

ハブエージェントへの公的補助によるワクチン接種を優先することは感染症流行抑止に意味があるか？

田中 真樹¹, 谷本 潤^{2,3}

¹九州大学 工学部 エネルギー科学科

²九州大学大学院 総合理工学研究院 環境理工学部

³九州大学大学院 総合理工学府 環境エネルギー工学専攻

概要

公的補助を取り入れた vaccination game を用いて, super-spreader となり易い次数の高いエージェントを優先するハブ選択ポリシーが, 最終感染者サイズと社会平均利得にどのような影響を与えるかを評価した. エージェントの戦略に依らないモデルと, 協調者を選ぶモデルではハブ選択ポリシーが最終感染者サイズの観点で有効といえる. 一方で, 裏切り者を強制的に無料接種させるモデルでは, ハブ選択ポリシーが次数の低いエージェントを優先する末端選択ポリシーと比べて, 常に有効であるとは限らないことを発見した.

Is subsidizing vaccination with hub agent priority policy meaningful to oppress disease spreading?

Masaki Tanaka¹, Jun Tanimoto^{2,3}

¹ School of Engineering, Kyushu University

² Faculty of Engineering Sciences, Kyushu University

³ Interdisciplinary Graduate School of Engineering Sciences, Kyushu University

Abstract

We evaluated how hub selection policy that gives priority to agents with higher degrees, which are likely to become super-spreader, affects the final epidemic size and the social average payoff by introducing public assistance into vaccination game. We can say that hub selection policy is effective to suppress disease spreading when giving subsidy to only cooperators and independent of the agent's strategy. In case of forcing defectors to commit vaccination, however, we found that hub selection policy doesn't always bring better result than fringe selection policy.

1. 緒言

インフルエンザは季節性の感染症で, 日本では人口の 1/4 の人が感染し, 医療機関を受診する患者は年間 2500 万人に達する. インフルエンザ予防接種には必ず自己負担が伴うため, 予防接種を受ける/受けないうちは, 個人レベルで意志決定される経済性とリスクの評価に委ねられる. よって, 社会全体としてみたとき結果的に接種率が上がらない事態が起き得る. これは, 個人にとってみると, 他者が予防接種をすることで集団免疫が達成されるならば自分は接種せずとも罹患しない可能性が高くなるため, 公共財としての集団免疫にただ乗りのインセンティブが潜在するからである. これをワクチン接種ジレンマという. 筆者等のグループでは, 進化ゲーム理論と感染症伝搬ダイナミクスとをマージさせたモデル vaccination game を構築, Multi Agent Simulation(MAS) [1-6]および演繹[7-8]による様々な解析を行ってきた. また, これに加えて公的補助による無料予防接種の枠組みを考慮するモデルを構築した[9]. ところで,

ネットワーク科学の知見に依れば, リンクを多く有するハブが外部からの攻撃に晒されると容易にシステム全体の機能不全に至ることが知られている[10]. 流行期に super-spreader になるハブに対して優先的にワクチン接種をすることは感染拡大を抑止するのに有効であることが, 上記知見よりわかっている[11]. エージェントの意志に依らずワクチン接種に誘導する仕組みとしては公的補助による無料接種が考えられるが, 財源上, 全員に接種することは不可能である. ハブエージェント優先で無料接種を実施すると, 少ない財源でも大感染を抑えることができると期待される. しかし, ただ乗り戦略を採るハブエージェント優先で無料接種を実施すると, このエージェントの戦略が広がるため, 自己負担で接種するインセンティブ低下により社会的協調エージェントを減らし得る. このことにより感染拡大を招き, 公的補助による無料接種が逆効果となる事態は起き得るだろうか? 本稿ではこれらの疑問に対して MAS による数値実験によりアプローチする.

