

# 生物に学ぶ 情報ネットワーク設計・制御



**村田正幸**

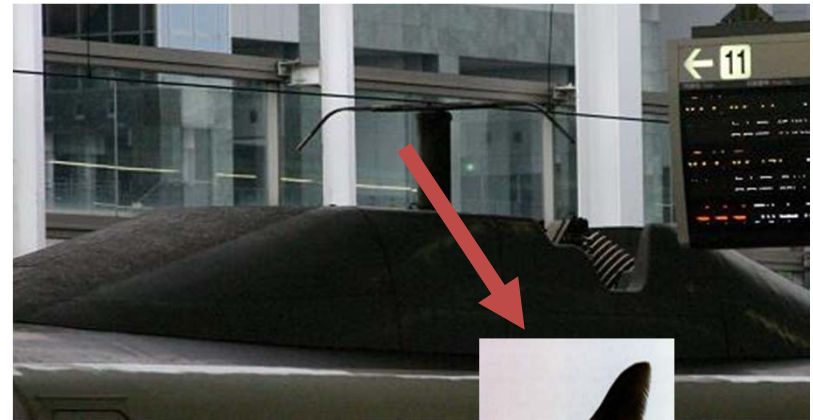
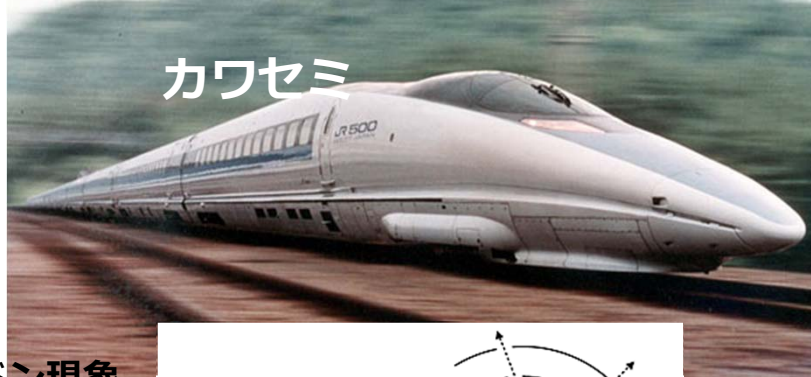
**大阪大学 大学院情報科学研究科**

**[murata@ist.osaka-u.ac.jp](mailto:murata@ist.osaka-u.ac.jp), [www.anarg.jp](http://www.anarg.jp)**

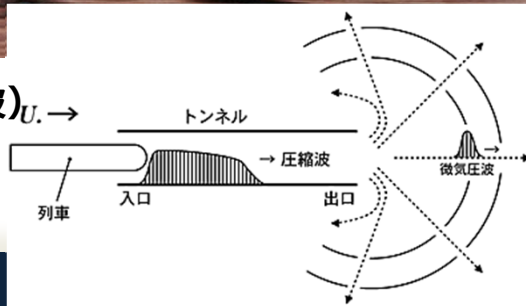
**関西学院大学環境順応型ネットワーク研究センターシンポジウム  
2012年9月7日**



# 生物に何を学ぶか



トンネルドン現象  
(トンネル微気圧波)





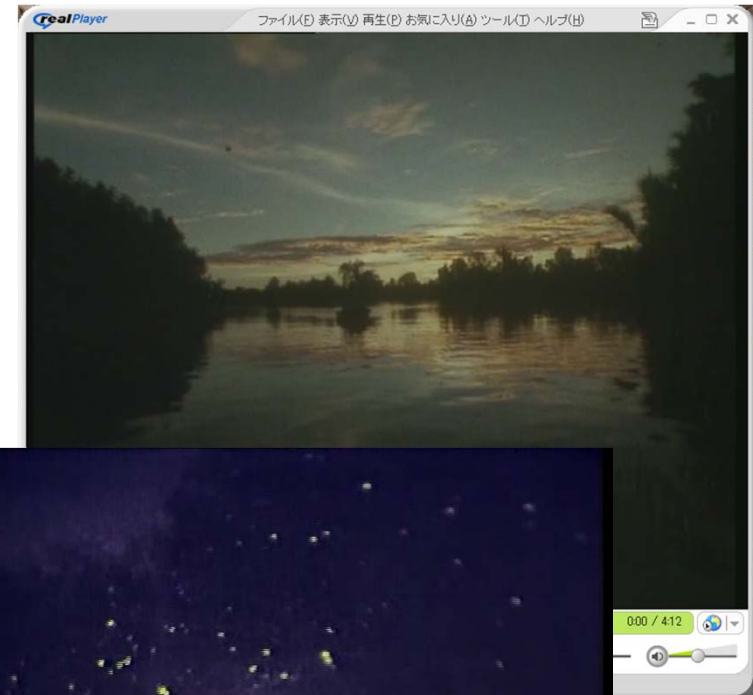
# 蛍の発光同期現象

© 1990 BBC

- Pteroptyx Malacae, Pteroptyx Cribellata
  - 東南アジア（マレーシアなど）に生息するホタルの一種
- 周囲のホタルに点滅の位相を徐々に合わせる機構
  - 中央制御なし
  - 局所的な相互干渉→プランニング不要
  - 集団的行動→個々の故障に強い



firefly.nlogo

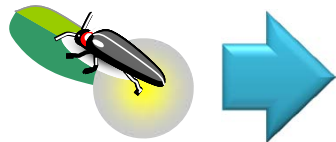




# 群知能に基づくセンサネットワーク情報伝搬機構

- 任意のノードによる情報拡散・収集を自己組織的に構成
  - 情報拡散：ノードから周縁に向かって情報伝達
  - 情報収集：ノードへ周縁から情報伝達
- パルス結合振動子における進行波現象を利用

## 蛍の発光同期・進行波現象



## パルス結合振動子モデル

振動子集合  $O = \{O_1, \dots, O_N\}$

振動子のタイマ位相  $\frac{d}{dt}\phi_i = 1$

タイマ位相が1に達すると振動子は発火

結合された振動子は刺激を受け位相が進行

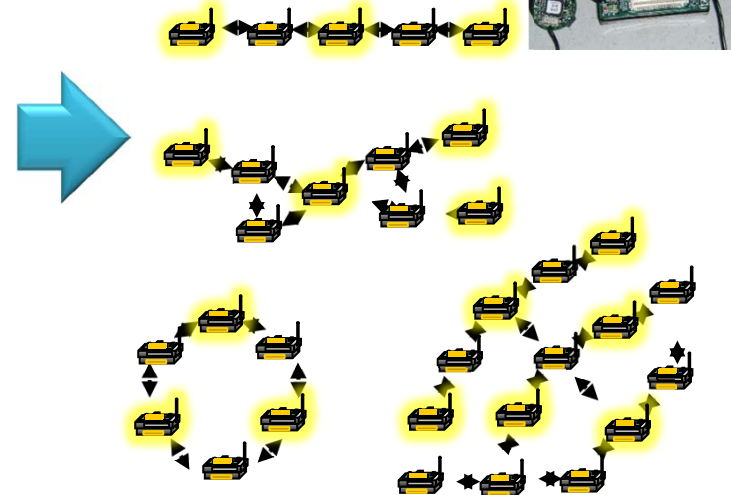
$$\phi_i \rightarrow \phi_i + \Delta(\phi_i)$$

