

# ゆらぎ原理に基づく情報通信システム

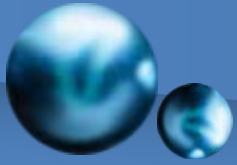


**村田正幸**

**大阪大学 大学院情報科学研究科**

**[murata@ist.osaka-u.ac.jp](mailto:murata@ist.osaka-u.ac.jp)**

**<http://www.anarg.jp/>**



# 脳とコンピュータの違い

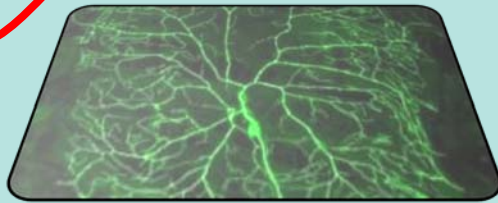
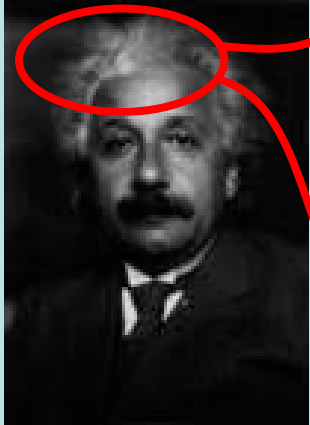
柳田敏雄、「脳に学ぶ複雑情報システムの省エネやわか制御」、脳情報通信融合研究キックオフ・シンポジウム、平成22年3月10日.

## 脳とコンピュータ

## 消費エネルギー

## 動作原理

### ヒト大脳のネットワーク



140億の神経細胞  
50兆個の結合  
超複雑システム

ポイント1

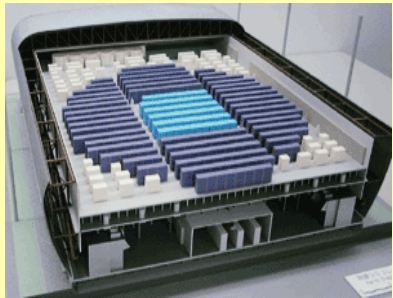
1ワット  
(動作)

ノイズ遮断  
不可能？

ポイント2

ゆらぎを利用？  
いい加減に  
巧妙に制御？

### スーパーコンピュータ



100億個の  
トランジスタ

5万ワット

ノイズを  
遮断して  
働かす

ノイズを遮断  
して正確、高速  
に厳密制御



# 脳は超複雑大規模ネットワークシステム

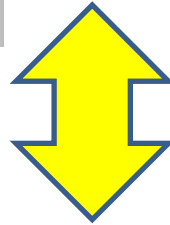
柳田敏雄、「脳に学ぶ複雑情報システムの省エネやわらか制御」、脳情報通信融合研究キックオフ・シンポジウム、平成22年3月10日。



ヒト大脳は140億の神経細胞  
数十兆の結合をもつ  
超大規模、複雑システム

結合の組合せの数 ( $10^{100000000000000}$ )

エネルギー消費1 ワット



脳には複雑なシステムを省エネで  
安定に制御する特別なしくみがある

もしスーパーコンピュータで

この結合の組合せ ( $10^{100000000000000}$ ) を厳密計算

すると、 $10^{100000000000000}$ ワットの電力が必要

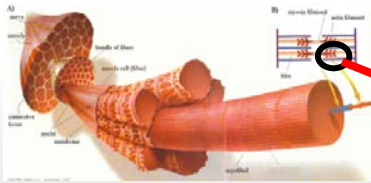
(原子力発電機 ( $\sim 10^{10}$ ワット) が何億台あっても足りない!)



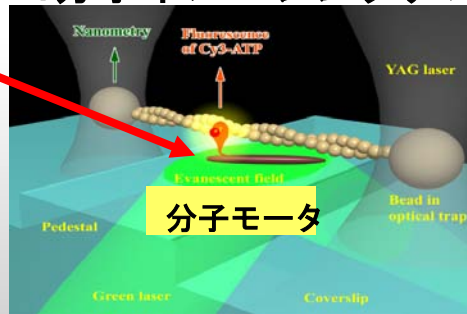
# 生物分子モーターにおける熱ゆらぎ利用

柳田敏雄、「脳に学ぶ複雑情報システムの省エネやわらか制御」、脳情報通信融合研究キックオフ・シンポジウム、平成22年3月10日。

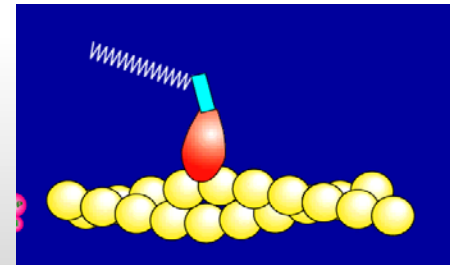
## 筋肉



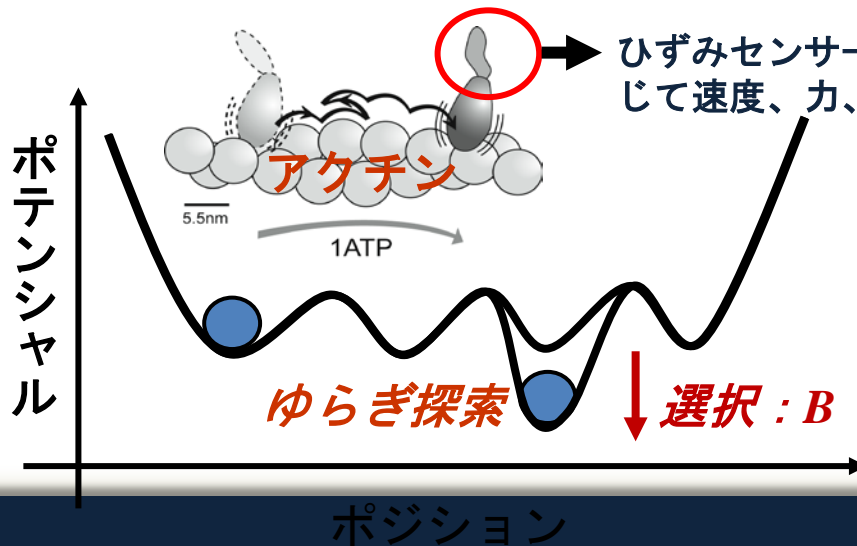
## 最先端計測技術 1分子イメージングナノ計測



## 生物分子モーターの動き



ノイズ（ブラウン運動）を積極的に使って運動！



状況に応じてバイアスされる  
ブラウン運動の式

$$\frac{dx}{dt} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial U(x,t)}{\partial x} B + \sqrt{\frac{2kT}{\rho}} \eta(t)$$

