

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

代表研究責任者 村田正幸 大阪大学

研究開発期間 平成 25 年度～平成 27 年度

【Abstract】

In this research, to establish fundamental technology for energy-saving network control compatible to changing communication status, we developed novel networking technologies which are highly responsive and flexible than ever before. By making use of operating principles, Yuragi, of the brain and living organisms, our developed technologies can adaptively find useful communication paths even when dynamic and unpredictable traffic fluctuations and system failures occur. Brain and biological systems do not optimize themselves by using the global information. Instead, they can responsively adapt to dynamically and unexpectedly changing environment through local information exchanges in an energy-efficient and flexible manner. We proved that our Yuragi control can adaptively find a near- or sub-optimal solution under dynamic environmental changes including unexpected disturbance with much smaller computational cost than existing control.

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 桐葉 佳明（日本電気株式会社 システムプラットフォーム研究所）
- 総合ビジネスプロデューサ 長谷川 聡（株式会社テクノエッジ）
- ビジネスプロデューサ 田中 宏（国立大学法人大阪大学 産学連携本部）
田中 淳裕（日本電気株式会社 事業イノベーション戦略本部）

- 研究開発期間 平成 25 年度～平成 27 年度
- 研究開発予算 総額 287 百万円

（内訳）

平成 23 年度	平成 24 年度	平成 25 年度	平成 26 年度	平成 26 年度 補正予算
		150	87	50

2 研究開発課題の目的および意義

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、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通信経路を探索することのできる、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する。

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。

本制御技術により、多種多様な大量の通信機器が有線や無線によって接続され、大規模かつ予測困難なトラヒックが発生するビッグデータ時代を支える情報通信インフラの実現が可能となる。

3 研究開発成果（アウトプット）

3. 1 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

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、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を示す。

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 倍向上できることを実証する。

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る。

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。

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

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、トラフィ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。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な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。

以降では、各課題における達成事項の詳細を述べる。

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

- 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。
- 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。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。
- 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

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うことによって、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。

- 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。
- 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、実装を行い、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。
- 上記有無線統合制御システムについては、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を結合した実機ネットワーク環境を構築し、広域なネットワークの実証実験を実施した。課題アの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。
- ユーザトラフィックとして遅延に厳しいストリーム系トラフィックと、それ以外のデータトラフィックを想定し、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。フロー平均遅延での評価により、ダイクストラ法（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ず適応的経路制御（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）。また、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。
- 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、開発した適応的経路制御システムの制御モジュールを、オープンソース版 SDN 制御ソフトウェア上で動作するよう移植することによって、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った。

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

- 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の設計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相手間の経路を導出できるゆらぎ制御技術を確立した。
- 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立した。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と比較して、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。

- 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、実装を行い、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た。
- 上記有無線統合制御システムについては、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を結合した実機ネットワーク環境を構築し、広域なネットワークの実証実験を実施した。課題イの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。
- 上記の無線制御方式については、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する手法を確立した。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

1. 階層的ゆらぎ制御の定量的特性解明

階層構造を有するネットワークの階層的経路制御について、定量的特性を解明した。具体的には、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、以下を達成した。

- 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。
- アクティビティ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。
- 既存手法での経路計算量 $O(N^2 \log N)$ ~ $O(N^3)$ 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。
- 階層的ゆらぎ制御の設計指針を確立。すなわち、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。

2. 生体の階層的ゆらぎ制御解明

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。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の遺伝情報の複製と維持に必要な制御原理を解明し、以下を達成した。

- 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。
- 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。具体的には、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。

3. 脳の階層的ゆらぎ制御解明

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。

- 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。
- 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。
- 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た。
- 上述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。

4 政策目標（アウトカム目標）の達成に向けた取組みの実施状況

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應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。

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。具体的には、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 NW ソリューションへの適用サービス (①) 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 年を目指した東京オリパラでの適用サービス展開 (②)、及び、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展開 (③)、を創出し、併せて3段階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。

また、上記サービスの着実な事業化に向けて、ゆらぎ制御技術のオープン・クローズ戦略を具体化した。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、OSS 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）、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不用意な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）を進めることとした。

