

自主的なワクチン接種行動に関する現実的な意思決定方法の提案

岩村泰郎¹, 福田枝里子², 谷本潤², 萩島理², 池谷直樹²

¹九州大学大学院 総合理工学府 環境エネルギー工学専攻

²九州大学大学院 総合理工学研究院 エネルギー環境共生工学部門

概要

ワクチン接種は、感染に対する危機感によって行われる。進化ゲームの多くが模倣による学習を前提とするのに倣って、従来のモデルでは社会模倣を前提としている。本研究ではワクチン接種に関して、模倣によらない戦略適応方法を提案する。危機感は隣人の感染状況に依存する利得差によって表されるものとし、いくつかのアドホックなモデルについて検証した。その結果、従来の社会模倣モデルに比して、ワクチン接種率の向上が見られた。特に、隣人中に非接種者が存在しない場合において、(1) 自身の戦略を保持するような意思決定方法では、感染症の流行も効果的に押さえ込む効率的なワクチン接種者の分布をある程度実現出来た。一方、(2) 自身の戦略を反転するような意思決定方法では、1シーズンおきにワクチン接種者の大クラスターが非接種クラスターへと変化することで、1シーズンおきに感染症の流行が引き起こされる結果となった。

Proposing Realistic Decision-making Measures for Voluntary Vaccination against Infectious Diseases

Yoshiro Iwamura¹, Eriko Fukuda¹, Jun Tanimoto¹, Aya Hagishima¹, Naoki Ikegaya¹

¹Interdisciplinary Graduate School of Engineering Sciences, Kyushu University

Abstract

Although committing vaccination is triggered by a sense of danger one can feel, previous models of vaccination dilemma game have presumed “social imitation” as strategy adaptation mechanism; copying from a neighbor. It is because those were derived from the conventional idea shared in spatial 2×2 games. This work establishes more appropriate strategy adaptation sub-models referring to one’s sense of danger quantified by both own payoff and surrounding situation. We build four different sub-models depending on what decision a focal agent makes when he has none of defectors (potential free-riders) around him. The simulation result reveals; the four variant models almost show more vaccination coverage rate in population vis-à-vis the default model presuming social imitation, (1) two of the four implicitly premising that an agent takes an opposite action when no defector around him existing show a significant time fluctuation of vaccination-coverage with huge vaccinators’ cluster appearing in one time-step and huge infected agents’ cluster following after, and (2) other two basically presuming that an agent keeps a current action when no defector existing show good performance because specially scattered vaccinators is realized, which can efficiently oppress epidemic outbreak.

1 緒論

近年、インフルエンザに代表される感染症パンデミック問題は、人口密度の高まった都市域の生活環境を論じる上で不可避の社会問題となっている。Nishinari[1]によれば感染症の伝播は森林火災と同じく自己駆動粒子系と捉えることが可能であり、交通流とは対照的に「渋滞」が好ましい系とされる。先に挙げたインフルエンザをはじめとするワクチン接種が有効な感染症の流行を抑制するためには、先制的ワクチン接種による集団免疫の達成が有効とされている[2]。しかし、ワクチン接種率が社会全体である水準を超え社会に集団免疫が誘導されたとしても、自主的ワクチン接種政策下ではワクチン接種率の低下による集団免疫が容易に崩壊し得る。なぜならば、集団免疫の達成は未接種者の罹患可能性を低下させ、集団免疫へのフリー

ライドのインセンティブを増加させるためである[2,3]。以上は個々人の合理的行動と社会の最適状態（集団免疫を達成するワクチン接種水準）との間の乖離、すなわち疫学上のワクチン接種ジレンマである[4]。このジレンマは感染症の伝播とそれによって決定される健康状態に関するジレンマであるため、個人間の相互作用によって利得が決定される古典的なジレンマと比較して複雑なものとなっている。

このワクチン接種ジレンマの解析、緩和・解消を目的とした、ワクチン接種モデルに進化ゲーム理論を適用した研究が行われている[5–8]。例えばFuら[5]は、ワクチン接種におけるエージェントの学習行動と集団構造の影響を探求する為、様々な集団構造におけるワクチン接種行動の模倣ダイナミクスを記述する動的モデルを構築した。文献[5]において彼らは進化ゲーム理論に基づき、エージェントの戦略適応をランダム選択さ

