これが環境に応じてその二状態を自発的に変化させることを実験的に示した (図 4)。これまで、細胞状態の確率分布から疑似ポテンシャルを描くことにより、統計力学の手法を用いたダイ



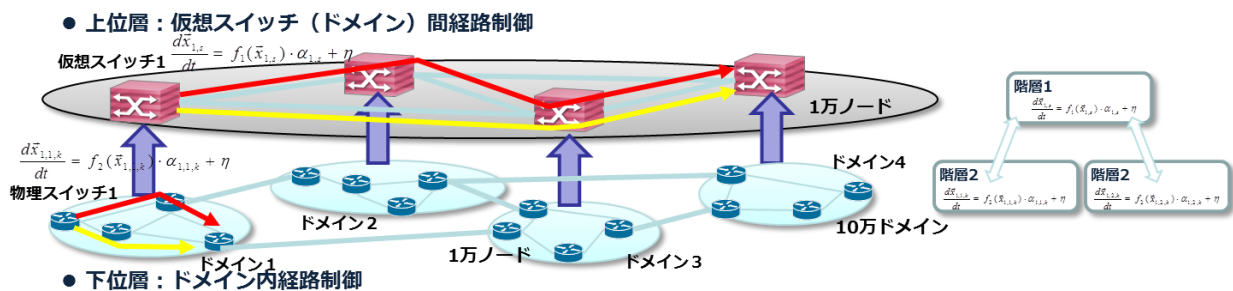


図 6：階層型ネットワークアーキテクチャと階層的なゆらぎ制御モデル

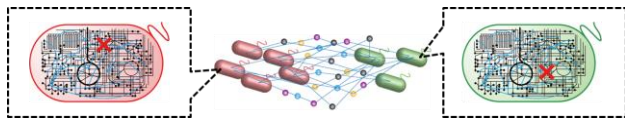


図 5：階層性を持つ人工生体高自由度ネットワーク模式図

ナミクスを解析する手法を確立してあるため、本結果に基づいてポテンシャルのダイナミクスを明らかにし、ゆらぎ制御による第 3 層経路制御における制御式の構造設計に応用する。

また、細胞間相互作用ネットワークについて、その適応ダイナミクスを観察するために、人工的な生体階層ネットワークを実験室内で進化させた（図 5）。その結果、100 世代を超える培養を経て、このネットワークは関係性を強めることが分かった。これは、細胞が、全体の増殖能を向上させるために、階層構造の下で相互作用することによって、環境に適応したことを示している。これまでに、この生体階層ネットワークにおける細胞内の 4000 次元の遺伝子ネットワークの状態を測定することに成功していることから、本結果に基づき、生体階層ネットワークにおける適応的な関係性の強化と生体内ネットワークの変化を解析することによって、階層化に基づくゆらぎ制御の設計指針を構築することができる。

一方、階層化ゆらぎ経路制御の研究開発においては、平成 23 年度は、階層化に基づくゆらぎ制御の特性分析を行うための基本方式検討を実施した。具体的には、まず、有線網においてゆらぎに基づくプロアクティブな経路制御を行うためには、全ノード対間での制御メッセージのやりとりが必要となり、その組み合わせはノード数  $N$  として  $N(N-1)$  となることから、経路の品質を保ちつつ、制御メッセージ量を効果的に削減する手法について検討した。制御メッセージを共用することによって制御メッセージ送出手を抑制する手法を提案し、BA モデルと WaxMan モデルによって生成された 100 ノードからなるトポロジにおいて、複数の手法を組み合わせることにより、オーバーヘッドの約 70% を削減できることを示した。

また、階層化されたゆらぎ制御の環境変動に対する適応性解析のため、この手法を前提とした階層モデルを構築した。具体的には、図 6 に示すようなネットワークの物理的な階層構造に対応付け、ドメイン内のゆらぎ経路制御と、ドメインを仮想化した仮想スイッチからなるスライス内（ドメイン間）のゆらぎ経路制御が階層的に動作する状況を想定し、その間の相互作用のモデルとして、それぞれの階層が独立動作する場合、上位層の経路制御において仮想スイッチに対応する物理ドメインの経路の良さを考慮する場合、下位層の経路制御において物理ドメインに対応する仮想スイッチの経路の良さを考慮する場合、および両階層で相互に経路の良さを考慮する場合の 4 通りを構築した。