2. モデル

2.1 Vaccination game の概要

vaccination game の枠組みは先行研究[1-9]による。

ワクチン接種を行うか否かの意思決定を行う社会ネットワーク上の有限集団 (サイズ $N=10^4$) を考える。また、インフルエンザのような季節的かつ周期的に流行する疾病を想定する。モデルのダイナミクスは第 1 ステージのワクチン接種キャンペーンと第 2 ステージの流行期から成る。これを 1 シーズンと呼ぶ。第 1 ステージでは、最初に、すなわち各エージェントは疾病の流行が起こる前に自己負担でワクチン接種を行うか否かの戦略を決定する (後述)。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。免疫は当該シーズン中完全であるとする。第 2 ステージでは、ワクチン接種者を除く感受性エージェントの中から初期感染エージェントがランダムに発生し、SIR (Susceptible-Infectious-Recovered) ダイナミクスに従って感染が拡大する。集団は、感受性エージェント S 、感染性エージェント I 、回復エージェント (免疫獲得エージェント) R の 3 クラスから成る。ネットワーク上の伝搬過程の計算には Gillespie 法[12]を用いる。インフルエンザを想定して基本再生産数 $R_0=2.5$ 、回復率 $\gamma=1/3$ [day⁻¹] を仮定する。基盤ネットワークは平均次数 8 の Barabási-Albert スケールフリーグラフ[13]とする。1 日 1 人当たりの感染率 β [day⁻¹ person⁻¹] は、ワクチン接種者が居ない状況下で、最終感染者サイズが 0.9 となる値を付与する。この基盤ネットワークでは $\beta=0.196775$ [day⁻¹ person⁻¹] である。1 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。ワクチン接種を行うことなく感染を免れたただ乗りのコストは 0 である。以下では、簡単のため相対ワクチン接種コスト $C_r=C_v/C_i$ ($0 \leq C_r \leq 1$) を定義する。

各エージェントは第 1 ステージで自身の戦略を決定する。本論では、空間型ゲームで広く適用されている自利得とランダム選択した隣人の利得との差に応じて確率的に自戦略を隣人戦略で上書きする Pairwise Fermi[1-9] を適用する。また、自己負担によりワクチン接種する戦略を協調 C 、しない戦略を裏切り D とし、接種した状態を V 、していない状態を NV 、補助金により無料接種した状態を V' とする。 C 戦略を選択した者も無料化されればコスト負担は 0 となり、 D 戦略を選択した者も無料接種されると、状態 V' となり感染リスクは生じない。個人の利得は接種コストと感染コストの和となるから必ず負値をとる。

以上の 2 つのステージを社会均衡に至るまで繰り返し、協調率 f_c ($0 \leq f_c \leq 1$)、ワクチン接種率 VC ($0 \leq VC \leq 1$)、最終感染者サイズ FES ($0 \leq FES \leq 1$)、社会平均利得 SAP ($-1 \leq SAP \leq 0$) ($= -C_r \cdot VC - FES$; 税負担については後述) を計測する。これを 1 エピソードと呼ぶ。また、社会平均利得 SAP は一人当た

りの負担を表す。従って、0 に近いほど一人当たりの負担が小さいことを意味する。

2.2 補助金スキーム

補助金のサイズを意味する σ ($0 \leq \sigma \leq 1$) は、集団のうち無料でワクチン接種を受けることができるエージェントの割合とする。従って、 $\sigma \cdot C_v$ はこの補助スキーム導入のための一人当たりの税負担を意味し、社会平均利得 SAP を計算するときに $\sigma \cdot C_v \cdot N$ を差し引く。ただし、各エージェントの利得を評価する際には $\sigma \cdot C_v$ を減分しない。これは、税負担の中からワクチン接種相当分を個人が認識することは困難であるとの仮定に基づく。補助金モデルは、無料化対象者の違いにより Fig.1 に示す 3 パターンを考える。

