

# 変動する通信状況に適応する省エネなネットワーク制御基盤技術の研究開発 R&D for fundamental technology for energy-saving network control compatible to changing communication status

## 研究代表者

村田正幸 大阪大学

Masayuki Murata Osaka University

## 研究分担者

若宮直紀<sup>†</sup> 寺前順之介<sup>†</sup> 一居哲夫<sup>†</sup> 桐葉佳明<sup>††</sup> 柳生智彦<sup>††</sup>

一圓真澄<sup>††</sup> 本吉彦<sup>††</sup> 加美伸治<sup>††</sup> 小川雅嗣<sup>††</sup> 若山永哉<sup>††</sup>

Naoki Wakamiya<sup>†</sup> Jun-nosuke Teramae<sup>†</sup> Tetsuo Ichii<sup>†</sup> Yoshiaki Kiriha<sup>††</sup> Tomohiko Yagyū<sup>††</sup>

Masumi Ichien<sup>††</sup> Gen Motoyoshi<sup>††</sup> Nobuharu Kami<sup>††</sup> Masatsugu Ogawa<sup>††</sup> Hisaya Wakayama<sup>††</sup>

<sup>†</sup>大阪大学 <sup>††</sup>日本電気株式会社

<sup>†</sup>Osaka University <sup>††</sup>NEC Corporation

研究期間 平成 25 年度～平成 27 年度

## 概要

外乱に強く省エネなネットワーク制御基盤技術を確立するために、きわめて低エネルギーで柔軟な「脳や生体の仕組み」に基づいたゆらぎ制御を活用することによって、事前の予測が困難なトラヒック変動や故障等の異常事象に対しても、適応的かつ即応的に通信経路を探索する、従前に比して飛躍的に高い即応性・柔軟性を有した自己組織型ネットワーク制御技術に関する研究開発を実施した。計算機シミュレーションならびに実機実験によってその有効性を示した。

## 1. まえがき

大規模、複雑かつ変動するネットワークにおいては、膨大な解候補の組み合わせの中から、適応的かつ即応的に最適または最適に近い解を導出し、制御に反映することが求められる。しかしながら、従来手法は専ら大域的情報にもとづく最適化アルゴリズムを用いているため、収集情報量の爆発、計算量の爆発の問題を有している。

本研究開発では、脳や生体における「大域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かつ即応的に対処することが可能な、低エネルギーで柔軟な仕組み」を応用することにより、外乱に強く省エネな、すなわち、トラヒック変動や故障等が発生した場合にも、その状況に基づいた全体最適化を必要とせず、新しい状況に適応して最適解またはそれに近い解を探索することが可能な自己組織型ネットワーク制御技術を確立する。

具体的には、近年、脳や生体に共通して発見され、モデル構築やネットワーク制御への応用の取り組みもなされている「ゆらぎ制御」を活用する。ゆらぎ制御は、様々な事象に対処できるように全体制御がプリプログラムされていなくとも、ノイズを活かすことによっ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る。

このゆらぎ制御を、ビッグデータの流通を支える情報通信ネットワークにおける経路制御に適用することによって、従来手法に比して、制御に要する計算時間を著しく短縮する。さらに、トラヒック変動や故障等の外乱に対しても、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、適応的に通信を継続し、動作し続けるとともに、高い確率で、新しい通信状況において最適もしくはそれに近い経路を探索することが可能な自己組織型ネットワーク制御技術を実現するものである。

## 2. 研究開発内容及び成果

生物システムは、分子から細胞、脳、個体、さらには社

会レベルに至る階層を持つ複雑かつ高次元なダイナミクスを持つシステムである。このような大自由度のシステムが決定論的手法で制御されていると考えるのは、制御すべきパラメータがあまりにも多く現実的でない。実際、これまでの研究によって、生物は、大きなエネルギーを用いて厳密さを追求する方法ではなく、むしろ、ノイズを遮断せずに利用することによって、高次元なシステムを制御していることが分かってきている。

脳や生体、細胞レベルで、その制御機構を説明するのが「ゆらぎ制御」であり、以下の数理モデルが確立されている。

$$dx/dt=f(x) \cdot \text{activity} + \eta$$

$x$  はシステムの状態を表す変数である。この制御式の構成要素のひとつめは制御関数  $f(x)=-dU(x)/dt$  である。ポテンシャル関数  $U(x)$  は、この非線形システムの定常状態であるアトラクターの構造を定めるエネルギー関数である。ふたつめの  $\text{activity}$  は、環境変動に応じてポテンシャル関数を変調させることによって、ノイズによって駆動されるアトラクターの探索を実現するものであり、システムにとっての「都合の良さ」を表す。もっとも重要なものはノイズ項  $\eta$  であり、システムの詳細な構造を記述することなく、高次元システムの次元数を減らした場合においてもシステムが有効に働くことを可能にする。

