

# 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

三隅 崇史<sup>1</sup>, 谷本 潤<sup>2</sup>, 岩村 泰郎<sup>3</sup>, 久我 一喜<sup>3</sup>

<sup>1</sup>九州大学 工学部 エネルギー科学科

<sup>2</sup>九州大学大学院 総合理工学研究院 環境理工学部門

<sup>3</sup>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

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 vaccination game モデルに、公的補助スキームの枠組みを組み込んだ。そのことにより自主的ワクチン接種を補助する社会機構が、感染症の流行に対する個々人の接種行動の進化に如何なる影響を及ぼすかを明らかにした。結果、ワクチンコストが相対的に高い場合に、社会成員の大多数でなく少数を全額補助する枠組みの元では、社会総コスト（疾病、自主的ワクチン接種コストおよび補助金を全員への税負担として考量した社会総平均コスト）は、補助金を投入しない場合よりも低くなることがわかった。さらにその効率は社会ネットワークのトポロジーに依存することが明らかになった。

## Influence brought by public subsidy on individual voluntary vaccination behavior in complex social networks

Takashi Misumi<sup>1</sup>, Jun Tanimoto<sup>2</sup>, Yoshiro Iwamura<sup>3</sup>, Kazuki Kuga<sup>3</sup>

<sup>1</sup> School of Engineering, Kyushu University

<sup>2</sup> Faculty of Engineering Sciences, Kyushu University

<sup>3</sup> Interdisciplinary Graduate School of Engineering Sciences, Kyushu University

## Abstract

We establish a new framework of vaccination game, originally both epidemic spreading and social dynamics of voluntary vaccination behavior in complex social networks are taken account, so as to evaluate how a public subsidy campaign influences on individual behavior. A series of simulations reveals that the introduction of a subsidy can be justified in terms of minimum social total cost when a relative vaccination cost is not so high and only small number of population is put in free-economics

## 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。その場合、予防接種を受ける／受けないは、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ため、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、個々人にとってみると、他者が予防接種をすることでいわゆる集団免疫が達成されれ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（Public Goods）としての集団免疫にフリーライドするインセンティブが潜在するからである。

いわゆる自主的ワクチン接種ジレンマである。このような背景から著者等のグループでは複雑社会ネッ

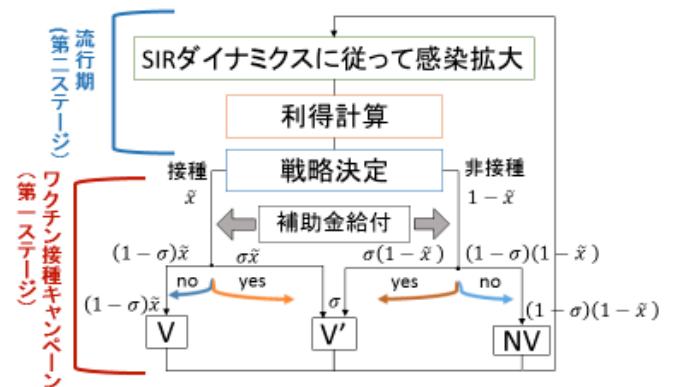


図 1: ワクチン接種ゲームの流れ

トワーク上の感染症伝搬をパーコレーションで再現し、これと個人（エージェント）の予防接種する／しないの意志決定を進化ゲーム理論でモデル化した枠組みをマージさせた vaccination game のモデルを構築し、様々な解析を行ってきた ([1-4])。

世界的な感染症流行の脅威と福祉・医療費の社会負担と云う今日的課題から、公的なワクチン接種補助ポリシーは社会的要請の高い問題だろう。予算制約から社会的弱者に対して無制限の福祉を提供することは不可能である。しかし、重症化による更なる高額医療費を未然に防ぎ、大感染を効率的に抑止出来るのなら、これら社会的弱者に対する先制的予防接種の完全無料化も選択肢の一つとなり得るかもしれない。