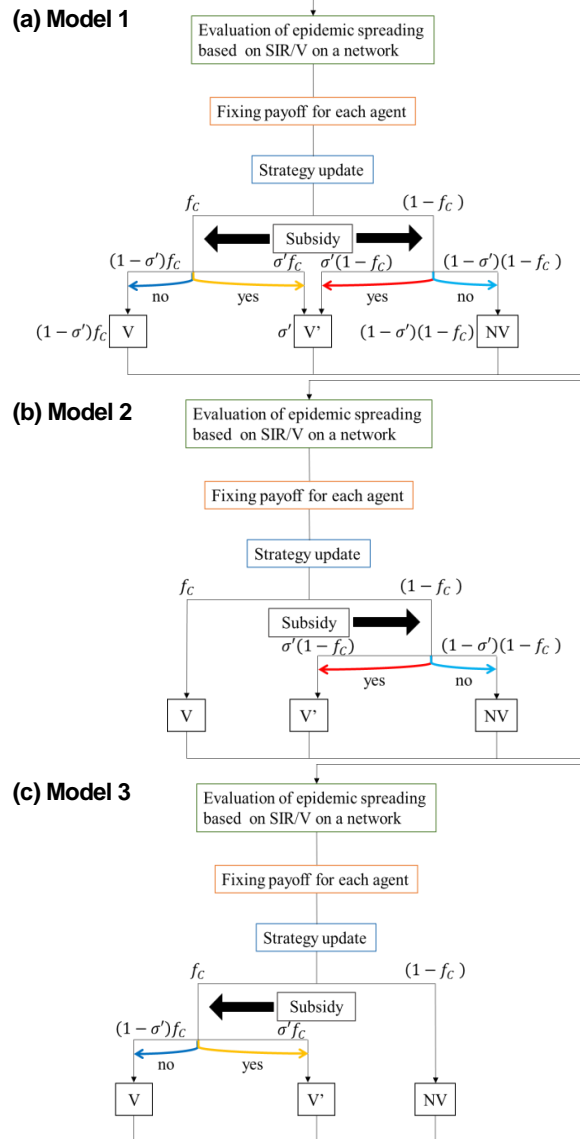


Figure 1 3つの補助金モデルの模式図。(a), (b)および(c)はそれぞれ Model 1, 2 および 3 を表す。

Model 1 では、エージェントの戦略に依らずランダムに対象者を選択する。従って対象者の戦略には、 C 戦略、 D 戦略の両方が存在する。Model 2 では、裏切り者を強制的に接種させるという発想から、 D 戦略エージェントから無作為抽出する。Model 3 では、

逆に C 戦略エージェントからだけ抽出する。

また、対象者に無料券を配る際には、エージェントの回数に依らず全くランダムに与える（以下、Random）、回数が多い順（以下、Hub）、小さい順（以下、Fringe）の 3 ケースを比較する。

2.3 数値実験の流れ

1 エピソードの初期状態では、C 戦略と D 戦略は等しい割合で存在し、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する。1 エピソードは十分に均衡に達するまで、シーズンを繰り返す。1 エピソード中の最後の 100 シーズンを平均することによって当該エピソードの疑似均衡を得る。以下に示す解析結果は、独立な乱数シードに基づく 100 エピソードのアンサンブル平均である。

3. 結果及び考察

Fig2 に Model 1 の結果を示す。上から、 C_r （横軸） $-\sigma$ （縦軸）平面上に協調率 f_c 、無料接種者を含むワクチン接種率 VC 、最終感染者サイズ FES 、社会平均利得 SAP を、左パネルから Random, Hub, Fringe の 3 ケースの順に示している。Fig.3, Fig.4 は Model 2, Model 3 を同様に示している。

