

令和 2 年 4 月 10 日現在

機関番号：17102

研究種目：挑戦的研究（萌芽）

研究期間：2018～2019

課題番号：18K18924

研究課題名（和文）人工社会アプローチによるインフルエンザパンデミックを阻止する社会プロトコルの創案

研究課題名（英文）Building a social protocol to avoid pandemics of influenza by relying artificial society approach

研究代表者

谷本 潤（Tanimoto, Jun）

九州大学・総合理工学研究院・教授

研究者番号：60227238

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 4,800,000円

研究成果の概要（和文）：情報科学、疫学、ネットワーク科学、進化ゲーム理論を複合的に応用し、ワクチン接種の社会行動を模擬するマルチエージェントシミュレーションモデルを人工社会に構築した。準備研究で構築してきたワクチン接種ゲームの枠組みに、補助金スキームを付加し、補助金の税負担、疾病コスト、ワクチン接種コストすべてを含む社会コストを最小化するのに最適な、補助金スキームの基礎デザインを行うために大規模数値実験を行った。従来知見から予想される「スーパースプレッダーとなるハブのエージェントに優先的に補助金によるワクチン接種を行う」との枠組み、多くの場合に有効に機能するものの、万能ではないとの反例が明らかにされた。

研究成果の学術的意義や社会的意義

予防接種コストが小さく、かつ、補助金の総予算規模が小さきときには、ハブではなく、社会複雑ネットワークの隣人数が小さい周辺部のエージェントに優先的に補助金を給付する方が、寧ろ社会効率が高くなる。これは、次数の高いハブエージェントは、感染リスクを自ら認識し、自助努力で予防接種する可能性があるため、かれらに予防接種補助金を給付することは、大感染予防には意味があっても、社会的誘引効果によってミスから予防接種を行うエージェントを増やす社会ダイナミクスが一部で阻害される、つまり補助金によるワクチン接種の無駄うちが生じてしまうことによるものである。この発見は社会的処方箋をデザインする上で有意な知見である。

研究成果の概要（英文）：A Multi Agent Simulation (MAS) model dovetailing evolutionary game theory with epidemiological dynamics based on SIR/V is established where various subsidizing policies for vaccination are considered. Relying on the presented model, we explore whether or not hub-agents priority policy letting them commit vaccination for free is meaningful to oppress disease spreading. We found that whether such a subsidy policy being justified is significantly dependent on whether an agent given a free-ticket is cooperator who originally intends to be self-financed vaccinee or defector who tries to free-ride.

研究分野：社会物理学

キーワード：感染症 季節性インフルエンザ ワクチン接種ジレンマ 数理疫学 進化ゲーム理論 マルチエージェントシミュレーション

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

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、個々人にとってみると、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 (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。これをワクチン接種ジレンマと云う。筆者等のグループでは、進化ゲーム理論と数理疫学とをマージさせたモデル vaccination game を構築、マルチエージェントシミュレーション (MAS X [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量するモデル [9] を構築した。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 (情報学で云う「選択的ノード破壊」の問題 e.g., [10])。このことから、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解っている (e.g., [11])。

2. 研究の目的

エージェントの意志に不拘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、全員に施術することは不可能である。となると、無料接種を仮にハブエージェント優先で実施すると、例えば、インセンティブ低下により自己負担で接種する社会的協調エージェントを減らし、結果的に感染拡大を招いて逆効果となる事態は起きないのだろうか？ 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。

3. 研究の方法

本研究では、本グループが構築してきた Vaccination game の枠組みに補助金スキームを付加し、補助金の税負担、疾病コスト、ワクチン接種コストすべてを含む社会コストを最小化するのに最適な、補助金スキームの基礎デザインを行う。

3.1 Vaccination game の概要

vaccination game の枠組みは既往研究 [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。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。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、SIR ダイナミクス (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) に従って感染が拡大する。パーコレーションに従うネットワーク上の伝搬過程の計算には Gillespie 法 [12] を用いる。1 日 1 人当たりの感染率を β [$\text{day}^{-1} \text{person}^{-1}$] は、インフルエンザを想定して基本再生産数が $R_0=2.5$ 、回復率 $\gamma=1/3 \text{ day}^{-1}$ を仮定、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 β (基盤グラフボロジーにより異なる) を付与する。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フリーライダーのコストは 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。