刺激を受けた結果、振動子が発火→同期

固定の位相差で発火→進行波

## 情報波の伝達

センサネットワーク上で  
さまざまな進行波を形成

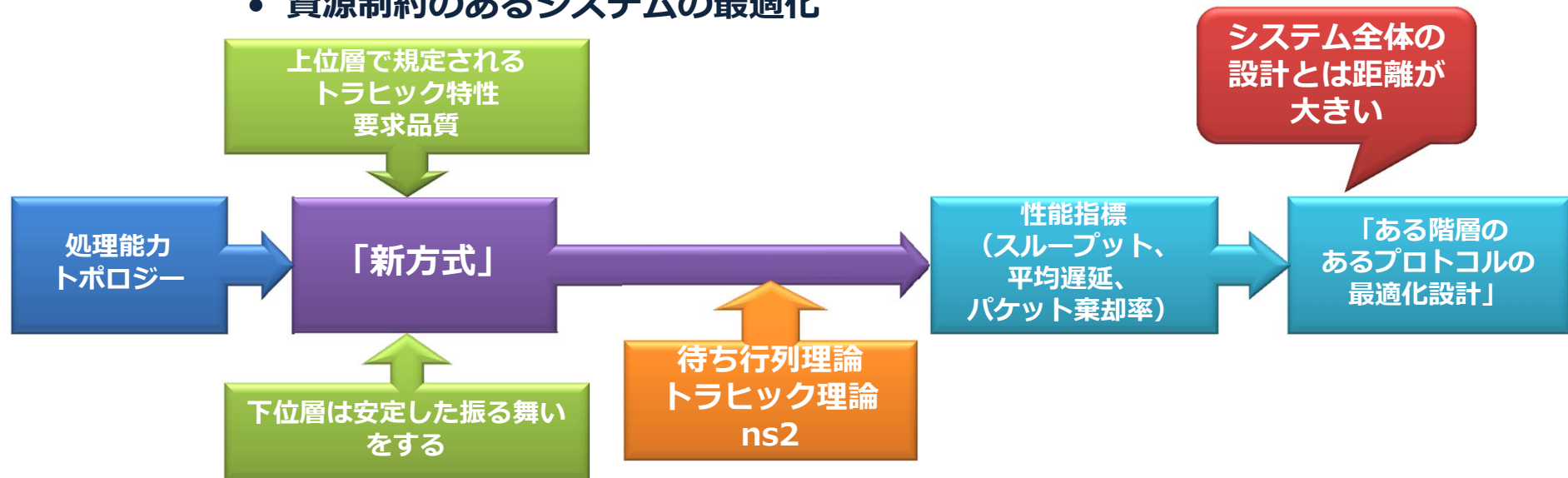




# なぜ生物学に学ぶのか

## ■ これまでは応用数学

- 確率過程
- 待ち行列理論・トラヒック理論
  - 交通学
  - 資源制約のあるシステムの最適化



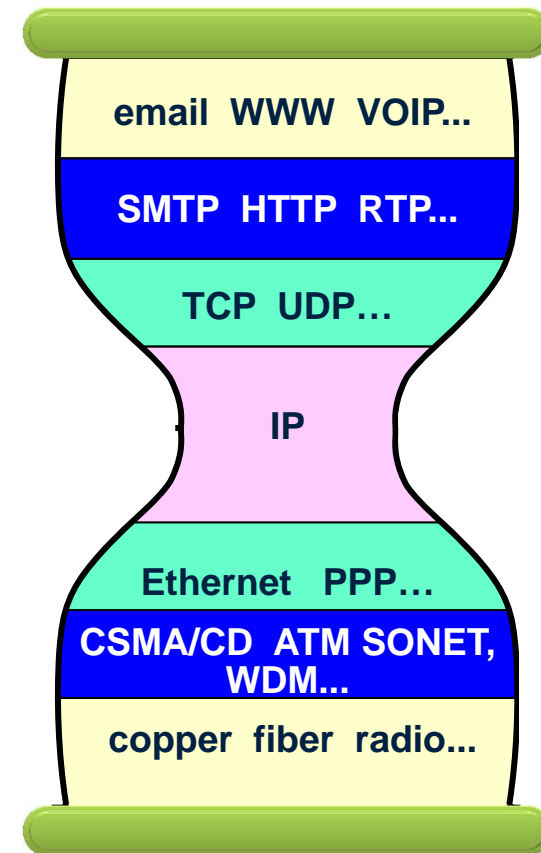
## ■ 非線形（非平衡）システムに関する知見

- 大規模なシステムにおける環境適応性（ロバスト性、最適制御）  
⇒自己組織化制御



# インターネット成功の理由

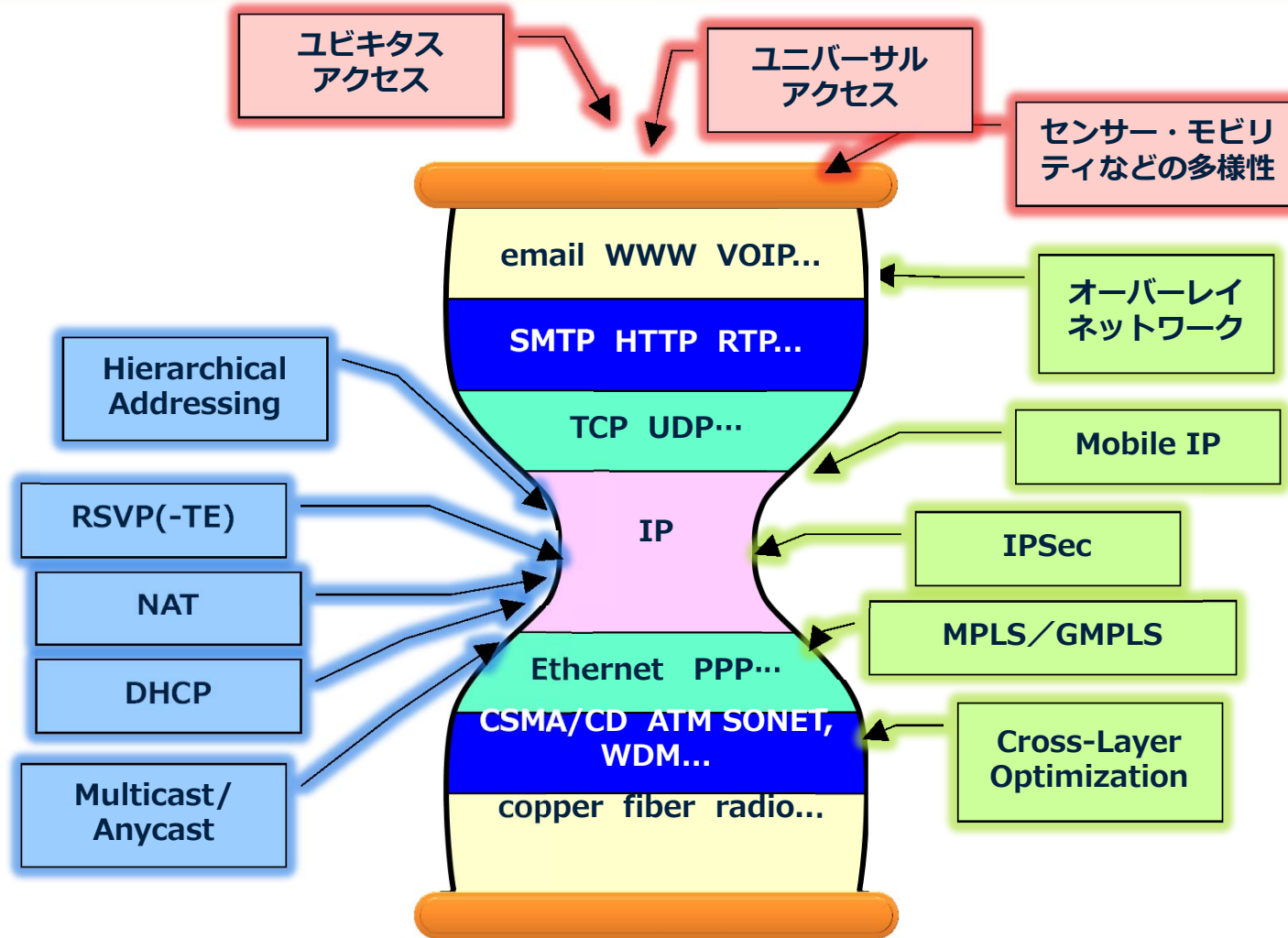
- 「砂時計」パラダイム
  - Everything on IP, IP on Everything
- KISSの原則
  - “Keep It Simple, Stupid” by David S. Isenberg
  - Today’s optimization is tomorrow’s bottleneck
- ネットワーク層はシンプルに、サービスはエンドホストで（あるいはエッジで）
  - スケーラブルかつロバストな通信インフラの構築
  - 未知のアプリケーションに対する対応；オープンなAPI
  - Disruptive Innovationの源泉



Deeringの砂時計モデル



# インターネットの限界を示唆するもの





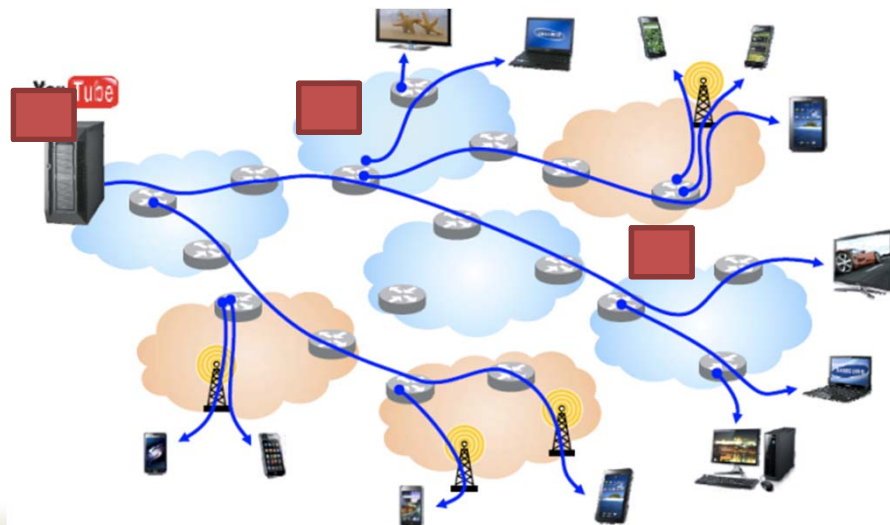
# CCN設計要件の例

## 設計プリンシプル

- Support multiple and new business models
- Simplicity
  - “Keep It Simple, Stupid” by David S. Isenberg
  - “Make everything as simple as possible, but not simpler,” by Albert Einstein
- Sustainability, Scalability and Robustness
- Loose coupling
  - As things get larger they often exhibit increased interdependence between components

## CCNのメリット

- Content could be stored/cached closer to the end users
- Routers could identify/analyze what content is flowing through them
- Network could dynamically identify what is the best path to the user
- Content could be interactively adapted
- Content could be selected and adapted to the context
- Content could be active instead of static



## CCNの設計要件

1. Name resolution and findability
2. Content-centric routing
3. Flexible content business models
4. Trustworthiness of content and media services
5. Choice of source and presentation
6. Decentralized self-organization

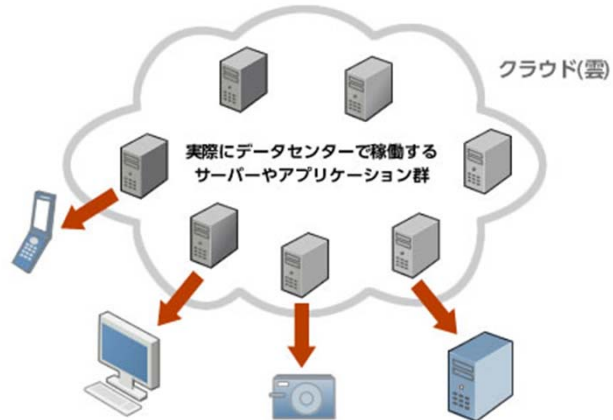
SRC: EC Future Content Networks Group, “Why do we need a Content-Centric Internet? Proposals towards Content-Centric Internet Architectures,” White paper.





# CCNの目指すところ

コンテンツホルダーは寡占状態



利用者は雲の中がどうなっているか気にせず、  
さまざまな端末を使ってサービスを利用できる

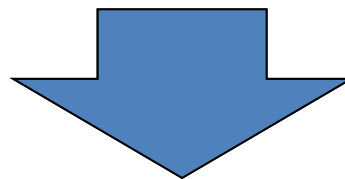
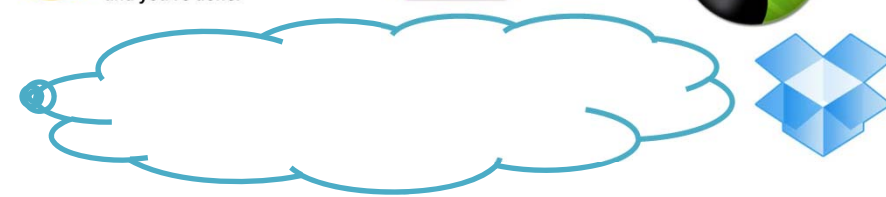
Google™

Akamai

amazon.com™  
and you're done.™



実態は



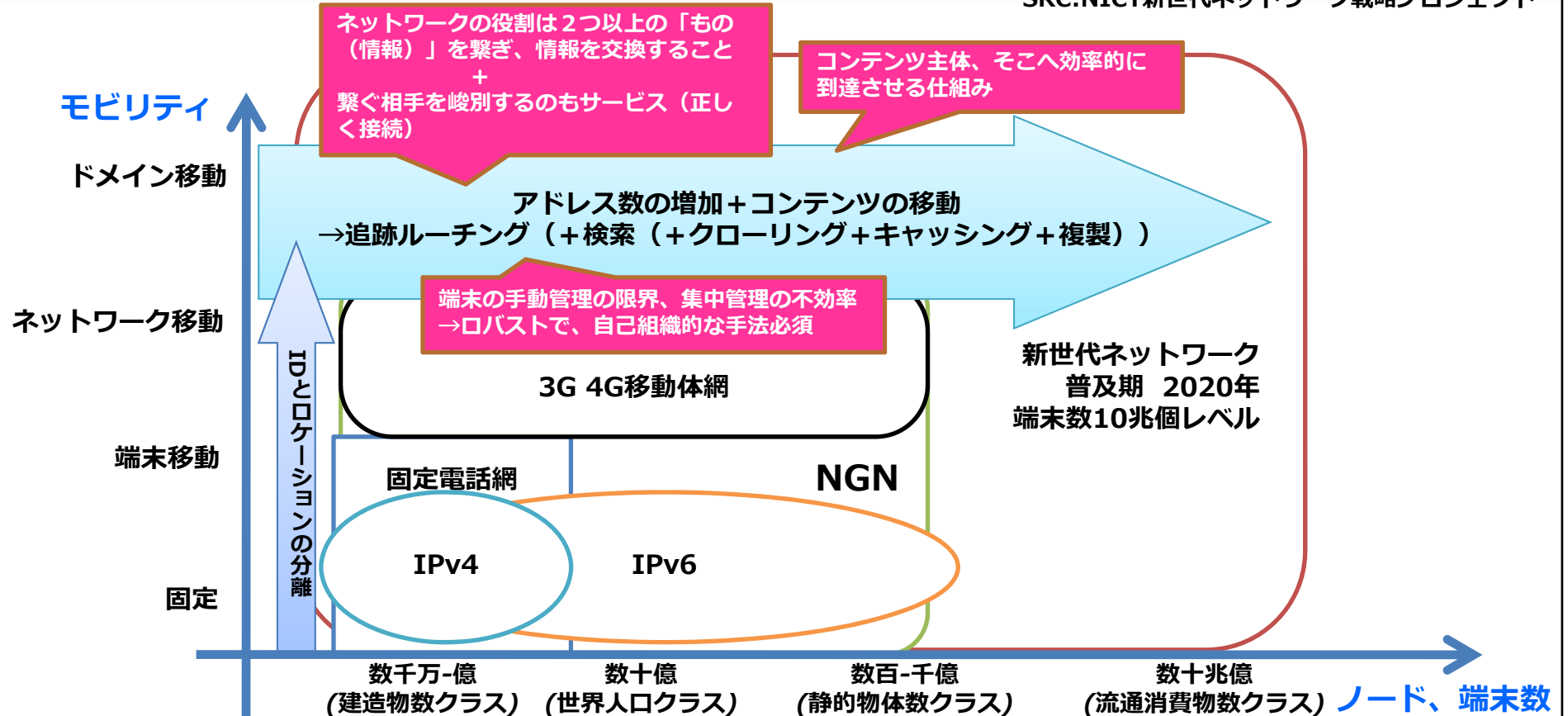
コンテンツリッチなネットワーク

- ステークホルダーの再構築
- ネットワーク中立性の確保
- スモールスタートサービスの実現
- 省エネ？



# 2020年に何が起こるか？ — 端末数、情報の爆発 —

SRC:NICT新世代ネットワーク戦略プロジェクト



- 移動する10兆個のデバイスを現状のインターネットでは収容できない
  - Mobile IPでは対応困難
- 知りたい情報自身も移動
  - 移動するコンテンツに対してクローリング結果からの検索は適用困難
- 情報でルーティングできる機構