情報ネットワークにおいては、対象とする情報ネットワークの制御構造を  $f(x)$  で記述し、望ましい安定状態をアトラクターとして表現する。その結果、 $\text{activity}$  によって変調された  $f(x)$  に基づいて、解探索がノイズによって駆動されるようになる。すなわち  $\text{activity}$  は、情報ネットワークにおいては対象となるシステムの性能指標に相当する。

本研究開発では、ゆらぎ制御によって、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も、停止せず適応的に動作し続けるとともに、全体として実用上問題ない良好

な通信相手間の経路を導出できることを、実機 1000 台以上（論理的台数を含む）のネットワークでの動作検証（シミュレーションを含む）において、80%以上の確率で通信相手間の最適な経路又はそれに近い経路を導出できることで示すことを目標とした。

また、従来の基地局と端末のシングルホップ通信技術に比較して、2種類以上の無線通信方式を備えたデバイスが 100 台以上（論理的台数を含む）の規模の無線ネットワークにおいて、データの通信スループットを 10 倍向上できることの実証を目指した。

上記目標を達成するため、以下の三つの研究課題を設定し、研究開発を推進した（図 1）。

課題ア) 自己組織型有線ネットワーク経路制御技術に関する研究開発

課題イ) 自己組織型無線ネットワーク経路選択技術に関する研究開発

課題ウ) 自己組織型階層的ゆらぎ制御に関する研究開発  
その結果、研究開発期間を通して、上記目標、さらにはそれを上回る成果を達成した。

具体的には、課題ア)においては、トラヒック変動や故障等の異常事象に対して、停止せず適応的に動作し続けるとともに、全体として実用上問題ない良好な通信相手間の経路を導出できることを、実機 1000 台以上（論理的台数を含む）のネットワークでの動作検証（シミュレーションを含む）を実施し、80%以上の確率で通信相手間の最適な経路又はそれに近い経路を導出できることを示した。また、ネットワーク制御ソフトウェアを作成し、広域ネットワークで実証実験を実施するとともに、事業化に供するためのライブラリ化を行い、本技術のオープン化を図り、当初の目標を達成した。加えて、トラヒックをストリーム系とデータ系に分離した制御機構を策定することによって、当初の目標を越えた遅延短縮、輻輳回避を実現した。

また、課題イ)においては、トラヒック変動や故障等の異常事象に対して、停止せず適応的に動作し続けるとともに、全体として実用上問題ない良好な通信相手間の経路を導出できる、無線ゆらぎ制御技術を確立した。また、従来の基地局と端末のシングルホップ通信技術に比較して、2種類以上の無線通信方式を備えたデバイスが 100 台以上（論

理的台数を含む）の規模の無線ネットワークにおいて、10 倍以上のデータの通信スループットの向上を達成した。さらに、ネットワーク制御ソフトウェアを作成し、広域ネットワークで実証実験を実施することにより、当初の目標を達成した。加えて、当初の目標を超えて、端末の残電力量を加味したゆらぎ制御方式を確立し、従来技術比 10 倍のスループットを保ちつつ、消費電力を削減し、通信可能時間を向上できることを示した。

さらに、課題ウ)においては、課題ア、課題イの理論的基盤となる自己組織型階層的ゆらぎ制御の定量的特性を解明し、既存手法と比較して 1 万ノード数規模のネットワークにおいて、多数ノードの同時故障など、通信環境の予期せぬ変動に対して、即座に経路を切り替えることで、停止せずに適応的に動作し続けることを示すとともに、基本計画の計算時間を 1000 分の 1 に抑えるという研究目標に対して、最短経路算出に使用されるアルゴリズムに比して、研究目標を大きく上回る、最高で 100 万分の 1 への計算量の削減に成功した。なお、このアルゴリズムについては高速化の研究が進められているが、現在知られている最も速い高速化アルゴリズムに対しても、当初の目標である 1000 分の 1 を達成した。

また、基本計画の研究目標である 80%に対して、ほぼ 100%の確率で、最適解、あるいは最適解の 99%という高い性能の解を発見できることを示し、基本計画の研究目標を大きく超える成果を得た。その上で、さらに将来の階層的ゆらぎ制御機構の基盤メカニズムとなり得る生体や脳での階層的ゆらぎ制御機構を研究し、生体と脳の両者において、それぞれ階層的ゆらぎ制御の基礎メカニズム解明に成功した。また、生体の階層性とゆらぎを安定してモデル化する反応装置の作成に世界で初めて成功した。

