

時間可塑的マスク装着戦略による感染症パンデミック防止効果

近藤，龍哉

九州大学大学院総合理工学府総合理工学専攻機械・システム理工学メジャー

<https://hdl.handle.net/2324/7358399>

出版情報：九州大学，2024，修士，修士
バージョン：
権利関係：



時間可塑的マスク装着戦略ゲームによる感染症パンデミック防止効果

複雑系社会環境科学研究室 近藤 龍哉

1. 緒言

COVID-19 のパンデミックに対し、各国は様々な感染対策を講じてきた。日本では、現在でこそ社会的に安定した対応が可能であるが、感染拡大から3年の間に緊急事態宣言やまん延防止等重点措置などによる社会活動の制限や、マスクの着用推奨がなされた。私たちは、これまでにワクチン接種を取り入れた感染伝搬のダイナミクスや、それを個人のストラテジーとした時の戦略安定性を検証してきた。これに対してマスクは、その装着期間を比較的自由に決定でき、結果としてコストを抑えつつ感染予防ができるという利点がある。社会全体を見た時も、感染症伝搬を局所的に封殺し得、複雑ネットワークにおける感染症の伝搬に効果的な働きをし得ると考える。したがって、マスクの感染防御効率とそのコストを変数とし、その効果や特徴を理解することは私たちが取り組むべきテーマの一つである。

そこで本研究では、Multi Agent Simulation (MAS) を用いて、新たなマスクゲームの感染症モデルを構築した。

2. モデル

2.1 基盤グラフ

Watts & Strogatz による WS-SW モデル⁽¹⁾に従い、平均次数 $\langle k \rangle = 8$ 、及び short-cut 確率 $p = 0.01 \sim 0.05$ 、粒子数 10^4 の SW と、Barabasi-Albert⁽²⁾による平均次数 $\langle k \rangle = 8$ の SF を採用した。

2.2 感染症モデル

感染症伝搬におけるモデルは Kermack & McKendrick⁽³⁾による SIR モデルに依る。S は感受性を持った個体、I は感染している個体、R は完全免疫を持つ回復個体である。季節性インフルエンザに則って、I から R への遷移確率 $\gamma = 1/3[\text{day}^{-1}]$ とした。感染率 β は、Fu⁽⁴⁾らの有効感染率の定義に従って、それぞれの基盤グラフにおいてワクチンやマスクの介入なしで FES が 0.9 を超える最小の β を採用した。また、SIR に加え、マスク着用状態の感受性個体を M、マスク着用状態の感染個体を MI とする。マスクによる感染率軽減は2種類に分けられる。1 つ目は、マスクを着けているノードが隣接する感染個体から感染する確率を $1 - e_1$ 倍に低減するもの、2 つ目は、マスクを着けているノードが隣接する感受性個体に感染させる確率を $1 - e_2$ 倍に低減するものである。この効果は重複して機能し、例えば、M が隣接する MI から感染する確率は $\beta(1 - e_1)(1 - e_2)$ となる。また、従来のワクチン接種ゲームでは、相手に感染させる確率を低減する効果(e_2 に該当する)はなく、自分の感染率低減のみの効果であった。このようなワクチン接種ゲームとの比較を適切にするため、本研究ではこの e_1 と e_2 が統合

(integrated) された e_i を次のように定義した。

$$e_i = 1 - (1 - e_1)(1 - e_2) \quad (1.1)$$

明記しない場合、 e_1 と e_2 の比率は 1:2 である。MI から R への遷移確率は γ である。

2.3 マスクゲームモデル

一般的な 2×2 ゲーム同様、(C; cooperation, D; Defection)の2戦略のうちどちらかを各ノードが保有している。C 戦略は、「自分が感染個体である」、または、「一次隣接ノードに感染個体が1以上存在する」場合、マスクを着用し、S なら M、I なら MI への状態遷移を行う。マスク着用には着用時間当たりのコストがかかる。コストは 0.0 から 1.0 まで動く変数としてその感度を観る。マスクを着用した時間に応じて、そのコストがノードの利得から引かれる。マスクコストの他にノードの利得変動に関わるのが感染時コストである。ノードは感染した瞬間に 1.0 の感染コストを支払う。