本研究では、公的補助スキームを vaccination game に組み込んだ新たなマルチエージェントシミュレーションモデルを構築し、公的補助が人々の自発的ワクチン接種行動に及ぼす影響を検討する。

## 2 モデル

### 2.1 Vaccination game の概要

vaccination game の枠組みは既往研究[1-4]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  $N$ ）を考える。計算の都合上  $N=10^4$  とする。本研究では、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毎シーズンの始めのワクチン接種キャンペーンと流行期の 2 ステージから成る。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。自主的ワクチン接種を行ったエージェントには、自主的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仮定する。一方、自主的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。伝播過程の計算に Gillespie アルゴリズム[5]を用いる。SIR モデルでは、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 クラスに分けられる。1 日、1 人当たりの感染率を  $\beta$  [day<sup>-1</sup> person<sup>-1</sup>]（インフルエンザなどのように基本再生産数が  $R_0=2.5$ 、回復率  $\gamma=1/3$  day<sup>-1</sup> の場合最終感染者割合は約 9 割となる。そのため  $\beta$  の値は、自主的ワクチン接種者ゼロの系での最終感染者率が 0.9 で均衡に達するように後述のネットワークトポロジー毎に同定[1-4])、1 日当たりの感染状態から回復する回復率を  $\gamma$  [day<sup>-1</sup>] (=1/3) とする。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。流行期の間には

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、流行期の間には自主的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。以下では、簡単の為、相対ワクチン接種コスト  $C_r = C_v / C_i$  を定義する。 $C_v, C_i$  は個人々の感覚に依拠するコストも加味する。ただし自主的ワクチン接種は支出であり、また  $C_v < C_i$  でなければ自主的ワクチン接種者がいなくなるのは利得を考えれば明らかなので  $0 \leq C_r \leq 1$  とする。

以上の 2 つのステージを終えると、各エージェントは自身の戦略（自発的にワクチン接種する（以下、V とする）、しない（以下、NV とする））を再検討する。本論では、自利得 ( $\pi_i$ ) とランダム選択した隣人 ( $j$ ) の有する戦略 ( $s_j$ ) の総利得を人数で除した平均利得、すなわち社会平均利得 ( $\langle \pi_{s_j} \rangle$ ) との差に

