

適応的ネットワークにおける 感染症ダイナミクス

小蔵 正輝

大阪大学 情報科学研究科

自己紹介

2009年 京都大学 情報学研究科 修士

- 制御理論
- “擬有理型システムのハンケルノルムの計算法”

2014年 Texas Tech University (Ph.D., Mathematics)

- 制御理論
- “Mean stability of switched linear systems”

2014年～2017年 University of Pennsylvania ポスドク

- 制御理論+ネットワーク科学

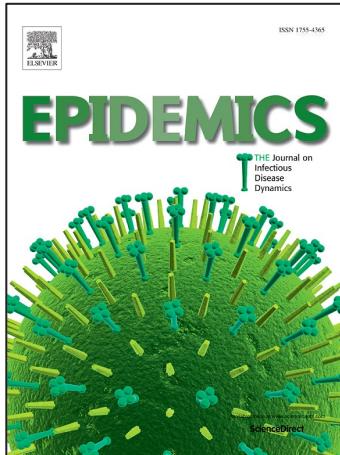
2017年～2019年 奈良先端大 情報科学領域 助教

2019年～現在 大阪大学 情報科学研究科 准教授

小蔵, “フェイルセーフな海外研究生活,” システム／制御／情報, vol. 11, pp. 449–454, 2018.

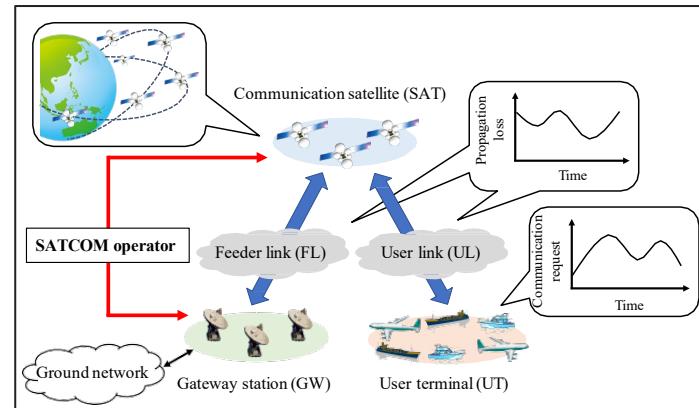
研究テーマの例

感染症



[Elsevier社]

衛星通信



プロジェクトマネジメント



無人航空機群



- ネットワーク上の伝播ダイナミクス
 - なぜネットワーク？
- 社会的距离戦略
- 研究紹介

ネットワーク上の 伝播ダイナミクス

SOCIETY

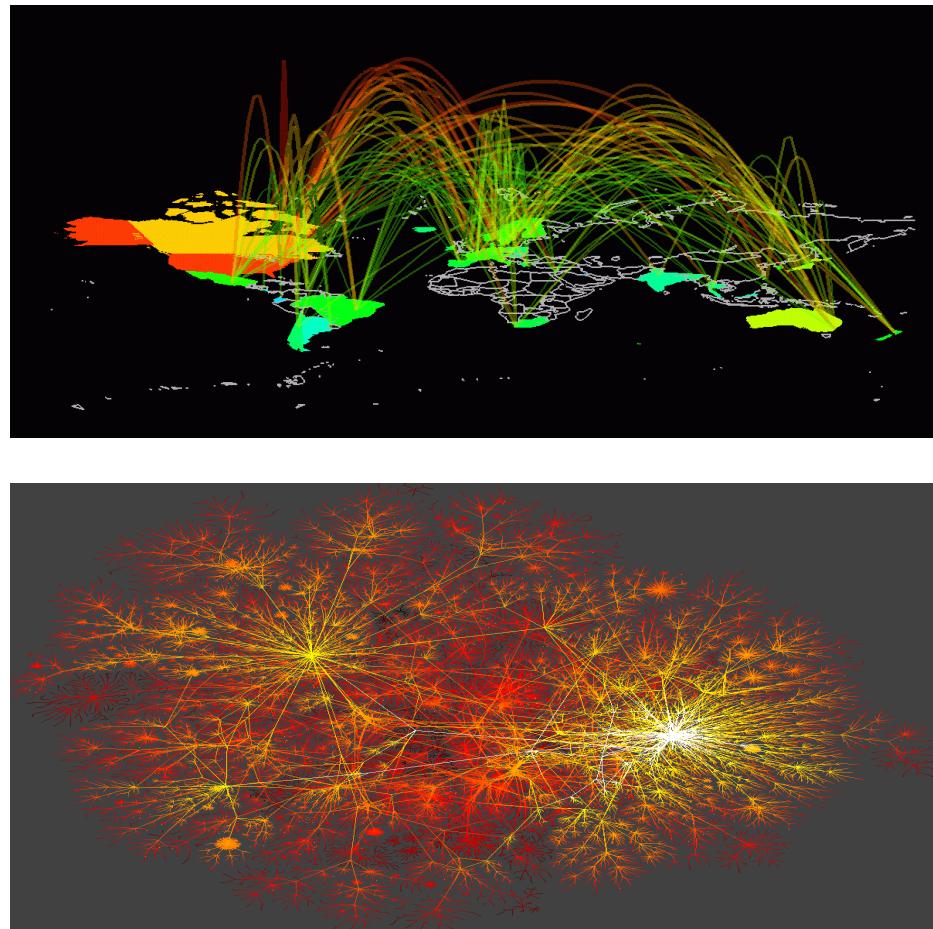
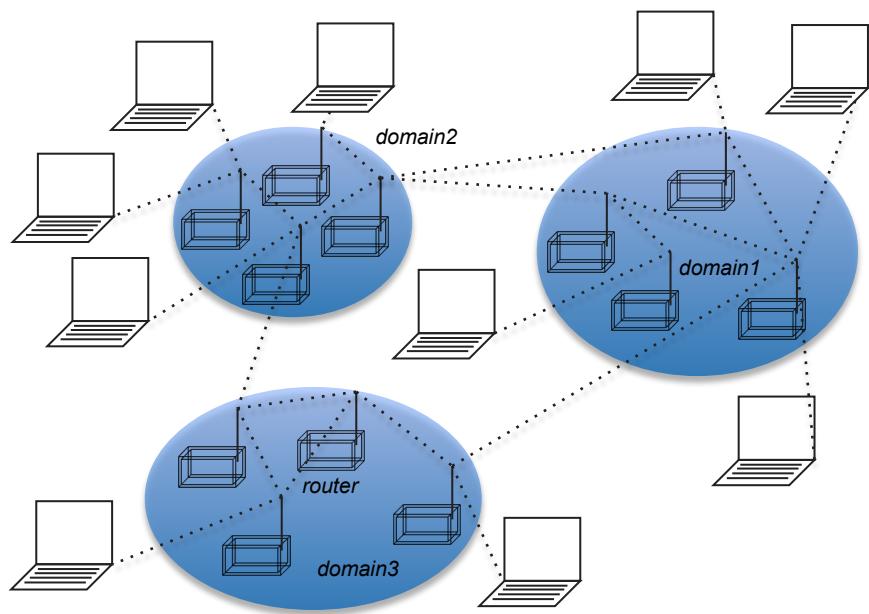
Factoid:



The “Social Graph” behind Facebook

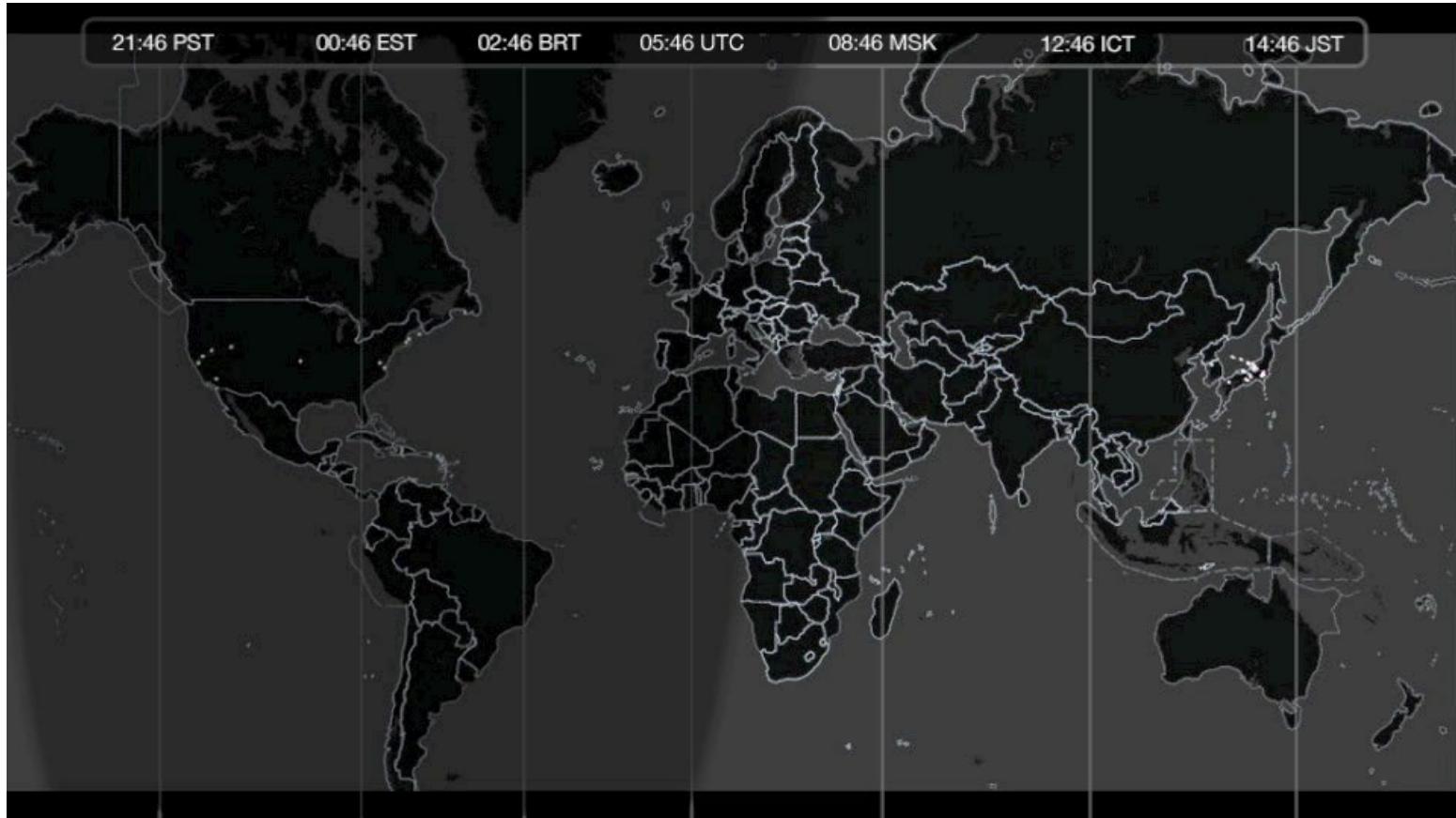
Keith Shepherd's "Sunday Best". <http://baseballart.com/2010/07/shades-of-greatness-a-story-that-needed-to-be-told/>

