



複雑ネットワーク

自然・社会はネットワーク

多くの要素からなるシステムの性質

- 連続体と考えると偏微分方程式を作る
 - 要素の繋がり方を無視
- 正規格子に要素を並べる
 - 要素ごとに隣接する要素数が一定
 - 一様なシステム
 - 情報伝達が遅い
- ランダムグラフに要素を並べる
 - 一様なシステム
 - 情報伝達が速すぎる
- 要素間の関係が重要な働きをしている場合
 - 要素間の関係の非一様性
 - 時間の遅れ



自然・社会はネットワーク

- 多数の要素の繋がりをネットワークとして捉える
 - インターネット
 - Webページのリンク
 - 知人の繋がり
 - 映画俳優の共演関係
 - 論文の共著者の関係
 - 食物連鎖
 - タンパク質の反応連鎖
 - 電力供給網
 - 交通網
- 共通の性質はあるのだろうか



自然・社会はネットワーク

○ ネットワーク上の現象

- 伝染病の拡がり
 - 人の病気:接触による伝染
- コンピュータウイルス
 - メール、USBなどの媒体、Web
 - インターネット上(論理ネットワーク、サービスなど)を広がる
- 障害
 - 電力ネットワーク
 - インターネット
- 情報、噂、意見



例

- インターネット: <http://www.opte.org/maps/>
- 代謝:
<http://capsid.msu.montana.edu/douglasgroup/index.php/complex-chemical-networks/17-metabolic-networks.html>
- 全米電力ネットワーク:
<http://www.isa.org/InTechTemplate.cfm?Section=Features3&template=/ContentManagement/ContentDisplay.cfm&ContentID=75580>
- 食物連鎖:
<http://www.nceas.ucsb.edu/featured/martinez>



ネットワークの科学

- システムをネットワークとして捉える
 - 要素間のつながりに注目
- 新しい分野
 - 応用：
 - 生態学、分子生物学、社会学、経済学
 - 基礎：
 - 数学、計算機科学、物理学



「複雑ネットワーク」共通の性質がある

- 要素間の距離が短い
 - Small world
 - Six degree
- べき則
 - Fat tail
 - 一人勝ち
 - 富者はより富み、貧者はより貧しく
- モジュール性
 - グループに分かれている



MILGRAMの実験

- 1967年に実施
- 手紙を目的の人Aまで届ける
 - 直接、Aを知らない場合、親しい人(ファーストネームで呼ぶような人)で、Aに近いと思われる人に送る
- 1/3 程度の手紙が到達
 - 平均のホップ数は5.5
- Small world性を示している?

- いろいろと問題は指摘されている
 - サンプルの偏り
 - 追試験



KEVIN BACON ゲーム

- 映画の共演関係
- <http://oracleofbacon.org>
- <http://www.imdb.com>
- <http://blog.globalpatentsolutions.com/bid/26875/Six-Degrees-of-Kevin-Bacon-the-inventor>

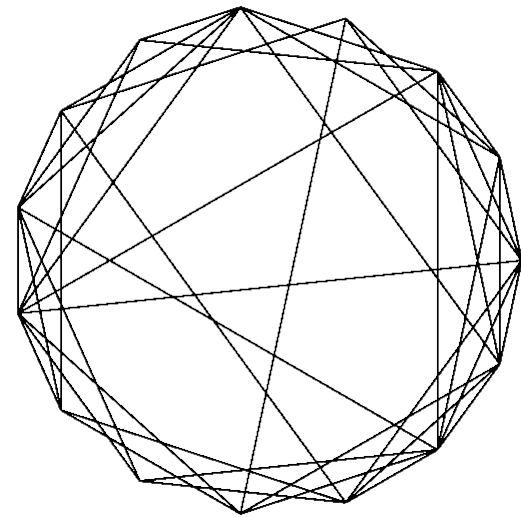
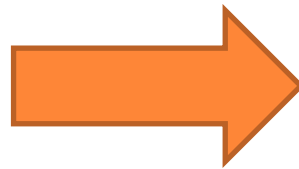
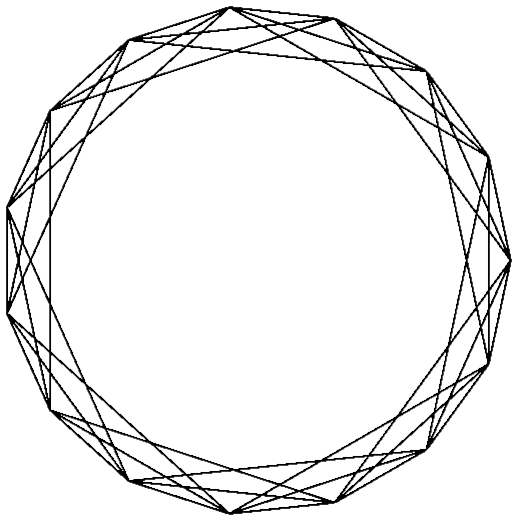