平成 24 年度においては、平成 23 年度において実施した、

階層化されたゆらぎ制御の数理モデルの検討結果に基づいて、階層型の適応的経路制御技術の基本設計を行った。本アーキテクチャでは、ドメインネットワークの経路制御は、ドメインを縮約した仮想スイッチ（OpenFlow コントローラに相当）において、定期的に、ドメインネットワーク内の通信状態を収集し、その内容に基づいて、ゆらぎ経路制御の制御式によって個々のドメイン内物理スイッチの経路情報を算出した後、得られた経路情報を物理スイッチに設定することによって実現される。一方、仮想スイッチ間の経路制御は、定期的に、それぞれの仮想スイッチが他の全ての仮想スイッチと経路制御メッセージを交換することによって経路の通信品質を測定し、ゆらぎ経路制御の制御式を計算することで実現される。

さらに、階層型アーキテクチャにもとづいた階層間相互作用についてシミュレーションによる OSPF との比較評価を行った。なお、ゆらぎ経路制御においては、リンク利用率を経路品質の指標とした制御を行う。シミュレーションの結果、下位層経路制御が上位層経路の良さを考慮する場合において、下位層経路制御の収束時間が短くなる傾向があること、ゆらぎ経路制御の平均経路長は、上位層、下位層のいずれにおいても OSPF の平均経路長を上回ること、一方で、ゆらぎ経路制御は OSPF よりもリンク利用率の公平性が高いことを示した。あわせて、リンク利用率を経路品質の指標とすることで、トラフィックデマンドに応じた経路が構築され、負荷分散された経路制御が行えることを明らかにした。このことにより、経路制御の良さ（アクティビティ、活性度）をリンク利用率に基づいて定義し、さらに、下位層の制御式に上位層の制御の良さを含めることで、トラフィック変動やノード故障などに対しても適応的に良好な解を得る経路制御が行えると考えられる。また、10% のノードが同時に故障する条件でのシミュレーション評価では、最適に近い経路が再構築できることを確認している。

また、階層型の適応経路制御の基本アルゴリズムにより 1000~10000 分の 1 程度の計算量削減効果が得られることを確認するため、平成 23 年度に開発した経路制御メッセージ削減手法のもとで、フラットな構造のまま全体最適化を行う OSPF との計算量の比較評価を行った。図 7、図 8 は、ノード数 100~500 の Waxman モデルネットワークを用いて、経路あたりの計算時間の計測を行った結果（度数分布）である。図に示されるように、ゆらぎ経路制御では、ノード数が計算時間に与える影響が小さい一方で、OSPF の経路計算時間はノード数の増加に伴って大きくなり、ゆらぎ経路制御に対しておよそ 1000 倍~10000 倍であることが分かる。

これに基づき、全ノードに対する経路の計算時間を比較したものが図 9 である。それぞれの点は実測値、実線は近似曲線である。10000 ノードのネットワークにおける全ノード間経路の計算時間については、ゆらぎ経路制御と OSPF との間で、約 250 倍の差があることが分かる。したがっ

