

# 「複雑ネットワーク科学」研究室紹介

林 幸雄

北陸先端科学技術大学院大学

## 0. 究極的な目標は...

故障や攻撃に対して自己修復できて、自らを自己組織的に創り出す近未来のネットワークをデザインすること！



# 1. 現実のネットワークに潜む三重苦

全く異なる対象や構成要素であるにもかかわらず、現実の多くのネットワークには共通構造が存在

社会的関係	知人関係, 企業間取引, 映画の共演, 論文引用, 性的関係, 言語
インフラ技術	インターネット (ルータおよび AS レベル), WWW, 航空路線網, 電力網, 電子メール送受信
生物系	神経回路網, 遺伝子やエネルギー代謝の反応系, 食物連鎖

しかも, 日々の生活や経済活動, 物流や通信手段, 我々自身の体内メカニズムに至るまで, どれも **複雑なネットワーク** の上で成り立っている.

# Extreme Attack Vulnerability

個々の現実ネットが脆い

$$P(k) \sim k^{-\gamma}$$

Scale-free 構造の性質

頑健性: ランダムなノード故障には極めて強く連結性を保持

脆弱性: ハブの集中攻撃で極度に分断

理論的裏付け: D.S.Callaway et al., Phys.Rev.Lett. 85, 2000

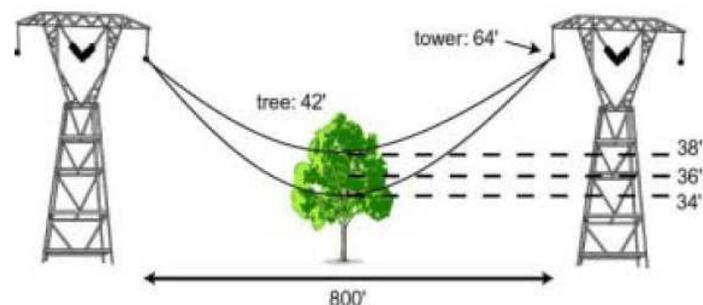


さらに、連鎖被害, 相互依存性が加わった三重苦!

# 連鎖故障のシステム障害

## 許容量を越えた被害伝搬

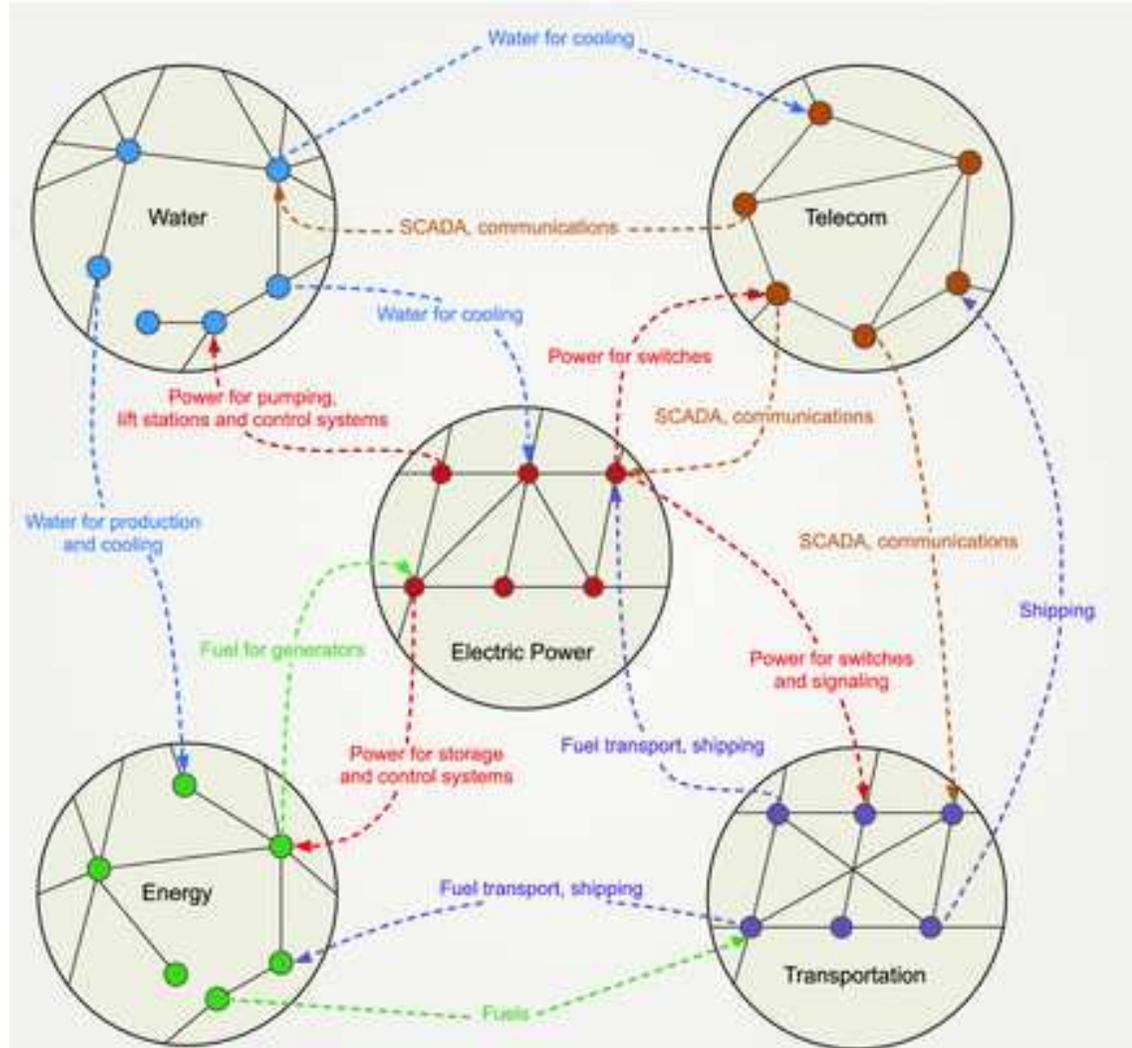
- 電力崩壊: 初期断線からの広域停電
- 道路やパケットの渋滞
- 不況で資金繰りが付かない企業の倒産連鎖
- :