# これまでのNWとの違い

SRC:NICT新世代ネットワーク戦略プロジェクト

- “ネットワーク=土管”からの脱却
  - NW自身にサービス提供機能を実装
  - オブジェクト指向ネットワーキング：ユーザ・プログラマにとって、オブジェクトとしてネットワークが扱える世界を目指す
  - サービスイネーブラの提供：NWに関するサービスはNWが提供。サービス開発者は、複数のサービスイネーブラの組み合わせにより省力化を実現
  - NWノード=クラウドの一部：クラウドコンピューティングのためのリソースをデータセンターの中だけでなく、NWのノードにも。NWノードがナノデータセンター化
  - 研究分野として、トランスポートだけでなくサービスまでを含めてネットワークとして定義



# ネットワークの大規模複雑化

## • 空間的複雑化

- 端末の多様化、端末数の拡大
- さまざまな競合する技術の発展
- アプリケーション・サービスの突如の出現
- モビリティ
- ネットワークが扱う粒度の細分化（ホスト・端末からコンテンツへ）

## • 時間的複雑化

- さまざまな競合する技術の発展
- アプリケーション・サービスの多様化
- モビリティ
- 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

- 全体を構成する諸要素の精緻な分析→コンポーネント設計→システム化の限界
- 要素還元論から新しいシステム設計論へ

## • 複雑適応系

- 全体を組み上げる過程も含めて系を捉える
- 自己組織化制御
- 要素が全体からのフィードバックを受けて多様に変化するとともに、全体が自律的に発展



# 新しいネットワークの設計指標

- 「性能（効率性）」以外の指標の重要性
  - 効率（ユーザから見ればスループット、ネットワークから見れば資源の効率利用）を求める時代でもなくなった
  - \*-ties



- 「量」から「質」へ



# 自己組織化制御

## 量より質！

### ● 自己組織化制御

- 要素間のインタラクションのみによって全体の構造や機能を発現する
- 各コンポーネントは、環境とのインタラクションによってあらかじめ望んでいる構成（アトラクター）に適応的に到達する

### ● 特徴

- A large number of redundant components
- A certain degree of randomness
- No central coordinator
- A combination of positive and negative feedback
- Emergent behavior from numerous local interactions

### ● 自己組織型情報ネットワーク制御

- 正のフィードバック+負のフィードバックによる安定化
- ランダム性の導入による新しい解の発見
  - ◆ 時間的変動のあるシステムに対してロバスト性を確保
- エンティティ間の局所的通信による行動の決定
  - ◆ 環境を介した間接的なインタラクションによって、全体の制御を実現する

### 対象システムの特長

- ・ 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

脳や生体に学ぶ  
自己組織型制御

### 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)法など
  - 局所最適解からの脱出に確率を用いる
  - **環境変動をそもそも考慮していない**

環境変動  
への適応性

ロバスト性

最適性

効率

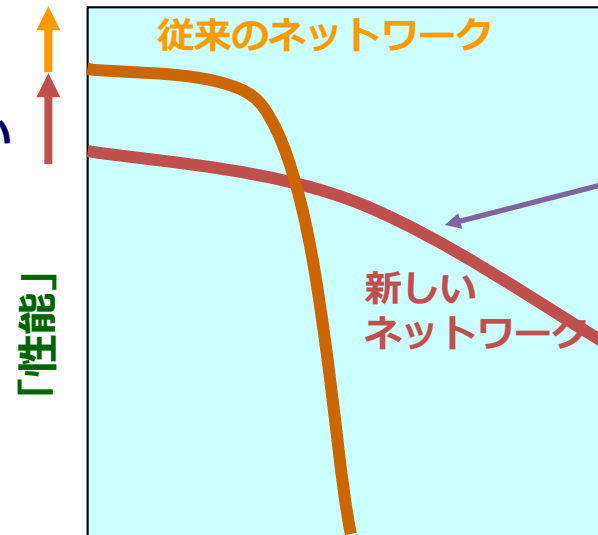


# 新しいシステム設計原理

## ■ ディペンダブルなシステムの構築

システムチューニング

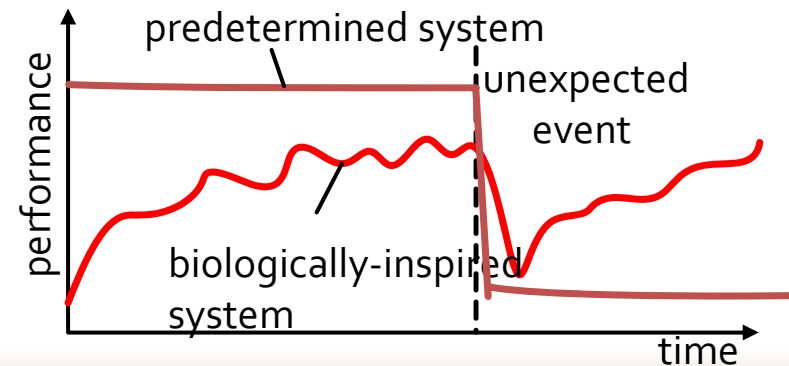
技術的发展ですぐに追いつく



同時故障数、故障の重大度、環境の変動度・・・

## ■ 対象システムの詳細な記述→スケーラビリティの問題

→ 自己組織化





# 脳や生体に学ぶ情報ネットワーク制御

- ホタルやありの集団行動
- パターン形成
- 代謝ネットワーク
- 遺伝子ネットワーク
- 脳機能ネットワーク
- ...

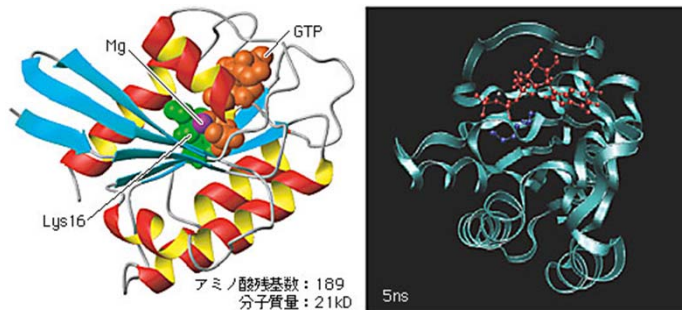
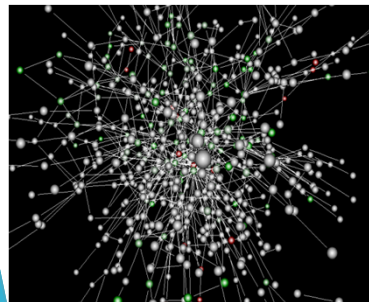
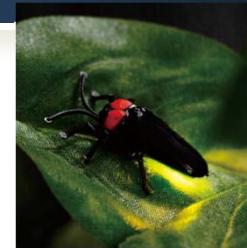


図6: 分子動力学シミュレーションによる変異 Resp21G タンパク質の動的構造変化

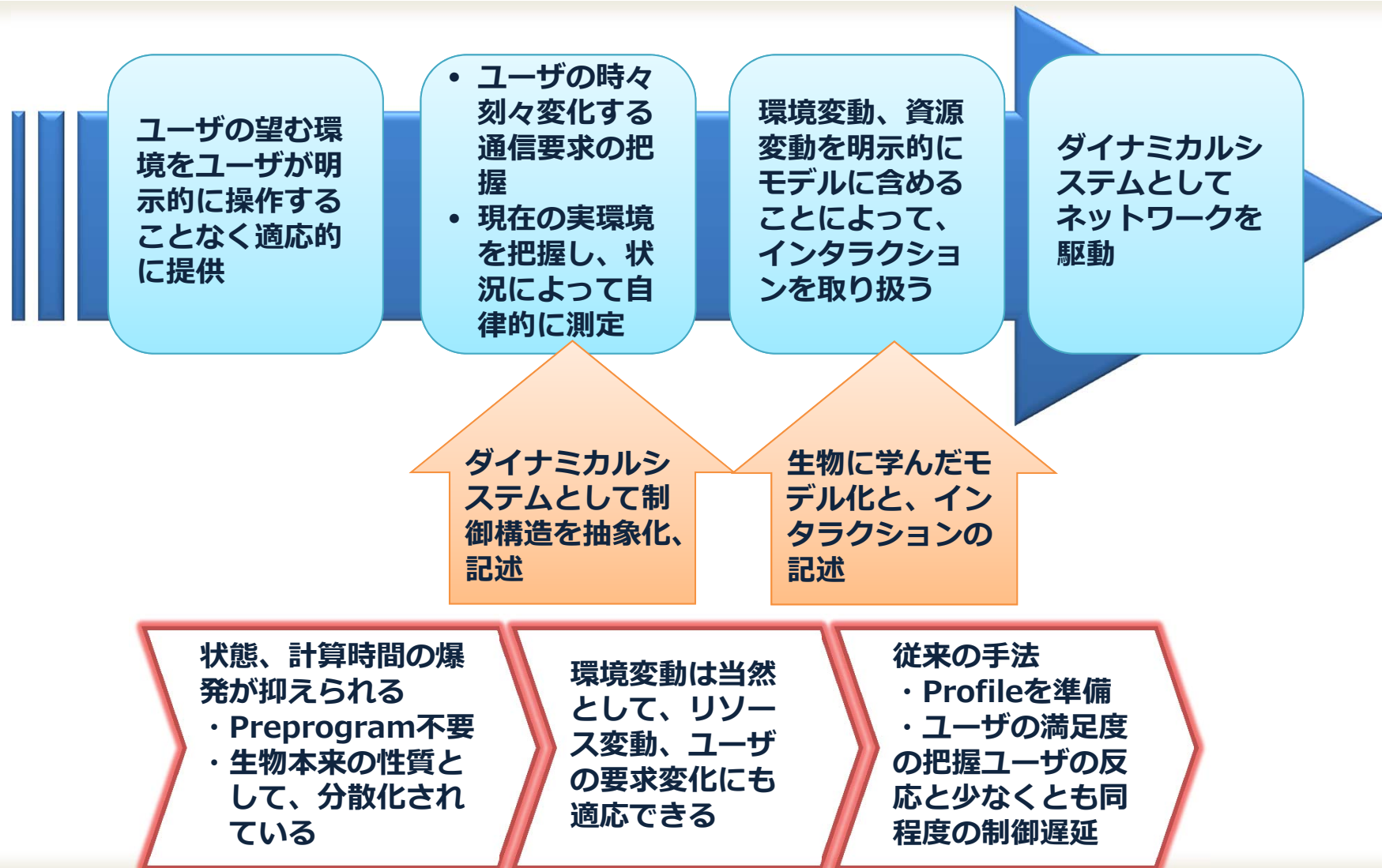
環境適応能力  
自律性  
自己組織性

数理モデル

故障に強い省エネネットワーク



# 「生物に学ぶ」ことの本質

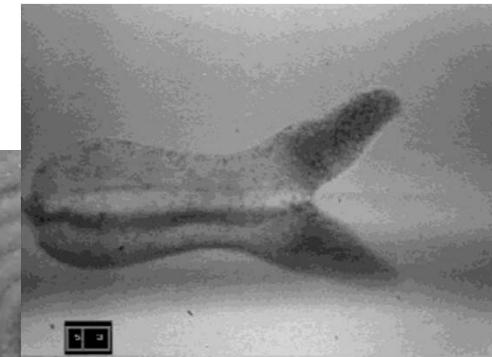




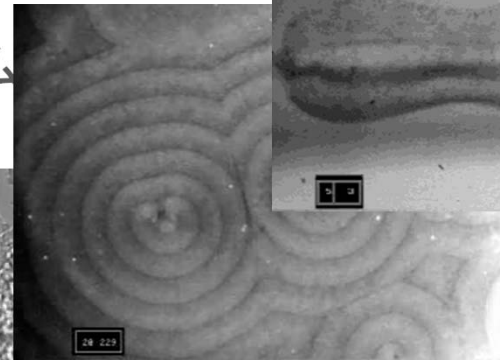
# 生物システム：ゆらぐ分子を素子として 階層化

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。

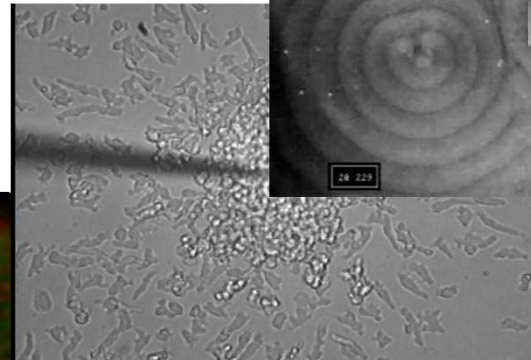
**ゆらぐ分子**を要素として  
自律的に組織化・階層化されたシステム  
**ゆらぎを内包**したシステム