俳優の氏名	Bacon Number
Julia Roberts	1
Marcello Mastroianni	2
Audrey Hepburn	2
高倉 健	2
Jean Reno	2
Keanu Reeves	2
Johnny Depp	2
木村拓哉	2



WATTS-STROGATZ SMALL WORLD

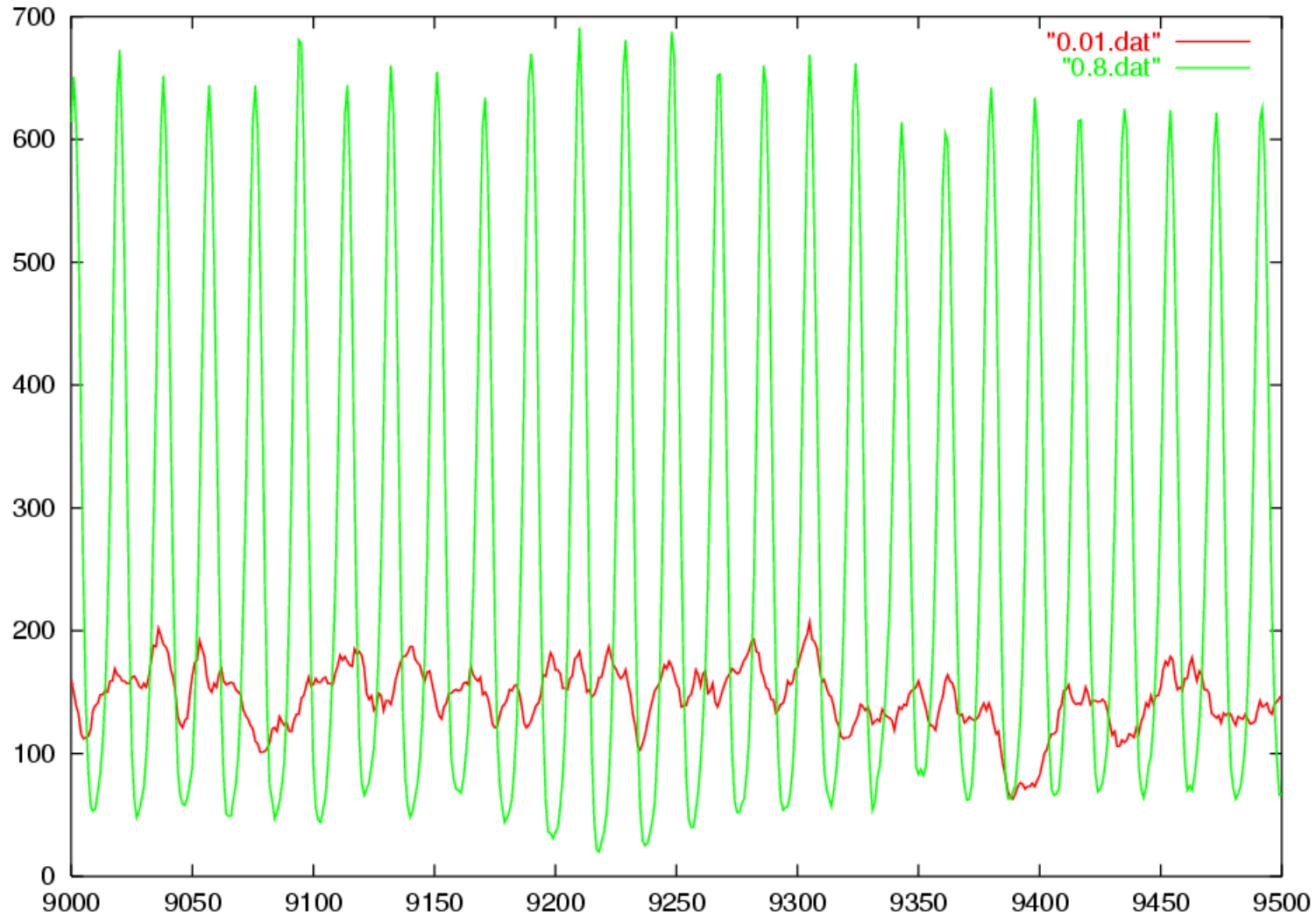
- 正規格子＋ランダムな近道



平均距離が急速に減少



$$N = 10^4, k = 3, \tau_I = 4, \tau_R = 9$$



伝染病モデル
近道を使って病気が活動



SCALE-FREE ネットワーク

- 頂点の次数の分布がべき則

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

- Web ページ $\gamma_{\text{in}} \sim 2.1$ 、 $\gamma_{\text{out}} \sim 2.7$
 - <http://www.nature.com/nature/journal/v401/n6749/full/401130a0.html>
- インターネット $\gamma \sim 2.2$
- 論文引用(Phys. Rev. D) $\gamma \sim 2.6$