2003年8月14日北米北東部停電事故に関する調査報告書, 2004年3月北米北東部停電調査団 (NERC "August 14 2003 Blackout"), 及び, 北米東部大停電について, IEEJ 2003年8月

# 相互依存：社会を支える情報通信

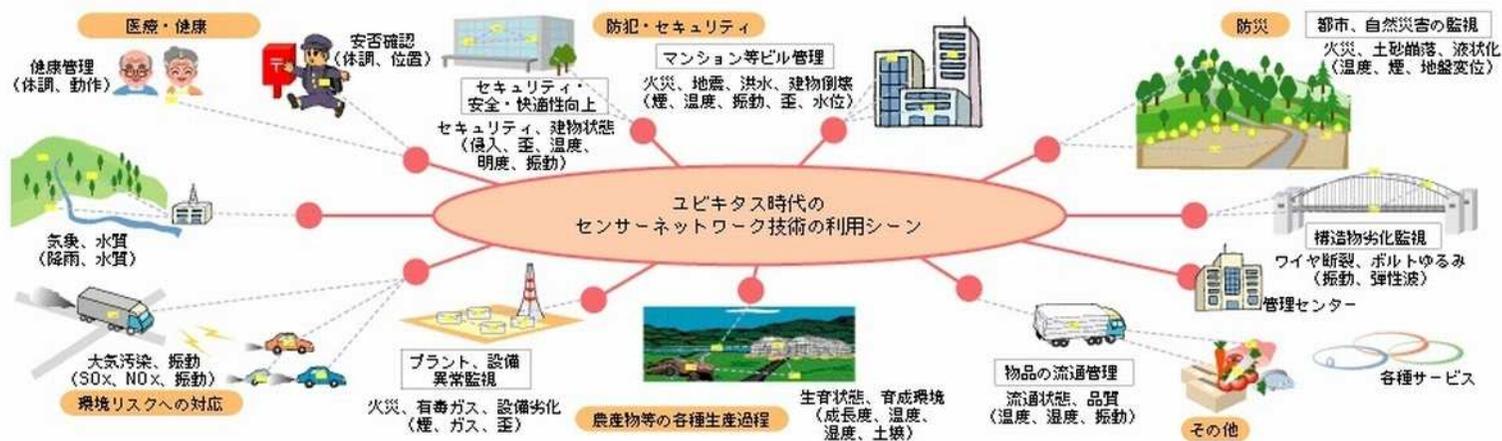
## Supervisory Control And Data Acquisition (SCADA)



J.Gao, D.Li, and S.Havlin, *National Science Review* 1, Special Topic: Network Science, 2014.