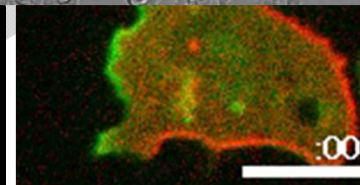
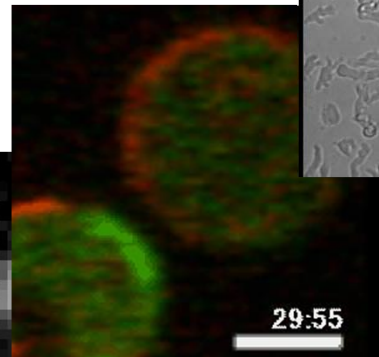
多細胞体



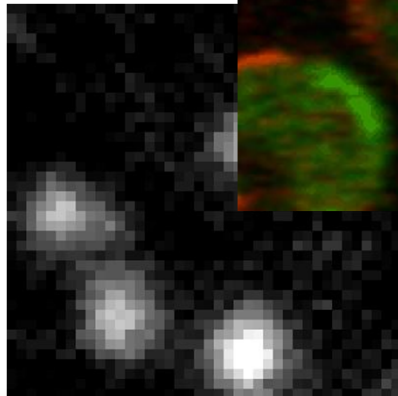
細胞ネットワーク



細胞



分子ネットワーク



分子

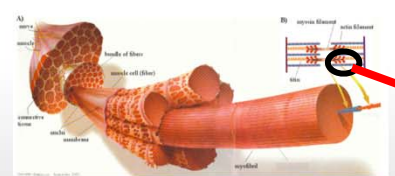
(細胞性粘菌の階層構造)




# 生物分子モーターにおける熱ゆらぎ利用

SRC: 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。

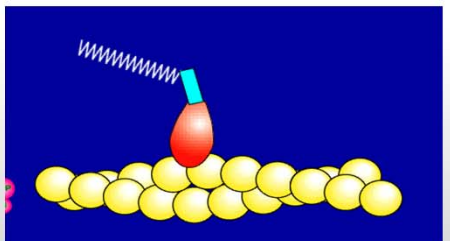
**筋肉**



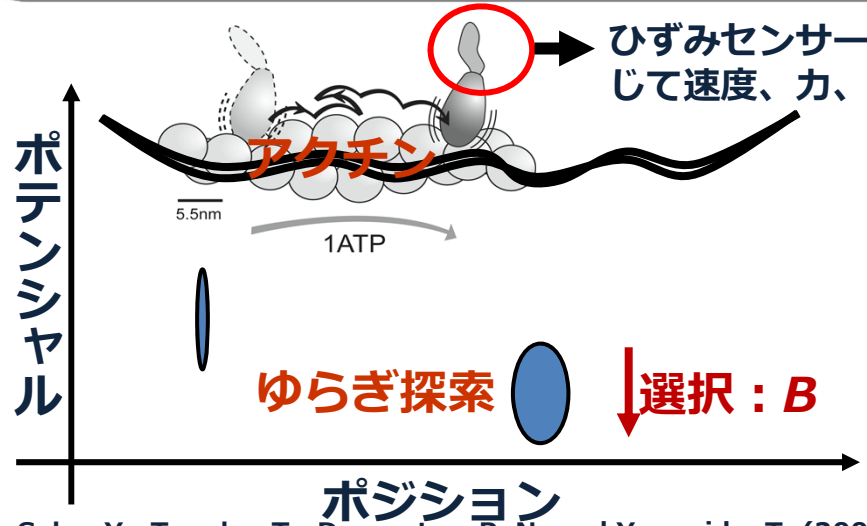
**最先端計測技術  
1分子イメージングナノ計測**



**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

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

ポテンシャルカバイアス      ゆらぎ

cf. ランジュバン方程式

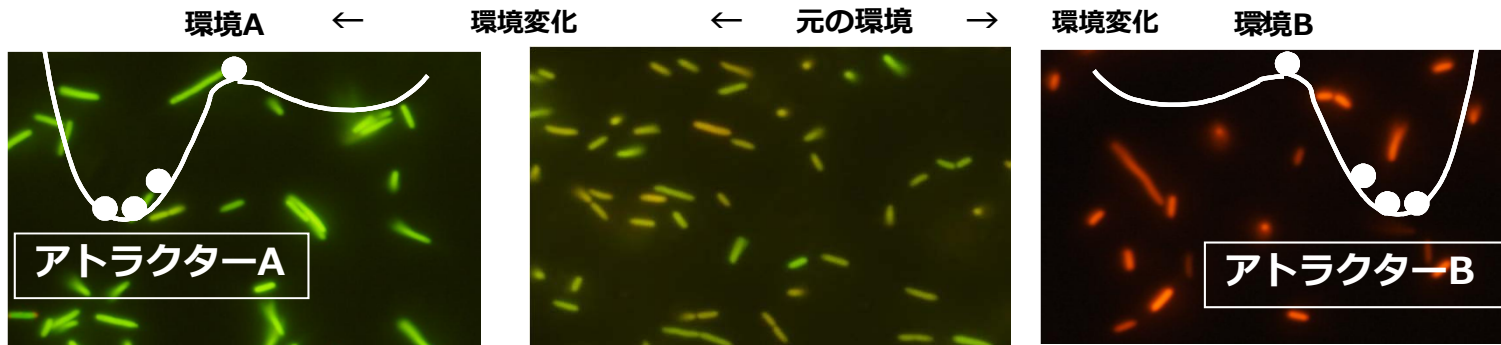
Ueda, M., Sako, Y., Tanaka, T., Devreotes, P. N. and Yanagida, T. (2001). Single molecule analysis of chemotactic signaling in *Dictyostelium* cells. *Science* 294: 864-867.



# 細胞レベル：遺伝子発現の熱ゆらぎによる環境適応

SRC: 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。

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



細菌の遺伝子発現をイメージング

「アトラクター選択」の基礎式 (ゆらぎ方程式)

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

アトラクターをもつ制御構造

制御変数  
環境情報フィード  
バック変数

ノイズ・外乱 (環境ゆらぎ)  
システムの不確定性

「ゆらぎ」によって状態空間を探索



決定論的項の絶対値は activity とともに単調増加するなら

- 1) 適応的アトラクターに近づくとき、activity が増加して、**制御**が**ノイズ**に比べて強くなり、適応的アトラクターに向かって加速される
- 2) 非適応的アトラクターに近づくとき、activity は減少し、**制御**が弱くなり、**ノイズ**によって、状態がゆらぐ。

Kashiwagi, A., Urabe, I., Kaneko, K., and Yomo, T., "Adaptive response of a gene network to Environmental changes by fitness-induced attractor selection," PLoS One, Vol. 1, No. 1, pp.e49 (Dec. 2006).



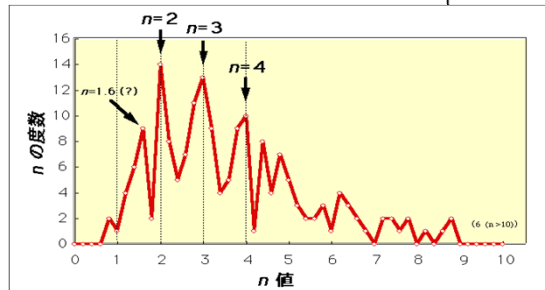
# ゆらぎとヒト脳の視覚認知

SRC: 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。

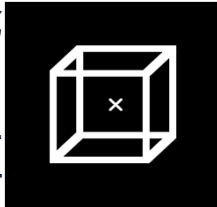
脳磁界計測法 (MEG) 脳活動のゆらぎ



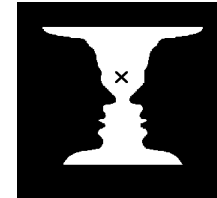
離散状態の分布



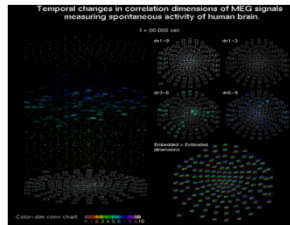
ネツカーキューブ



顔・杯



多義図形の認知



離散的な  
脳の状態

見えの  
切り替わり

3  
2  
1  
0



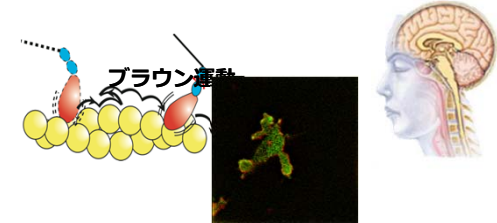
ゆらぎ  
探索

整合性 ゆらぎ

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

# ゆらぎ方程式から情報ネットワークへ

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



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  
 $f(x) = -dU(x)/dx$

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

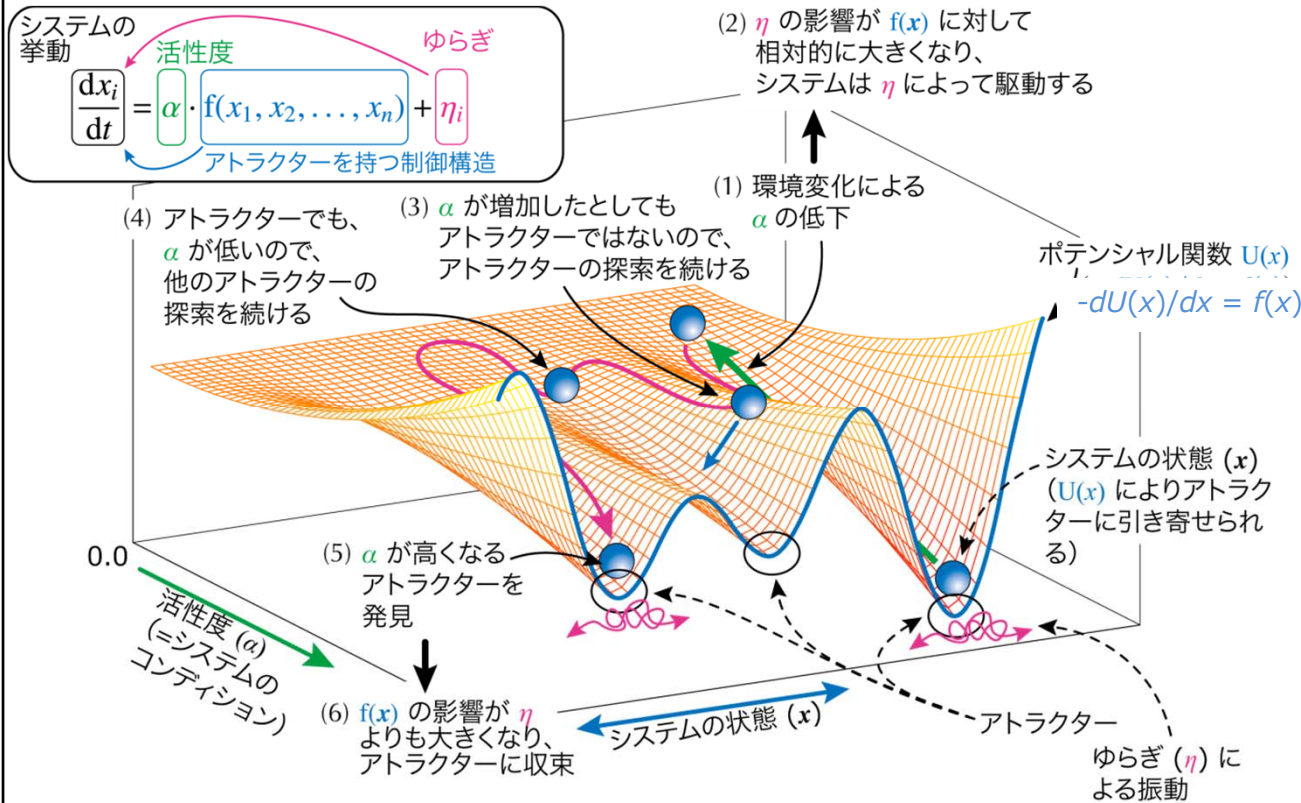
システムの現在の状態  
・システム遅延の逆数  
・スループット

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

- If-then-else型で扱われてきた制御システムを、ゆらぎ制御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
- 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