戦略更新はシーズンが終わるごとに行い、IB-RA の戦略更新規則に依る。戦略更新を繰り返し、連続した前後 10 シーズンの平均協調率の差が 1%以下になると収束したとみなし、シミュレーションを終了する。

3. 結果及び考察

3.1 ワクチン戦略ゲームとの比較

先行研究では、ワクチン戦略による感染症伝搬防止効果に関する研究がなされているが、本研究で主に使用する Small-World ネットワークにおけるシミュレーションは新たな試みである。したがって、比較のためにワクチン戦略ゲームにおける感染伝搬シミュレーションを行った。ワクチン戦略ゲームでは、C 戦略をとるものがシーズンの最初にワクチンコストを一括で支払い、その対価にシーズンを通して感染防御効率 η を獲得する。ワクチン戦略ゲームにおいてはこれを efficiency モデルと呼んでいる。Fig.1 はワクチン戦略ゲームとマスク戦略ゲームのヒートマップによる比較である。マスク戦略ゲームの特徴的な点は、1 シーズンあたりのコストが 1.0 に近づいても FES が 1.0 に漸近しないことである。これはネットワーク協調率や ASP にも共通して見られる。ワクチンゲームでは、感染コストと同コストでワクチンを接種することに意味がないため、C 戦略が生き残れないが、マスクは着脱可能で効率的に防御できるため、相対コストが 1.0 付近でも協調率は 0.5 程度に落ち着く。

また、相対コスト 0.4 以下では防御効率が高まると逆に協調率が下がる特徴が見られる。これは、フリーライダーの増加によるものであり、感染が広がった領域では局所的に C 戦略が増え、拡大前に収束が起こりやすくなるためである。その結果、感染が広がらなかった場所では戦略比率がほぼ初期値

のままとなる。ASPを観察すると、防御効率が大きくなるほどASPも増加することが確認され、この考察の妥当性を裏付けている。

続いて、Fig.2 はマスクの2つの防御効率 e_1, e_2 の関係を变化させた場合の結果である。予想通り、自分に対する得が高い下段になるほど協調率が高くなり、結果的にFESの臨界も低防御効率側に移動する。補足として、 $e_1 = e_2$ の時、それぞれの値は $1 - \sqrt{1 - e_i}$ であり、 $e_1 : e_2 = 1:2$ の時、 $e_1 = \frac{3 - \sqrt{9 - 8e_i}}{4}$ である。

現実的にマスクがどれだけ感染防御に関与するかという点や、ワクチン接種後の感染コストが未接種の時と不変である点等、現実の複雑さを再現するには至らないが、基礎的な理論モデルとしての価値は十分である。

Fig.3 は、ワクチンゲームとマスクゲームの社会的超過負担；SED（Social efficiency deficit）の比較結果である。ASPの大きな領域に大きな違いがあることがわかる。マスクゲームでは、自らが感染個体になった際、コストを払い続ける必要があるため、マスクによる感染拡大防止に貢献する点でASPは向上するが、それは自らの利得という点では得が無い。したがって、マスクの相対コストが上がると、SEDが大きくなる防御効率の範囲は拡大していくことは妥当な結果である。両方に共通してみられる特徴は、感染防御効率に対して中間領域にSED大が見られる点だ。感染防御効率大では、個人最適と社会最適がともに協調に寄り、感染防御率小ではその逆の現象が起こるためである。マスクゲームのコスト大、感染防御率小においてSEDが0.5程度に留まるのは、マスクの着脱自由度が高い点において、実質的なコストがワクチンに比べて小さいことが影響していると考えられる。

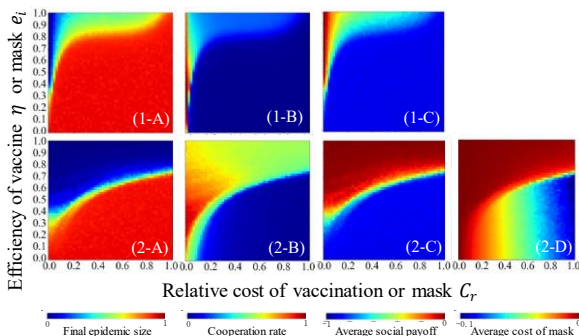


Fig. 1 Small-world ネットワーク $p=0.03$ ($\beta = 0.16$) におけるワクチンゲーム(上段；1-*)とマスクゲーム(下段；2-*)の比較結果。左から最終感染者サイズ；FES(*-A)，ネットワーク協調率(*-B)，社会平均利得；ASP(*-C)，平均マスクコスト(*-D)。横軸はワクチンまたはマスクの相対コスト C_r ，縦軸はワクチンまたはマスクの防御効率 η or e_i 。

