

# 感染症流行下での人の接触ネットワークの構造と実効再生産数の妥当性の関係

○三須由希 高橋真吾(早稲田大学)

## The Relationship between the structure of the human contact network and the validity of the effective reproduction number under infectious disease epidemic

\*Y. Misu and S. Takahashi (University of Waseda)

**概要-** 現在も感染拡大が続いている新型コロナウイルスについて、その感染状況を示す指標にはいくつかの種類がある。本研究では実効再生産数に着目した妥当性評価について新たな知見を得るべく、社会における人のネットワーク構造が実効再生産数の妥当性に与える影響について検証する。先行研究では、報告される新規陽性者数の不確実性と世代時間の不確実性が実効再生産数の妥当性に与える影響について、仮想人工社会のモデルを用いて検証されている。

**キーワード:** 新型コロナウイルス, 実効再生産数, エージェントベースシミュレーション, 複雑ネットワーク

### 1 研究背景

日本で国内初の新型コロナウイルス感染患者が確認されてから既に1年以上が経過しているが、未だに流行は終息せずむしろ拡大傾向にある。こうした感染状況を評価する指標の1つとして実効再生産数  $R_t$  (以下  $R_t$ ) がある。  $R_t$  とは「(ある時刻  $t$  における、一定の対策下での) 1人の感染者による二次感染者数」<sup>1) 2)</sup>である。この指標に着目することで感染症の流行の状況のある程度把握することができる。

実社会ではいつ誰が誰に感染させたかを観測することはできないため、発表される  $R_t$  の値は新規陽性者数を利用して推定を行ったものである<sup>3)</sup>。しかし新規陽性者数は診断を受けて報告された患者の数であり、すべての感染者の数ではない。また、患者が感染した日を正確に知ることが難しいため、新規陽性者数を用いた  $R_t$  の推定には不確実性が存在する。

この不確実性により、現在の方法で推定される  $R_t$  の妥当性についての検討の必要性が生じる。特に感染者数は線形的ではなく急激に増加するようなケースが何度も見られており、背景には社会における人の繋がり(ネットワーク)が深く関係している<sup>4)</sup>。そこでエージェントベースモデルによる仮想人工社会を用いて、ネットワークの構造が  $R_t$  の妥当性に与える影響について評価を行うことを目的とする。

### 2 先行研究

#### 2.1 SIR モデル

SIR モデルは直接伝播する感染症の流行をボトムアップ式に表したモデルである。対象の人口を

Susceptible(感受性者), Infectious(感染者), Recovered(回復者)に分け、各人口の変化を

$$\frac{dS(t)}{dt} = -\beta S(t)I(t)$$

$$\frac{dI(t)}{dt} = \beta S(t)I(t) - \gamma I(t) \quad (1)$$

$$\frac{dR(t)}{dt} = \gamma I(t) \quad \beta : \text{感染率} \quad \gamma : \text{回復率}$$

と表す。初期に感染者が流入する前の状態  $(S(t), I(t), R(t)) = (1, 0, 0)$  で(1)式を線形化すると

$$\frac{dI(t)}{dt} = \beta I(t) - \gamma I(t) = (\beta - \gamma)I(t) \quad (2)$$

となる。この(2)式を「ある生物群の個体数の増加速度は個体数自体に比例する」というマルサスモデルに当てはめて解くと

$$I(t) \approx I_0 e^{(\beta - \gamma)t}$$

となり ( $I_0$  は初期に流入する感染者数),  $\beta - \gamma > 0$  のときに感染が拡大していくことが分かる。これは  $\beta/\gamma > 1$  と変形することができ、  $\beta/\gamma$  を基本再生産数  $R_0$  と呼ぶ<sup>2)</sup>。

#### 2.2 実効再生産数 $R_t$

基本再生産数  $R_0$  が「(すべての個体が初期に感受性を有する状態で) 1人の感染者当たりが生産する2次感染者数」であるのに対して、実効再生産数  $R_t$  は「(ある時刻  $t$  における、一定の対策下での) 1人の感染者による2次感染者数」と定義されている<sup>2)</sup>。

実際にすべての感染者や感染経路を観測することはできないため、現在は以下のような推定式<sup>5)</sup>を用いて、  $R_t$  を算出している。

$$R_t = \left( \frac{J_{k+1}}{J_k} \right)^{\frac{1}{\Delta t}}$$

$J_{k+1}$  : 直近 7 日間の新規陽性者数  
 $J_k$  : その前 7 日間の新規陽性者数  
 $\mu$  : 平均世代時間(=5 日)  $\Delta t$  : 報告間隔(=7 日)