# 解探索の例



- 1)  $\alpha$  が固定 (与条件) の場合、かつ、 $\eta$  が 0 の場合
  - 非線形連続時間発展方程式を明示的に解くことが可能な場合もある。
  - 過去の最適化に関するほとんどの研究がこの場合「与条件固定、かつ、環境の時間変動なし」を明示的・暗的に仮定
- 2)  $\alpha$  が時間変動する場合、ただし、 $\eta = 0$  の場合
  - 時々  $\alpha$  に依って最適解を導出することは可能。ただし、局所最適解の場合がある。また、計算を瞬時に行うことが必須。
- 3)  $\alpha$  が時間変動し、かつ、 $\eta \neq 0$  とした場合
  - 局所最適解から脱出することが可能になる。
  - ただし、最適解に到達した場合にも、収束せずに近傍で振動する
  - ゆらぎ制御のねらいは、環境変動があった場合にも、それを  $\alpha$  を介して知り、適応可能にしているところにある



# 耐故障性の確保： オフライン制御 vs オンライン制御

計画に基づくネットワーク設計  
(オフライン制御：If-then-else型)

If 広島 fails then switch to 鳥取  
If 名古屋 fails then switch to 金沢  
...  
(想定される場合を網羅的に列挙)  
...

## オンライン制御

- すべてのノード、回線の状態を収集
- 最適化問題として定式化  
for given トポロジーマトリックス  
トラヒックマトリックス  
minimize 遅延  
subject to トラヒック量 < 回線容量
- 新しいルーティング情報を通知

想定すべき場合の数の爆発  
⇒ 単独故障：Nオーダー  
⇒ 同時2台故障：N<sup>2</sup>オーダー  
...



環境変動への追従？

新しいノードの追加時？

トラヒック（利用状況）の変動時？

最適化問題をどう解くか  
・ Linear Programming  
・ 発見的手法  
・ GN、NN、SA



収集すべき情報量の爆発  
・ リアルタイム化  
・ 大規模化

最適化問題を解く間は定常状態  
(環境が変化しない) であることが大前提





# 耐故障性の確保：集中型から自律分散型へ

耐故障性

大規模化・複雑化

それぞれのノードが判断材料（ネットワーク状況）を交換し、別々に計算

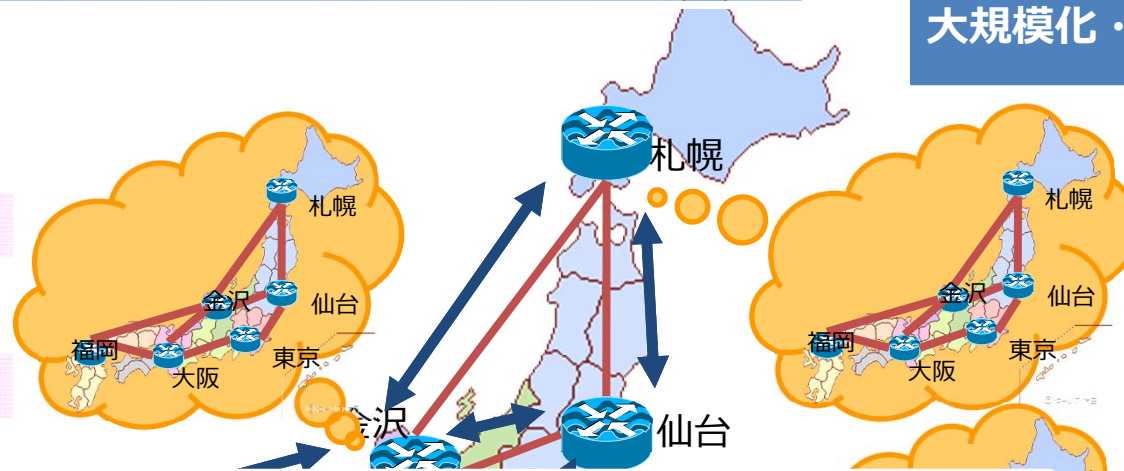
1. リンク情報の交換

2. 最適解の導出

3. リンク情報

分散協調型集中制御

- ・ 正確かつリアルタイムのネットワーク状況収集前提
- ・ 環境変動への耐性？





# ゆらぎ原理を利用した情報ネットワークの経路制御

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

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

経路選択確率

活性度 ノイズ

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

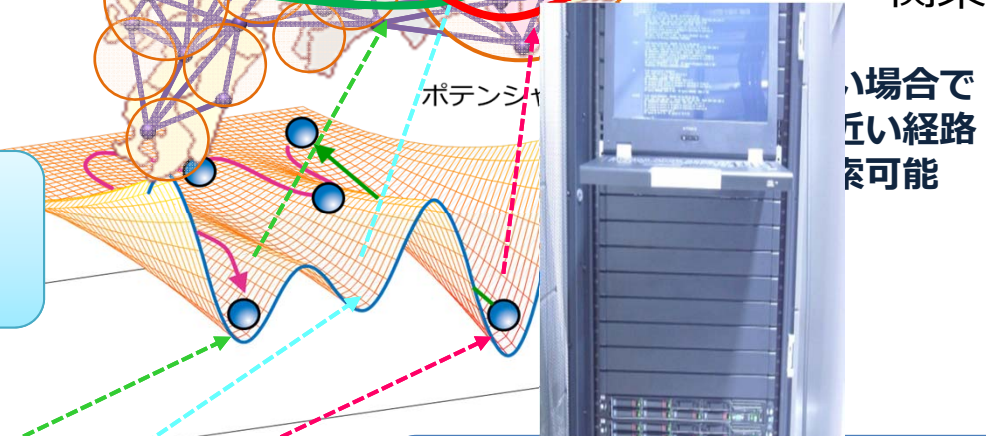
activity: 経路の良さ(リンクスピード, 遅延時間の逆数)

Kenji Leibnitz, Naoki Wakamiya and Masayuki Murata, "Biologically-inspired self-adaptive multi-path routing in overlay networks," *Communications of the ACM*, Vol. 49, No.3, pp. 62-67, March 2006.

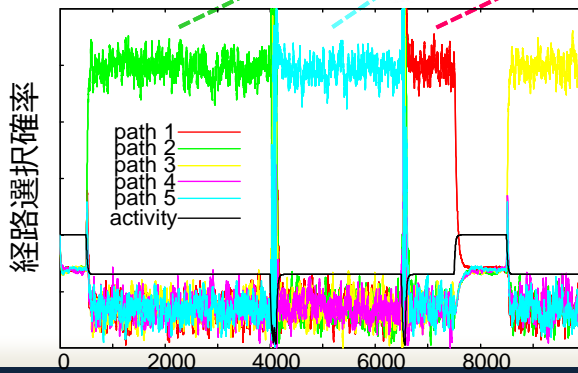
Kenji Leibnitz, and Masayuki Murata, "Attractor selection and perturbation for robust networks in fluctuating environments," *IEEE Network: The Magazine of Global Internetworking*, vol.24, no.3, pp.14-18, May/June 2010

九州

関東



い場合で  
近い経路  
系可能



- 故障
  - 負荷
  - 対
- 回避  
変動に

仮想ネットワークプラット  
フォーム動作環境



# ダイナミクスを直接扱う情報ネットワーク制御

時間

トラフィック変動

オフライン制御



経路構築



プリプログラムされた手順に従って経路変更

トラフィック変動への追従性？  
もともと資源変動は予測できることが前提

オンライン制御  
集中型制御  
分散協調型集中制御



経路構築

情報収集



経路再構築  
大域的最適化・  
発見的解法の実行



大域的最適化・発見的解法の実行

情報収集



経路再構築

収集情報量・計算時間の増大

自己組織化  
ルーティング



自律的  
情報収集



自律的経路  
再構築



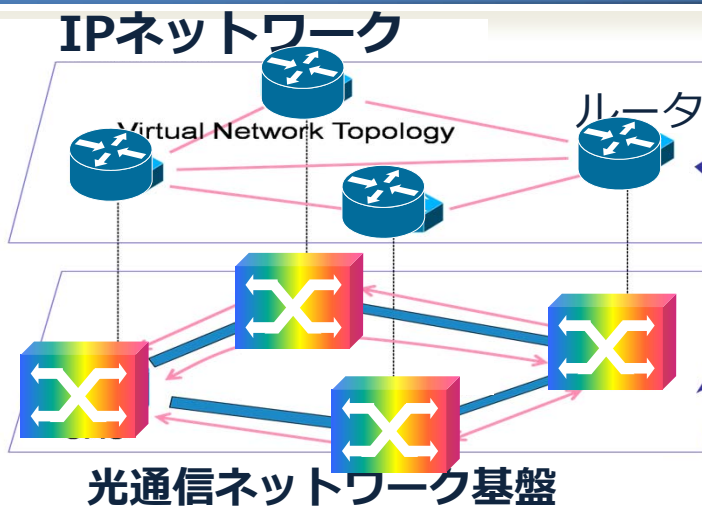
もともと時間発展方程式として記述

情報ネットワークのダイナミクスを直接扱う制御



# 光通信基盤への適用

物理網（WDMベースの波長ルーティングネットワーク）上に、論理トポロジー（波長パスペースの仮想ネットワーク；VNT）を構築



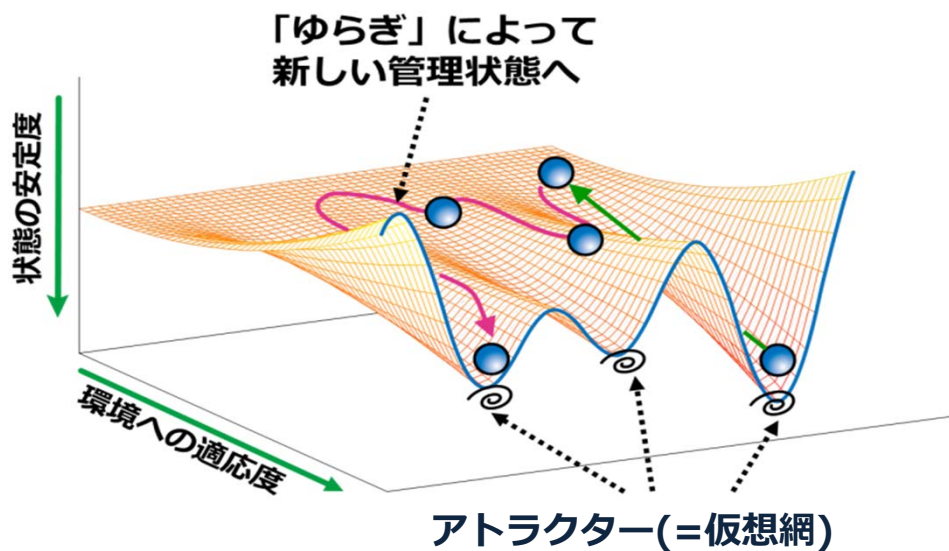
①ネットワーク品質を計測



②活性度計算

④仮想網設定投入

③アトラクター選択



システムの挙動

$$\frac{dx_i}{dt} = \alpha \cdot f(x_1, x_2, \dots, x_n) + \eta_i$$

活性度

ゆらぎ

アトラクターを持つ制御構造



# 動作概要

## ● 2階層構成のゆらぎ制御

### ■ 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:  $a$ ) 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 $f(x)$