さらに、知財化の観点では、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、本研究開発で創出した知財の事業適用を行う戦略を立案した。

上記で明確化された計画を踏まえて、題ア) のオープン戦略について、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ライブラリ化を図り、OSS 版 SDN (Software-Defined Networking) プラットフォーム上で動作するモジュールを作成しオープン化を図った。今後は、産学技術交流会やハンズオン講習会の開催や web ダウンロードを通じたソフトウェア提供を行い、外部利用者のさらなる拡大に努める予定である。

(1) ゆらぎ制御技術の利活用による新たなサービス市場の創出

ゆらぎ制御の新たな適用システム/サービスに対する段階的、かつ継続的なビジネス展開シナリオを策定した。図 4.1 にそのコンセプトを示す。現状のゆらぎ制御の実証システムをベースとして、2020 年の東京オリパラでのスタジアム NW ソリューション等への適用、さらに先では第 5 世代無線通信サービス（5G サービス）を含んだ、M2M/IoT を視野に入れた、仮想システム上でのネットワーク設計・制御への展開も考慮したものである。具体的には、以下の 3 段階での展開シナリオを立案した。

- (1-1) 現行スタジアム NW ソリューションへのゆらぎ制御適用サービス展開
- (1-2) 2020 年を目指した東京オリパラでのゆらぎ制御適用サービス展開
- (1-3) Beyond 2020 の仮想システムでのゆらぎ制御応用サービス展開

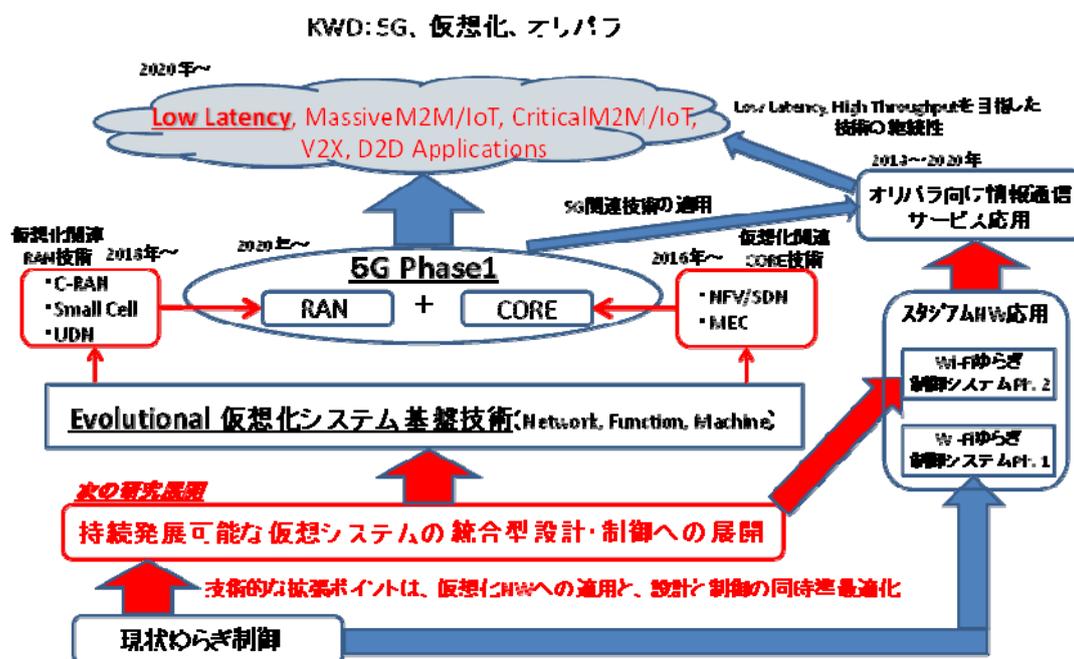


図 4.1 : ゆらぎ制御の将来展開シナリオ

- (1-1) 現行スタジアム NW ソリューションへの適用サービス

図 4.2 にスタジアムを想定した有線無線統合システムの概念図を示す。スタジアムにおいては人の移動や

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。そのため、人が混雑する過密環境では安定した通信環境を提供することができないという課題が生じる。このような環境に「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できることがメリットである。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」はまさにその必要性を満たすものと考えられる。一方で、今後建築が予定されている大規模スタジアムにおいては運営主体がまだ決定されておらず、それらの具体化を待って顧客アプローチを行う予定である。

