

ネットワーク成長によるメール型ウィルスの再流行と 重点的なハブの免疫化の効果

北陸先端科学技術大学院大学
知識科学研究科

林 幸雄, 箕浦 正人, 松久保 潤.

ポイント：

- 送受信数分布の実測値に基づく接触関係を考慮したモデル,
- 新規ユーザを伴うネットワーク成長による再流行現象の示唆,
- 重点的なハブの免疫化による感染の広がりの抑制.

1. 再流行現象を説明できるモデルは？

1-1. 非現実的なネットワーク構造上の従来モデル

評価指標として、

- ランダムネットワークの直径と拡散速度や感染数の関係、完全グラフ上の駆除率の限界を解析 [千石他'96].
- 1次元格子 (正規分布) 上の接続数と感染率の関係、アンチウイルスによる拡散抑止効果をシミュレーション [岡本他'01].

⇒ 上記のモデルは解析には適するが、**実際の接触構造 (メールのやりとり)** はランダムでも規則的でもなく人ごとに偏っている。

1-2. 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 ($N \rightarrow \infty$).

2-2. 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-

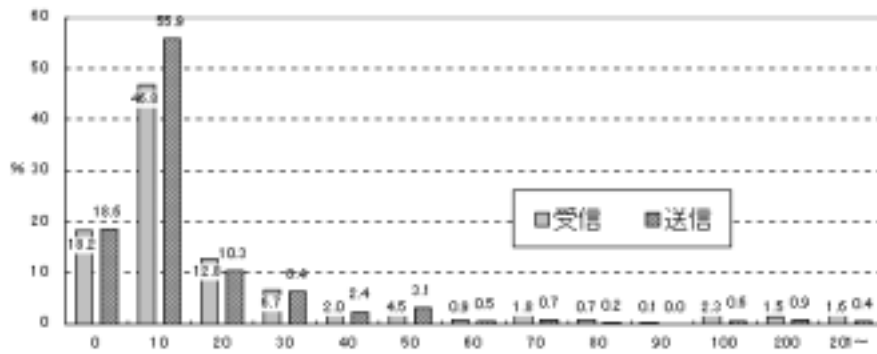
べき乗則は現実のネットワークに普遍的に存在し、その生成原理は単純で自然な **Growth と Preferential Attachment** による [Barabási'99].

- 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!**

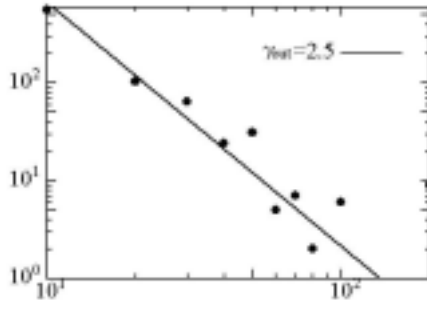
3. 電子メールの送受信関係

3-1. 送受信数の実測値

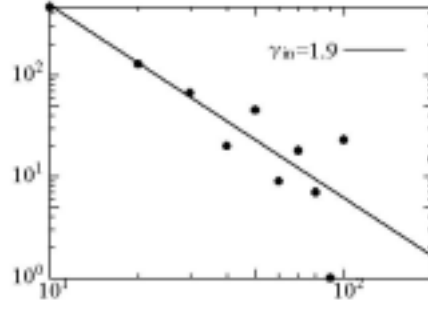


World Internet Project の日本調査より (平成 12 年 10-11 月, 2555 人)

