

スケールフリーネットワーク上で観察される Effectiveness model 適用 Vaccination Game における感染率への additive ノイズがもたらす確率共鳴現象

沖田 航貴¹, 立川 雄一^{1,2} 内海 忍¹ 谷本 潤³
¹ 九州大学大学院 総合理工学府 総合理工学専攻
² エム・アール・アイ リサーチアソシエーツ株式会社
³ 九州大学 総合理工学研究院 環境理工学部門

要旨

SIR プロセスに従う感染症伝搬と意思決定ダイナミクスとを統合した Vaccination Game において, ワクチンによる免疫獲得の確率性を Effectiveness model とした枠組みを, Multi Agent Simulation (MAS) 上に構築し, 感染率 β に平均ゼロの additive ノイズを印加することで発現する確率共鳴現象を考究した. 接種コストが高く, かつ Effectiveness が低い条件において, 社会全体のワクチン接種率 (Vaccination Coverage; VC) は変化せず, 最終感染者サイズ (Final Epidemic Size; FES) は減少した. 一方で, 接種コストが低く, かつ Effectiveness が高い条件においては, ワクチン接種率は減少し, 最終感染者サイズが増加し, 感染症封じ込めの観点からは逆効果となる傾向が創発することを明らかにした.

Stochastic resonance effect observed an Vaccination game with Effectiveness framework for vaccination presuming a scale-free network as underlying network

Kouki Okita¹, Yuichi Tatsukawa^{1,2}, Shinobu Utsumi¹, Jun Tanimoto²
¹ Interdisciplinary Graduate School of Engineering Sciences, Kyushu University
² MRI Research Associates Inc.
³ Faculty of Engineering Sciences, Kyushu University

Abstract

We explored whether an additive noise to the transmission rate brings an advantageous stochastic resonance effect to confine a disease spreading in the effectiveness model with Multi Agent Simulation. We found that, with a higher vaccination cost and/ or a lower vaccine efficacy, the stochastic noise has no gap of vaccination coverage with the default without-noise case, but brings a less level of final epidemic size. In contrast, when a lower vaccination cost and a higher vaccine efficacy would be imposed, the additive stochastic noise brings a smaller VC that consequently results in a larger FES than the default without-noise case.

1. 序論

COVID-19 パンデミックに同期して社会物理学では数理疫学と (例えば, 有償ワクチン接種に関する) 人間意思決定ダイナミクスとを統合した枠組み Vaccination Game (VG) への関心が高まっている [1], [2]. 確率共鳴は統計物理学上のテーマだが, 数理疫学モデルにこれを適用し, 様々な変数やパラメータへの additive ノイズがダイナミクスに如何なる確率特性をもたらすかを巡って関心が高まっている [3]. 確率共鳴の本義を考えると, エージェントが複雑ネットワークで接続される状況下を前提にすること, 更には Perc [4] や Tanimoto [5] が発見した空間型囚人ジレンマ

ゲームの利得行列への additive ノイズがネットワーク互惠を強化する現象とのアナロジーから想起して, 背後に, 所謂, ワクチン接種ジレンマが埋め込まれた VG に適用することは, 興味ある研究課題である. 本研究は, これに Multi Agent Simulation (MAS) を用いてアプローチする.

2. モデル

2.1. Vaccination Game (VG)

[2] の基本形を踏襲した [1] の VG を用いる. ワクチンの確率性は Effectiveness [1] に従う. すなわちワクチン接種イベントにおいてワクチン接種を行うエージェントは

Effectiveness; E により完全免疫を獲得する。
 1 流行期は 2 ステージからなり、ステージ 1 で各エージェントは前流行期の自己利得とランダム選択した隣人利得との差異に基づく確率戦略更新 (PW-Fermi に基づく IB-RA[1]) をし、ステージ 2 で初期感染者 $I_0 (=5)$ を粒子数 10^4 、平均次数 ($\langle k \rangle$) 8 の BA-SF[6] 上にランダム配置して当該流行期の SIR 感染ダイナミクスを感染者 I がなくなるまで Gillespie 法により追跡する。ワクチン接種率 (VC) と最終感染者サイズ (FES) が社会均衡に達するまで流行期を繰り返し、MAS の結果としては 100 アンサンブル平均を採る。

2.2. 感染率に印加するノイズ

基本再生産数 $R_0 = 2.5$ 、回復率 $\gamma = 1/3 [\text{day}^{-1}]$ として求まるリンクベース感染率 $\beta_{eq} = \beta / \langle k \rangle = R_0 \cdot \gamma / \langle k \rangle$ [7] に対し、各時間ステップ各リンクで上下限 $\pm \delta$ の一様乱数を付加する ($\beta_{eq} \pm \delta$) 。

