

**総務省 ICT重点技術の研究開発  
平成25～27年度**

**変動する通信環境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**

**研究代表者：村田正幸（大阪大学）**

**研究分担者：若宮直紀，寺前順之介，一居哲夫（大阪大学）**

**桐葉佳明，柳生智彦，一圓真澄，本吉彦，加美伸治，**

**小川雅嗣，若山永哉（日本電気株式会社）**

**ICTイノベーションフォーラム2016**

**2016年10月**

# 研究開発の目的と手法

## 目的

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、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の制御技術として、自己組織型有線ネットワーク経路制御技術、および自己組織型無線ネットワーク経路選択技術を実現する。

## 本研究開発の特徴

- ゆらぎを積極的に活用したゆらぎ制御、それに基づいた自己組織化制御技術の実用化
- 既存技術では不可能であった、大規模・複雑・多様なネットワークにおいても動作可能な自己組織化制御を、ゆらぎ制御をさらに発展させ、階層化・グループ化技術を導入することによって実現

## 手法

- 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。
- ゆらぎ制御によって、制御に要する計算時間を著しく短縮し、かつ、自己組織化制御によって外乱に強いネットワーク制御基盤技術を確立する。すなわち、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、新しい状況に応じた最適もしくはそれに近い解を探索する。

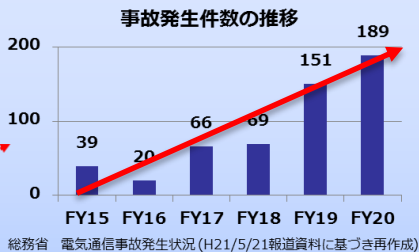
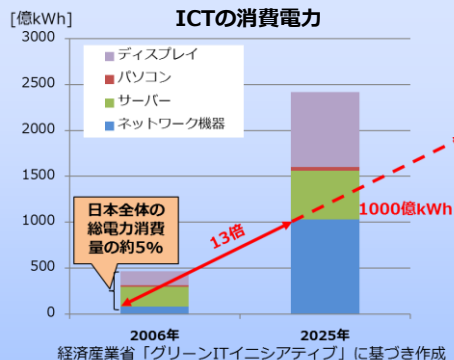
## ゆらぎ制御の特徴

- 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
- 全体システム制御を不要とすることによって、制御に要する計算時間の著しい低減を実現