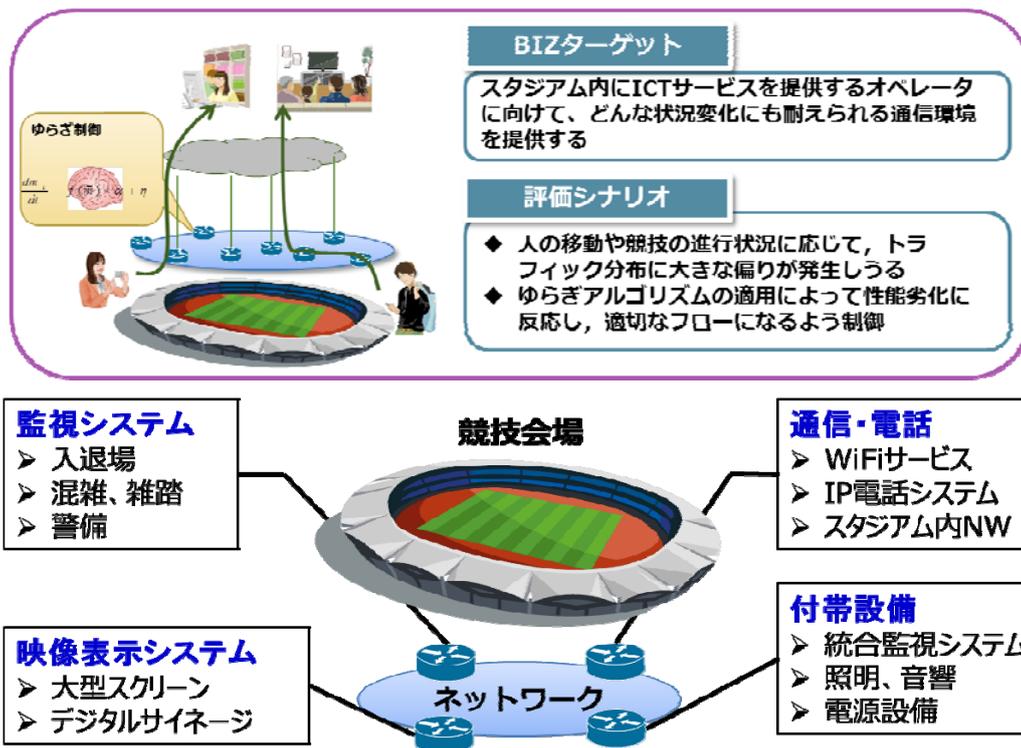


図 4.2：有無線統合システムの概念図

(1-2) 2020 年を目指した東京オリパラでの適用サービス

実証システムである有無線統合システムを踏まえて、2020 年の東京オリンピック・パラリンピックへの適用を見据えたさらなるゆらぎ制御適用サービスを 3 つ創出した。以下に例示する。

例 1) 多数のイベント参加者の誘導アプリへのゆらぎ制御適用： イベント会場から帰宅する多数の（最大 10 万人規模）参加者の帰宅経路の誘導に関する制御を、ゆらぎ制御を用いて行う提案である。この制御は、システムの制御とは異なり、個別の「人、あるいは車」の制御となり、制御対象は膨大なものとなる。ゆらぎ制御の特徴が十二分に発揮でき得る領域と考えることができる。

例 2) オリンピック会場でのモバイル SNS サービスへのゆらぎ制御の適用： オリンピックスタジアムでの観客へのサービスであり、観客同士がモバイルアドホック SNS によって、より強い一体感をもって試合を楽しむことができるサービスである。SNS の最適コミュニケーションの自動および動的形成にゆらぎ制御を適用する。観客間あるいは観客から外部へのコンテンツ配信制御については、輻輳時でのゆらぎによる無線 NW 選択制御の適用も考えられる。

