

自律成長ネットワークの強さと弱さ -ウィルスの拡散防止とライフラインの維持-

北陸先端科学技術大学院大学
知識科学研究科
林 幸雄 (yhayashi@jaist.ac.jp).

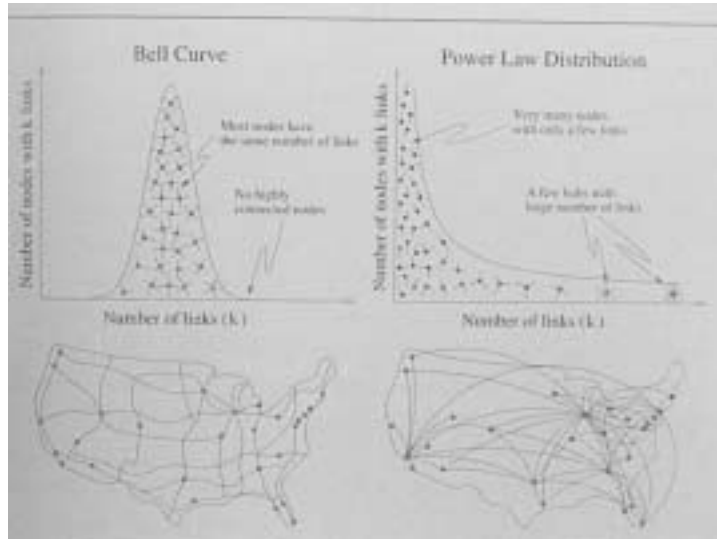
「経済、インターネット、知人関係等は生物に似たネットワーク構造を持つ！」

- 分散電力供給の耐故障性（連結性に基づく検討）
- コンピュータウィルスの拡散防止策
- 破滅的集中から流通へ：

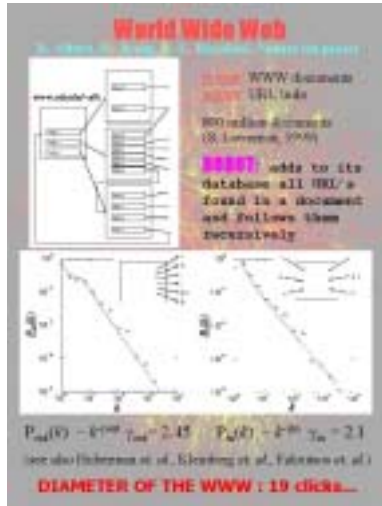
ネットワーク設計とデザインに向けて

1. 現実的な Scale-Free ネットワーク

1-1. ランダムや規則的なグラフ理論からの脱皮



1-2. べき乗分布: $P(k) \sim k^{-\gamma}$ とアキレス腱



1-3. SF ネットワーク構造の普遍性

-べき乗則によるハブの存在-

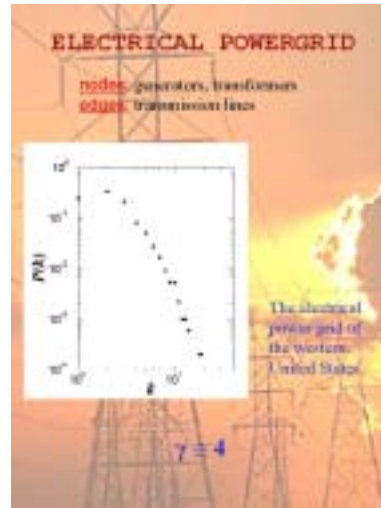
べき乗則は現実のネットワークに普遍的に存在し、その生成原理は単純で自然な Growth と Preferential Attachment による [Barabási'99].

- 生物系: 神経回路網, 遺伝子や代謝反応, 食物連鎖
- インフラ: インターネット, WWW, 航空路線, 電力網
- 社会関係: 知人, 企業間取引, 映画の共演, 論文引用

⇒ 電子メールの送受信関係も！

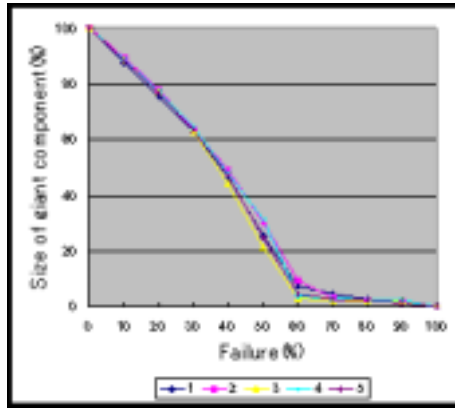
2. 分散電力供給の可能性

2-1. 電力系統図の例 ($\gamma \approx 4, \langle k \rangle = 2.7$)