以下ではそれぞれの研究課題の研究開発内容と成果の概要を述べる。

課題ア) 自己組織型有線ネットワーク経路制御技術に関する研究開発

現行の IP ネットワークは、予期せぬトラヒック変動や故障等の異常事象に対しては、例えばネットワーク全体に新しい環境情報を入力して経路を再計算する等、復旧のた

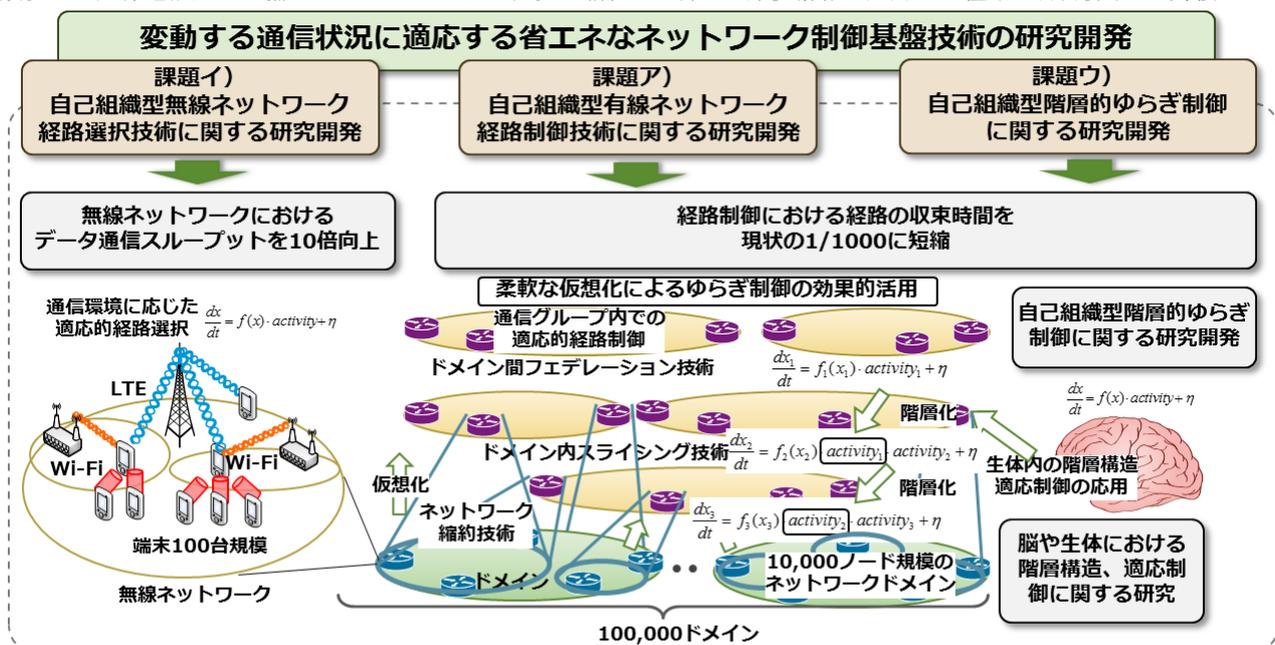


図1. 研究開発の概要

めに必要となる経路計算に対して膨大な計算を行うことで多くのエネルギーを消費する。そこで、本課題では、大局的な情報を用いて全体最適化を行わず、局所的な情報を用いて環境変動に適応的に動作している脳や生体のメカニズムを応用して、有線ネットワークにおける自己組織型省エネ・高信頼な経路制御技術を確立する。

具体的には、1万ノードの規模のネットワークドメインを10万持つようなネットワークにおいて、ネットワーク仮想化技術により、ドメイン内、また、ドメインをまたがる通信グループを構成し、ドメイン内、およびドメイン間で、ゆらぎ制御に基づいた自己組織型経路制御を行う。これによって、トラヒック変動や故障等の異常事象が発生した場合にも、通信グループ内の通信が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探索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経路を導出可能とする。

上記目標の達成のため、以下に挙げる技術の研究開発を行った。

- ・ネットワーク縮約技術：複数の通信ノードを単一のノードへ仮想化する。
- ・ドメイン内スライシング技術：単独で1万台規模のネットワークドメイン内において、複数の通信グループを形成する。
- ・ドメイン間フェデレーション技術：10万ネットワークドメインを持つようなネットワーク環境において、複数のネットワークドメインをまたいで通信グループを形成する。
- ・階層型適応的経路制御技術：階層化されたネットワークにおいて、階層間の相互作用を考慮しつつ通信グループ内で効率的に動作する適応的に経路制御を行う。

