

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)

代表研究責任者 村田 正幸 国立大学法人大阪大学大学院情報科学研究科
研究開発期間 平成 23 年度～平成 24 年度

...

【Abstract】

In this research, to realize a new generation ICT infrastructure which is energy conserving and reliable, we developed novel networking technologies by making use of operating principles of the brain and living organisms. Brain and biological systems does not optimize themselves by using the global information. Instead, they can find a near- or sub-optimal solution in an energy-efficient and reliable manner through local information exchanges, even under dynamically and unexpectedly changing environment. Our routing mechanism can compute routes in one thousandth of time which a conventional mechanism requires. Furthermore, it can maintain routes suitable for practical use when exposed to unexpected traffic changes and failures. We proved the performance and practicality of our system through simulation and experiments involving 100 nodes. We made control software and made a library for public and open use of developed technologies.

1 研究開発体制

- **代表研究責任者** 村田 正幸 (国立大学法人大阪大学大学院情報科学研究科)
- **研究分担者** 西原 基夫 (日本電気株式会社クラウドシステム研究所)
- **研究開発期間** 平成 23 年度～平成 24 年度
- **研究開発予算** 総額 300 百万円

(内訳)

平成 23 年度	平成 24 年度
205 百万円	95 百万円

2 研究開発課題の目的および意義

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、適応的かつ即応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す。

本研究開発では、脳や生体に見られる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によって、省エネルギーでかつ高信頼、すなわち、トラフィック変動や故障等が発生した場合にも、その状況をネットワーク全体に再入力し全体最適化をしなくとも、新しい状況に適応して最適解又はそれに近い解を探索することが可能な大規模ネットワーク制御基盤技術を確立する。具体的には、早期の実現が求められているビッグデータ用仮想化ネットワークへ適用できる自己組織型の省エネ・高信頼な経路制御技術の基礎技術に関する研究開発を行う。

3 研究開発成果

3. 1 課題ア-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

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、かつトラフィ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。なお、シミュレーションを含む動作検証において、80%以上の確率で最適解を導出できることを示す。また、制御ソフトウェアを作成し、実用に供するためのライブラリ化を行い、開発技術のオープン化を図る。

(1) 自己組織型有線ネットワークの研究開発

省エネ・高信頼な経路制御技術の基盤を実現するため、まず平成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。

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ことが可能な経路制御基盤構築の要素技術であり、異なるルーティングポリシー間で経路制御指示の衝突を回避する。この技術をもって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並列制御化によって経路制御の計算量負荷や適応性の向上に寄与する。

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。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、単一物理ホスト当たり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。これら仮想ネットワークプラットフォームを用いた性能評価を実施し、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の短縮に寄与する。

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。仮想スイッチシステムは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。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、環境変動に際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確認した。

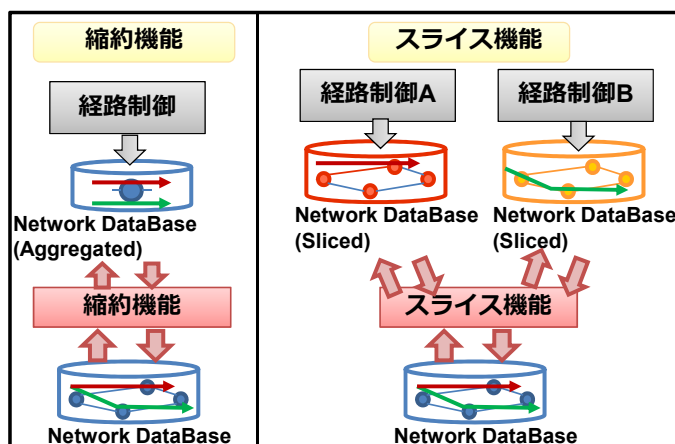


図 3.1.1：仮想スイッチシステムによるネットワーク仮想化

また、上記の成果をより広範囲の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確立を行った。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し、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。

これにより、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（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。なお、これらについては、課題ア-2 において、シミュレーションを用いた検証を行っている。

これらの研究成果に関わる技術に関しては対外発表を行い、技術のオープン化を図るとともに、特に仮想スイッチシステムに関しては今後実用に供するため、上述のように幅広いユーザに提供可能な設計でソフトウェア化を行った。後継プロジェクトなどの活動において、モデルの整理や知的財産権の取得を今後も継続するとともに関連団体との議論を進め、成果の普及に努める。