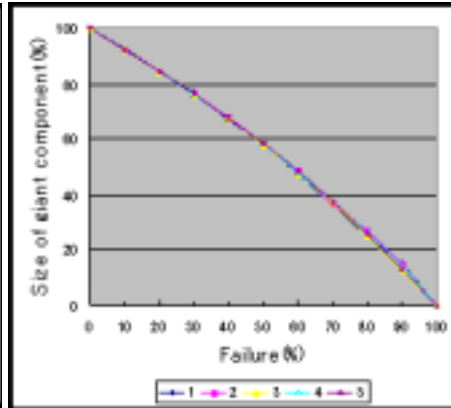


2-2. 最大クラスター（無向グラフの連結性）

ハブへの集中攻撃と、ランダムな故障を想定

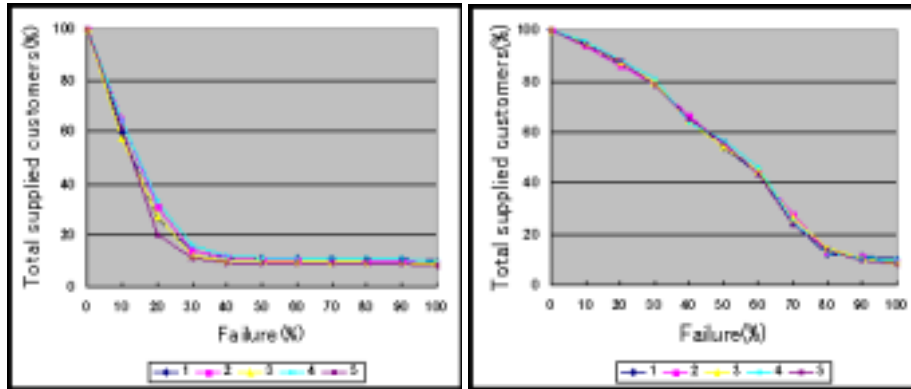


ハブ故障は60%でバラバラ



ランダム故障は99%まで頑強

2-3. 需要家への到達 (有向グラフの連結性)

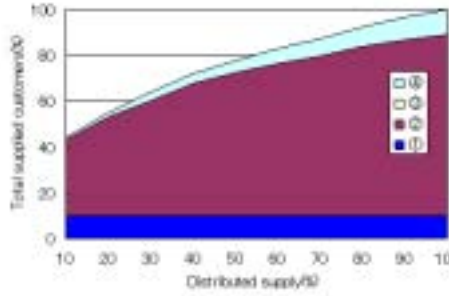


ハブ故障は20%で孤立分断

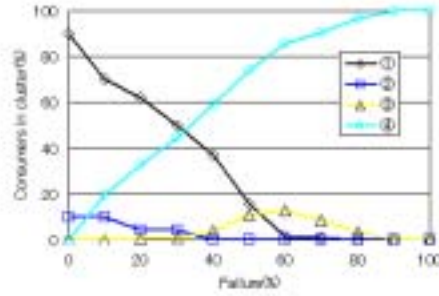
ランダム故障は80%まで頑強

⇒ 耐故障性は無向グラフの場合より弱くなる.

2-4. 分散電力による供給可能性 (ハブ故障率 10%)



普及率 10%で全体の 35%供給



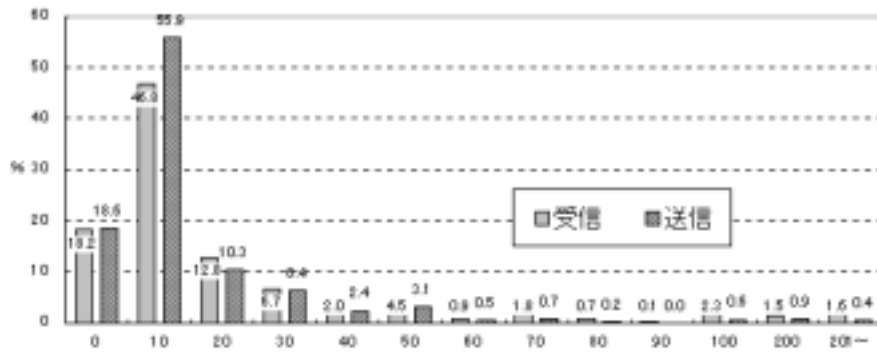
各クラスタ内の需要家数

⇒ 壊滅的な被害でなければ, 他の需要家を助けられる.
電力量や潮流によるカスケード被害のメカニズム解明が課題.