ポテンシャル力 バイアス      ゆらぎ

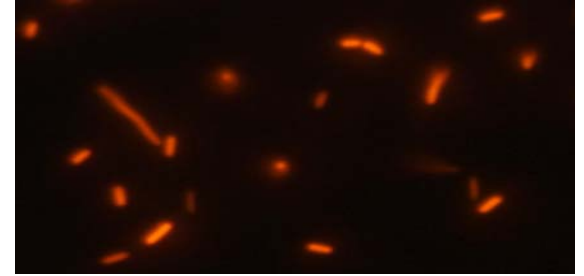
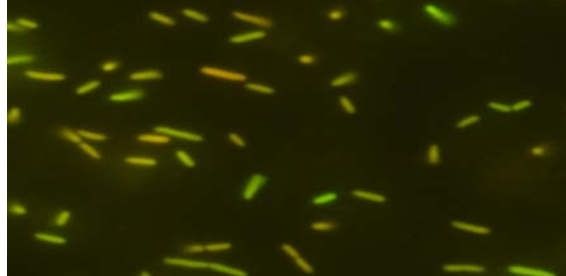
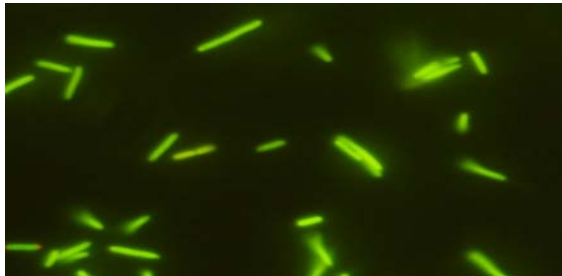
cf. ランジュバン方程式



# 細胞レベル：遺伝子発現の熱ゆらぎによる環境適応

確率的に起こる遺伝子発現をActivity(心地よさ)が上がるようにゆらぎ探索してほぼベストの状態(アトラクタ)を選択

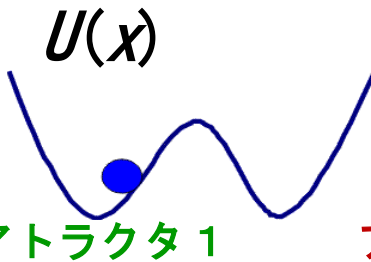
環境1 ← 環境変化 ← 元の環境 → 環境変化環境2



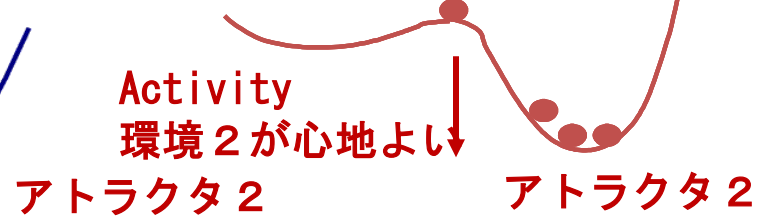
グルタミン欠損環境



ポテンシャル



テトラヒドロ葉酸欠損環境



分子モータ

$$\frac{dx}{dt} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial U(x,t)}{\partial x} B + \sqrt{\frac{2kT}{\rho}} \eta(t)$$