れた近隣のエージェントの利得と自身の利得を比較して模倣するものとしている。しかし、実際のワクチン接種に関する意思決定方法は隣人からの単純な模倣に限らず、より多くの情報を参照することが可能であろう。例えば Fukuda ら[6]は、情報伝搬におけるメディアの存在を想定して、あるエージェントは隣人から一人の相手エージェントをランダムに選択した後、相手を持つ戦略の社会全体での平均利得と自身の利得を比較し、相手の模倣を行うか否かを決定するという、戦略がもたらした社会平均利得を参照する意思決定方法を検討している。

一方、Xiao らおよび Fukuda ら[7,8]は、頑なに自身の戦略を保持し続けるエージェントの存在を想定し、集団免疫の達成と感染症流行の抑制にはワクチン接種割合の向上のみならず、空間構造ごとに適切なワクチン接種者の空間分布が存在し、その空間分布を達成することが有効である事を示した。

本研究は、文献[5]が検討したワクチン接種に関する意思決定方法は単純な模倣行動に基づく方法以外にも現実として存在しうることを、および、文献[7,8]が指摘したワクチン接種の社会的な効果が単純な接種率のみならず空間分布にも依存することに動機付けられ、エージェントらの意思決定について、ある隣人エージェントの戦略を模倣する従来の方法[5]ではなく、全隣接エージェントの戦略および感染状況に応じて得られる利得を参照した上で、ワクチン接種の意思決定を行うモデルを提示する。また、従来の戦略模倣[5]と比較することで、ワクチン接種率向上効果の程度だけでなく、新たに提案する戦略適応方法がどの程度感染症の流行を抑制する上で適切な空間分布を実現できるのかを論じる。

2 モデル

2.1 ネットワーク上のワクチン接種ゲーム

本研究では、周期的に流行する疾病を想定する。そのような感染症に関して、ワクチン接種による個体の免疫獲得の効果は非永続的であるため、流行シーズン毎に接種の必要が生じる。よって、モデルのダイナミクスは毎シーズンの始めのワクチン接種キャンペーンと感染症流行期の2ステージから成る[5]。

第1ステージ(ワクチン接種キャンペーン)では、各エージェントは疾病の流行が起こる前、すなわち集団の感受性エージェント中の誰かが流行株に感染する前にワクチン接種を行うか否かの戦略を決定する。ワクチン接種を行ったエージェントには、ワクチン接種コスト C_v が生じる。単純化のため、先行研究[5]に倣いワクチン接種者らは該当シーズン中、完璧な免疫を獲得すると仮定する。一方、ワクチン接種を行わなかったエージェントには感染のリスクが生じる。第2ステージ(感染症流行期)では、流行株に感染した初期感染エージェントがワクチン接種者を除く感受性エージェントの中からランダムに発生し、集団が空間構造を持つように拡張された SIR ダイナミクスに従って感染が拡大する。本研究では文献[5]に倣い、伝播過程の計算に Gillespie アルゴリズム[9]を用いた。SIR モデルでは、集団 N は感受性エージェント S 、感染性エージェント I 、

表 1: 流行期終了後の利得。

Strategy \ State	Healthy	Infected
Vaccination	$-C_v$	
No-vaccination	0	-1

回復エージェント(免疫獲得エージェント) R の3つの群に分けられる。1日、1人当たりの感染率を β [$\text{day}^{-1} \text{ person}^{-1}$], 1日当たりの感染状態から回復する回復率を γ [day^{-1}]である。本研究では、典型的かつ単純なネットワーク構造として[5]に倣い集団サイズ $N=4900$ の周期境界2次元正方形格子(次数 $k=4$)を想定し、感染率 $\beta=0.46$ 、回復率 $\gamma=1/3$ (典型的なインフルエンザを想定)とした。流行期は、集団中に感染中のエージェントが存在しなくなるまで続く。流行期の中に感染したエージェントには感染コスト C_i が生じる。一方、流行期の中にワクチン接種を行うことなく感染を免れたフリーライダーのコストは0である。簡単のため、これらの利得を相対的ワクチン接種コスト $C_r=C_v/C_i$ ($0 \leq C_r \leq 1$)を定義して再計量する。すると、流行期終了後の各エージェントの利得は戦略および疾病状態に応じて表1のように与えられる。

2.2 戦略適応方法

以上2ステージを終えると、各エージェントは自身の戦略を再検討する。先行研究における戦略適応方法は以下の通り。あるエージェント i は自身の隣人中からランダムにエージェント j を選ぶ。夫々の利得を π_i, π_j とすると、戦略 S_i を持つ i が j の戦略 S_j を模倣する確率 $P(S_i \leftarrow S_j)$ は、Fermi 関数によって両者の利得差 $\pi_i - \pi_j$ を pairwise 比較[9]することで与えられる。

$$P(S_i \leftarrow S_j) = \frac{1}{1 + \exp[(\pi_i - \pi_j)/\kappa]}, \quad (1)$$

