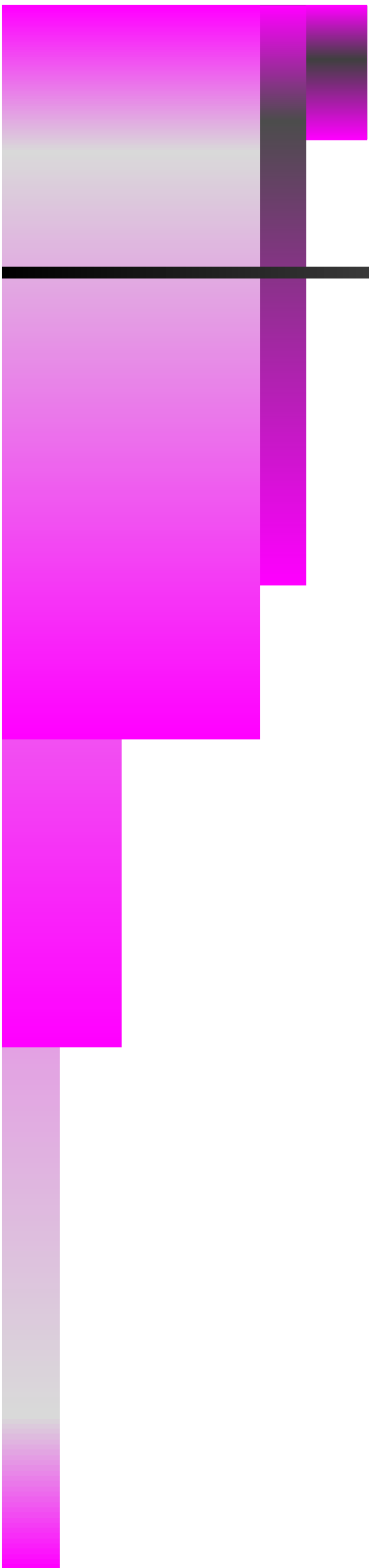




経済・技術インフラ・生物における ネットワークの成長原理

- 災害や悪意ある攻撃にも耐えうるネットワークの設計に向けて -

林 幸雄

北陸先端科学技術大学院大学

5月26日(水曜日) 12版 科学 (32)

「グラフ理論」で問題解決

インターネットの機能的なグラフ、感染症の蔓延、効率的な結核治療……「点と線」の組み合わせで解く「グラフ理論」が注目されている。この理論は、点と線の組み合わせで表現される「グラフ」の性質を数学の一分野、約三百年の歴史を持つ、コンピュータ計算を用いたため、最近になって多くの分野で成果を上げている。(一宮 昭)

ネット検索、感染症、経営

グラフ理論の始まりは、十七六百年とされる。多くの論議、方法を駆使し、数学の巨人・オイラーなど、ドイツのある町、川と中州にかかる七つの橋を渡って一週つづるという「七橋問題」がある。この問題を解決する過程で、グラフ理論の基礎が築かれた。その後、グラフ理論は、ネットワークの構造分析、感染症の蔓延、経営戦略の最適化などに応用されている。

図1 現実 グラフ
川と中州の地図

図2 現実 グラフ
リン・ホーム・ページ

図3 規則的 スモール・ワールド 不規則

サイエンス

水曜日は「サイエンス」

イ大教授は、日本と英語で、論議の組み立て方からして、三つの違いがある。一つは、研究者が国際的なネットワークに属している。二つは、英語圏の研究者が研究の中心にいる。三つは、英語圏の研究者が研究の中心にいる。

世界は狭い？
世界の共演関係分析すると、SWNは、初対面の人と共通の知人がいることを示す。つまり、世界は狭い。small world)と表現される。この現象の背後には、ネットワークの性質がある。

2004年

「グラフ理論」は、点と線の組み合わせで表現される「グラフ」の性質を数学の一分野、約三百年の歴史を持つ、コンピュータ計算を用いたため、最近になって多くの分野で成果を上げている。

2004 8/3(火) 25 経済教室

やさしい経済学

7 トポロジーが鍵

「小」的な脳細胞間の連結を解放、いづなり方々の結節点を持つ、睡眠時のランダムな小世界化によって脳全体の伝達特性を回復するための、たとえて言えば「放電効果」ではないかと考えている。生存に必要な「精神の新陳代謝」とも言える。

本稿の帰結の一つは、ネットワークの有効機能のために、結節点間の結びつき方、すなわち情報伝達の全体経路を定義づけるトポロジー(構造、形態)が重要ということだ。トポロジーとは、平たく言えば外部から力が加わり、

ネットワーク、つまり大多数の点の規則的につながっているが、一部のつながり方にランダム性を残した小世界ネットワークだということだ。前にみたように、グラフネットワークの「遠い友人」を大切に、バートのいう「構造的な満」に効果的に構築し、大いに付加価値を生み出すのも、やはり小世界のトポロジーを持つネットワークであろう。そして、ネットワークの

サーが他社の新車に乗り換えようとしても「顧客」なご顧客のつなぎ留めに、大幅な

コストリカの主な環境政策

立命館大学 学術公開講演会, 22 Nov. 2004 - p.2/3

読売新聞 5/26 夕刊, 日経新聞 8/3

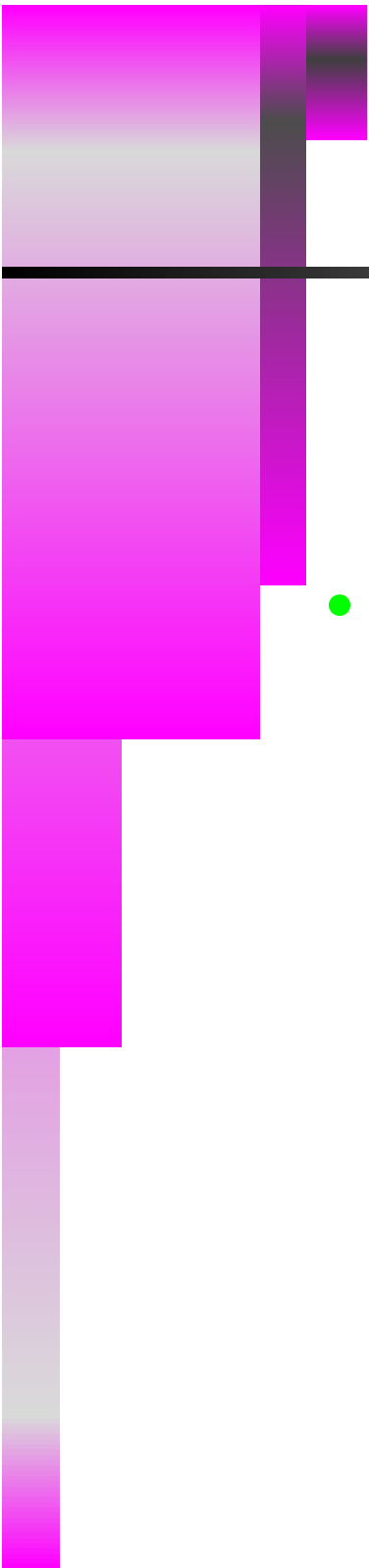
日々の生活や経済活動, 物流や通信手段, 我々自身の体内メカニズムに至るまで, どれも複雑なネットワークの上で成り立っている.

例えば,

- 人や企業間の関係 : ロコミ効果, 連鎖倒産の阻止
- 自律分散システム : インターネット, 移動体通信
- バイオ技術 : 分子モータ, 遺伝子治療薬

全く異なる対象や構成要素であるが...

⇒ 新発見はまさに世紀末に起こった!!



It's a small world !

人のつながりのネットワークを考えると

- 意外に世間は狭い！

人のつながりのネットワークを考えると

- 意外に世間は狭い！
- 私 ⇒ 本多教授（同学科）⇒ 慶伊 前学長
⇒ 森 元文部大臣 ⇒ 小泉 総理

人のつながりのネットワークを考えると

- 意外に世間は狭い！
- 私 ⇒ 本多教授（同学科）⇒ 慶伊 前学長
⇒ 森 元文部大臣 ⇒ 小泉 総理
- 私 ⇒ 下原 **ATR** ネット情報学研 所長
⇒ 石田教授（京大 社会情報）⇒ 仲谷教授

人のつながりのネットワークを考えると

- 意外に世間は狭い！
- 私 ⇒ 本多教授（同学科）⇒ 慶伊 前学長
⇒ 森 元文部大臣 ⇒ 小泉 総理
- 私 ⇒ 下原 **ATR** ネット情報学研 所長
⇒ 石田教授（京大 社会情報）⇒ 仲谷教授

何か法則が存在するのでは？

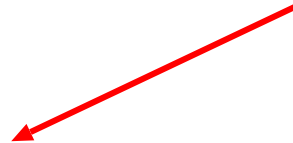
Erdős Number



Hayashi



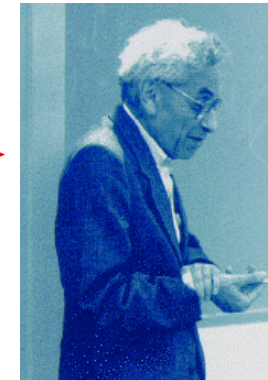
Prof. Ibaraki



Prof. Yamashita



Prof. Pavol



Prof. Erdos

共著者の連鎖において、優れた研究者は数人でエルデシュ
にたどり着く？

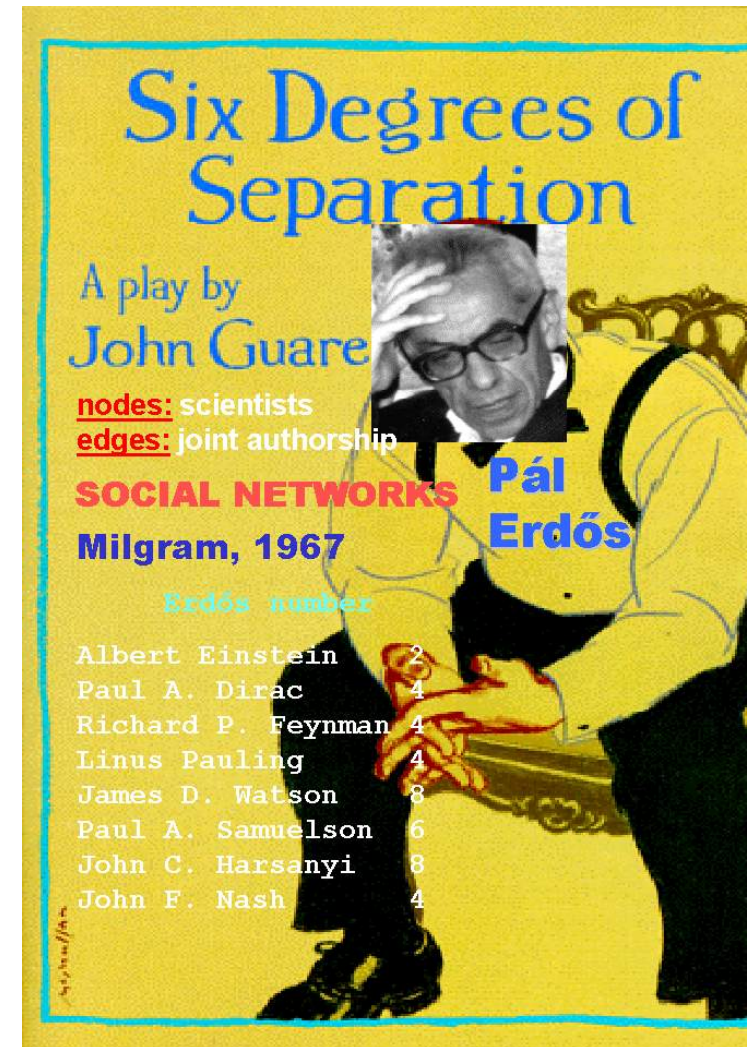
Six Degrees of Separation

「小さな世界」

- 6 人の知人, S.Milgram, Physiology Today 2, 1967.
- WWW は 19 クリック
 $d = 0.35 + 2 \log_{10} N$,
R.Albert et al., Nature 401, 1999.