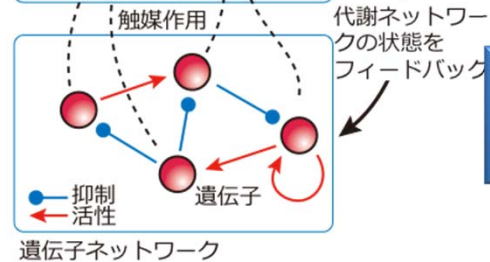
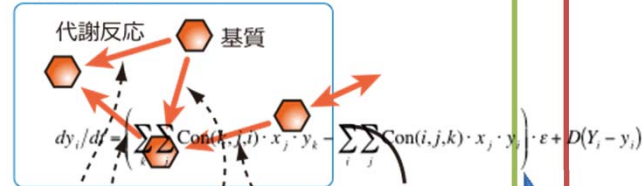
- ◆ 遺伝子ネットワーク内の遺伝子間の活性・抑制

### ■ ゆらぎ

### ■ 活性度

- 代謝ネットワークの状態

代謝反応ネットワーク



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

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

活性度 遺伝子間の相互作用(活性・抑制) ゆらぎ

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

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

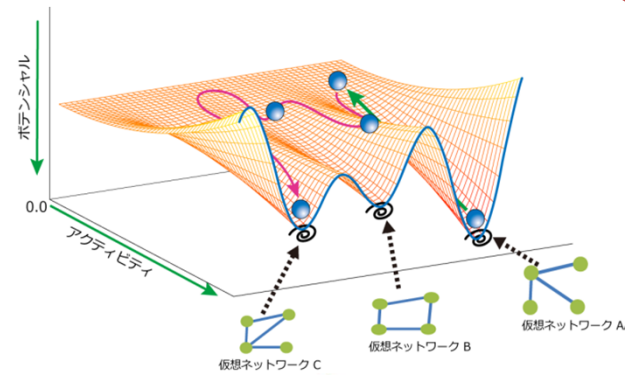


Critical

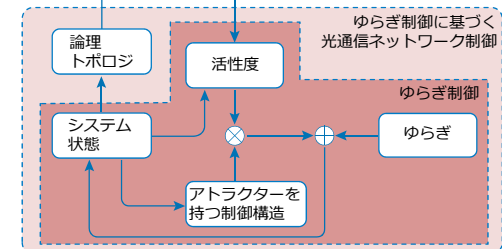
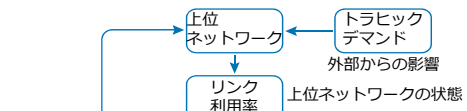
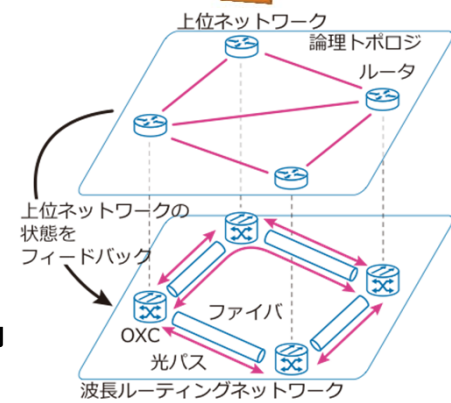


Random

M. Murata



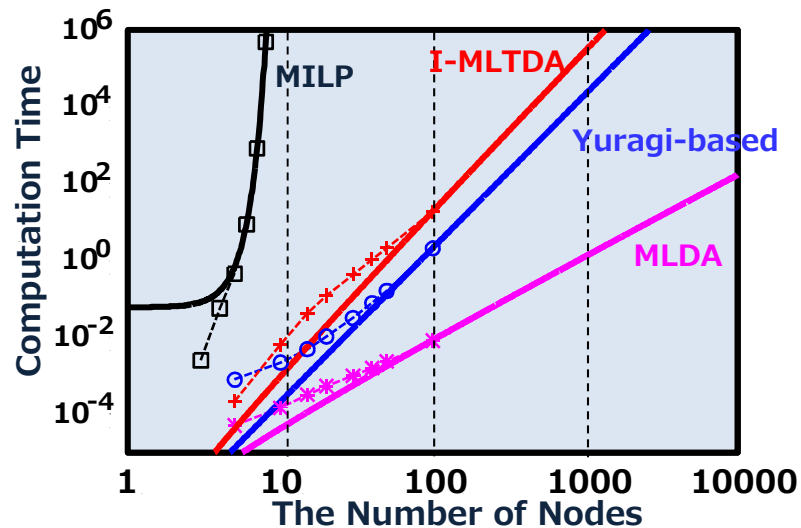
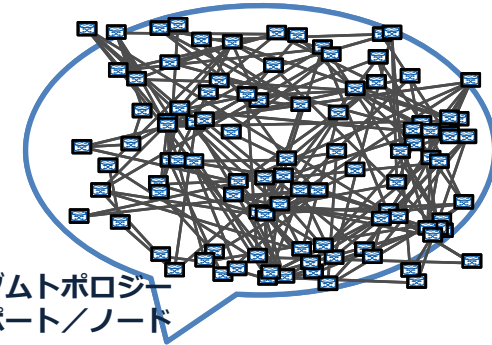
光通信ネットワークへの適用



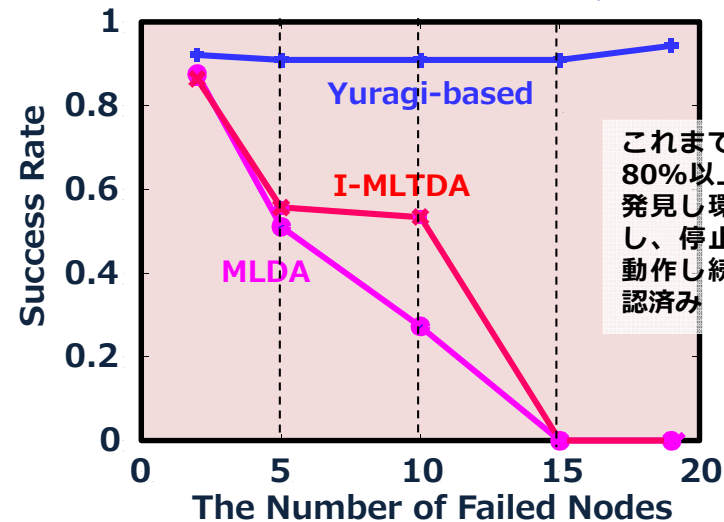


# 光通信基盤におけるゆらぎ制御の計算量

- 全体最適化 (MILP) :  $O(Cn^4)$ ;  $C$ は定数、 $n$ はノード数
- MLDA : 全体情報を集めて仮想トポロジー構築を行うヒューリスティック、計算量  $O(n^2)$
- I-MLTDA : MLDAの改良版、計算量  $O(n^4 \log_2 n)$
- ゆらぎ制御 :  $O(n^4)$



ノード数に対する計算時間の変化  
(実線は近似結果)



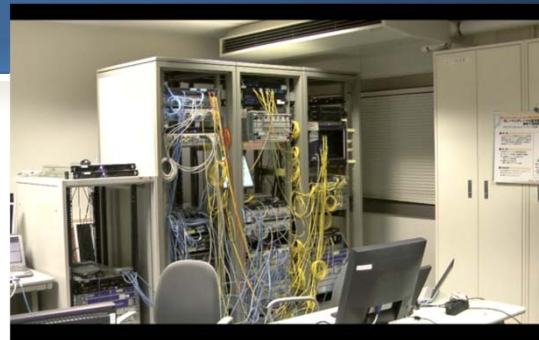
ノード障害数に対する制御成功率 (最適解の得られる確率) の変化

これまでの実験でも、80%以上の確率で解を発見し環境変動に追従し、停止せず適応的に動作し続けることは確認済み

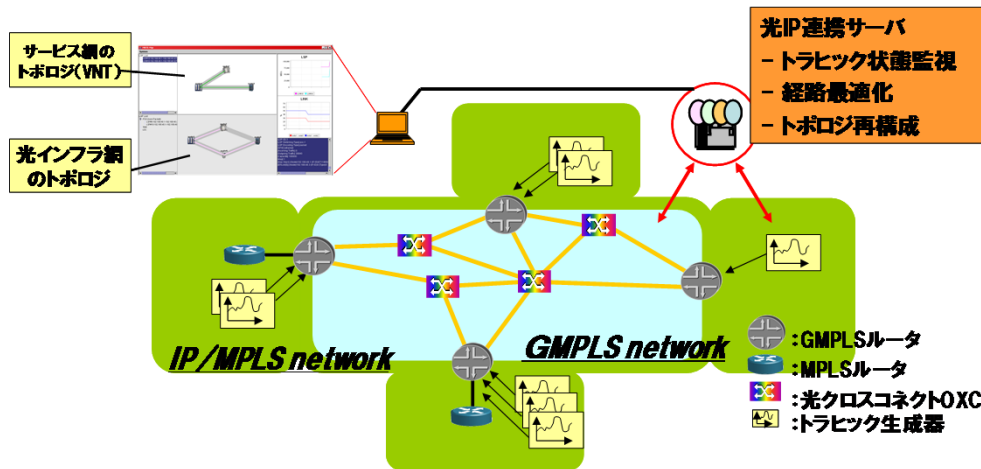


# 実証実験

- NTT社内実験用ネットワークを用いた実証実験
- 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



実験環境 (一部)



Yuki Koizumi, Takashi Miyamura, Shin'ichi Arakawa, Eiji Oki, Kohei Shiomoto, and Masayuki Murata "Adaptive virtual network topology control based on attractor selection," *IEEE/OSA Journal of Lightwave Technology*, vol. 28, pp. 1720-1731, June 2010.

特許 (以下を含め11件)

1. 宮村 崇、塩本 公平、村田 正幸、小泉 佑揮、荒川 伸一, "仮想網制御方法および仮想網制御装置," 特願2010-015934 (2010/1/27出願)

日経新聞2009年6月22日付

光通信網の滞  
故障や渋滞

## 「ゆらぎ」参考に解消

### 阪大 NTTと実証実験

大阪大学は光通信網で情報の渋滞や故障が起きても素早く復旧する技術を開発した。「ゆらぎ」と呼ばれる生物の不規則な動きを参考に、情報を送る最適な迂回(うまかい)路などを見つけて出す。NTTなどと協力して今冬

から実証実験する。動画配信など情報量の急増が続くインターネットの安定性を保つ基盤技術として2020年をめどに実用化する。光通信網では、ある地点で情報の渋滞が発生するとただちに迂回路を見つけて情報を送る。だが、一度に数カ所で渋滞や故障が起きると対応に手間

取り、復旧が遅れるケースもある。阪大の村田正幸教授らは、ゆらぎを参考に光通信網を管理するコンピュータが自動的に迂回路を見つける技術を開発。プログラムで細かく指示しないのが特徴で、模擬実験では従来なら混雑解消に1時間かかるとは、最速約5分で克服したほか、復旧までに3時間必要だった故障も約10分で回復できた例もあった。情報通信研究機構の支援でNTTと共同実験して効果や課題を調べ、改良を重ねて実用化する考

えだ。総務省によると、国内のブロードバンド回線契約者によるダウンロードの推計通信量(08年11月時点)は毎秒900ギガ(ギガは10億)ト。動画のやりとりなどが増えた影響で、3年前と比べ約2倍



# 自己組織化に対して指摘される問題

- 「結果がわからないのでは使えない」
  - ミクロ→マクロ：要素還元論にとらわれすぎではないか
    - サブシステムの積み上げによる全体システムの設計の限界
- 「保証できないネットワークはビジネスに使えない」
  - 現状、すべてを保証できるしかけはない
  - 問題がなければ、何をやっても（やらなくても）うまくいく
- 「管理できないネットワークは使えない」
  - 「管理する」の意味
    - 現状の状態を把握している
    - 資源を操作する
  - 時間粒度の異なることを指摘している
- 「評価手法がない」
  - 現状、機能が発現するかどうかはシミュレーション
  - ロバストなシステムの評価手法