3-2. 送受信数の分布



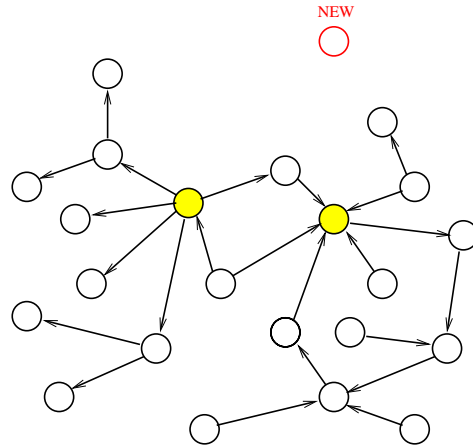
送信



受信

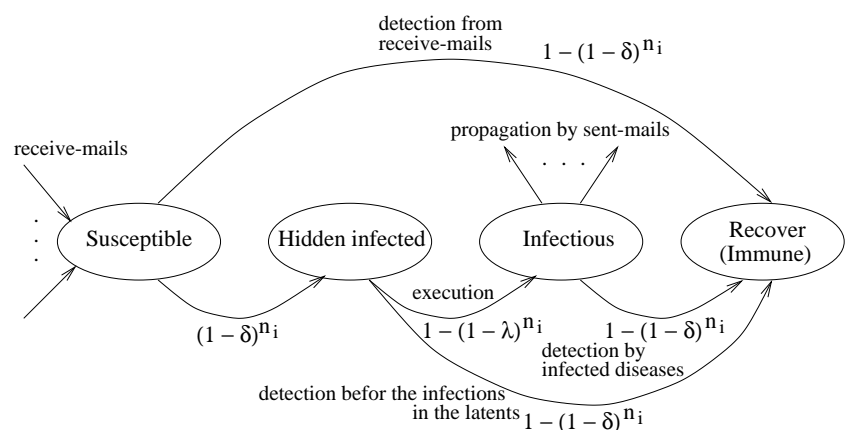
3-3. 構成的な (α, β) モデル: $\gamma_{in} = \frac{1}{1-\alpha}$, $\gamma_{out} = \frac{1}{1-\beta}$

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



4. 電子メールによるウイルス感染

4-1. ウィルスの行動パターン



確率的遷移, 未感染: S → 潜伏: H → 増殖/発病: I → 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.

—

4-2. 拡散伝搬の基本特性

感染数の立ち上がり / 下がりの鋭さに関して,

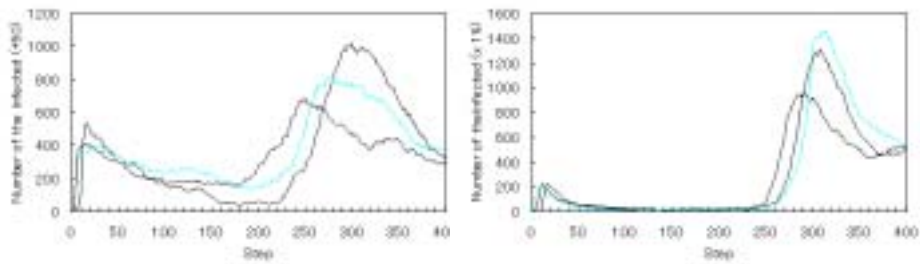
- 実行率 λ が大きいほど, 感染数が急増 ↗
- 発見率 δ が大きいほど, 感染数が急減 ↘
- 平均辺数 \bar{k} が大きいほど, 拡がりやすい

感染が拡がると複数メールから発見されやすくなって早く絶滅.

⇒ 固定規模 N では, **いったんは拡がるが, やがて絶滅する挙動**しか説明できない!

5. 開放系における再流行現象

5-1. 線形成長と指数成長



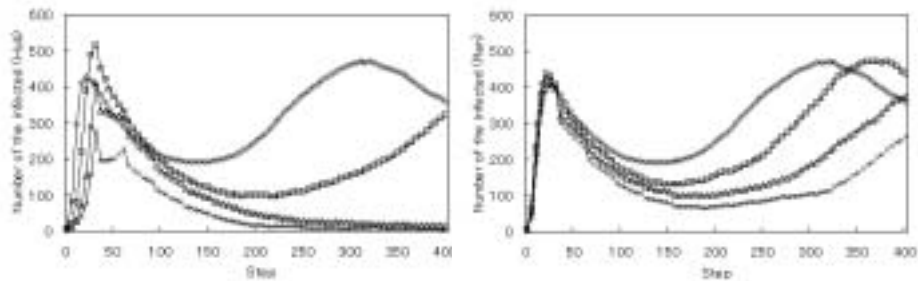
+50 個ずつ頂点追加

× 1% 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？

5-2. ハブ免疫化の効果 (線形成長)



