

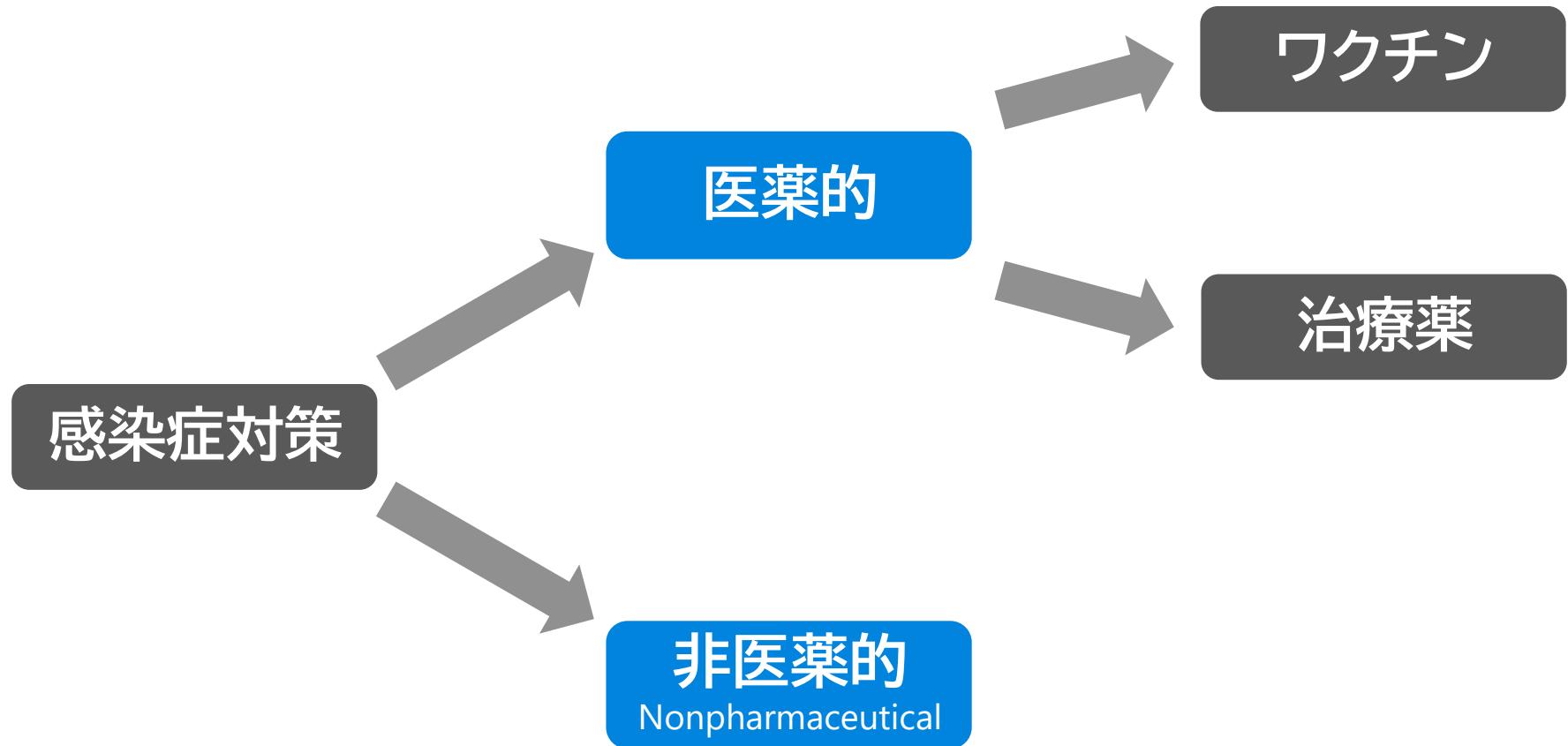
第1回SICEポストコロナ未来社会ワークショップ  
パンデミックとシステム・制御・ネットワーク理論  
6/6/2020

# 社会的距离戦略の数理： ネットワーク科学の観点から

小藏 正輝

阪大 情報科学研究科  
奈良先端大 情報科学領域（客員）

# 感染症対策の分類



# ワクチンの威力

3

[https://www.biken.or.jp/about\\_vaccine/support-society](https://www.biken.or.jp/about_vaccine/support-society)

## 天然痘

1958年～世界天然痘根絶計画を実施。

世界を挙げて徹底的なワクチン接種を実施。

400万人  
1958年 推定死亡者数(世界)

