

社会的弱者を新興感染症から守る IoT デバイスを通じた予防接種オファ―



谷本 潤 (Jun Tanimoto, Dr Eng.)

九州大学 総合理工学研究院 環境理工学部門 教授
(Professor, Kyushu University, Faculty of Engineering Sciences)
受賞: Best Paper Award at IEEE/ CEC (2009 年), 日本建築学会 学会賞
(論文) (2006 年), 日本建築学会 奨励賞 (1998 年), 空気調和衛生工学会 学会賞 (学術論文) (1995 年) 他
著書: Sociophysics Approach to Epidemics, Springer (2021 年),
Evolutionary Games with Sociophysics: Analysis of Traffic Flow and
Epidemics, Springer (2019 年), Fundamentals of Evolutionary Game
Theory and its Applications, Springer (2015 年) 他
研究専門分野: 社会物理学, 進化ゲーム理論, 都市環境工学

あらまし

新興感染症の襲来に対して社会システムのレジリエンスを担保するには、緊急時の公的ワクチン接種、定在化した際の自発的ワクチン接種の勧奨、マスク装着、Social-distance 確保など様々な対策を総合的かつ立体的に適用した感染抑制効果を、それらに対する人々の受容行動動態を含めて定量的に予測する枠組み構築が急務となる。感染症伝搬は、人間社会の複雑ネットワークを通じて生起する現象としての側面を有するから、原因側で元を絶つ、罹患する生体側で防御する対策と並んで、経路となる社会システムを適切に制御することで、感染を封じ込め、大流行を未然に防ぐ対策が立てられる。本研究では、①感染症の伝播力が流行株により確率変動する効果が、人々のワクチン接種受容行動に及ぼすのか、②IoT デバイスが社会実装される状況を想定し、ロックダウンにより人々が瞬時に社会活動を控える状況を複雑ネットワーク上のリンク切断に準え、このことが新興感染症伝搬にどのような影響を付与するのかを検討した。感染症は SIR ダイナミクスに依拠するものとし、ワクチン接種受容行動には進化ゲーム理論を援用した

Vaccination Game を適用した。

1. 研究の目的および背景

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。

また、複雑ネットワーク上で離れたノードへのリンクは、社会システムにおける遠距離移動に伴う物理接触を模擬するから、グラフ上の遠距離リンク切断は、社会活動の自粛やロックダウンを模擬することになる。ワクチンや抗ウイルス薬剤などが存在しない状況下で最も効果的非医療的介入法であると信じられ、実際、COVID-19 パンデミックにあっては日本以外の多くの国でロックダウンが試みられた。本稿の後半では、ロックダウンの確率的効果を定量的に明らかにする。

2. 研究方法および結果

あらましに述べた二つのテーマについて、アプローチ及び MAS の結果得られた結果を述べる。

2.1 感染症の伝播力が流行株により確率変動する効果が人々のワクチン接種受容行動に及ぼす影響

2.1.1 モデル

参考文献[1], [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

社会的弱者を新興感染症から守る IoT デバイスを通じた予防接種オファー

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 Barabashi-Albert Scale-Free (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。

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 $\beta_{eq} = \beta / \langle k \rangle = R_0 \gamma / \langle k \rangle$ [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 ($\beta_{eq} \pm \delta$)。