# 管理可能な自己組織化システム

## トラヒックエンジニアリング

- 統計情報の収集
- 時間を止めて最適化→制御

## 自律分散システム

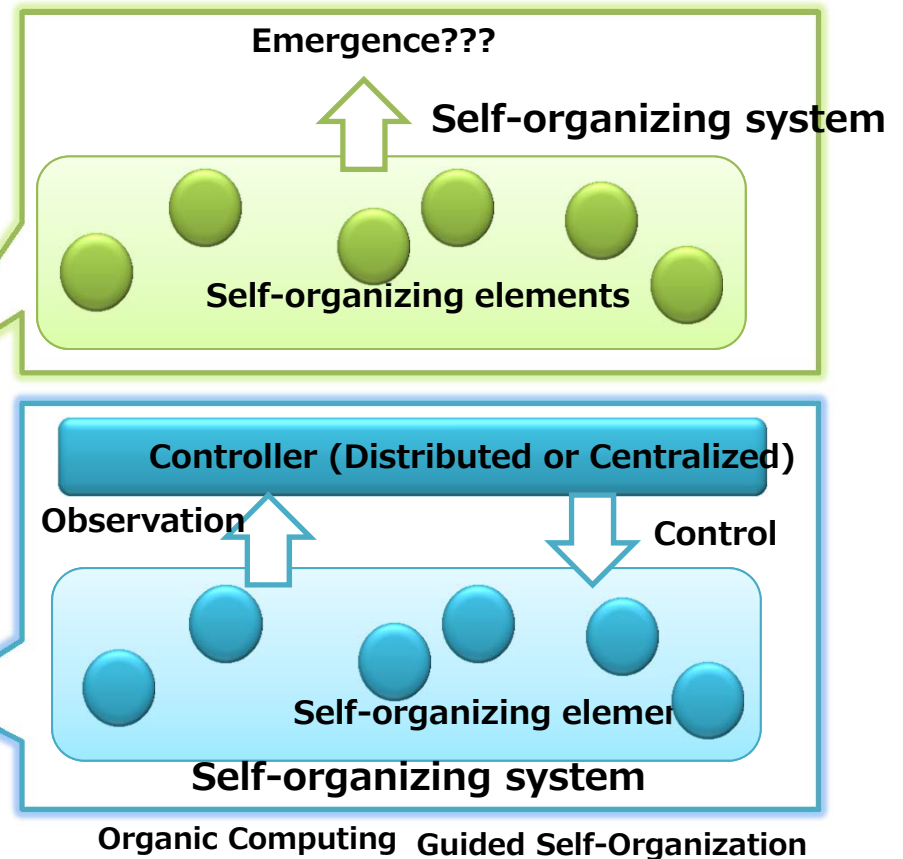
- 変化する環境に対して情報を収集して自律的判断
- 制御時間のタイムスケール > 環境変動のタイムスケール

## 自己組織化システム

- 環境変動の局所的な情報収集と情報交換
- 制御時間のタイムスケール ≤ 環境変動のタイムスケール
- 機能発現を行う。ただし、どのように機能が発現するかは必ずしも予測できない

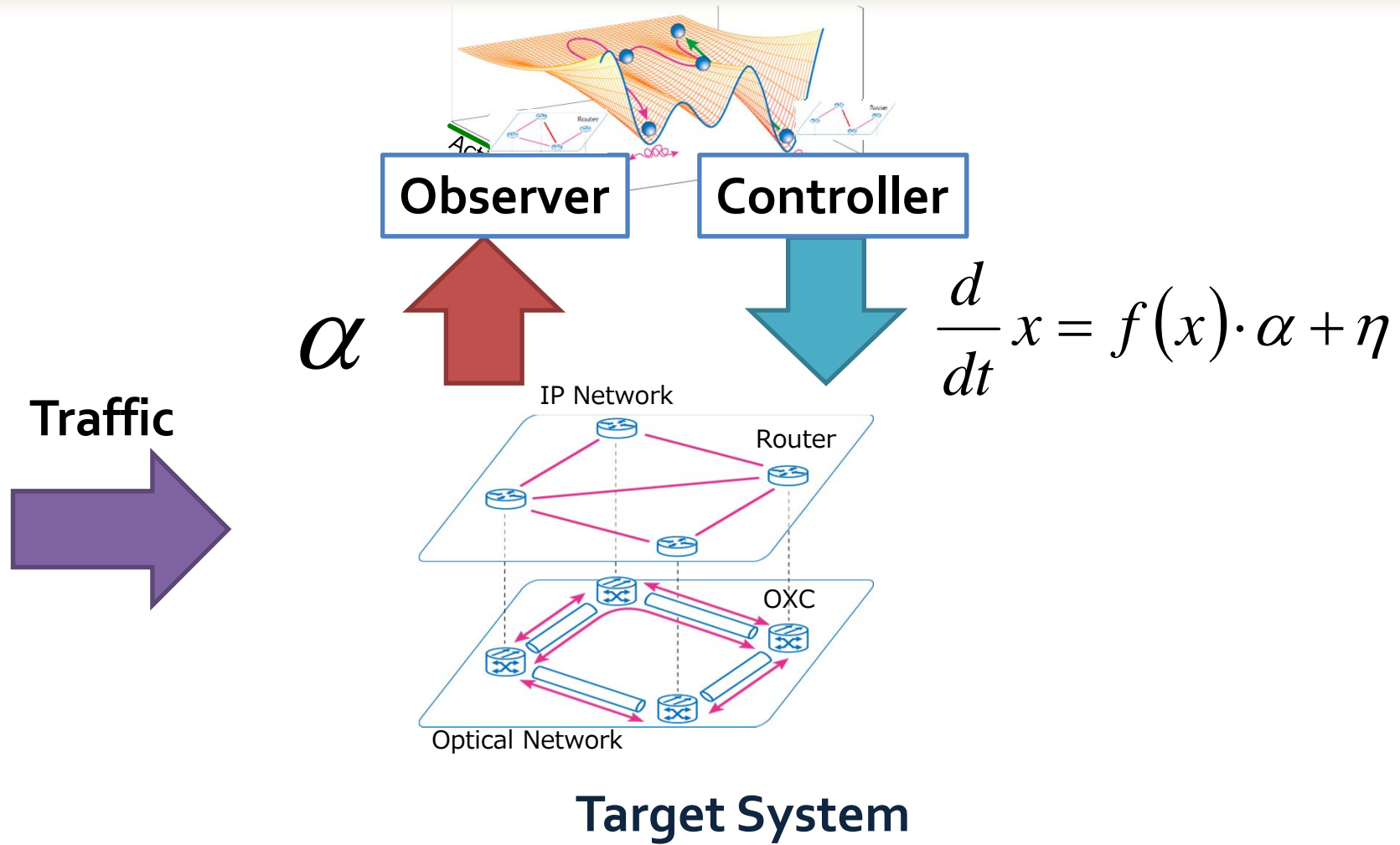
## 管理型自己組織化システム

- 自己組織化システムであると同時に、外部からの全体的な制御によって発現の方向性を制御





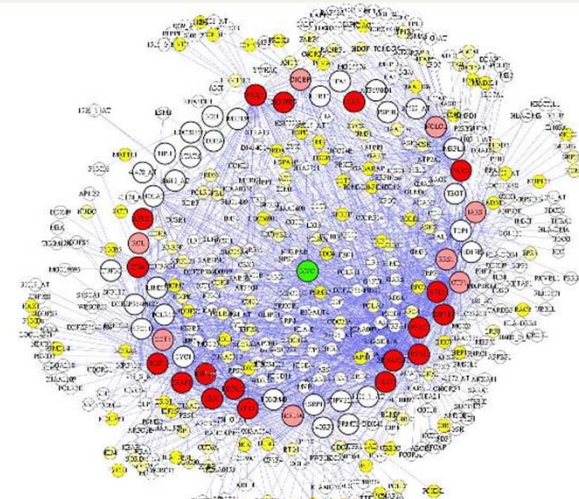
# ゆらぎ制御における管理型自己組織化制御



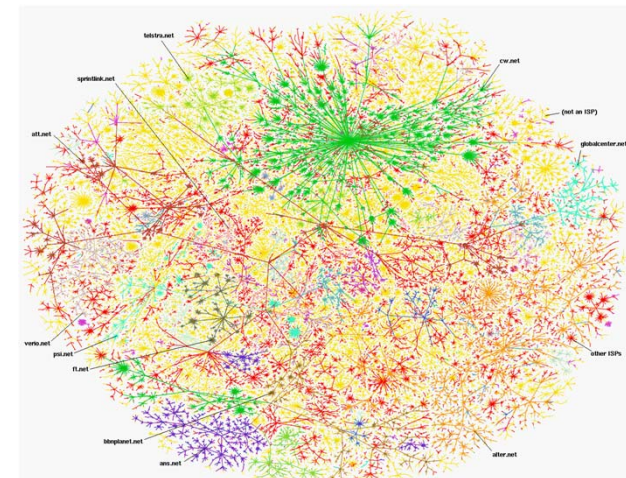


# インターネットのスケールフリー性

- インターネットはもともと分散志向であり、大規模かつ複雑
  - 基礎研究の成果に基づいて得られたものではない
  - 「人が設計可能な、制御可能な範囲を超えている」
  - にも関わらず、べき則に従っている
  - 単なる現象か必然か？
- 空間的構造
  - 「スケールフリー理論」
  - 構造分析→工学的設計手法へ
- 時間的構造
  - システムダイナミクス
  - アトラクター (Basin) 理論などによる evolution
  - ネットワーク全体の情報流制御



<http://wiki.c2b2.columbia.edu/califanolab/index.php/Research>



<http://research.lumeta.com/ches/map/gallery/index.html>



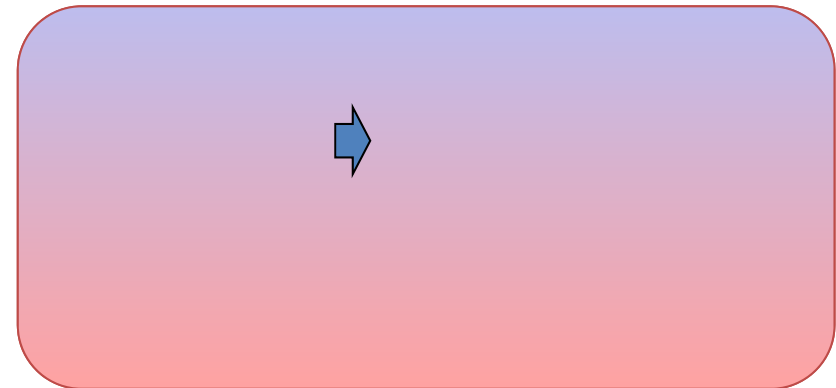
# 脳機能や生体機能に学ぶ省エネかつロバストな情報ネットワークのトポロジー構築・制御

- 脳機能や生体機能に学ぶ省エネかつロバストな情報ネットワークのトポロジー構築・制御
  - 脳機能や生体機能：省エネかつロバスト
    - スケールフリー制があることは共通
  - 脳機能ネットワークの刺激伝達構造や生体機能ネットワークの情報伝達構造を分析
    - モジュール性、階層性 (Hierarchy) など
  - 情報ネットワークのトポロジー構造と対比

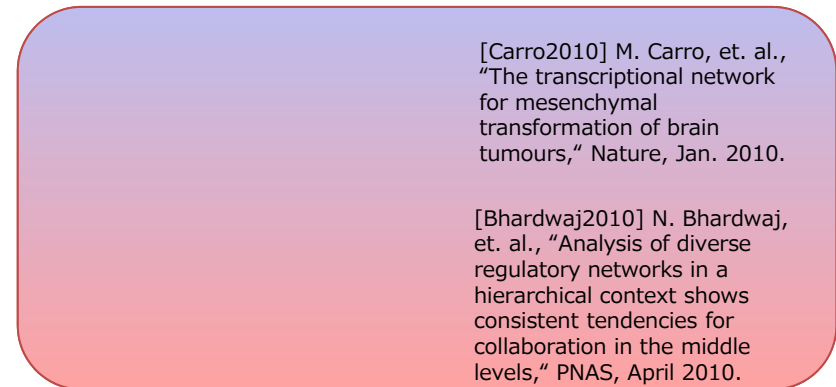


- 省エネかつロバストな情報ネットワークのトポロジー構築・制御
  - まずはトポロジカルな観点で検証
  - 次に、脳機能や生体機能にはないと考えられる情報ネットワーク固有の特徴（例えば、回線容量、経路制御、輻輳制御）が作用する環境下で有効なトポロジー制御を検討評価する

## 脳機能ネットワーク



## 生体機能ネットワーク（転写因子ネットワーク）

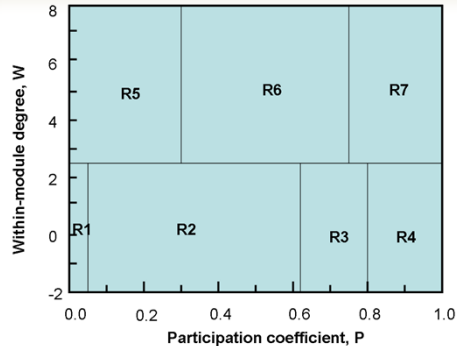


[Carro2010] M. Carro, et. al., "The transcriptional network for mesenchymal transformation of brain tumours," Nature, Jan. 2010.

