

平成23年度～24年度

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

研究代表者 村田正幸

大阪大学大学院情報科学研究科

研究分担者

上田昌宏, 若宮直紀, YIN BEI WEN, 細田一史 (大阪大学)

西原基夫, 田中淳裕, 下西英之, 小出俊夫, 芦田優太, 千葉靖伸,
本吉彦, 平野由美, 西岡淳, 植田啓文, 角丸貴洋, 山野悟,
戸沼正光 (日本電気株式会社)



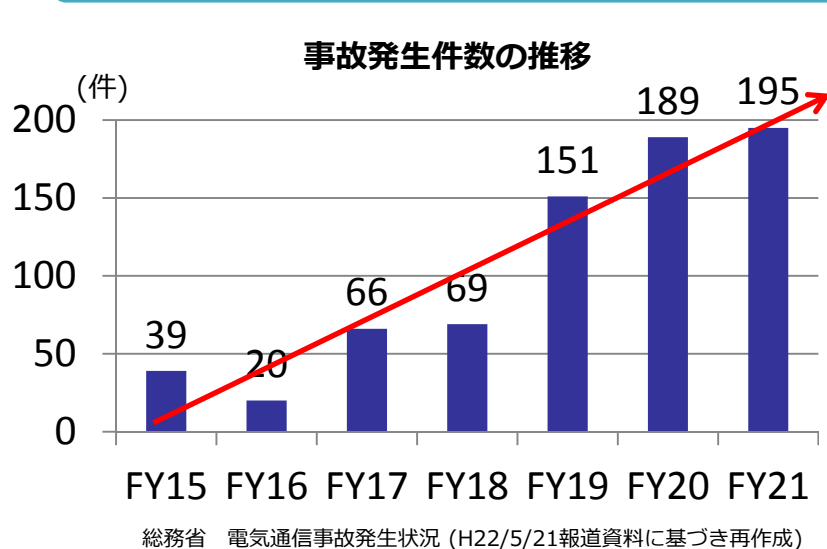
2013年10月1日

NEC

省エネで自律的に動くネットワークの必要性

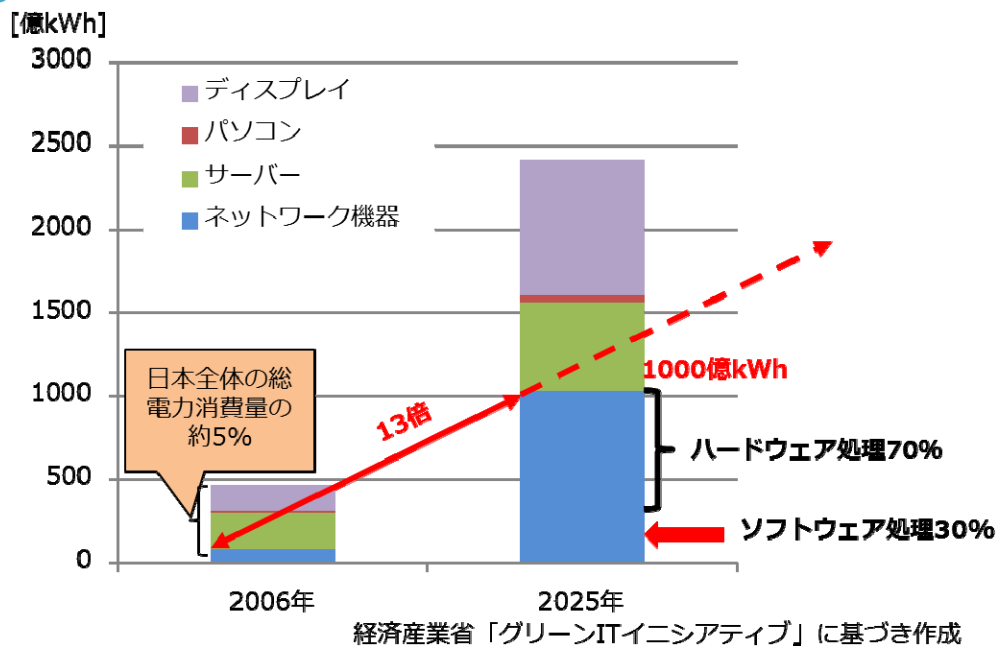
顕在化してきた課題

複雑化による厳密制御の破綻



- 通信事業者の通信障害件数が、39件(H15)から195件(H21)に急増
- 通信障害対策費として1事業者で1640億円投資
- 現状技術の延長の対策では通信障害は今後も増加

消費電力の増大



- ハードウェア処理部分はデバイス・光技術により数十分の一に下げられる
- ソフトウェア処理 (制御部) の省電力化が課題

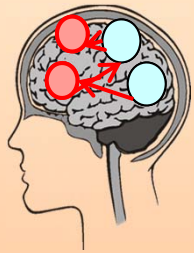


省エネルギーかつ外乱に強い情報通信ネットワークの『既存技術の延長でない制御技術』が必要

ゆらぎ制御による実現

脳や生体に学ぶゆらぎ制御

脳はケタ違いの省エネ



計算機で厳密制御すると
原子力発電所が多数必要
なほど複雑

脳は1ワットの動作エネ
ルギーでロバストに働く

- ノイズを許容
- 曖昧だが柔軟

情報通信技術は 膨大な電力を消費



91万キロワット (2006年, ネットワーク機器全体)