ポテンシャル力    センサシグナル    熱ゆらぎ



細胞

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

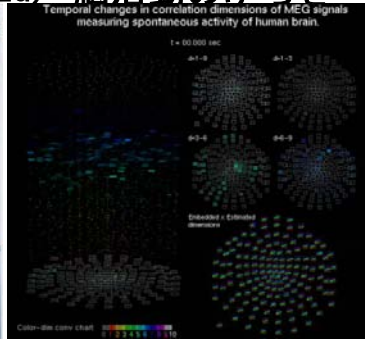
アトラクタ構造    心地よさ    自発ゆらぎ



# ゆらぎとヒト脳の視覚認知

柳田敏雄、「脳に学ぶ複雑情報システムの省エネやわらか制御」、脳情報通信融合研究キックオフ・シンポジウム、平成22年3月10日。

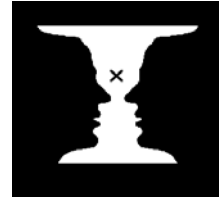
## 脳磁界計測法 (MEG) 脳活動のゆらぎ



ネッカーキューブ

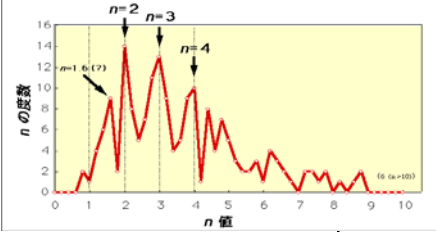


顔を杯

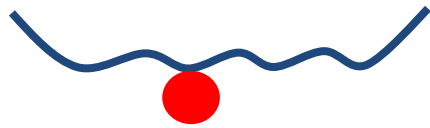


多義図形の認知

離散状態の分布

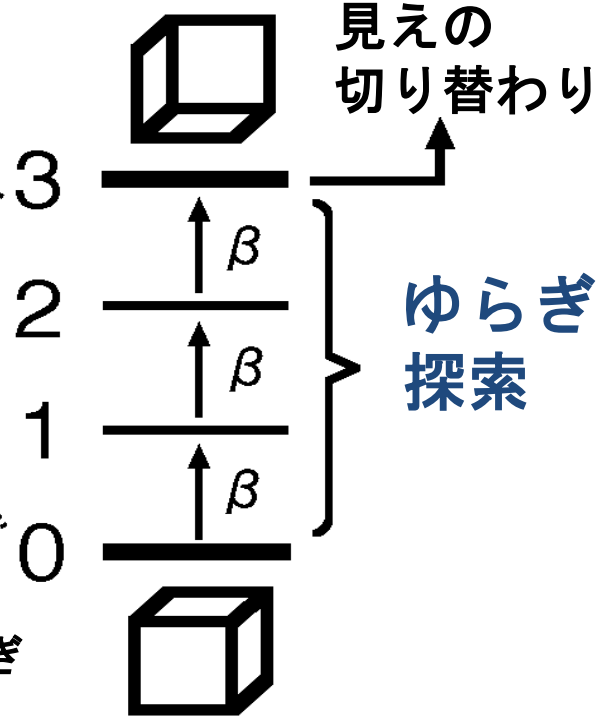


離散的な  
脳の状態



整合性 ゆらぎ

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

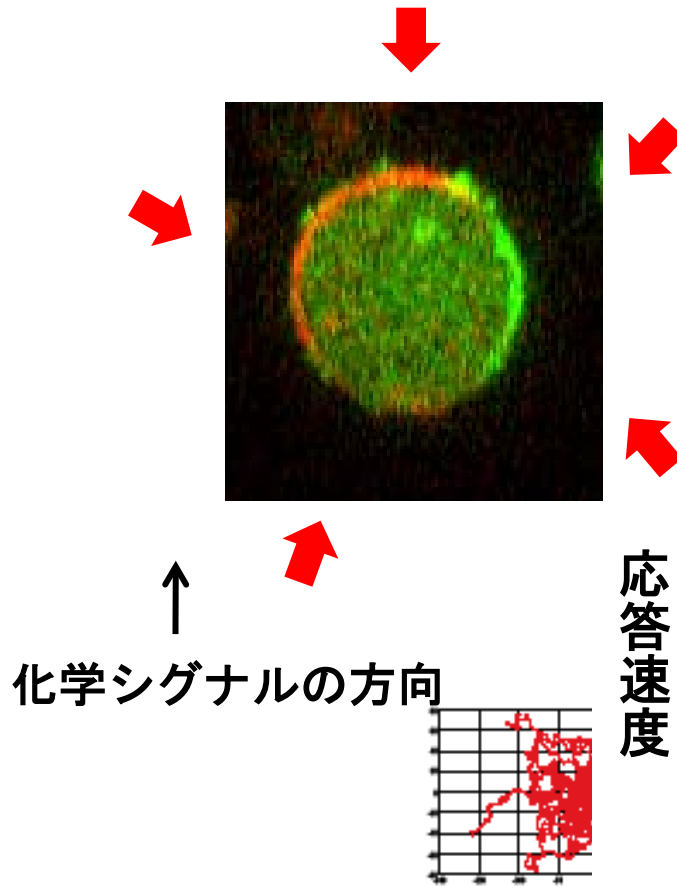




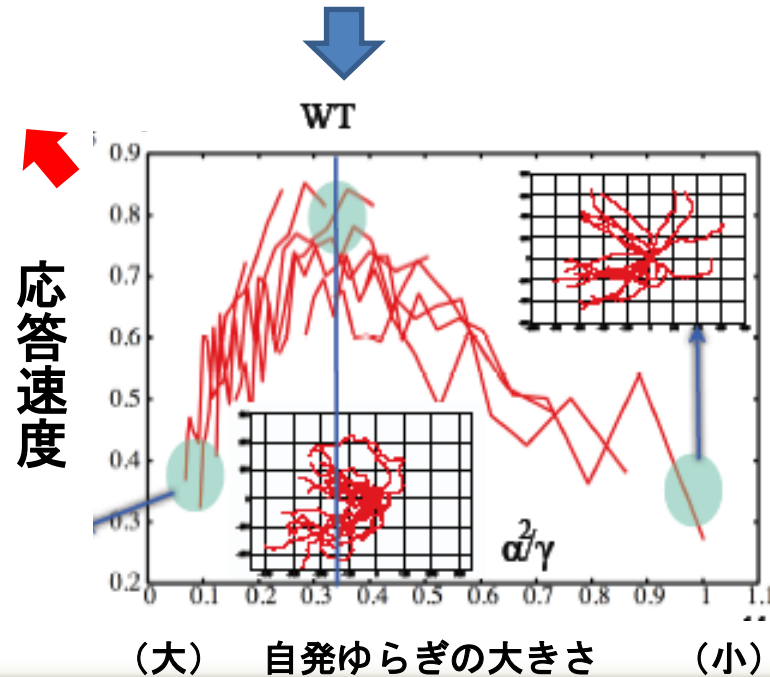
# ゆらぎと応答速度の関係

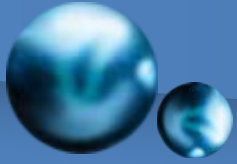
柳田敏雄、「脳に学ぶ複雑情報システムの省エネやわらか制御」、脳情報通信融合研究キックオフ・シンポジウム、平成22年3月10日。

ゆらぎは状況が一定の時には、人工機械同様邪魔者であるが、状況が予測できない、または突然変化したような場合に素早く自律的に応答するのに有効



適度なゆらぎ

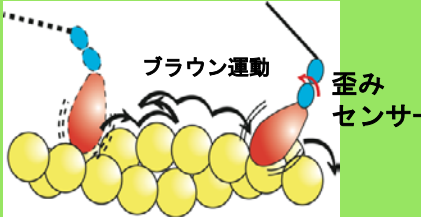




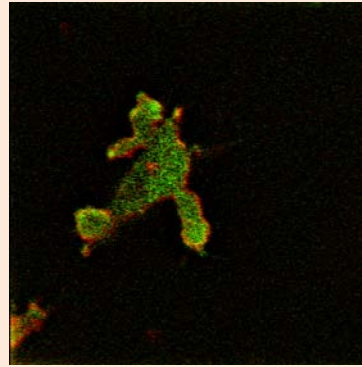
# 分子から脳まで“ゆらぎ”を使う生体システム

柳田敏雄、「脳に学ぶ複雑情報システムの省エネやわか制御」、脳情報通信融合研究キックオフ・シンポジウム、平成22年3月10日。

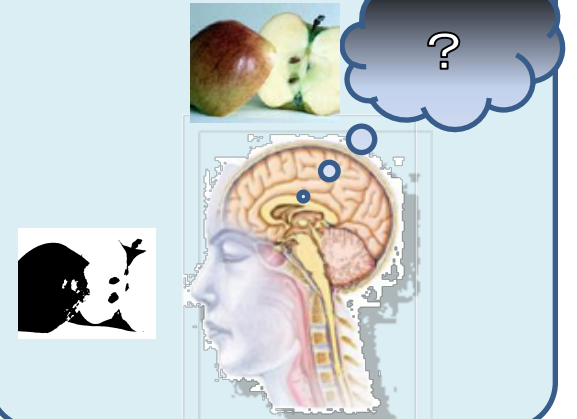
## バイアスブラウン運動 で動く分子モータ



## ゆらぎを用いた 細胞情報処理



## 脳の視覚認知



細胞，脳レベル

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

アトラクタを持つ制御構造    心地良さ    自発ゆらぎ  
整合性

一般化  
ゆらぎ方程式  
(四方ら)

分子レベル

$$\frac{dx}{dt} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial U(x,t)}{\partial x} B + \sqrt{\frac{2kT}{\rho}} \eta(t)$$