INTERNET



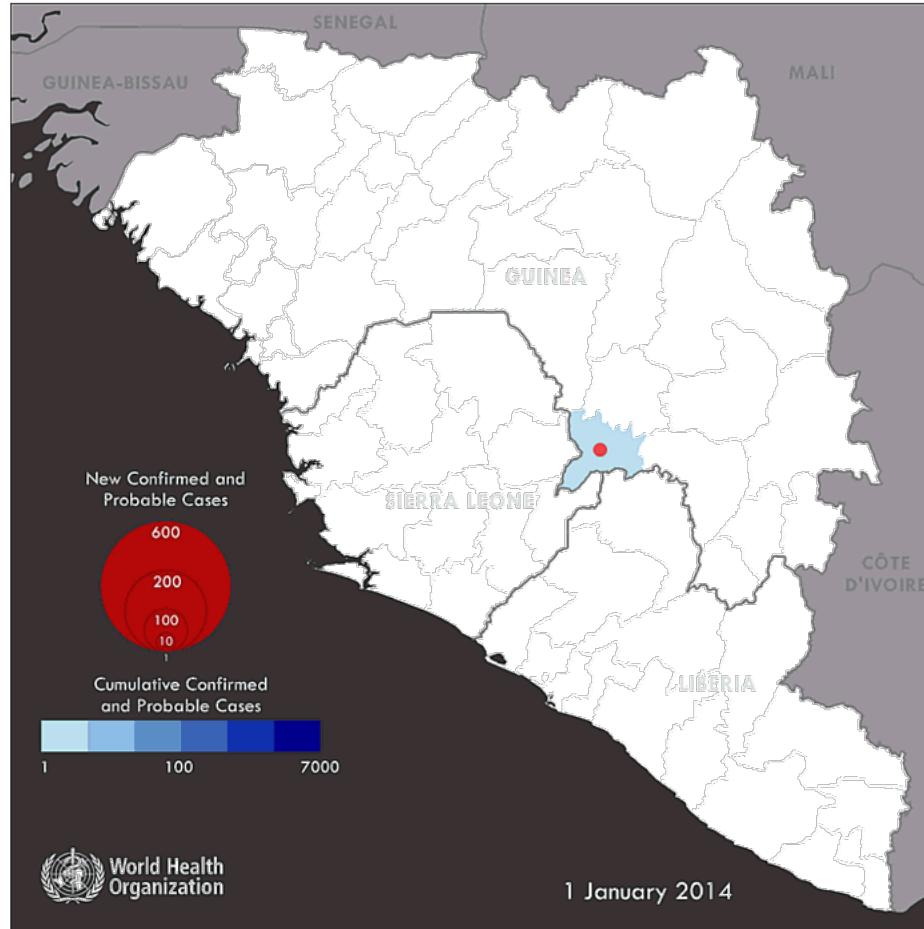
Network Science: Introduction

東日本大震災後の情報伝播



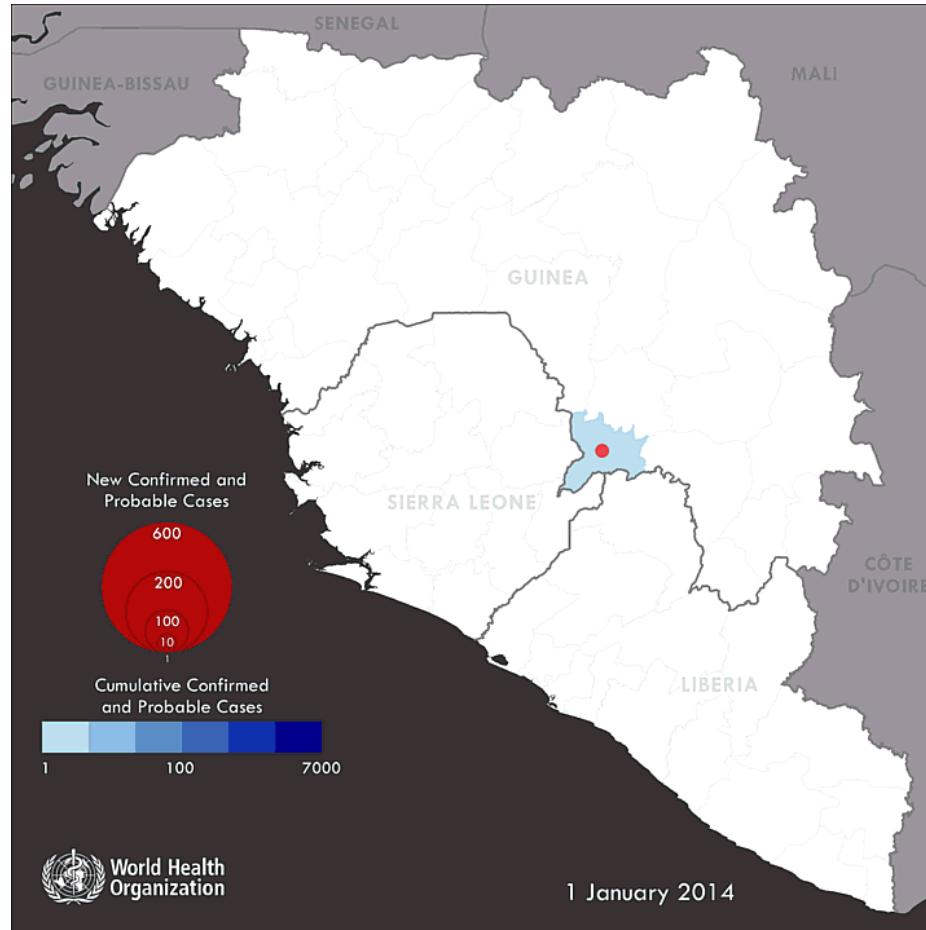
norbertomoreau, "Global pulse through Retweets", <http://en.inmoreau.com/720/global-pulse-through-retweets-2-video-grafics/>

エボラ出血熱の広がり



World Health Organization, <http://www.who.int/csr/disease/ebola/maps/en/>

エボラ出血熱の広がり



World Health Organization, <http://www.who.int/csr/disease/ebola/maps/en/>

なぜ「ネットワーク」？

■ 18世紀ヨーロッパにおける天然痘の流行

- 20-60%の死亡率
- 毎年400,000人の死者

■ 人痘接種

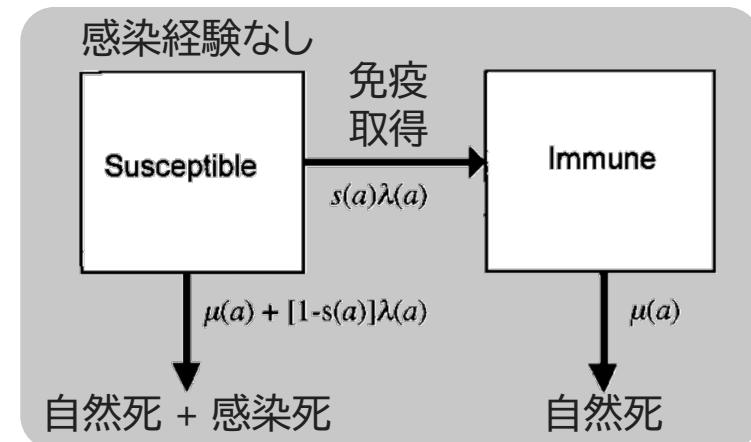
- 効果的だが、致死率 $\approx 0.5\%$
- 人々の疑問: 人痘接種を受けるべき?

