

頑固な個人が社会ネットワーク上における 自発的ワクチン接種行動に与える影響

福田枝里子¹, 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 総合理工学府 環境共生工学部門

概要

進化ゲーム理論を適用した感染症伝搬ダイナミクスをモデリングすることにより、感染症の流行に対する個々人のワクチン接種行動について研究する。本稿では、社会ネットワーク上の集団中に常にワクチン接種戦略もしくは非接種戦略をとる”頑固な個人（接種者／非接種者）”が存在する場合を考える。小さな割合の頑固な個人の存在が、感染症の流行やワクチン接種行動にもたらす影響を報告する。

Influence of Stubborn Individuals on Voluntary Vaccination Behavior in Social Networks

Eriko Fukuda¹, Jun Tanimoto¹, Aya Hagishima¹, Naoki Ikegaya¹

¹Interdisciplinary Graduate School of Engineering Sciences, Kyushu University

Abstract

We investigate the decision-making process with vaccination by modeling the dynamics for epidemic spreading applied to evolutionary game theory. In this study, we consider the case where “stubborn individuals” who consistently hold the vaccination strategy (stubborn vaccinated individuals) or the no-vaccination strategy (stubborn unvaccinated individuals) are presented in social networks. We report what influence in the epidemic spreading and voluntary vaccination behavior are brought if there are the stubborn ones, a small fraction of individuals in a social network.

1 緒論

ワクチン接種が有効であるような感染症に対して感受性人口に先制的接種を行う事は、感染症の蔓延を制御し防止するための主要な公衆衛生上の手段である[1]。しかしながら、自主的なワクチン接種政策下では、個々人の自己利益に基づく接種行動と社会全体にとって最適な接種レベル、すなわち集団免疫レベルとの間にかい離が生じてしまう[2,3]。これはよく知られた疫学におけるワクチン接種ジレンマである。集団のワクチン接種率が増加すると、残りの未接種者は極めて感染しにくくなる[1,4]。ゆえに、彼らのワクチン接種を行うインセンティブが低下してしまい、結果、このジレンマが感染症の根絶を厳しくしてしまう。

この観点から、ここ10年でワクチン接種ジレンマを特徴付けるために進化ゲーム理論を適用した研究が行われており、有益な結果が報告されている[5-7]。Fuらは、ワクチン接種におけるエージェントの模倣（学習）行動と集団構造の影響を探求するために、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構築した[5]。文献[5]において彼らは、エージェントのワクチン接種行動は集団構造およびワクチン接種コストに大きく依存することを示した。多くのワクチン接種ジレンマを扱う進化ゲーム理論的研究では、ある感染症の脅威に晒されたエージェントの感染の知覚リスクは同じであると仮定されている。しかし現実には、感染の知覚リスクに対して過度に敏感で、いつでもワクチン接種戦略をとる個人も存在するだろう。Liuらは、集団中に頑固な（献身的な）ワクチン接種者が存在する場合における影響を研究し、頑固なワクチン接種者らが集団のワクチン接種率の促進に大きく寄与することを示した

[6]。しかしながら、感染症の脅威に晒されている集団中の頑固な個人のすべてが、“ワクチン接種を行うこと”に対して頑固であるとは限らない。実際に、感染症に関する知識の低下による感染リスクの過小評価や科学的証拠に基づかないワクチン接種コストの過大評価もワクチン接種率を引き下げてしまう深刻な原因となっている[8]。したがって、頑固なワクチン接種者とは対照的に、いつでも非接種戦略をとる頑固なワクチン非接種者もまた存在しうる。

以上より、本研究では集団中の頑固な個人（接種者／非接種者）の存在が集団のワクチン接種行動や感染症の蔓延に与える影響を感染症の伝搬過程にワクチン接種に関する戦略の模倣過程を適用したモデルを用いて研究する。モデルの詳細は次節に記述する。

2 モデル

2.1 ネットワーク上のワクチン接種ゲーム

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集団を考える。集団中には頑固なワクチン接種者(Stubborn Vaccinated individual, SV)およびワクチン非接種者(Stubborn Unvaccinated individual, SU)が含まれる。本稿では、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。そのような感染症において、ワクチン接種による個体の免疫獲得の効果は永続的なものではないため毎年接種する必要がある。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、各エージェントは季節的な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

表1: 流行期終了後の戦略および疾病状況に応じた利得.