3. コンピュータウィルスの拡散防止

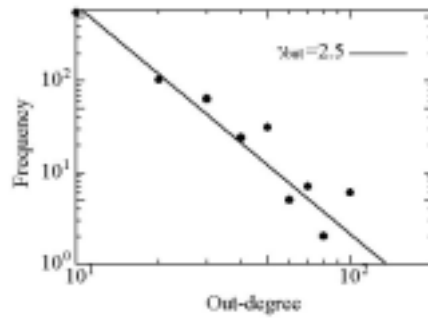
3-1. 送受信数の実測値

コンピュータウィルスの被害の中で電子メールによるものは70-80%以上で、その損害も年間100億ドル以上！

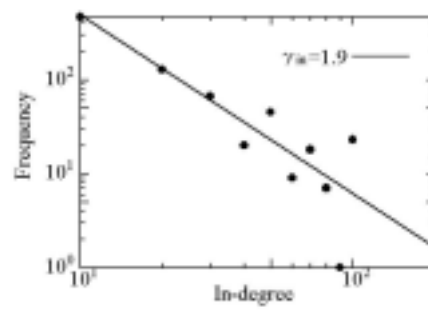


World Internet Project の日本調査より (平成 12 年 10-11 月, 2555 人)

3-2. 送受信数の分布



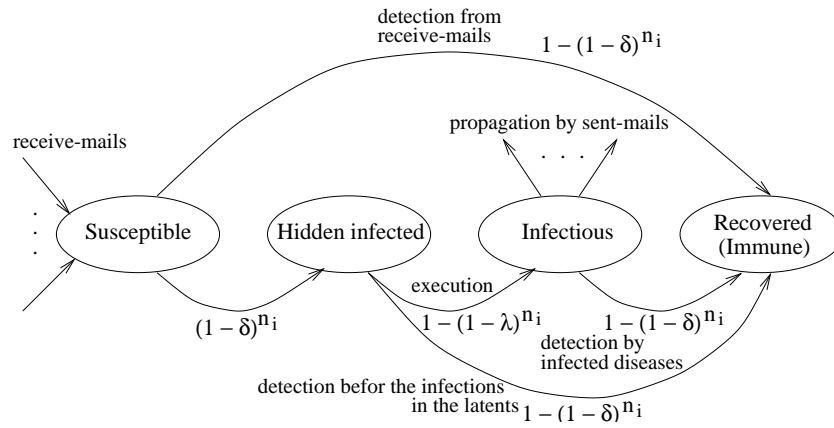
送信



受信

⇒ 独 Kiel 大のメールサーバのログ解析でも同様なべき乗分布.

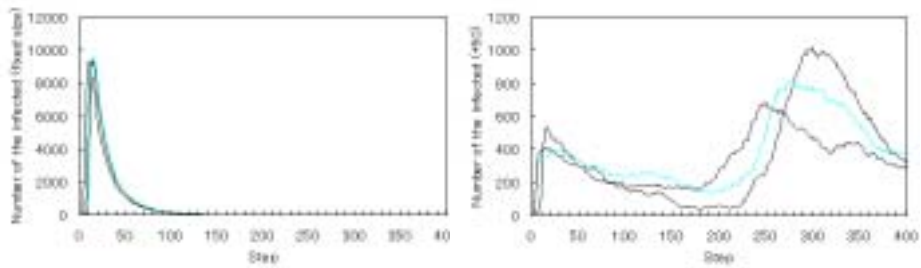
3-3. 電子メールによるウィルスの行動パターン



確率的遷移, 未感染: $S \rightarrow$ 潜伏: $H \rightarrow$ 増殖/発病: $I \rightarrow$ 免疫: R
 ここで, 実行率 λ , 発見率 δ , ウィルスの個数 n_i とする.