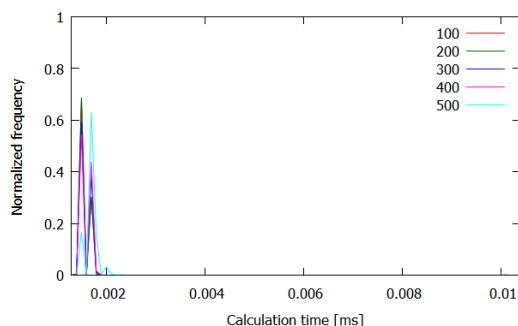


図 7：経路計算時間分布（ゆらぎ）

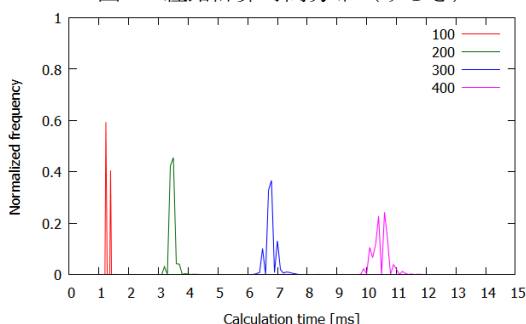


図 8：経路計算時間分布（OSPF）

て、10000 ノードのネットワークを 1000 ノードのドメインを単位として階層構造を構築することによって、約 2500 分の 1 の計算量削減効果が得られると考えられる。特に、トラフィック変動やリンク、ノードの障害が発生する環境下においては、OSPF の経路計算頻度は高くなり計算量が増加する。一方、適応的経路制御手法では、変動の有無によらず経路計算の頻度や時間は変わらない。従って、外乱のある環境においては、より高い計算量削減効果が得られることが期待できる。

また、OSPF では、経路計算が完了するまでは通信が途絶してしまうが、適応的経路制御手法では、変動に対してより高い確率で通信を継続することができる。簡略化したモデルでの評価では、30%のノードが同時に故障した直後における経路の存在率は、OSPF が約 36%、ゆらぎ経路制御は約 82%であることを確認している。したがって、残存経路の最適性については未検証であるものの、本技術により、変動に対して 80%以上の確率での最適解の導出が可能であると考えられる。今後、経路の最適性などに関する詳細なシミュレーション検証を行うとともに、課題 1 で開発したプラットフォームに実装し、実機実験での検証を行う。

### 3. 今後の研究開発成果の展開及び波及効果創出への取り組み

研究成果の社会展開のため、新たなサービス市場の創出を目指し、脳や生体の仕組みを応用した自己組織型ネットワーク制御技術の技術展開（オープン化）を推進する。具体的には、ネットワーク制御ソフトウェアの作成とライブラリ化を行い、高度な知識を有しない人でも容易に利用可能とするために本技術のオープン化を図り、サービス市場の創出につなげる。脳や生体の仕組みを応用したネットワーク制御技術は、適応的かつ即応的に通信経路を探索することが可能であり、大局的な情報交換ではなく局所的な情報交換を行うため、エネルギー消費量が少ないという効果を有している。しかしながら、現状においては、脳や生体の仕組みに関する高度な知識と技術を持たない限り、所望するネットワーク制御を行うことができない。研究開発の成

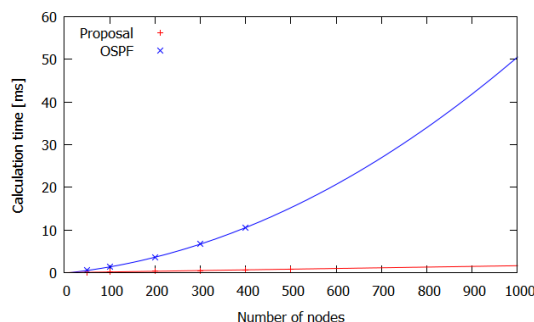


図 9：全ノードに対する経路計算時間の比較

果をオープンに展開することで、より多くのネットワーク技術者に脳や生体の仕組みを応用した技術成果が利用されるようになり、サービス市場の創出に向けた活動が活性化すると予想される。

実用化施策としては、本研究開発で開発したソフトウェアを今後の活動で発展・拡張させ、オープンソースソフトウェア、もしくは自由に利用可能なソフトウェアとして公開することで、研究開発で確立した技術の普及啓発を図るとともに、ビジネス戦略検討のための市場分析の一助とする。自己組織型有線ネットワークの研究成果については、日本電気株式会社が所有する OpenFlow コントローラ上のソフトウェアライブラリとして開発する。日本電気株式会社は製品化した OpenFlow コントローラも所有しており、国内外のネットワークオペレータ等における実用化に向けて、前記ソフトウェアをこの商用コントローラ上に移植可能な形で実装する。また、自己組織型無線ネットワークの研究成果については、一般に利用されている端末への展開を推進するために、開発した成果を Android アプリケーションマーケットに公開する。また将来の端末の動向を睨んだうえで、WebAPI、および次世代 Web 技術 (HTML5) から本技術の利用が容易となるようなソフトウェアライブラリを整備する。なお、すでに、本研究開発の成果技術の成果普及を見据えた取り組みとして、平成 24 年度に「仮想スイッチシステム (OdenOS)」をオープン化を見据えて開発しており、日本電気株式会社社内で公開試験を行うなどの準備を進めている。今後、外部公開を実施することにより、フィードバックの獲得、また成果活用先、ユースケースの検討に活用していく。