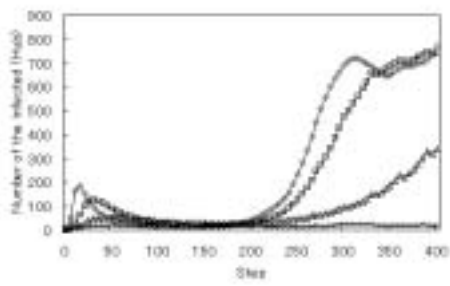
ハブ免疫化

ランダム免疫化

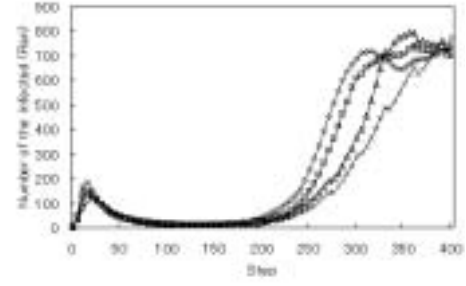
30 ステップ (1ヶ月に相当) ごとに, 成長した規模の 10, 20, 30 % の頂点を免疫化した場合の, 感染数の平均値の変化.

⇒ ハブ免疫率 30 % で絶滅!, ランダムな免疫化では再流行

5-3. ハブ免疫化の効果 (指数成長)