ワクチン接種キャンペーンでは、各エージェントは自身の戦略 (自己負担によりワクチン接種する (以下、協調者 C とする); V 、しない (以下、裏切り D とする); NV) をアップデートする。自己負担でワクチン接種を選択した者も無料化されればコスト負担は 0 となり、ワクチン接種せずの選択をした者も無料化されれば感染リスクは生じない。本論では、空間型ゲームでも広く適用されている自利得 (π_i) とランダム選択した隣人の利得 (π_j) との差違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。個々人の利得は接種コストと疾病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 (以下、 f_c)、ワクチン接種率 (以下、 VC)、最終感染者サイズ (以下、 FES)、社会平均利得 (以下、 SAP) を計測する。以上を Fig.1 に示す。

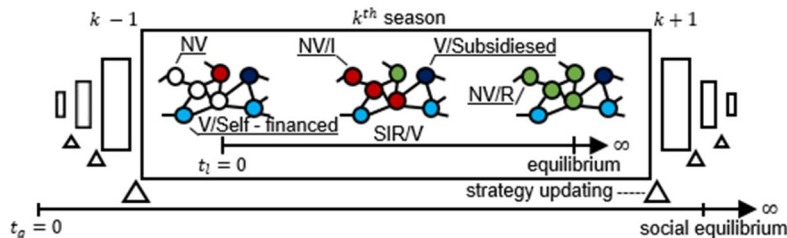


Figure 1 The present model consists of two layers having different time-scales; local time-scale (t_l) controlling what happening in a single season according to SIR/V, while global one (t_g) dealing with strategy time-evolution.

3.2 補助金スキーム

補助金のサイズを意味する σ 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し、社会平均利得 (SAP) を計算するとき $\sigma \cdot C_v \cdot N$ を差し引く (但し、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、所得税などで徴収される税負担の中からワクチン接種相当分を個々人が認識することは困難であるとの仮定に基づく)。補助金スキームは、無料化対象者の違いにより Fig.2 に示す 3 パターンを考える (図では補助金スキームの違いを vaccination game のフローに埋め込んで説明している)。Model 1 では、協調者 C (戦略 V)、裏切り D (戦略 NV) に不拘ランダムに対象者を選択する。よって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。Model 2 では、非協力者を強制的に接種せしめるとの発想から、裏切り D から無作為抽出したエージェントに接種する。Model 3 では、逆に協調者 C だけを対象とする。

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与える（以下、Random ケース）、回数大きい順（以下、Hub ケース）、小さい順（以下、Fringe ケース）の 3 ケースを比較する。

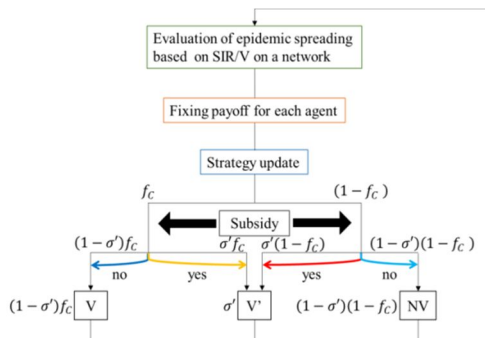
3.3 数値実験の流れ

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 エピソードの初期状態では、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。1 エピソードは十分に均衡に達するまで、時間ステップ（1 ステップは上記の 2 つのステージ 1 セットからなる）を繰り返す。最終 100 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。

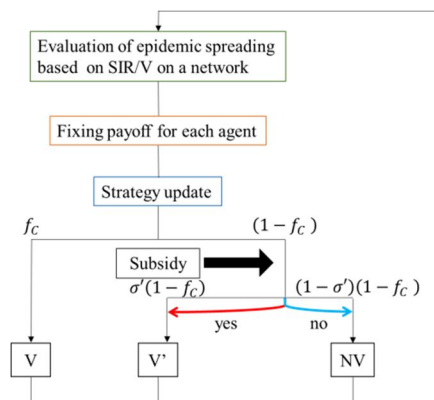
3.4 解析結果及び考察

Fig.3 に Model 1 の結果を示す。上から、 C_r (横軸) - σ (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.4, Fig.5 は Model 2, Model 3 を同様に示している。

(a) Model 1



(b) Model 2



(c) Model 3

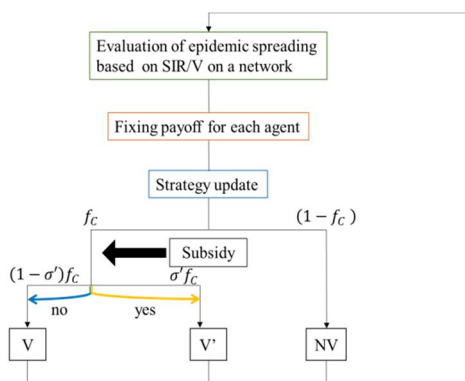


Figure 2 Schematic representation of three subsidy models. Panel (a), (b) and (c) respectively display Model 1, 2 and 3.