(2) 自己組織型無線ネットワークの研究開発

ゆらぎ制御を適用した無線ネットワーク制御による自己組織型無線ネットワークの研究開発を進めた。本研究課題は、大規模な有無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（これらによりエンド間の経路が変化）でのゆらぎ制御による省エネ、高信頼化を目的として、研究者らが新たに設定したものである。

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。

省エネ型無線ネットワーク制御アルゴリズムとして、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。制御概要イメージを図 3.1.2 に示す。

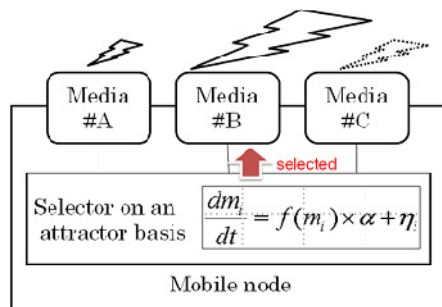


図 3.1.2：複数無線インタフェース選択制御

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して、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。本アルゴリズムでは、端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。制御概要イメージを図 3.1.3 に示す。

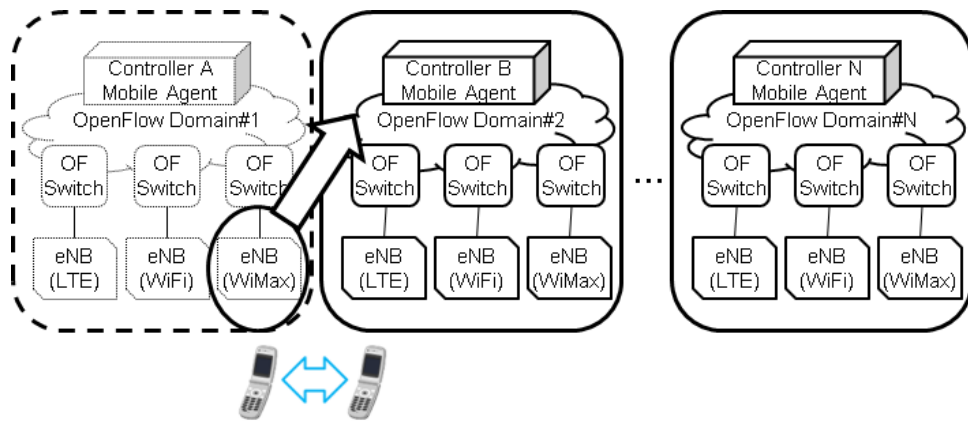


図 3.1.3 : 動的クラスタリング制御

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。また、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。

3. 2 課題アー2 階層化に基づくゆらぎ制御に関する研究開発

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示す。

研究開発の到達目標の達成のため、(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、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。

(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

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 3.2.1）。これまでに、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。

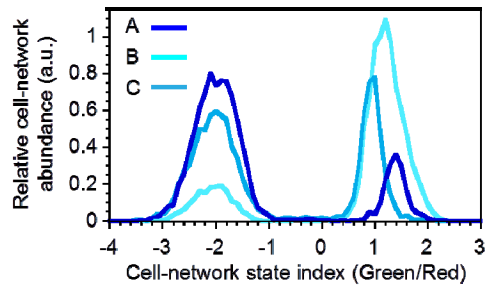


図 3.2.1 : 3つの異なる環境 A、B、Cにおける細胞の状態分布

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 3.2.2)。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が示される。

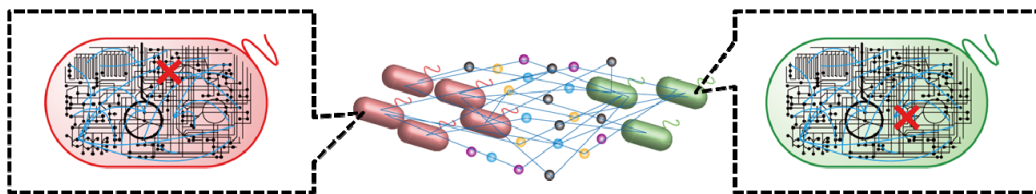


図 3.2.2 : 階層性を持つ人工生体高自由度ネットワークの模式図

今後、これらの成果に基づいて新たに階層的なゆらぎ制御モデルを構築し、ネットワーク仮想化技術によって階層化された大規模ネットワークにおける第3層経路制御への適用に取り組む。