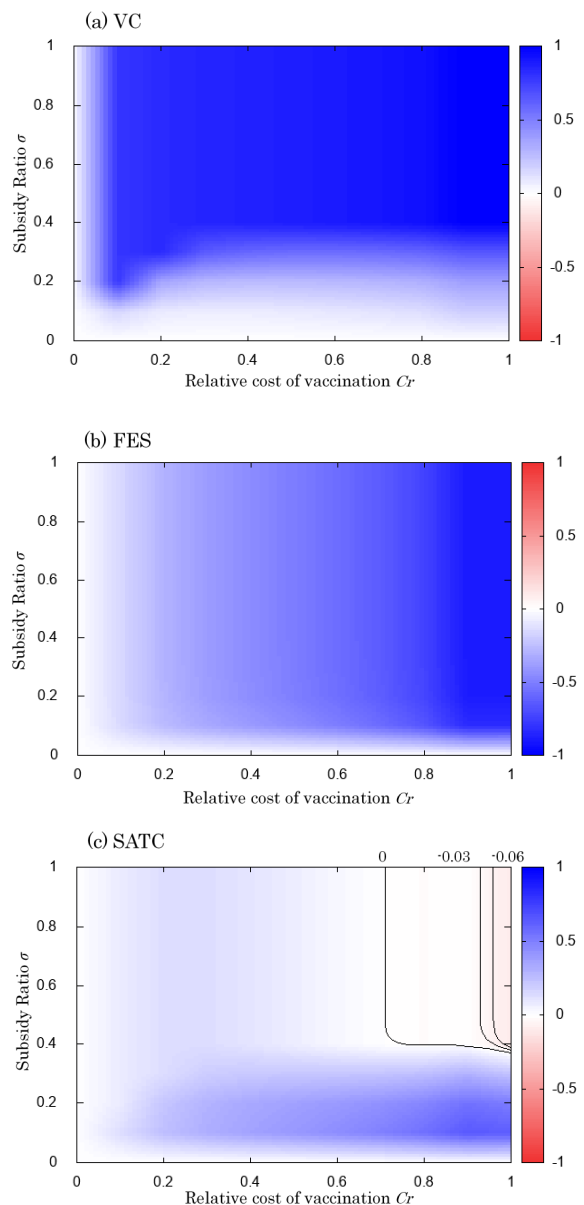


図 2 Lattice( $\langle k \rangle=8$ )の結果 : (a) Vaccination Coverage, (b) Final Epidemic Size, (c) Social average of total cost

応じて確率的に  $s_i$  を  $s_j$  で上書きする枠組み[4]を適用する。

その確率は以下の Fermi 確率で与える。

$$P(s_i \leftarrow s_j) = \frac{1}{1 + \exp\left(\frac{\pi_i - \langle \pi_{s_j} \rangle}{\kappa}\right)}$$

但し、利得差への敏感度は既往[1-4]に倣って  $\kappa=1$  とした。以上の 2 つのステージを繰り返し、ワクチン接種率 (vaccination coverage; 以下, VC), 最終感染者サイズ (final epidemic size; 以下, FES) が均衡に達するまで戦略進化を行う。

## 2.2 補助金のモデル化

補助金のモデル上の扱いを図 1 に示す。  $\tilde{x}$  はあるシーズンにおける自主的ワクチン接種率 (協調率に相当),  $\sigma$  は母集団 (サイズ  $N$ ) のうち補助金スキームにより無料でワクチン接種を受けられ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する。このスキームでは、母集団から無作為抽出されたエージェントが、本来の戦略  $V$ ,  $NV$  に不拘に無料化される (これに対して全員を割り引く「広く薄く」の補助金スキームがあり得る)。シミュレーションの処理フロー上は、図に示すように、流行期を経て、次流行期の戦略更新を行った後に、補助金により無料化されるエージェントをランダムに決める。補助金により無料化されたエージェント (これを便宜上  $V'$  とする) の本来の戦略は、 $V$ ,  $NV$  の両方が存在する。この  $V'$  のエージェントが次の戦略更新を行う場合には、前期末に無料化されたことを受けて、 $NV$  エージェントであれば、フリーライドに成功した裏切りエージェントと同じ扱いとなる。 $V$  エージェントであれば、彼自身の戦略は協調的 (すなわち  $V$ ) だがコスト負担は幸運にも免除された者として扱う。

## 2.3 数値実験の流れ

シミュレーションでは、相対自主的ワクチン接種コストとともに社会ネットワークとのトポロジーを変えて数値実験した。具体的には、次数 8 の 2 次元周期境界のラティス (以下, lattice), 平均次数 8 の Barabási-Albert の Scale-free グラフ[6] (以下, BA-SF), 平均次数 12 の random regular グラフ (以下, RRG) を検討した。

シミュレーション 1 エピソードの初期状態において、集団中の自主的ワクチン接種者と非接種者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とした。1 エピソードは十分に均衡に達するまで、最大 3000 回 (1 回は上記の 2 つのステージ 1 セットからなる) の繰り返しを行い、最後の 1000 回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た。その正確性担保のため、計算後十分な疑似的均衡が得られていることを確認した。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 結果および考察

図 2 から図 4 に lattice, BA-SF, RRG の結果を示す。各結果は、相対ワクチンコスト ( $C_r$ ) と補助金税負担 ( $\sigma \cdot C_r$ ) の 2D 平面上に、パネル(a)では VC, (b)では FES, (c)では社会平均総利得 (社会平均総コストの正負を反転させた数値; SATC) に関して、夫々の値を  $\sigma=0$  すなわち補助金スキームのない default ケースのそれらとの差をとってコンターとして描いている。社会平均総コストとは、母集団全員の自主的ワクチン接種コスト、疾病コスト、補助金スキームの税負担を足し合わせて、集団数 ( $N$ ) で除した値である。パネル(c)の差画像の正負が、疾病、税負担全てを含めたコストで見たときに、補助金スキームが正当化されるか (利得正值の領域) 否か (利得負値の領域) を意味する。