### 2.3 感染症と複雑ネットワーク

個体のネットワークにおける相互作用から、全体としてどのような振る舞いが生まれるかを探るのが複雑ネットワークの研究である。複雑ネットワークの重要な特徴量として次数、平均頂点間距離 $L$ 、クラスター係数 $C$ などがある。次数の分布がべき乗側に従う場合をスケールフリーと呼ぶ。また、現実の複雑ネットワークの大半は、 $L$ が小さく $C$ が大きいスモールワールド性を持つとされている<sup>6)</sup>。

湯浅ら<sup>7)</sup>はネットワーク上での SIR モデルを用いて、ネットワーク構造と感染症の伝播ダイナミクスの関連性を分析する研究を行った。

ネットワーク

ノード数 10000, 平均次数 8

6 種類のモデルとそのパラメータによって 12 種類のネットワークを作成

統計的指標

平均頂点間距離 $L$ , クラスター係数 $C$ , 次数相関 $r$   
結果

非スケールフリーネットワークの場合

- ・ $L$ も $C$ も小さいほど感染が拡大しやすい
- ・小規模感染→ $L$ が小さいほど流行期間が短い
- ・大規模感染→ $C$ が小さいほど流行期間が短い

スケールフリーネットワークの場合

- ・正の次数相関が感染拡大を抑制( $r$ の影響)
- ・ $C$ の増大による感染拡大の抑制効果は非スケールフリーの場合より小さい
- ・全体的に非スケールフリーより流行期間が短い
- ・ $L$ が影響を与える一方で $C$ の影響は小さい

結論と課題

既存研究の知見の再確認と、統計的指標が感染症の流行期間や規模に与える影響について新たな知見を得た。 $L$ と $C$ が相関の中で与える影響や次数相関の与える効果についての分析が今後の課題である。

### 2.4 仮想人工社会モデル

鴻池<sup>8)</sup>は行動モデル・病態遷移モデル・感染モデルから構成される仮想人工社会モデルを構築し、シミュレーションを行った。モデル上では定義通りの $R_t$ の計算が可能で、その値と推定式を用いて計算し

たときの値を比較して $R_t$ の妥当性を検証している。

実験では新規陽性者数の不確実性と世代時間の不確実性について検証されている。新規陽性者数の不確実性については発症後に診断を受ける確率でシナリオ分析をしており、これが高いほど推定式による実行再生産数の妥当性は高くなった。世代時間の不確実性については家庭内感染率でシナリオ分析をしているが(家庭内感染率が大きくなれば感染者が増え、不確実性が大きくなると考えている)、これは $R_t$ の妥当性に影響を及ぼさなかった。

### 3 研究目的

湯浅らの研究では、ネットワーク構造と感染症流行の速度や規模との関連が確認された。また鴻池の研究では個人の行動やウイルスの感染率による不確実性が $R_t$ へ与える影響が検討されていた。

この2つの研究をもとに、ネットワーク構造が $R_t$ の妥当性に与える影響について検討することを本研究の目的とする。モデルは鴻池の行動モデルをベースとし、そこから人の接触ネットワークを生成して構造の分析を行うことで新たな知見を得たい。

### 参考文献

- 1) 国立感染症研究所: COVID-19 感染報告者数に基づく簡易実効再生産数推定方法, <https://www.niid.go.jp/niid/ja/diseases/ka/corona-virus/2019-ncov/2502-ids-c/iasr-in/10465-496d04.html>, 2021.06.29(2021)
- 2) 西浦博, 稲葉寿: 感染症流行の予測: 感染症数理モデルにおける定量的課題, 統計数理, 第 54 巻(2 号), 461-480(2006)
- 3) 東洋経済オンライン: 新型コロナウイルス 国内感染の状況, <https://toyokeizai.net/sp/visual/tko/covid19/>, 2021.08.09(2021)
- 4) 大澤幸生ほか: 新しい社会ネットワークモデルを用いた感染拡大抑制戦略の創出, 内閣府(2020)
- 5) 西浦博: 実効再生産数とその周辺, 日本科学技術ジャーナリスト会議, <https://live2.nicovideo.jp/watch/lv325833316>, 2020.05.12(2020)
- 6) 増田直紀, 今野紀雄: 複雑ネットワークの科学, 産業図書株式会社(2005)
- 7) 湯浅友幸, 白山晋: 感染症流行予測におけるネットワーク構造の影響分析, 人工知能学会全国大会論文集 24 回, 1-4(2010)
- 8) 鴻池陸: 仮想人工社会を用いた感染症指標の評価, 早稲田大学経営システム工学科卒業論文(2021)