ポテンシャル力    バイアス    熱ゆらぎ

ゆらぎ方程式



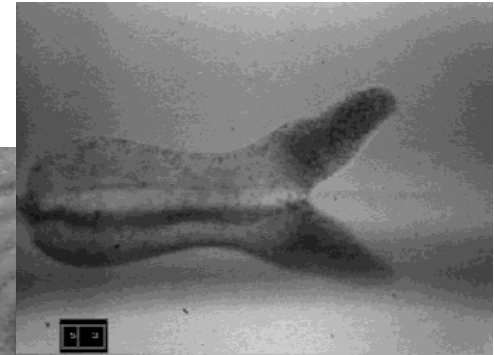




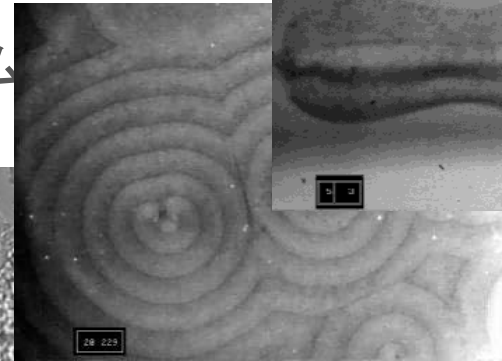
# 生物システム：ゆらぐ分子を素子として階層化

柳田敏雄、「脳に学ぶ複雑情報システムの省エネやわらか制御」、脳情報通信融合研究キックオフ・シンポジウム、平成22年3月10日。

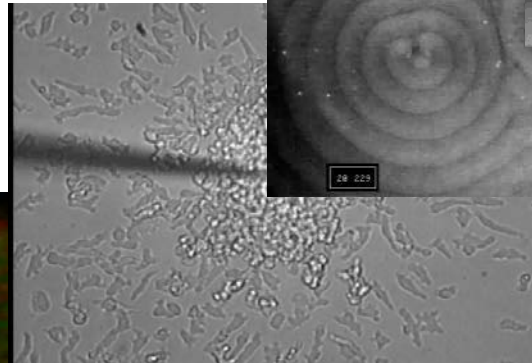
ゆらぐ分子を要素として  
自律的に組織化・階層化されたシステム  
ゆらぎを内包したシステム



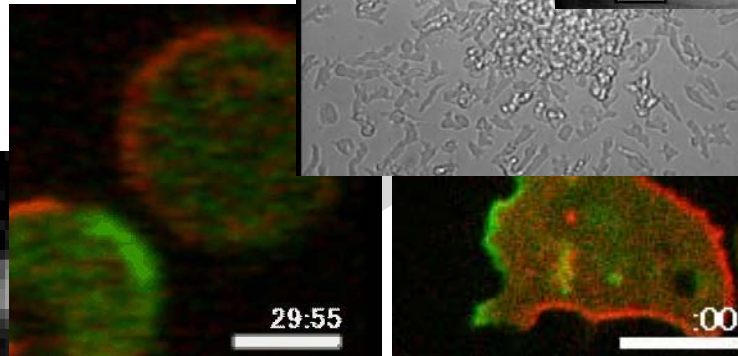
多細胞体



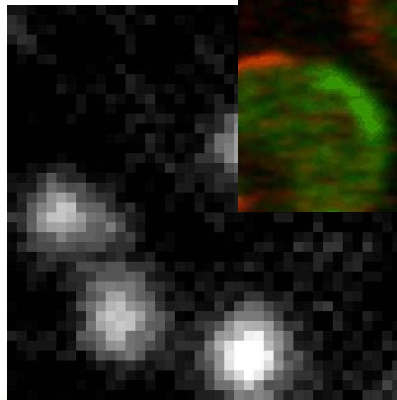
細胞ネットワーク



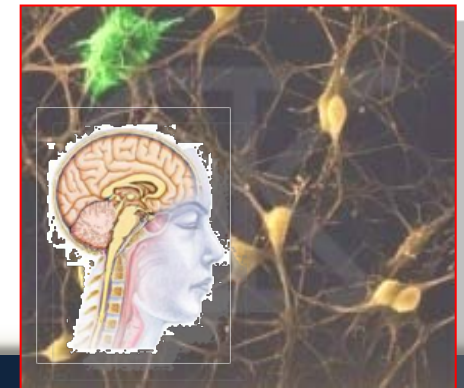
細胞



分子ネットワーク



分子 (細胞性粘菌の階層構造)





# ゆらぎ方程式から情報システムへ

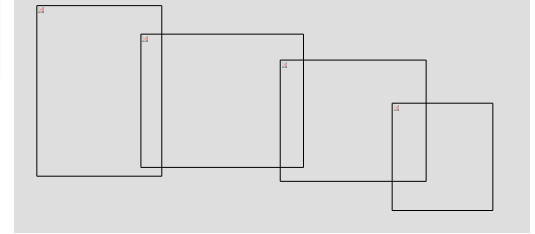
分子から脳まで階層を越えて共通の原理

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

アトラクタを持つ制御構造  
ゆらぎを利用できる形で受け入れる構造  
 $f(x) = -dU/dx$

系の状態  
状態が良いと感じる度合い  
スカラーとは限らない

熱ゆらぎ、自発ゆらぎ  
ゆらぎの構造



・各階層における制御  
プロトコルの動作

・システム遅延  
・スループット  
・信頼性

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

ノイズによるシステム駆動  
・局所最適解からの脱出  
・環境変動への適応

ゆらぎ 探索

- If-then-else型で扱われてきた制御システムを、アトラクタ選択を用いてモデル化し、頑強かつ環境変動に柔軟に適応可能な情報ネットワークシステムを実現する
- 階層化アーキテクチャをとる情報ネットワークにおいて、各階層プロトコルをアトラクタを持つ制御構造によって実現し、新しい情報ネットワークアーキテクチャを実現する



# ゆらぎ原理を利用した情報ネットワークのルーティング制御

常に揺らいで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ルーティングを実現

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

経路選択確率

ノイズ

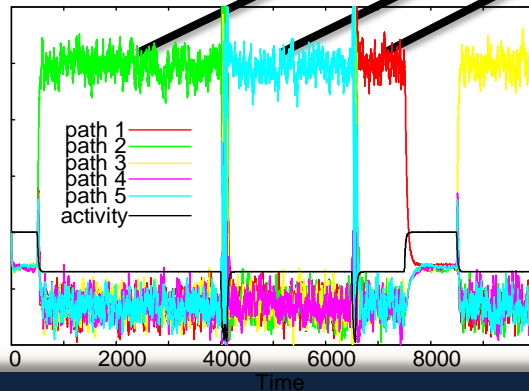
$$\frac{dx}{dt} = \frac{s(activity)}{1 + \max(x)^2 - x^2} - d(activity)x + \eta$$

activity: 経路の良さ(リンクスピード, 遅延時間)