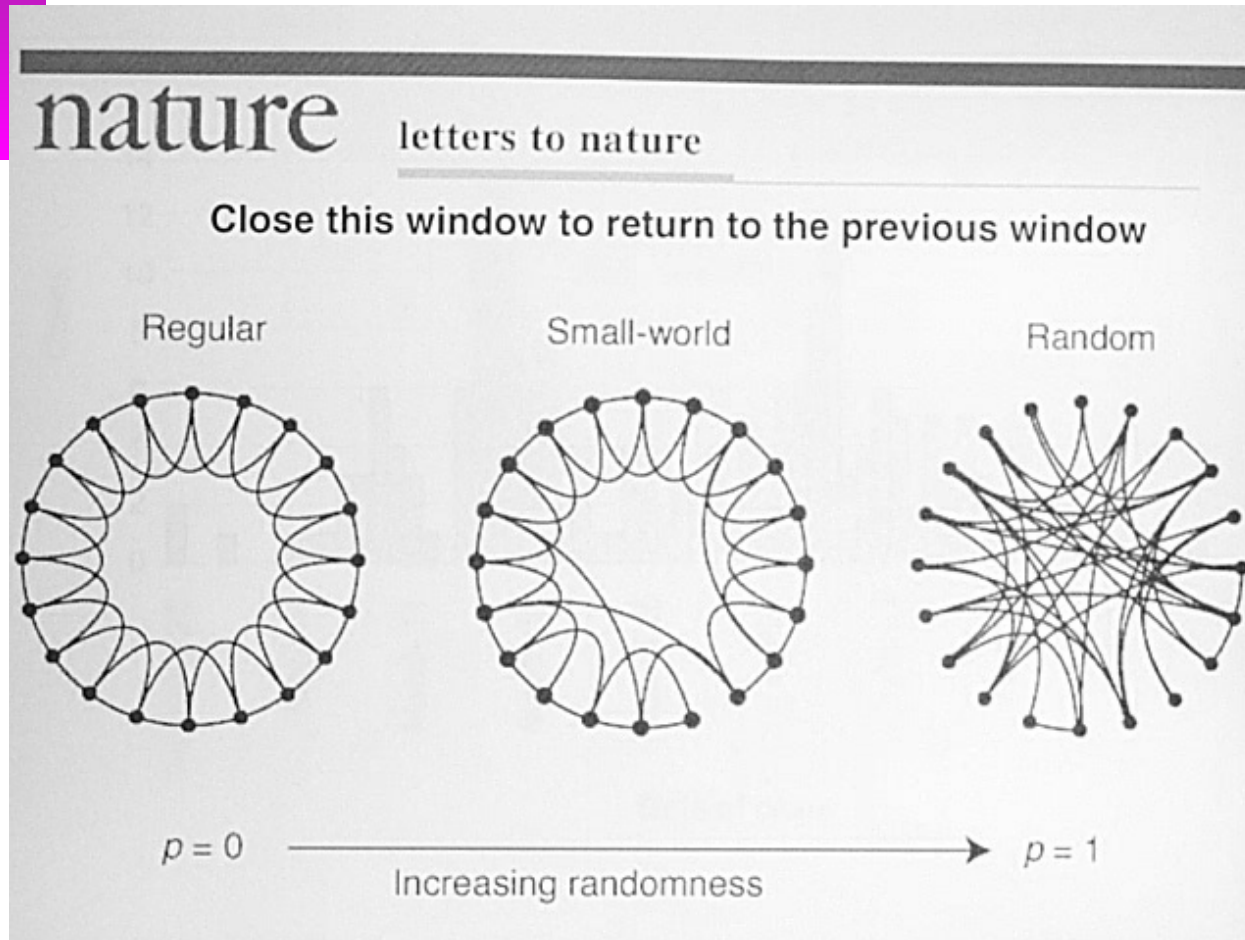
社会関係, 人工物, 自然界など,
全く異なる対象や要素のネットワークに共通の性質がある!

むしろ例外: 階層的組織, 碁盤目の都市, 物質の結晶格子など



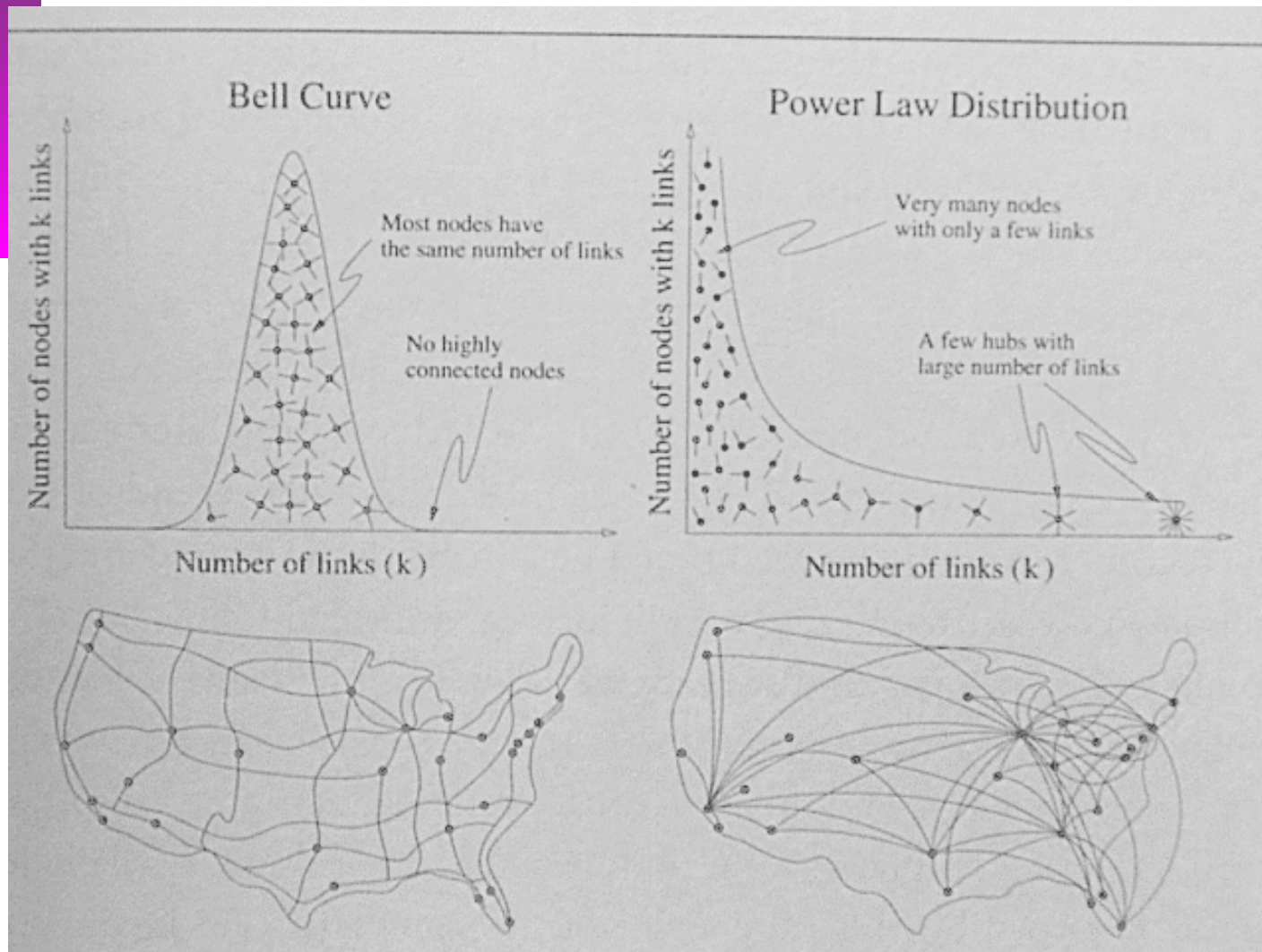
Small World Network

現実は一規則的でも一様ランダムでもない中間的特性!



D.J. Watts and S.H. Strogatz, Nature, 393, 1998

Scale-Free Network: $P(k) \sim k^{-\gamma}$



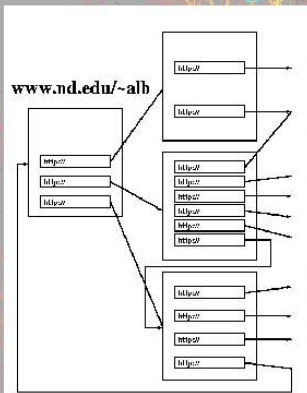
In A.L. Barabási, LINKED, Perseus Pub., 2002

⇒ ランダムグラフ理論では説明不可

Technological Nets (Infra.)

World Wide Web

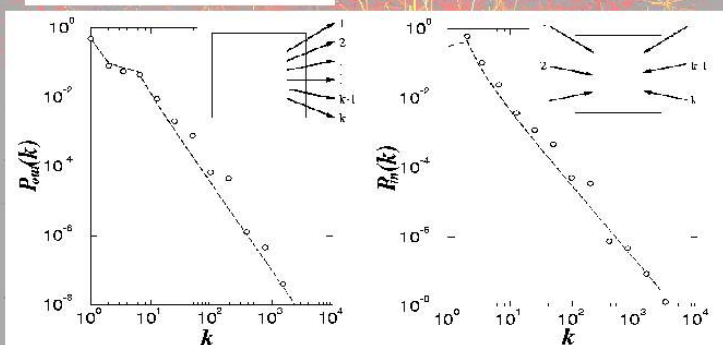
R. Albert, H. Jeong, A.-L. Barabási, Nature (in press)



nodes: WWW documents
edges: URL links

800 million documents
(S. Lawrence, 1999)

ROBOT: adds to its database all URL's found in a document and follows them recursively



$$P_{\text{out}}(k) \sim k^{-\gamma_{\text{out}}} \quad \gamma_{\text{out}} = 2.45 \quad P_{\text{in}}(k) \sim k^{-\gamma_{\text{in}}} \quad \gamma_{\text{in}} = 2.1$$

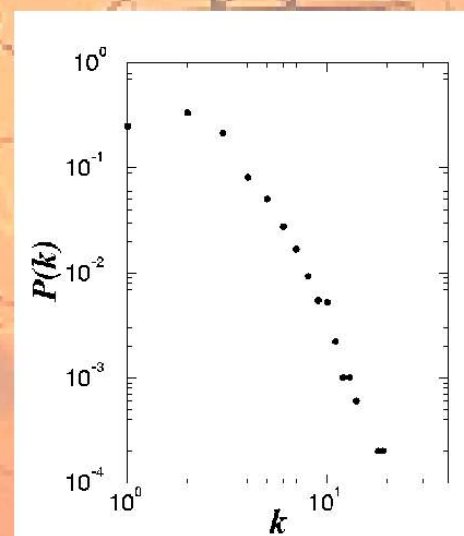
(see also Huberman *et. al.*, Kleinberg *et. al.*, Faloutsos *et. al.*)

DIAMETER OF THE WWW : 19 clicks...