4. 開放系における再流行現象

4-1. 確率論的 SHIR モデルにおける典型的挙動



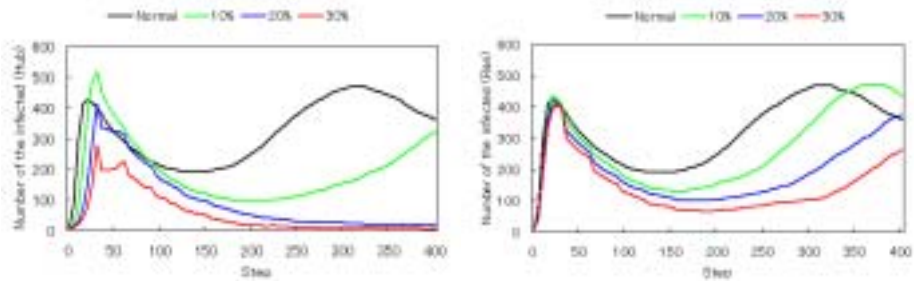
固定サイズ

+50 個ずつ頂点追加

状態遷移を行う各ステップ毎に同時に、頂点と辺を追加しながら成長していく開放系のモデルを考えると、再流行現象が起る。

⇒ ウイルスの拡散伝搬を抑えることはできないのか？

4-2. ハブ免疫化の効果（線形成長）



ハブ免疫化

ランダム免疫化

30 ステップ（1ヶ月に相当）ごとに、成長した規模の10, 20, 30 %の頂点を免疫化した場合の、感染数の平均値の変化。

⇒ ハブ免疫率 30 %で絶滅！、ランダムな免疫化では再流行

4-3. 決定論的 SIR モデルの解析

平均場方程式：

$$\frac{dS_k(t)}{dt} = -bkS_k(t)\Theta(t) + a - \delta_r S_k(t), \quad (1)$$

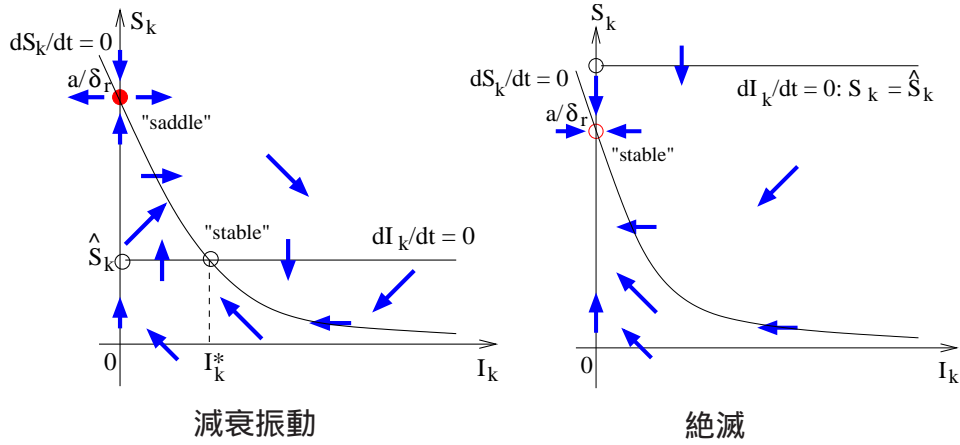
$$\frac{dI_k(t)}{dt} = -\delta_0 I_k(t) + bkS_k(t)\Theta(t) - \delta_r I_k(t), \quad (2)$$

ここで、ネットワーク成長率 a 、感染率 b 、発見率 δ_0 、次数 k の未感染数 S_k と感染数 I_k 、接触期待値 $\Theta(t) \stackrel{\text{def}}{=} \sum_k \frac{kP(k)}{\langle k \rangle} I_k(t)$ 、影の変数：
 $\frac{dR_k(t)}{dt} = \delta_0 I_k(t) + \delta_r (S_k(t) + I_k(t))$.

⇒ ランダムな免疫率 δ_r やハブの免疫率 $\delta_h k^\tau$ と成長度 a に対する、
絶滅の必要条件が導ける

4-4. 減衰振動と絶滅のメカニズム - サドル点分岐 -

$I_{k'}^* = 0, (k' \neq k)$ の断面における nullclines



成長を抑え，免疫率を大きくしないと絶滅は不可能

5. 破滅的集中から流通を促すネットワークへ

SF 構造上のダイナミクスは徐々に解明，しかし設計指針は??