■ 2区画モデル(Daniel Bernoulli)

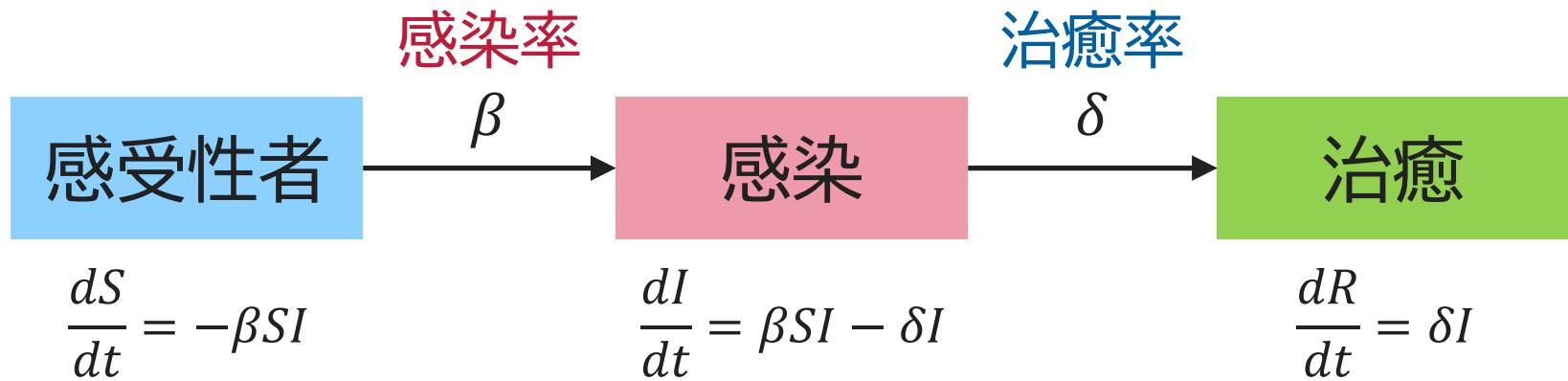
- 数学的な解析
- 人痘接種の致死率 $< 11\%$ ならば平均寿命は伸長



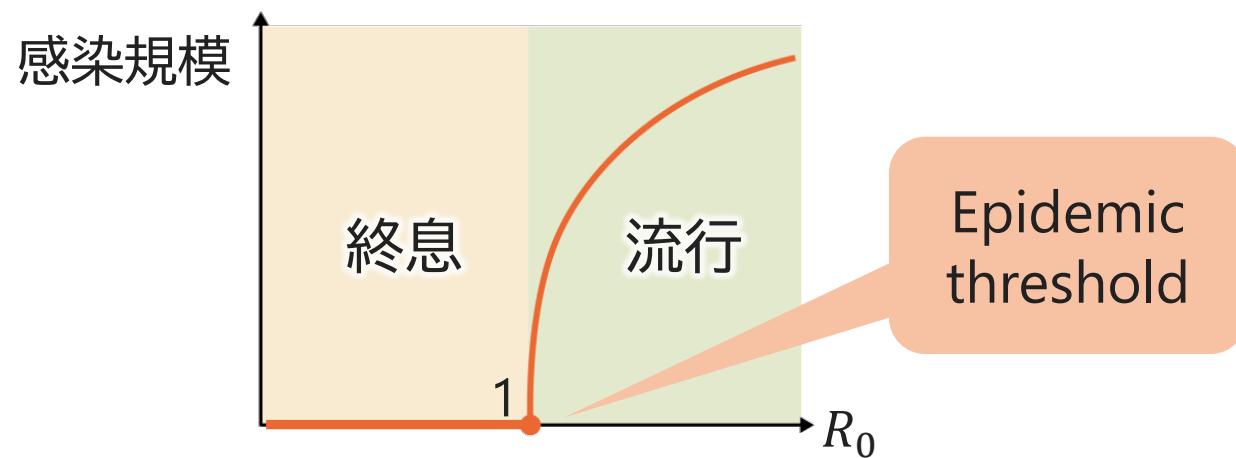
Lady Mary
Wortley Montagu



Colombo, Diamanti, "The smallpox vaccine: the dispute between Bernoulli and d'Alembert and the calculus of probabilities," *Lettera Matematica*, 2015.



基本再生産数: $R_0 = \beta / \delta$



未知の感染症の発生

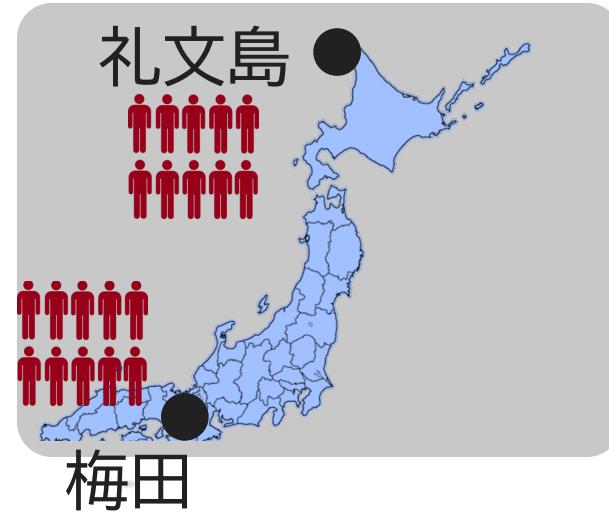
■ 10人が発症

- ケース1:梅田
- ケース2:礼文島

■ どちらが深刻か？



梅田



梅田



同じ
(基本再生産数は一緒)

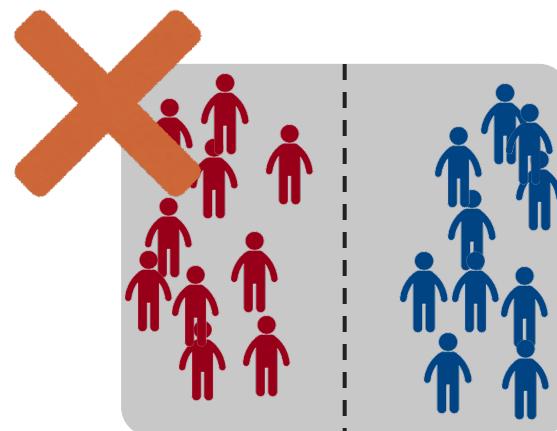
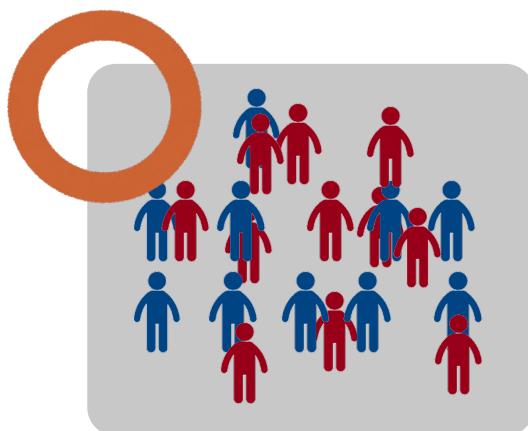


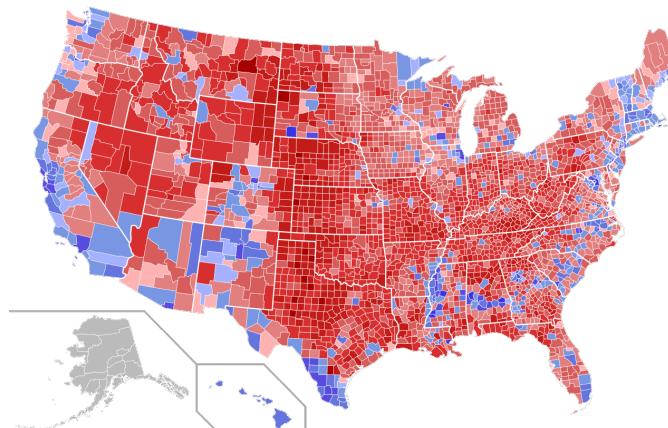
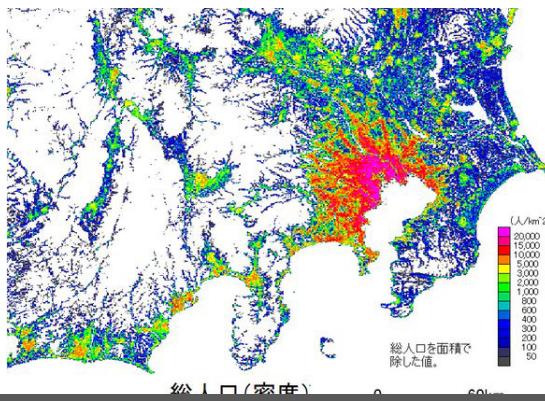
$$\frac{dS}{dt} = -\beta SI$$