# 環境問題とネット脆弱の類似：利己・依存

## ・広範囲



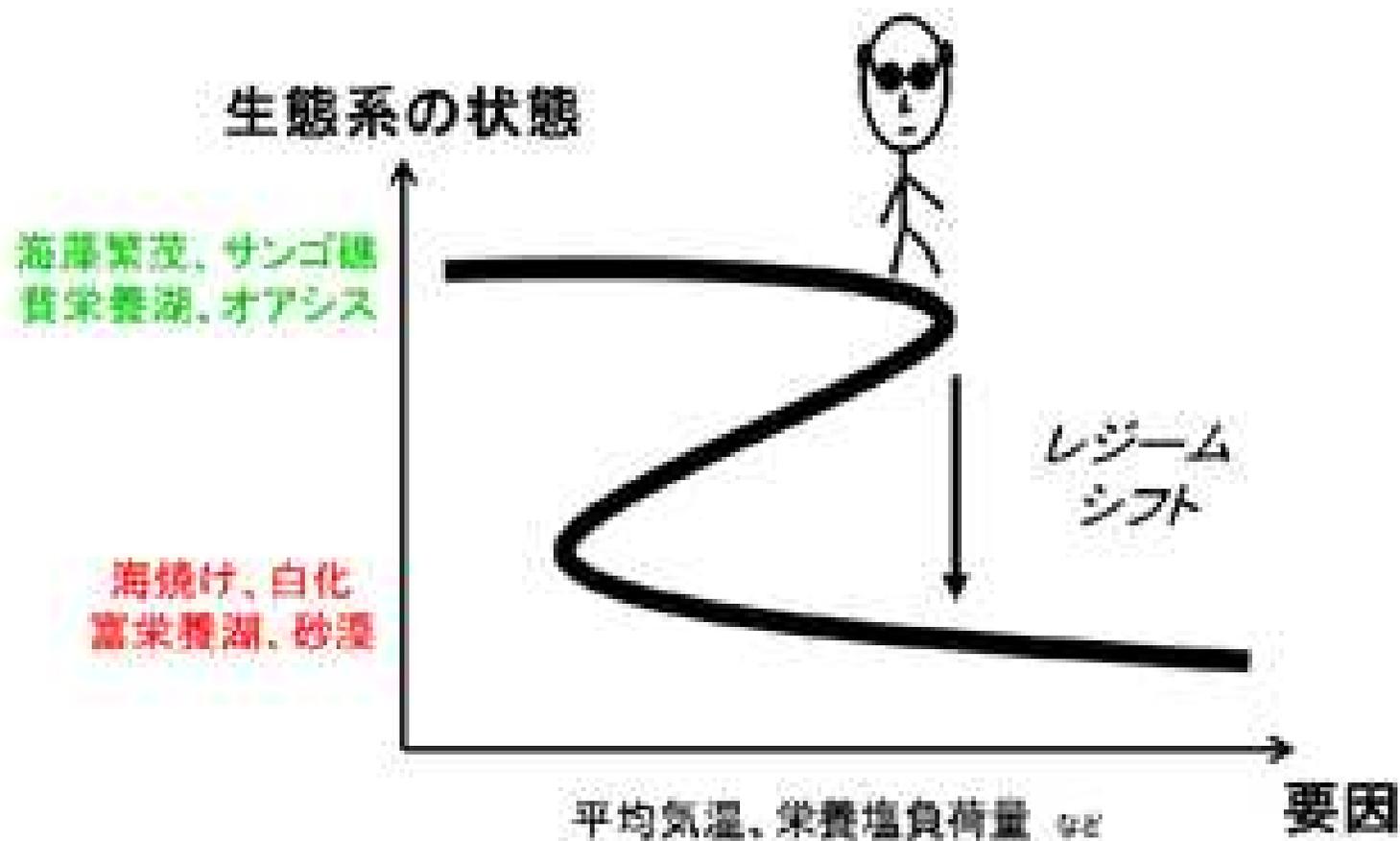
<http://ss-ecota.com/eco>,

[http://www.chemsys.t.u-tokyo.ac.jp/research\\_environment.html](http://www.chemsys.t.u-tokyo.ac.jp/research_environment.html),

<http://www.soumu.go.jp/johotsusintokei/whitepaper/ja/h16/html>

## 2. レジームシフト

“いったん落下すると、後ずさりしても遠い上がるのは非常に難しい”



### 3. レジリエンスとは

## レジリエンス

「困難な状況にもかかわらず、しなやかに適応して生き延びる力」



## 壊して衝撃を吸収する設計例



[http://www.homemate-research-car-shop.com/useful/11962\\_shopp\\_069/](http://www.homemate-research-car-shop.com/useful/11962_shopp_069/)

# 無駄に思える存在が危機を救うことも



## 働かないアリに 意義がある

進化生物学者 長谷川英祐・著  
メディアファクトリー新書  
定価:本体740円(税別)

身につまされる最新生物学！  
働き者で知られるアリに、われわれは思わず共感する。だが、生態を観察すると、働きアリの7割はボーっとしており、1割は一生働かないことがわかってきた。しかも、働かないアリがいるからこそ、組織は存続できるという！これらの事実を発見した生物学者が著す本書は、アリやハチなどの社会性昆虫に関する最新の研究結果を人間社会に例えながら、わかりやすく伝えようとする意欲作である。(※カバーより)

# レジエントなシステム設計という新概念

レジリエンス(復活力): 固く頑丈でも限界に達すると脆い従来のシステムから脱却して、必ずしも全く元道りに戻る訳ではないかも知れないが、しなやかに機能を復活させることができる力 ⇒ 新たな設計指針: 植物, 車, ...



図 1.2-1: インフラ・レジリエンスを構成する4つの要素

防衛基盤整備協会『重要インフラ防護におけるレジリエンス・マネジメントについて』

# 人とシステムの双方に関するレジリエンス

レジリエンスの定義：システム、企業、個人が極度の状況変化に直面したとき、基本的な目的と健全性を維持する能力

適応能力の維持：予測不能な混乱や変動が頻繁に発生する現代において、状況の変化に適応しつつ自己の目的を達成する為、好ましい状態からはじき出されないように抵抗力を強化し、いざというときに備えて許容性の幅を広げておくこと

システムの脆弱性を増幅するのは複雑さ、一極集中、同質性、効率偏重であり、レジリエンスを高めるのは適正な単純さ、局所性（分離性）、多様性、重複冗長性

A.Zolli, A.M.Healy 著（須川訳）レジリエンス 復活力, ダイヤモンド社, 2013

# レジリエンスのある世界: 自律, 分散, 協調

大事にするもの:

- 多様性, 生態的なばらつき, モジュール性
- ゆっくりと変化する変数を認識する
- 緊密すぎないフィードバック  
→ 破滅への閾値を超える前に発見
- 社会関係資本: 信頼の絆やリーダーシップ
- イノベーション: 変化を受け入れる
- 機関や制度の重複
- 金銭では認識されない開発の提案や評価

枝廣著 レジリエンスとは何か, 東洋経済新報社, 2015

## レジリエンス思考の必要性

『ますますグローバル化する世界では、社会状況、保健、文化、民主主義、そして安全保障や生存、環境の問題は複雑に絡み合っており、加速的な変化にさらされている。変化を避けることはできないものの、変化の性質について理解することが必須である。特に、閾値の存在と、実際には元に戻せない、望ましくないレジームシフトの理解は不可欠だ。(中略) 予防的アプローチとレジリエンスに関するより深い理解、および社会システムと経済システムにおける複合的な能力が必要である。』

枝廣著 レジリエンスとは何か, 東洋経済新報社, 2015

# レジリエンスの分類

擾乱のタイプ： 意図の有無による人為 or 自然災害, 頻度, 予測可能性, 持続時間, 内部 or 外部要因

対象システム： 生物・生態系, 工学：人工物, 公共インフラ, 金融, 会社組織, 社会コミュニティ  
→ 自律性, 粒度, 単一 or 複雑な目的

回復のタイプ： 構造的回復, 機能的回復, 革新的回復

大学共同法人 著 システムのレジリエンス, 近代科学者社, 2016

レジリエントな(復活力のある)システム設計として具体的に何をどう考えれば良いのか?

⇒ 強い耐性の自己組織化と自己修復が鍵!

## 4. 主な関心事

インターネット、電力網、航空路線網など身近なネットワークは極端に脆弱！で、相互に依存

フラクタル物理、生物メカニズム、数理最適化、アルゴリズムを活用して近未来のネットワークを探る

- 淘汰、分割、複写に基づいて**自己修復**する

ネットワークデザイン原理の解明

- **大規模災害**や**広域無線通信**への応用

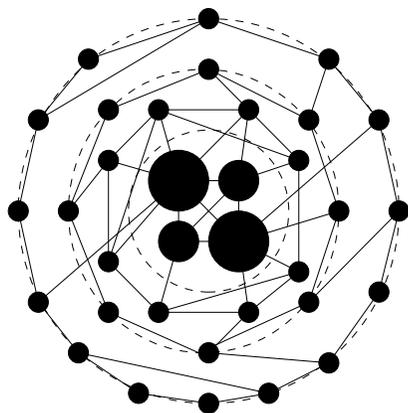
- 組織論も活かした遠距離交際と近所付き合いによる結合耐性強化

- マルチコア分散計算やシミュレーション技術の習得



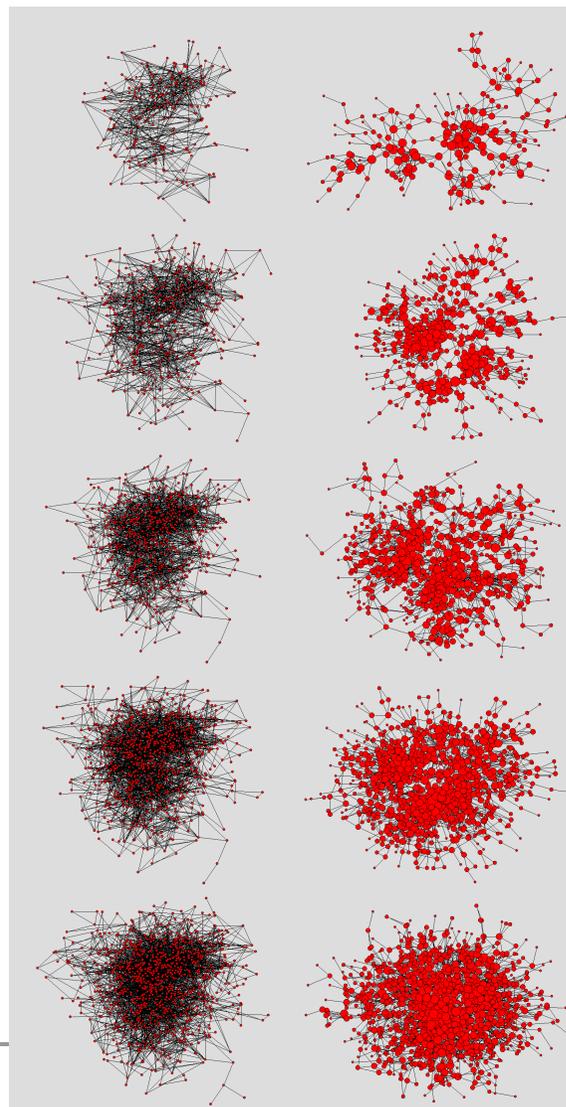
# 世界初の逐次成長構築法

攻撃に最適な結合耐性 = 正  
次数相関を持つ玉葱状構造  
C.M.Shneider et al., PNAS 810,  
2011, T.Tanizawa, S.Havlin, and  
H.E.Stanley, PRE 85, 046109,  
2012 ⇒ 全体張り替えのみ Z.-  
X.Wu, and P.Holme, PRE 84, 0  
26116, 2011