根絶  
1980年5月 根絶



[参考] 国立感染症研究所HP

## ポリオ

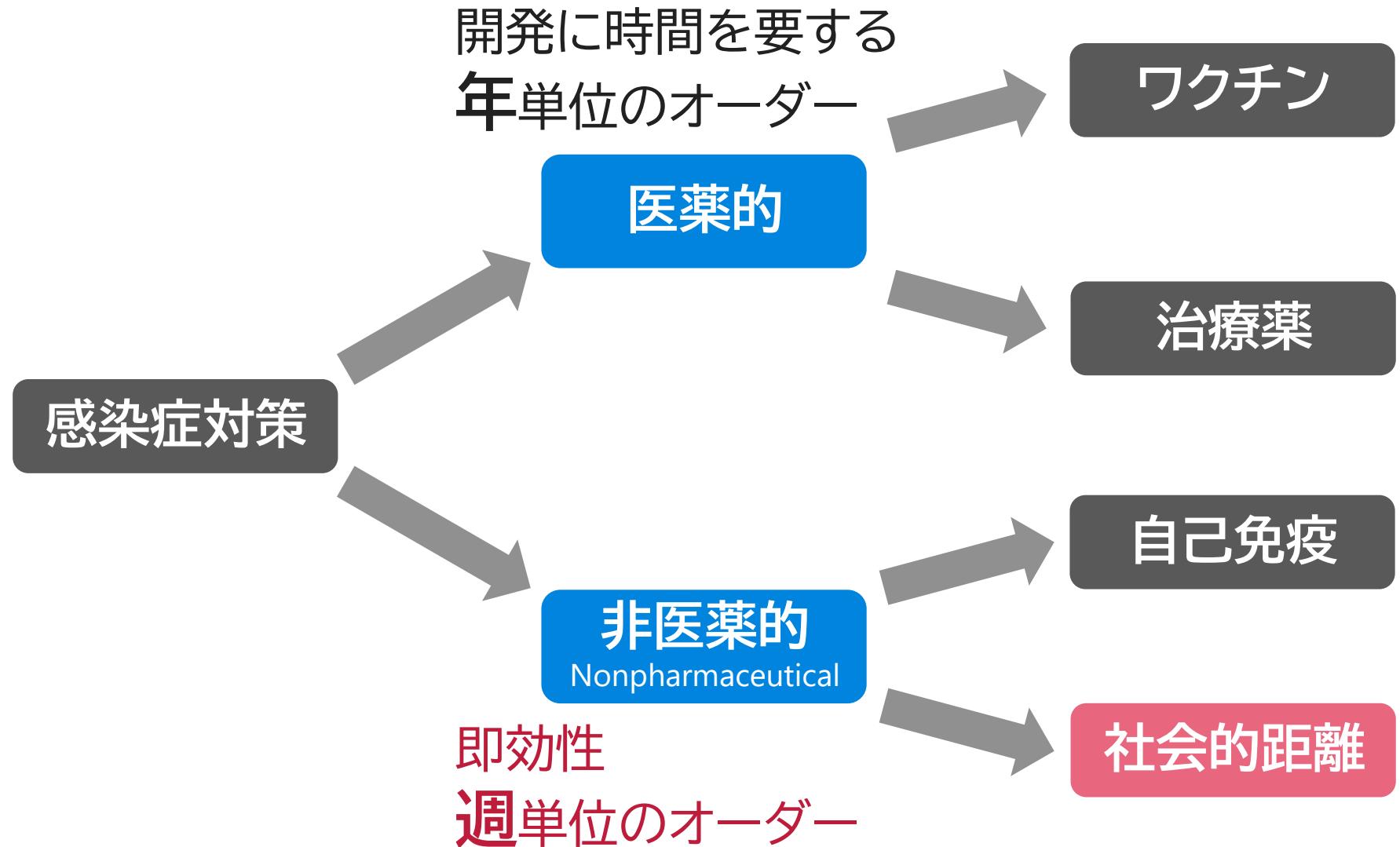
1988年～世界ポリオ根絶計画を実施。

世界を挙げて予防接種を実施する取り組みを続け、症例数は28年間で99%減少。世界からポリオを根絶するまであと一歩。



[参考] 日本ユニセフ協会HP

# 感染症対策の分類



# 社会的距离戦略

5

人と人の間の接触を少なくする



マスクの着用