$$\frac{dI}{dt} = \beta SI - \delta I$$

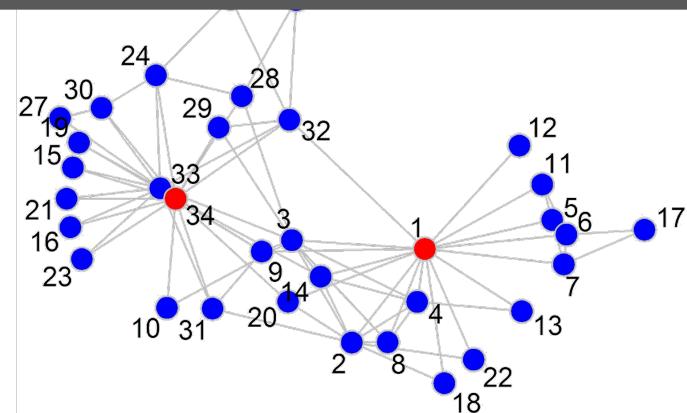
$$\frac{dR}{dt} = \delta I$$

仮定:感受性者と感染者は十分に混じっている





個体ベースのモデルが必要

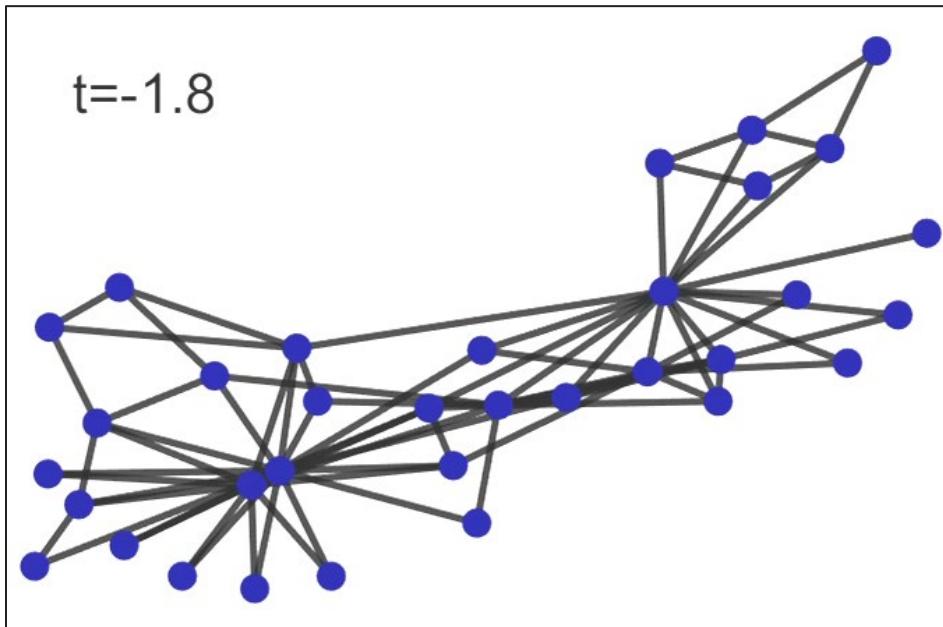


社会的ネットワーク

グラフ + 確率過程

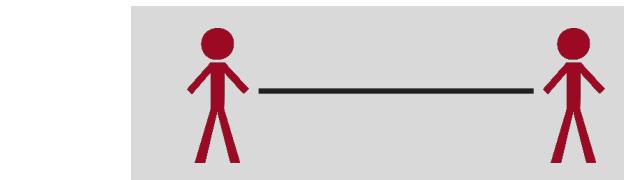
頂点 = 個体

辺 = 関係性

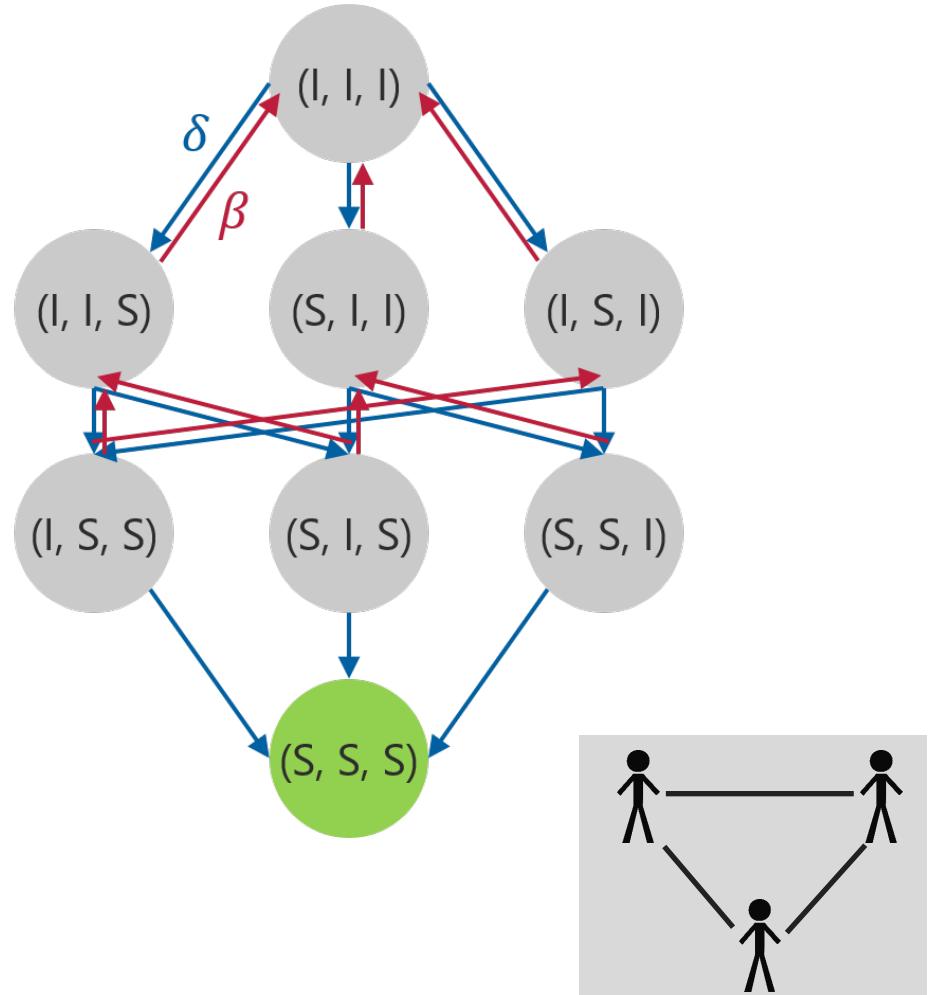
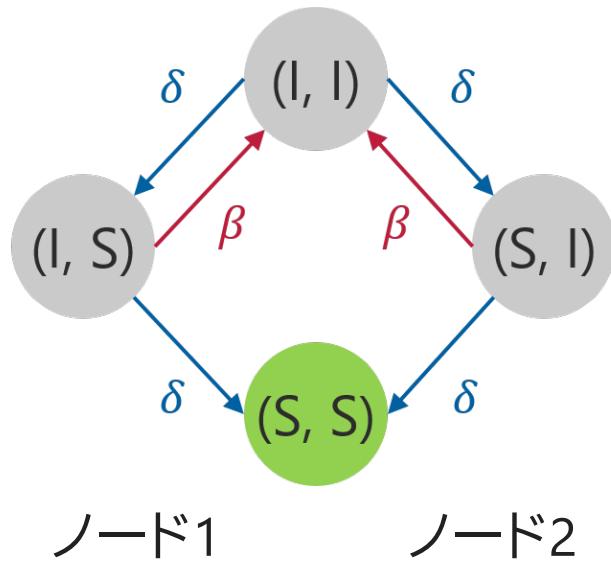


健康

感染

感染率 β 治癒率 δ 

状態遷移図



状態が 2^n 個 ($n = \text{頂点数}$)

- 興味のあるネットワーク $n \geq 100$
- 厳密な解析はほぼ不可能

一次モーメント解析

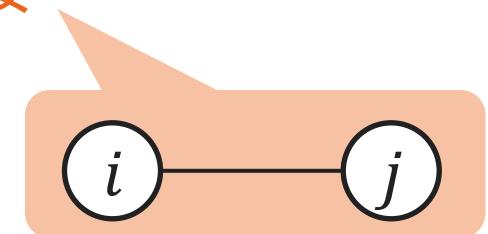
- 感染規模の増加率は

$$\beta \text{ [隣接行列の最大固有値]} - \delta$$

以下である。

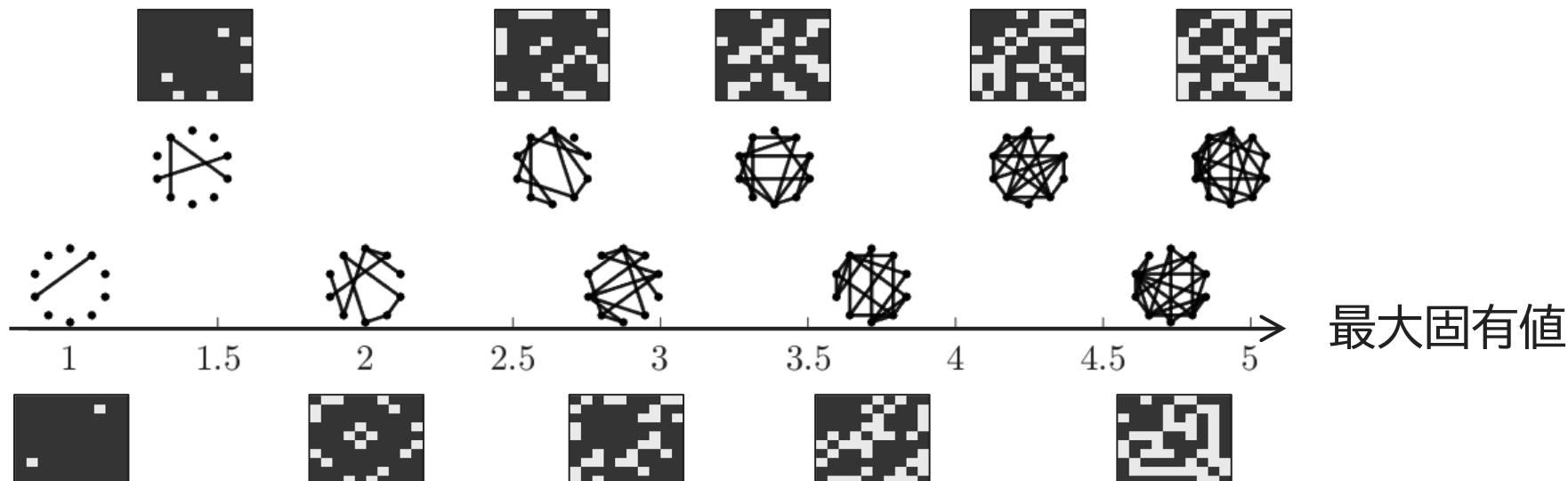
定義（隣接行列）

$$A_{ij} = \begin{cases} 1, & \text{ノード } i \text{ と } j \text{ が隣接} \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases}$$