ELECTRICAL POWERGRID

nodes: generators, transformers

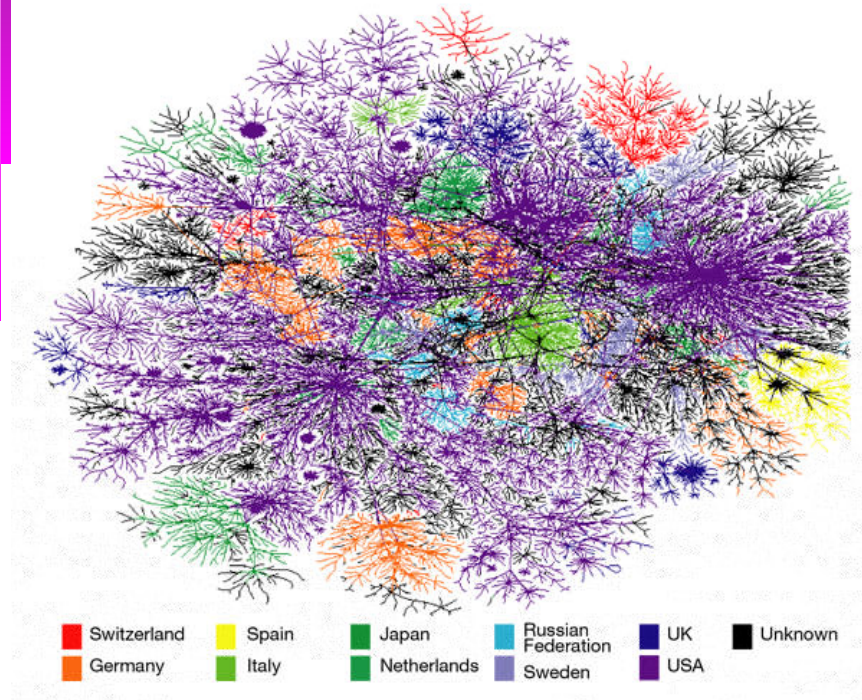
edges: transmission lines



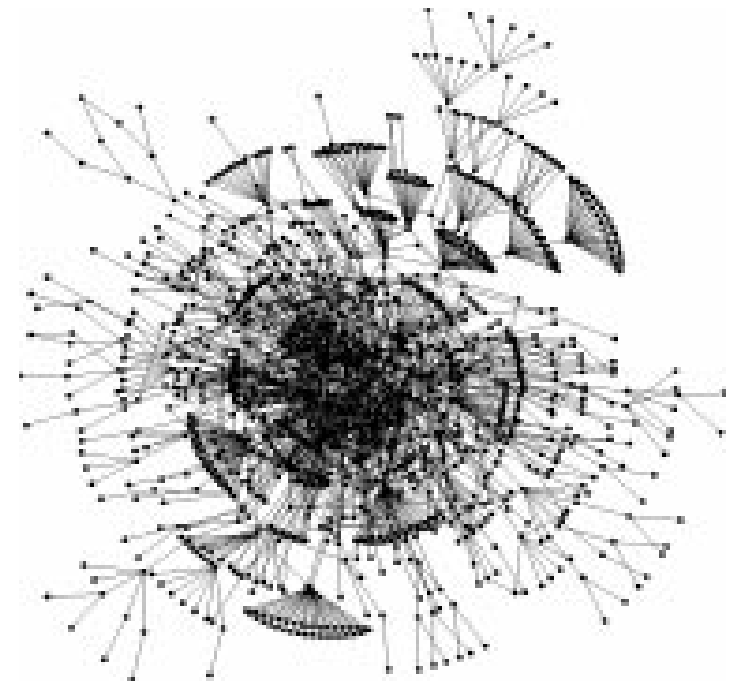
The electrical power grid of the western United States

$$\gamma \cong 4$$

<http://www.nd.edu/~networks/ppt/SanDiego.ppt/>

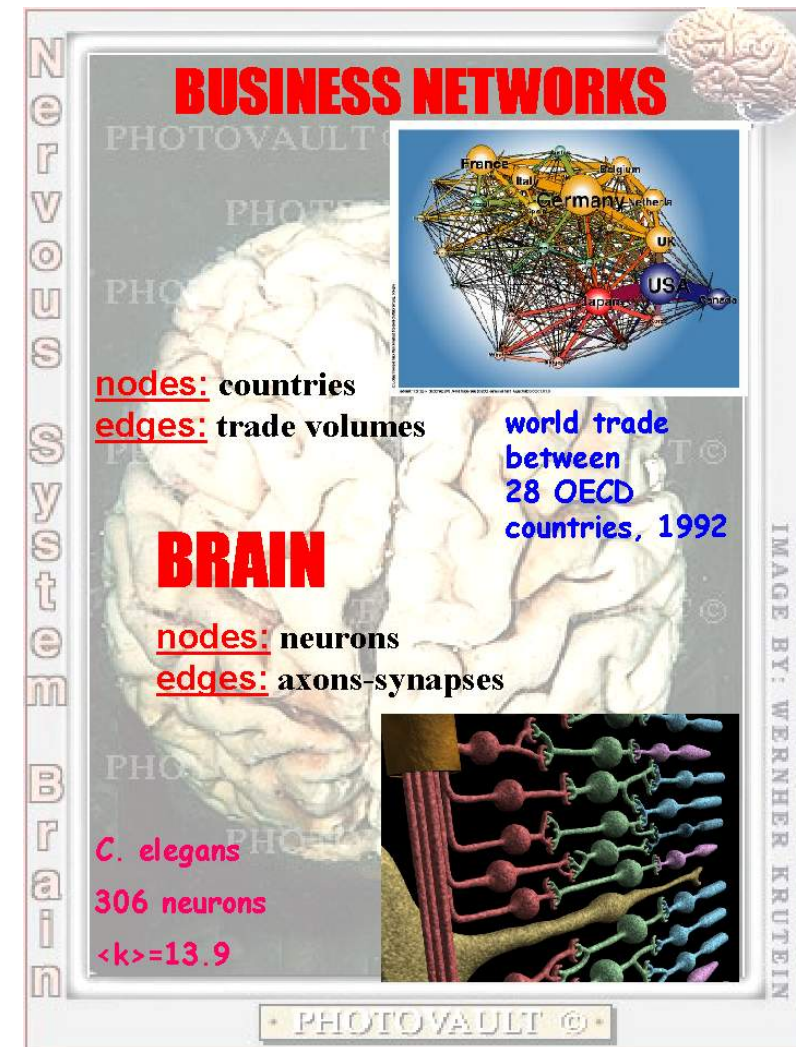
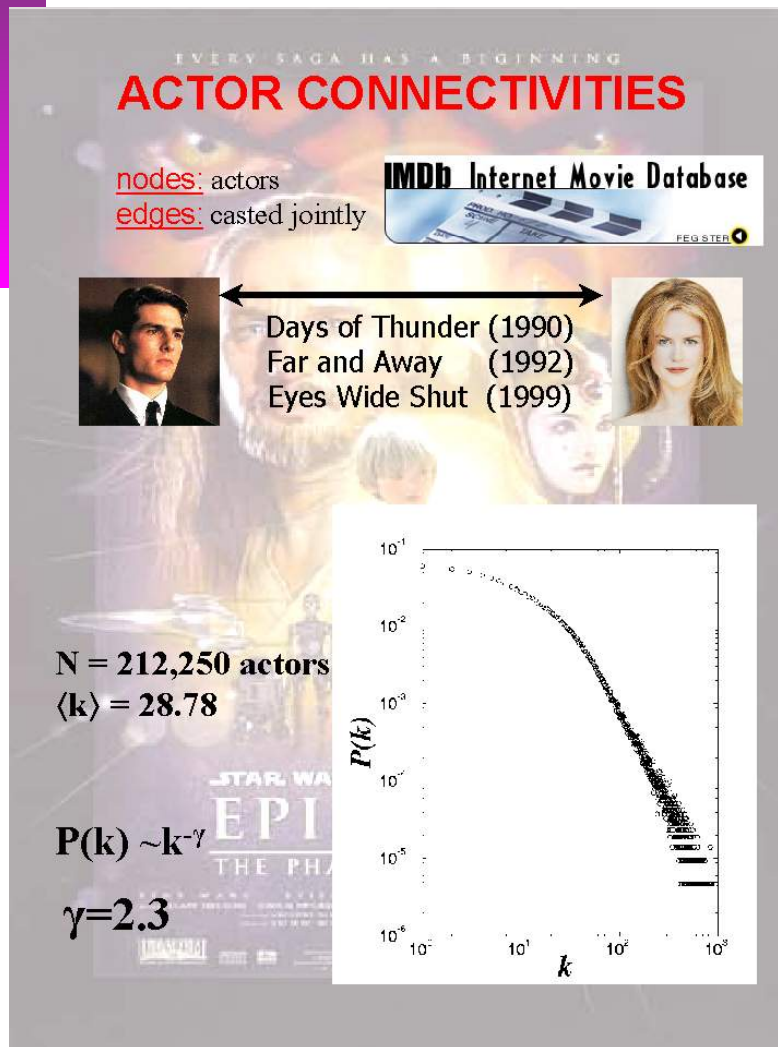