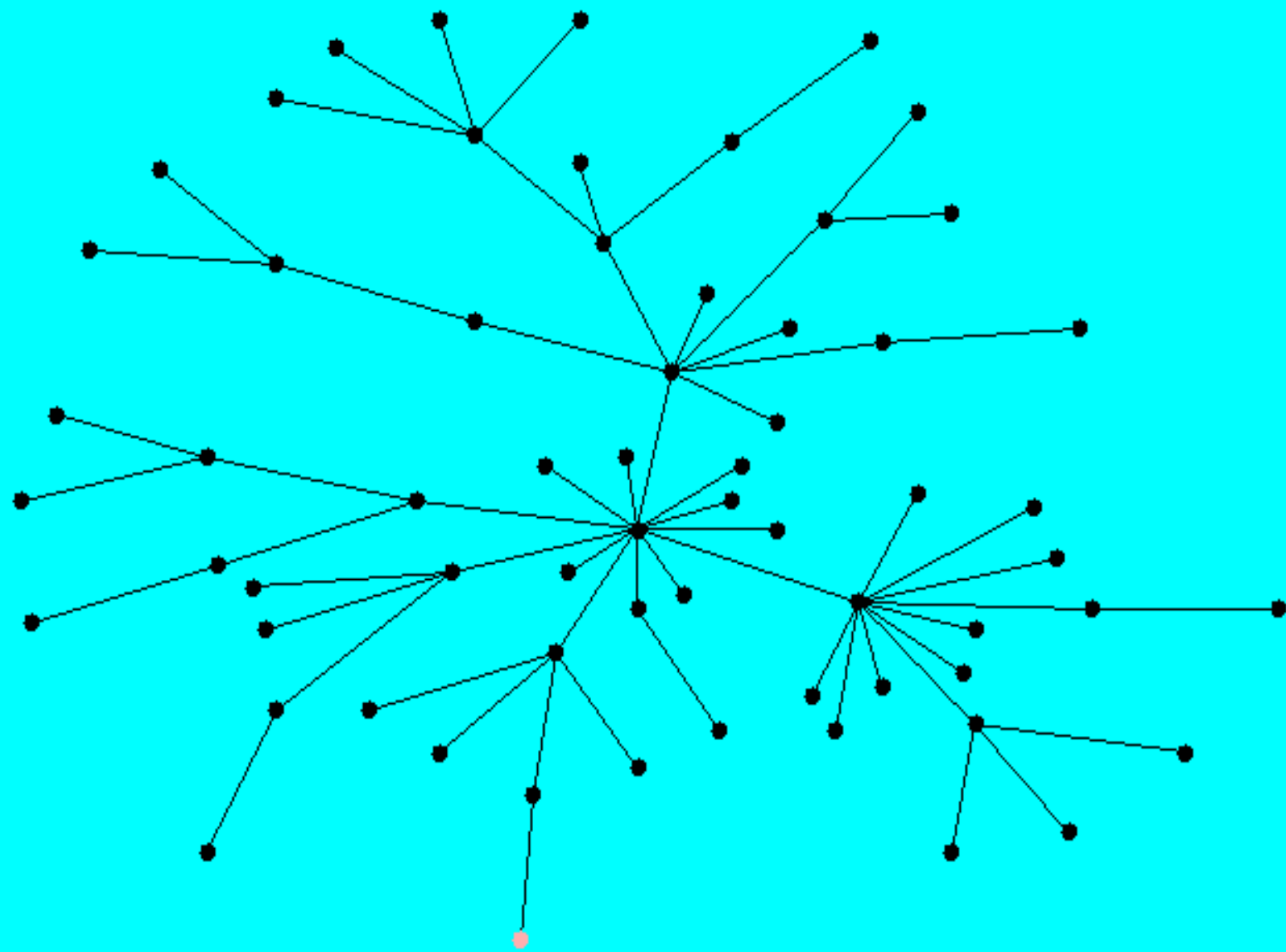


BARABÁSI-ALBERTモデル

- Preferential attachment
 - 次数の高い頂点ほど、新しいリンクを集める
- 各時刻で新しい頂点が発生する
- 新しい頂点は、既存の頂点に m 本のリンクを作る
 - リンク先は、直前の時刻の次数に比例した確率で選ばれる