最大固有値

- つながりの「密度」の尺度
- 辺の追加に関して **単調増加**



社会的距離戦略



マスクの着用

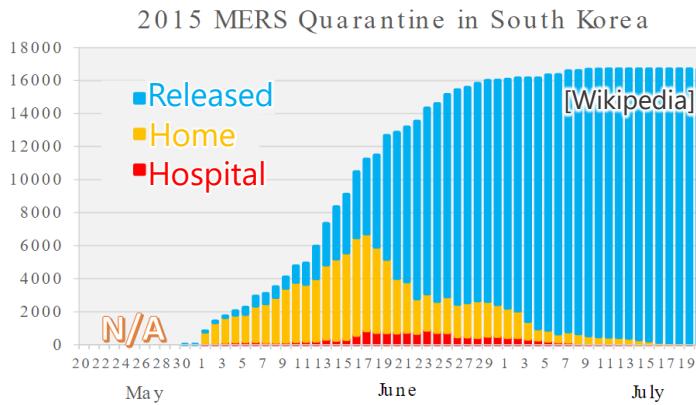


学校閉鎖



検疫

■ 韓国におけるMERS流行



■ 武漢コロナウィルス



社会ネットワークの構造が変化

複雑ネットワーク科学

- T. Gross and B. Blasius, "Adaptive coevolutionary networks: a review," *Journal of the Royal Society, Interface / the Royal Society*, 2008. 882 citations

疫学

- S. Cauchemez et al., "Closure of schools during an influenza pandemic," *The Lancet Infectious Diseases*, 2009. 364 citations

T. Gross and B. Blasius, "Adaptive coevolutionary networks: a review," *Journal of the Royal Society, Interface / the Royal Society*, 2008.

■ 構成

- 1. Introduction
- 2. 適応的ネットワークの分野横断的な普遍性
- 3. ブーリアンネットワークにおけるロバストな自己組織化
- 4. 結合した振動子系における leadership
- 5. 適応的ネットワーク上のゲームにおける協力
- 6. 意見形成と伝播におけるダイナミクスと相転移
- 7. 結論

1. Introduction

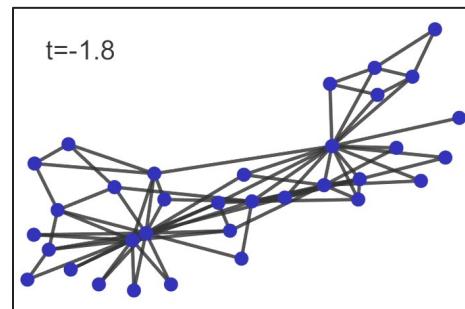
25

■ Dynamics of networks

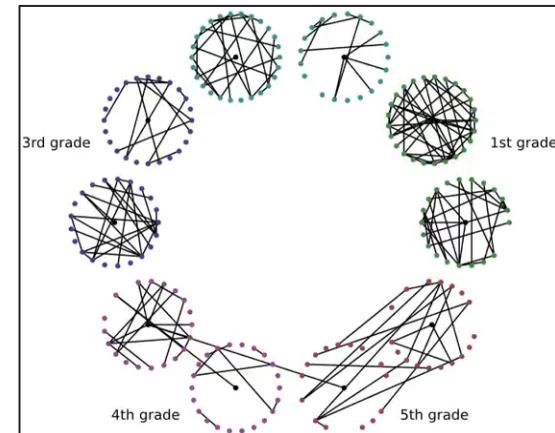
- 接続構造 = 動的システム
- ネットワークの時間発展・変化
- Small-world networks, scale-free networks

■ Dynamics on networks

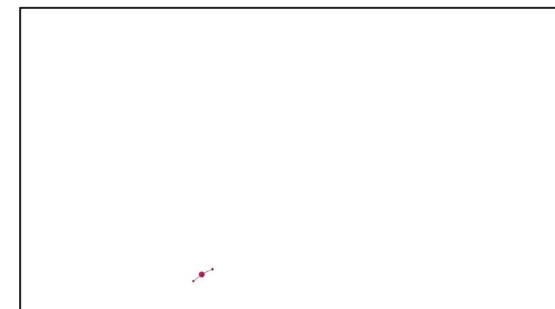
- ノード = 動的システム
- 接続構造は固定
- 同期と伝播
- 例: SIS モデル



SIS モデル



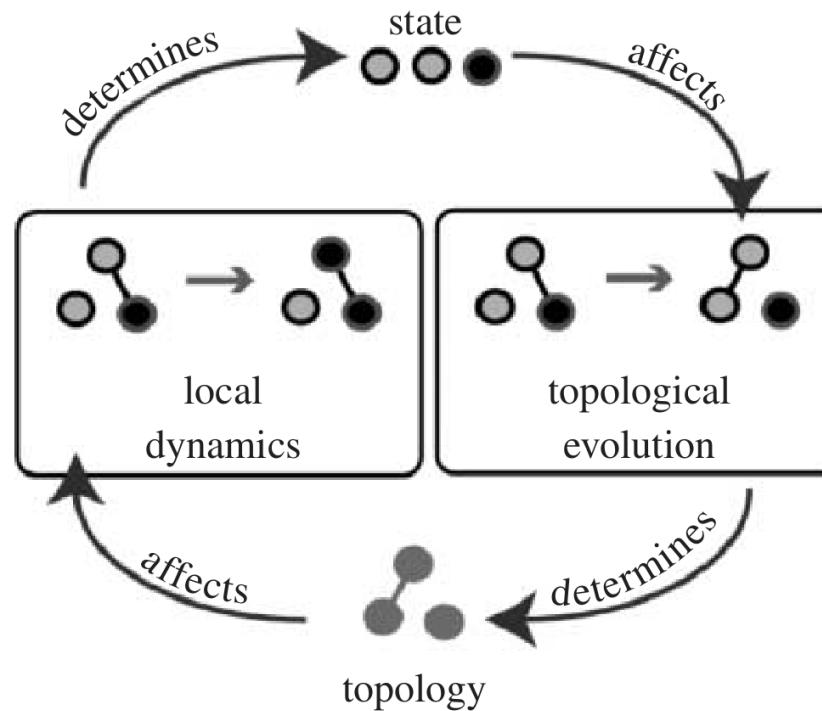
French School



Barabási-Albert preferential attachment model

Adaptive network

■ Dynamics on and of networks のフィードバック





マスクの着用

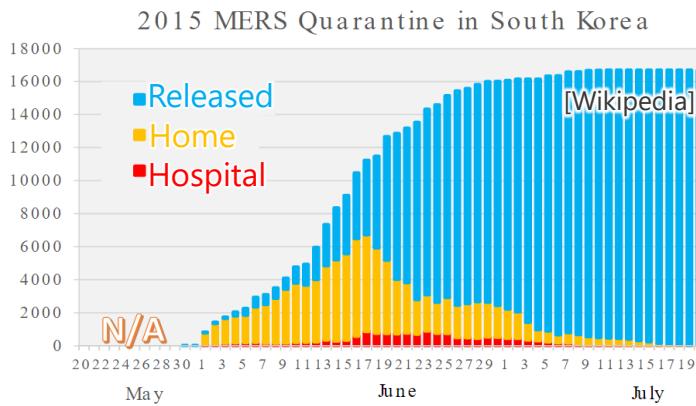


学校閉鎖

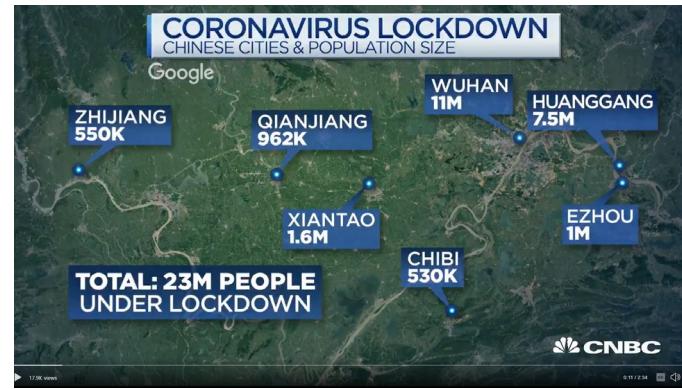


検疫

■ 韓国におけるMERS流行



■ 武漢コロナウィルス



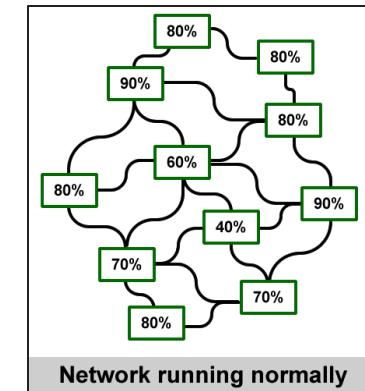
社会ネットワークの構造が変化

2. 適応的ネットワークの分野横断的な普遍性

28

■ 社会インフラ

- 交通網, 電力網, 通信網
- 高負荷 → 故障 → 接続の切断
- 高負荷 → 投資 → 接続を追加



[Wikipedia]