FES を観ると、Model 1 – Hub (Fig.3 (c-2)) と Model 3 – Hub (Fig.5 (c-2)) が 3 モデル \times 3 ケースの組み合わせの中で最も効率的に感染症封じ込めが達成されていることが解る。実際、ワクチンコストが著しく高く、補助金規模が極端に小さい場合以外には breakout は生じてない。

行政施策上、自己負担接種が出来ないような社会的弱者を無料接種対象とする考え方があり得るが、Model 2 – Hub の FES (Fig.4 (c-2)) は前記 2 設定を上回って好成绩とはならない。注目すべきは、この設定では協調率 f_c が著しく低くなってしまふ点 (Fig.4 (a-2)) である。これは、以下の理路により説明される。ハブエージェントの系全体へのインパクトは、自ら super-spreader となって大感染を招くとの感染ダイナミクス上の影響、多数の隣人を持つことで自戦略を彼らに模倣させる戦略ダイナミクスへの影響、とに分けられる。ワクチンコストに依存するが、ハブはリンク数が多いので感染リスクが高く、補助金がなくとも自己負担で接種するインセンティブがそもそも高い傾向にある。その

ような中において、ハブでDであるエージェントに無料接種させると、彼らはコスト負担なく感染を免れるので、常に free-rider となる。このことは、彼らの周辺の非ハブエージェントにDをコピーさせる結果となり、社会全体がNV戦略を採る裏切りエージェントに埋め尽くされることになる。自己負担接種エージェントを淘汰してしまうことは是非は社会的文脈の中で解釈すべき問題だろう。

但し、社会平均利得 SAP を比較すると、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) 生じるけれど、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)) とを上回って好成绩となっている。Model 1 と Model 3 が FES では好成绩なのに SAP では Model 2 に劣る、すなわち、社会的弱者優先策を採らずに無料接種をハブ優先に行くと感染症蔓延を抑制する観点からは最も効果的なのに、社会総コストの観点からは社会的弱者優先策に劣ってしまう、との示唆の結果となっている。本来、疾病コストに比して極端にワクチンコストが高い場合には、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総コストは小さくなるにも拘らず、ハブ優先基準だけで戦略については無差別に配布する (Model 1) もしくは協調者だけに配布する (Model 2; これは "Heaven helps those who help themselves" ポリシーと云えよう) と、無料接種に頼らずに自己負担接種を大きく促がしてしまうからである。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。

ハブ優先配布は常に合理化されるかを考えてみる。D に無料券を配るとし、ワクチンコスト小さく財源もごく小規模の場合に注目する。ハブ優先 (Fig.4 (*-2)) と末端優先 (Fig.4 (*-3)) の破線で囲われた領域を観ると、前者より後の方が若干社会総コストは小さい。何より、協調率は高く、感染の封じ込めに成功していることが看取出来る。無料券配布が僅少なので、ハブは感染リスク回避のため自己負担接種し、次数の低いエージェントは彼らに倣って自己負担接種を受け入れるようになる。末端 D は初期には補助金によりフリーライドに成功するものの、彼らのDが社会模倣により広がっていく可能性は低い。このことから、ハブ優先ポリシーは常に正しいわけではないことが解った。

3.5 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*

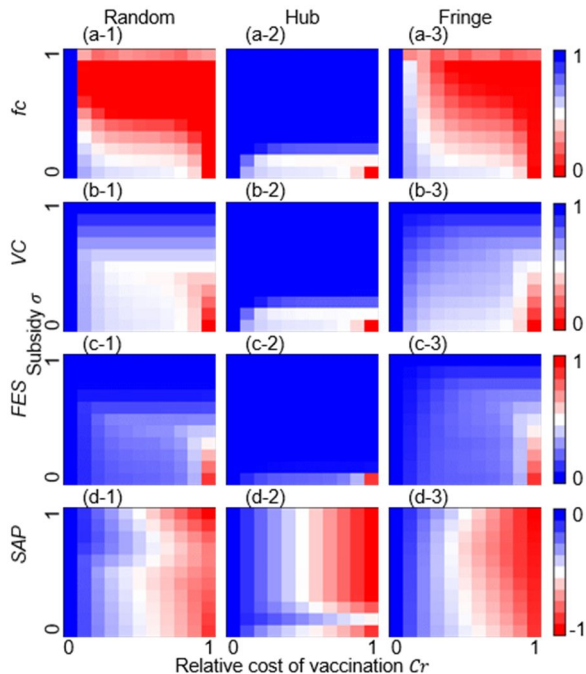


Figure 3 C_r - σ phase-diagram showing; cooperation fraction; f_c (top row), vaccination coverage; VC (second top), final epidemic size; FES (second bottom row), and social average payoff; SAP (bottom). Left, center and right panels respectively show Random, Hub and Fringe cases. For subsidy policy, Model 1 is presumed.