(2) 階層化ゆらぎ経路制御の研究開発

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、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 3.2.3 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。

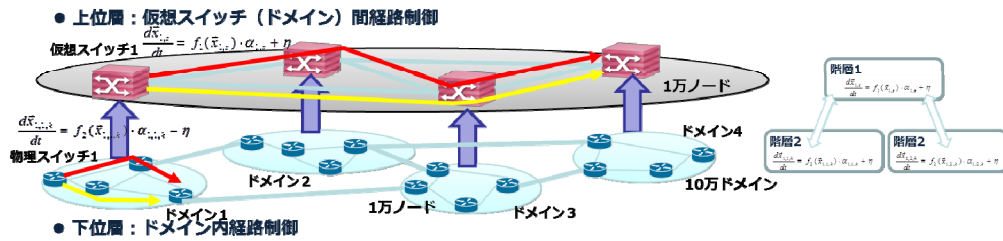


図 3.2.3 : 階層型ネットワークアーキテクチャと階層的なゆらぎ制御モデル

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値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 1000~1 万分の 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 3.2.4 は、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 3.2.5 である。それぞれの点は実測値、実線は近似曲線である。

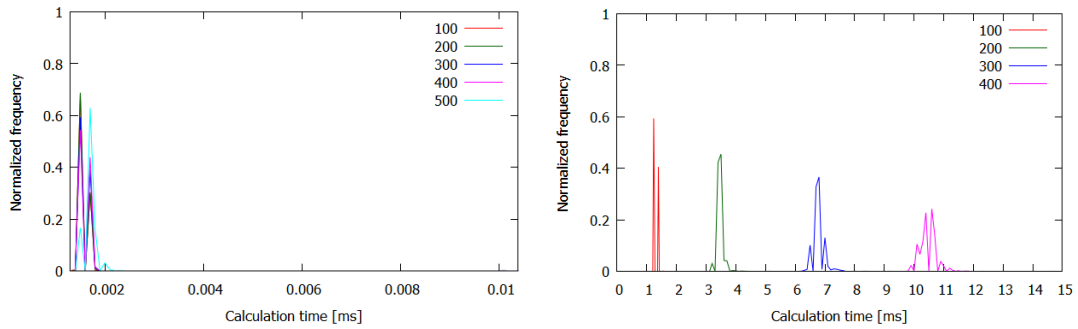


図 3.2.4：経路計算時間分布（左：ゆらぎ、右：OSPF。ノード数 100～500）

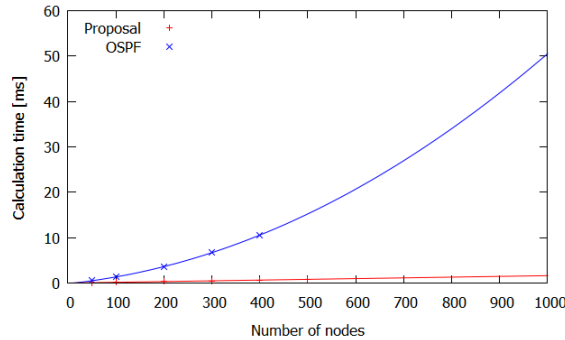


図 3.2.5：全ノードに対する経路計算時間の比較

10000 ノードのネットワークにおける全ノード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。したがって、10000 ノードのネットワークを 1000 ノードのドメインで階層構造にすることによって、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、変動に対する 80%以上の確率での最適解導出の実現性が確認できたものと考えられる。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、課題ア-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. 3 研究開発成果の社会展開のための活動実績

○対外アピール活動について

本研究成果を広く一般に公開するため、IEEE WONS、ACM SIGCOMM などの国際会議（計 4 件）、電子情報通信学会などの国内学術集会（計 18 件）などの会議において研究成果を発表した。

国際会議 6th International ICST Conference on Bio-Inspired Models of Network, Information, and Computing Systems (Bionetics 2011) においてスペシャルセッション “Brain inspired networking” を、また、国際会議 2012 International Symposium on Nonlinear Theory and its Applications (NOLTA

2012) において、スペシャルセッション “From Brain Functions to Information and Communication Technology” をそれぞれ企画、開催するなど、当該研究分野の活性化に努めた。