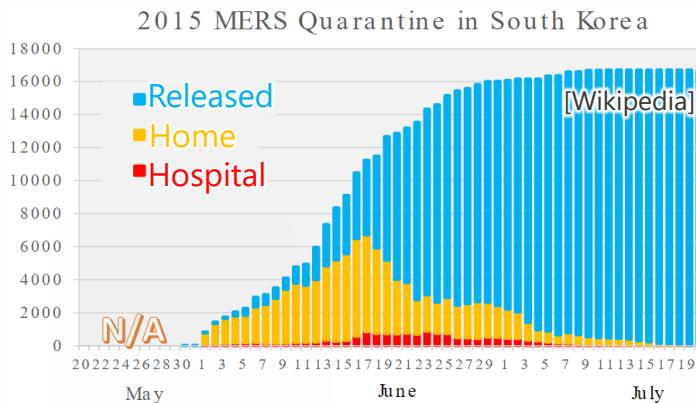


学校閉鎖



検疫

## ■ 韓国におけるMERS流行



# 社会的距离戦略

人と人の間の接触を少なくする

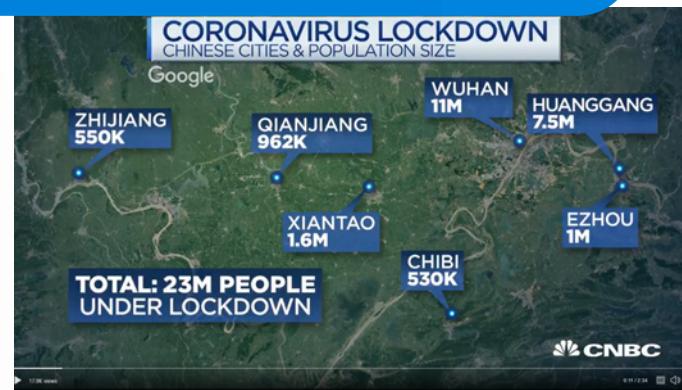
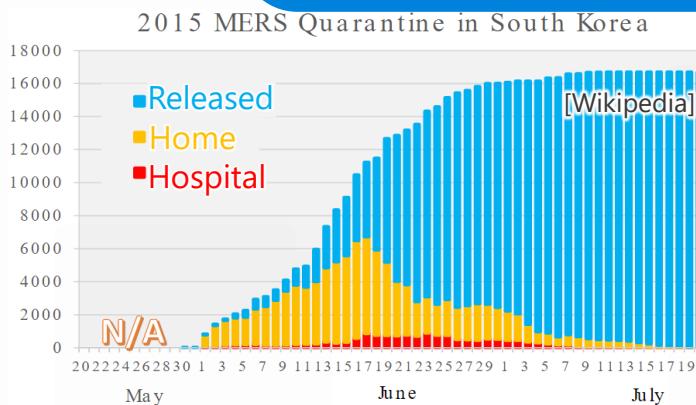


マスク



数理モデルはあるか?  
どの程度 tractable か?  
制御はきくか?