Internet connectivity with
selected backbone ISPs
Nature 406 (CAIDA) 2000



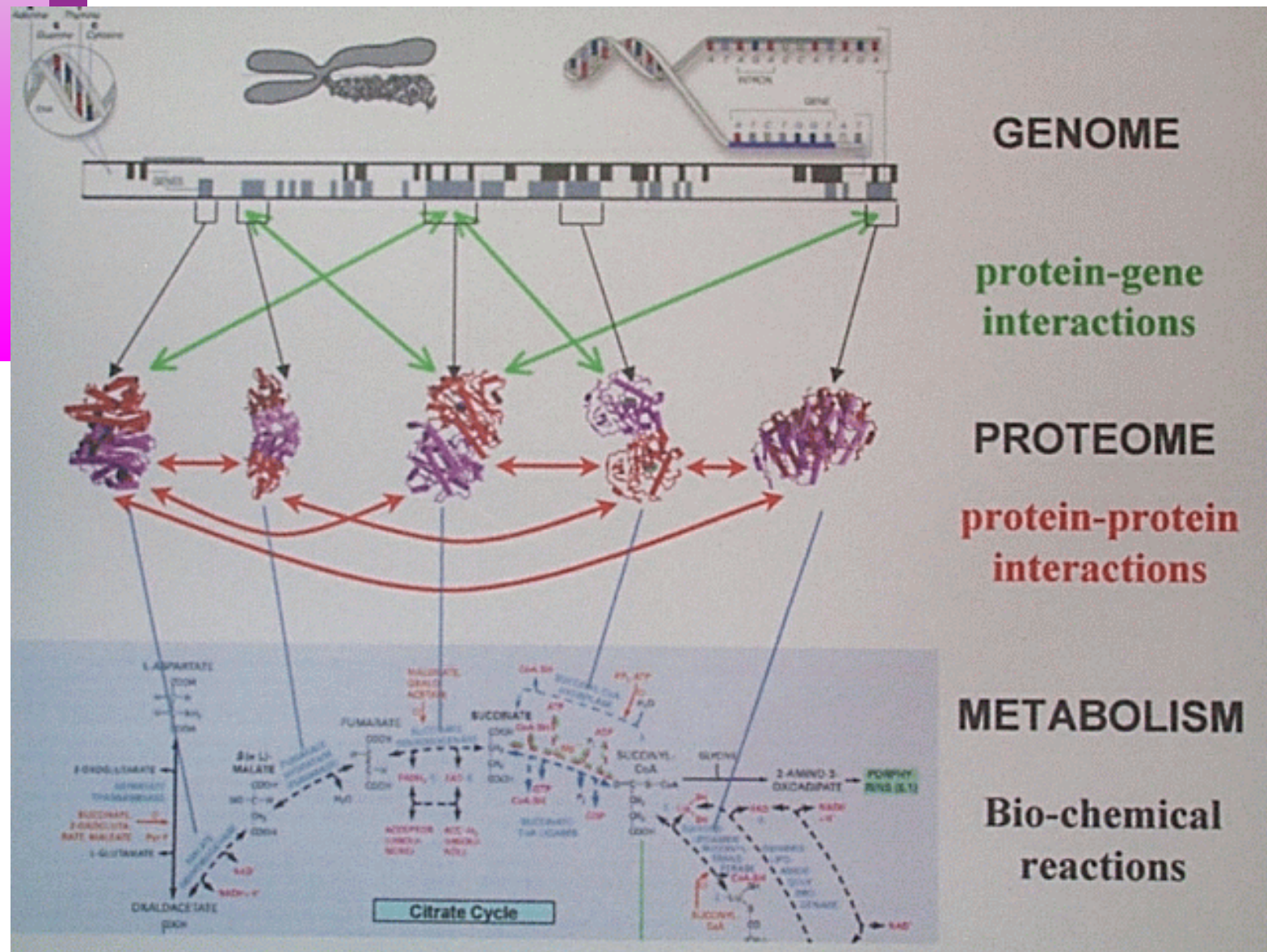
Java Class Components
(JDK1.2)
Europhysics Letters 2002

Social Nets

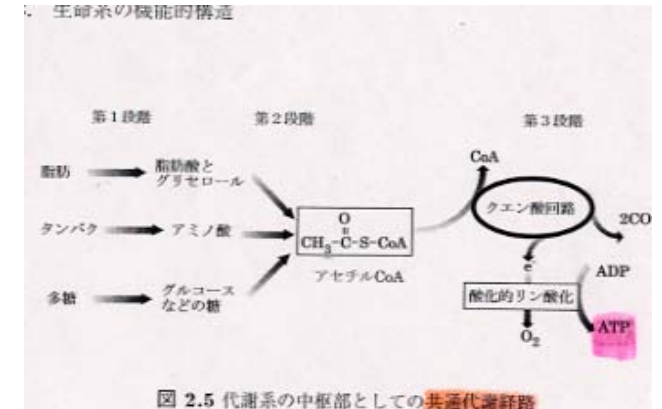
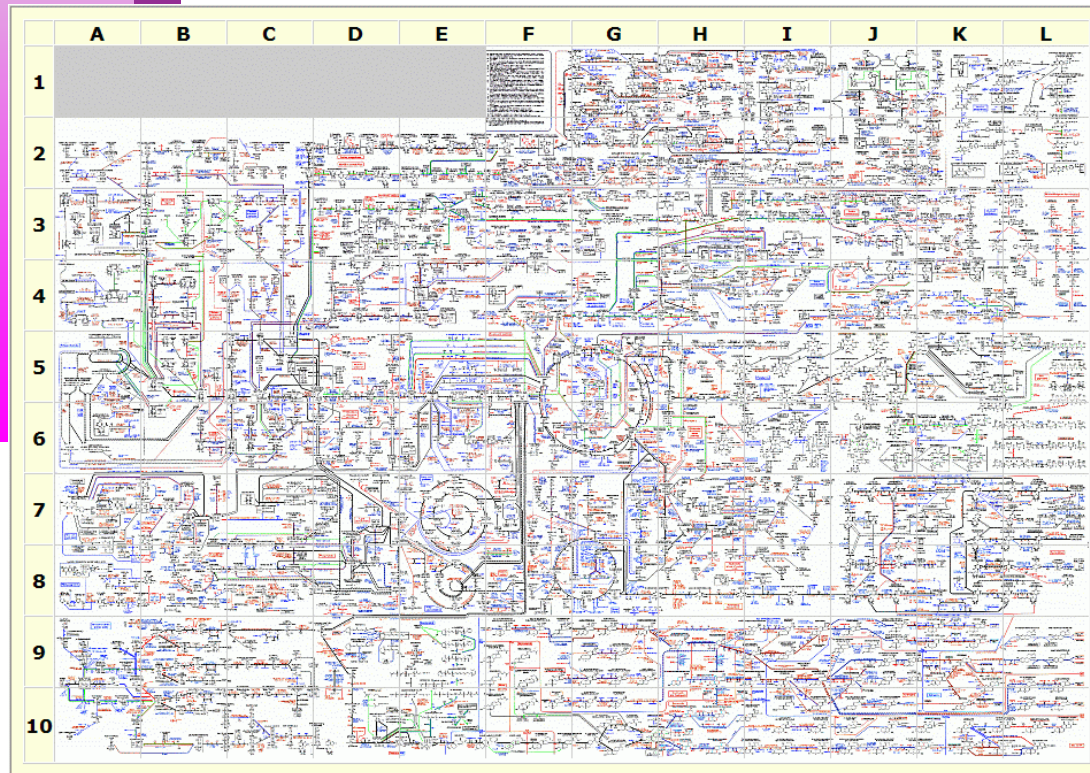


<http://www.nd.edu/~networks/ppt/SanDiego.ppt/>

Bio-Chemical Nets



Metabolic Pathways

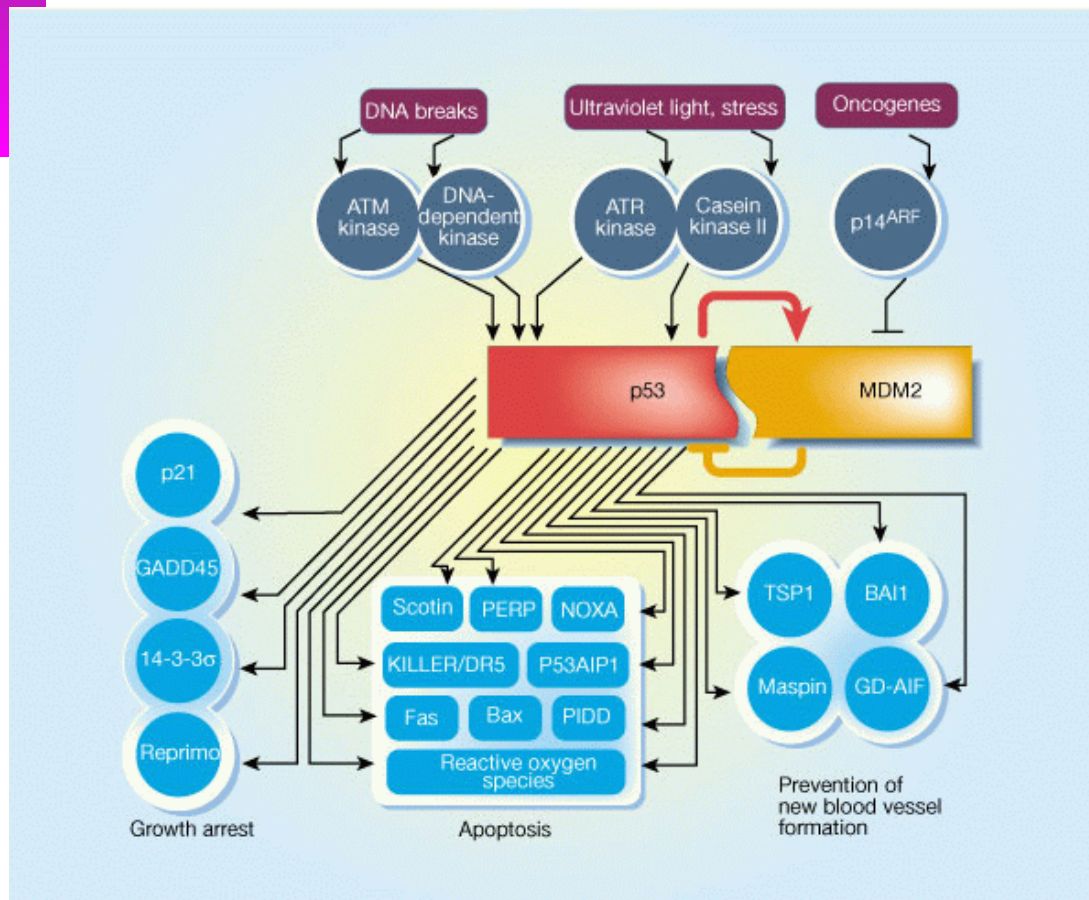


田中著, 生命と複雑系,
培風館, 2002

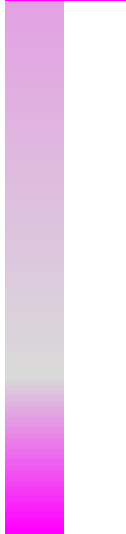
ATP(アデノシン三リン酸)がエネルギー代謝反応系のハブ

Surfing the p53 Network

癌発病に深く関与する p53 ハブ遺伝子 ⇒ 新薬の開発



K.W. Kohn, Mol.Bio.Cell 10, 1999 & B. Vogelstein et al.,
Nature 408, 2000



1978.)

Universal Evolution Mechanisms

現実の複雑なネットワークに共通する SF 構造

インフラ技術: 航空路線, インターネット, WWW, 電力網, 電子回路網

社会関係: 企業間取引, 知人, 映画の共演, 論文引用, 性的接触, 電子メール送受信数, 言語

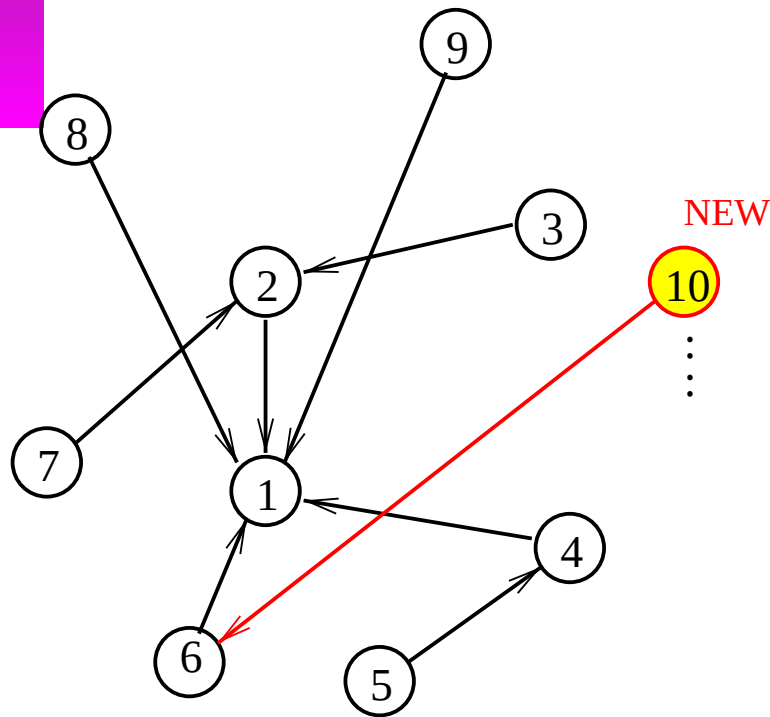
生物系: 神経回路網, 遺伝子や代謝反応, 食物連鎖

べき乗則 $P(k) \sim k^{-\gamma}$, $2 \leq \gamma \leq 3$ は現実のネットワークに普遍的に存在し, その生成原理は単純で自然な成長と優先的結合による.