また、課題アの有線経路制御の研究開発においてベースとして使用している OpenFlow に関して、参画企業である日本電気株式会社は、既に ProgrammableFlow として OpenFlow コントローラ、スイッチともに商用化しており、Interop や Open Networking Summit など、国内外の展示会、会合において普及促進活動を活発に行っている。また、日本電気株式会社は OSS である OpenFlow コントローラ開発プラットフォーム : Trema の主要なコード提供者でもある。Trema は日本電気株式会社だけでなく他社で利用されている実績があり、日本電気株式会社は社外の研究者や事業者が利活用可能な形でも OpenFlow の普及活動を行っている。本研究課題の成果はこれら普及活動を既に行っているプロジェクトに展開可能であるように設計しているため、既に普及している OpenFlow 関連のプロジェクトを活用する形で成果の普及を加速化することができる。

○運営委員会について

研究開発の実施に当たって、外部の学識経験者、有識者による運営委員会を構成、開催し、関連する要素技術間の調整、成果の取りまとめ方等、研究開発全体の方針について幅広い観点から助言を頂くと共に、実際の研究開発の進め方について適宜ご指導を頂いた。

運営委員会構成

大阪大学 柳田 敏雄 様 (座長)
九州工業大学 尾家 祐二 様 (副座長)
NTT 西日本 木村 丈治 様
日立製作所 高瀬 晶彦 様
KDDI 研究所 安田 豊 様
慶應義塾大学 山中 直明 様

開催日時

平成 23 年 9 月 26 日 (月) 13:00~17:00
平成 24 年 4 月 25 日 (水) 13:00~17:00
平成 25 年 1 月 31 日 (木) 10:00~12:00

4 研究開発成果の社会展開のための計画

本研究開発における成果は、平成 25 年度の総務省委託研究テーマ「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」において継続して研究開発を推進する。よって本研究開発成果の社会展開について、上記の後継研究開発において継続して取組を推進する。

研究成果の社会展開の方針としては、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を使っていただけることになり、サービス市場の創出に向けた活動が活発化すると予想される。そのために、後継研究開発プロジェクト期間中に市場調査・分析を行い、オープン化を推し進めるなかでの、活用可能な知財を確保するための具体的戦略の立案、およびビジネスモデルの戦略の立案を行う計画である。

上記の方針をふまえ、社会展開に向けた現時点における具体的な取り組み計画を以下の表に示す。評価項目については、「OSS のコミュニティに参加している組織数」、「アプリケーションダウンロード数」を想定しているが、後継研究開発プロジェクト最終年度までに、各評価項目についての数値目標を決定する計画である。

表 4.1：研究成果の社会展開計画

取組時期	年度	目的	取組計画	評価項目
プロジェクト期間中	2013~2014	市場動向調査・分析	・市場動向調査 ・オープン・クローズド戦略立案	・分析/戦略の妥当性
プロジェクト最終年度およびプロジェクト終了後(1~2年後)	2015~2017	市場反応調査・分析 分析結果に基づく方針決定・仮説立案	・ビジネスモデルの検討・戦略立案 ・OSS 化、アプリのマーケット公開 ・実環境でのトライアル実施	・トライアル件数 ・OSS のコミュニティに参加している組織数 ・活用された特許件数 ・アプリダウンロード数
プロジェクト終了後(2~4年後)	2018~2019	NP で培われた知財・技術の活用 (ゆらぎ制御の活用)	・JGN-X を利用した高可用性ネットワークサービスの提供 ・Android アプリの展開	・同上
プロジェクト終了後(5年後)	2020	NP で培われた知財・技術の活用 (階層型ゆらぎ制御の活用)	・大規模ネットワーク向け高可用性ネットワークサービス基盤の商品化 ・Android アプリによる収益化	・納入実績、売上、競合他社数 ・アプリ販売数

また、社会展開に向けた施策について、以下に述べる。

・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(ソースコード非公開)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。また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。

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。

・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。

自己組織型無線ネットワークの研究成果については、将来の端末の動向を睨んだうで、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について以下に述べる。

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。

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ヒ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、災害時等のトラヒック集中、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。

想定している本研究開発の成果技術の活用、ユースケースについて以下に述べる。

まず、システムの規模、用途について、現時点の想定は以下の通りである。

- 想定するシステムの規模：AS 数 10 万、AS 内ノード数 1 万

[現在運用されている大規模システムの例]