最終感染者サイズ FES をみると、Model 1 - Hub (Fig.3 (c-2)) と Model 3 - Hub (Fig.5 (c-2)) が 3 モデル×3 ケースの組み合わせの中で最も効率的に感染症の封じ込めが達成されていることがわかる。実際、相対ワクチンコスト C_r が著しく高く、補助金規模 σ が極端に小さい場合以外には大感染は生じていない。一方で、補助金規模 σ が極端に小さい場合は Model 2 - Hub の最終感染者サイズ FES (Fig.4 (c-2)) は前記 2 設定を上回って小さくすることができていない。なぜなら、この設定では協調率 f_c が著しく低くなってしまふ (Fig.4 (a-2)) からである。協調率 f_c が低くなる理由は以下により説明される。Hub エージェントの系全体への影響は、①自ら super-spreader となり、より多くの者を感染させる感染ダイナミクス上の影響、②多数の隣人を持つことで自戦略を彼らに模倣させるという戦略ダイナミクスへの影響、とに分けられる。相対ワクチンコスト C_r に依存するが、Hub エージェントは隣人数が多いため、隣人数の少ないエージェントと比べて感染リスクが高い。そのため、補助金がなくとも自己負担で接種しようとする意志が隣人数の少ないエージェントに比べて強い傾向にある。そのような中であって、Hub かつ D 戦略であるエージェントに無料接種させると、彼らは接種コストの負担なく感染を免れるので、常にただ乗りとなる。このことは、彼らの周辺の非 Hub エージェントに D 戦略を模倣させる結果となり、社会全体がただ乗りを狙う D 戦略エージェントに埋め尽くされることになる。

一方、社会平均利得 SAP をみると、パラメータ C_r と σ によって逆転がごく一部に ($\sigma=0.1$ で) 生じるが、総観としては Model 2 - Hub (Fig.4 (d-2)) が Model 1 - Hub (Fig.3 (d-2)) と Model 3 - Hub (Fig.5 (d-2))

とを上回って 0 に近づけることができていいる。Model 1 と Model 3 が最終感染者サイズ FES では好成績なのに社会平均利得 SAP では Model 2 に劣る。すなわち、無料接種を Hub 選択ポリシーで行うと感染症流行を抑制する観点からは最も効果的であるが、社会平均利得 SAP の観点からは D 戦略エージェント選択モデルに劣る、との示唆的結果となっている。本来、極端に相対ワクチンコスト C_r が高い場合には、接種者を無理矢理に引き上げることなくある程度の感染者を許容した方が、社会平均利得 SAP が大きくなり、一人当たりの負担は小さくなる。しかし、Hub 選択ポリシーだけで戦略については無差別に配布する

(Model 1)、もしくは C 戦略エージェントだけに配布する (Model 3) と、自己負担接種率 f_c が高くなり、社会平均利得 SAP が小さくなることで、一人当たりの負担が大きくなる。従って、社会平均利得 SAP の観点では、Model 1 と Model 3 は Model 2 に劣る。これを「社会的無駄」と捉えるか、パンデミックに対して頑強な社会と考えるかは議論が分かれよう。

最後に、Hub 選択ポリシーは常に合理化されるかを考える。D 戦略エージェントに無料券を配るとし、相対ワクチンコスト C_r が小さく、補助金規模 σ も小さい場合に注目する。Hub 選択ポリシー (Fig.4 (*-2)) と末端選択ポリシー (Fig.4 (*-3)) の破線で囲われた領域をみると、前者より後者の方が若干、社会平均利得 SAP は大きくなり、一人当たりの負担が小さくなっている。何より、協調率 f_c が高くなることで感染の封じ込めに成功し、最終感染者サイズ FES が小さくなっている。無料券配布がわずかなので、Hub エージェントは感染リスク回避のため C 戦略を採り、Hub エージェントの隣人エージェントは Hub エージェントに倣って C 戦略を受け入れるようになる。末端の D 戦略エージェントは無料接種でただ乗り成功するが、隣人数の少ない彼らの D 戦略が模倣により広がっていく可能性は Hub エージェントのそれと比べて低い。従って、Hub 選択ポリシーに比べ協調率 f_c が高くなることで、最終感染者サイズ FES が小さくなる。以上から、Hub 選択ポリシーは常に正しいわけではないことがわかった。

4. 結言

Vaccination game を基盤とする MAS モデルにより、公的補助により Hub 選択ポリシーで無料接種を行うことの適否を検討した。無料接種の対象を本来自己負担する意志のない者に絞るか否かで結果は異なり、Hub 選択ポリシーでは感染コストを含めた社会平均利得 SAP を大きくし、一人当たりの負担を最小化することは可能だが、最終感染者サイズ FES を最小化するには末端選択ポリシーが有効な場合があることがわかった。