一方、標準化施策としては、研究成果のオープン化による国内外への普及を推進することで、本成果の第三者による活用や更なる派生研究の進展を促進し、本技術による国際競争力の強化を図る。自己組織型有線ネットワークの研究開発のベースとして利用する Open Flow は、日本電気株式会社と米国 Stanford 大学との過去数年間にわたる共同研究の成果である。そこで、Stanford 大学との共同研究を通して、本研究開発の成果を強化し、世界に通用する技術的な競争力の獲得を図る。また日本電気株式会社は米国大学との強い連携により、すでに OpenFlow Switch の試作機を北米の 6 大学ならびに 3 研究機関に導入済み、稼働中である。また、OpenFlow コントローラの API については Stanford 大学内に OpenFlow Consortium を 2008 年に設立済みであり、2011 年に Open Networking Foundation が設立されている。これらの協力関係にある研究機関・団体に対して、関係研究者との議論を初めとする技術のアピールを行い、本研究開発の基盤部分の OpenFlow 及び SDN 分野におけるデファクト化に取り組むことで、脳や生体の仕組みを応用した本研究開発成果の普及促進を図る。また、自己組織型無線ネットワークの研

研究成果については、将来の端末の動向を睨んだうえで、端末における複数無線インタフェースの選択方式について API としてのデファクト化を検討する。

予測される波及効果としては、自己組織型有線ネットワークの研究開発の対象である経路制御技術は、世界トップレベルとなるエコロジー技術の確立、ネットワークアーキテクチャの革新を狙う研究投資であることから、この研究開発で得られた成果を広く普及させることで、SDN によるグローバル市場向けインフラ機器事業の拡大や、既存のネットワークアーキテクチャで不可能であった柔軟なネットワークサービスの提供ビジネスの創出、それらに伴う国内アカデミアにおける通信基盤研究の発展等が考えられる。また、自己組織型無線ネットワークの研究成果は、無線ネットワークにおける通信端末のトラフィックが集中するエリアのスループット向上を実現する。本成果は、スマートフォンを始めとする通信端末だけでなく、各種センサ、ゲートウェイ装置等にも適用できる。また、ユースケースとして、通勤、イベント開催、災害時等のトラフィック集中、複数通信事業者間の通信インフラ連携や MVNO (Mobile Virtual Network Operator) 等が挙げられる。

本研究開発の成果技術を活用することにより、緊急性や要求性能が異なる様々なサービスごとの広域仮想ネットワークを構築することができる (図 10)。例えば、放送や電話などの高品質通信、電子メールや web などの非実時間通信、データバックアップなどの大規模非実時間通信などの用途毎、平時や災害時の別、また、一般市民や消防・警察などの利用者毎に、それぞれに応じた通信制御を実施すると同時に、様々な環境変動に対して高信頼かつ超低消費エネルギーなネットワークサービスを提供することができるようになる。さらに、ネットワーク全体で環境情報を共有する必要がないことから、経路情報などの制御情報の秘匿性が高まるとともに、攻撃に対しても頑健になり、ネットワーク自身の信頼性がさらに向上する。

#### 4. むすび

本研究課題においては、脳や生体の環境変動に適応的で超低消費エネルギーな仕組み、すなわちゆらぎ制御を応用することにより、高信頼かつ省エネな第 3 層経路制御の研究開発を行った。ゆらぎに基づく経路制御の動作環境である仮想ネットワークプラットフォームならびにその要素技術を確認し、大規模な物理網上に複数ドメインをまたがる