A.L. Barabási et al., Physica A, 272, 1999

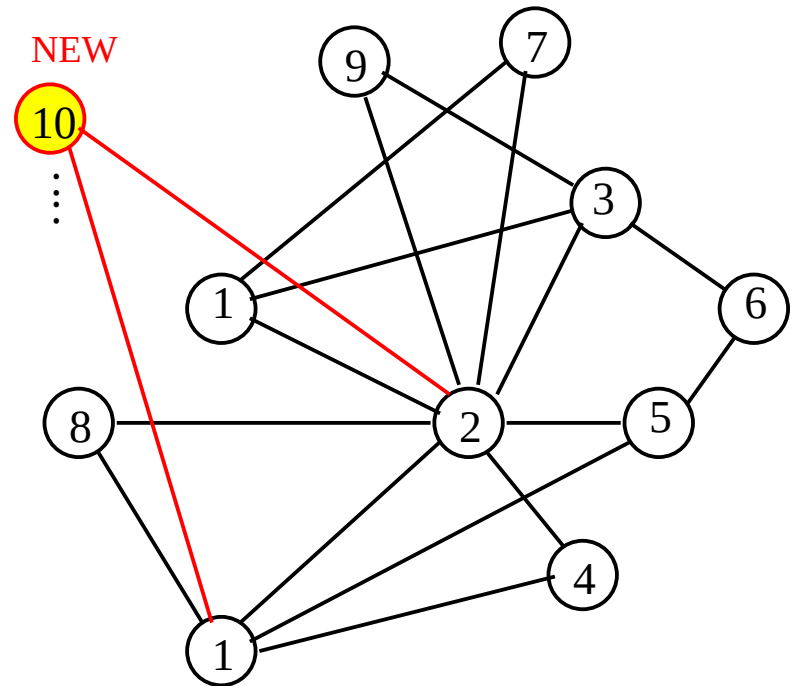
GN and BA Models

$$P(k) \sim k^{-\gamma}, \gamma \sim 3, m = 1$$



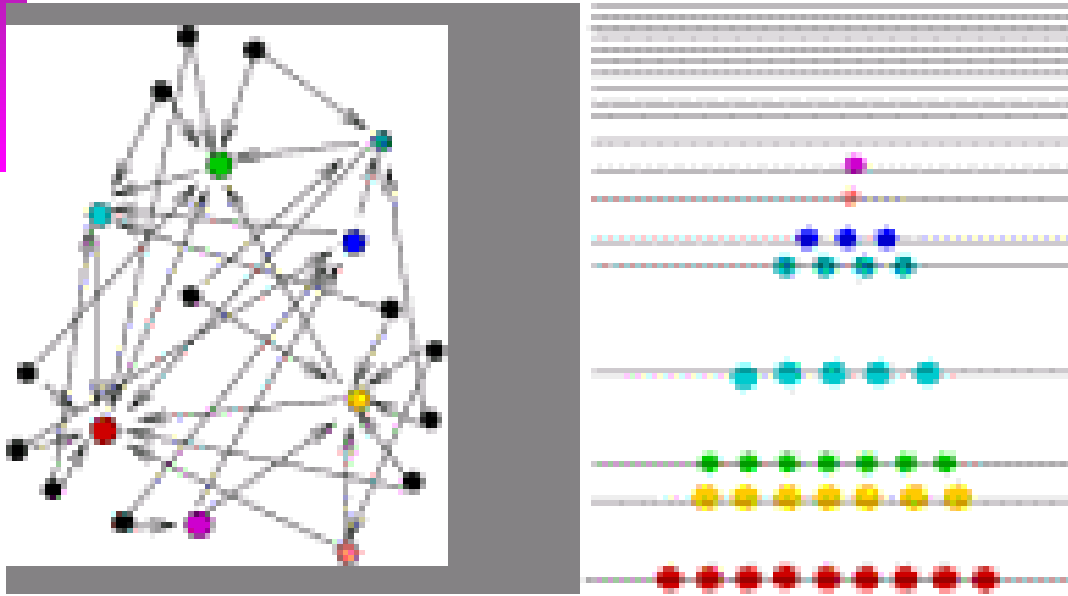
Krapivsky-Redner's GN model

$$\gamma = 3, m = 2$$



BA model

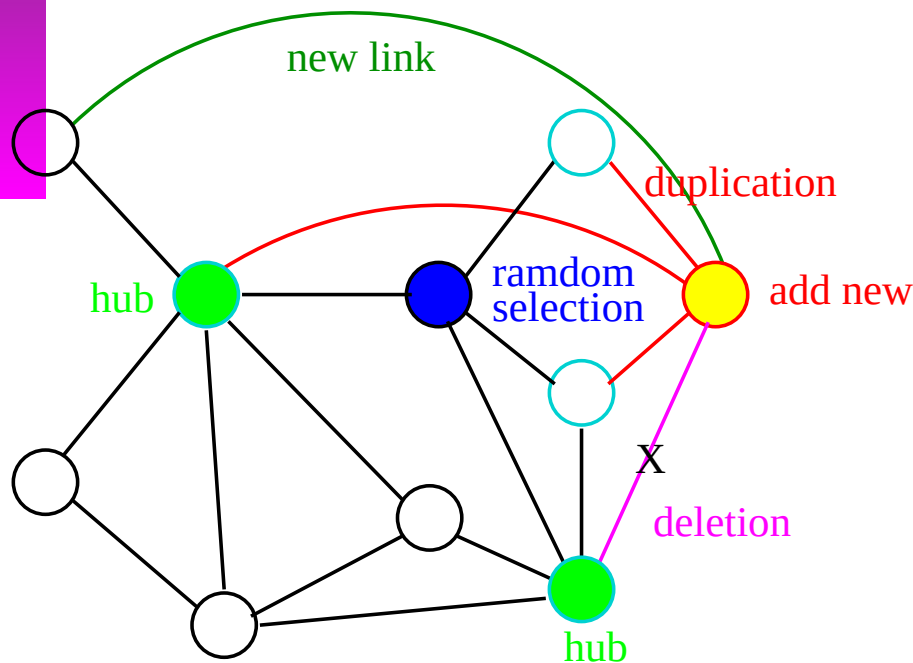
⇒ age-effect (S.N. Dorogovtsev et al., PRL 85, 2000),
rewire(A. Albert, PRL 85, 2000), fitness(G. Bianconi, PRL
86, 2001)



G. Bianconi et al., PRL 86, 2001.

Bose-Einstein 凝縮と同様なメカニズムによって, リンクの独占が起こることを示唆 (MS の市場独占に対応)

Duplication Model



ランダムに選ばれた頂点に隣接するハブにはリンク複写のチャンス大!

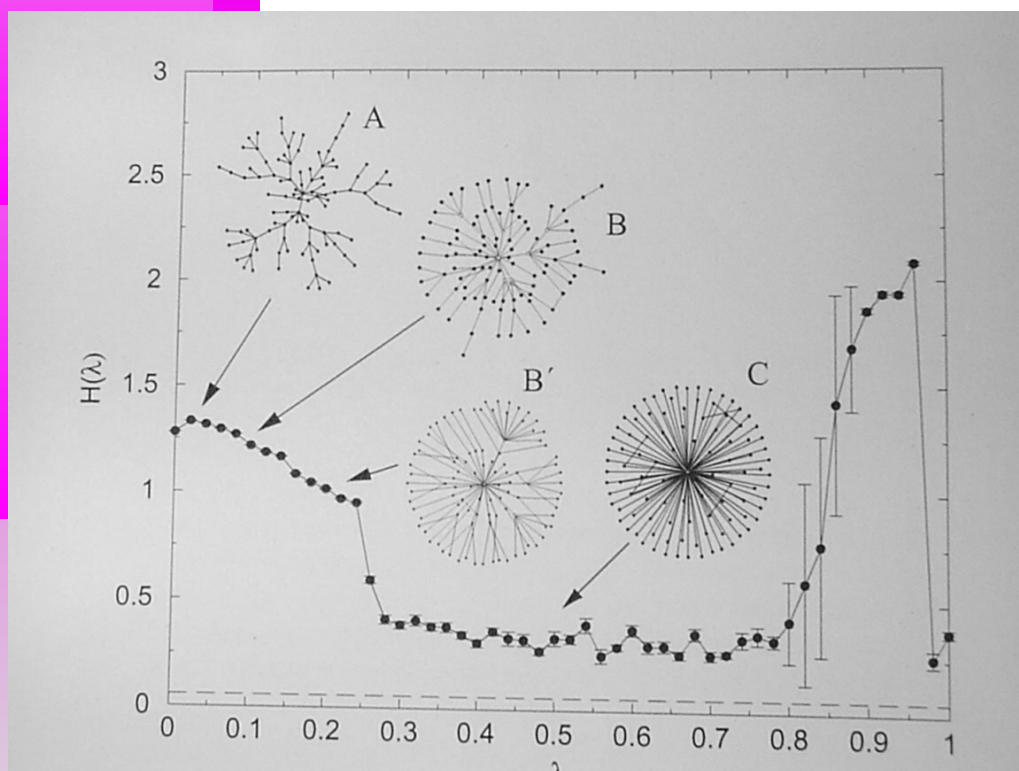
⇒ 生物は, 選択不要のより単純な機構で, 優先的結合を実現!