研究開発期間を通して、有線ネットワークにおける省エネ・高信頼な経路制御の実現に適した適応的経路制御アルゴリズムの計算式的设计および実装を行うことによって、トラヒック変動や故障等の異常事象に対して、停止せず適応的に動作し続ける、全体として実用上問題ない良好な通信相手間の経路を導出できるゆらぎ制御技術を確立した。本制御技術では、ノードペア毎にあらかじめ経路候補を準備し、以下のゆらぎ制御式によって使用する経路を選択する。

$$dm_i/dt = s(\alpha) / \{1 + (m_{\max})^2 - (m_i)^2\} - d(\alpha)m_i + \eta_i$$

なお、

$$m_{\max} = \max m_j, \quad s(\alpha) = \alpha(8\alpha^2 + 1/\sqrt{2}), \quad d(\alpha) = \alpha$$

ここで  $m_i$  は経路候補  $i$  の良さを表すスコアであり、最も高いスコアの経路を選択、使用する。 $\alpha$  は activity であり、使用経路の遅延によって与えられる。

上記ゆらぎ制御技術において、従来の経路制御手法であるダイクストラ法との性能比較性能評価を行うことによって、ゆらぎ制御技術が、従来技術では実現不可能な、80%

以上の確率で通信相手間の最適な経路又はそれに近い経路を導出できる技術であることを確認した。さらに、スイッチ 40 台のネットワーク模擬システムにて評価を行い、従来手法であるダイクストラ法では経路が収束しない変動環境において、提案手法では安定した経路選択が可能となることを確認した。また、提案手法は、ダイクストラ法に比べ遅延性能で 80%以上を維持しながら、計算量をノード 40 台規模で7分の1に抑えられることを確認した。

また、複数のドメインから構成されるネットワークを、ドメイン間・ドメイン内の二階層に分割してそれぞれで適応的経路制御を行うことでより大規模なネットワークでも低計算量で状態変動に適応可能な、階層的適応的経路制御アルゴリズムの設計と実装を行った。実機 1000 台以上（論理的台数を含む）のネットワークでの動作検証（シミュレーションを含む）を行い、1000 台規模の大規模ネットワークでも実用上問題無く動作するゆらぎ制御技術を確立した。

さらに、1ドメイン 50 ノード、全 20 ドメイン（合計 1000 ノード）で構成された広域ネットワークにおいて階層型経路制御の評価を行い、フロー遅延での評価結果では、提案手法が経路収束まで遅延が変動しているが、収束後は安定した通信が実現できている一方、既存のダイクストラ法（推定遅延をコストした最小コスト経路選択）では、常に経路が変動しているためフロー遅延も終始安定しない結果を示した。また、CPU 使用率での評価結果では、提案手法では、ドメイン内コントローラ 20 台の合計でも 50~100%程度の負荷であるのに対し、ダイクストラ法では 200%と数倍の計算負荷がかかっていたことを示した。

また、有線制御（課題ア）、無線制御（課題イ）を統合した有無線環境を活用した大規模イベントにおけるスタジアムでの観客への高品質な無線 LAN 提供サービスについての検討を行い、有無線統合制御システムの設計、実装、ならびに、ゆらぎを活用した有線ネットワーク制御ソフトウェアを作成した。

通信端末 100 台以上が存在する無線ネットワークおよび仮想スイッチ 8 台、仮想ホスト 2 台の有線ネットワークからなる実機ネットワーク環境を用いた実証実験により、仮想ホスト間の背景負荷の発生による通信品質変化に対して、ゆらぎ制御により適切に有線経路切替えが行われ、通信品質が改善し、実用上問題無く動作することを確認した（図 2）。

さらに、スタジアムソリューションを想定した評価実験を行った（図 3）。ユーザトラヒックとして遅延に厳しいストリーム系トラヒックと、それ以外のデータトラヒックを想定し、それぞれの特性に応じた経路制御を独立に行う制御機構を確立することによって、約 75%の遅延短縮、輻輳状態の 30%以上削減を実現し、当初の目標を越えて達成した。また、フロー平均遅延での評価により、ダイク