例 3) ドローンによる映像中継制御関連：5G でのユースケース検討では、ドローンの各種サービスが提案されている。東京オリンピック・パラリンピックでも、その一部が適用される可能性はあり、ここでは競技種目の空中からの映像中継への適用を考慮した、複数ドローンの航路制御にゆらぎ制御を適用する。具体的なサービス例としては、マラソン中継における、従来バイクが担ってきた走者の映像中継を、空中からのドローンにより代行させる。また、サッカーやゴルフ競技における映像中継を上空からも併せて行うことで、より臨場感あふれる、また従来では見ることのできなかつた映像提供を可能とするものである。ゆらぎ制御は、複数ドローンの航路制御や情報中継経路制御へ適用可能と考えている。

(1-3) Beyond 2020 の仮想システムでの応用サービス

ゆらぎ制御がその特徴を最大限活かせることを考えて、5G での具体的な個別基盤技術として、仮想化技術と M2M/IoT 技術を特に意識した検討を行った。仮想化に焦点を当てた理由は、仮想化によって、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ため、ゆらぎ制御が適した対象システムと考えられるためである。M2M/IoT に関しては、制御対象数が膨大な数となり、これまたゆらぎ制御が適した制御方法を提供するものとする。つまり、5G で展開されるシステムは、従来の制御や設計手法ではどうも対処できない複雑かつ巨大なシステムとなり、ゆらぎ制御がその威力を十分発揮できる。このような 5G におけるユースケースの検討が、3GPP で行われている (3GPP TR22.891 V1.2.0 (2016 年 1 月現在)、2016 年 1 月現在で 74 個のユースケースが検討されている)。さらに、ゆらぎ制御が適用可能と思われるユースケースの絞り込みを行った。その結果を、以下にリストとして上げる。

表 4.1：ゆらぎ制御の適用が有望なユースケース

ユースケース	件数
ドローン制御関連 (M2M)	4 件
インダストリー制御関連 (M2M)	4 件
ネットワークスライス関連 (仮想化)	7 件
コンテンツセントリック NW 制御関連 (上位)	4 件
Joint Network 制御関連 (上位)	2 件
Massive M2M 関連 (M2M)	1 件
合計	22 件

(2) ゆらぎ制御技術の事業化に向けたオープン・クローズ戦略

ゆらぎ制御技術は、単独技術として効果を発揮するのではなく、他のプラットフォーム上で動作する制御技術として始めて大きな効果を生む技術であり、そのプラットフォーム自体がメジャーとなるものを選定することが重要である。有線制御(課題ア)は SDN (Software Defined Network) を活用する 03 プロジェクトで研究開発を進める ODENOS をプラットフォームとして活用することを決定し、今年度のプロジェクト開始時点で研究計画への反映し、今年度にモジュール開発、および有効性検証を完了した。今後は、先進ユーザーへのハンズオン教育を行いながら普及活動を継続する予定である。一方、無線制御(課題イ)は、端末間通信ソフトウェアのプラットフォームに組込むことを想定しているものの、メジャーなプラットフォー

ムが出現するまで、もう数年を要する見込みである。具体的には LTE D2D 通信が登場する 2018 年頃が想定される。また、端末の通信デバイスを制御する機能を有するため、不用意に公開すると予期せぬセキュリティリスクを拡大する恐れが生じる。従い、しっかりとした端末セキュリティを確保するためにはオープン化は不向きであり、パートナー企業を吟味した上でのクローズ戦略を優先するものとする。

表 4.2 : オープン・クローズ戦略

		有線制御 (課題ア)	無線制御 (課題イ)
オープン戦略		OSS 版 ODENOS をターゲットとし、簡単なアグリーメントを結んだ組織・個人にモジュール提供を行ない、ゆらぎ制御技術の普及を進める。	セキュリティリスクの懸念が払拭されるまでは、広範囲なオープン化を控える。
クローズ戦略	拡大領域	—	戦略的なパートナー連携を進める。
	競争領域	ゆらぎ制御のパラメータ設計指針、運用指針等はノウハウとして隠し、有償ビジネスの対象とする。	