# ゆらぎ制御原理

## 現状の情報通信制御

### 情報通信技術は膨大な電力を消費



大規模・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

## 脳や生体に学ぶゆらぎ制御

### 脳や生体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10ワットの動作エネルギーでロバストに働く

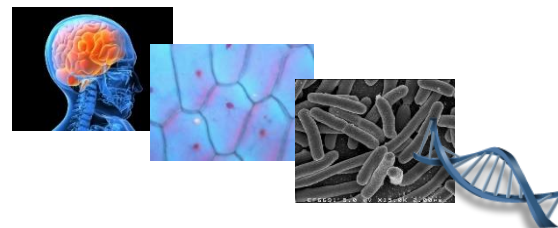
- ・ ノイズを許容
- ・ 「曖昧」だが柔軟

## 分子から脳まで階層を越えた共通原理の抽出

### ゆらぎ方程式

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

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

- ・ 故障発生時に素早く、故障箇所を回避
- ・ 負荷変動などの環境変動に対する素早い対応

# ゆらぎ制御原理の概念

変化する環境下で  
適切なアトラクタを  
探索し、**選択する**

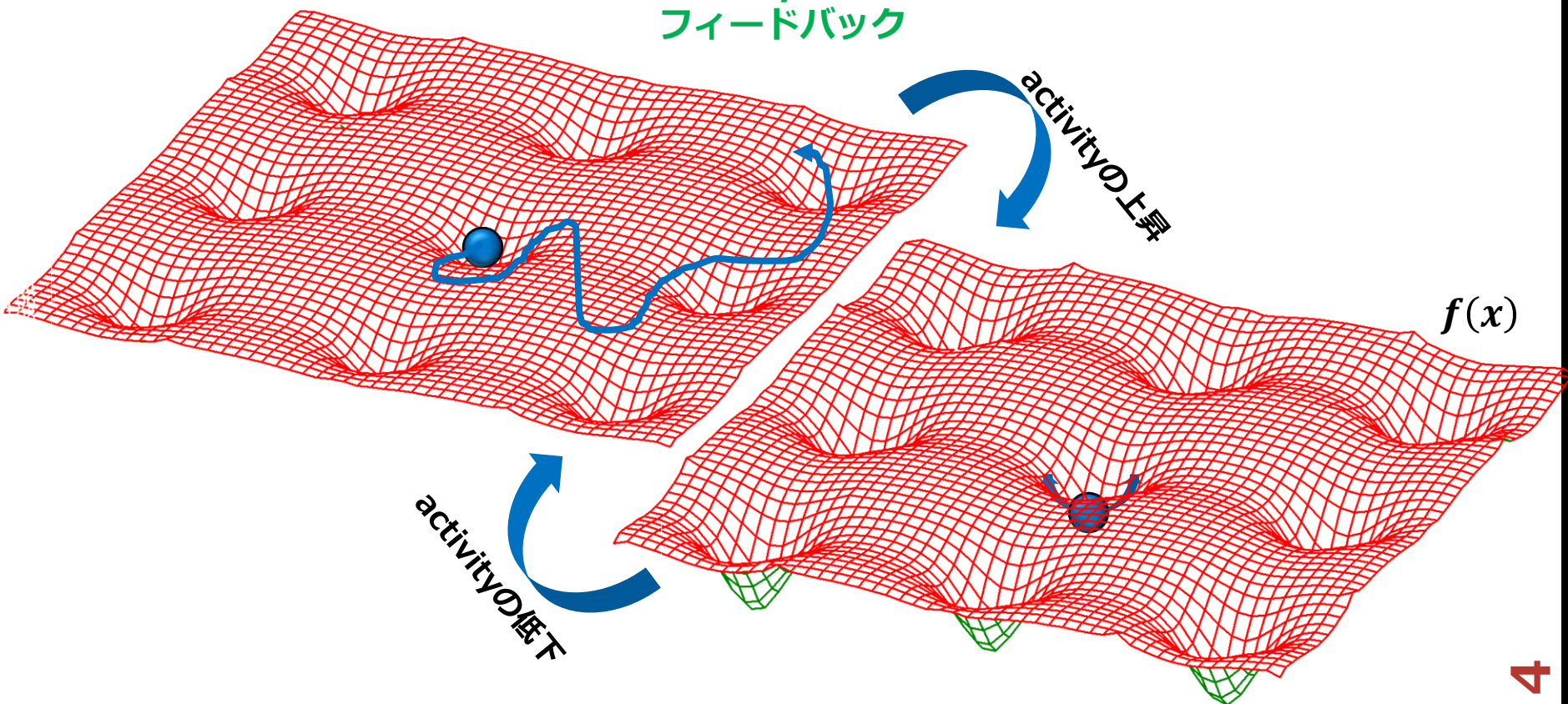
引き込みによる  
状態安定化

ゆらぎによる  
ランダムサーチ

$$\frac{d}{dt} x = \boxed{f(x)} \boxed{\alpha} + \boxed{\eta}$$