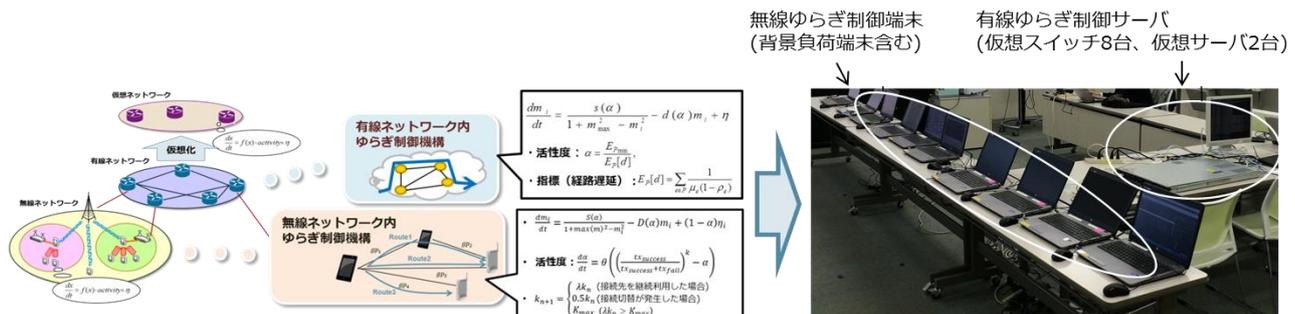


図2. 有無線統合制御システム

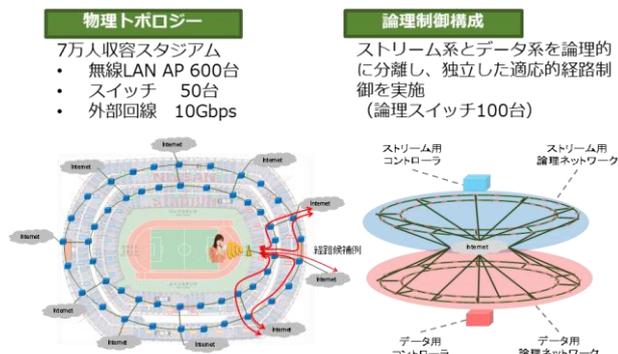


図3. スタジアムソリューションを想定した実験ネットワーク

ストラ法（ホップ数最小経路選択）と比較し、ストリームとデータトラフィックを分けない適応的経路制御（単一制御）でも 55%の遅延短縮、ストリームとデータを分離した独立制御では単一制御よりさらに 24%遅延短縮、さらに、データよりもストリームに対して有利な経路候補を設定したストリーム優先制御ではさらに 54%の遅延短縮を実現した（全体で約 75%遅延短縮）。さらに、各リンクの単位時間あたりの利用率の評価では、ストリーム優先制御は、トラフィックを各経路に適切に分散し、リンク利用率が 90%を超える輻輳状態を 35%以上削減した。

課題イ) 自己組織型無線ネットワーク経路選択技術に関する研究開発

近年、無線通信インフラと通信端末が互いに進化を続ける中で、膨大な情報を扱えるスマートフォンを始めとする通信端末の急増に伴い、流通するトラフィックの爆発的な増加が深刻な課題となってきている。今後のトラフィックの爆発的な増加に対応するためには、トラフィックが集中するエリアにおける通信端末のスループット向上が課題となる。特に近年は、さまざまな種類のネットワークを効率的に活用することが、ますます重要になると考えられる。そこで本課題では、端末の無線インタフェース選択、および集約端末選択にゆらぎ制御を適用し、外乱に強く省エネな自己組織型ネットワーク制御技術として、自己組織型無線ネットワーク経路選択技術に関する研究開発を行う。

具体的には、下記の二つの制御機構の組み合わせにより、2種類以上の無線通信方式を搭載した通信端末が 100 台以上（論理的台数を含む）存在する無線ネットワーク環境において、1種類の無線通信方式を用いた従来の基地局と通信端末のシングルホップ通信技術と比較して、データ通信のスループットを 10 倍に向上する。

- 複数無線通信インフラ利用機構：多様化する無線アクセスを有効活用する。通信端末に搭載される 2 種類以上の無線インタフェースを利用して、3G、LTE、WiMAX、無線 LAN 等の複数の無線通信インフラに適応的に接続することにより、利用可能な無線アクセスを拡大する。
- 端末間パケット集約機構：通信端末が密集するエリアにおける端末余剰リソースを有効活用する。通信端末同士で適応的に連携し、ある通信端末において複数の通信端末のパケットを 1 つに集約することにより、無線帯域の利用効率を向上する。

研究開発期間を通して、無線ネットワークにおける省エネ・高信頼な経路制御の実現に適した適応的経路制御アルゴリズムの計算式的设计および実装を行うことによって、トラフィック変動や故障等の異常事象に対して、停止せず適応的に動作し続け、全体として実用上問題ない良好な通信