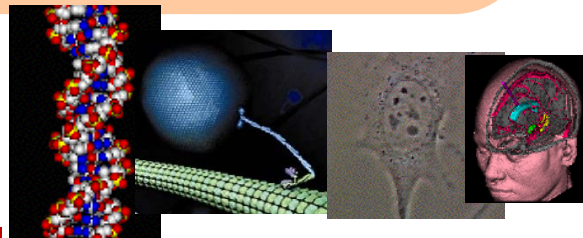


複雑化による厳密制御の破たん

- ノイズを遮断
- 正確で厳密

原理の抽出

ゆらぎ原理



分子から脳まで階層を越えて共通の原理

$$\frac{d}{dt} x = f(x) \cdot activity + \eta$$

アトラクタを
持つ制御構造 最適化 自発ゆらぎ
指標

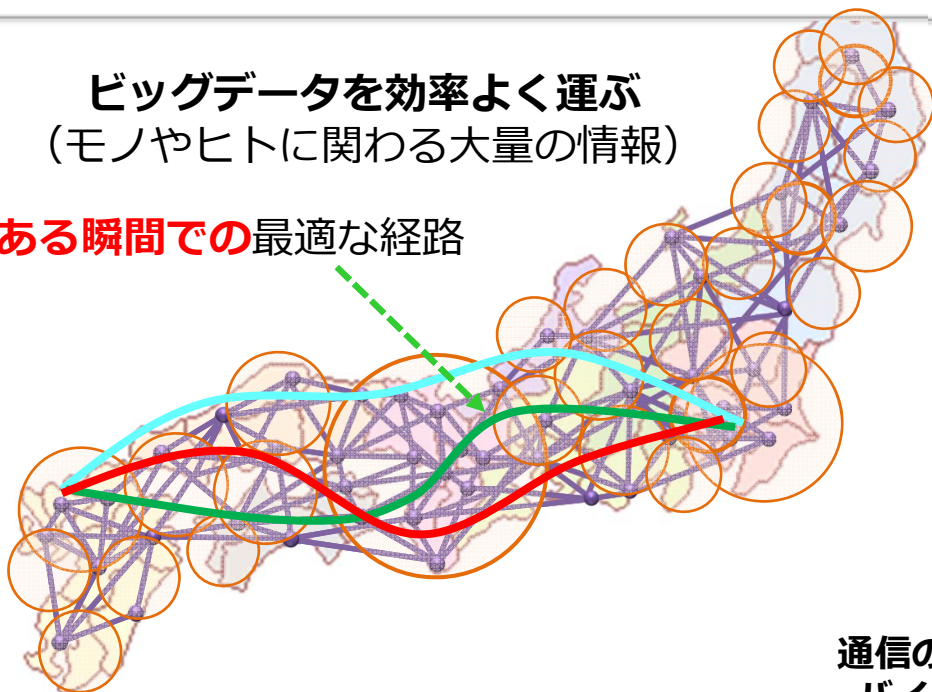
ゆらぎ方程式

生物ゆらぎ原理を
複雑な情報通信
ネットワークの省
エネ、頑強性制御
に応用

省エネで自律的に動くネットワークのためのゆらぎ制御

ビッグデータを効率よく運ぶ
(モノやヒトに関わる大量の情報)

ある瞬間での最適な経路



全ての組み合わせの中で
最適なものを求める厳密最適化

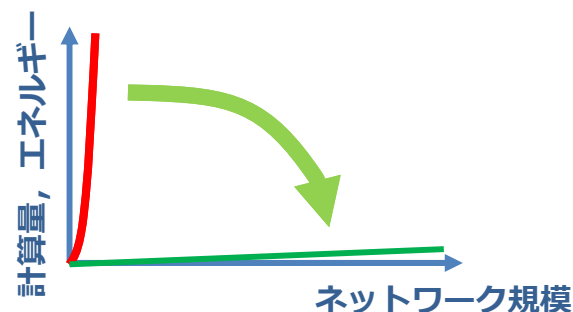
3^{N^2} 通りの計算量

$3^{10^2} = 5.15 \times 10^{47}$ (5150載)

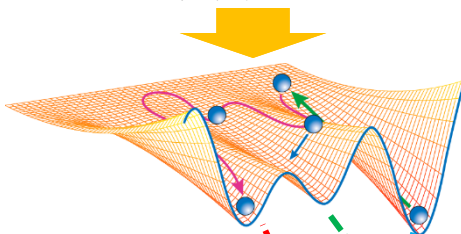
膨大なエネルギーと時間が必要



変化する通信状態に対して適応的に
適切な経路を選択する



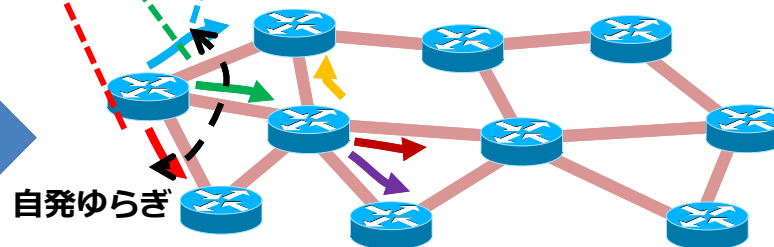
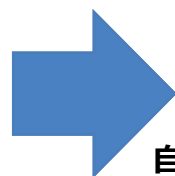
通信の結果によって
バイアスがかかる



ゆらぎ制御による経路選択
それぞれは自発ゆらぎで探索

N^2 通りの計算量

低消費エネルギーかつ
頑健性、適応性が高い

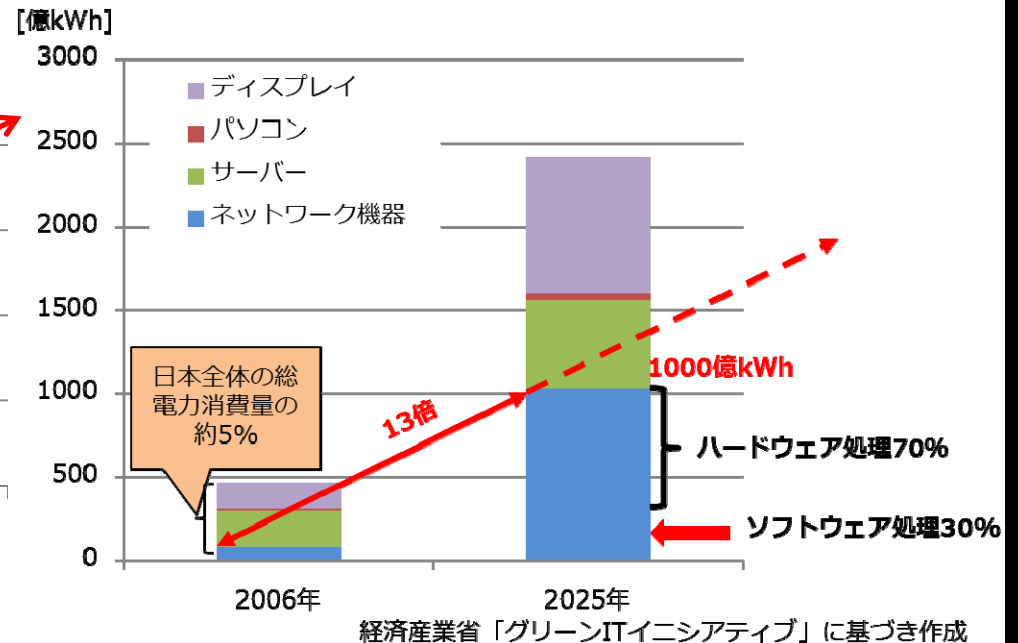
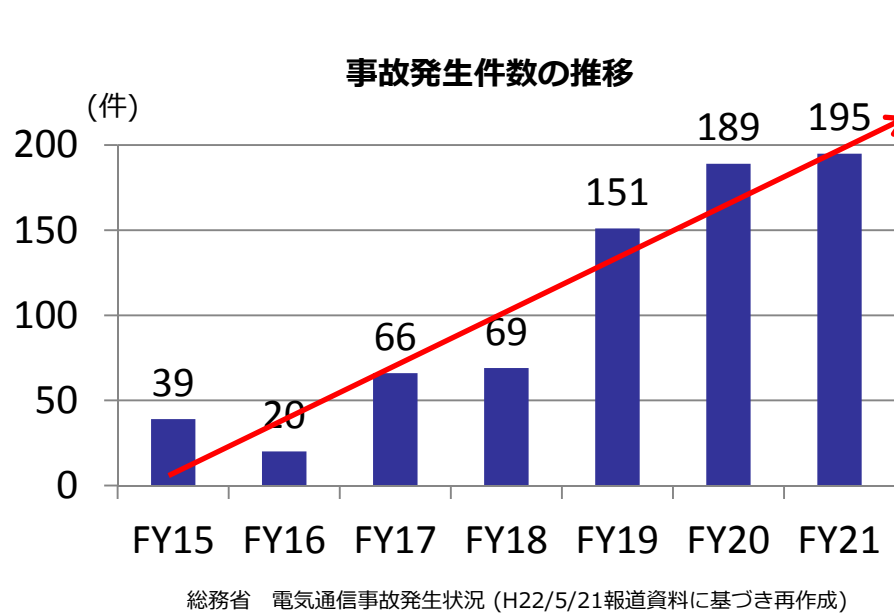