一様に混合された膨大な人数の集団に対して平均

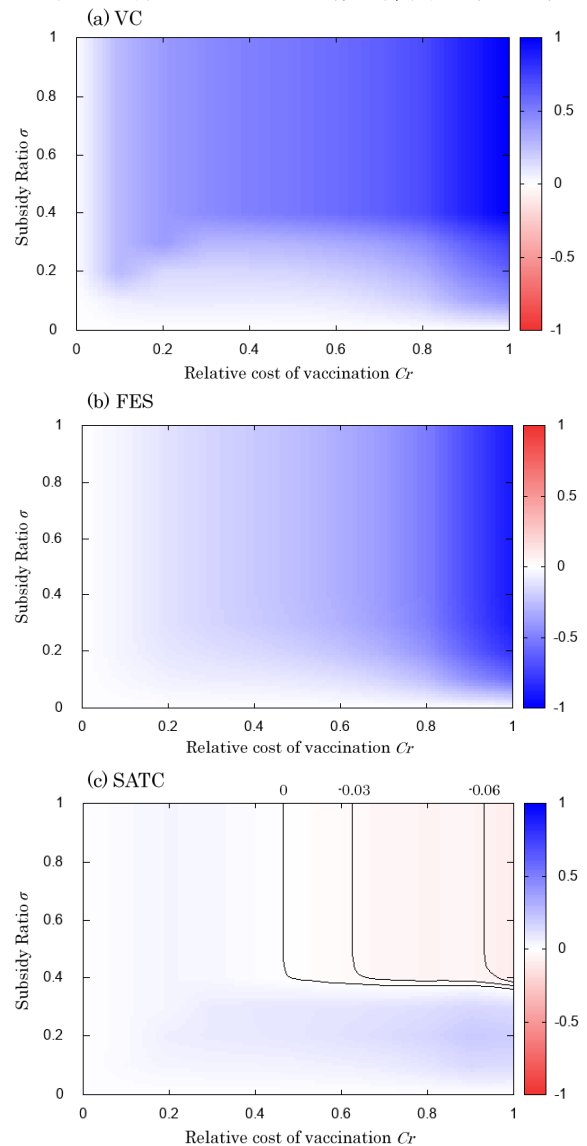


図 3 BA-SF( $\langle k \rangle=8$ )の結果 : (a) Vaccination Coverage, (b) Final Epidemic Size, (c) Social average of total cost

パス長が長いという意味での空間構造の影響が大きい lattice において、ワクチンコストが大きく、補助金のスケールが小さい領域に上記の“補助金スキームが正当化される”エリアが広がる。逆に言えば、自主的ワクチン接種コストがそもそも小さいときには、補助資金の効果は小さく、誰にでもタダ打ちを許す、所謂、バラまきの補助金スキームは社会総コストを押し上げてしまい、却って逆効果となる。この傾向は、平均パス長の短い BA-SF や RRG では lattice ほど顕著でない。これらの領域を VC と FES のパネルで併せて観ると諒解されるように、適度な（少量の）補助金の投入によって、自発的ワクチン接種が促され、ワクチン接種率が向上する。それが最終感染者サイズの減少、言い換えると感染症の封じ込めを達成し、結局、社会の総コストを圧縮することができたことが解る。バラまきの補助金投入は、勿論、感染を封じ込めることは出来るけれど、税負担が社会コストを押し上げて、トータルでは持ち出しになってしまう。

図 3(a)では相対自主的ワクチン接種コストが高い領域である額以上の補助金を投入すると、それ以上では税負担に無感度に急激にワクチン接種率が大きくなっている。これは、補助金投入によって、ハブエージェントがワクチン接種 (V) に転じるが故の相転移的状況が生じているためである。

