

## <研究課題> 季節性インフルエンザ感染から高齢者を守る先制的予報接種の公的補助スキームに関する社会設計

代表研究者 九州大学大学院総合理工学研究院 教授 谷本 潤

### 【まとめ】

社会的弱者である高齢者をインフルエンザ感染リスクから守る先制的予防接種の公的補助スキームにフォーカスし、感染ダイナミクス、社会ジレンマを巡るエージェントの意志決定機構を人工社会システム上に **Multi Agent Simulation** として理論構成した。疾病コスト、ワクチン接種、さらに公的補助を担保する追加税負担を含めた社会総コストをトータルに最小化する社会基本デザインを提示した。

### 1. 研究の目的

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、これと個々人 (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。

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、これら社会的弱者である高齢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. 研究方法と経過

2-1 Subsidize Vaccination Game モデルの理論構成

#### 2-1-1 Vaccination game の概要

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。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。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。伝播過程の計算に **Gillespie** アルゴリズムを用いる。**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  $\beta$  [ $\text{day}^{-1} \text{person}^{-1}$ ] (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  $\gamma=1/3$  [ $\text{day}^{-1}$ ] 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、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日当たりの感染状態から回復する回復率を  $\gamma$  [ $\text{day}^{-1}$ ] ( $=1/3$ ) 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

期の間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。以下では、簡単な為、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。

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(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( $s_j$ )の社会平均利得( $\langle \pi_{s_j} \rangle$ )との差に応じて確率的に  $s_i$

を  $s_j$  で上書きする枠組みを適用する。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  $\kappa=1$  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。

### 2-1-2 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。 $\bar{x}$ はあるシーズンにおけるワクチン接種率(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

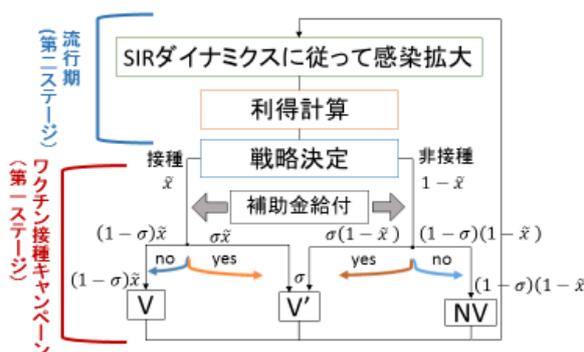


図1: ワクチン接種ゲームの流れ

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。

### 2-1-3 数値実験の流れ

シミュレーションでは、相対ワクチン接種コスト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、回数8のラティス(以下、lattice)、平均次数8のBarabási – AlbertのScale-free グラフ(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、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。

### 2-2 数値実験の結果及び考察

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  $\square\square=0$  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、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况が生じているためである。