それぞれのルータが他のそれぞれのルータに対して3つの経路候補を持つ

ゆらぎ経路制御技術の効果

本技術の実用化により
顕在化してきた課題を解決

1. 消費電力の増大
2. 複雑化による厳密制御の破綻



急激なトラヒック変動や故障に対する頑健性の向上により通信障害を回避、設備投資費用を大幅に圧縮

制御部（ソフトウェア）の省エネ化により電力消費を大幅に削減

2020年の実用化に向けた研究開発

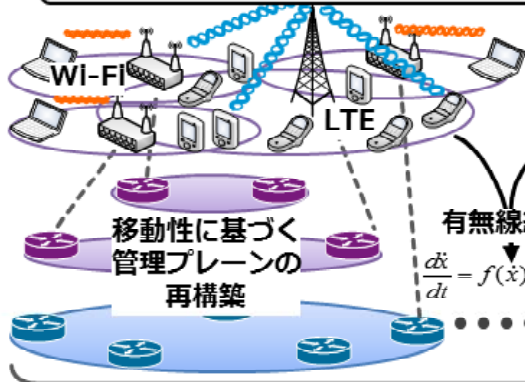
研究開発課題と成果目標

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技術基盤の実現

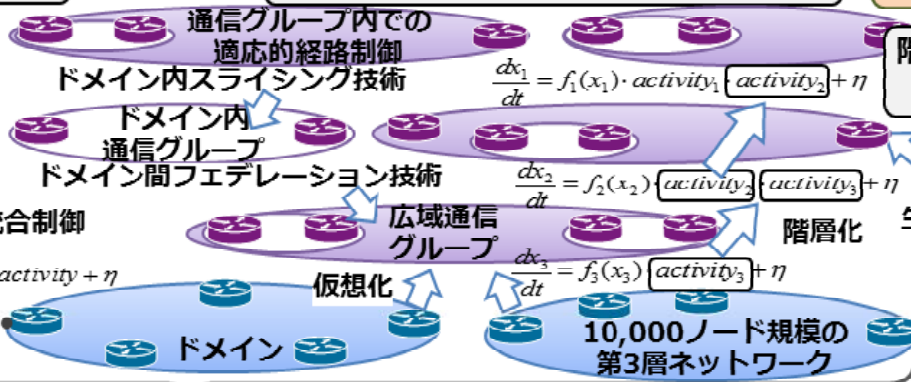
課題 ア) 自己組織型省エネ・高信頼な第3層経路制御技術に関する研究開発

ア-1) 地球規模自己組織型省エネ・高信頼な第3層経路制御技術の研究開発

大規模無線ネットワークにおける
第3層経路制御技術



大規模有線ネットワークにおける
第3層経路制御技術



ア-2) 階層化に基づく
くゆらぎ制御に関する
研究開発

階層化経路制御技術に関
する研究開発

生体内の階層構造
適応制御の応用

脳や生体における階
層構造、適応
制御に関する研究

100,000ドメイン

成果目標

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と比較して、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。

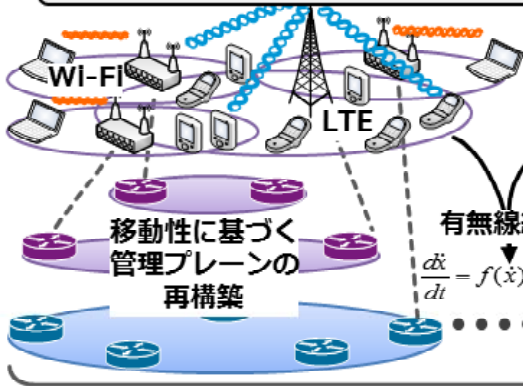
研究開発課題と成果目標

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技術基盤の実現

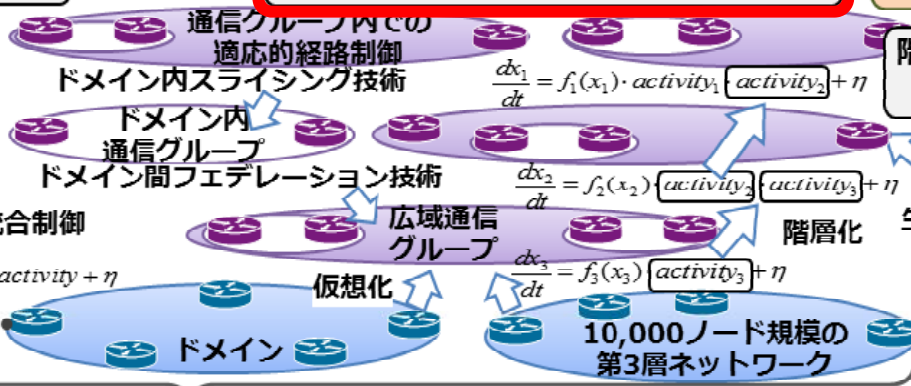
課題 ア) 自己組織型省エネ・高信頼な第3層経路制御技術に関する研究開発

ア-1) 地球規模自己組織型省エネ・高信頼な第3層経路制御技術の研究開発

大規模無線ネットワークにおける第3層経路制御技術

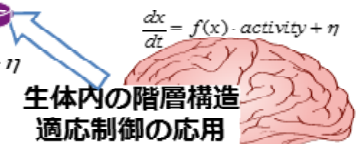


大規模有線ネットワークにおける第3層経路制御技術



ア-2) 階層化に基づくゆらぎ制御に関する研究開発

階層化経路制御技術に関する研究開発



脳や生体における階層構造、適応制御に関する研究

100,000ドメイン

成果目標

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と比較して、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。