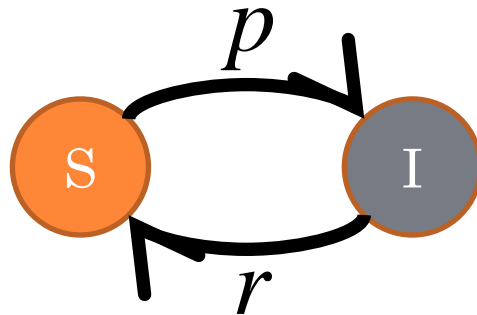
$$P(k) \sim k^{-3}$$



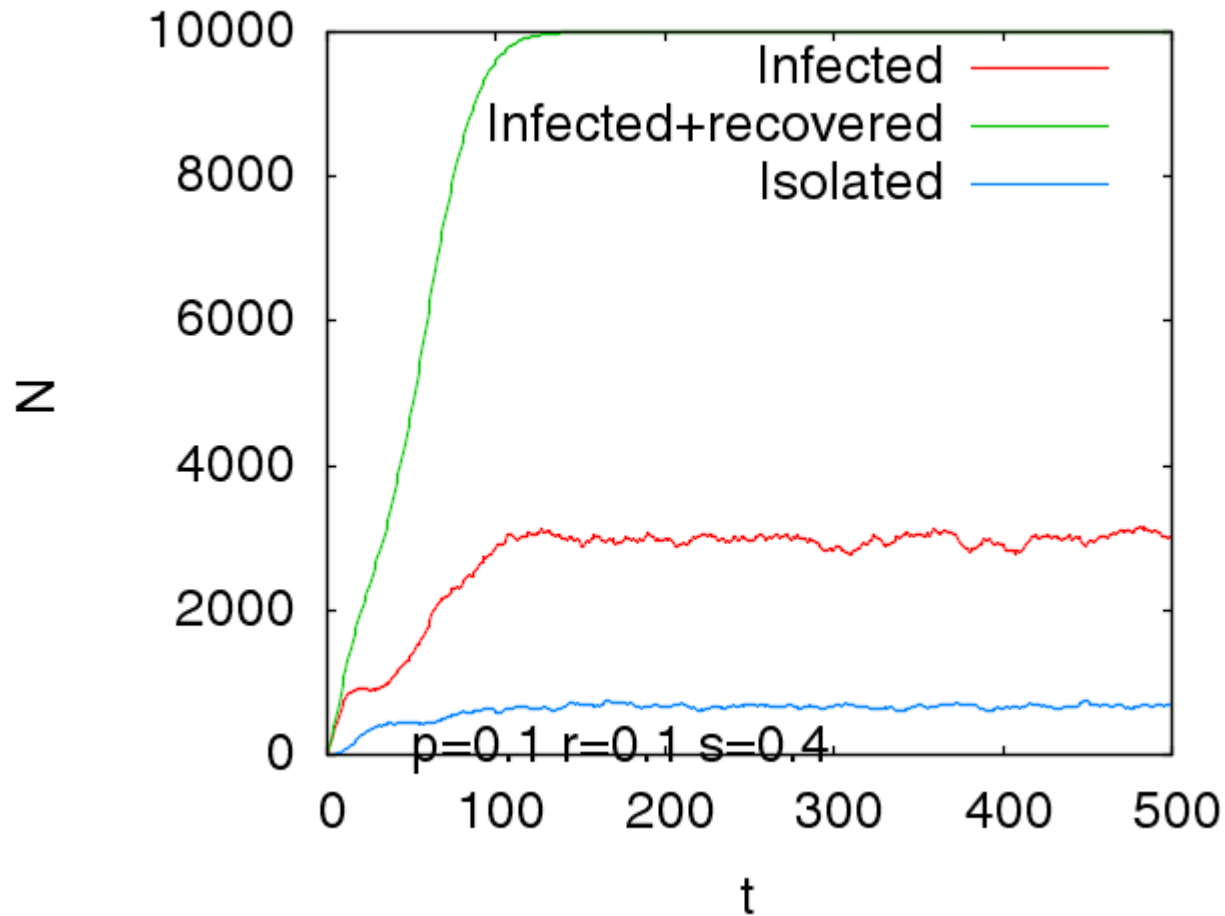


SCALE-FREE NETWORK上の伝染病モデル