## ■ 韓国に



# 人間集団 = 社会的ネットワーク

6

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/>

Network Science: Introduction

# Susceptible-Infected-Susceptible モデル

7

感染

ダイナミクス

健康

感染



感染率  $\beta$  ↓



社会的ネットワーク

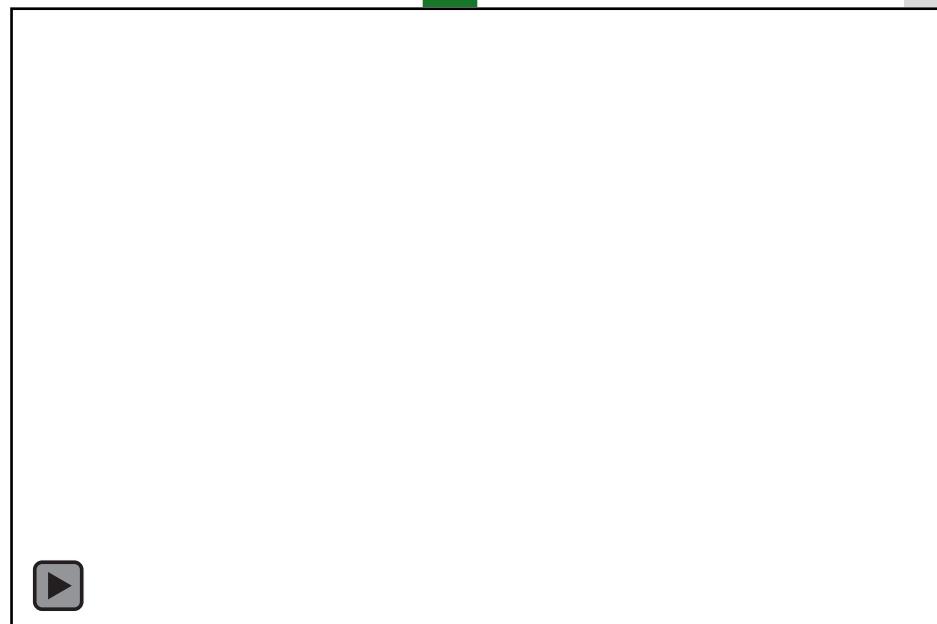


治癒

ダイナミクス



↓ 治癒率  $\delta$



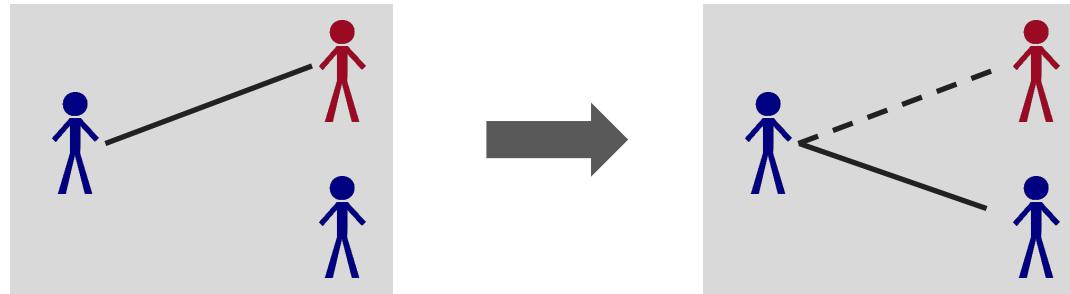
# Susceptible-Infected-Susceptible モデル

7



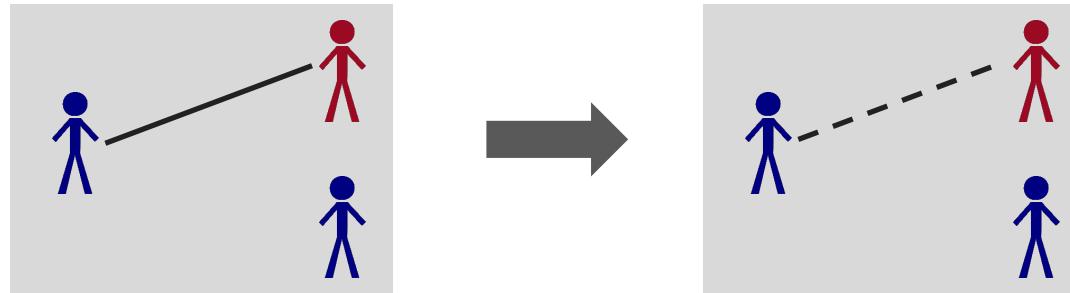
# 社会的距離戦略を組み込む

## ■ 辺の張りかえ [Gross 2006, Lagorio 2008]



- 利点: 次数が保存
- 欠点: 現実的とは限らない?