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

ワクチン接種を行うか否かの意思決定を行う。ワクチン接種を行った (SV を含む) エージェントには、ワクチン接種コスト (金銭的損失や副作用等の複合的なリスクが含まれる) C_v が生じる。簡単のため、ワクチン接種者らはその1シーズン中において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 (SU を含む) エージェントには、1シーズン中において感染のリスクが生じる。

第2ステージ (流行期) では、流行株に感染した初期エージェント数 I_0 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。社会ネットワーク上の感染症の伝播過程をシミュレーションするにあたり、Gillespie アルゴリズムを用いた[5,9]。このモデルでは、集団 N は感受性エージェント S 、感染性エージェント I 、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日当たり、1人当たりの感染率を β [$\text{day}^{-1} \text{person}^{-1}$]、1日当たり感染状態から回復する回復率を γ [day^{-1}]とする。

疾病伝播の様相はネットワーク構造に大きく依存する。よって本稿では、典型的なネットワーク構造である正方格子および Barabási-Albert スケールフリーネットワーク (BA-SF) [10]の2つを想定し、ワクチン接種者がいない場合の最終感染者の割合が約9割になるような感染率 β の値を選んだ。この方法によって、正方格子では $\beta=0.46$ 、BA-SFでは $\beta=0.55$ とした。また、回復率は $\gamma=1/3$ とした (すなわち、感染性を有する平均日数が3日)。これらの値は、典型的なインフルエンザを想定したものである[5]。

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。流行期の間に感染した (感染した SU を含む) 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幸運な (健康な SU を含む) フリーライダーのコストは0である。ここで、簡単化のため、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の3タイプに応じて表1のように与えられる。

2.2 戦略適応方法

以上の2ステージを終えると、各エージェントは次のシーズン始めにワクチン接種を行うか否かの意思決定を再度検討する。戦略適応のルールは以下の通りである。あるエージェント i は、自身の隣人の中からランダムにエージェント j を選ぶ。それぞれの利得を 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 比較することで与えられる[11]。

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

ここで、 κ は利得差に対する敏感度を意味する。本稿では κ の値を多くの先行研究で用いられている 1 とした。

式(1)は、自身と相手の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している。なお、式(1)において、もしエージェント i が SV もしくは SU の場合、 i は自身の戦略を保持し続けるため j の戦略や利得差に関わらず $P(s_i \leftarrow$

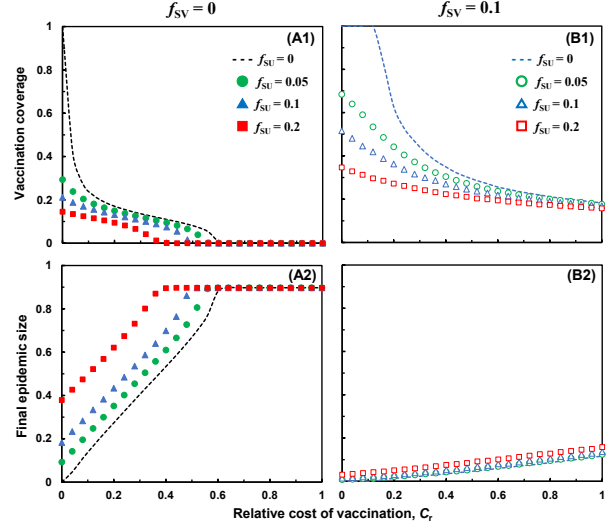


図1: 正方格子上におけるSUの割合 f_{su} 別の均衡時のワクチン接種率 (上図) および最終感染者の割合 (下図)。(A1, A2) $f_{sv} = 0$, (B1, B2) $f_{sv} = 0.1$ 。パラメータ: $N = 100 \times 100$ (von Neumann 近傍), $\beta = 0.46 \text{ day}^{-1} \text{ person}^{-1}$, $\gamma = 1/3 \text{ day}^{-1}$, $I_0 = 10$ 。

s_j)は0である[6]。

2.3 シミュレーション方法

初期状態において、集団中の (ある割合 f_{sv} の SV を含む) ワクチン接種者と (ある割合 f_{su} の SU を含む) 非接種者は等しい割合で存在し、集団サイズ $N = 10000$ の社会ネットワーク上にランダムに分布している。なお、SV と SU はあるシミュレーション中、すなわちあるエピソードの最初のシーズンから最後のシーズンまでずっと不動である。その後、流行株に感染した初期エージェント $I_0 = 10$ 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, 3, 4に示している均衡状態の結果は、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