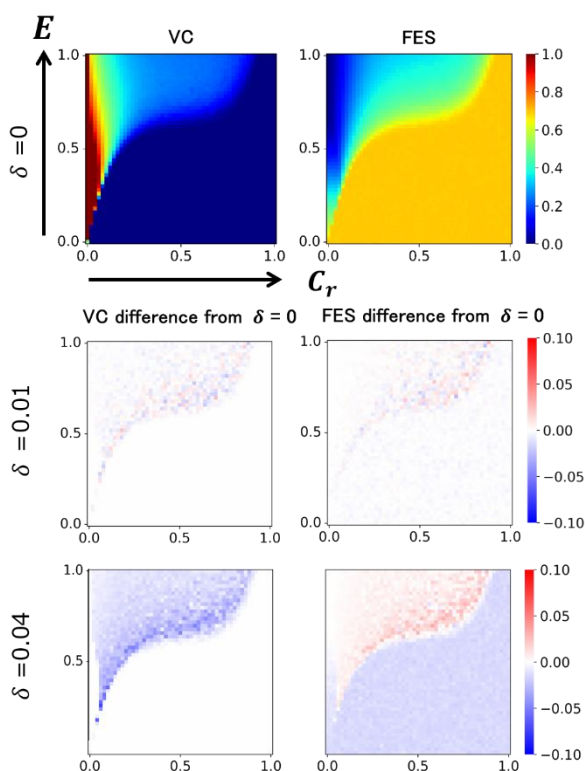


図 1 $\delta=0$ の行において左パネルからワクチン接種率(VC), 最終感染者サイズ(FES)を示す。 $\delta=0.01, 0.04$ の各行は左パネルから $\delta=0$ と比較した時の VC, FES の変化量を示す。

2.1.2 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。図 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 (図 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)。

2.1.3 小括

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 を繰り返る系を前提に、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。

社会的弱者を新興感染症から守る IoT デバイスを通じた予防接種オファー

2.2 ロックダウンの感染症封じ込め効果

2.2.1 モデル

著者らは既報[8]で short-cut リンクを動的に繋ぎ変える Small-world ネットワーク (以下、動的 SW) 上の SIR プロセスを解析した。動的 SW は、遠隔地への移動が飛び火感染のトリガーになることを、固定 short-cut 確率 (p) で繋ぎ替えられるランダムリンクを日々差し替えることで模擬している。ここでは、この topology 上で SIR プロセスに従う感染が、所謂、ロックダウン (lockdown) により、如何に封じ込め得るかを Multi Agent Simulation (MAS) により検討する。

動的 SW は、2 次元ラチスを基盤に、固定の short-cut 確率 p で繋ぎ替えた Watts & Storgatz Small-world を多数生成しておき、日毎にこれを差し替えることで付与する。粒子数は 10^4 で、lockdown が適用される以前の default 状況は、平均次数 64 ($\langle k \rangle_{def} = 64$)、short-cut 確率 5% ($p_{def} = 0.5$) とした。

SIR プロセスでは、感染エージェントの I から R への遷移確率 $\gamma = 1/3[\text{day}^{-1}]$ 、基本再生産数 $R_0 (\equiv \beta/\gamma)$ は 2.5 とした。あるリンクの他端に I エージェントをもつ S エージェントの I への遷移確率は、 $\beta_{eq} = R_0 \cdot \gamma / \langle k \rangle_{def}$ で与える。各エピソードは、初期感染者 5 エージェントをドメイン上にランダムに配置し、感染の時間発展を Gillespie 法で追跡する。

Lockdown は図 2 のように模擬した。あるエピソードで、感染者数が総人口に対する比で定義する閾値 (図中の $I_{threshold}$) を上回った時、平均次数を $\langle k \rangle_{def}$ から $\langle k \rangle_{LD}$ に、short-cut 確率を p_{def} から p_{LD} に削減する。評価は Default の最終感染者サイズ (Final Epidemic Size; FES) と最大感染者数 (Peak Infected) が lockdown によってどれだけ削減されたかを 100 エピソードのアンサンブル平均を採って計量する。