activityによる  
フィードバック

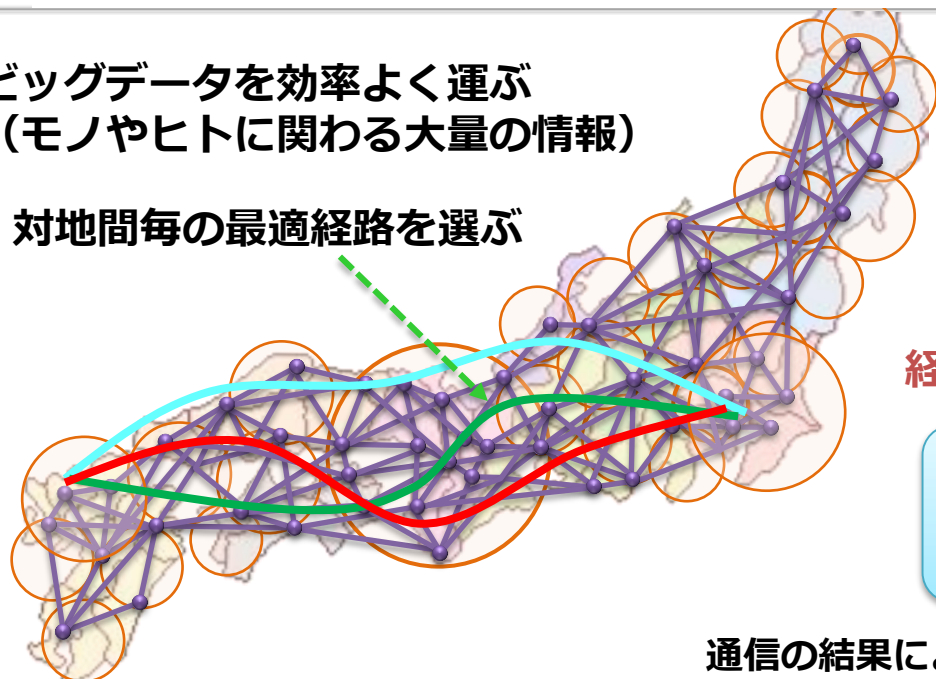
アトラクタ : システムがとりうる状態  
activity : 状態xの良さによって  
定められる最適化指標



# ゆらぎ制御原理を利用した情報ネットワークの経路制御

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)

対地間毎の最適経路を選ぶ



常に変動している通信状況を  
環境情報として取り込みながら、  
適応的で応答性のよい経路制御を実現

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

経路選択確率

活性度

ノイズ

$$\frac{dx}{dt} = \frac{s(activity)}{1 + \max(x)^2 - x^2} - d(activity)x + \eta$$

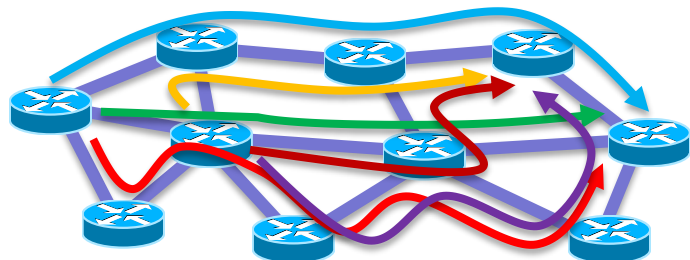
activity: 経路の良さ (帯域, 遅延時間の逆数)

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

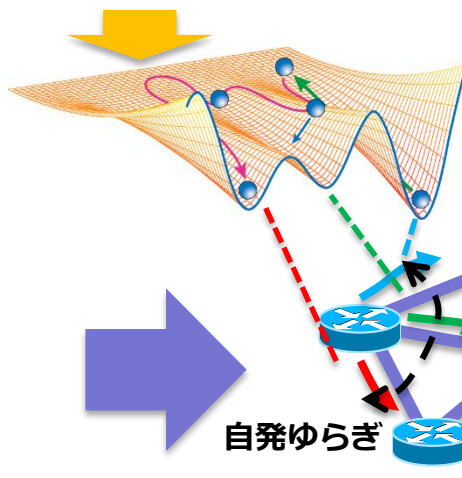
$3^{N(N-1)}$ 通りの計算量

$3^{90} = 8.73 \times 10^{42}$  (873正)