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 大規模有線ネットワークにおける第3層経路制御技術

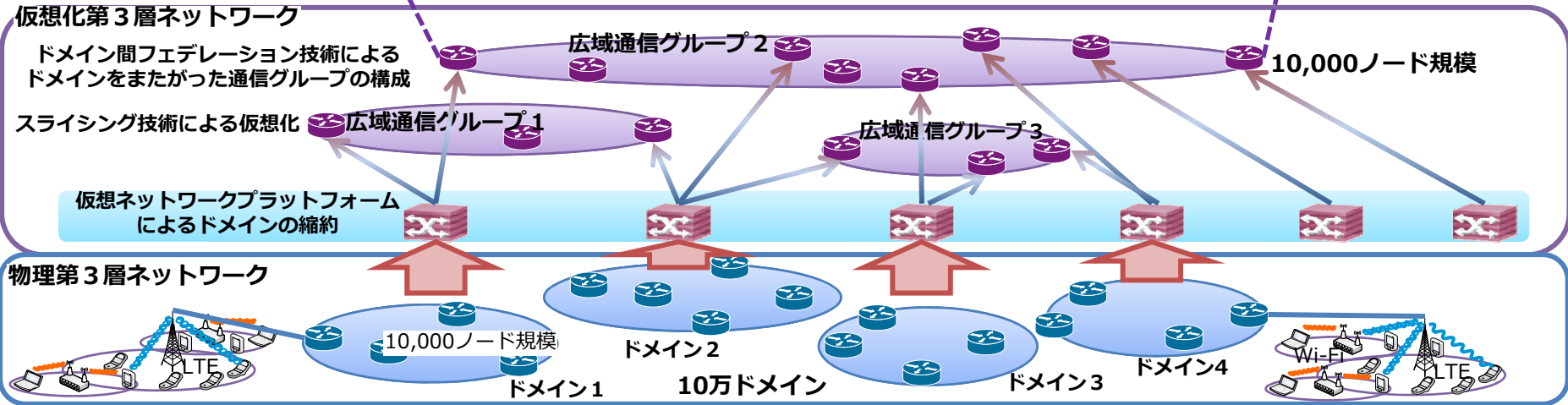
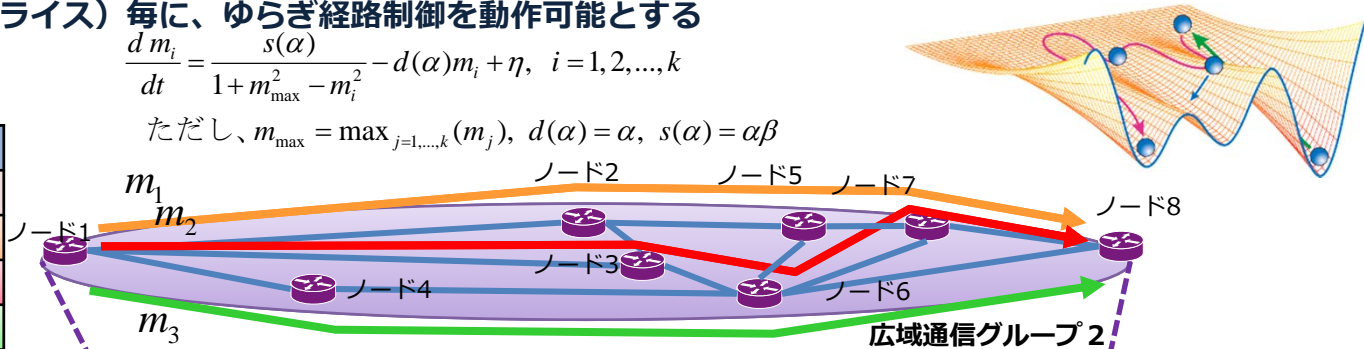
- 各広域通信グループ (スライス) 毎に、ゆらぎ経路制御を動作可能とする

$$\frac{d m_i}{dt} = \frac{s(\alpha)}{1 + m_{\max}^2 - m_i^2} - d(\alpha)m_i + \eta, \quad i = 1, 2, \dots, k$$

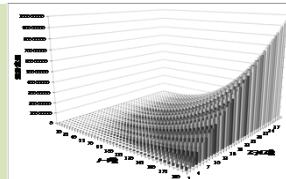
ただし、 $m_{\max} = \max_{j=1, \dots, k} (m_j)$, $d(\alpha) = \alpha$, $s(\alpha) = \alpha\beta$

ノード1→8経路表

宛先 8	
次ホップ	選択確率
ノード2	m_1
ノード3	m_2
ノード4	m_3



ドメイン内スライシング技術と仮想ネットワークプラットフォームを開発し、**計算量削減に寄与するネットワーク階層化が可能**となった



ネットワークの仮想化・経路制御の複雑性を軽減する仮想スイッチシステムを開発し、実環境において100台程度の物理スイッチ上に合計100程度の独立した仮想ネットワークを構築可能となった



ドメイン間フェデレーション技術により、ドメイン間でトラフィックを一貫して制御でき、物理的に広域なネットワーク上での**仮想ネットワーク構築が可能**となり、多様なサービスの広域展開の道筋ができた