R.V. Solé et al., SantaFe Inst. Working Paper, 01-08-041, 2001

Optimal Topology

経済性：リンク数 $\leftarrow 0 < \lambda < 1 \rightarrow$ 通信効率：距離

Random (tree) - Pref. (SF) - Forced (star, clique)



$$\min E(\lambda) = \lambda d + (1 - \lambda)\rho,$$

$$\text{距離 } d \stackrel{\text{def}}{=} \frac{\sum_{i < j} D_{ij}}{nC_2} / D_{max},$$

$$\text{リンク数 } \rho \stackrel{\text{def}}{=} \frac{\sum_{i < j} a_{ij}}{nC_2},$$

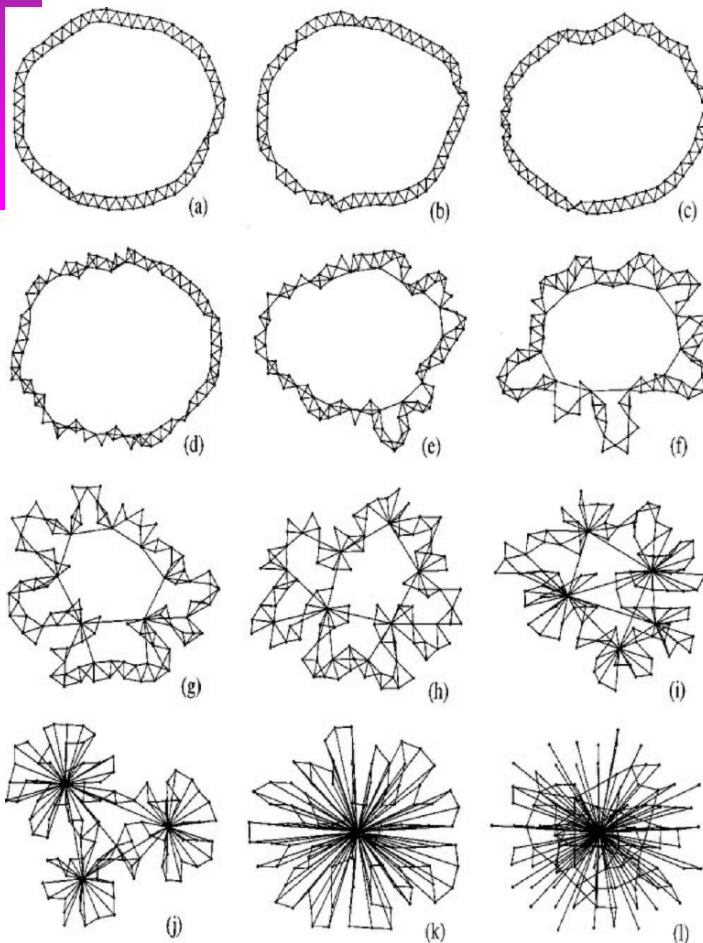
次数 k の頂点頻度 p_k のエントロピーで評価

$$H \stackrel{\text{def}}{=} - \sum_{k=1}^{n-1} p_k \log p_k$$

R.F. i Cancho and R.V. Solé, SantaFe Inst. Working Paper

01-11-068, 2001

Hub Evolution



最短パスのリンク数 L と頂点間距離 W に関して

$\min E = \lambda L + (1 - \lambda)W$,
を Metropolis の SA 法で最適化

距離重視 $\lambda \approx 0$ からリンク数重視 $\lambda \approx 1$ にかけて, (a) regular
→ (g)~(j) **SF** → (l) random

⇒ **SF** は経済性と効率を両立する最適構造!

N. Mathias and V. Gopal, Phy. Rev. E 63, 2001

Robust and Vulnerable Connectivity

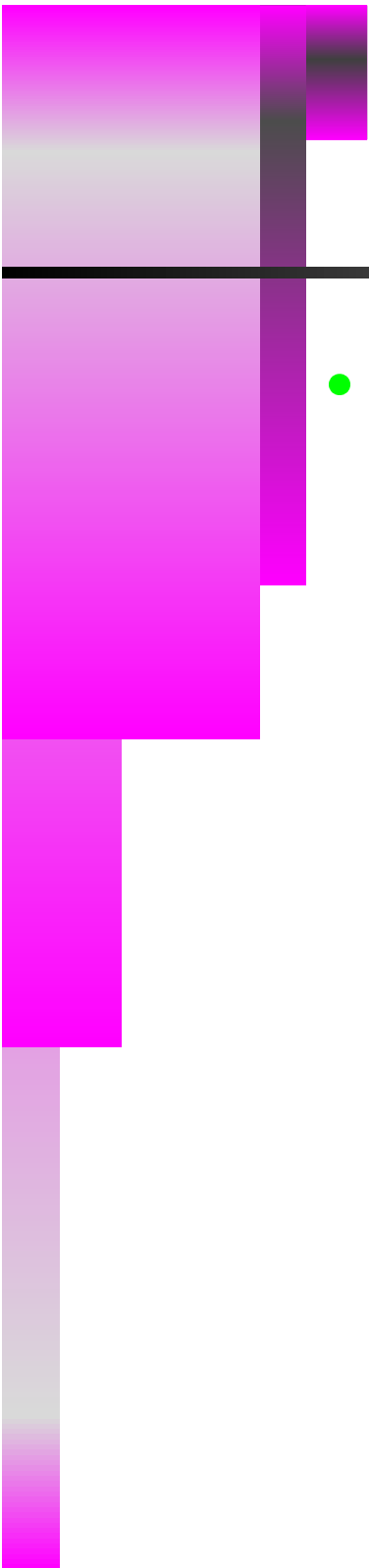
SF 構造の性質

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

⇒ 逆に、極度な分断性は、ウィルス拡散の防止には好都合!





Our Research Activities

- SF ネットは平均辺数 5 本で蔓延し, 規模によらない伝搬速度 (2001)

Our Research Activities

- SF ネットは平均辺数 5 本で蔓延し, 規模によらない伝搬速度 (2001)
- SF ネットは「小さな世界」の特性を満たす災害時などの連結性による分散電力供給の可能性 (2002)

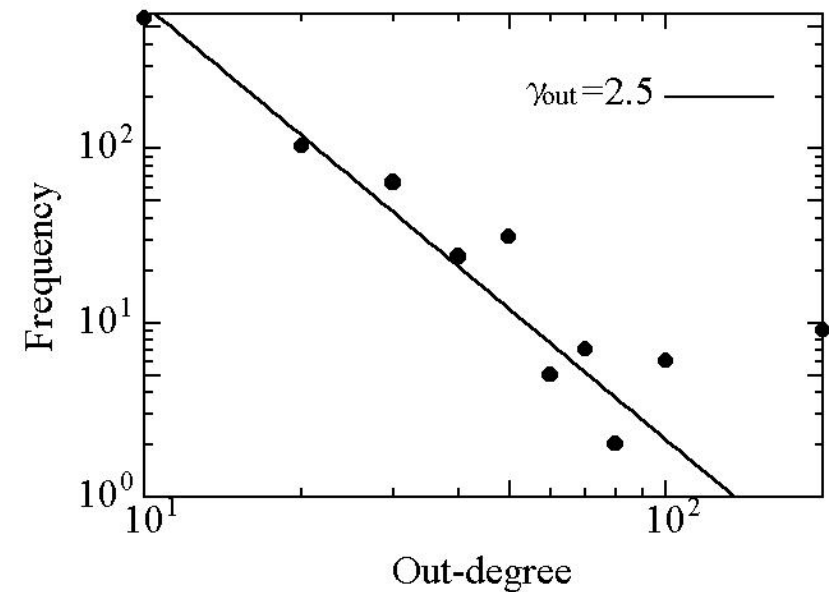
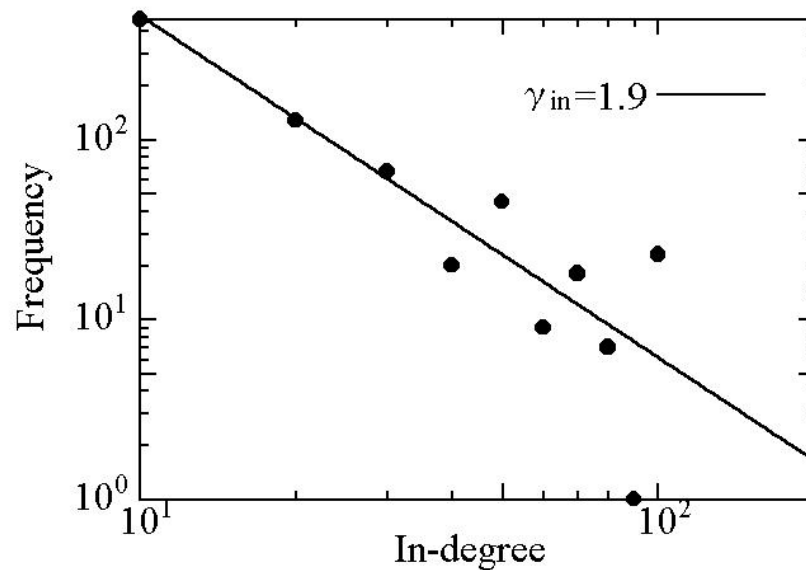
Our Research Activities

- SF ネットは平均辺数 5 本で蔓延し, 規模によらない伝搬速度 (2001)
- SF ネットは「小さな世界」の特性を満たす災害時などの連結性による分散電力供給の可能性 (2002)
- ウィルスの再流行現象と効果的なハブの免疫化確率論的モデル (2002), 決定論的モデル (2003)
パケット輸送に影響するトポロジ特性 (2003)

Our Research Activities

- SF ネットは平均辺数 5 本で蔓延し, 規模によらない伝搬速度 (2001)
- SF ネットは「小さな世界」の特性を満たす災害時などの連結性による分散電力供給の可能性 (2002)
- ウィルスの再流行現象と効果的なハブの免疫化確率論的モデル (2002), 決定論的モデル (2003)
パケット輸送に影響するトポロジ特性 (2003)
- 社会システムや生物系の結合傾向に対するウィルス伝搬の特性分析 (2004)
渋滞やカスケード故障の防止策 (2004)

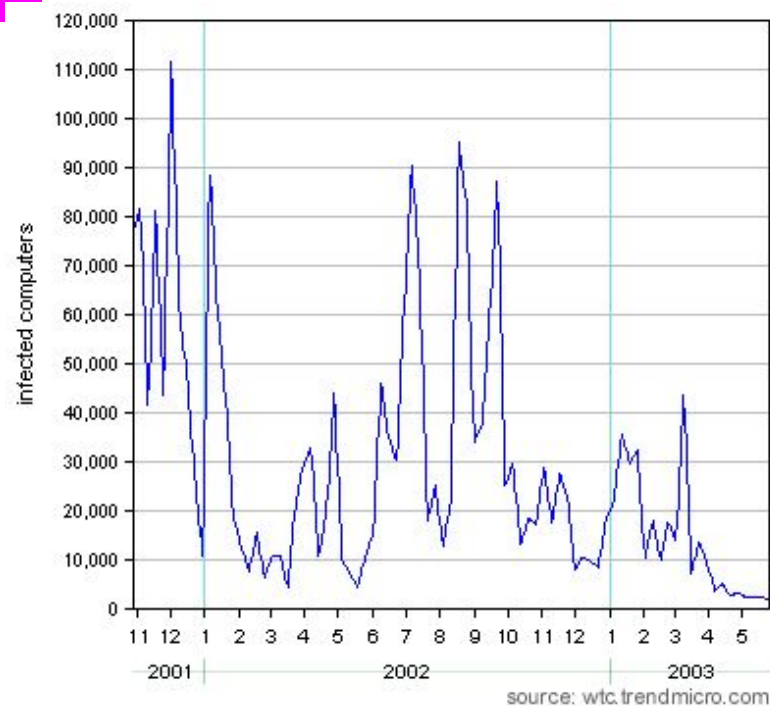
電子メールの送受信関係は **SF** ネットワーク
⇒ 従来の格子上あるいは一様ランダムな接触ではない!