膨大なエネルギーと時間が必要



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

全体で $N^2$ 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

# 研究開発課題と成果目標

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

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

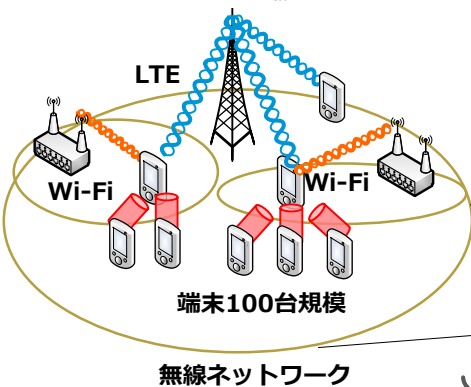
課題ア)  
自己組織型有線ネットワーク  
経路制御技術に関する研究開発

課題ウ)  
自己組織型階層的ゆらぎ制御  
に関する研究開発

無線ネットワークにおける  
データ通信スループットを10倍向上

経路制御における経路の収束時間を  
現状の1/1000に短縮

通信環境に応じた  
適応的経路選択  $\frac{dx}{dt} = f(x) \cdot activity + \eta$



柔軟な仮想化によるゆらぎ制御の効果的活用

通信グループ内での  
適応的経路制御

ドメイン間フェデレーション技術

$$\frac{dx_1}{dt} = f_1(x_1) \cdot activity_1 + \eta$$

ドメイン内スライシング技術

$$\frac{dx_2}{dt} = f_2(x_2) \{ activity_1 \cdot activity_2 + \eta$$

仮想化

ネットワーク  
縮約技術

$$\frac{dx_3}{dt} = f_3(x_3) \{ activity_2 \cdot activity_3 + \eta$$

ドメイン

10,000ノード規模の  
ネットワークドメイン

100,000ドメイン

自己組織型階層的ゆらぎ制御  
に関する研究開発

$$\frac{dx}{dt} = f(x) \times activity + h$$

生体内の階層構造  
適応制御の応用

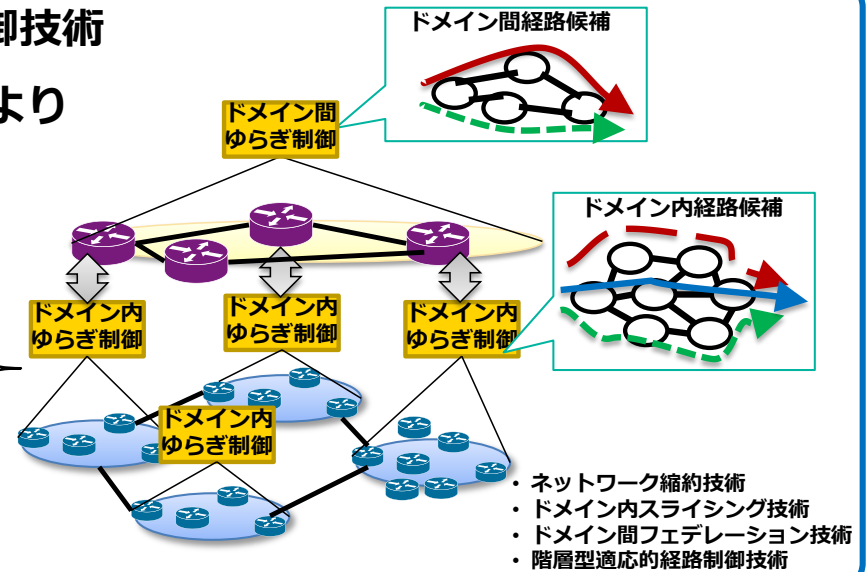
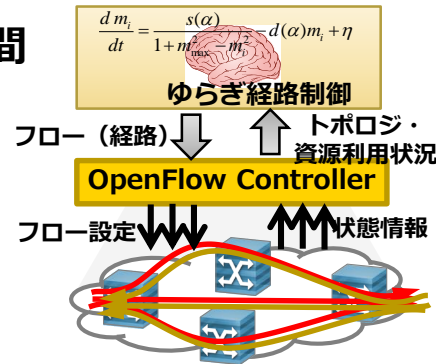
脳や生体における階層  
構造、適応制御に関する  
研究

# 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

## 低計算量で広域トラフィック変動に追従する経路制御技術

- SDN (Software Defined Network) 技術により大規模ネットワークを仮想化・階層化

- ドメイン内・ドメイン間それぞれの階層でゆらぎ制御による適応的経路選択



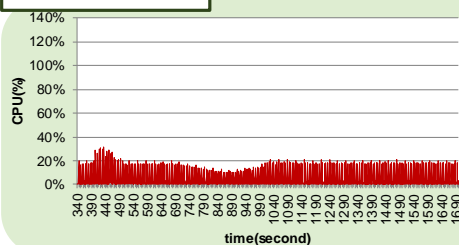
従来手法では経路が収束しない変動環境に対し

- 安定した経路選択を達成
- 遅延性能で80%以上を維持
- 計算量を7分の1に抑制 (ノード40台規模)