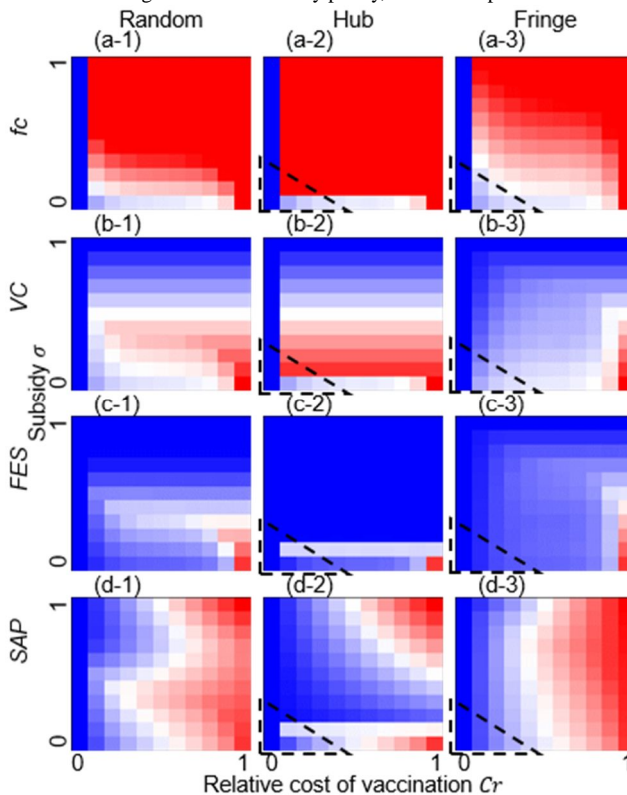


Figure 4 C_r - σ phase-diagram showed in the same format of Fig. 3. For subsidy policy, Model 2 is presumed.

- [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.

4. 研究成果

インフルエンザ・パンデミックを阻止する唯一の有効な手段はワクチン予防接種により集団全てを免疫化することだが、社会コストの観点から実現不可能である。また、ウィルスの時間変異性が大きいインフルエンザの場合、予防接種により獲得される免疫が流行のウィルス類型と一致せずワクチンが有効に機能しない事態を想定しなくてはならない。実際、現下実施されている A 型 B 型 3 種混合ワクチンはその年の流行株には免疫効果を発揮しない場合がある（但し、感染後の症状緩和が期待出来る）。さらに、我が国では、予防接種法に基づく定期接種の例外を除けば季節性インフルエンザ予防接種は保

険適用外であるから、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ことになり、社会全体としてみたととき結果的に接種率が上がらない事態も想起し得る（ワクチン接種ジレンマ）。

本研究では、情報科学、疫学、ネットワーク科学、進化ゲーム理論を複合的に応用し、ワクチン接種の社会行動を模擬するマルチエージェントシミュレーションモデルを人工社会に構築した。我々がこれまで準備研究で構築してきた Vaccination game の枠組みに、補助金スキームを付加し、補助金の税負担、疾病コスト、ワクチン接種コストすべてを含む社会コストを最小化するのに最適な、補助金スキームの基礎デザインを行うために大規模数値実験を行った。

それに依ると、従来の情報科学分野の知見から予想される「スーパースプレッダーとなるハブのエージェントに優先的に補助金によるワクチン接種を行う」とのスキームは、多くの場合に有効に機能するものの、万能ではないとの反例が明らかにされた。すなわち、予防接種コストが疾病コストに比して相対的に小さく、かつ、補助金の総予算規模が小さきとき（現実社会では蓋然性の高い条件設定であると考えられる）には、ハブではなく、社会複雑ネットワークの隣人数が小さい周辺部のエージェントに優先的に補助金を給付する方が、寧ろ社会効率が高くなる。これは、次数の高いハブエージェントは、感染リスクを自ら認識し、自助努力で予防接種する可能性があるため、かれらに予防接種補助金を給付することは、大感染予防には意味があっても、社会的誘引効果によってミスから予防接種を行うエージェントを増やす社会ダイナミクスが一部で阻害される、すなわち補助金によるワクチン接種の無駄うちが生じてしまうことによるものである。この発見は、極めて示唆的な、社会的処方箋をデザインする上で有意な知見であろう。