3. 結果及び考察

数値実験では感染時の疾病総コスト 1 に対する相対ワクチン接種コスト C_r ($0 \leq C_r \leq 1$) とワクチンの確率的有効性 E ($0 \leq E \leq 1$) を変えながら VC と FES を求める。 $\delta = 0$ のデフォルト設定に対して δ の影響を考察する。 Fig.1 に結果を示す。 1 行目左パネルが VC、右パネルが FES のデフォルト設定の絶対値であり、これらは既往研究で報告されている結果[1]と一致する。 2 および 3 行目は、夫々、大小のノイズを印加したときのデフォルト設定との差画像で、赤がプラス、青がマイナス偏差を意味する。 SF グラフ上のワクチン接種がない単純な SIR プロセスに対して、感染率に additive ノイズを印加すると、感染力 (基本再生産数) の強さに依存への依存性が観察されるが、確率揺らぎがパーコレーション経路の連続性を棄損することで、最終感染サイズが小さくなる側へ deflate する (結果は示していない)。 このことは揺らぎ幅が小さい範囲では VG にあっては有意な差異とはならない (Fig.1 の 2 行目)。 而して、ノイズ幅が大きくなると (3 行目)、確率共鳴効果は大きく 2 相のパラメータ領域に分かれて発現する。 ワクチンの信頼性が低く、コストが高い領域では、元々、デフォルト設定で $VC=0$ であるから、VC に差異は現れない。 が、FES は小さい側に歪む (右下パネル)。 一方、ワクチンが低コストで信頼性が比較的高い領域では、確率共鳴により感染リスクが低減されることが、エージェントをミスリードし、VC は低い側に歪み (3 行目左パネル)、これに依り FES は高い側に歪んでしまう (3 行目右パネル) 。

4. 結論

スケールフリー上のエージェントが Effectiveness によりワクチン接種確率特性を考

慮した VG を繰り広げる系を前提に、感染率に additive ノイズを印加した際の確率共鳴効果を MAS により検討した。 ワクチンコストとワクチン信頼性の 2 次元パラメータ領域で、2 相の異なる効果が現われ、コスト低、信頼性高の領域では、確率共鳴で感染力が弱められる効果が、却って VC を低下させ、FES が増加させる方向に歪ませる結果となることがわかった。

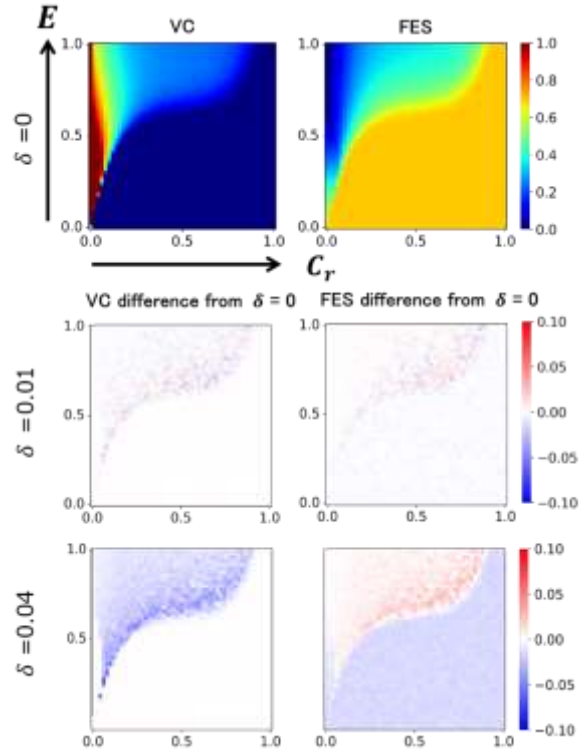


Fig.1 $\delta = 0$ の行にて、左図からワクチン接種率(VC)、最終感染者サイズ(FES)を示す。 $\delta = 0.01, 0.04$ の各行は、左図から、 $\delta = 0$ と比較した時の VC、FES の変化量を示す。

参考文献

- [1] Tanimoto, J.; Sociophysics Approach to Epidemics, Springer, 2021.
- [2] Fu, F., Rosenbloom, D. O., Wang, L., Nowak, M. A.; Imitation dynamics of vaccination behaviour on social networks, *Proceedings of Royal Society B* **278**, 42–49, 2011.
- [3] Nino-Torres, D., Rios-Gutierrez, A., Arunachalam, V., Ohajunwa, C., Seshaiyer, P.; Stochastic modeling, analysis, and simulation of the COVID-19 pandemic with explicit behavioral changes in Bogota: A case study, *Infectious Disease Modeling* **7**, 199-211, 2022.
- [4] Perc, M.; Coherence resonance in a spatial prisoner's dilemma game, *New Journal of Physics* (**8**), 22, 2006.
- [5] Tanimoto, J.; Promotion of cooperation by payoff noise in a 2×2 game, *Physical Review E* **76**, 041130, 2007.
- [6] Barabási, A. L., Albert, R.; Emergence of Scaling in Random Networks, *Science* **286** (80), 509-512, 1999.
- [7] Utsumi, S., Arefin, Md. R., Tatsukawa, Y., Tanimoto, J.; How and to what extent does the anti-social behavior of violating self-quarantine measures increase the spread of disease?, *Chaos, Solitons & Fractals* **159**, 112178, 2022.