$f_B(x)$

確率的遺伝子発現  
ダイナミクスより

経路選択確率



九州

ルータ

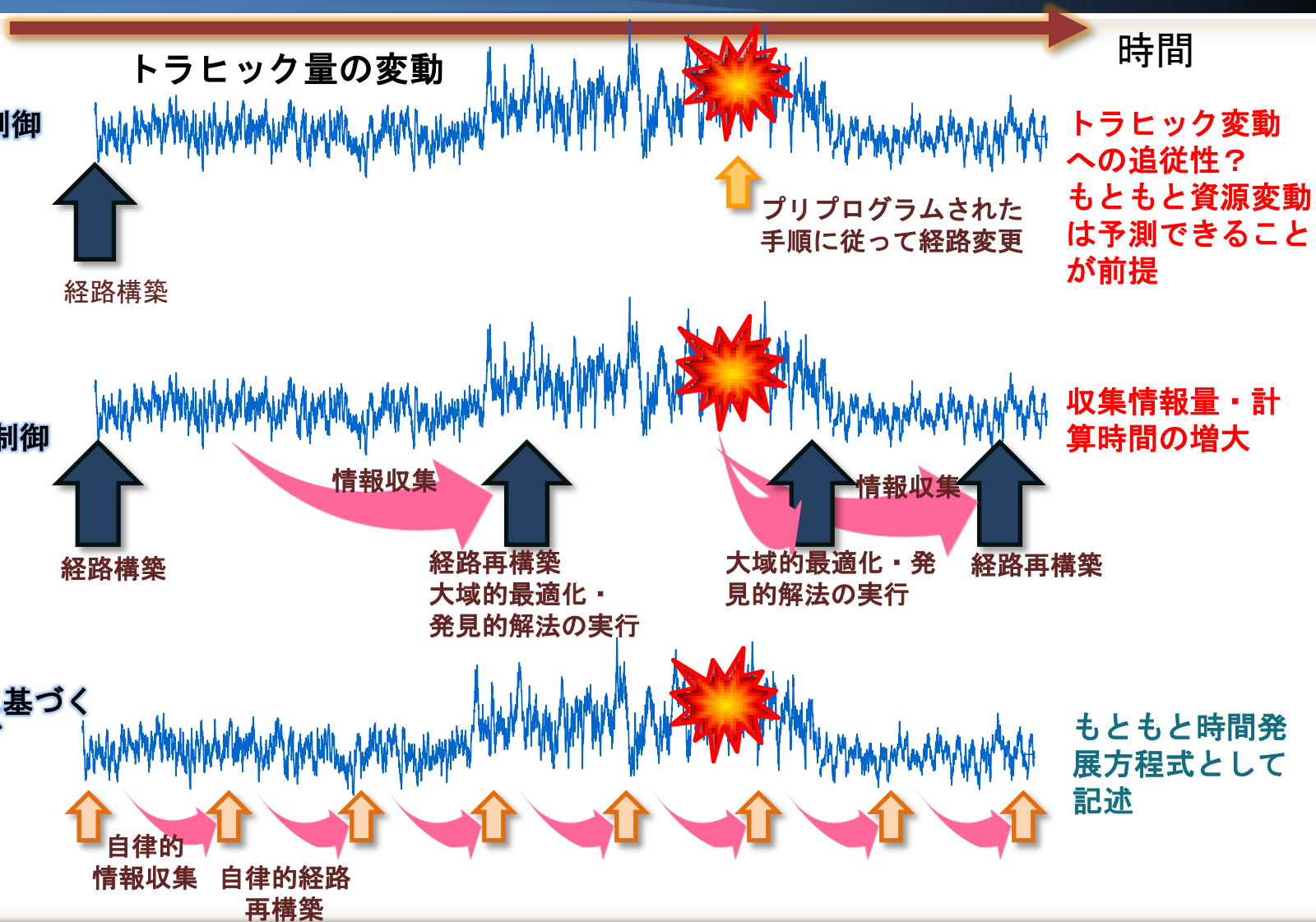
関東

100%ベストではなく  
ベストに近い複数の  
経路をゆらぎ検索

故障、事件発生時に素早く回避  
負荷変動などの環境変動に対する  
素早い対応



# 情報システムに対するインパクト





# 遺伝子・代謝ネットワークにおけるゆらぎ制御； $f(x)$ の設計指針

## ■ 2 レイヤー構成

### ■ 代謝反応ネットワーク

- ・ 代謝反応による細胞成長に必要な基質の生成
- ・ 必須基質の濃度 (活性度:  $\alpha$ ) を遺伝子ネットワークにフィードバック

### ■ 遺伝子ネットワーク

- ・ 遺伝子間の相互作用によるタンパク質の発現レベル ( $x_i$ ) の決定
- ・ 発現レベルによって代謝反応を制御

## ■ ゆらぎ制御の基本要素

### ■ アトラクターを持つ制御構造

- ・ 遺伝子ネットワーク内の遺伝子間の活性・抑制

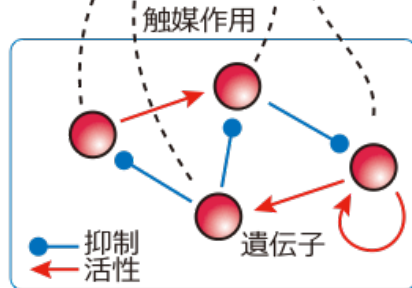
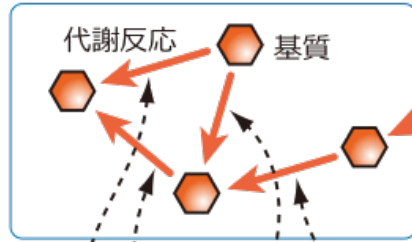
### ■ ゆらぎ

### ■ 活性度

- ・ 代謝ネットワークの状態

$$dy_i/dt = \left( \sum_k \sum_j \text{Con}(k,j,i) \cdot x_j \cdot y_k - \sum_i \sum_j \text{Con}(i,j,k) \cdot x_j \cdot y_i \right) \cdot \varepsilon + D(Y_i - y_i)$$

代謝反応ネットワーク



遺伝子ネットワーク

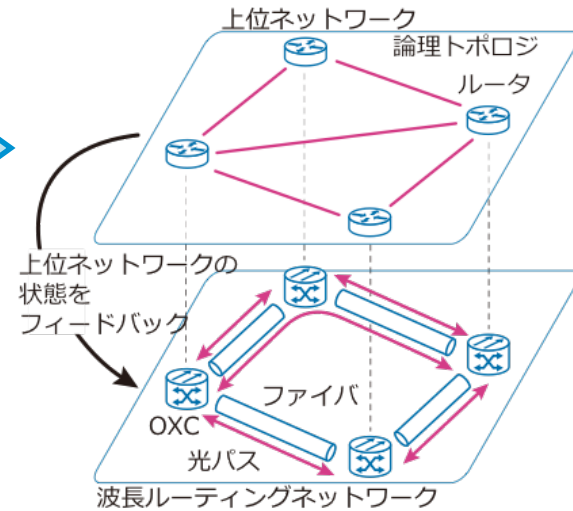
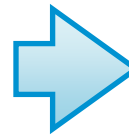
発現レベル (光バス数の決定)

アトラクターを持つ制御構造

$$\frac{dx_i}{dt} = \alpha \cdot \left( \text{sig} \left( \sum_j W_{ij} \cdot x_j - \theta_i \right) - x_i \right) + \eta$$

活性度      遺伝子間の相互作用 (活性・抑制)      ゆらぎ

$$\text{sig}(z) = 1/(1 + \exp(-\mu z))$$



光通信ネットワークへの適用

C. Furusawa and K. Kaneko, "A generic mechanism for adaptive growth rate regulation," *PLoS Computational Biology*, vol. 4, p. e3, Jan. 2008.