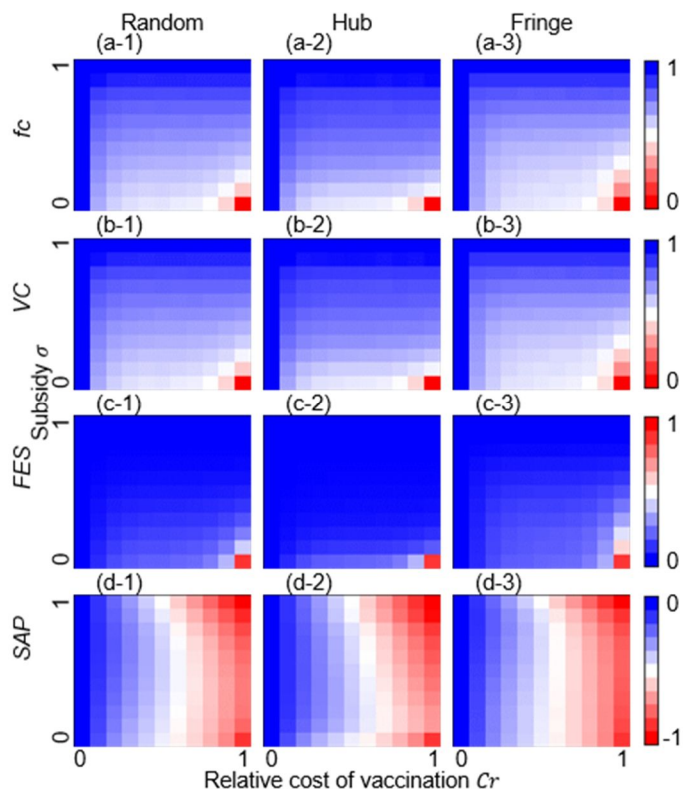


Figure 5 C_r - σ phase-diagram showed in the same format of Fig. 3. For subsidy policy, Model 3 is presumed.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計5件（うち査読付論文 5件/うち国際共著 3件/うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 Ito, H., Tanimoto, J.	4. 巻 2018
2. 論文標題 Scaling the phase- planes of social dilemma strengths shows game-class changes in the five rules governing the evolution of cooperation	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Royal Society Open Science	6. 最初と最後の頁 181085
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） http://doi.org/10.1098/rsos.181085	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -
1. 著者名 Kabir, K. M. A., Tanimoto, J., Wang, Z	4. 巻 91
2. 論文標題 Influence of bolstering network reciprocity in the evolutionary spatial Prisoner 's Dilemma game: A perspective	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 European Physical Journal B	6. 最初と最後の頁 312
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） https://doi.org/10.1140/epjb/e2018-90214-6	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する
1. 著者名 Kuga, K, Tanimoto, J.	4. 巻 2018
2. 論文標題 Impact of imperfect vaccination and defense against contagion on vaccination behavior in complex networks	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Journal of Statistical Mechanics: Theory and Experiment	6. 最初と最後の頁 113402
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） https://doi.org/10.1088/1742-5468/aae84f	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 Alam, M., Kuga, K. Tanimoto, J.	4. 巻 346
2. 論文標題 Three-strategy and four-strategy model of vaccination game introducing an intermediate protecting measure	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Applied Mathematics and Computation	6. 最初と最後の頁 408-422
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） https://doi.org/10.1016/j.amc.2018.10.015	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 Kabir, K. M. A., Kuga, K., Tanimoto, J.	4. 巻 119
2. 論文標題 Analysis of SIR epidemic model with information spreading of awareness	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Chaos, Solitons & Fractals	6. 最初と最後の頁 118-125
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) https://doi.org/10.1016/j.chaos.2018.12.017	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

〔学会発表〕 計3件 (うち招待講演 0件 / うち国際学会 0件)

1. 発表者名 田中真樹, 谷本潤
2. 発表標題 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?
3. 学会等名 第24回交通流と自己駆動粒子系のシンポジウム
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Muntasir Alam, Jun Tanimoto
2. 発表標題 Introduction of intermediate defense measure in an evolutionary vaccination game
3. 学会等名 第24回交通流と自己駆動粒子系のシンポジウム
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 K M Ariful Kabi, Keisuke Nagashima, Jun Tanimoto
2. 発表標題 Influence of Metapopulation traffic model with vaccination game approach to suppress the disease spreading on different graphs
3. 学会等名 第24回交通流と自己駆動粒子系のシンポジウム
4. 発表年 2018年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
--	---------------------------	-----------------------	----