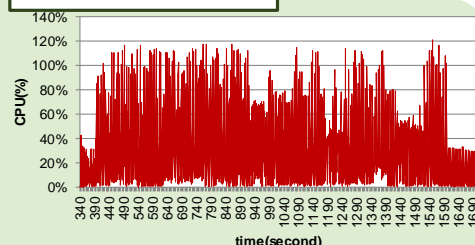
1000台規模の広域ネットワーク

- 従来手法に比べ25~50%程度の負荷で安定した遅延性能を実現

ゆらぎ (40ノード)

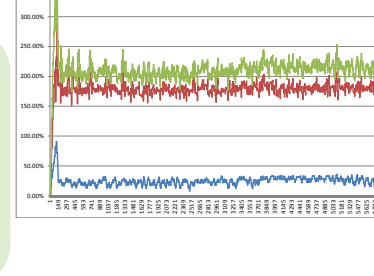


ダイクストラ (40ノード)



CPU使用率 ダイクストラ (遅延)

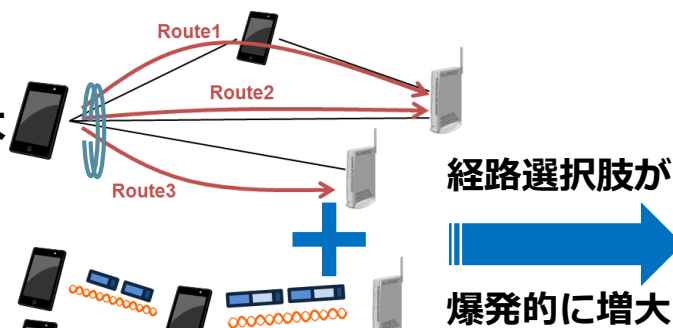
従来手法  
CPU負荷は常に200%以上



# 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

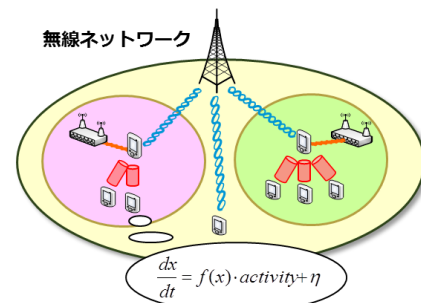
## 省エネ・高信頼な複数無線通信インフラ制御技術を確立

- 無線インタフェース選択  
複数無線通信インフラを用意  
することで利用可能帯域を拡大
- 端末間パケット集約  
無線フレーム送信処理の  
オーバーヘッド・通信衝突を抑制し  
送受信効率を向上



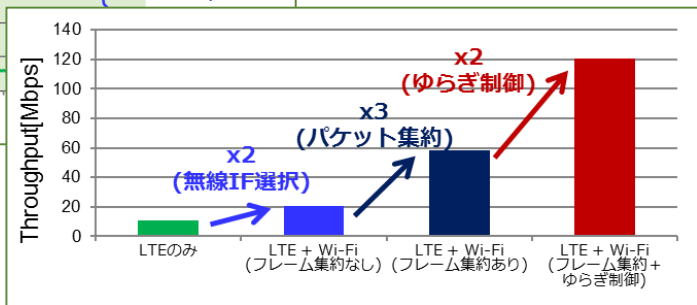
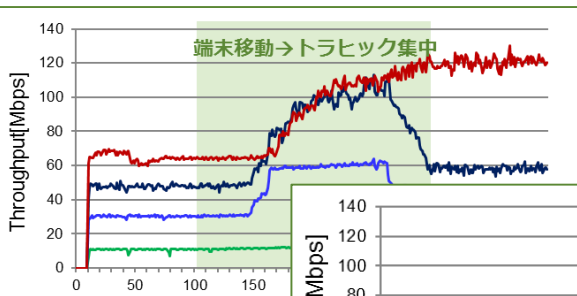
## 無線ゆらぎ制御