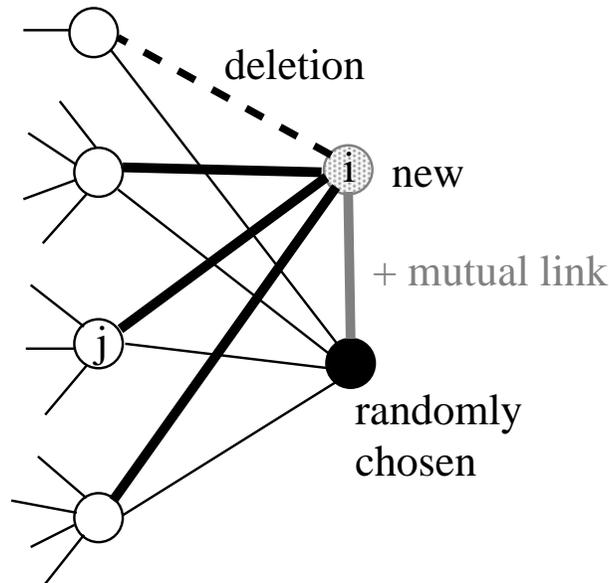


Y.Hayashi, IEEE Xplore Digital  
Library SASO 2014

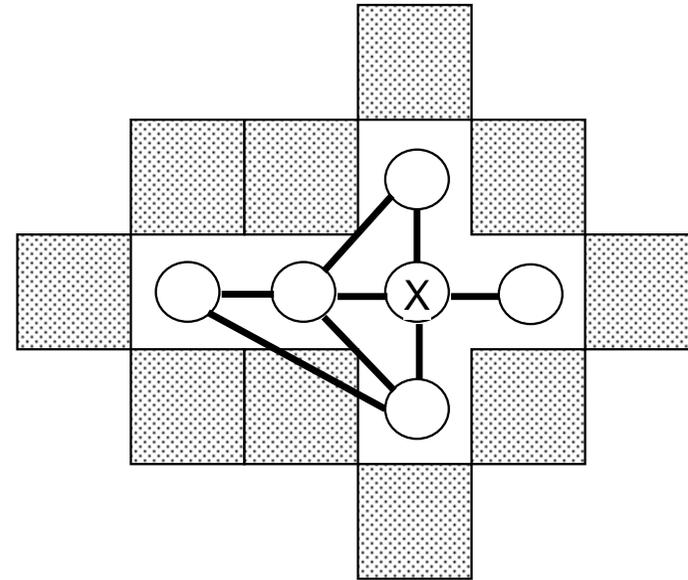
成長しながら構築!