(3) ゆらぎ制御技術の知財戦略

ゆらぎ制御技術の知財活用としては、ゆらぎ制御技術が大きな効果を発揮することが想定される SDN コアネットワークの制御機能 (特に仮想化ネットワークの構築・制御機能) としての活用を目指し、そのメジャーな実装である ODENOS をベースとしたモジュール化を中心に進めることとした。

仮想化ネットワークは、ネットワーク機能 (スイッチ、ルータ、各種サーバ、など) を、仮想マシン (Virtual Machine : VM) を用いて、ソフトウェアとして実現し、柔軟かつ CAPEX/OPEX の小さい経済的なキャリアインフラ、データセンタ、クラウド環境などで提供可能とする技術である。このような仮想化ネットワークでは、ハードウェアとしての装置ではなく、VM 上のソフトウェアでネットワーク機能が実現可能となるので、比較的容易に実時間でネットワーク動的構成が可能となる。このような柔軟なネットワーク構成上での各種ネットワーク制御は、最適化自体がもはや実現不可能となり (つまり、制御をかけるネットワーク自体が動的に変化してしまう)、従来のネットワーク設計・制御技術では対処できないため、ゆらぎ制御の適用が大きな効果を奏するものである。仮想化システムに着目し SDN サービスコントローラ技術の上位レイヤ技術、および NFV 技術について調査すると、各社ともオープンフローコントローラ (OFC) 関連の出願件数がドミナントであり、もはや SDN コントローラは OFC である、と断言してもよい状況である。従い OFC のメジャーな実装である ODENOS をベースとした「ゆらぎ制御」モジュールを提供することは、今後、この業界に大きな影響を与えるものと言える。

5 政策目標 (アウトカム目標) の達成に向けた計画

「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を応用した自己組織型ネットワーク制御技術を確立することで、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した活動の達成に向けた計画として、① 本研究開発で創出したゆらぎ制御技術の成果を広く外部へアピールする成果プロモーション活動、② 本成果をプロジェクト外部で実際に活用して頂く社外実証推進活動、③ 本成果の事業化・製品化に向けた活動を行う、という 3 段階の施策を設

定した。

① 成果プロモーション活動： 外部へのアピールとして、産学向け技術交流会や、ハンズオン講習会や学会での成果発表を平成 28 年度までに実施し、本成果の有用性をアピールする。

- ・大阪大学 IT 連携フォーラム (OACIS) 技術交流会、ハンズオン講習会等の開催(～平成 27 年度)
- ・国内学会、国際学会でのゆらぎ制御およびその発展技術の発表(～平成 28 年度)

② 社外実証推進活動： プロジェクト外の成果活用として、ゆらぎ制御のソフト・モジュールを Web ダウンロードにより他の組織へ提供する仕組みを構築し、平成 30 年度までに他の組織への成果の浸透を図る。

- ・ゆらぎ制御ソフトウェアの web ダウンロード仕組み構築(～平成 29 年度)
- ・ゆらぎ制御ソフトウェアの社外利用を促進(～平成 30 年度)

③ 事業化・製品化活動： 商品化への活動として、平成 32 年度までに、本研究開発で創出した知財を製品やソリューションへ適用することで、研究開発成果の事業化を行う。

- ・有線ゆらぎ制御技術に関する知財の NEC 製 SDN 製品等への適用を想定(～平成 32 年度)
- ・無線ゆらぎ制御技術に関する知財の NEC 製無線 LAN 製品等への適用を想定(～平成 32 年度)

また、以下の表 5.1 に示すアウトカム指標によって、上記研究開発成果の社会展開に向けた進捗状況を確認する。

表 5.1 アウトカム目標の達成に向けた計画

アウトカム指標	目標年度	数値目標	調査方法	終了条件
成果プロモーション活動 (ハンズオンおよび成果発表件数)	平成 28 年	5 回	主催者等へのヒアリング調査	目標を達成した時点
社外実証推進活動 (他組織への成果提供件数)	平成 30 年	5 件	ソフト・モジュールの提供件数をヒアリング調査	目標を達成した時点
事業化・製品化活動 (知財の活用件数)	平成 32 年	3 件	製品、ソリューション等への適用件数をヒアリング調査	目標を達成した時点