経路選択肢の爆発的増大、  
接続環境の頻繁な変化に対応し、  
実用時間で経路導出



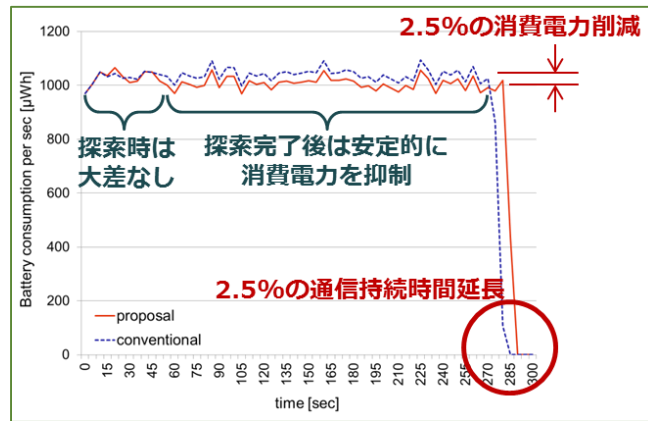
従来のシングルホップ通信技術と比較して

- スループット10倍以上を達成



端末の残電力量を加味したゆらぎ制御

- 残存電力量の少ない端末の消費電力量を  
抑え、通信可能時間を2.5%延長

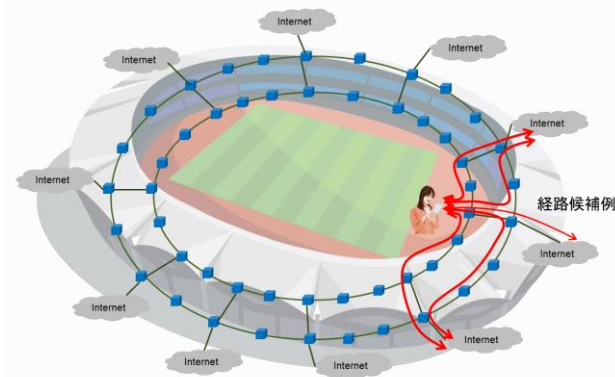




# スタジアムソリューションを想定した有無線統合システム実験

## 利用形態が大きく変化するネットワーク環境

- 観客にWiFi環境を提供
- SNS等への投稿（データ系上り通信）
- Web・SNS情報の取得（データ系下り通信）
- 動画の視聴（ストリーム系下り通信）
- 動画のリアルタイム配信（ストリーム系上り通信）
- 競技の進行に応じて異なる時間・場所でトラフィック量が変化