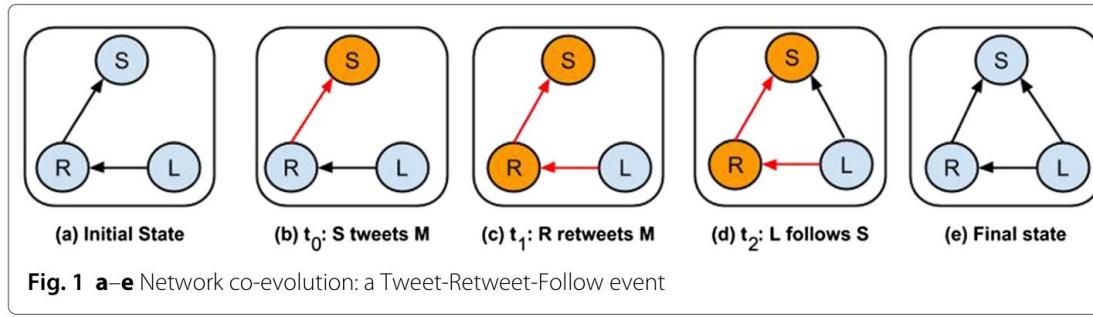
1900年

1964年

2020年

■ 社会ネットワーク

- 意見の合致・相違 → 知人関係への影響



Antoniades, Dovrolis, "Co-evolutionary dynamics in social networks: a case study of Twitter," Computational Social Networks, 2015.

T. Gross and B. Blasius, "Adaptive coevolutionary networks: a review," *Journal of the Royal Society, Interface / the Royal Society*, 2008.

■ 構成

- 1. Introduction
- 2. 適応的ネットワークの分野横断的な普遍性
- 3. ブーリアンネットワークにおけるロバストな自己組織化
- 4. 結合した振動子系における leadership
- 5. 適応的ネットワーク上のゲームにおける協力
- 6. 意見形成と伝播におけるダイナミクスと相転移
- 7. 結論

S. Cauchemez et al., "Closure of schools during an influenza pandemic," *The Lancet Infectious Diseases*, 2009.

■ 構成

- 1. Introduction
- 2. エビデンス
- 3. 社会的・経済的影響
- 4. 実装, コミュニケーション, 相互運用性
- 5. 結論, H1N1インフルエンザ制圧への implication

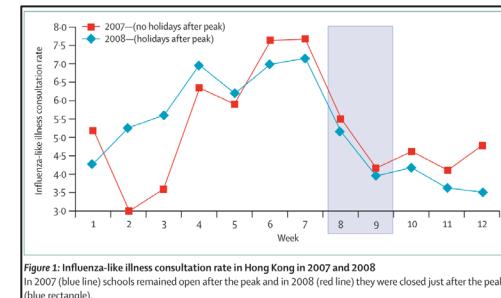
- 分野横断的, 包括的な観点
- 公衆衛生行政としての school closure を概観
- いつどのように school closure が行われるべきか
- 議論は多いが, consensus は得られていない

■ Mathematical modelling of the effect of school closure

- School closure の有用性について様々な結論
- "Those differences in model outputs are because of differences in modelling assumptions."
- 重要なハイパーパラメータ: 感染のうち学校で起こるもの割合
- "Modelling does not therefore provide primary evidence of the likely effect of school closure on transmission".

■ 香港 ('08)

- きっかけ: 2人の生徒の死
- 期間: 2週間
- “no significant effect” [Cowling 2008]



■ イスラエル ('00)

- きっかけ: 教員のストライキ
- 受診件数が 22% 減少
- ストライキ後に受診件数が rebound

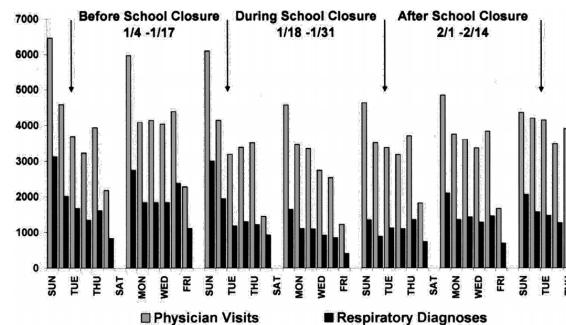


FIGURE 1. Daily physician visits and recorded diagnoses of respiratory tract infections before, during and after school closure.

■ フランス ('84-'06)

- きっかけ: バカンス
- バカンスが無し → 16-18% の感染数増加が見込まれる(シミュレーション)
- 結論の及ぶ範囲は限定的

■ フランス (1957)

- 社会の混乱を心配して、当時の行政は学校閉鎖に消極的
- 閉鎖のしきい値 = 50 – 75 % の感染
- 閉鎖は効果的ではなかったとの判断

■ アメリカ, オーストラリア (1918)

- 学級閉鎖を含む様々な社会的距離戦略の実装
- 教会の閉鎖, 集会の禁止, マスク着用の義務化...
- 実施の早さ, 長さと効果の間に正の相関

経済コスト

■ Sadique et al. ('08)

- イギリスを想定
- 12週間の学校閉鎖 → コストはGDPの 0.2~1.0%

■ Sander et al. ('09)

- アメリカ合衆国を想定
- GDP の 6%
- 治療薬とワクチンによる介入戦略より14~21倍のコスト

Social justice and ethical issues

■ 貧困家庭の子供への支援: 多くは学校施設に依存

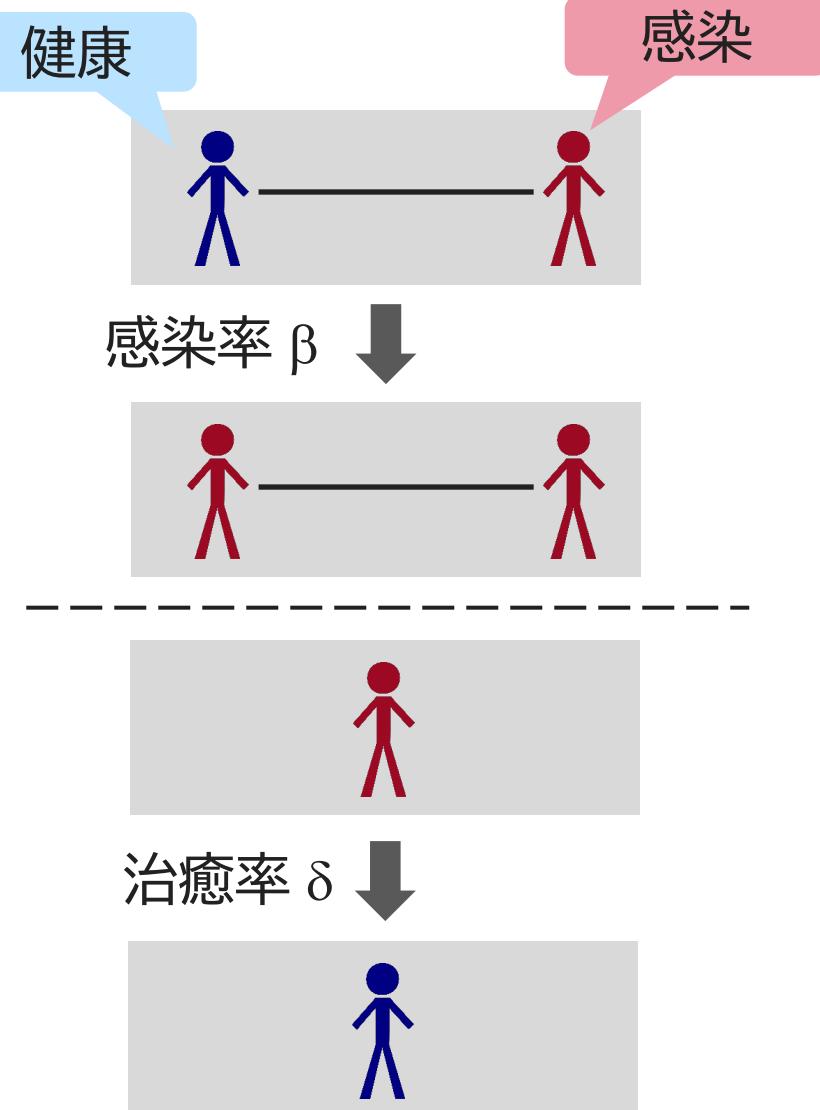
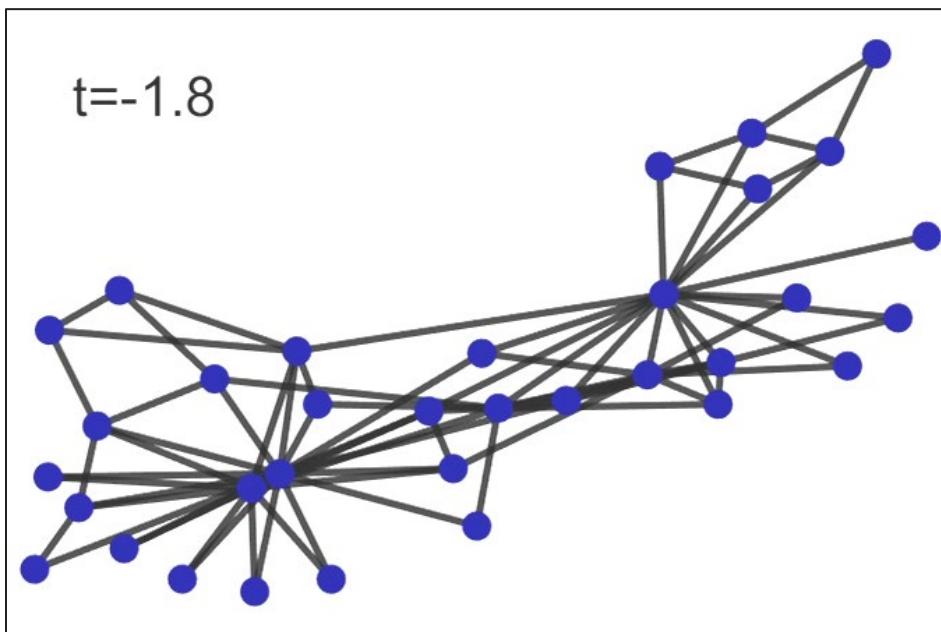
- National School Lunch Program: 3040万人 (2016年)
- School Breakfast Program: 1457万人 (2016年)