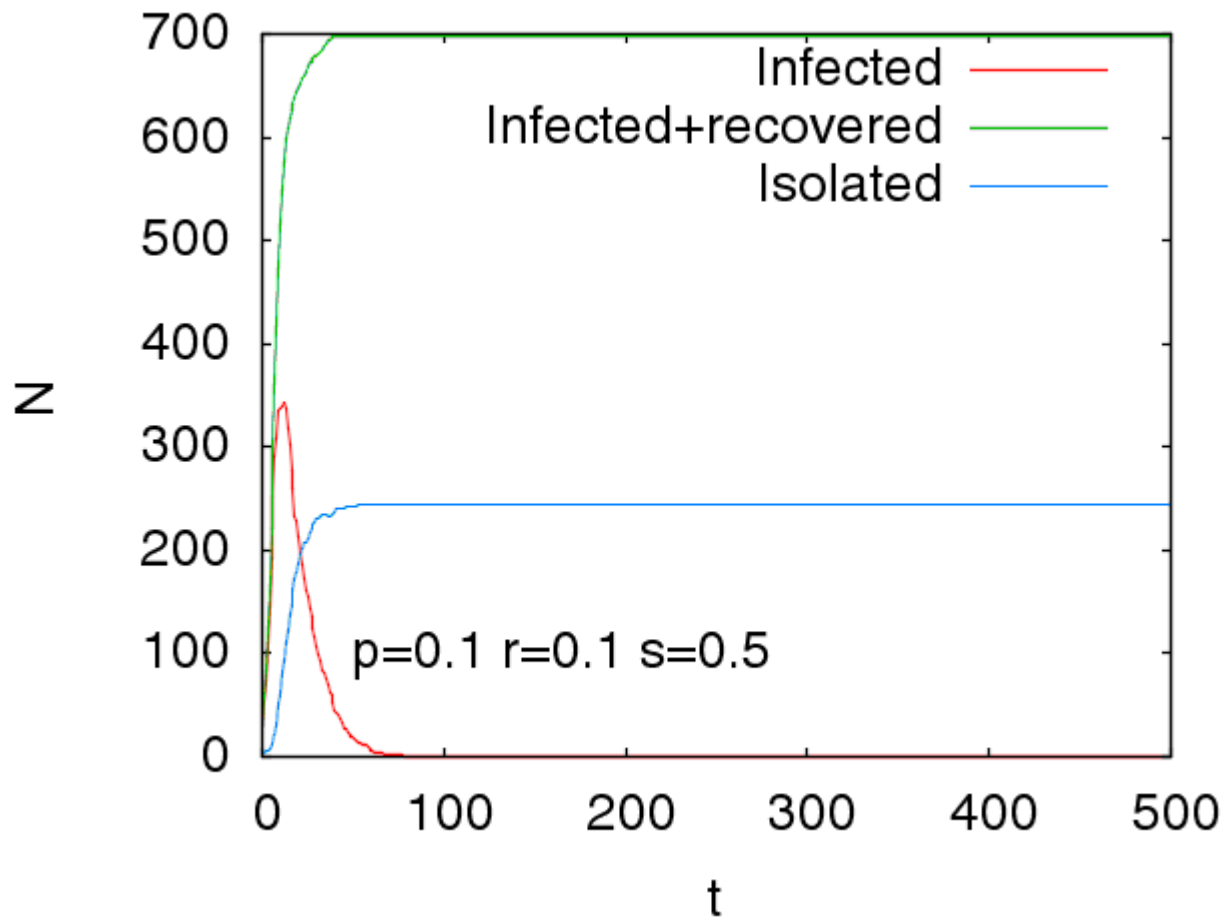
- 各頂点には「個体」が居る
- 各個体の状態はS(健康)またはI(病気)
- 状態Sの個体に状態Iの個体が隣接している場合
 - 確率 p で病気に係る
- 状態Iの個体は、確率 r で治り、状態Sに戻る