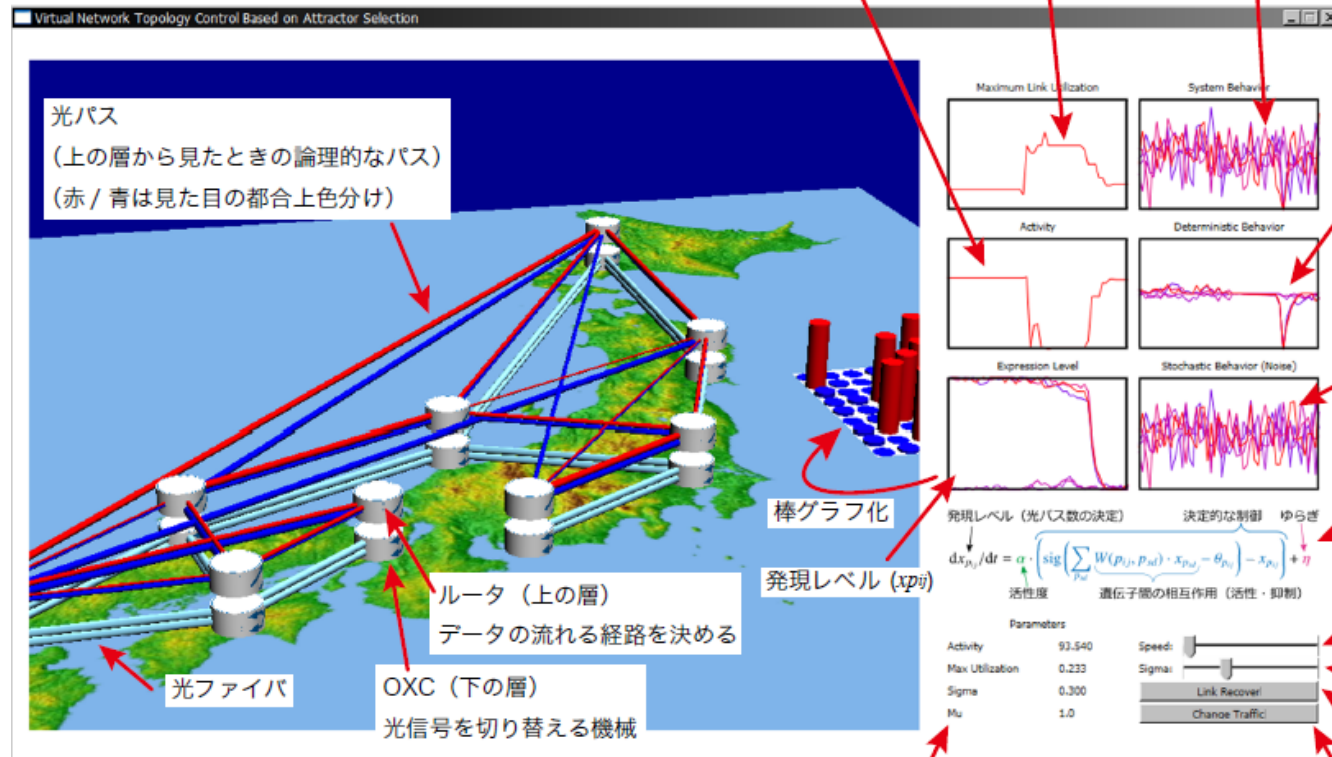
# ゆらぎ制御にもとづくトラフィックエンジニアリングのデモ

発現レベル（光パス数の決定） アトラクターを持つ制御構造

$$dx_{p_{ij}}/dt = \alpha \cdot \left( \text{sig} \left( \sum_{p_{sd}} W(p_{ij}, p_{sd}) \cdot x_{p_{sd}} - \theta_{p_{ij}} \right) - x_{p_{ij}} \right) + \eta$$

↑ 活性度      遺伝子間の相互作用（活性・抑制）      ↑ ゆらぎ

システムの挙動 (dx/dt)



活性度 (α)

最大リンク利用率

活性度 × アトラクターを持つ制御構造

$$\alpha \cdot \left( \text{sig} \left( \sum_{p_{sd}} W(p_{ij}, p_{sd}) \cdot x_{p_{sd}} - \theta_{p_{ij}} \right) - x_{p_{ij}} \right)$$

↑ 活性度      遺伝子間の相互作用（活性・抑制）

ゆらぎ (η)

提案手法 (アトラクター選択) の式

シミュレーションのスピード調節

ゆらぎの強さ調節

光ファイバの故障、復旧ボタン

パラメータ / 結果

activity: 活性度  
max utilization: 最大リンク利用率  
sigma: ゆらぎの強さ  
mu: 内部パラメータ (不要)

トラフィック (データ量) のパターンの変化ボタン

random failure ; ランダムなリンクダウン

critical failure : 東海地域が不通

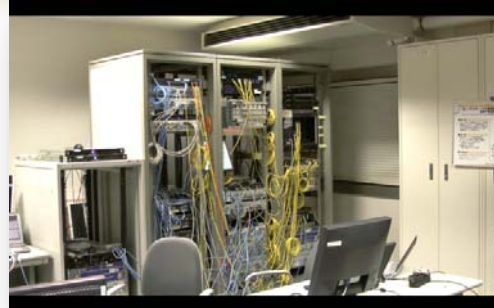


# 実証実験

## •NTT社内実験用ネットワークを用いた実証実験に成功

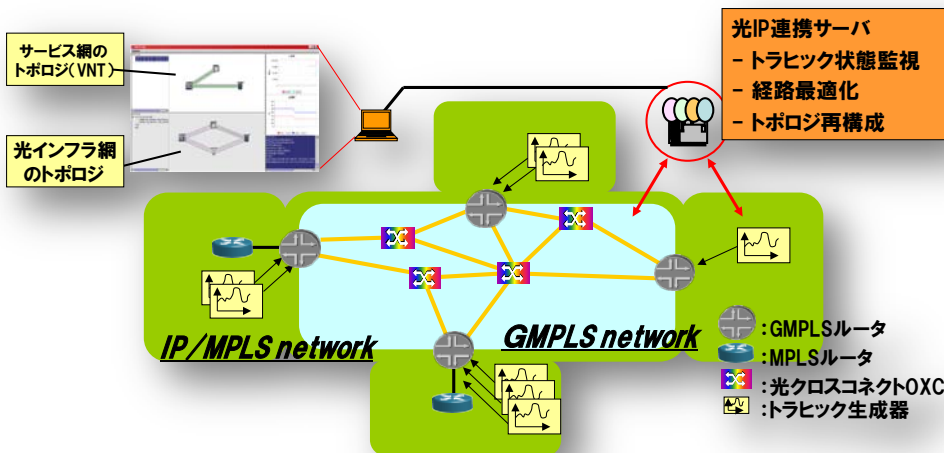
- 光ネットワーク設定プログラムとの連携動作を確認
- トラフィック変動に応じて適切なVNTに切り替わることを確認