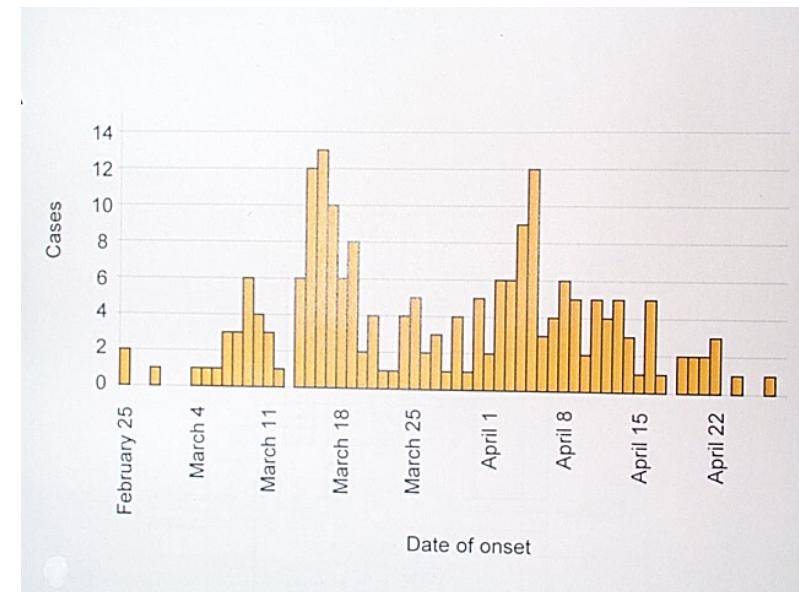
World Internet Projects 日本調査より (H12 10-11, 2555 人)

Epidemic Spreading

典型的に観測される再流行現象

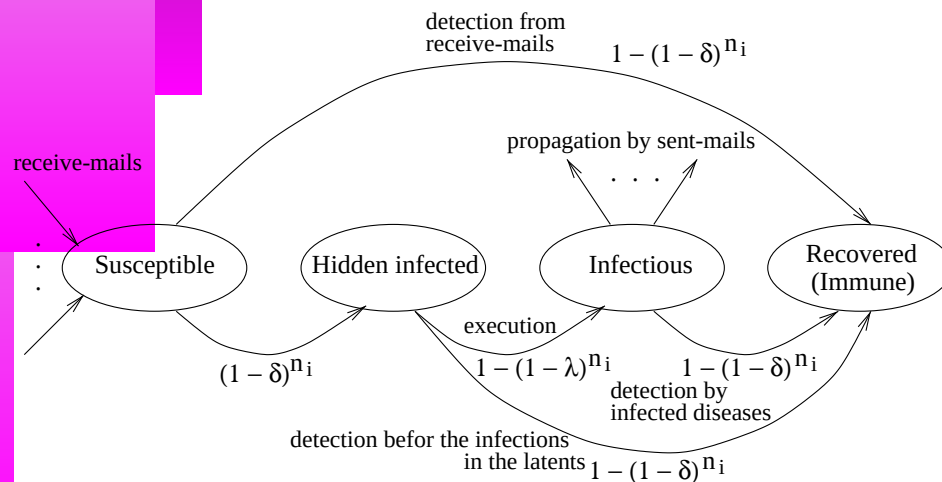


computer virus NIMDA



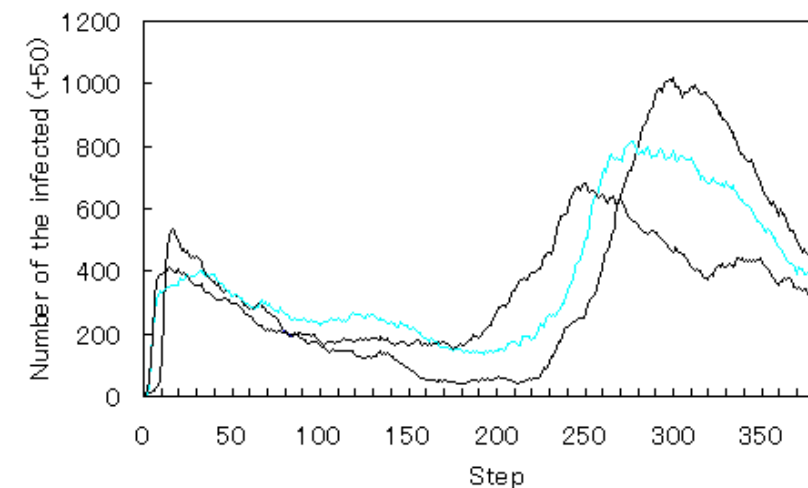
SARS in Singapore,
Scienceexpress May 23,
2003

Stochastic Model



確率的な SHIR 状態遷移を,
電子メール送受信の SF ネット上でシミュレート

再流行現象



⇒ ランダムよりもハブの
免疫化が有効

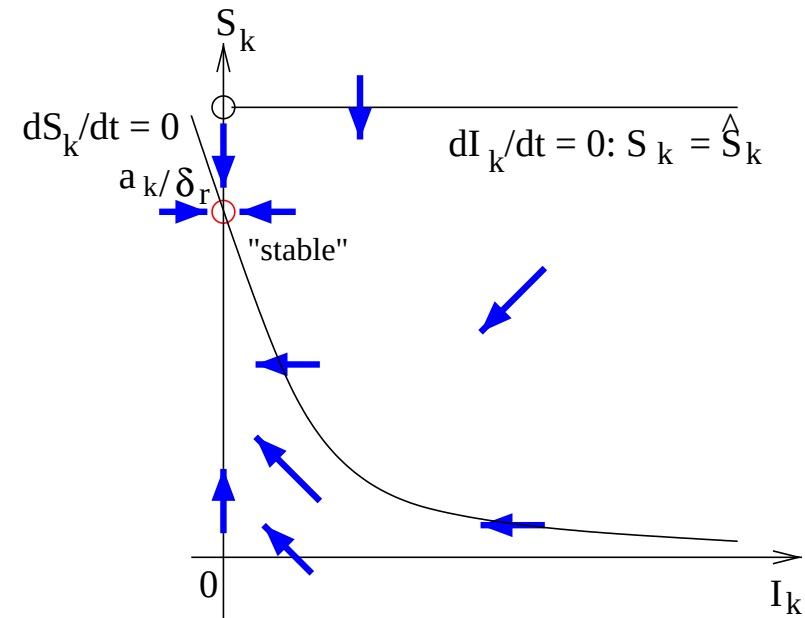
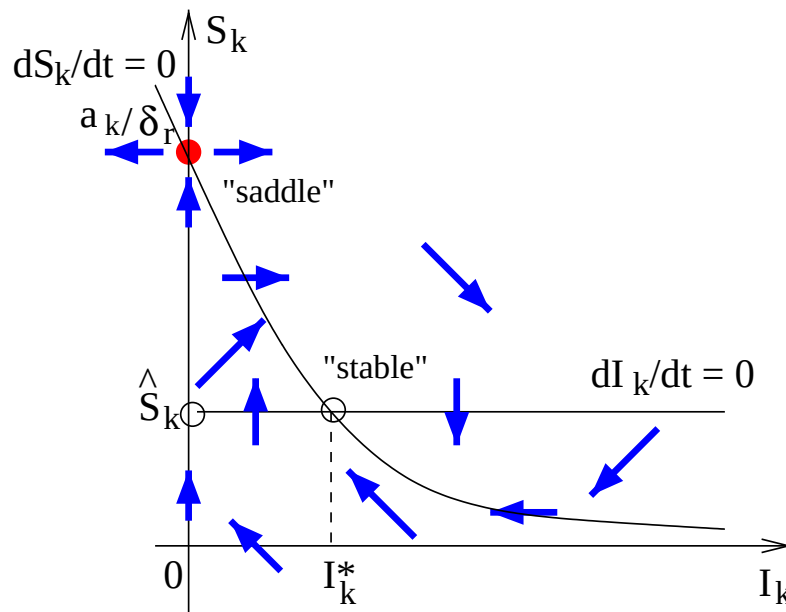
林, 箕浦, 松久保, 情処論 Vol.44, SIG(TOM9), 2003.

Condition of Extinction

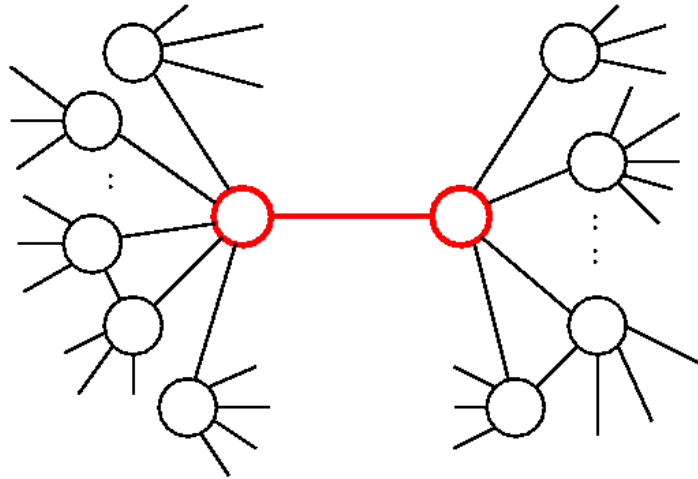
次数 k ごとの未感染数 S_k , 感染数 I_k ,

$$\frac{dS_k}{dt} = -\delta_r S_k - bk S_k \Theta + a_k, \quad \frac{dI_k}{dt} = -(\delta_0 + \delta_r) I_k + bk S_k \Theta,$$

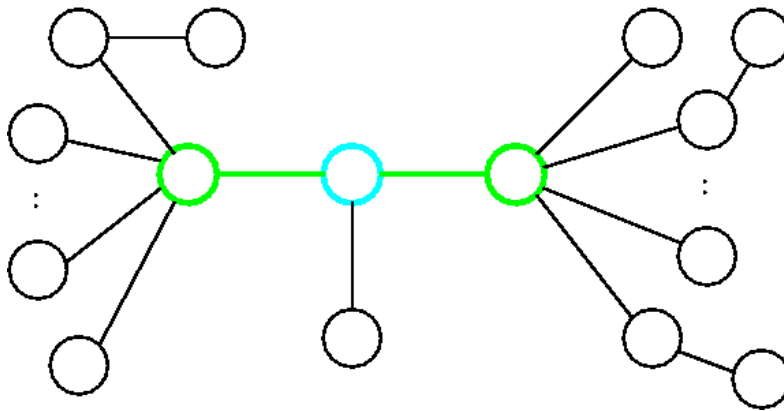
免疫率 δ_r , 成長度 $a_k = Ak^{-\nu}$, $\Theta(t) \stackrel{\text{def}}{=} \sum_k \frac{kP(k)}{\langle k \rangle} I_k(t)$.