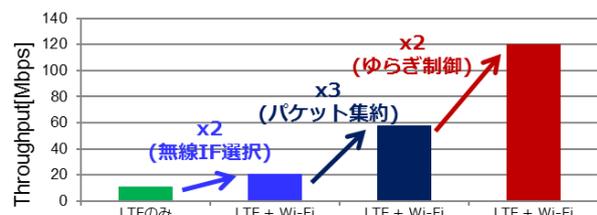


図4. 無線通信スループットの向上

相手間の経路を導出できるゆらぎ制御技術を確認した。

経路選択機構として、無線インタフェース選択、および経路上で端末間パケット集約を行う集約端末選択を統合的に扱う複数無線通信インフラ制御技術を確認した。本制御技術を活用することで、AP/eNB（基地局）への負荷を分散するよう各通信端末が自律動作することにより、通信端末が 100 台以上存在する無線ネットワーク環境において、従来技術と比較して、通信スループットが 10 倍向上することを計算機シミュレーションによって検証した。これにより、従来の基地局と端末のシングルホップ通信技術に比較して、2種類以上の無線通信方式を備えたデバイスが 100 台以上（論理的台数を含む）の規模の無線ネットワークにおいて、データの通信スループットを 10 倍向上できることを実証した（図 4）。

なお、ゆらぎ制御においては、課題アと同様の制御式を用いている。無線ネットワークでは、利用可能な無線通信インフラや近隣端末が経路候補に相当し、それぞれにスコア  $m_i$  が与えられる。また、制御の良さを表す activity  $\alpha$  は、無線ネットワークの特性を考慮し、継続的にスループットを得られることと、高いスループットを得られることを反映して導出される。

また、ゆらぎを活用した無線ネットワーク制御ソフトウェアを作成し、課題アで述べた実機ネットワーク環境を用いた実証実験を行うことにより、無線アクセスポイントへの背景負荷の発生による通信品質変化に対して、ゆらぎ制御により適切に無線経路切替えが行われ、通信品質が改善し、実用上問題無く動作することを確認した。

さらに、無線端末の残電力量をさらに加味したネットワーク経路選択方式へと拡張した。接続先候補を選択する際、極力残電力量の多い端末が、消費電力量の高い中継処理を処理するように接続先を割り当てることで、端末間での通信機会の公平性を改善しうる手法を確認した。また、性能評価の結果、残存電力量の少ない端末の消費電力量を抑えるように接続先ネットワークを選択することで、消費電力量を 2.5%削減し、これにより通信可能時間を 2.5%延長できることを示した。

課題ウ) 自己組織型階層的ゆらぎ制御に関する研究開発

システムの大規模化に対し、ゆらぎ制御自体を階層化することが有効であるが、対象システムの特性に合わせた階層的ゆらぎ制御とその階層間結合のあり方に関する検討と課題アと課題イに資する基本理論の構築が必要不可欠である。

そこで、本課題では、すでにモデル化、応用されているゆらぎ制御の階層化と階層的ゆらぎ制御の設計指針の確立に取り組んだ。また、構造的、機能的な階層構造を有する脳や生体が進化の過程で自己組織的に獲得した、外乱に強く省エネな階層的なゆらぎ制御の解明に取り組んだ。

まず、階層的ゆらぎ制御の定量的特性解明においては、ドメインネットワーク内でのゆらぎ経路制御と、ドメインネットワークを仮想化・フェデレーションすることで構成

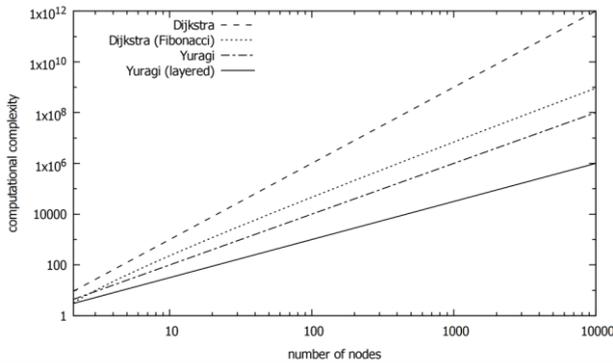


図5. ゆらぎ制御による計算量削減

される広域グループネットワーク内でのゆらぎ経路制御が同時に動作する階層的なゆらぎ経路制御について、数十ノード規模の小規模ネットワーク（ドメインネットワークや広域グループネットワークに対応）から一万ノード規模の大規模ネットワークを対象としたシミュレーションと数値解析を行い、その特性を解明した。

具体的には、10%のノードの同時故障に対して、即座に経路切り替えを行い、最短経路を用いる手法や遅延最小な経路を選ぶ手法と同程度、あるいはより小さい遅延を安定的に実現できること、また、activityを共有するゆらぎ制御によって、約50%の確率で最適解を発見でき、残りの50%においても最適解に対して約99%の性能の極めて最適に近い解を発見できること、さらに、既存手法での経路計算量  $O(N^2 \log N) \sim O(N^3)$  に対して、階層化したゆらぎ制御によって  $O(N^{1.5})$  まで計算量を削減できることを確認した（図5）。