謝辞

本研究の一部は科研費・挑戦的萌芽研究/萌芽 (18K18924)、三井住友海上福祉財団による。記して謝意を表する。

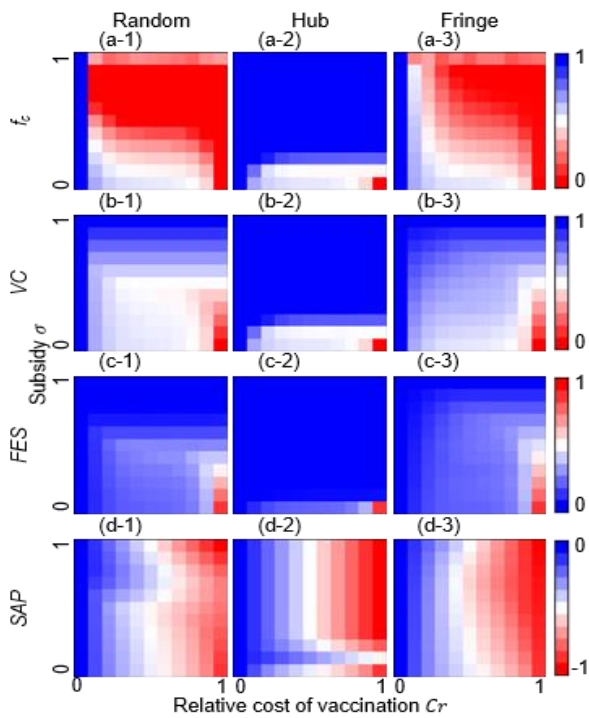


Figure 2 C_r - σ 相図を示す。協調率 f_c (最上列), ワクチン接種率 VC (第2列), 最終感染者サイズ FES (第3列), および社会平均利得 SAP (最下列). 左, 中央および右のパネルは Random, Hub および Fringe の場合を示す. 補助金モデルは, Model 1 である.

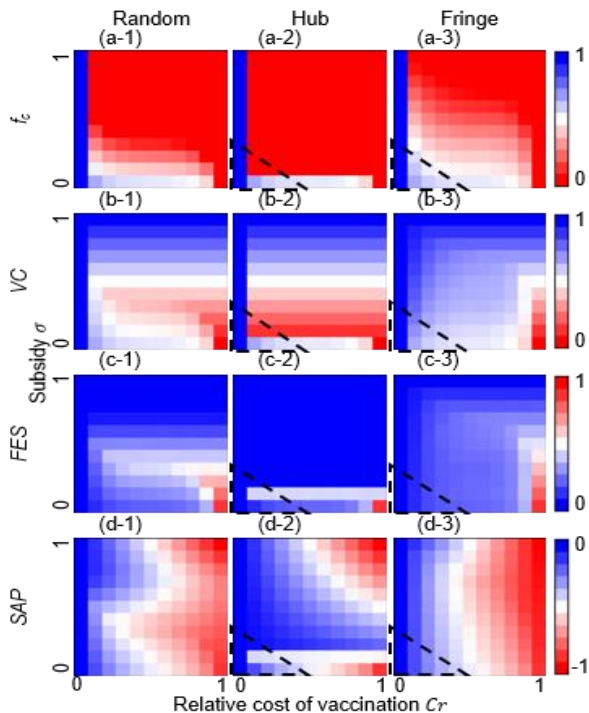


Figure 3 C_r - σ 相図は Fig. 2 と同じ形式で示されている. 補助金モデルは, Model 2 である.

参考文献

- [1] Ida, Y., Tanimoto, J.; Effect of noise-perturbing intermediate defense measures in voluntary vaccination games, *Chaos, Solitons & Fractals* **106**, 337-341, 2018.
- [2] Iwamura, Y., Tanimoto, J.; Realistic decision-making processes in a vaccination game, *Physica A* **494** (15), 236-241, 2018.