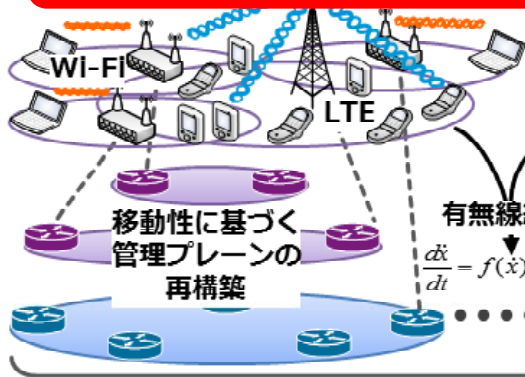
研究開発課題と成果目標

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技術基盤の実現

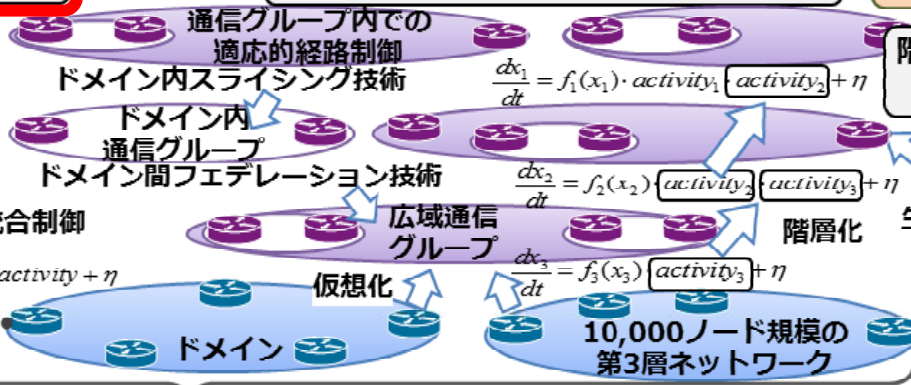
課題 ア) 自己組織型省エネ・高信頼な第3層経路制御技術に関する研究開発

ア-1) 地球規模自己組織型省エネ・高信頼な第3層経路制御技術の研究開発

大規模無線ネットワークにおける第3層経路制御技術

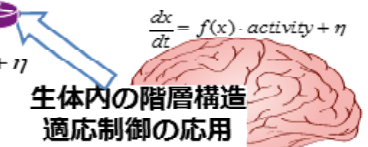


大規模有線ネットワークにおける第3層経路制御技術



ア-2) 階層化に基づくゆらぎ制御に関する研究開発

階層化経路制御技術に関する研究開発



脳や生体における階層構造、適応制御に関する研究

成果目標

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。

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 大規模無線ネットワークにおける第3層経路制御技術

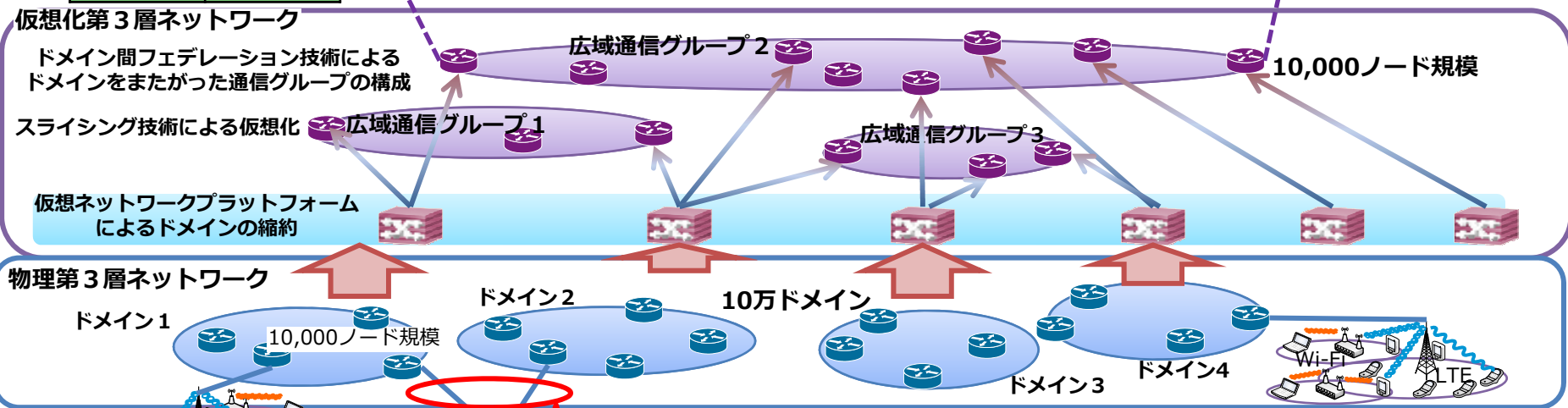
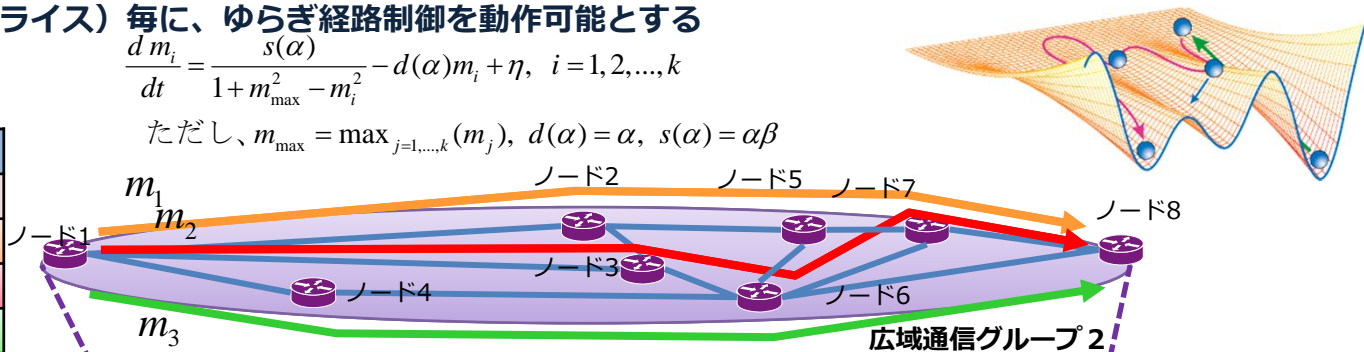
- 各広域通信グループ（スライス）毎に、ゆらぎ経路制御を動作可能とする

$$\frac{d m_i}{dt} = \frac{s(\alpha)}{1 + m_{\max}^2 - m_i^2} - d(\alpha)m_i + \eta, \quad i = 1, 2, \dots, k$$

ただし、 $m_{\max} = \max_{j=1, \dots, k} (m_j)$, $d(\alpha) = \alpha$, $s(\alpha) = \alpha\beta$

ノード1→8経路表

宛先 8	
次ホップ	選択確率
ノード2	m_1
ノード3	m_2
ノード4	m_3



複数無線インターフェース
選択制御

動的クラスタリング制御

省エネ型無線ネットワーク経路制御アルゴリズムを開発し、
端末10万台規模（論理的台数を含む）の大規模環境、
100km/h程度の高速移動環境において適応的に動作
し続けることが可能となり、また、無線インターフェ
ース切替コストを既存技術の1/1000以下に削減できた



複数無線インターフェース選択制御

複数無線インター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、環境変動に適応して最適な経路を選択する無線インターフェース選択制御アルゴリズムを創出した

動的クラスタリング制御

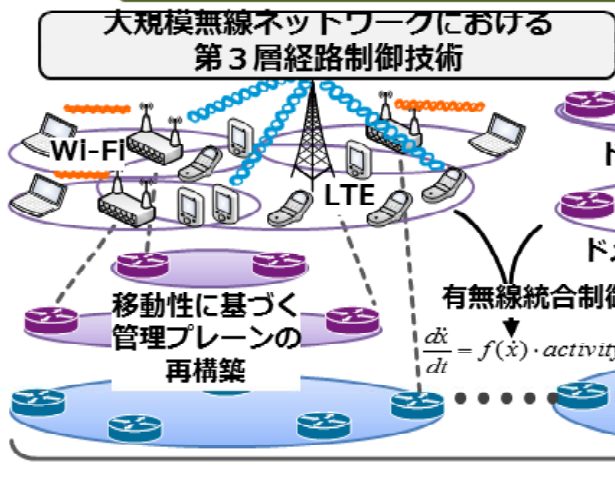
端末の移動性に関する情報を基に、環境変動に適応して最適なドメイン構成を動的に選択制御する動的クラスタリング制御アルゴリズムを創出した