# 界面成長による制約が付くと



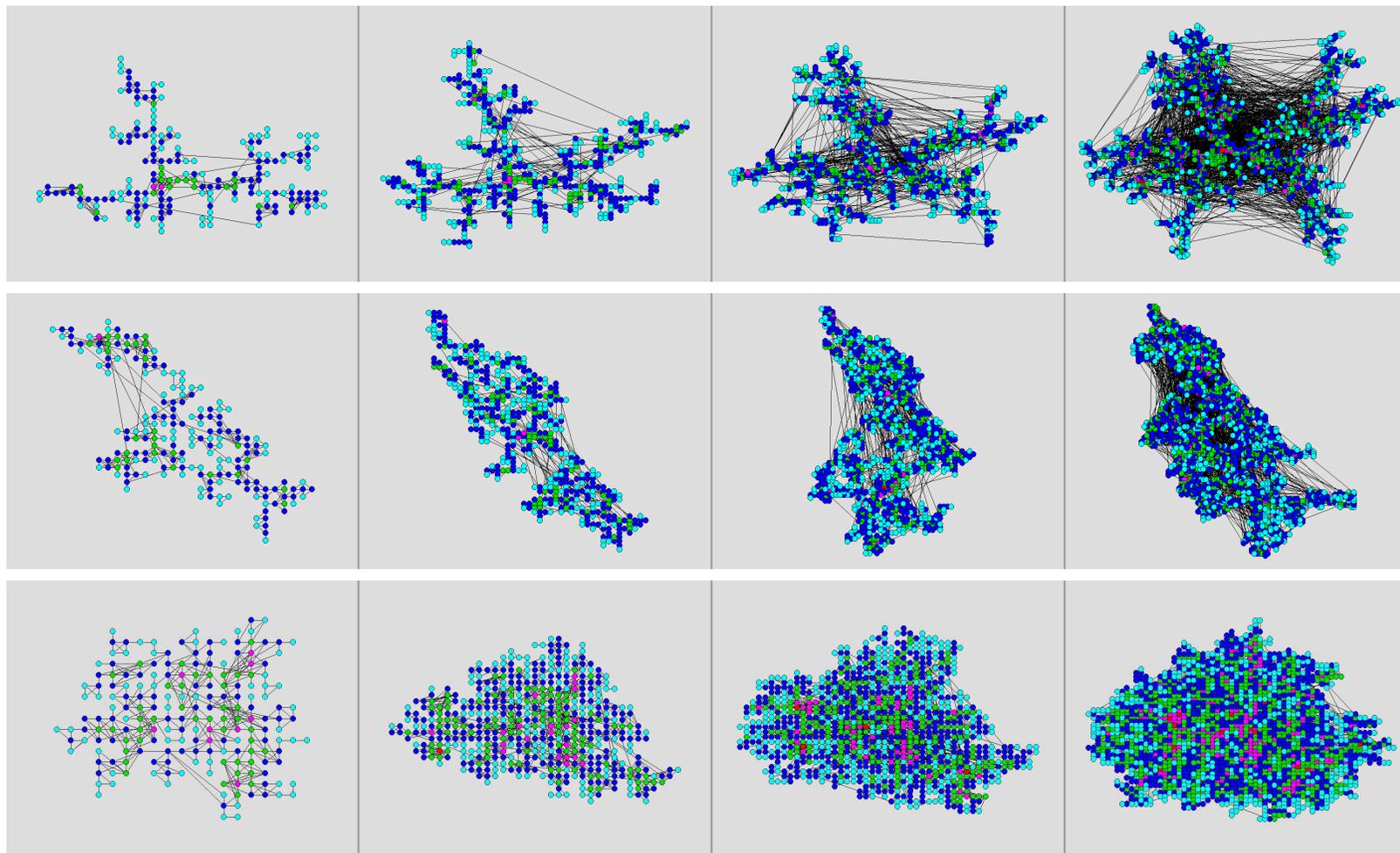
部分コピー操作の  
基本モデル



界面(表面)上の限られた  
位置のみに新ノード追加:  
界面に隣接するノードの  
みが部分コピー操作対象  
として選択可

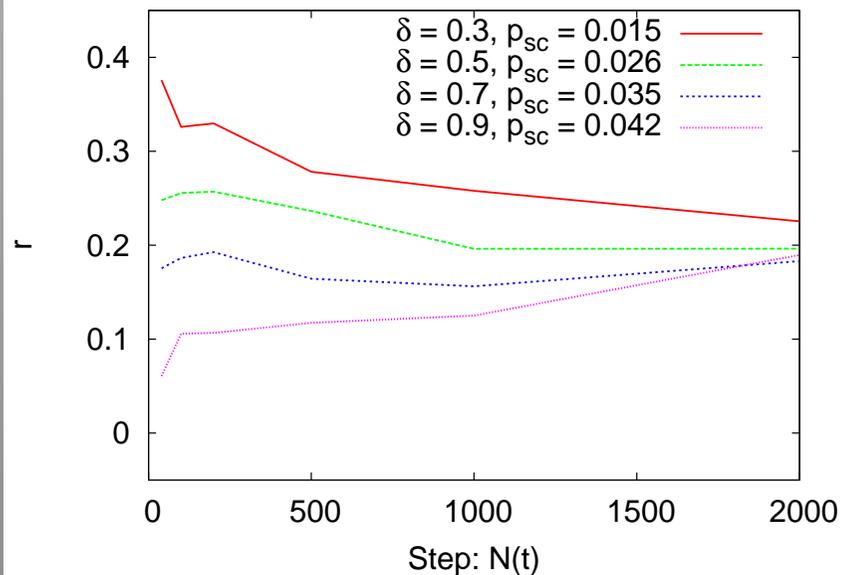
# 典型的な表面成長: *DLA, IP, Eden*

高次数ノードが空間的に自己組織化されて点在

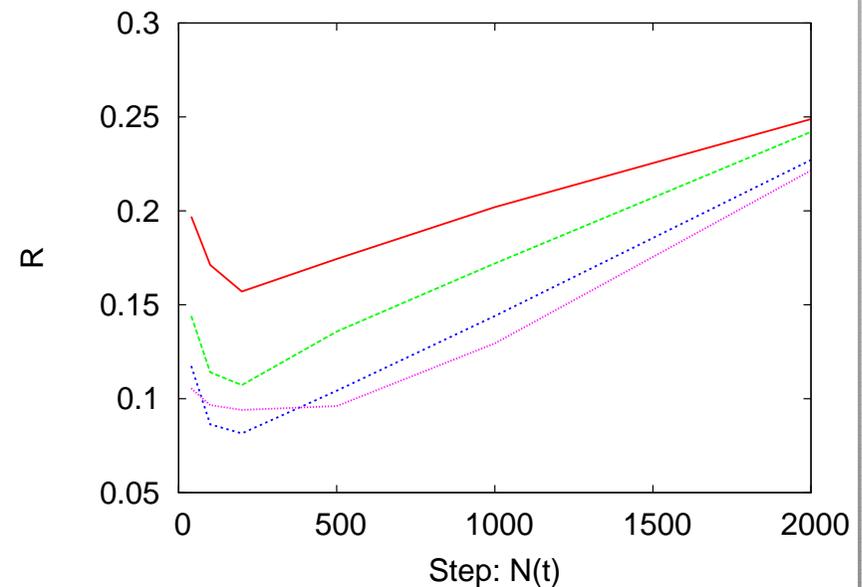


# レジリエントなネットワーク成長

治癒処理のないランダム成長でも，執拗な連続攻撃から  
玉葱状構造を復活可！ ⇒ 効率性と頑健性が共存



Deg-deg correlation  
with moderate  $r \approx 0.2$

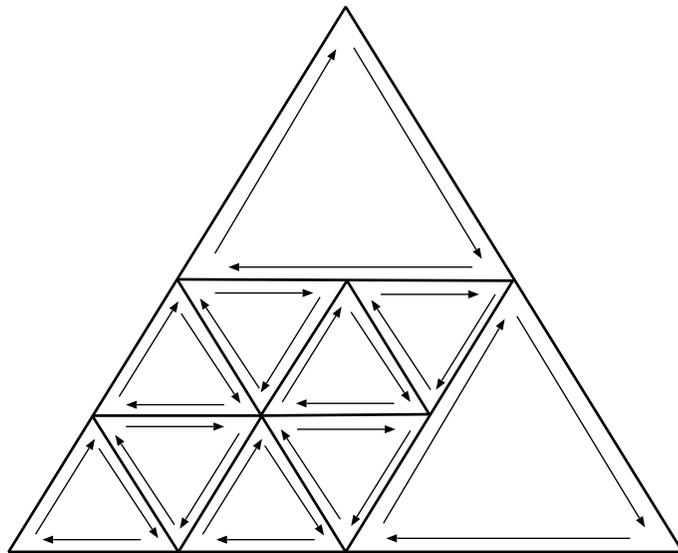