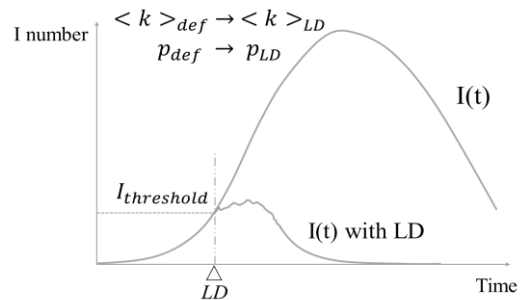


図 1 Lockdown のモデル化概要

2.2.2 結果及び考察

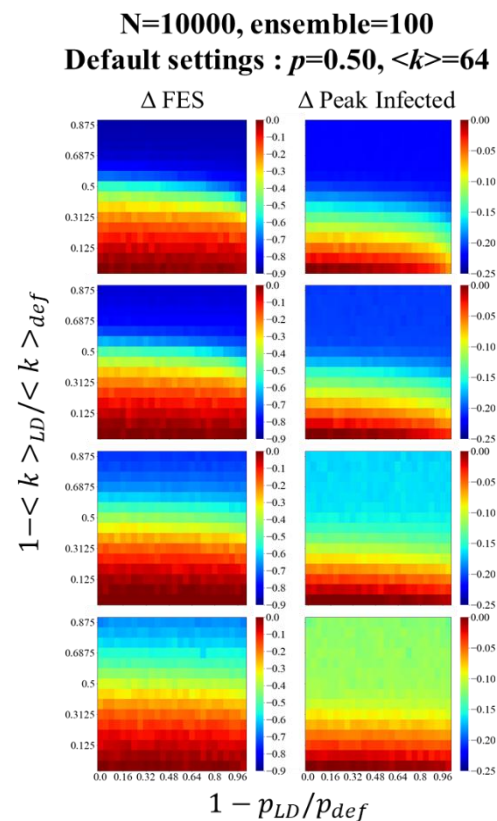


図 3 Lockdown による感染抑制効果

図 3 に FES の削減率 (左カラム)、ピーク感染者数の削減率 (右カラム) を夫々、 $1 - p_{LD} / p_{def}$ と $1 - \langle k \rangle_{LD} / \langle k \rangle_{def}$ の 2 次元平面のヒートマップとして示した。パネル上から閾値 $I_{threshold}$ は総人口の 1%、2%、5%、10% である。最も厳しい Lockdown (1% ケース) では、平均次数を 50% 以下に抑制すると ($1 - \langle k \rangle_{LD} / \langle k \rangle_{def} < 0.5$)、FES の削減率は約 0.8 (80%) である。

社会的弱者を新興感染症から守る IoT デバイスを通じた予防接種オファー

$k >_{LD} / < k >_{def} > 0.5$) FES はほぼ完封の状況になる。逆に、平均次数 30%以下の抑制率では、ほとんど効果が挙がらなくなる。1%ケースでは効果有無は平均次数削減率に対して急激に変化するが、lockdown 導入閾値を緩和すると効果有（青色領域）境界が退潮し、効果無（赤色領域）境界が上方（より大きな平均次数削減率の方向）に押し上げられる。

2.2.3 小括

COVID-19 のパンデミックでは、各国で lockdown が施行された。本邦では非常事態宣言下により人出、移動は劇的に削減された。厳しい lockdown が導入されても、現実感染拡大が鈍化ないしは感染者数が減り始めるのには時間遅れが伴う。これらの実世界で行われた lockdown のスケール感、効果からすると、本報の予測結果は少々過大評価傾向にあるのかも知れない。社会活動レベルを動的 SW の平均次数と short-cut 確率で表象する適否に加え、既往の MAS による感染症シミュレーションの多くは時不変ネットワークでエージェントの物理接触を表していることの妥当性を、向後、検討する必要があるだろう。

3. 結言

本研究では、新興感染症を SIR ダイナミクスで模擬し、スーパーコンピュータ上の MAS として実装した人工社会システム数値実験により、感染率の確率揺らぎが人々の先天的ワクチン接種受容行動に影響し、ワクチンによる免疫獲得確率（Effectiveness）と感染による疾病コストとの相対的ワクチン接種コストに依存して、ワクチン接種率を強化する場合と減退させる場合とに 2 相転移することが明らかとなった。また、人間社会ネットワークを代表的複雑グラフである Small-world で表現、short-cut リンクを切断することでロックダウンを模擬する MAS システムにより、ロックダウンによる新興感染症パンデミック効果を定量的に明らかにした。ICT 技術は、感染情報の動的観測を可能にし、突然変異株の出現確率およびその病原性（感染力）を確率揺らぎとして予測できると期待される。また、スマホなどの通信機器により、人々にインセンティブ

を付与した活動自粛を呼びかけるアクティブな非医療的感染介入法が実現できる日も遠くない。そのような近未来において、本研究で得られた知見は有意な処方箋になるものと思料される。

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. I., 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.
- [8] 猪毛尾、内海、立川、谷本；Short-cut を動的に繋ぎ変える small-world における最終感染者サイズへの影響とその評価、第 27 回交通流と自己駆動粒子系のシンポジウム論文集、2021。

この研究は、令和 3 年度 S C A T 研究助成の対象として採用され、令和 4 ～ 6 年度に実施されたものです。