研究開発課題と成果目標

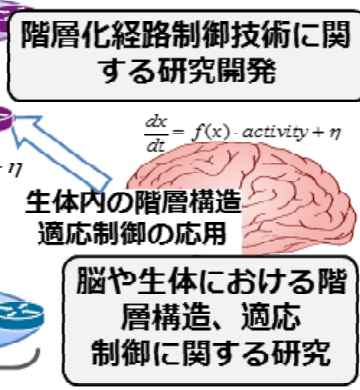
脳の動作原理の活用による省エネで外乱に強いネットワーク制御技術基盤の実現

課題 ア) 自己組織型省エネ・高信頼な第3層経路制御技術に関する研究開発

ア-1) 地球規模自己組織型省エネ・高信頼な第3層経路制御技術の研究開発



ア-2) 階層化に基づくゆらぎ制御に関する研究開発



成果目標

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。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。

課題ア-2) 階層化に基づくゆらぎ制御に関する研究開発

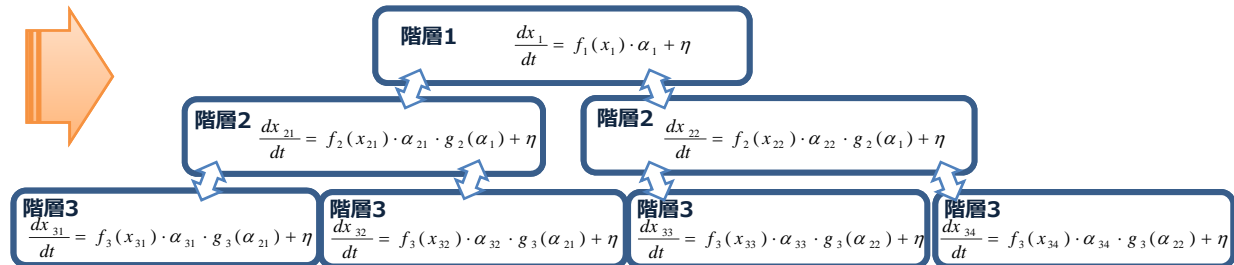
1. 脳や生体の階層構造や適応制御構造の解明



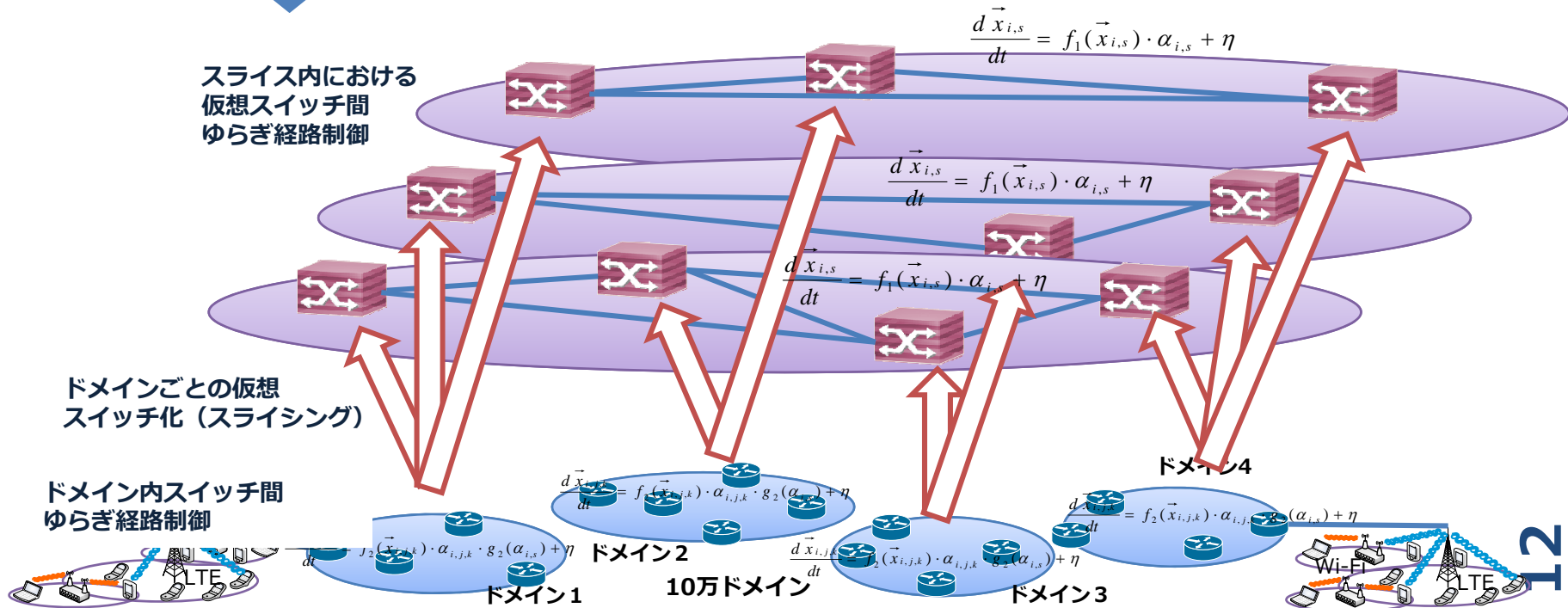
- 脳や生体の階層構造性に基づく環境変動への適応制御のしくみの解明
- そのために、階層化ゆらぎ制御モデルを構築し、視覚認知機構などを対象に実験データを収集、解析し、検証



2. 階層間相互作用を考慮した階層化ゆらぎ制御に基づく経路制御



これらの結果に基づいて、第3層経路制御のさらなる計算時間の短縮を図る



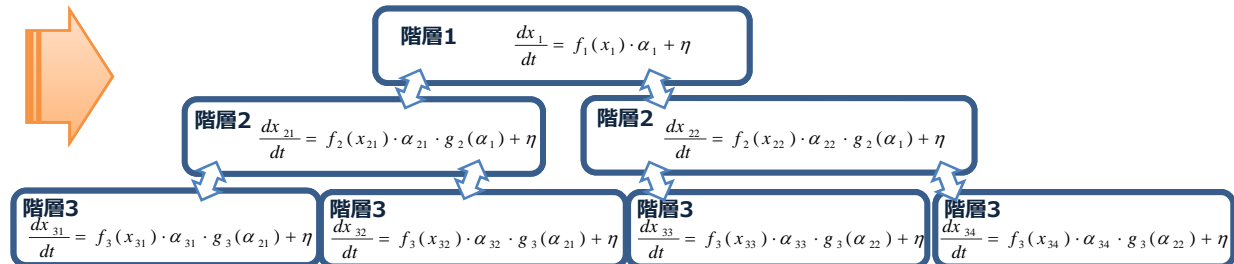
課題ア-2) 階層化に基づくゆらぎ制御に関する研究開発

1. 脳や生体の階層構造や適応制御構造の解明



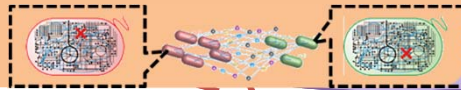
- 脳や生体の階層構造性に基づく環境変動への適応制御のしくみの解明
- そのために、階層化ゆらぎ制御モデルを構築し、視覚認知機構などを対象に実験データを収集、解析し、検証