- Amazon, Google などは数 10 万台のサーバを用いてコンシューマ向けサービスを提供
- ネットワークにおいては約 6 万の AS が存在。将来は 10 万超えも予想される

- 携帯の基地局数：10 万局程度
- サービスへの適用例
 - ※サービス毎に細かくポリシー制御を適用（ネットワークオペレータが設定）
 - 音声通話網、ストリーミング配信網等、配信内容ごとに専用ネットワークを構築
 - 広域企業網(個人事業者含む)における高度な VPN サービス
 - e コマースや、SNS におけるメッセージ交換を更に高度化
 - まずは AS や、広域実験網への適用を目指す
 - 比較的小規模な NaaS サービス、広域実験網上の仮想ネットワークを ASP へ公開することによる実験ビジネス等

本研究開発の成果技術の活用としては、成果技術はサービスごとにネットワークを仮想化し、固有のポリシーに基づいて AS 間をまたがる広域ネットワークを制御できるため、以下の想定ができる。

図 4.1 に活用イメージを示す。

- 緊急性、要求性能に基づいて異なる性能のゆらぎ制御を適用し、資源を有効に活用する。
- スマートフォン・タブレット等のモバイル機器やセンサーノードから発生する時間的・空間的に大きな偏りを持つトラフィックに対しても柔軟に対応する。

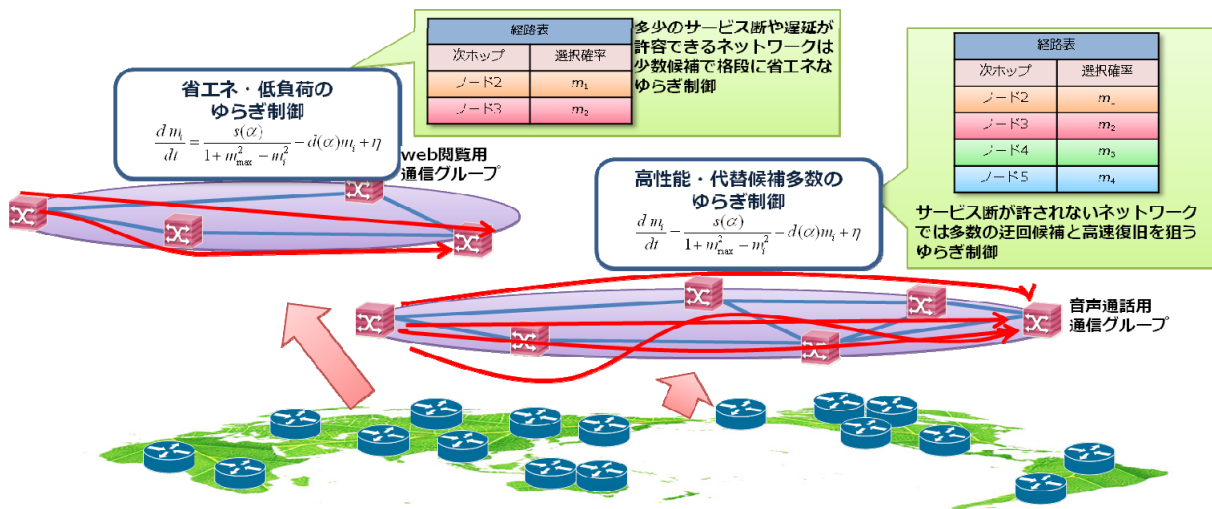


図 4.1：成果技術の活用イメージ

本研究開発の成果技術は、従来の VLAN 等のネットワーク仮想化と違い、回線やノードなどのデータプレーンだけでなく、制御プレーン/管理プレーンまで仮想ネットワーク毎に独立するため、仮想ネットワーク毎に(つまりアプリケーションやサービスが)、それぞれ独自の経路制御や OAM 等のメカニズムを独立して持つ。本研究開発が可能とする“自由度の高さ”によって、“ネットワーク仮想化”のメリットが実現される。