Strong Robustness  
with increasing  $R$

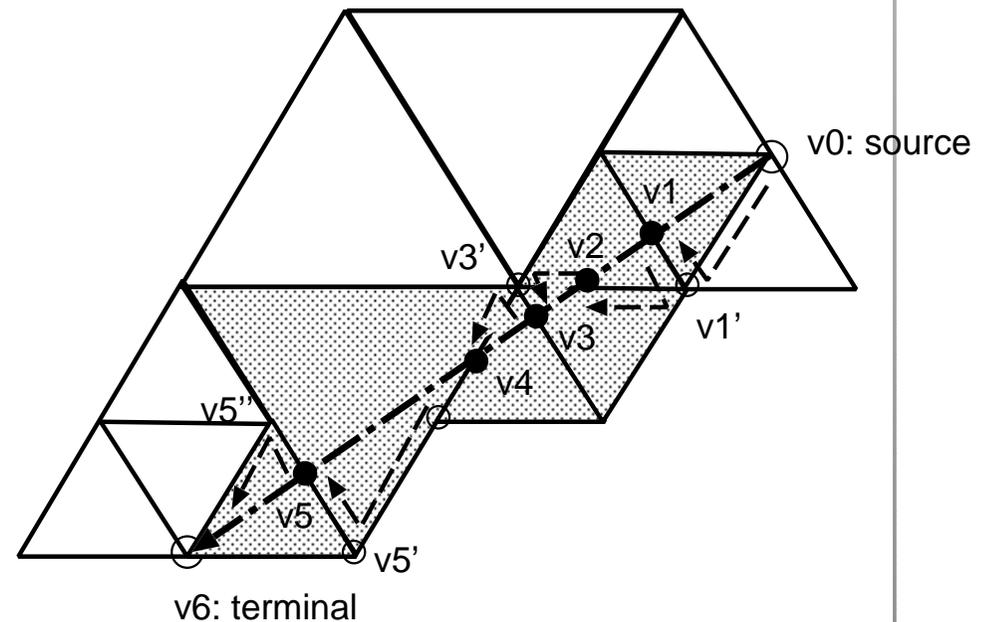
Y.Hayashi, Physica A 457 pp.255-269, 2016

# サイクル上の **MF** のリレーによる転送

巡回する **MF** の自律的移動(さまざまな速度や間隔)と  
ノードの仲介をリレーしてデータ転送



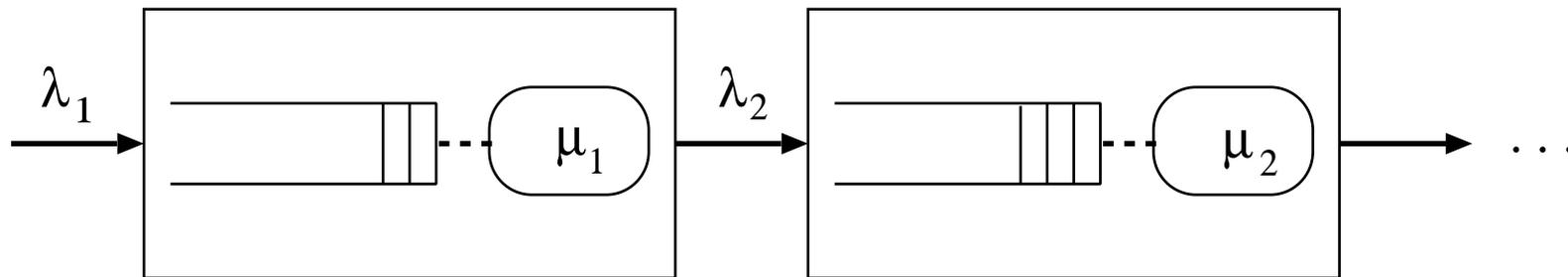
**MF** が移動する  
順サイクル



経路表不要な  
面ルーチング

# 直列型待ち行列理論の適用

M/M/1 キューの鎖では、出力 = 次の入力 はポアソン過程。よって、到着率  $\lambda_i$  (情報フロー量) とサービス率  $\mu_i$  (MFの周回頻度に相当) の辺要素キューの和で経路を表現。