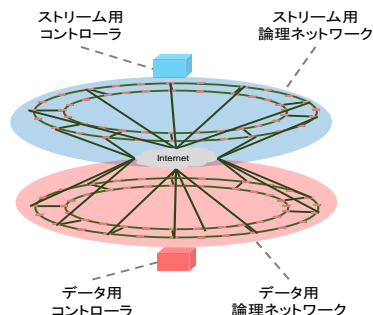


7万人収容スタジアム

- 無線LAN AP 600台
- スイッチ 50台
- 外部回線 10Gbps

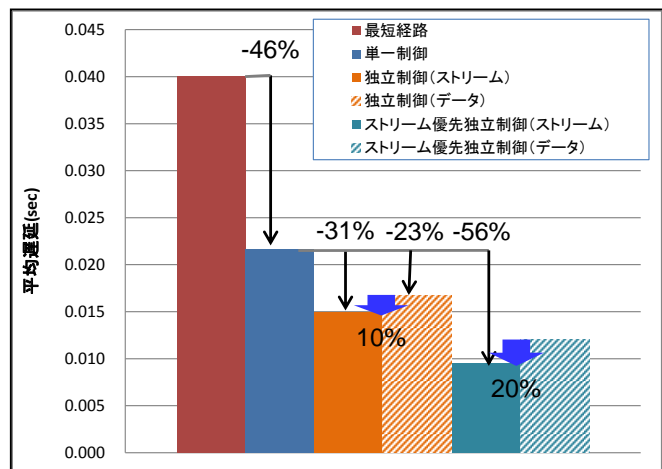
## 有線ネットワーク経路制御

- ストリーム系とデータ系を論理的に分離、ゆらぎ制御
- 遅延を75%短縮
- 輻輳状態を35%削減

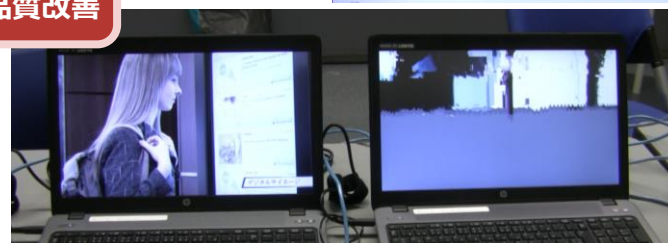


## 無線ネットワーク経路選択

- 背景負荷発生による通信品質劣化に対して適切に無線経路を切替え、通信品質を改善



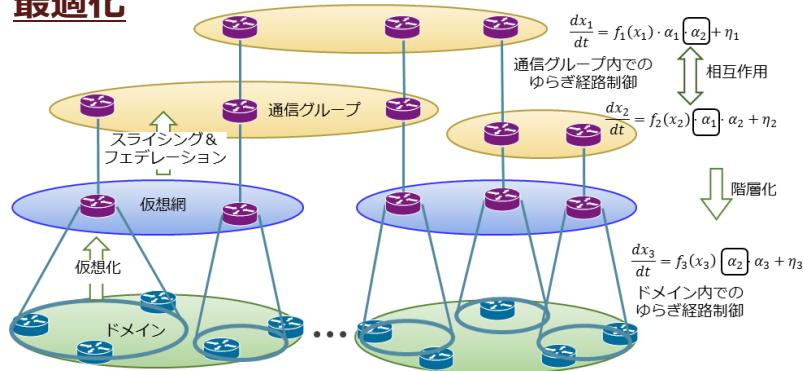
ゆらぎ制御(左)の通信品質改善



# 課題ウ) 自己組織型階層的ゆらぎ制御に関する研究開発

## 階層的ゆらぎ制御の拡張と定量的特性解明

### 階層的ゆらぎ制御における相互作用による適応、最適化

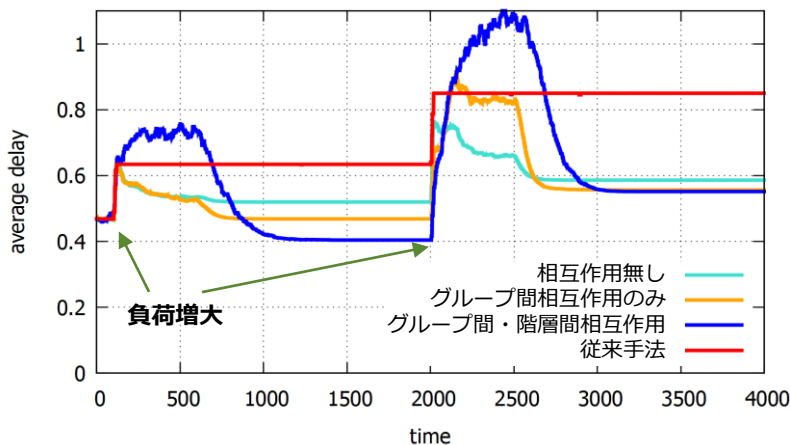


評価条件

階層化ネットワーク (Waxman)

- ・ 100ドメイン、100ノード/ドメインの1万ノード
- ・ 3通信グループ、50ドメイン/グループ

グループ間・階層間相互作用を取り入れることによって、  
負荷変動に対して最も小さい遅延を達成



### ゆらぎ制御の最適性

相互作用のあるゆらぎ制御により、  
最適または最適に近い解を発見

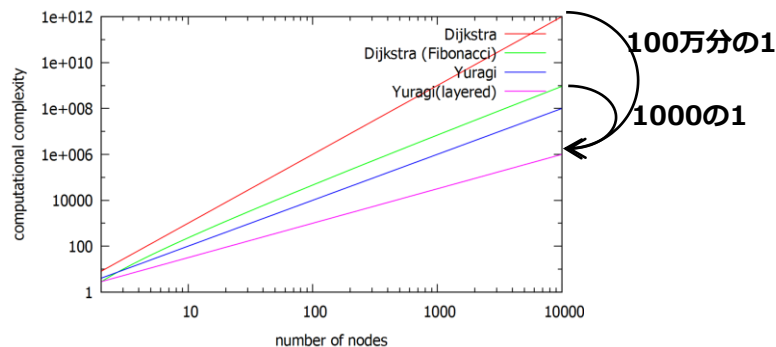
- ・ 最適解への収束率 約50%
- ・ 最適でない収束解の最適性 約99% (最適解/収束解)