なお、階層的ゆらぎ制御においては、上位層（広域グループネットワーク内でのゆらぎ制御）と下位層（ドメインネットワーク内でのゆらぎ制御）で互いに他方の activity (activity') を組み込んだ次式によって、単一パラメータを介した緩やかな階層間相互作用が生まれる。

$$dx/dt = f(x) \cdot \text{activity} \cdot \text{activity}' + \eta$$

なお、上位層のノード（ドメインネットワークを仮想化した仮想ノード）では、対応するドメインネットワークでの activity の平均値を activity' として用い、下位層のノード（物理ノード）では、対応する仮想ノードで管理する経路の activity の平均値を activity として用いる。

このような階層的ゆらぎ制御の応用にあたっては、送受信ノード対にリンクやノードに関して素な候補経路をゆらぎ制御で選択するとともに変動に応じて入れ替えること、経路選択においては局所的に把握できる他の経路のアクティビティの平均値を掛け合わせることで、上位層制御の制御周期を下位層制御の10倍程度に設定することが、収束性、最適性、安定性、適応性の観点で有効であることを明らかにし、階層的ゆらぎ制御による経路制御の設計指針とした。

次に、生体の階層的ゆらぎ制御解明においては、生体の階層性とゆらぎを安定してモデル化する反応装置の作成に世界で初めて成功した。さらに、この装置を用いた生化学実験と理論モデル研究によって、階層性とゆらぎがある中で遺伝情報の複製と維持に必要な制御原理を解明した。

具体的には、生体の階層性とゆらぎをモデル化する反応装置として、攪拌槽内の微小水滴内で、人工的な RNA 複製反応を長時間にわたって維持する反応装置の開発に、世界で初めて成功した。さらに、実験を通じて、生体を模した液滴内での、遺伝子情報の安定した複製には、階層性を

利用したゆらぎ制御が重要であることを明らかにした。すなわち、第一にケモスタットとしてモデル化できる自律的・適応的な定常態が生じること、第二に、阻害的な副産物によって主となる情報の複製が阻害され少なくなると、階層による情報の分配の確率的なゆらぎの効果が大きくなり、副産物の影響を脱する情報が生じることで複製の持続が可能になることを明らかにした。

さらに、脳の階層的ゆらぎ制御解明においては、大脳皮質階層構造の実験データに基づく大規模ネットワークモデルの作成に成功した。このネットワークでの神経発火活動のシミュレーションにも成功し、数値解析と統計解析により以下の解明に成功した。

具体的には、大脳皮質の階層構造は、局所的なクラスタ性によって特徴づけられることが知られていたが、そのクラスタ性は、脳が大域的なスモールワールドネットワークの特性を持つことを世界で初めて示し、クラスタ性がその帰結であることを発見した。また、このスモールネットワーク性は、シナプス結合が強い神経結合ネットワークのみで特異的に実現することを発見した。さらに、クラスタ性と抑制性神経細胞からのシナプス結合分布のバランスが、脳のゆらぎ制御機構の実体であり、抑制性神経活動の不均一性によってゆらぎ調整が実現されていることを世界で初めて発見し、このゆらぎ調整によって、神経細胞の入出力応答が直線的応答から指数関数型応答に変化することを示した。

### 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

総合プロデューサ、NEC ビジネスプロデューサ、大阪大学ビジネスプロデューサの密な連携によって、「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（ゆらぎ制御技術）をより効果的な技術として確立し、変動する通信状況に適応する省エネなネットワーク制御基盤の利活用による新たなサービス市場の創出を目指す活動を実施した。

具体的には、今後の新たなサービス市場の創出に向けた計画を明確化する取組として、3段階のゆらぎ制御技術の利活用サービスを創出した。まず、通信キャリア等の想定顧客からのヒアリングを経て、ゆらぎ制御技術の技術展開を進めるビジネスモデル戦略を検討し、ゆらぎ制御技術がもっとも効果を発揮する利用シーンとして、現行のスタジアムネットワークソリューションへの適用サービスを創出した。次いで、5G 及びその将来像の中に「ゆらぎ制御」の重要性を見出し、5G サービスの2020年を目指した大規模スポーツイベントでの適用サービス、および、さらに将来の Beyond 2020 への仮想システムでのゆらぎ制御応用サービスを創出するとともに、それらのサービス展開シナリオを作成し、ゆらぎ制御技術の展開戦略を策定した。