ここで、 κ は利得差への感度を意味する。式(1)は、戦略が異なる場合に i が j の戦略 S_j を模倣する確率を表す。

一方、新たに提案する戦略適応方法では、あるエージェント i は自身の隣人全員の戦略および感染状態を参照し、以下の式(3)のように定義された自身の次時間ステップでのワクチン接種確率 P_c に従ってワクチン接種を行う。

$$\langle C_D \rangle = \frac{C_i \cdot n_i + C_f \cdot n_f}{n_D}, \quad (2)$$

$$P_c = \frac{1}{1 + \exp[(C_r - \langle C_D \rangle)/\kappa]}, \quad (3)$$

ここで C_i ($=1$) は感染コスト、 C_f ($=0$) はフリーライドのコスト、 n_D はあるエージェント i が隣接する非接種者数、 n_i は隣接する非接種者のうちの感染者数、 n_f は隣接する非接種者のうちのフリーライダー数をそれぞれ意味する。感染者とフリーライダーはともに非接種者であるため $n_D = n_i + n_f$ が成立し、 $\langle C_D \rangle$ はあるエージェント i の隣接者のうち、非接種戦略を持つエージェントの平均利得を意味する。本研究では、式(1)および式(3)の κ の値を多くの先行研究で用いられている 0.1 とした。

隣人中に非接種エージェントがない場合、 $\langle C_D \rangle$ を定義

できない。そのため、本研究ではそのような場合に現実的にありうる意思決定方法の選択肢として以下の4Caseを想定した。

Case1. 現在の自身の戦略を維持する。

Case2. $P_c = 1 - C_r$ とする。

Case3. 現在の自身の戦略を反転する。

Case4. $\langle C_D \rangle = 0$ とし、(3)式に基づいて P_c を算出する。

以上4つのCaseは、あるエージェントの隣人中に非接種者が存在する場合は式(2)および式(3)を用いることができるため基本的な意思決定方法に違いはない。隣人中に非接種者が存在しない場合のみ各Caseの取り扱いが適用される。

2.3 シミュレーション方法

初期状態において、集団中のワクチン接種者と非接種者は等しい割合で存在し、正方格子上にランダムに分布している。その後、初期感染者 $I_0 = 5$ が感受性エージェントの中からランダムに発生し、SIRダイナミクスに従って感染が拡大する。各2ステージ(ワクチン接種キャンペーンと感染症流行期)を繰り返すことによって、ワクチン接種率や感染者の割合も更新される。図1の均衡状態の結果は、全3000回の繰り返しのうちの、最後の1000回を平均することによって得られ、それぞれのデータ点は独立した100回の試行の平均から得られる。

3 結果および考察

図1に、従来の意思決定方法(Original)および今回提案した各Caseの意思決定方法を適用した場合の(A)ワクチン接種率、(B)最終感染者割合、(C)社会平均利得を示す。図1(A)を見ると C_r の値にかかわらず新たな戦略適応は全てのCaseでOriginalよりも高いワクチン接種率を達成していることが分かる。しかし、図1(B)、(C)を見ると、すべてのCaseにおいてワクチン接種率が向上したのにも関わらず、感染者割合や社会平均利得は必ずしも改善されているわけではない。例として、図1(B)、(C)の $C_r = 0.3$ の結果を見ると、最終感染者割合および社会平均利得の結果は二分化している。すなわち、隣人に非接種者がいない場合に戦略を維持するモデル(Case1)と $1 - C_r$ の確率でワクチン接種を行うモデル(Case2)では感染症の流行を抑え高い社会平均利得を達成できているが、隣人に非接種者がいない場合に戦略を反転するモデル(Case3)と $\langle C_D \rangle = 0$ としてペアワイズ比較を行うモデル(Case4)では感染症の流行が起りOriginalよりも社会平均利得が低下している。

図2は $C_r = 0.3$ におけるワクチン接種率および最終感染者割合の時系列データを示している。これらを見ると、(A)Originalと比較して、Case1およびCase2(図2(B)、(C))ではワクチン接種率および最終感染者割合のシーズン(時系列)ごとの振幅は大きくなく、どのシーズンにおいても平均的に高いワクチン接種率によって感染症を押さえ込んでいることが分かる。一方、Case3およびCase4(図2(D)、(E))ではワクチン接種率、最終感染者割合はともにシーズンごとに大きく変動し、1シーズンおきに感染症の抑制と流行が繰り返されている。