極度な集中を示す同様な構図: **敗者が復活できない急速な破壊**

自然環境	人口の増大	生物種の絶滅
国際経済	先進国の豊	途上国からの資源や労働力の奪取
就労	株主優先のメガ企業	中小の倒産，リストラ，失業
社会行動	法外な投棄的取引	貧困による殺人，犯罪
商業圏	郊外大型店の立地撤退	商店街の消滅，ドーナツ化

⇒ **流通を促し，弱者や敗者にチャンスを与えるネットワーク!!**
多様性を許容し，共生する社会に向けた技術を．

補足 1. Scale-Free ネットワーク構造上の SIS モデル

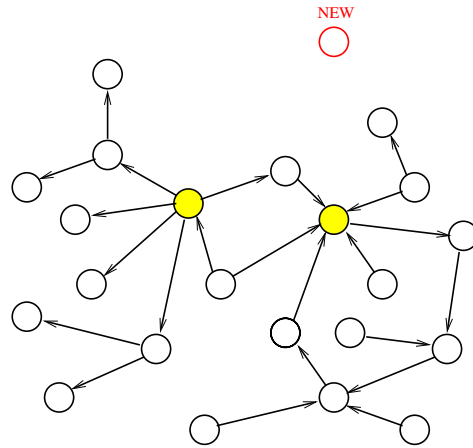
ごく最近, **社会的な知人関係**を表す感染モデルにおいて,

- ×: 平均場近似による理論解析から, しきい値が存在しないことが判明 [Satorras'01].
どんな小さな感染率でも広がる (**従来の疫学の常識を覆す**).
- : 重点的なハブ (結合の多い頂点) の免疫化によってウィルスの拡散を抑止できる [Dezsö'02][Satorras'02].
極度な分断を引き起こすアキレス腱を逆に利用.

⇒ ランダムでも規則的でもない, SF ネットワーク構造の特徴!
蔓延か絶滅かどちらかの定常状態しか議論してない ($N \rightarrow \infty$).

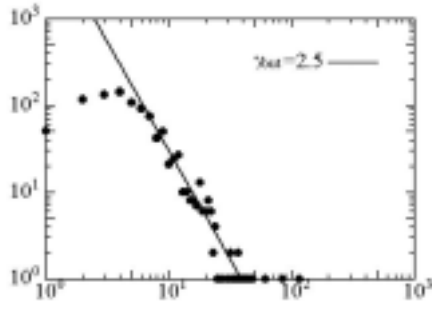
補足 2. 構成的な (α, β) モデル: $\gamma_{in} = \frac{1}{1-\alpha}$, $\gamma_{out} = \frac{1}{1-\beta}$ 18

確率	α	$1 - \alpha$
β	新頂点の自己ループ	終点は既存で, 始点は新頂点
$1 - \beta$	終点は新で, 始点は既存	ともに既存の頂点

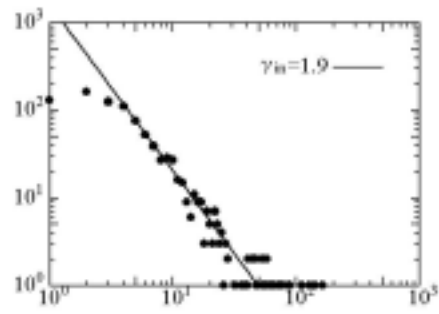


—

補足 3. (α, β) モデルにおけるべき乗分布

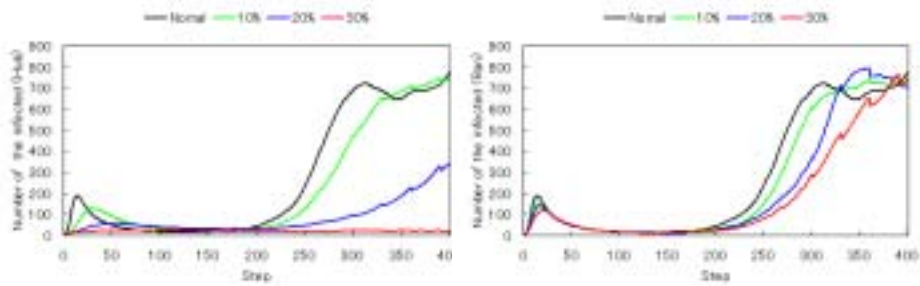


送信



受信

補足 4. ハブ免疫化の効果 (指数成長, $\times 1\%$)



ハブ免疫化

ランダム免疫化

補足 5. 決定論的 SIR モデルにおける S-I 振動子