図1および図3は、相対的ワクチン接種コスト C_r の値に対する f_{sv} および f_{su} 別の均衡のワクチン接種率と最終感染者の割合である。全体的な傾向として、集団中に存在するSUの割合が大きいほどワクチン接種率が低く、結果として最終感染者の割合が大きいことが分かる。特に、その傾向はBA-SF上での結果の方がより顕著であることが分かる。それは、次数に不均一性 (べき性) を持つBA-SFは、次数が均一な正方格子よりも容易に疾病が蔓延しやすい事に原因がある[12]。疾病が蔓延しやすいBA-SF上では、感染するリスクの高い高次数者 (いわゆるゆハブ) である程、自主的なワクチン接種を行う (図4)。加えて、多くの低次数者の (ハブの戦略を模倣するという) 模倣行動により、集団のワクチン接種行動が促進される[5]。したがって、もともと自主的なワクチン接種行動が促進されにくい正方格子上よりも (ワクチン接種率が低下する効果) が顕著に現れたと言える。

一方、図1(B1)および図3(B1)を見ると、図1(A1)および図3(A1)の集団中にSVおよびSUが存在しない ($f_{sv} = f_{su} = 0$) 結果と比較して、 C_r が小さい範囲ではSUが存在する効

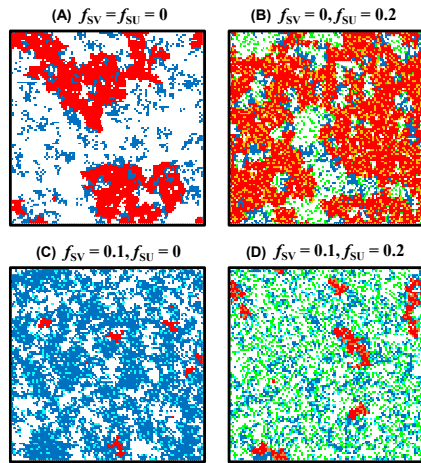


図2: 図1における $C_r = 0.2$ のときの正方形格子上の均衡時のある流行期終了後の典型的なスナップショット。青はワクチン接種者、水色はSV、赤は感染者、橙は感染したSU、白はフリーライダー、緑は健康なSUを示している。

果、 C_r が大きい範囲ではSVの存在する効果（すなわちワクチン接種率が増加する効果）がより顕著に現れていることが分かる。これはワクチン接種を行うインセンティブに原因がある。 C_r が小さい範囲では、ほとんどコストを負担することなくワクチン接種を行えるため、エージェントのワクチン接種のインセンティブはもともと高い。よって、ワクチン接種行動を促進するSVの効果はあまり現れなかったと言える。一方、 C_r が大きい範囲ではその逆にワクチン接種のインセンティブが低い。よって、ワクチン非接種行動を促進するSUの効果はあまり現れなかったと言える。

次節では、ネットワーク構造の影響をより詳細に調べるため、3.1節では正方形格子、3.2節ではBA-SF上の結果について議論する。

3.1 正方形格子

図1(A1)および(A2)は、 $f_{SV} = 0$ の（すなわち集団中にSVが存在しない）場合の相対的ワクチン接種コスト C_r の値に対する f_{SU} 別の均衡のワクチン接種率と最終感染者の割合である。なお、 $f_{SU} = 0$ の（すなわち集団中にSUが存在しない）場合は文献[5]の結果に対応する。これらを見ると、ある C_r における集団中のSUの割合が増加するほどワクチン接種率が低下し、その結果として最終感染者の割合が増加していることが分かる。図2(A)および(B)は $C_r = 0.2$, $f_{SV} = 0$ における f_{SU} 別の均衡時のある流行期終了後の典型的なスナップショットである。図2(A)を見ると、SVとSUがともに集団中に存在しない場合、集団中の少数のワクチン接種者が小さなクラスターを複数形成しているものの、感染が拡大していることが分かる。一方、図2(B)を見ると、集団中にSUのみが20%存在することにより、ごく少数のワクチン接種者が小さなクラスターを複数形成することしかできず、感染が大きく拡大していることが分かる。これらの結果から、SUの存在が周囲のワクチン非接種行動をわずかながら促進し、流行を引き起こしたと言える。この理由は以下のように説明される。ネットワーク上のワクチン接種行動において、個々人の模倣行動による感受性エージェントのクラスターの形成は、感染症の流行を容易に引き起こすことが指摘されている[13]。SUが集団中に存在すると、SUが周囲のエージェントのワクチン非接種行動を促進する。結果として大きな感受性エージェントのクラスターが形成されてしまい、多くのエージェントが感染してしまう。しかしながら、SUが存在しなくとも正方形格子でのワクチン接種率はもともと低いで、集団のワクチン接種率がさらに低下してしまうと、ワクチン非接種者はワクチン接種者にフリーライドすることが厳しくなってしまう。よって、SUはワクチン非接種行動を大きく促進することはできなかった（すなわちワクチン接種率の大きな減少は起こらなかった）と言える。