パンデミック状態



隔離を適切に実施すると



○ Scale-free ネットワークでは

- 伝染病への閾値がない→必ず、全体に広がってしまう。
- 伝染病への広がりを抑えるには、ネットワークの構造を変える
 - 適切にワクチン接種で、対抗する

○ ネットワークの脆弱性・冗長性

- ランダムな攻撃には強い
- 次数の大きな頂点を狙った攻撃に弱い

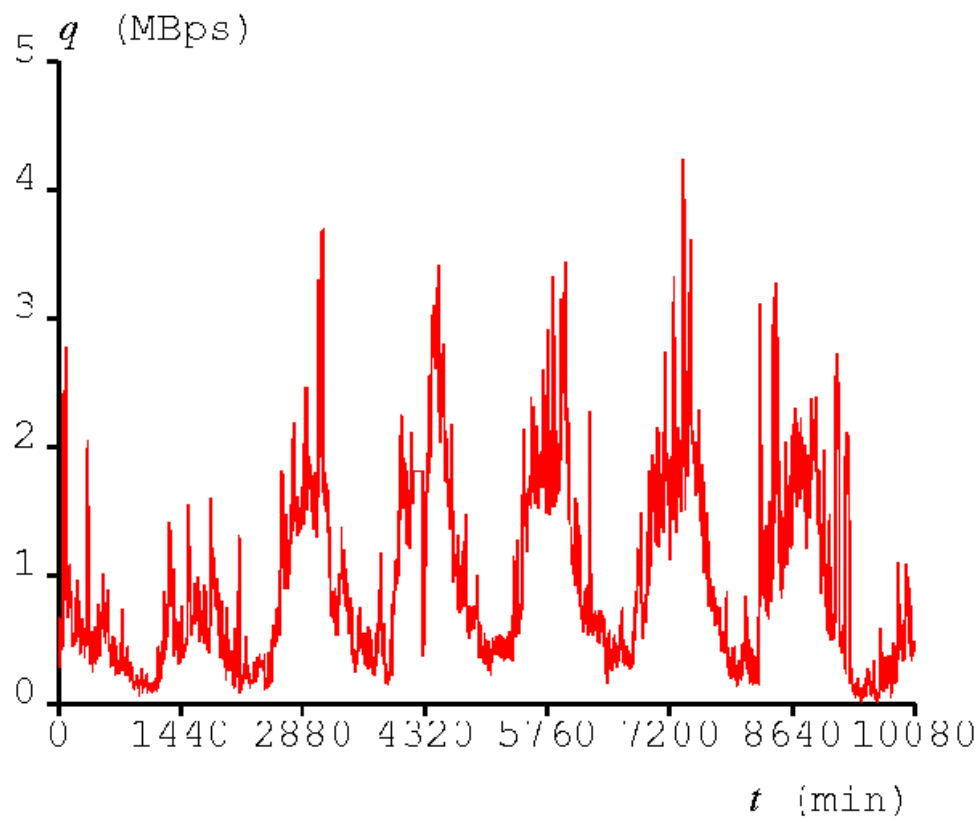


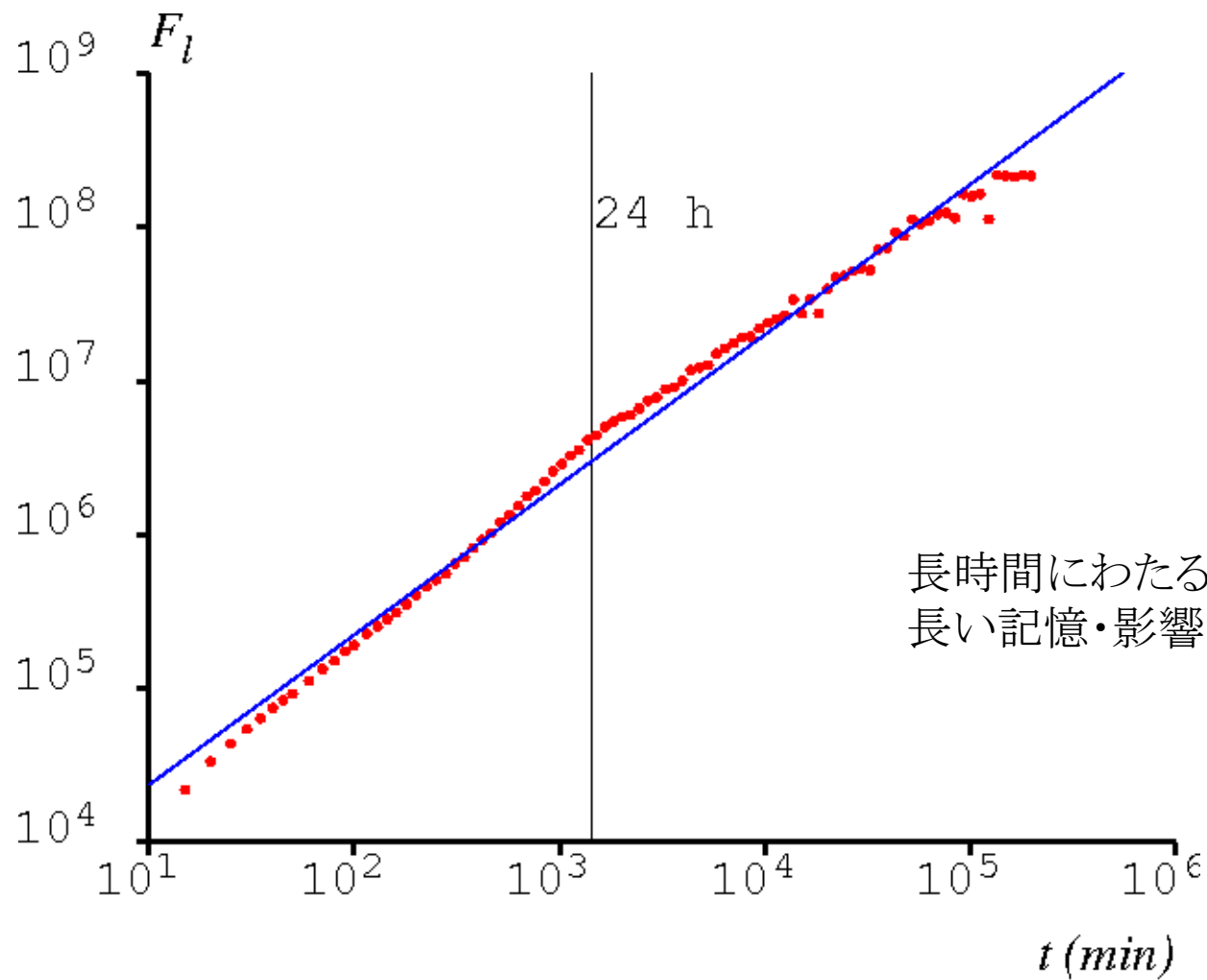
ネットワーク上の流れ

- 高速道路の車の流れ
 - その場所の性質で決まるもの
 - 高速道路網の性質を反映しているもの
- インターネットの情報の流れ



インターネット上のパケット流





長時間にわたるべき則相関
長い記憶・影響



良くわかっていない

- パケット流に現れる $1/f$ 的ゆらぎ
 - ネットワークの構造に由来するのか
 - インターネットが持っている様々な機構によるのか
- 人間の活動が $1/f$ 的なのか
 - 仕事が溜まる
 - ある仕事の遅れが他の仕事の遅れを誘発



メール需要: インターネットサービスの例