## ■ 辺の切断 [Guo 2013, Ogura 2016, Achterberg 2020]



- 次数は保存されないが, 現実に近そう

# 適忾的なSISモデル

健康



感染

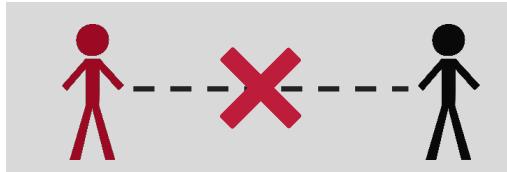
感染率  $\beta$



治癒率  $\delta$



切断率  $\phi$

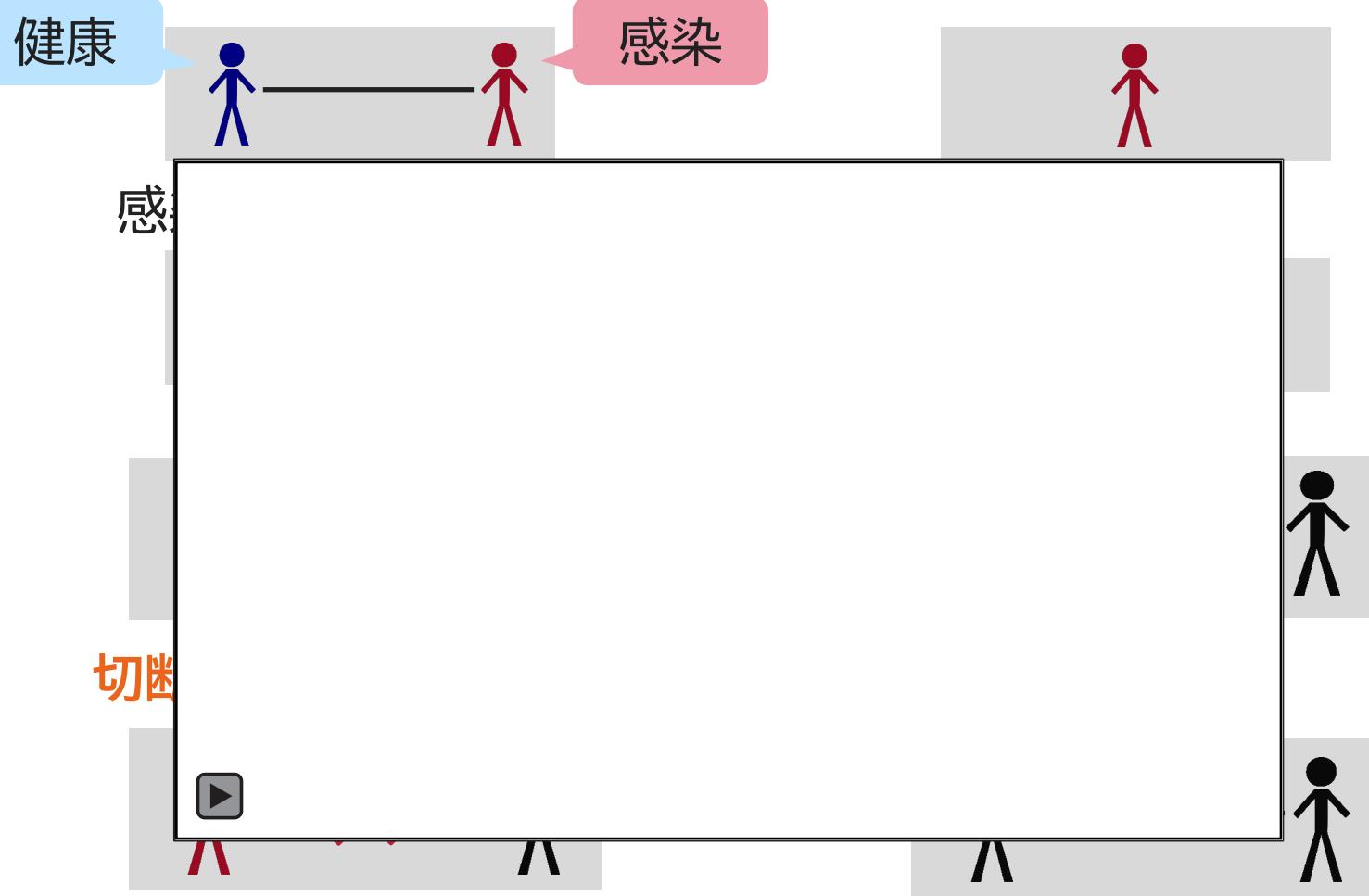


接続率  $\psi$



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

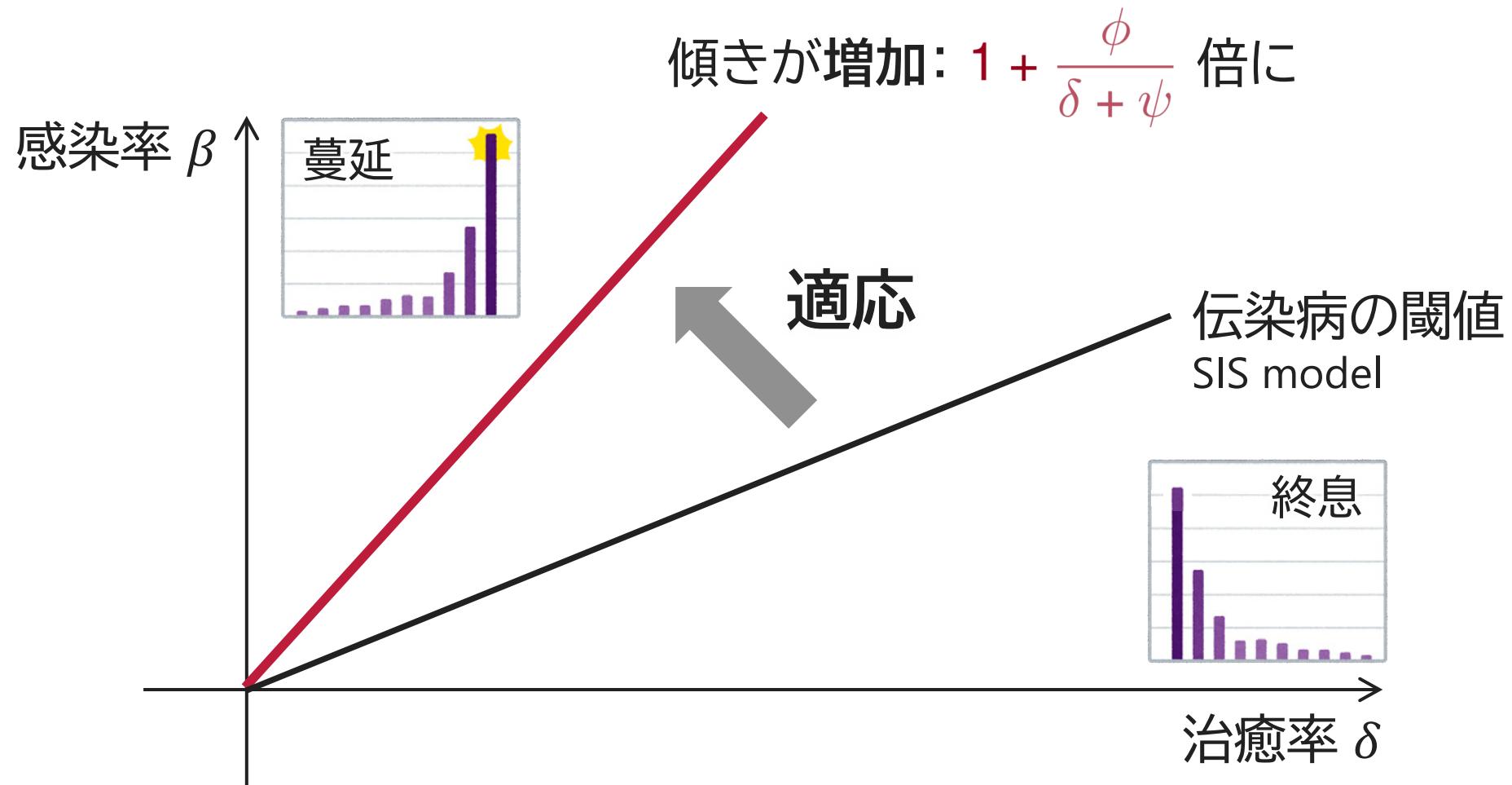
# 適忾的なSISモデル



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

# 適応による相図の変化（解析）

10



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

# 閾値の導出

制御工学のスタイルが役立つ

上から抑える  
Poisson 型の  
確率微分方程式

固有値解析

Adaptive  
SIS model



線形システム



伝染病の閾値

- 状態数 =  $2^{N+M}$
- 厳密な解析は不可能
- 非負性
- 状態数 =  $N + M$
- 閾値の **bound**
- 原点近傍で正確

# コスト最適な社会的距離

感染症の抑え込み

↔  
トレードオフ

社会機能の維持

## ■ 最適化問題

感染症の抑え込みを保証し, かつ社会の損失を最小化するようにそれぞれの辺の切断率を指定せよ

## ■ 数学的には

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

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

幾何計画 → 凸最適化問題へ

# 他の理論的な話題

- **自律的に変化する適応ネットワーク** [MO, Masuda, Preciado, *SIAM J. Appl. Math.*, 2019]
  - Adaptive activity driven model
  - 凸最適化によるコスト最適な社会的距離戦略
- **社会ネットワークの不確定性** [MO, Kishida, Lam, *IEEE TAC*, 2020]
  - プライバシの問題
  - コンタクトネットワークを既知部分と不確定部分に分解
  - 非負システムの理論 + 構造特異値の理論
- **感染確率の下界** [Chen, MO, Preciado, *IEEE TNSE*, 2020]
  - 精度良い(とされる)上界は存在 [Cator, Van Mieghem, *PRE*, 2014]
  - Moment problem への帰着を通じた下界の計算

## 社会的距離戦略の数理

Adaptive SIS model  
Rewiring model