- [3] Iwamura, Y., Tanimoto, J., Fukuda, E.; Effect of intermediate defense measures in voluntary vaccination games, *Journal of Statistical Mechanics: Theory and Experiment*, 093501, 2016.
- [4] Fukuda, E., Tanimoto, J.; Effects of stubborn decision-makers on vaccination and disease propagation in social networks, *International Journal of Automation and Logistics* **2**, 78-92, 2016.
- [5] Fukuda, E., Tanimoto, J., Akimoto, M.; Influence of breaking the symmetry between disease transmission and information propagation networks on stepwise decisions concerning vaccination, *Chaos, Solitons & Fractals* **80**, 47-55, 2015.
- [6] Fukuda, E., Kokubo, S., Tanimoto, J., Wang, Z., Hagishima, A., Ikegaya, N.; Risk assessment for infectious disease and its impact on voluntary vaccination behavior in social networks, *Chaos, Solitons & Fractals* **68**, 1-9, 2014.
- [7] Kuga, K., Tanimoto, J.; Impact of imperfect vaccination and defense against contagion on vaccination behavior in complex networks, *Journal of Statistical Mechanics: Theory and Experiment*, In Press, 2019.
- [8] Kuga, K., Tanimoto, J.; Which is more effective for suppressing an infectious disease: imperfect vaccination or defense against contagion?, *Journal of Statistical Mechanics: Theory and Experiment*, 023407, 2018.
- [9] 三隅崇史, 谷本潤, 岩村泰郎, 久我一喜; 自主的ワクチン接種行動に及ぼす公的補助スキームの影響, 第23回交通流と自己駆動粒子系のシンポジウム, 2017.
- [10] Cohen, R., Erez, K., ben-Avraham, D., Havilin, S.; Breakdown of the internet under intentional attack, *Physical Review Letter* **86**, 3682-3685, 2001.
- [11] Taghavian, F., Salehi, M., Teinouri, M.; A local immunization strategy for networks with overlapping community structure, *Physica A* **467**, 148-156, 2017.
- [12] Gillespie, D. T. J.; Exact stochastic simulation of coupled chemical reactions, *Journal of physical chemistry* **81**, 2340-2361, 1977.
- [13] Barabási, A. L., Albert, R.; Emergence of scaling in random networks, *Science* **286** (5439), 509-512, 1999.

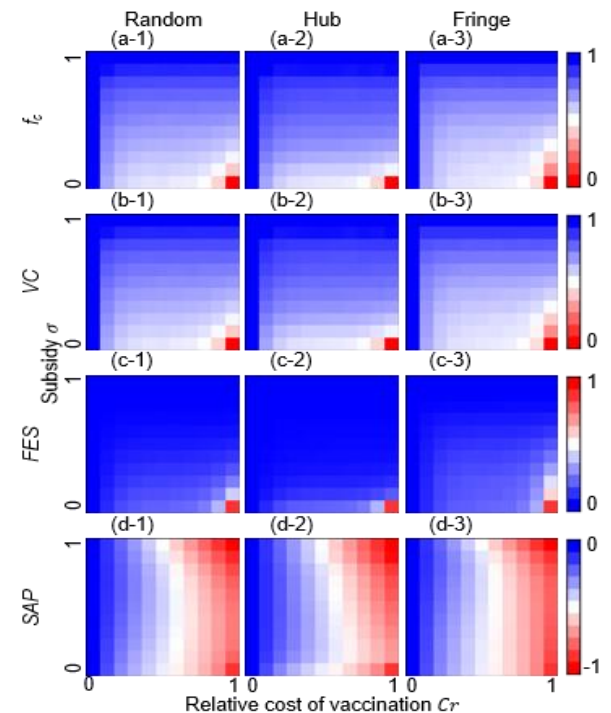


Figure 4 C_r - σ 相図は Fig. 2 と同じ形式で示されている. 補助金モデルは, Model 3 である.