[Bhardwaj2010] N. Bhardwaj, et. al., "Analysis of diverse regulatory networks in a hierarchical context shows consistent tendencies for collaboration in the middle levels," PNAS, April 2010.



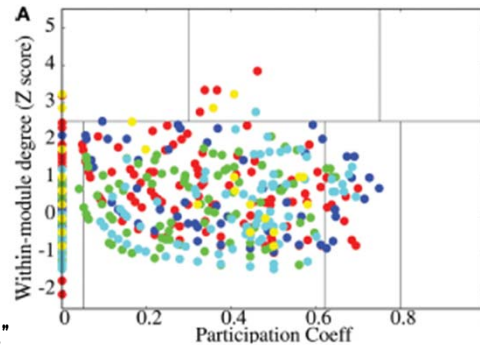
# 情報ネットワークのトポロジー構造



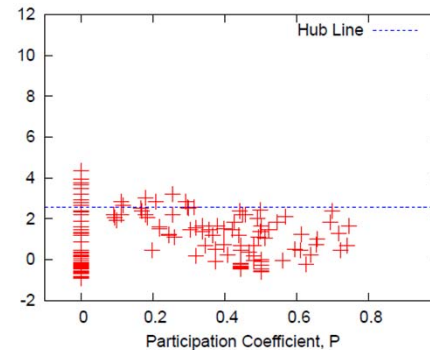
R1: Ultra peripheral  
R2: Peripheral  
R3: Non-hub connectors  
R4: Kinless nonhub  
R5: Provincial hubs  
R6: Connector hubs  
R7: Kinless hubs

SRC: Guimera R, Luis LAN, "Functional cartography of complex metabolic networks," Nature, Vol. 433, No. 7028. (24 February 2005), pp. 895-900.

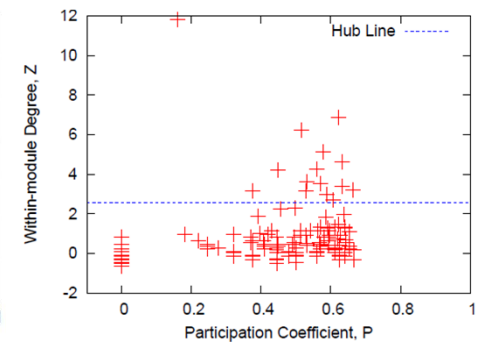
脳機能ネットワーク [Meunier2009]  
モジュール度 0.5~0.6



情報ネットワーク(AT&T)  
モジュール度 0.89

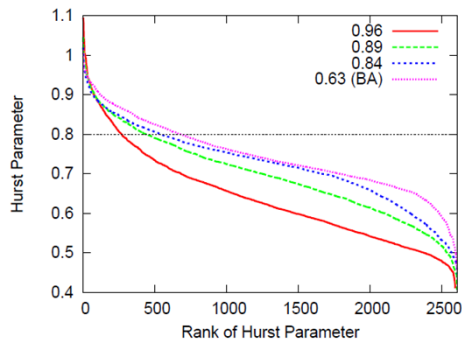


生成モデル(BA)  
モジュール度0.63

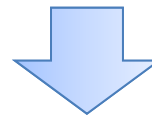


- 脳機能ネットワークとBAモデルはトポロジー構造が類似(?)
- 情報ネットワークは高いモジュール性を有する

注1) ランダムグラフはそもそもモジュールに分割できない  
(モジュール分割法はMeunier2009と同様、Newmanの方法を採用)  
注2) モジュール度は1.0で最大



N=523, L=1304(TCP, B=1000)

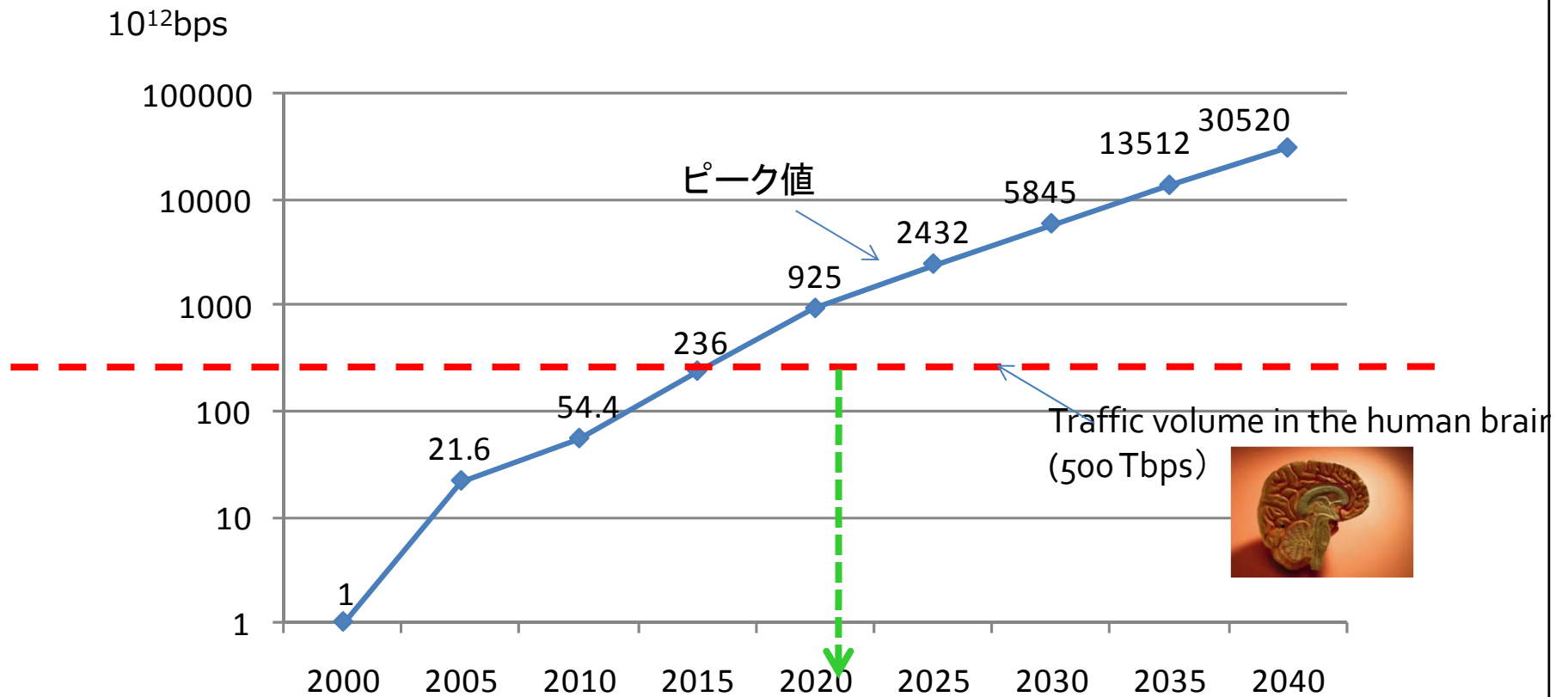


- モジュール性が高いほど、パケット量のばらつきが大きいリンク数が抑えられる
- 課題：トポロジーをどう組み替えていけば良いか（通信容量をどのように設計すればよいか）



# ネットワークを流れる情報量

## 情報ネットワークに学ぶ脳機能ネットワーク解明???



ニューロン : 100億

◆ 毎秒トラフィック量 (Tera bps :  $10^{12}$  bps)

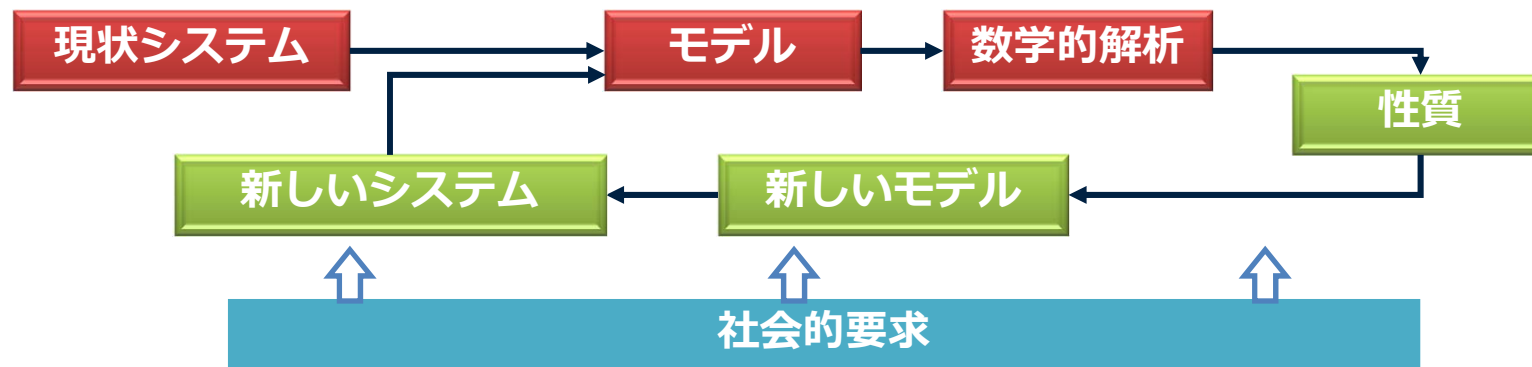


# NWアーキテクチャ = 科学 + 技術

- 科学（解析）：すでに存在しているものにある普遍的な法則を探求すること、知の創造
- 技術（設計）：新しい機能を実現する具体的な方法を案出し、作り上げ、利用すること、知の具現化



- ネットワークアーキテクチャの創成
  - 先端科学技術の融合
  - 秩序だった既成学問体系からは産まれない





# 電子情報通信学会 情報ネットワーク科学時 限研究専門委員会 (NetSci研究会)

## [担当する研究分野]

### 1) 情報ネットワーク科学基盤

- 情報ネットワーク科学、大規模複雑情報システム、ネットワークアーキテクチャ、ネットワークモデリング、ネットワーク性能評価、ネットワーク計測、ネットワーク設計概念と応用、ネイチャーインスパイアードアーキテクチャ、自律分散ネットワーク、自己組織化ネットワーク、ネットワーク情報理論とその応用、情報ネットワークに資するゲーム理論と応用、データセントリックネットワーク、持続発展可能ネットワーク

### 2) リアルワールド情報ネットワーク科学基盤

- センサーネットワーク・Internet of Things (IoT)を扱う基盤理論と応用、リアルタイムネットワーク、情報通信におけるエネルギー基礎理論、省電力ネットワーク、サイバーフィジカルシステムと情報ネットワーク、ネットワーク科学の知見に基づく物理システム・物理デバイス、光・量子等の先進物理原理と情報ネットワークへの展開

### 3) 知識社会情報ネットワーク科学基盤

- ソーシャルネットワーク、ネットワークサービス、ネットワークセキュリティに関する理論と応用、知識ネットワーク、集合知、ネットワーク知識情報融合、ユーザー・ネットワークインタラクション

#### ■ 委員長

■ 村田 正幸 大阪大学

#### ■ 副委員長

■ 会田 雅樹 首都大学東京

■ 中村 元 KDDI

#### ■ 幹事

■ 成瀬 誠 情報通信研究機構

■ 巳波 弘佳 関西学院大学

#### ■ 幹事補佐

■ 井上 武 北海道大学

■ 久保 健 KDDI研究所

#### ■ 顧問

■ 斎藤 洋 NTT

■ 長谷川 亨 KDDI研究所

2011年10月より活動開始