仮想ネットワークを構築できるようになった。また、無線ネットワークについても、ゆらぎ技術を用いて動的クラスタリング、複数無線インタフェース選択を行うことにより、大規模環境および端末高速移動環境での通信制御が行えること、また、電波状況の変動に対して 80%以上の確率での最適解導出、無線インタフェース切り替えコストの 1/1000 以下への削減効果についても検証した。あわせて、階層的なゆらぎ制御によって 1 万ノード規模のネットワークにおいて約 1/2500 の計算量削減効果が得られることを示した。

今後は、仮想ネットワークプラットフォームでの実証実験ならびに本成果の社会展開を推進する。

#### 【誌上発表リスト】

- [1] Bei-Wen Ying, Shigeto Seno, Fuyuro Kaneko, Hideo Matsuda, Tetsuya Yomo, “Multilevel comparative analysis of the contributions of genome reduction and heat shock to the Escherichia coli transcriptome”, BMC Genomics Vol.14 No.25 (2013 年 1 月 16 日)
- [2] Isao Kubo, Kazufumi Hosoda, Shingo Suzuki, Kayo Yamamoto, Kumiko Kihara, Kotaro Mori, Tetsuya Yomo, “Construction of bacteria-eukaryote synthetic mutualism”, BioSystems Vol.113 No.2 pp66-71 (2013 年 8 月)
- [3] Gen Motoyoshi, Naoki Wakamiya, Masayuki Murata, “Future mobile network management with attractor selection”, IEEE WONS 2012 (9th International Conference on Wireless On-demand Network Systems and Services) (2012 年 1 月 10 日)

#### 【申請特許リスト】

- [1] 小出俊夫、通信システム、制御装置、通信方法、及びプログラム、日本・PCT、2012 年 3 月
- [2] 本吉彦、通信装置、通信方法、及び、プログラム、日本・PCT、2012 年 9 月
- [3] 芦田優太、通信システム、通信方法、制御装置、制御装置の制御方法及びプログラム、日本、2013 年 2 月

#### 【受賞リスト】

- [1] 細田一史、Artificial Life XIII Evolution in action Best Poster, “Experimental evolution of an artificial bacterial mutualism”, 2012 年 7 月 21 日

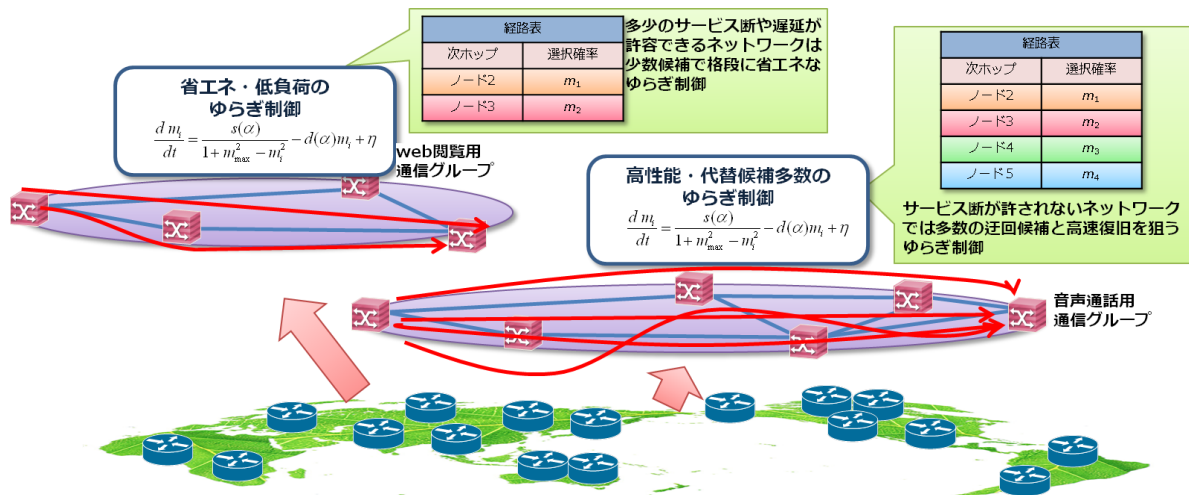


図 10 : 成果技術の活用イメージ