2. 階層間相互作用を考慮した階層化ゆらぎ制御に基づく経路制御

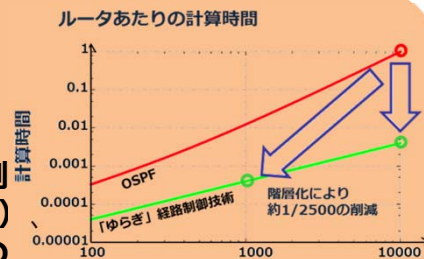


これらの結果に基づいて、第3層経路制御のさらなる計算時間の短縮を図る

脳や生体における階層構造や適応制御構造について、解析およびモデル化することによって、脳や生体に学ぶ階層的なゆらぎ制御による適応性向上の見通しを得た

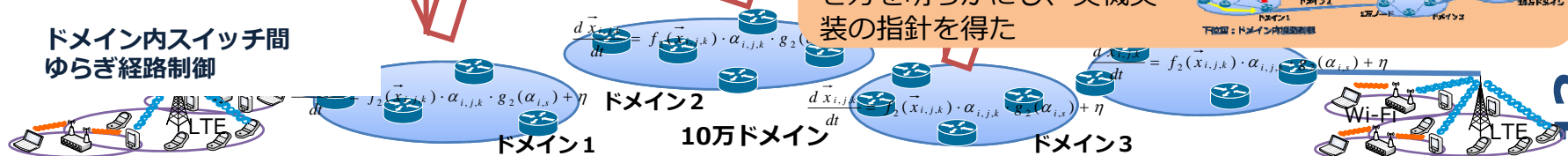


既存技術との比較によって、階層型の適応経路制御の基本アルゴリズムにより、1万ノード規模のネットワークにおける約2500分の1の計算量削減効果（階層化時の見積もり）30%のルータの同時故障時の高い経路存在率など、政策目標、研究開発目標が達成可能であることを示す成果が得られた



ドメインごとの仮想スイッチ化 (スライシング)

ドメイン内スイッチ間ゆらぎ経路制御

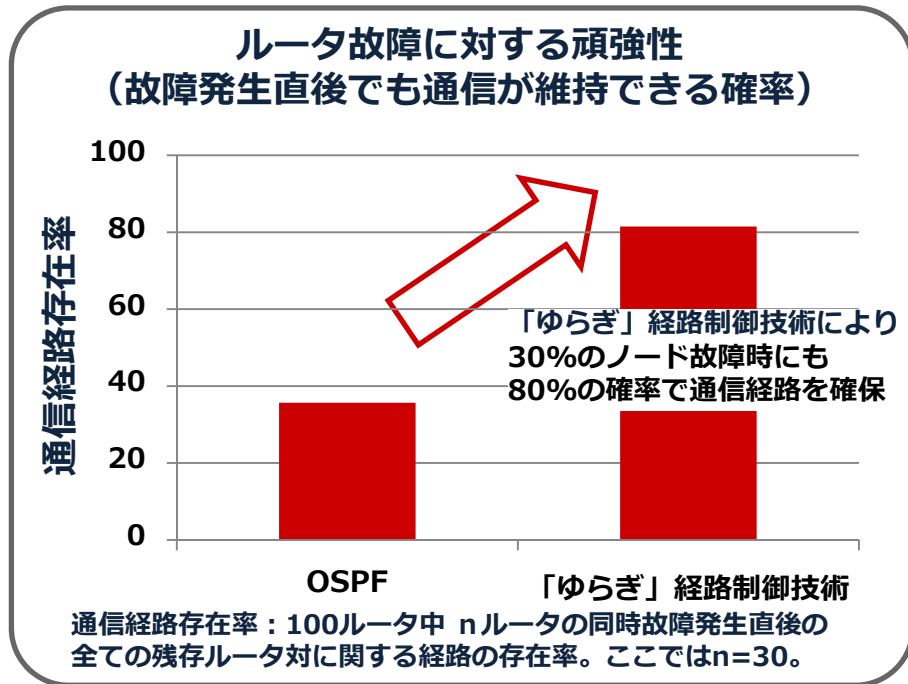


2階層からなる階層型の適応的経路制御における、経路品質、経路収束時間、適応性に優れた階層間の組み合わせ方を明らかにし、実機実装の指針を得た

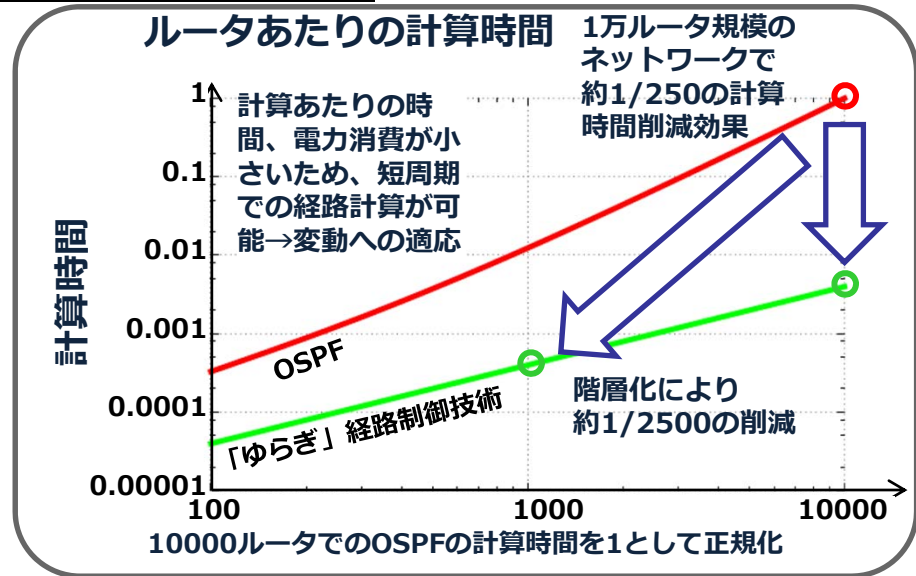
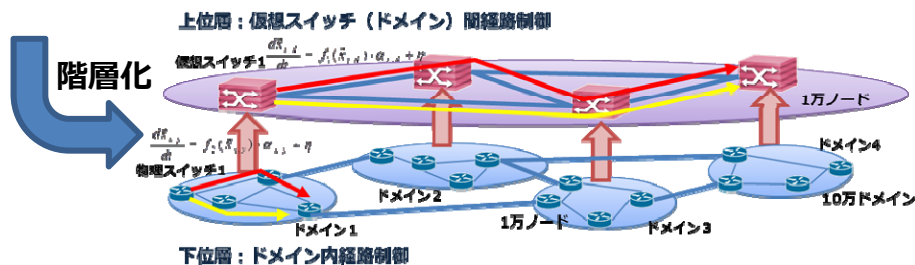
課題ア-2) 階層化に基づくゆらぎ制御に関する研究開発 ゆらぎ制御の妥当性の検証