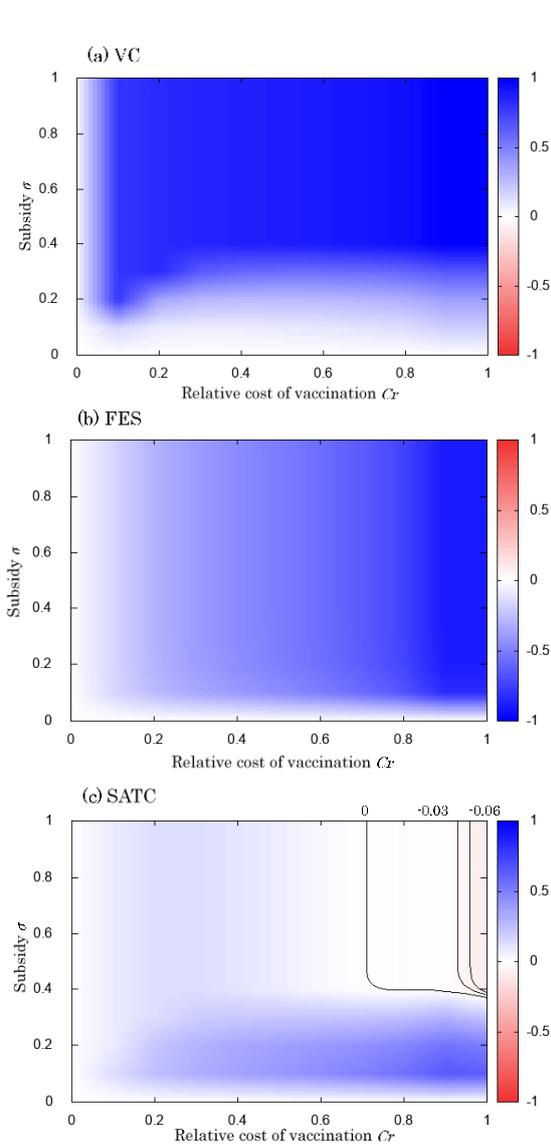


図 2 Lattice( $\langle k \rangle = 8$ )の結果：(a) Vaccination Coverage, (b) Final Epidemic Size, (c) Social average of total cost

### 3. 研究の成果

本研究では、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。

本研究成果から社会福祉医療行政への示唆として以下を引き出し得る。本研究で、数値実験場の制御変数とした  $\sigma$  は「予算規模」を意味する。現下の財政逼迫状況を考えると、潤沢な  $\sigma$  の元に福祉行政施策が立てられることはあ

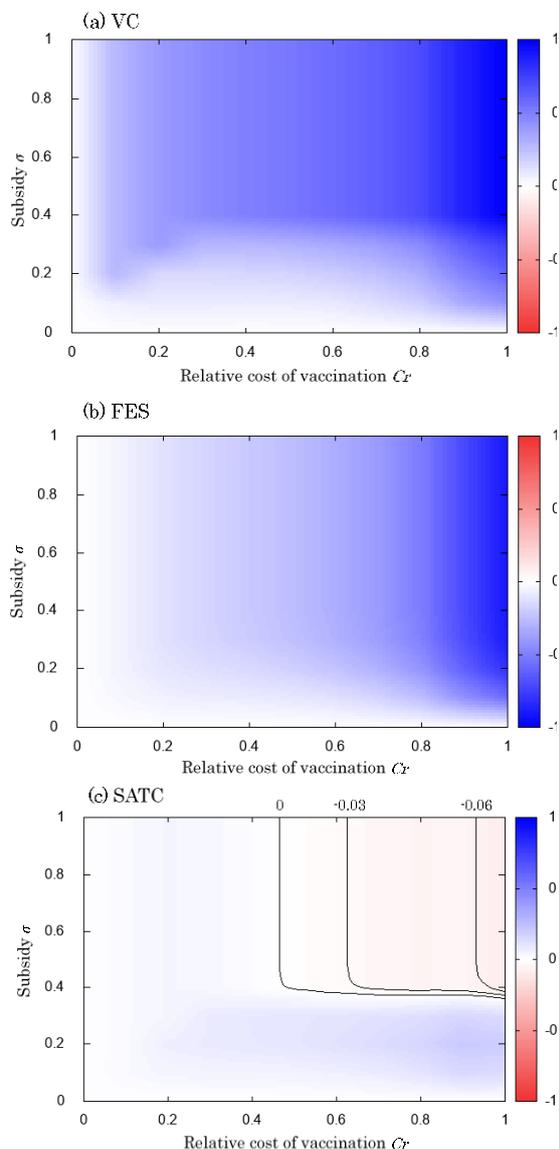


図 3 BA-SF( $\langle k \rangle = 8$ )の結果：(a) Vaccination Coverage, (b) Final Epidemic Size, (c) Social average of total cost

り得ない。就中、高齢者へのインフルエンザ無料接種の補助策に財務上の裏付けは厳しいものがある。しかし、季節性感染症で或るインフルエンザについて云うと、疾病コストに対して保険の利かないワクチン接種コストは比較的大きな比を占めるから、本数値実験結果が顕か何したように、少数の高齢者への無料接種キャンペーンを行うことが、周囲の自己接種者の創発を惹起し、税負担を勘案しても総社会コストを低抑化できる可能性がある。

#### 4. 今後の課題

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、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ことも今後の課題とする。

#### 5. 研究成果の公表方法

本研究成果は、社会物理学、統計物理学、数理生物学上の新知見を含んでいる。当該分野の世界一流学術誌への原著論文としての成果発表を予定している。

以上