また、アウトカム以外に期待される波及効果としては、「脳に学ぶ」システム制御手法に関する新しい産学連携（オープンイノベーション）の構築等が想定される。

6 査読付き誌上発表論文リスト

- [1] 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) :
- [2] T. Yoshiyama, C. Motohashi, N. Ichihashi, T. Ichii, and T. Yomo, “Maintenance of a translation-coupled RNA replication in dynamic micro-sized compartments under continuous stirring and flow”, Chemical Engineering Journal Vol.283 pp896-902 (2015年8月12日) :
- [3] H. Kada, J. Teramae, and I. Tokuda, “Synchronized Firing Induced by Correlated Bidirectional Couplings in a Neural Network Model for Spontaneous Activity”, Journal of Signal Processing Vol. 19 No. 4, pp107-110 (2015年7月1日) :

7 査読付き口頭発表論文（印刷物を含む）リスト

- [1] 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) :
- [2] E. Takeshita and N. Wakamiya, “Proposal and evaluation of attractor selection-based adaptive routing in layered networks”, Proceedings of International Symposium on Ubiquitous Intelligence and Autonomic Systems (UIAS-2013) pp595-600 (2013年12月19日) :
- [3] K. Yamaguchi, J. Teramae, and N. Wakamiya, “Liquid State Machine with Heterogeneous Connections for Information Networks”, Proceedings of International Symposium on Nonlinear Theory and its Applications (NOLTA2014) pp799-802 (2014年9月18日) :
- [4] T. Nakao, J. Teramae, and N. Wakamiya, “Distributed routing protocol based on biologically-inspired attractor selection with active stochastic exploration and a short term memory”, Proceedings of the 11th IEEE International Conference on Autonomic and Trusted Computing (ATC-2014) pp473-478 (2014年12月11日) :
- [5] 小出俊夫, “ODENOS: Exploring Modularized Design for SDN Controller Platform”, ACM SIGCOMM Workshop on Hot Topics in Software Defined Networking (HotSDN 2014) (2014年8月22日) :
- [6] 吉山友明、市橋伯一、一居哲夫、四方哲也, “Maintenance of a Translation-coupled RNA Replication in Micro-sized Dynamic Compartments”, 7th International Symposium on Microchemistry and Microsystems (2015年6月8日) :
- [7] 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) :
- [8] T. Nakao, J. Teramae, and N. Wakamiya, “Biologically-inspired adaptive routing protocol with stochastic route exploration”, Proceedings of 9th EAI International Conference on Bio-inspired Information and Communications Technologies (BICT) (2015年12月4日) :