シミュレーション評価により「ゆらぎ」経路制御技術の妥当性を確認

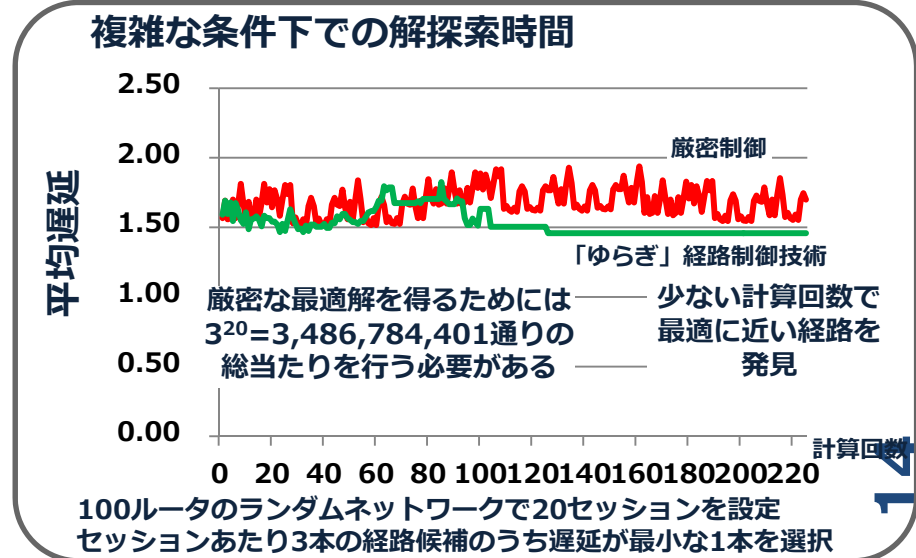
- 機器の同時故障時にも高い通信成功率を確保
- 通信経路の計算時間を約1/2500に短縮
- 複雑な条件下で高速に最適に近い経路を発見



「ゆらぎ」経路制御技術はトラフィック変動や故障に対して頑強であるため、トポロジー情報の収集間隔を大幅に長くできる



例：OSPFの10倍周期とするとトータルの電力消費10分の1その間、通信状態の変化にも適応、障害発生時も通信維持できる



成果概要 (まとめ)

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技術基盤の実現

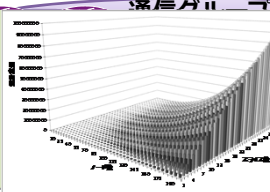
課題 ア) 自己組織型省エネ・高信頼な第3層経路制御技術に関する研究開発

ア-1) 地球規模自己組織型省エネ・高信頼な第3層経路制御技術の研究開発

ア-2) 階層化に基づくゆらぎ制御に関する研究開発

有線ネットワーク技術

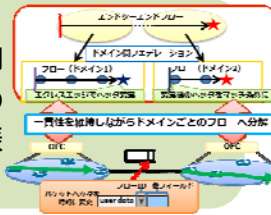
ドメイン内スライシング技術と仮想ネットワークプラットフォームを開発し、**計算量削減に寄与するネットワーク階層化が可能**となった



ネットワークの**仮想化・経路制御の複雑性を軽減**する仮想スイッチシステムを開発し、実環境において100台程度の物理スイッチ上に合計100程度の独立した仮想ネットワークを構築可能となった



ドメイン間フェデレーション技術により、ドメイン間でトラフィックを一貫して制御でき、物理的に広域なネットワーク上での**仮想ネットワーク構築が可能**となり、多様なサービスの広域展開の道筋ができた



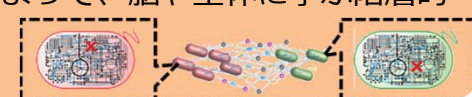
無線ネットワーク技術

省エネ型無線ネットワーク経路制御アルゴリズムを開発し、端末10万台規模（論理的台数を含む）の大規模環境、100km/h程度の高速移動環境において適応的に動作し続けることが可能となり、また、**無線インタフェース切替コストを既存技術の1/1000以下に削減**できた

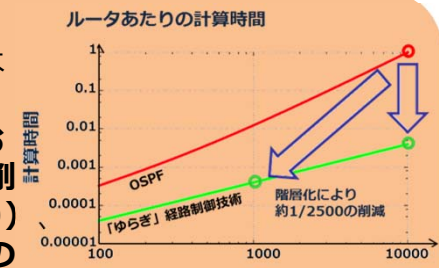


大規模有線ネットワークにおける第3層経路制御技術

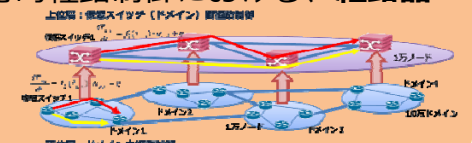
脳や生体における階層構造や適応制御構造について、解析およびモデル化することによって、脳や生体に学ぶ階層的なゆらぎ制御による適応性向上の見通しを得た



既存技術との比較によって、階層型の適応経路制御の基本アルゴリズムにより、**1万ノード規模のネットワークにおける約2500分の1の計算量削減効果（階層化時の見積もり）**30%のルータの同時故障時の高い経路存在率など、政策目標、研究開発目標が達成可能であることを示す成果が得られた



2階層からなる階層型の適応的経路制御における、**経路品質、経路収束時間、適応性に優れた階層間の組み合わせ方を明らかにし、実機実装の指針を得た**



省エネかつ外乱に強い第3層経路制御技術を実現するための基本要素技術（ネットワーク仮想化技術、階層型ゆらぎ制御アルゴリズム）を確立し、シミュレーション、数値解析等により、政策目標、研究開発目標が達成可能性であることを確認した

研究成果の社会展開（計画）

本研究開発成果の社会展開は、新たなサービス市場の創出を目指して、以下の表に示すように、継続して取り組みを推進する。

年度	目的	取組計画	評価項目
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
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
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
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