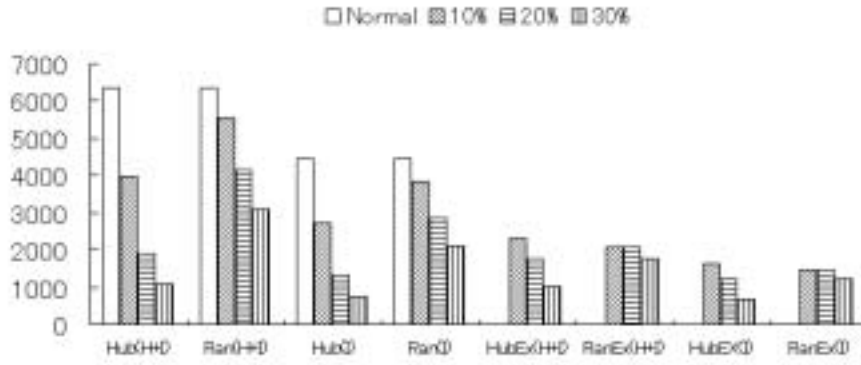


ハブ免疫化



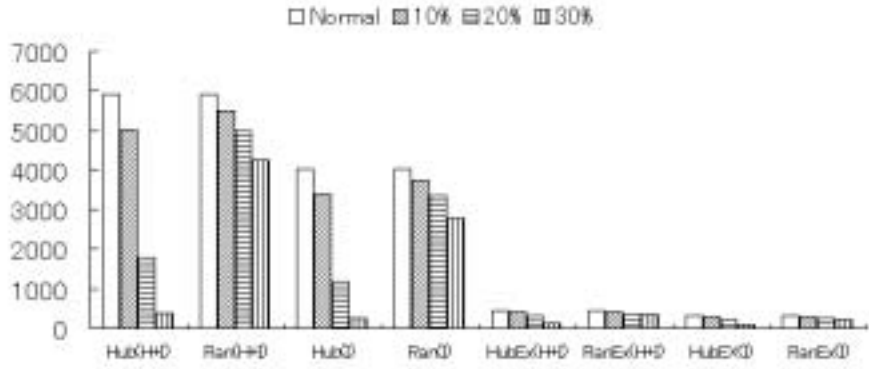
ランダム免疫化

5-4. 総感染数の比較（線形成長）



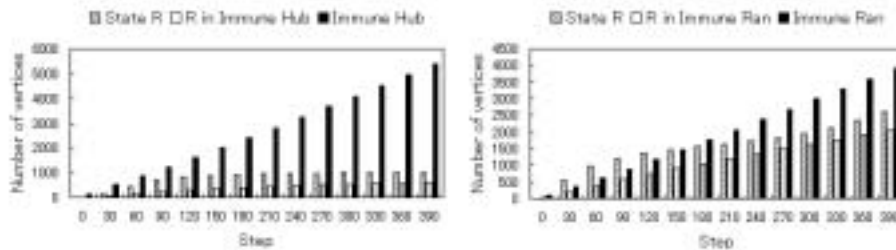
ハブ免疫化 30 % で 400 ステップまでの総感染数は $1/6$ に減少する一方、**ランダム免疫化ではせいぜい半分**。
確率的な状態遷移のために、完全に絶滅した場合でも効果あり。

5-5. 総感染数の比較 (指数成長)



ハブ免疫化 30 %で総感染数は1/10に減少する一方、ランダム免疫化ではせいぜい2-3割減程度.

5-6. 免疫頂点数の変化 (線形成長, 免疫率 30%)



ハブ免疫化

ランダム免疫化

免疫化されたハブの頂点数がウイルス発見数より圧倒的に多い,
一方, ランダムに免疫化された頂点数では顕著な差が見られない.

⇒ 感染数の激減や絶滅には, ウィルス発見よりもハブの免疫化
が効果的! .

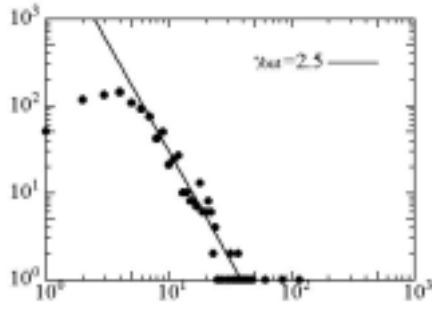
6. まとめ

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！

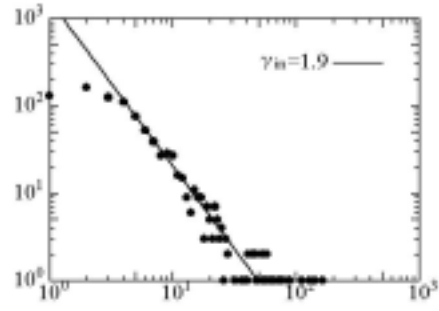
⇒ モデルによる予測や、拡がりを抑えるための対策の検討が急務

- 従来の規則的やランダムな構造ではなく、実際の送受信数の分布がべき乗則に従うSFネットワーク構造となることを示し、その実測値に基づく接触関係を持つモデルを提案.
- 基本特性として、一旦拡がった複数メールからウィルスが発見されやすくなることが判明.
また、新規ユーザを伴うネットワーク成長によって再流行が起ることを確率論と決定論的な双方のモデルから示唆.
- 再流行する場合でも、重点的なハブの免疫化によって感染数が激減し、絶滅にまで至らせる（免疫率30%）ことが判明.

補足1. (α, β) モデルにおけるべき乗分布

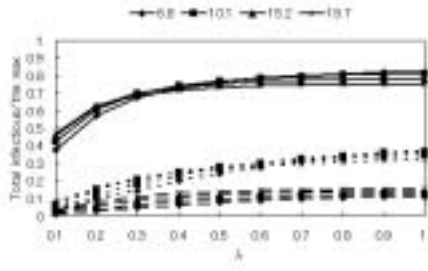


送信

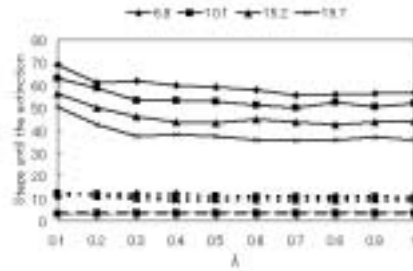


受信

補足 2. 総感染 PC 数と絶滅時間の基本特性
-固定規模-



総感染 PC 数



絶滅時間