図3に、図2におけるTime step=2940からの連続したスナップショットを示す。これらを見ると、Originalと比較して、Case1およびCase2(図3(B)、(C))では、文献[6,7]が指摘したように、一部ではクラスター化しているが塊集化せずばらけたワクチン接種者が空間中に広く分布することによって、効率よく感染を押さえ込んでいることが分かる。ただし、ばらけたワクチン接種者は高確率でフリーライダーに囲まれることとなるため、数ステップでその数を減らす。その結果、数ステップおきに部分的な感染症の流行を招く。それによりある程度長周期のワクチン接種率、最終感染者割合の時間方向の摂動が見られる。一方、Case3およびCase4(図3(D,E))では、あるシーズンで空間中に形成されたワクチン接種者の大クラスターが次のシーズンで非接種者の大クラスターへと反転することで、1シーズンおきに大規模な感染症の流行が起き、2ステップ周期での激しい時間方向の摂動が見られる。

4 結論

本研究では、全隣人の戦略および利得を参照し、ワクチン接種コストと隣人の情報から得られた非接種戦略がもたらした平均利得(コスト)と接種コストを比較することで、従来のような模倣による意思決定ではなく能動的にワクチン接種を行う意思決定方法を提案した。隣人中に非接種者が存在せずにコストの比較が不可能である場合には、自身の現在の戦略を保持する(または保持する傾向を持つ)もしくは反転する(または反転する傾向を持つ)4ケースを想定し、夫々の戦略適応方法が感染症の流行及びワクチン接種者の分布に及ぼす影響について比較検討した。その結果、従来の模倣行動に基づく意思決定方法よりも、今回提案した意思決定はより高いワクチン接種率を達成できることがわかった。しかし、周囲に非接種者がおらずコストの比較が不可能である場合の処理方法に依存して最終感染者割合および社会平均利得の結果は二分化した。自身の戦略を保持する方法では、空間的にばらけた接種者分布となつて感染症の流行を効果的に押さえ込むが出来た。一方、自身の戦略を反転する方法では、1シーズンおきにワクチン接種者の大クラスターが非接種クラスターへと変化し、それに伴って1シーズンおきに感染症の大蔓延が引き起こされた。

今後は、基盤グラフのtopologyの影響、隣人範囲を第2近傍等々に広げると如何なる特性を示すかを検討する。

謝辞

本研究の一部は科研費・萌芽研究(JP15K14077)助成による。記して謝意を表する。

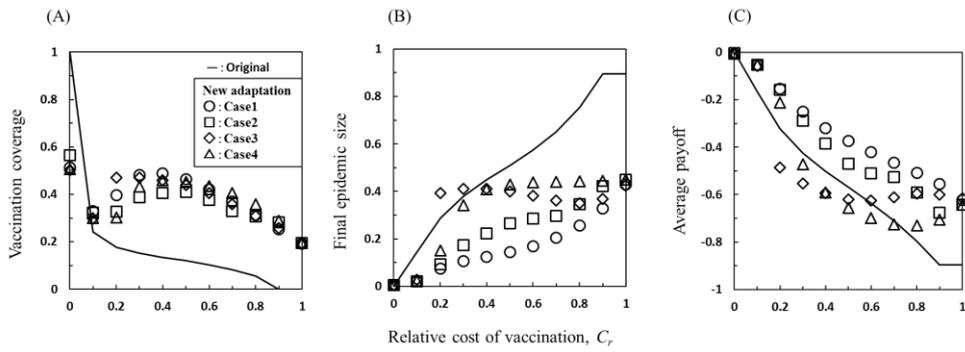


図1：意思決定方法別の (A) ワクチン接種率, (B) 最終感染者割合, (C) 社会平均利得. 先行研究における戦略適応 (Original) を実線で示し, 新たな戦略適応方法4 ケースをプロットで示している.