研究紹介

グラフ + 確率過程

頂點 = 個體

辺 = 関係性



健康

感染

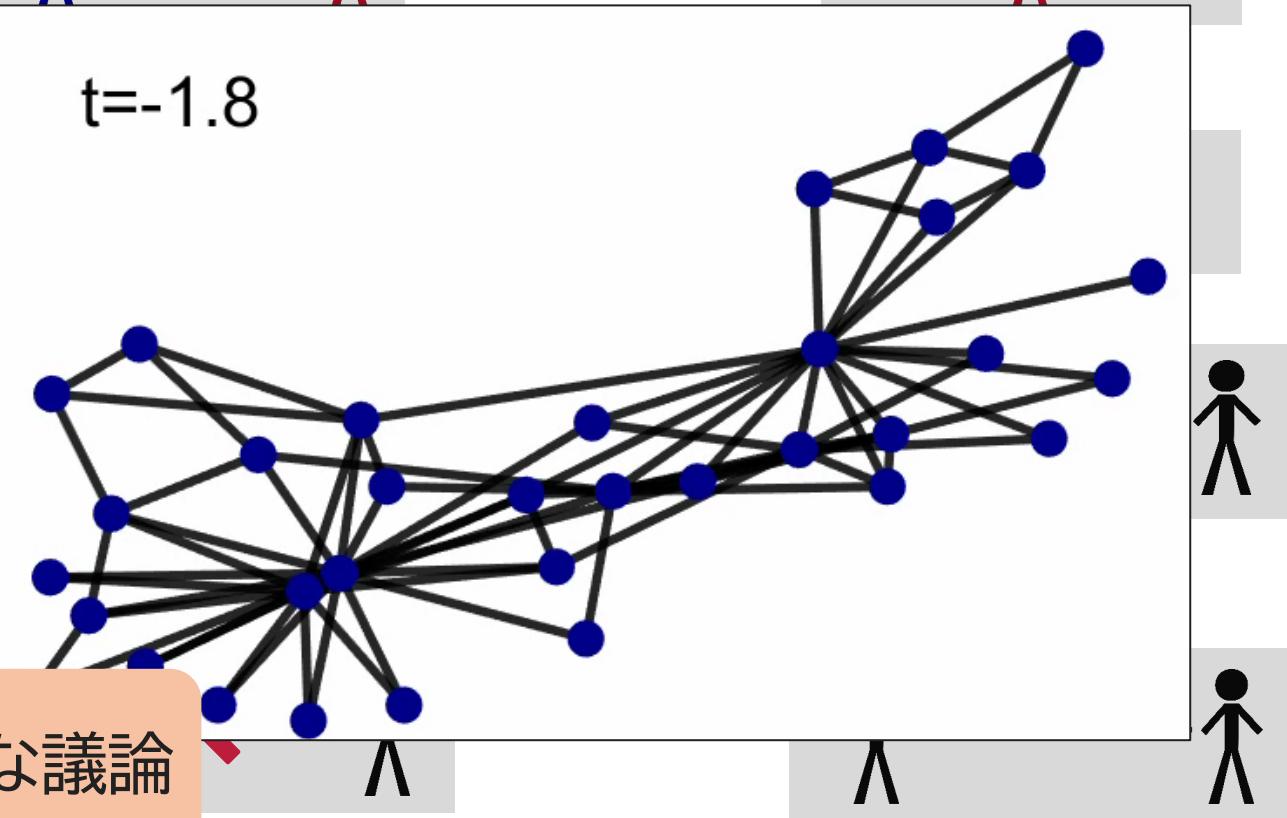
感染

$t = -1.8$

切断率

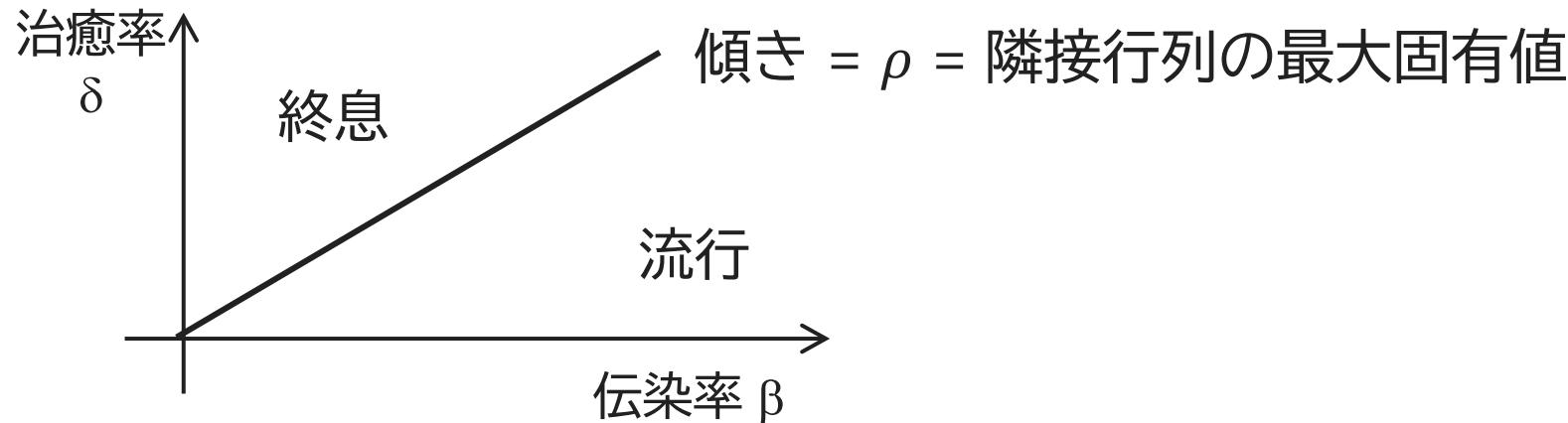
近似的な議論

i

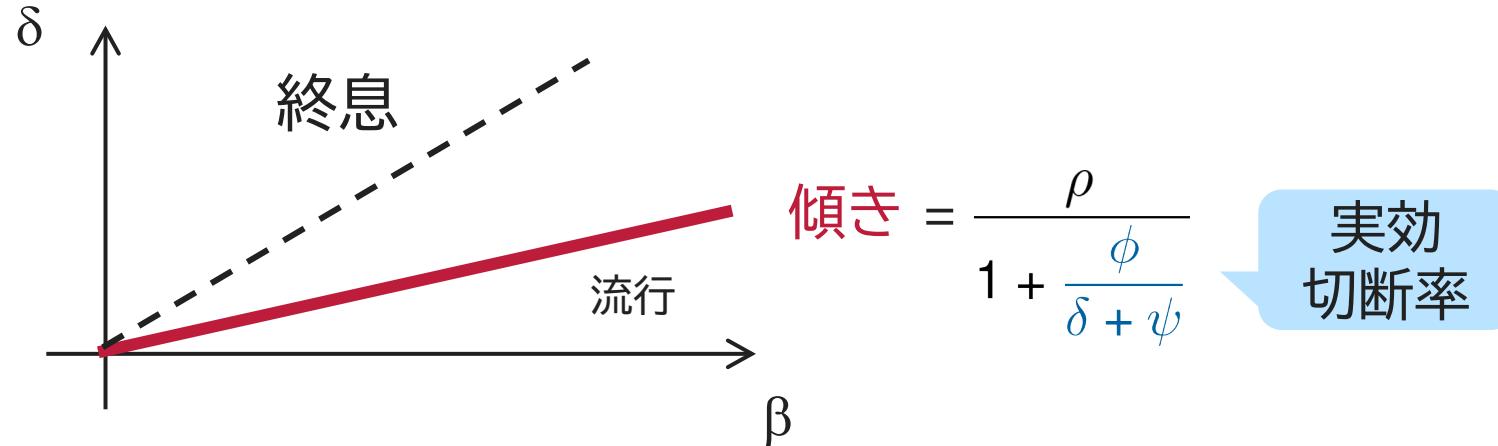


Guo et al., "Epidemic threshold and topological structure of susceptible-infectious-susceptible epidemics in adaptive networks," *Physical Review E*, 2013.

■ SISモデル



■ 適応的なSISモデル



Ogura, Preciado, "Epidemic processes over adaptive state-dependent networks," *Physical Review E*, 2016.