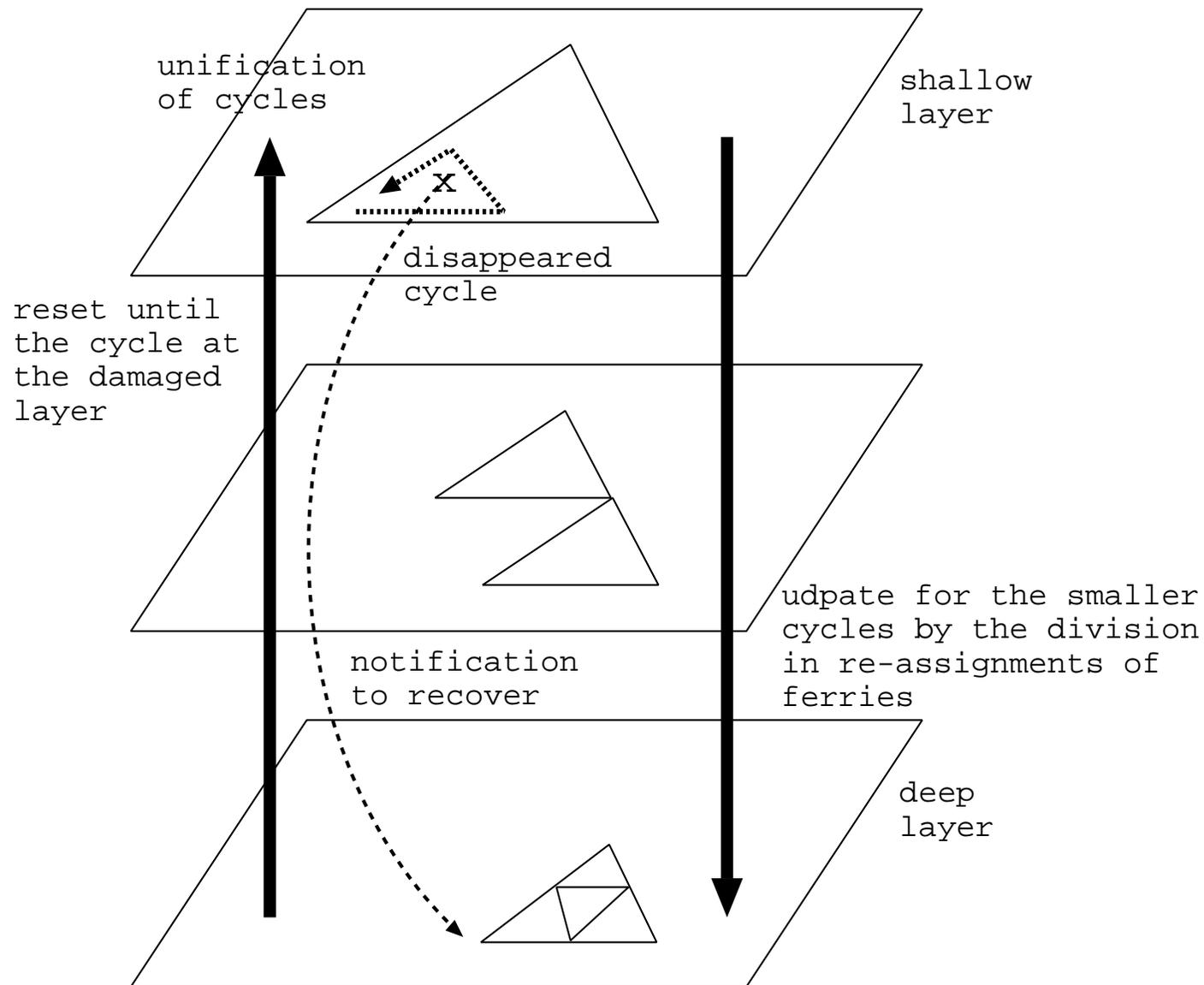


その経路の end-to-end の平均遅延時間:

$$\sum_i \frac{1}{\mu_i - \lambda_i}$$

N. Chee-Hock, and S. Boon-Hee, Queueing Modeling Fundamentals, John Wiley & Sons, 2008.

# 階層的な **MF** の統合と再配分 -自律適応-





- お待ちしています! -

北陸新幹線 開業!

# 北陸の名所

> 北陸の名所を見る

富山  
石川  
福井

Japanese Beauty Hokuriku  
～日本の美は、北陸にあり。～

福井で 美!美!美!	FUKUI 2014 福井県恐竜博物館	石川で 美!美!美!	ISHIKAWA 2014 和倉温泉・足湯	富山で 美!美!美!	TOYAMA 2014 南砺(南砺)海岸
---------------	------------------------	---------------	--------------------------	---------------	-------------------------