(50ノード, 100リンク. うち6セッションがゆらぎ制御)

### ゆらぎ制御による計算量削減効果

従来手法に比して計算量を1000分の1~100万分の1に削減

ダイクストラアルゴリズム	$O(N^3)$	) $O(N\sqrt{N})$ の削減
→ ダイクストラ高速化	$O(N^2 \log N)$	
ゆらぎ制御	$O(N^2)$	← $N$ : ノード数
→ 階層型ゆらぎ制御	$O(N\sqrt{N})$	



### ゆらぎ制御の耐故障性

- ・ 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、低遅延を安定的に達成

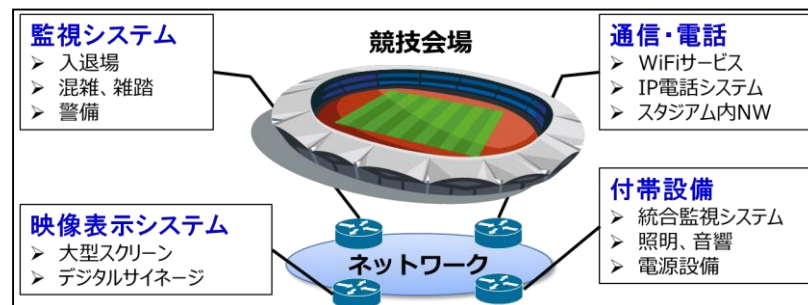
# 研究成果の展開

想定顧客のヒアリングを実施。その結果と5G無線の動向調査・分析を含めたビジプロ活動を行ない「ゆらぎ制御」が効果的に働く利用シーンを明確化。大規模ネットワークの単なる高信頼化ではなく、利用形態そのものが今後大きく変化するネットワーク環境を想定し、快適な通信環境を提供し続けるという価値を軸とした将来展開シナリオ（ロードマップ）を立案。

## ・ 5Gの展開を見据えた将来展開シナリオ（ロードマップ）

### ・ 三段階のサービスシナリオ

- ① スタジアムネットワークソリューション
- ② 大規模スポーツイベントを想定したサービス
- ③ 2020年以降のサービス（Beyond 2020）



## ・ オープン・クローズ戦略

- ・ 有線制御（課題ア）：SDNプラットフォームで動作するモジュールとしてオープン化
  - ・ オープンソース版SDN制御ソフトウェア（ODENOS）上に、適応的経路制御モジュールを移植し、外部提供準備完了。ハンズオントレーニングを実施
- ・ 無線制御（課題イ）：クローズドスタイルで戦略的なパートナー連携を推進

# まとめ

- ゆらぎ制御原理を応用することにより、大規模・複雑・変動する広域ネットワークのための外乱に強く省エネなネットワーク制御基盤技術を確立

自己組織型階層的ゆらぎ制御  
自己組織型無線ネットワーク経路選択技術  
自己組織型有線ネットワーク経路制御技術  
ゆらぎ制御

## 計算時間

- 1万台規模ネットワークで約1000~100万分の1へ計算量を削減

## 適応性、最適性

- 1000台規模のネットワークで有線NW適応的経路制御システムを実現
- トラヒック変動に対してほぼ100%の確率で、最適解、あるいは極めて最適に近い解を発見

## 有効性

- 通信端末100台規模の無線NWでスループット10倍以上向上

## 実用化

- 有無線NW統合制御ソフトウェアの制作、広域ネットワークでの実証実験
- 有線NW向け適応的経路制御モジュールをOSS版SDN制御ソフトへ移植完了

- オープン・クローズ戦略の下、ゆらぎ制御技術の普及・利用促進と、事業化・製品化を推進