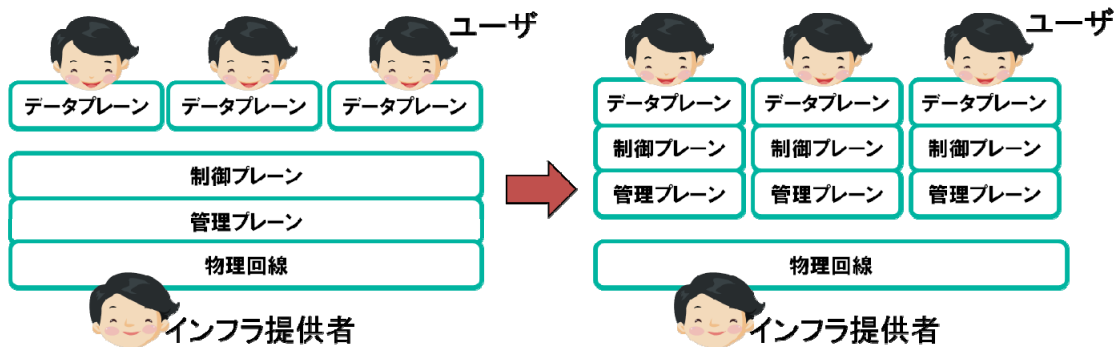


図 4.2 : ネットワーク仮想化イメージ

以下にユースケースを例示する。

ユースケース(1)

高品質なネットワークを実現

- 単一の制御で全てのサービスを収容する従来の IP ネットワークの限界。
 - アプリケーション・サービス毎の品質制御が困難
 - すべてでのアプリケーション・サービスで共通化してしまっているため、変更が困難
- 本研究開発の成果技術を活用し、異なる要件に対して異なる制御(経路制御や受付制御など)を実施することで、ネットワークの利用効率と通信品質を同時に高める。
 - 異なるアプリケーションやサービス: 放送や電話などの高品質通信、e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
 - 異なるコンテキスト: 平時や災害時
 - 異なる利用者: 一般市民や消防・警察

ユースケース(2)

経路情報の秘匿

- BGP/OSPF のように経路情報やトポロジ情報を広く共有せず、仮想ネットワーク内に閉じて管理できる。また FQDN やアドレス情報も秘匿できる。
- 偽の経路情報を流してネットワークを混乱させたり、アドレス詐称によって則りを行ったりすることが困難になる。

災害時の緊急ネットワーク

- 緊急通信用の仮想ネットワークを平時から準備しておき、災害発生時には他の仮想ネットワークをシャットダウンして緊急通信のみを許可する。
- 復旧期・復興期には、その時の需要にあった仮想ネットワークを、容易に構築して利用できる。

ユースケース(3)

ネットワーク技術の” Birth-and-death evolution”

- 実ネットワークへの新技術の導入が容易となる。
 - 仮想ネットワークとして分離することにより、新たなアプリケーション・サービス向けの制御を、他の既存のサービス・アプリケーションに影響を与えることなく、導入可能

- 仮想ネットワーク内部の制御プレーン・管理プレーンの構築を、インフラ提供者側からインフラ利用者側に開放することで、インフラ利用者が独自の制御機構を自ら導入し、運用することができる
- 仮想ネットワーク間で健全な競争が行われる(技術的、経済的、政治的)環境が整えば、ネットワーク技術の発展が加速度的に進むと期待される。

また、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、現在、日本電気株式会社社内のソースコード管理・共有サイト (git) において、社内限定で公開を行っている。本プロジェクト関係者以外からの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る。