## •広域実験網を用いた実証実験を今後予定



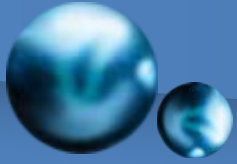
日経新聞2009年6月22日付

実験環境（一部）



NICT委託研究

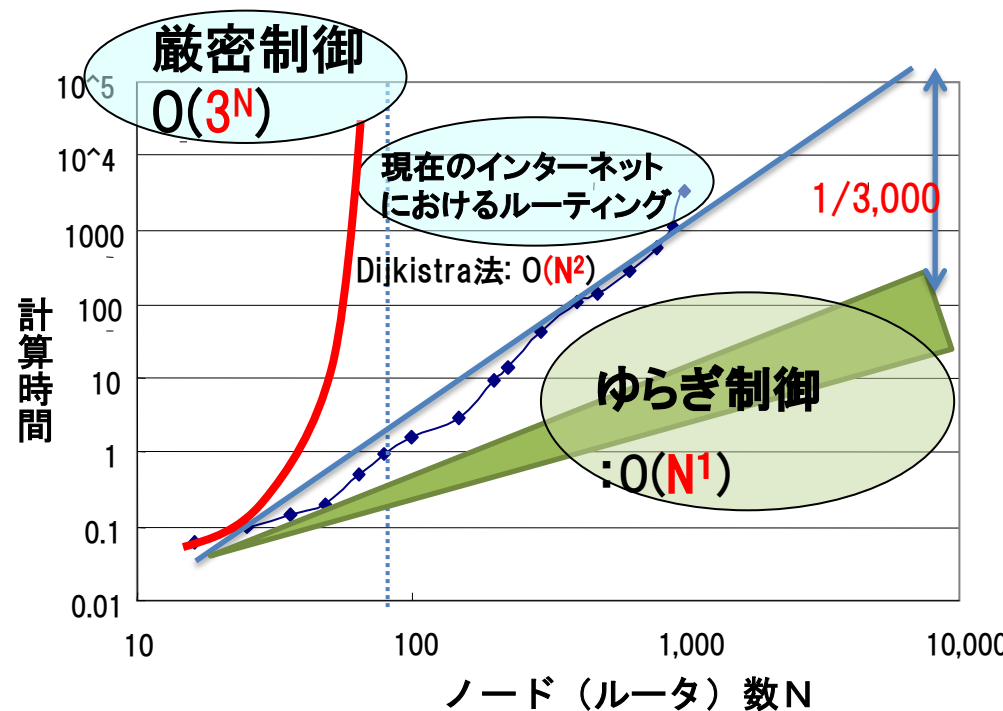
「新世代ネットワークの構築に関する設計・評価手法の研究開発」  
 新世代ネットワークアーキテクチャのコアとなる技術アイデアの検討およびその実装評価



# ルーティングのゆらぎ制御による計算量削減と省エネ効果

ゆらぎ制御による計算量の削減  
(Activityによる自律的目標設定による自律分散制御の実現)

- 従来制御 (IP経路制御) はNの2乗. ゆらぎ制御は $K * N$  (K=3の場合, すなわち, 各ルータが3個のルーティングパターンを持つ)
- N=10,000 (日本のASの規模) で計算量を約1/3,000に削減

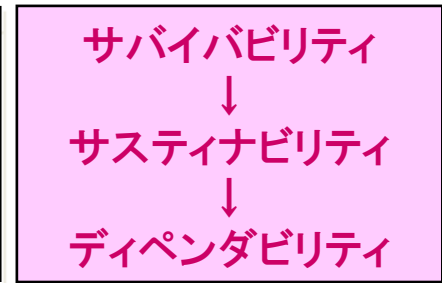
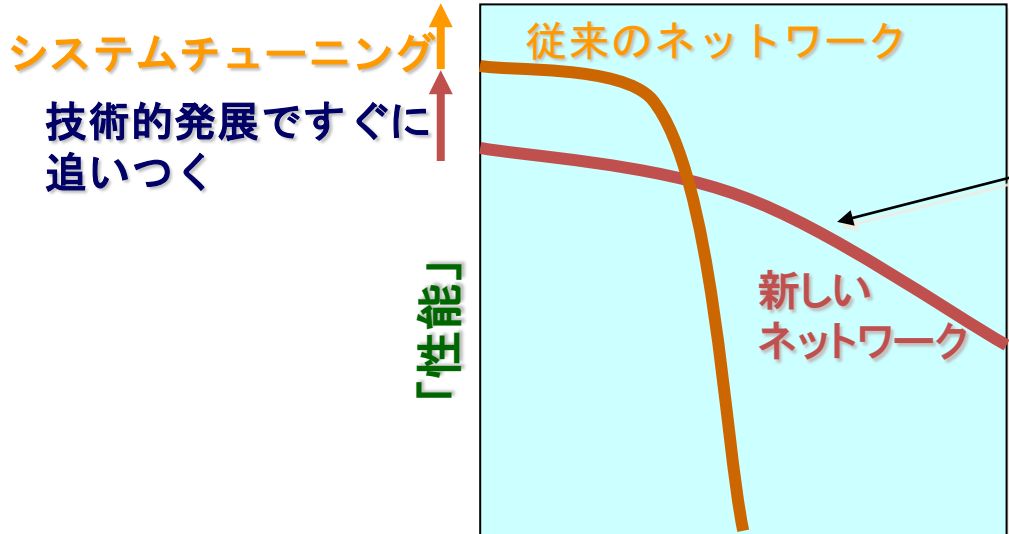






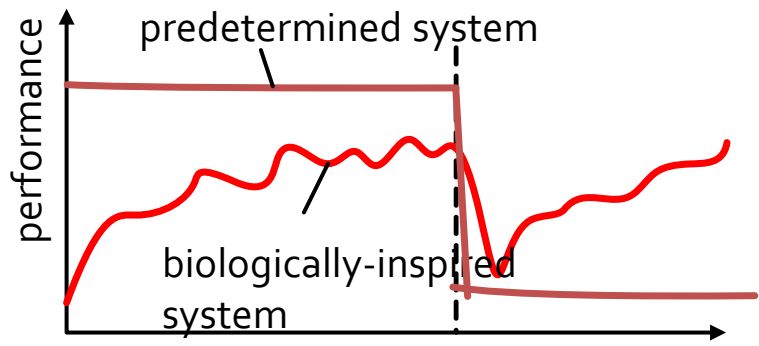
# ゆらぎ原理にもとづく新しい情報ネットワーク

## ■ ダイナミックでディペンダブルなシステムの構築



同時故障数、故障の重大度、環境の変動度...