#### 4 結論

本稿では、補助金によるワクチン接種無料化が社会トータルで観たときに合理化されるか否かの観点から、vaccination game の新たな枠組みを構築し、数値実験を行った結果を報告した。

社会ネットワークの空間構造を考慮する場合、疾病に対する自主的ワクチン接種コストが相対的に大きな場合に、比較的少数の成員に限ってワクチンを無料化する（多数を唯とするような「バラまき」的でない）キャンペーンが社会総コスト低抑化の観点から有意であることが明らかとなった。

今後は、全員を割り引く「広く薄く」の補助金スキームでは如何なる様態となるのか、エージェントの意志決定プロトコルを様々変えるとどうなるか、ワクチンが完全免疫を達成できない場合は異なる結論となるのか等々について検討する。また、今回は単純化のため導入しなかった「感染拡大防止に有効なエージェントを選択的に選ぶ場合、どれほどの効果が得られるか」というモデルも今後取り組むべき課題とする。

#### 謝辞

本研究の一部は大林財団、柿原科学技術財団による記して謝意を表す。

#### 参考文献

[1] Iwamura, Y, Tanimoto, J., Fukuda,E.; Effect of intermediate defense measures in voluntary vaccination

games, *Journal of Statistical Mechanics: Theory and Experiment*, 093501, 2016.

[2] 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.

[3] 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.

[4] 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.

[5] Gillespie, D. T. J.; Exact stochastic simulation of coupled chemical reactions, *Journal of physical chemistry* **81**, 2340-2361, 1977.

[6] Barabási, A. L., Albert, R.; Emergence of scaling in random networks, *Science* **286 (5439)**, 509-512, 1999.

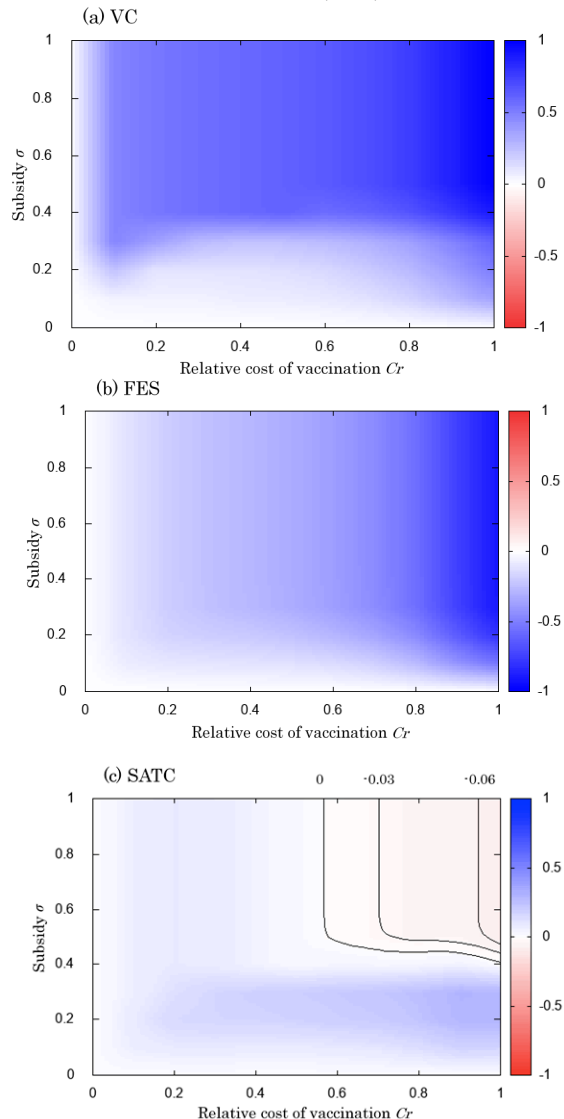


図 4 RRG( $\langle k \rangle = 12$ )の結果 : (a) Vaccination Coverage, (b) Final Epidemic Size, (c) Social average of total cost