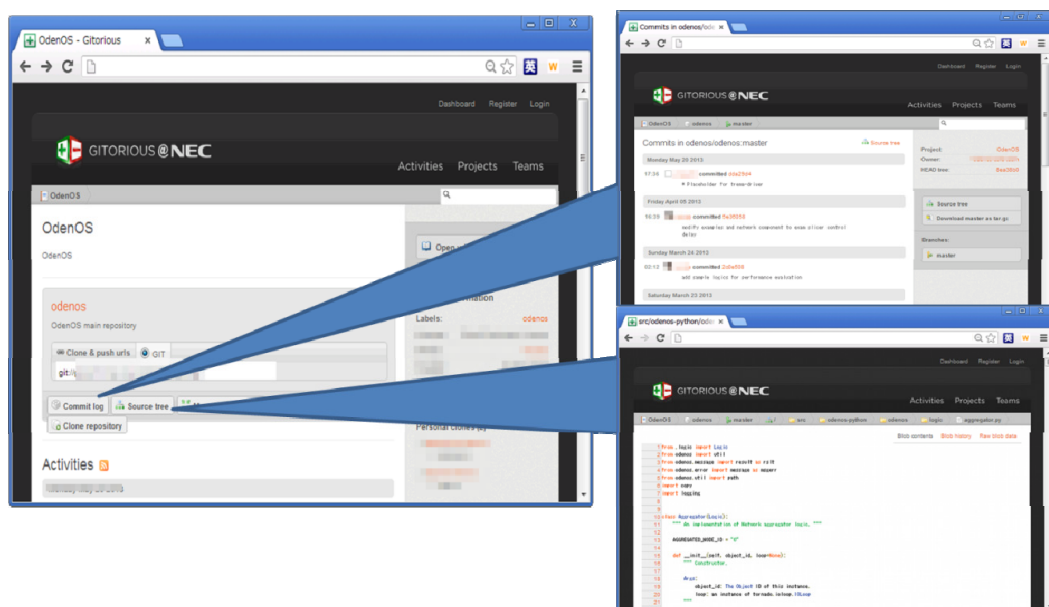


図 4.3 : 成果普及を見据えた取り組み

5 査読付き誌上発表リスト

- [1] Itsuka Kumano, Kazufumi Hosoda, Hiroaki Suzuki, Katsuki Hirata, Tetsuya Yomo, “Hydrodynamic trapping of Tetrahymena thermophila for the long-term monitoring of cell behaviors”, Lab on a Chip Vol. 12 pp3451-3457 (2012年6月14日)
- [2] 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)
- [3] Isao Kubo, Kazufumi Hosoda, Shingo Suzuki, Kayo Yamamoto, Kumiko Kihara, Kotaro Mori, Tetsuya Yomo, “Construction of bacteria-eukaryote synthetic mutualism”, BioSystems (採録決定)

6 その他の誌上発表リスト

該当なし

7 口頭発表リスト

- [1] Gen Motoyoshi 他, “Future Mobile Network Management With Attractor Selection”, IEEE WONS 2012 (the 9th International Conference on Wireless On-demand Network Systems and Services) (クールマイヨール、イタリア) (2012年1月10日)
- [2] 芦田優太 他, “OpenFlow ネットワークにおけるドメイン縮約を用いた階層型ネットワーク構築手法の提案”, 電子情報通信学会コミュニケーションクオリティ研究会 (沖縄県石垣市) (2012年4月19日)
- [3] イン ベイウエン, “Genomic and environmental contributions to bacterial transcriptome”, 日本ゲノム微生物学会第6回大会 (東京都豊島区) (2012年3月10日)
- [4] 細田一史, “なぜ生物は共生するのか? 実験的に再構成して考える”, 第6回内部観測研究会 (兵庫県神戸市) (2012年3月17日)
- [5] 細田一史, “Synthesizing symbiosis”, 日本生態学会第59回大会・東アジア生態学会連合第5回大会 合同大会 (滋賀県大津市) (2012年3月20日)
- [6] 細田一史, “Experimental evolution of an artificial bacterial mutualism”, 複雑系生命システム研究センターセミナー (東京都目黒区) (2012年3月29日)
- [7] 細田一史, “Experimental evolution of an artificial bacterial mutualism”, Artificial Life XIII (ミシガン、アメリカ) (2012年7月21日)
- [8] イン ベイウエン, “Reduced noise in gene expression caused by a replaced foreign promoter”, 日本進化学会第14回東京大会 (東京都八王子市) (2012年8月21日)
- [9] 細田一史, “人工共生の実験進化”, 日本進化学会第14回東京大会 (東京都八王子市) (2012年8月21日)
- [10] 細田一史, “Experimental evolution of synthetic microbial symbioses./微生物人工共生の実験進化”, 第28回日本微生物生態学会大会 (JSME 2012) (愛知県豊橋市) (2012年9月22日)
- [11] 細田一史, “Experimental evolution of a synthetic symbiosis./人工共生系の実験進化”, 第50回日本生物物理学会年会 (愛知県名古屋市) (2012年9月23日)
- [12] 細田一史, “協力の進化について実験進化が出してきた一つの解”, 第28回個体群生態学会大会 (千葉

県船橋市) (2012年10月20日)