Connectivity Correlations



Assortative 結合 ハブ同士
など, 同程度の次数
ノードが結合しがちな
傾向
社会システム



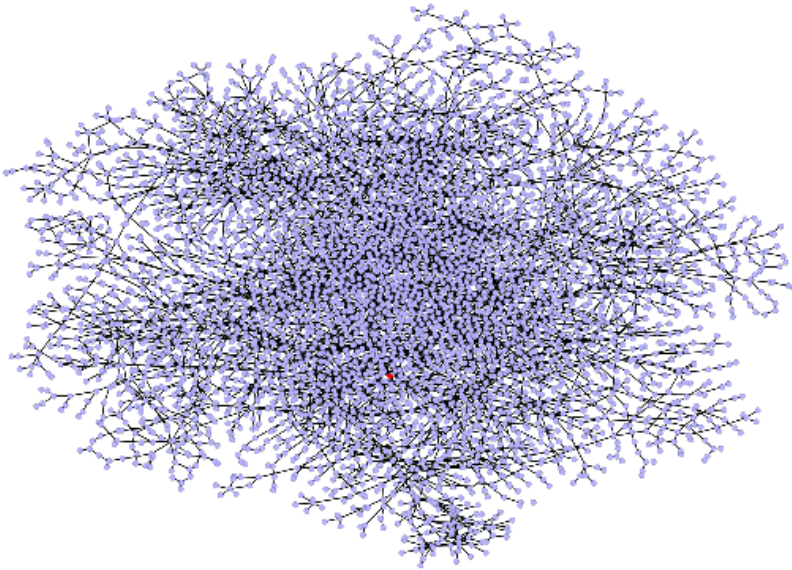
Disassortative 結合 ハブと
低次数ノードなど, 次
数が異なるノードが結
合しがちな傾向
技術・生物システム

⇒ 結合傾向に依存した伝搬特性, それぞれの長短所を!

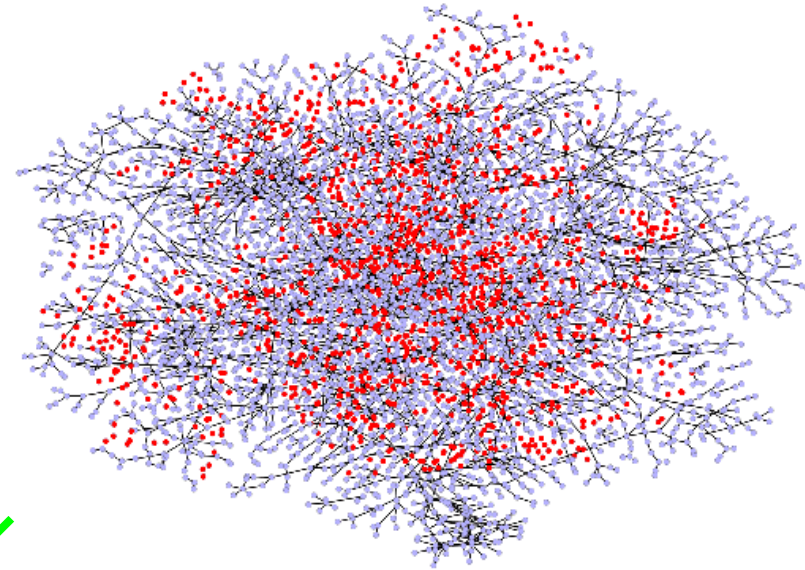
M.E.J. Newman, PRL 89, 2002 & PRE 67, 2003

Cascade Failure

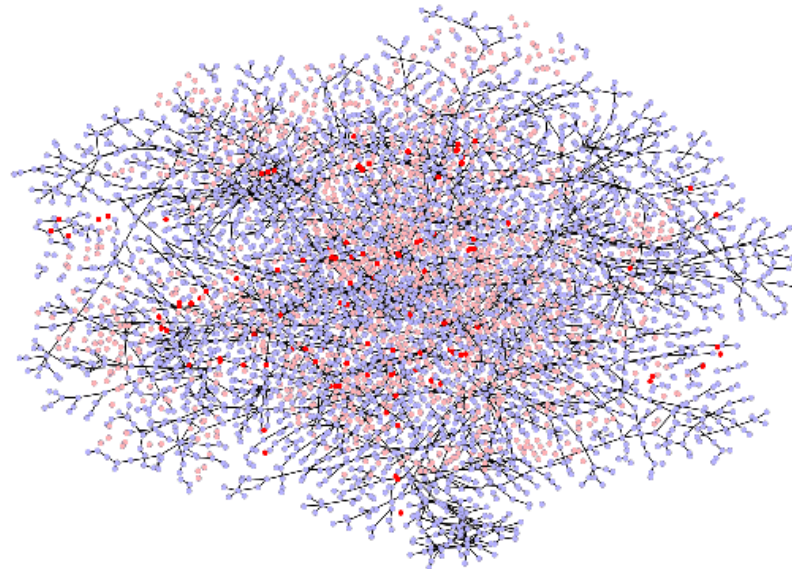
カスケード故障 0 (before)



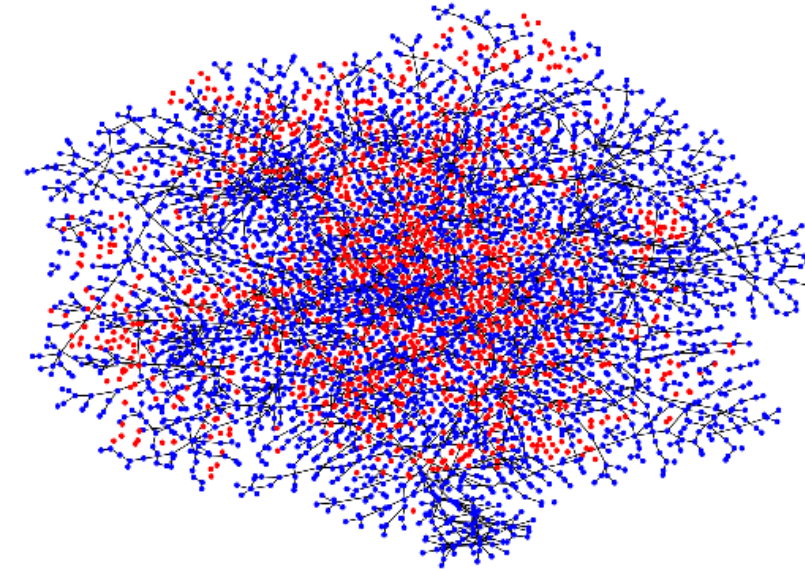
カスケード故障 1



カスケード故障 2

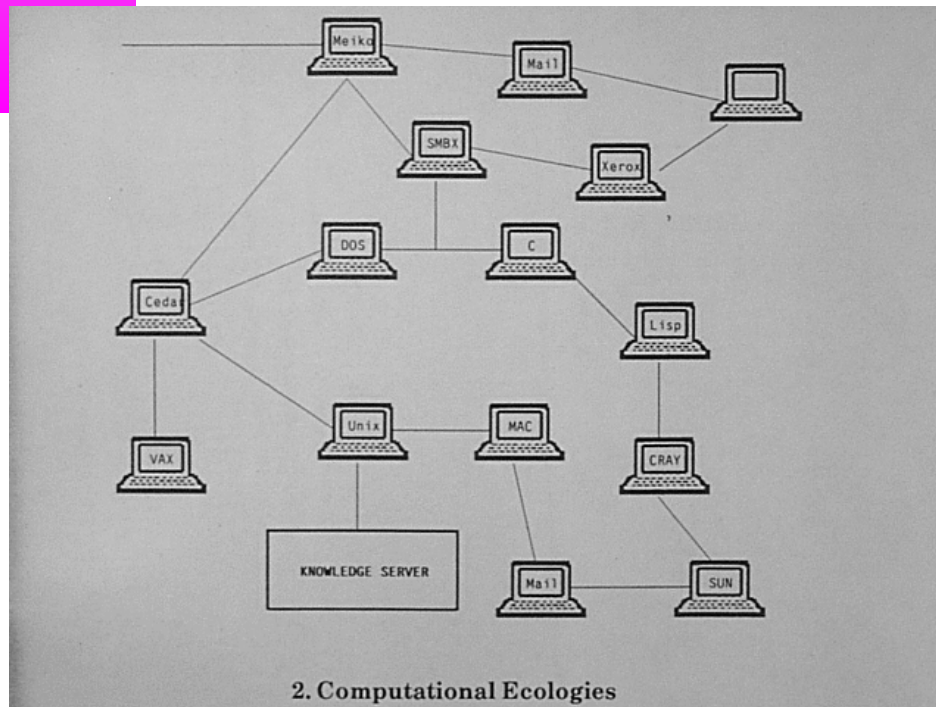


カスケード故障 3 (end)



Network Ecology

The Ecology of Computation, B.A. Huberman, '85
Webology = The Information Ecology + WWW,
Xerox PARC SSL, '90~



生態系：任意の一定空間に
生育する生物群とそれらの
生育を制御、または促進す
る諸要因を含むエネルギー
収支上の複合体系. 国語大
事典 小学館

社会や経済活動における生
息分布, 活性度, 関連性 等
を分析

⇒ 情処学会 ネットワーク生態学研究 G 新設!

災害や悪意ある攻撃にも耐え得るネットワーク設計!

- センサネットや携帯における ad hoc 通信の適応的制御, 自律分散システム (ロボット).

災害や悪意ある攻撃にも耐え得るネットワーク設計!

- センサネットや携帯における ad hoc 通信の適応的制御, 自律分散システム (ロボット).
- 社会システムや生物系の長所を模倣した, ウィルスの拡散防止 (免疫化) 対策.

災害や悪意ある攻撃にも耐え得るネットワーク設計!

- センサネットや携帯における ad hoc 通信の適応的制御, 自律分散システム (ロボット).
- 社会システムや生物系の長所を模倣した, ウィルスの拡散防止 (免疫化) 対策.
- カスケード故障の防止策: 電力崩壊, 渋滞, 連鎖倒産.

災害や悪意ある攻撃にも耐え得るネットワーク設計!

- センサネットや携帯における **ad hoc** 通信の適応的制御, 自律分散システム (ロボット).
- 社会システムや生物系の長所を模倣した, ウィルスの拡散防止 (免疫化) 対策.
- カスケード故障の防止策: 電力崩壊, 渋滞, 連鎖倒産.
- 企業組織内や企業間, **WWW** コミュニティ等の社会ネットワークの中心性の分析: オピニオンリーダーの抽出, 情報や技術の普及促進, 効果的な宣伝戦略.

災害や悪意ある攻撃にも耐え得るネットワーク設計!

- センサネットや携帯における ad hoc 通信の適応的制御, 自律分散システム (ロボット).
- 社会システムや生物系の長所を模倣した, ウィルスの拡散防止 (免疫化) 対策.
- カスケード故障の防止策: 電力崩壊, 渋滞, 連鎖倒産.
- 企業組織内や企業間, WWW コミュニティ等の社会ネットワークの中心性の分析: オピニオンリーダーの抽出, 情報や技術の普及促進, 効果的な宣伝戦略.

⇒ 過度な経済的競争よりも, 安心・安全な社会システムの構築を目指して

Thanks

ご清聴ありがとうございました!

参考資料:

- Barabási, LINKED, Perseus Press, 2002.
邦訳 「新ネットワーク思考」 NHK 出版.
- Barabási and Bonabeau, 「世界の”なぜ”を読み解くスケールフリーネットワーク」, 日経サイエンス, 9月号, pp.34-45, 2003.
- 林, Scale-Free ネットワークの生成メカニズム, 応用数理, Vol.14, No.4, 2004.
- 林, 「講義 2: ネットワーク生態学 -経済, 社会インフラ, 生物における共通構造」, 計測と制御, 特別企画「創発夏の学校」, 8月号, Vol.43, No.8, 2004.

立命館大学 学術公開講演会, 22 Nov. 2004 – p.32/33