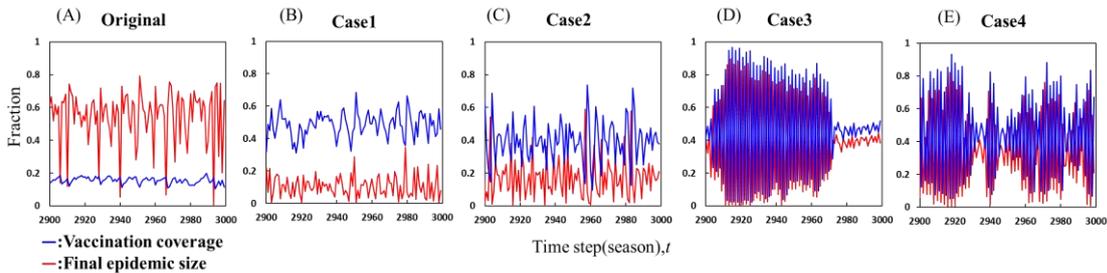


図2： $C_r=0.3$, 戦略適応方法別疑似均衡における典型的な時系列データ.

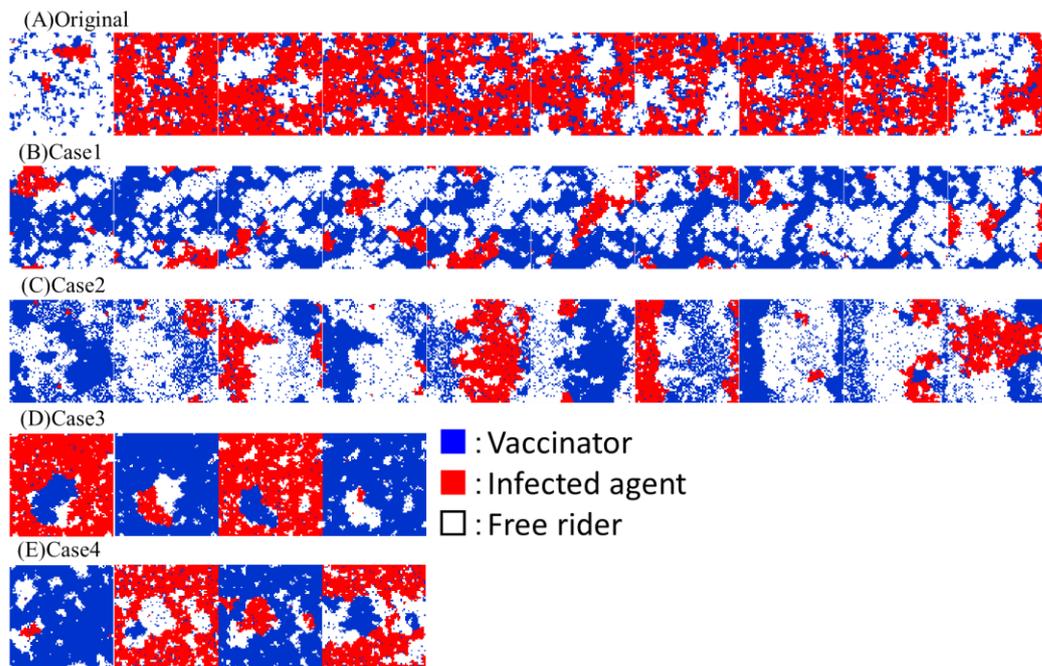


図3： $C_r=0.3$, 戦略適応方法別 2940 ステップからの連続したスナップショット.

参考文献

- [1] 西成活祐 渋滞学 (新潮選書 東京 2006)
- [2] R. M. Anderson and R. M. May, *Infectious diseases of humans: Dynamics and Control* (Oxford University Press, New York, 1991).
- [3] M. Brisson and W. Edmunds, *Med. Decis. Making.* **23**, 76–82 (2003).
- [4] C. T. Bauch, A. P. Galvani, D. J. D. Earn, *Proc. Natl. Acad. Sci. U.S.A.* **100**, 10564 (2003).
- [5] F. Fu, D. I. Rosenbloom, L. Wang, M. A. Nowak, *Proc. R. Soc. B* **278**, 42 (2011).
- [6] E. Fukuda, S. Kokubo, J. Tanimoto, Z. wang, A. Hagishima, N, Ikegaya, *Chaos, Solitons and Fractals* **68**, 1-9 (2014).
- [7] Xiao-Tao Liu, Zhi-Xi Wu, and Lianzhong Zhang *Phys. Rev. E* **86**, 051132(2012).
- [8] E. Fukuda, J. Tanimoto, *Int. J. Auto. Logis.* **2(1-2)**, 78–92 (2016)
- [9] D. T. Gillespie, *J. Phys. Chem.* **81**. 2340–2361 (1977).