8 その他の誌上発表リスト

[1] 芦田優太、"SDN コントローラー作成のシンプル化を実現するネットワーク抽象化モデル"、NEC 技報

9 口頭発表リスト

- [1] J. Teramae, "Noise-Induced Order and Computation in the Brain", NCTS Workshop: Progress of Mathematical Studies in Neuroscience (PMSN 2013) (台湾) (2013 年 6 月 5 日)
- [2] 寺前順之介、"大脳皮質自発発火活動と確率的記憶状態"、第 36 回日本神経科学会 (京都) (2013 年 6 月 20 日)
- [3] J. Teramae, "Origin and Functional Roles of Spontaneous Noise in the Brain: Self-organized Stochastic Resonance and Memory States", Modeling Neural Activity: Statistics, Dynamical Systems, and Networks (MONA 2013) (Hawaii, USA) (2013 年 6 月 28 日)
- [4] 寺前順之介、"揺らぎをつくり活かす大脳皮質の情報処理メカニズム"、Top Runners' Lecture Collection of Science 第 5 回「脳をシステムとして理解するー神経回路の動作原理と機能創発ー」(東京) (2013 年 10 月 16 日)
- [5] 寺前順之介、"神経情報処理における自発揺らぎの起源と機能"、日本時間生物学会シンポジウム「生物リズム現象の数理フロンティア」(大阪) (2013 年 11 月 11 日)
- [6] 寺前順之介、"大脳皮質における自発揺らぎの理論的解明"、視覚科学の統合的研究センターセミナー、(滋賀) (2013 年 12 月 19 日)
- [7] 若宮直紀、"ゆらぎを活用した情報通信技術"、日本学術振興会「分子系の複合電子機能第 181 委員会」第 18 回研究会 (京都) (2014 年 2 月 14 日)
- [8] 中尾知紘、寺前順之介、若宮直紀、"記憶を持つアトラクタ選択モデルに基づく能動的な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 (宮崎) (2014 年 3 月 7 日)
- [9] 渡辺俊貴、芦田優太、宮尾泰寛、"OpenFlow ネットワークにおけるアトラクタ選択モデルに基づく適応的経路制御システム"、電子情報通信学会総合大会 (2014 年 3 月 18 日)
- [10] 若山永哉、小川雅嗣、山野悟、"パケット集約を考慮した無線アクセス選択手法の提案"、電子情報通信学会知的環境とセンサネットワーク研究会 (2014 年 1 月 23 日)
- [11] 寺前順之介、"大脳皮質局所回路網におけるゆらぎと確率性の理論研究"、立命館大学視覚科学統合的研究センターシンポジウム「視覚情報処理の新展開-局所回路から認知へ」(滋賀) (2014 年 3 月 14 日)
- [12] 寺前順之介、"大規模システムとしての大脳皮質ゆらぎの効果"、日本物理学会第 69 回年次大会 (神奈川) (2014 年 3 月 27 日)
- [13] 一居哲夫、鈴木宏明、四方哲也、"攪拌で駆動する液滴内連続反応系の構築-チューブの中の 10 億個のケモスタット"、化学とマイクロ・ナノシステム学会第 29 回研究会 (東京) (2014 年 5 月 23 日)
- [14] 小川賢人、寺前順之介、若宮直紀、"無線ネットワークにおけるエンド間遅延の分散特性を考慮したアトラクタ摂動モデルの改良と評価"、電子情報通信学会情報ネットワーク科学研究会 (東京) (2014 年 5 月 15 日)
- [15] J. Teramae, "Origin and computational roles of intrinsic heterogeneity and spontaneous fluctuation in cortical networks", AIMS Conference on Dynamical Systems, Differential Equations and Applications (Madrid, Spain) (2014 年 7 月 8 日)

- [16] J. Teramae, “Stochastic dynamics and computation in network models of cortical spiking neurons”, Workshop on Theory and Applications of Random/Non-autonomous Dynamical Systems (London, UK) (2014年9月15日)
- [17] J. Teramae, “Introduction to Stochastic Differential Equations and its Application”, Multidisciplinary Approach Forum 2014 (仙台) (2014年9月21日)
- [18] 中尾知紘、寺前順之介、若宮直紀, “Distributed routing protocol based on biologically-inspired attractor selection with active stochastic exploration and a short-term memory”, 電子情報通信学会ヒューマンコミュニケーショングループ情報の認知と行動研究会「情報の認知と行動研究会ワークショップ2014」(岡山) (2014年10月2日)
- [19] 山口佳久、寺前順之介、若宮直紀, “Brain-inspired liquid state machine and its possible applications to information-communication systems”, 電子情報通信学会ヒューマンコミュニケーショングループ情報の認知と行動研究会「情報の認知と行動研究会ワークショップ2014」(岡山) (2014年10月2日)
- [20] 若山永哉、小川雅嗣、柳生智彦, “ネットワーク接続の多様性を考慮したアトラクタ選択モデルに基づく無線ネットワーク選択手法”, 電子情報通信学会 (IEICE) 知的環境とセンサネットワーク(ASN)研究会 (和歌山) (2015年1月26日)
- [21] 若宮直紀, “階層的に相互作用する自己組織型ネットワーク制御”, 電子情報通信学会複雑コミュニケーションサイエンス研究会 (大阪) (2015年5月19日)
- [22] 寺前順之介, “大脳皮質自発揺らぎの回路構造と非線形ダイナミクス”, 第28回回路とシステムワークショップ (兵庫) (2015年8月4日)
- [23] 齋藤慶彦, 寺前順之介, 若宮直紀, “確率的経路制御に向けたアトラクタ選択モデルの拡張と適応的アトラクタ更新モデル”, 電子情報通信学会情報ネットワーク科学研究会 (大阪) (2015年5月22日)
- [24] 若山永哉、小川雅嗣、柳生智彦, “複数の評価指標を考慮したアトラクタ選択モデルに基づく無線ネットワーク選択手法”, マルチメディア, 分散, 協調とモバイル(DICOMO2015)シンポジウム (岩手) (2015年7月8日)