ASIS model = Markov process w/ **exponentially many states**

- Computationally intractable

SDE representation

- Nodal states $x_i \in \{0, 1\}$

$$dx_i(t) = -x_i(t)dN_{\delta_i}(t) + (1 - x_i(t)) \sum_{k \in \mathcal{N}_i(0)} a_{ik}(t)x_k(t)dN_{\beta_i}(t)$$

- Edge states $a_{ij} \in \{0, 1\}$

$$da_{ij}(t) = (1 - a_{ij}(t))dN_{\psi_{ij}}(t) - a_{ij}(t) (x_i(t)dN_{\phi_{ij}}(t) + x_j(t)dN_{\phi_{ji}}(t))$$

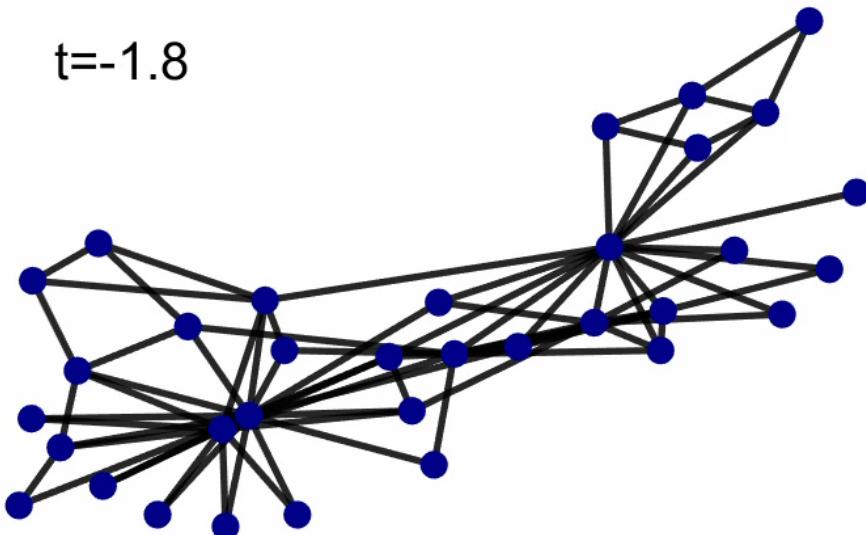
Upper-bound for expectations $p_i(t) = E[x_i(t)]$ $q_{ij}(t) = E[a_{ij}(t)x_i(t)]$

$$\frac{dp_i}{dt} = -\delta_i p_i + \beta_i \sum_{k \in \mathcal{N}_i(0)} q_{ki}$$

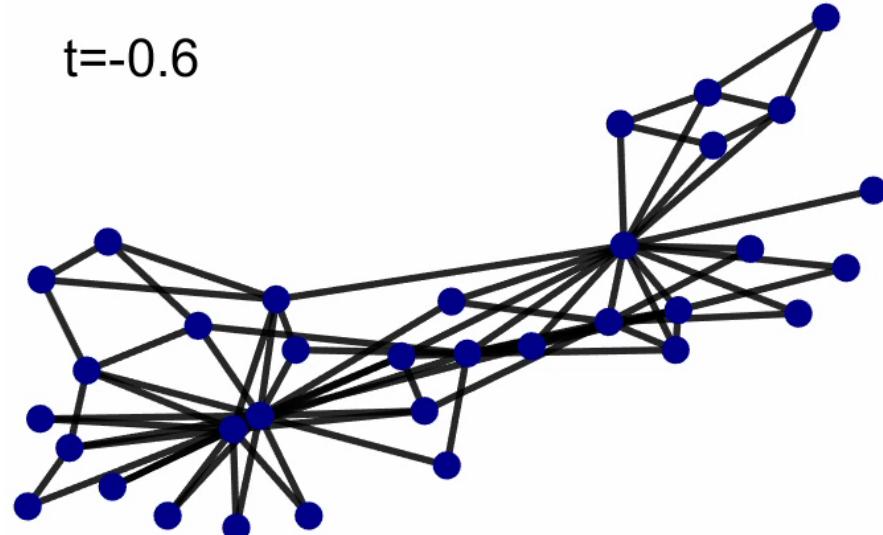
$$\frac{dq_{ij}}{dt} \leq -\phi_{ij} q_{ij} + \psi_{ij}(p_i - q_{ij}) - \delta_i q_{ij} + \beta_i \sum_{k \in \mathcal{N}_i(0)} q_{ki}$$

- 空手ネットワーク
- 伝染率, 治癒率, 再接続率は固定
- クリティカルな切断率 = ϕ^*

小さい切断率 ($\phi = \phi^*/10$)



大きい切断率 ($\phi = 2\phi^*$)



Disease eradication

↔
Trade-off

Keeping societal
functions

■ Question:

How can we tune adaptation rates to eradicate spreading processes while **minimizing societal loss**?

■ Optimization problem:

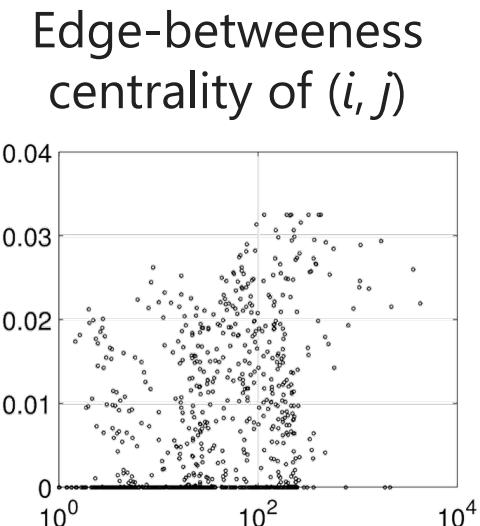
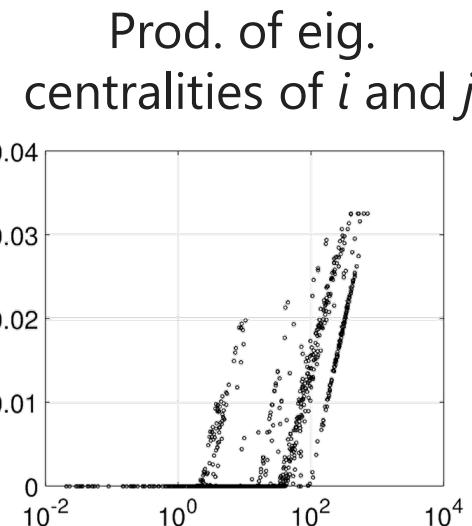
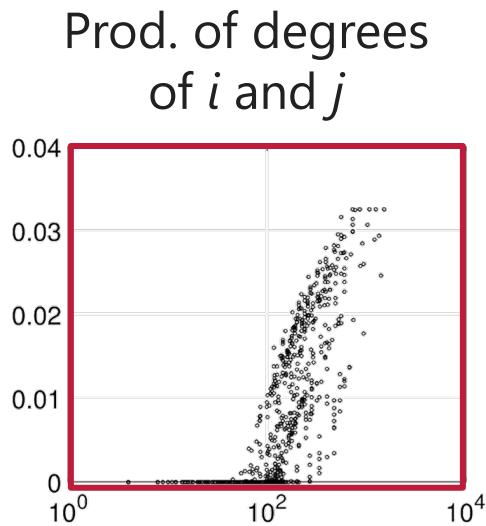
$$\text{minimize } \sum_{i,j} \text{cost}(\phi_{ij})$$

$$\text{subject to } \lambda_{\max} \left(\begin{bmatrix} -D_1 & B_1 \\ \psi_1 & B_2 - D_2 - \Phi - \psi_2 \end{bmatrix} \right) < 0$$

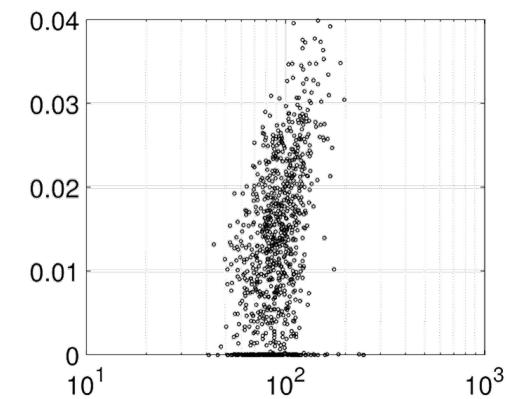
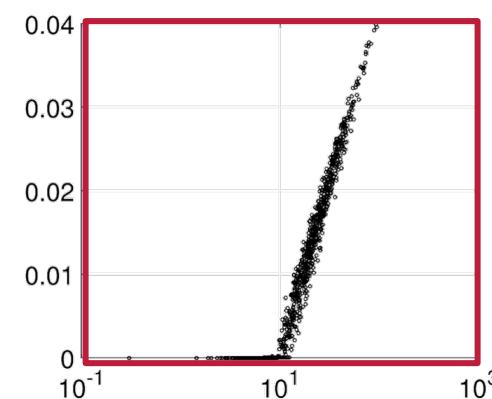
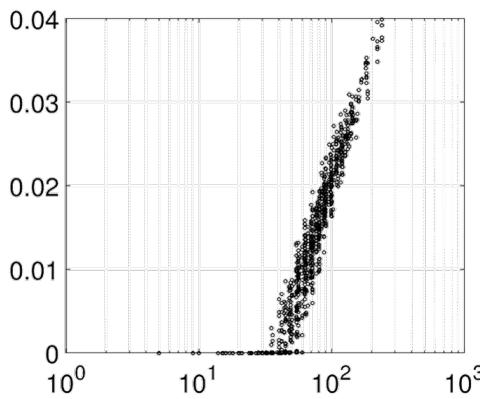
Can be equivalently converted to
a **geometric program**

■ Optimal investment and centralities

A Facebook network



Erdös-Rényi random graph



まとめ

- ネットワーク上の伝播ダイナミクス
- 社会的距離戦略
- 研究紹介