現行スタジアムネットワークソリューションへの適用サービスとしては、人の移動や競技の進行状況に応じて、通信状況が大きく変動するという特徴を有するスタジアム環境で、「ゆらぎ制御」を適用することで、安定した通信環境を迅速かつ低コストで提供することを目指す。また、スタジアム運営においては、監視システム・映像表示システム・通信・電話・付帯設備監視など様々な機能・サービスを支える必要があり、それらの利用形態に応じてネットワークインフラを効率的に制御する「ゆらぎ制御」によってその必要性を満たすことができる。

また、2020年を目指した大規模スポーツイベントでの適用サービスとしては、多数のイベント参加者の誘導アプ

リ、会場内でのモバイル SNS サービス、さらにドローンによる映像中継制御などにおいて「ゆらぎ制御」を適用することによって、膨大な制御対象、変動する通信要求やトラフィックに対する効果的な制御が実現可能である。

さらに、Beyond 2020 の仮想システムでの応用サービスとしては、仮想化技術によってシステムあるいはネットワークの構成自体が容易に動的に変動し、制御対象自体が動的に変化する、といった次元が異なる複雑系となるとともに、M2M/IoT の展開によって制御対象数が膨大な数となる状況を想定し、「ゆらぎ制御」の特徴を最大限活かした制御を実現する。

今後は、ゆらぎ制御技術のオープン・クローズ戦略のもとで、これらサービスの着実な事業化を推進する。成果展開のインパクトの大きさと、セキュリティリスクの低減の両者を考慮した上で、有線制御技術（課題ア）は、プロジェクト外部へのソフトウェア提供が容易となるよう、OSS（Open-Source Software）版 SDN（Software-Defined Networking）プラットフォーム上で動作するモジュールとして活用することで普及させる（オープン戦略）。現在、開発した適応的経路制御システムの制御モジュールのライブラリ化を行い、ハンズオン講習会などを通じて本技術のオープン化を図っている。

一方、無線制御技術（課題イ）は、端末間通信ソフトウェアのプラットフォームへの組み込み（2018 年ターゲット）を想定し、かつ、不用意なソフトウェア公開によるセキュリティリスク拡大を防止するべく、戦略的なパートナー連携（クローズ戦略）を進めている。

さらに、ゆらぎ制御技術の SDN ネットワーク制御機能としての展開を想定し、オープンフローコントローラーのメジャーな実装である ODENOS をベースとした「ゆらぎ制御」モジュールの提供により、ゆらぎ制御技術の知財活用を進める。

#### 4. むすび

研究開発期間を通して、ゆらぎ制御を適用することにより、現行技術に比して 1000 分の 1 以下の計算時間で 80% 以上の確率で最適またはそれに近い経路を導出できる有線ネットワーク経路制御技術、ならびに従来のシングルホップ通信技術に比して 10 倍のデータ通信スループットを達成する無線ネットワーク経路制御技術を確立し、実機実験によってその有用性、有効性を示した。また、階層構造を持つネットワーク制御への応用のため、階層的なゆらぎ制御の設計指針を定めるとともに、脳や生体における階層的なゆらぎ制御の基本メカニズムを解明した。

今後はゆらぎ制御技術のオープン化による普及、利用の促進と、事業化・製品化を推進する。

#### 【査読付発表論文リスト】

- [1]E. Takeshita and N. Wakamiya, “Adaptive multipath routing for large-scale layered networks”, Proceedings of Asia-Pacific Network Operations and Management Symposium (APNOMS) pp221-226 (2015 年 8 月 20 日)
- [2]J. Teramae and N. Wakamiya, “Brain-inspired Communication Technologies: Information networks with continuing internal dynamics and fluctuation”, IEICE Transactions on Communications Vol. E98-B No.1 pp153-159 (2015 年 1 月 1 日)
- [3]N. Onzuka, N. Wakamiya, and M. Murata, “Robust and lightweight routing with attractor

selection”, Proceedings of World Conference on Information Technology (WCIT 2013) pp105-115 (2013 年 11 月 26 日)

#### 【取得特許リスト】

- [1]若山永哉、無線通信装置、無線通信方法、無線通信プログラム、および情報通知システム、PCT 国際出願、2015 年 1 月 15 日
- [2]芦田優太、通信システム、通信方法、ネットワーク情報結合装置、処理規則変換方法および処理規則変換プログラム、PCT 国際出願、2014 年 10 月 16 日
- [3]宮尾泰寛、ネットワークシステム、制御装置、制御方法およびプログラム、PCT 国際出願、2014 年 12 月 16 日

#### 【受賞リスト】

- [1]T. Nakao, J. Teramae, and N. Wakamiya, 9th EAI International Conference on Bio-inspired Information and Communications Technologies Best Student Paper, “Biologically-inspired adaptive routing protocol with stochastic route exploration”, 2015 年 12 月 4 日