- プリプログラム（未知のイベント（外的、内的環境変動）に対するルール）を増やせば、ただちにスケラビリティの問題
- われわれのアプローチ
  - ゆらぎを利用した自己組織化情報ネットワークアーキテクチャの構築



unexpected event time 17



# ゆらぎに基づく自己組織型ネットワーク

量より質！

## 対象システムの特徴

- ・ 大規模かつ複雑
- ・ 環境が変動する  
他ユーザの利用状況  
自身の利用状況  
資源自身の変動  
統計情報の変動

ゆらぎに学ぶ  
自己組織型制御

環境変動  
への適応性

ロバスト性

## 従来手法

- ・ 状況を予測し、個別最適解を準備  
→ 集中型制御による最適化  
→ 状態空間の爆発
- ・ 発見的解法  
GA (Genetic Algorithm) 法、NN法  
SA (Simulated Annealing) 法  
→ 局所最適解からの脱出に確率を用いる  
→ 環境変動に対しては？

最適性

効率



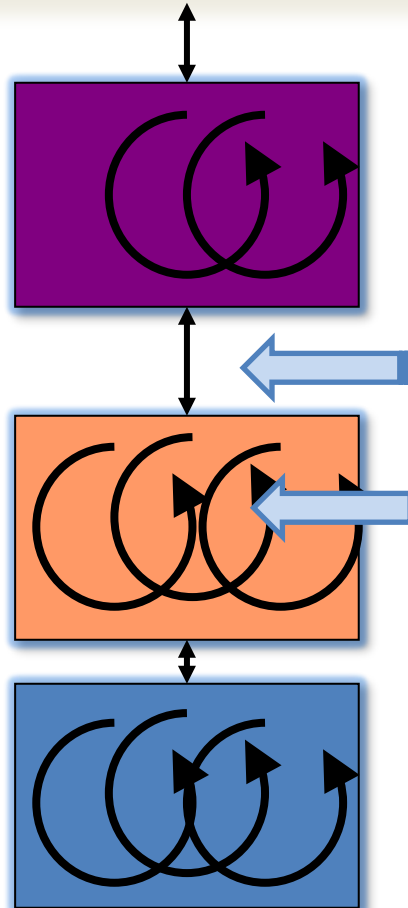
# ゆらぎ原理にもとづくネットワークアーキテクチャ

## エマージェント型制御

- ・ 上位層の活性度が下位層を適応的に動作させる
- ・ 下位層の状態変化が上位層を適応的に動作させる

## 自己組織型制御

- ・ エンティティ間の局所通信
- ・ フィードフォワードによる最適解への収束
- ・ フィードバック制御による安定化
- ・ ランダム性の導入による適応性



## 階層化ゆらぎ制御

$$\frac{d}{dt} \bar{x}_i = \bar{f}(\bar{x}_i) \times activity_{i+1} + \bar{\eta}$$

## 階層内ゆらぎ制御

$$\frac{d}{dt} \bar{x}_i = \bar{f}(\bar{x}_i, \bar{y}_i) \times activity_i + \bar{\eta}_x$$

$$\frac{d}{dt} \bar{y}_i = \bar{f}(\bar{x}_i, \bar{y}_i) \times activity_i + \bar{\eta}_y$$

## ゆらぎ応答制御

摂動を与えることによって、ゆらぎと適応速度の関係を制御する

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



# 大規模複雑なネットワーク

## ■ 空間的複雑化

- さまざまな競合する技術の発展
- さまざまなアプリケーション・サービスの出現
- 端末の多様化
- 端末数の拡大
  - ・ 特にセンサー

## ■ 時間的複雑化

- さまざまな技術の発展
- アプリケーション・サービスの多様化
- 情報環境化
  - ・ センサー→アクチュエーターのリアルタイム処理

## ■ 計画的なネットワーク設計、運用は困難

## ■ ComplexityとEvolvabilityを同時に扱いたい

- 制御の時間的粒度≒空間的変化の粒度



# 最近の動き

- **米国NSF Network Science & Engineering**
  - ネットワークにおけるComplexityを扱う科学と技術
  - キーワード
    - ・ Integrative (Multidisciplinary) Thinking
    - ・ Socio-Technical Networks
- **欧州FP7 Future and Emerging Technologies (FET)**
  - Science of Complex Systems for Socially Intelligent ICT等
- **NICT新世代ネットワーク研究開発戦略本部 技術戦略、新世代ネットワーク推進フォーラム 研究開発戦略WG**
  - SWG-4; NWGN Fundamentals
    - ・ 複雑システムのネットワーク科学



# 脳型情報処理システムの数理モデル化とその応用に関する研究開発

## これまで(他プロジェクトでの成果)

- ゆらぎ方程式制御  
→低計算量・ロバスト性・動的対応  
簡素化 即応化 (今瀬(阪大) 村田(阪大))
- 不安定状態のゆらぎ安定化制御  
→遅延系+速いゆらぎ=安定化  
耐遅化 (下川(NICT))
- Nano-scale cellular automata  
→ゆらぎによる論理回路  
簡素化 (Peper(NICT))
- ウェアラブル技術による生体計測と行動支援  
→五感伝送による体験共有  
(前田(阪大))



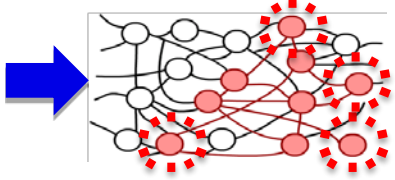
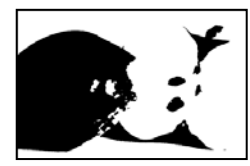
## 本プロジェクトの研究テーマ

- ネットワークの更なる低負荷制御  
簡素化 (今瀬(阪大) 村田(阪大))
- アトラクタ摂動駆動型情報ネットワーク  
→即応安定化のゆらぎ活用  
即応化 (村田(阪大))
- 遅延耐性ネットワーク  
→ポテンシャル経路制御  
耐遅化 (今瀬(阪大))
- 生体情報フィードバックによる応答解析  
→意識下での行動意図のモデル化推定  
(前田(阪大))

## 長期目標 (Brain-Function installed Information Network の構築を目指して)

脳機能の機構であるはずの「第2の情報表現」の解明・構築  
→ 要素ラベリングではなくシステム状態にエンコード(少数ノード組合せ)  
ゆらぎ原理によるシステムの自発的状态遷移

閃き脳機能仮説の理論化  
(不足情報を神経自発活動で補足)



## 本プロジェクトの研究テーマ

- 1) 環境異変即応 & 伝達遅延許容・・・相反する脳内両立機構の検討  
→ 閃き機構&知覚交替機構の包含モデル化
- 2) 脳機能ダイナミクス遷移検出法の構築(相関次元等)
- 3) 意図推定のモデル化とこれを用いたインタフェースの開発と検証