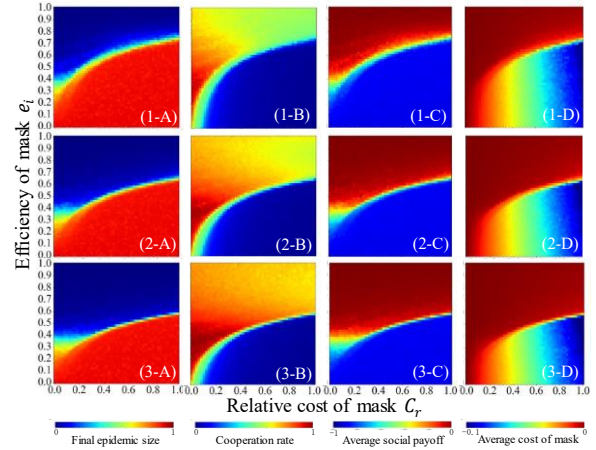


Fig. 2 Small-world ネットワーク $p=0.03$ ($\beta = 0.16$) におけるマスクの感染防御効率比 $e_1:e_2 = 1:2$ (上段；1-*)， $1:1$ (中段；2-*)， $2:1$ (下段；3-*)の比較結果。左から最終感染者サイズ；FES(*-A)，ネットワーク協調率(*-B)，社会平均利得；ASP(*-C)，平均マスクコスト(*-D)。横軸はマスクの相対コスト C_r ，縦軸はマスクの防御効率 e_i 。

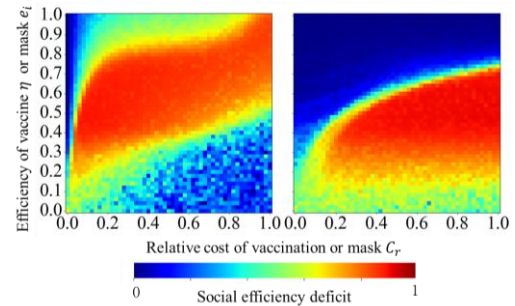


Fig. 3 Small-world ネットワーク $p=0.03$ ($\beta = 0.16$) におけるワクチンゲーム(左)とマスクゲーム(右)の社会的超過負担；SEDの比較結果。横軸はワクチンまたはマスクの相対コスト C_r ，縦軸はワクチンまたはマスクの防御効率 η or e_i 。

4. 結言

マスク戦略による感染伝搬防止効果についてMASにより考察した。感染症モデルはSIRモデルに基づき、基盤グラフはSmall-worldを主に使用した。マスクの特徴として、低コスト、着脱の自由度、感染拡大防止効果をモデリングした。ワクチンゲームとの比較を持って、それぞれの防御効率と相対コストの組み合わせにおけるFESや協調率、ASPから評価した。数値結果は、マスクの特徴を反映した妥当な結果であり、社会戦略としての優位性や感染防止効果を理解するために有用なものであった。

参考文献

- (1) D. J. Watts, S. H. Strogatz, Collective dynamics of 'Small-World' networks, *Nature*, **393**(6684), 440–442, 1998.
- (2) Barabasi, A.-L., and Albert, R., Emergence of scaling in random networks, *Science* 286, 1999, pp. 509-512.
- (3) Kermack, W. O., McKendrick, A. G.; A contribution to the mathematical theory of epidemics, *Proceedings of the Royal Society of London A* **115**(772), 700–721, 1927.
- (4) Fu, F., Rosenbloom, D. I., Wang, L., & Nowak, M. A., Imitation dynamics of vaccination behavior on social networks, *Proceedings of the Royal Society B* 278, 42, 2011