10 出願特許リスト

- [1] 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、2013年11月27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およびネットワーク情報結合プログラム、日本、2013年11月27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、日本、2013年12月18日
- [4] 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、日本、2013年12月18日
- [5] 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、日本、2014年1月15日
- [6] 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
- [7] 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
- [8] 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、2013年11月27日

換プログラム、PCT 国際出願、2014 年 10 月 16 日

[9] 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

[10] 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

1 1 取得特許リスト

該当無し

1 2 国際標準提案・獲得リスト

該当無し

1 3 参加国際標準会議リスト

該当無し

1 4 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

1 5 報道発表リスト

(1) 報道発表実績

該当無し

(2) 報道掲載実績

該当無し

研究開発による成果数

	平成 25 年度
査読付き誌上発表論文数	0 件 (0 件)
査読付き口頭発表論文数 (印刷物を含む)	2 件 (2 件)
その他の誌上発表数	1 件 (0 件)
口 頭 発 表 数	1 2 件 (2 件)
特 許 出 願 数	5 件 (0 件)
特 許 取 得 数	0 件 (0 件)
国 際 標 準 提 案 数	0 件 (0 件)
国 際 標 準 獲 得 数	0 件 (0 件)
受 賞 数	0 件 (0 件)
報 道 発 表 数	0 件 (0 件)
報 道 掲 載 数	0 件 (0 件)

	平成 26 年度	平成 27 年度	合計
査読付き誌上発表論文数	1 件 (0 件)	2 件 (2 件)	3 件 (2 件)
査読付き口頭発表論文数 (印刷物を含む)	3 件 (3 件)	3 件 (3 件)	8 件 (8 件)
その他の誌上発表数	0 件 (0 件)	0 件 (0 件)	1 件 (0 件)
口 頭 発 表 数	8 件 (2 件)	4 件 (0 件)	2 4 件 (4 件)
特 許 出 願 数	5 件 (5 件)	0 件 (0 件)	1 0 件 (5 件)
特 許 取 得 数	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)
国 際 標 準 獲 得 数	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)
報 道 発 表 数	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 : 「査読付き誌上発表論文数」には、定期的に刊行される論文誌や学会誌等、査読 (peer-review (論文投稿先の学会等で選出された当該分野の専門家である査読員により、当該論文の採録又は入選等の可否が新規性、信頼性、論理性等の観点より判定されたもの)) のある出版物に掲載され

た論文等（Nature、Science、IEEE Transactions、電子情報通信学会論文誌等および査読のある小論文、研究速報、レター等を含む）を計上する。

注3：「査読付き口頭発表論文数（印刷物を含む）」には、学会の大会や研究会、国際会議等における口頭発表あるいはポスター発表のための査読のある資料集（電子媒体含む）に掲載された論文等（ICC、ECOC、OFC など、Conference、Workshop、Symposium 等での proceedings に掲載された論文形式のものなどとする。ただし、発表用のスライドなどは含まない。）を計上する。なお、口頭発表あるいはポスター発表のための査読のない資料集に掲載された論文等（電子情報通信学会技術研究報告など）は、「口頭発表数」に分類する。

注4：「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（査読の有無に関わらず企業、公的研究機関及び大学等における紀要論文や技報を含む）を計上する。

注5：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。

注6：同一の論文等は複数項目に計上しないこと。例えば、同一の論文等を「査読付き口頭発表論文数（印刷物を含む）」および「口頭発表数」のそれぞれに計上しないこと。ただし、学会の大会や研究会、国際会議等で口頭発表を行ったのち、当該学会より推奨を受ける等により、改めて査読が行われて論文等に掲載された場合は除く。