- [13] 細田一史、“創ってわかった協力の進化”、「細胞を創る」研究会 5.0 (神奈川県横浜市) (2012年11月21日)
- [14] イン ベイウエン、“Disturbing native regulations by a synthetic promoter reduced the noise in gene expression”、COLD SPRING HARBOR ASIA CONFERENCE Synthetic Biology (江蘇省、中国) (2012年11月26日)
- [15] イン ベイウエン、“疑似進化による新規的表現型の獲得” (一般ポスター発表)、第35回日本分子生物学会年会 (福岡県福岡市) (2012年12月11日~14日)
- [16] イン ベイウエン、“疑似進化による新規的表現型の獲得” (ワークショップ発表)、第35回日本分子生物学会年会 (福岡県福岡市) (2012年12月12日)
- [17] 竹下絵莉奈、若宮直紀、“アトラクタ選択モデルに基づく階層化経路制御手法の提案と評価”、電子情報通信学会情報ネットワーク研究会 (沖縄県読谷村) (2013年3月7日)
- [18] 芦田優太 他、“マルチドメイン OpenFlow ネットワークにおけるフローの一貫性維持方法に関する一検討”、電子情報通信学会ネットワークシステム研究会 (沖縄県読谷村) (2013年3月8日)
- [19] イン ベイウエン、“飢餓と蘇生の繰り返しを乗り越えた大腸菌” (一般口頭発表)、第7回日本ゲノム微生物学会 (滋賀県長浜市) (2013年3月8日)
- [20] イン ベイウエン、“飢餓と蘇生の繰り返しを乗り越えた大腸菌” (一般ポスター発表)、第7回日本ゲノム微生物学会 (滋賀県長浜市) (2013年3月8日)
- [21] 小出俊夫 他、“SDN 制御プラットフォームにおけるネットワーク抽象化モデルの検討とその評価”、電子情報通信学会コミュニケーションクオリティ研究会 (新潟県佐渡市) (2013年4月19日)

8 出願特許リスト

- [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] 芦田 優太、通信システム、通信方法、及びプログラム、日本・PCT、2012年3月
- [3] 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
- [4] 芦田 優太、フロー情報収集システム、方法およびプログラム、日本・PCT、2012年9月
- [5] 小出 俊夫、制御装置、制御方法、通信システム及びプログラム、日本・PCT、2012年9月
- [6] 芦田 優太、通信システム、制御装置、通信制御方法およびプログラム、日本、2013年2月
- [7] 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

9 取得特許リスト

該当なし

10 国際標準提案リスト

該当なし

11 参加国際標準会議リスト

該当なし

12 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

13 報道発表リスト

該当なし

研究開発による成果数

	平成 23 年度	平成 24 年度	合計	(参考) 提案時目標数
査読付き誌上発表数	0 件 (0 件)	3 件 (3 件)	3 件 (3 件)	5 件 (1 件)
その他の誌上発表数	0 件 (0 件)	0 件 (0 件)	0 件 (0 件)	0 件 (0 件)
口 頭 発 表 数	6 件 (1 件)	15 件 (2 件)	21 件 (3 件)	12 件 (2 件)
特 許 出 願 数	2 件 (2 件)	5 件 (3 件)	7 件 (5 件)	8 件 (0 件)
特 許 取 得 数	0 件 (0 件)	0 件 (0 件)	0 件 (0 件)	0 件 (0 件)
国 際 標 準 提 案 数	0 件 (0 件)	0 件 (0 件)	0 件 (0 件)	0 件 (0 件)
国 際 標 準 獲 得 数	0 件 (0 件)	0 件 (0 件)	0 件 (0 件)	0 件 (0 件)
受 賞 数	0 件 (0 件)	1 件 (1 件)	1 件 (1 件)	0 件 (0 件)
報 道 発 表 数	0 件 (0 件)	0 件 (0 件)	0 件 (0 件)	0 件 (0 件)
報 道 掲 載 数	0 件 (0 件)	0 件 (0 件)	0 件 (0 件)	—

注 1 : 各々の件数は国内分と海外分の合計値を記入。(括弧)内は、その内海外分のみを再掲。

注 2 : 「査読付き誌上発表数」には、論文誌や学会誌等、査読のある出版物に掲載された論文等を計上する。学会の大会や研究会、国際会議等の講演資料集、アブストラクト集、ダイジェスト集等、口頭発表のための資料集に掲載された論文等は、下記「口頭発表数」に分類する。

注 3 : 「その他の誌上発表数」には、専門誌、業界誌、機関誌等、査読のない出版物に掲載された記事等を計上する。

注 4 : PCT 国際出願については出願を行った時点で、海外分 1 件として記入。(何カ国への出願でも 1 件として計上)。また、国内段階に移行した時点で、移行した国数分を計上。