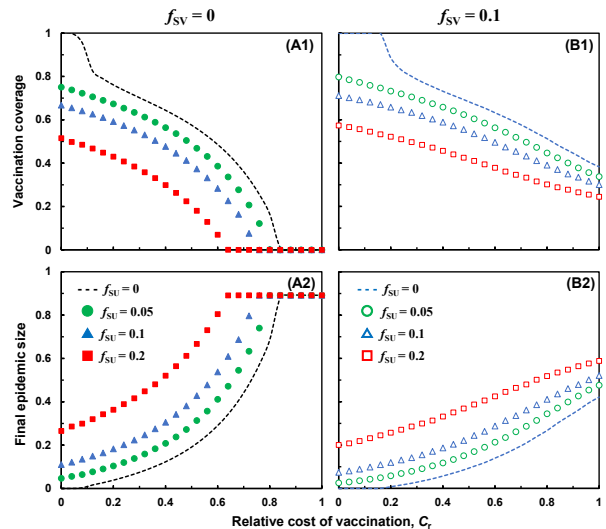


図3: BA-SF上におけるSUの割合 f_{SU} 別の均衡時のワクチン接種率（上図）および最終感染者の割合（下図）。(A1, A2) $f_{SV} = 0$, (B1, B2) $f_{SV} = 0.1$. パラメータ: $N = 10000$, 平均次数 $\langle k \rangle = 4$, $\beta = 0.55 \text{ day}^{-1} \text{ person}^{-1}$, $\gamma = 1/3 \text{ day}^{-1}$, $I_0 = 10$.

チン接種率はもともと低いで、集団のワクチン接種率がさらに低下してしまうと、ワクチン非接種者はワクチン接種者にフリーライドすることが厳しくなってしまう。よって、SUはワクチン非接種行動を大きく促進することはできなかった（すなわちワクチン接種率の大きな減少は起こらなかった）と言える。

図1(B1)および(B2)は、 $f_{SV} = 0.1$ の場合の相対的ワクチン接種コスト C_r の値に対する f_{SU} 別の均衡のワクチン接種率と最終感染者の割合である。なお、 $f_{SU} = 0$ の（すなわち集団中にSUが存在しない）場合は文献[6]の結果に対応する。 $f_{SV} = 0$ の場合と同様、 f_{SU} が大きいほど、ある C_r におけるワクチン接種率は低下し、最終感染者の割合が増加していることが分かる。しかしながら、集団中にSVおよびSUが存在しない結果[5]と比較すると、たとえ集団中にSUが存在したとしても、少ない割合のSVの存在によって広い C_r の範囲（およそ $C_r > 0.04$ ）で最終感染者の割合の大きく抑制されている。図2(C)および(D)は $C_r = 0.2$, $f_{SV} = 0.1$ における f_{SU} 別の均衡時のある流行期終了後の典型的なスナップショットである。図2(C)を見ると、SVのみ集団中に存在する場合、集団中の多くのワクチン接種者が大きなクラスターをネットワーク上にまんべんなく形成し、ほとんど感染が伝播していないことが分かる[6]。一方、図2(D)を見ると、SVとSUがともに集団中に存在する場合、集団中のワクチン接種者が小さなクラスターをネットワーク上にまんべんなく形成し、 $f_{SV} < f_{SU}$ であるのにも関わらず、感染の伝播を大きく抑制できていることが分かる。これらの結果から、特に図2(D)より、正方形格子上にランダムに分布している（決して多くない）SVが周囲のワクチン接種行動を促進し、集団中にまんべんなくワクチン接種者のクラスターを形成すること助け、結果として大いに感染拡大を抑制できたと言える。この理由は以下のように説明される。前述したように、ネットワーク上の感染症の流行を抑制するためには、感受性エージェントのクラスター形成を抑制することが効果的である[13]。これを達成するためには、ワクチン接種率を増加させるとともにワクチン接種者のクラスターを集団中にまんべんなく分布させることが効果的である。なぜなら、集団中にまんべんなくワクチン接種者のクラスターが存在することで、大きな感受性エージェントの

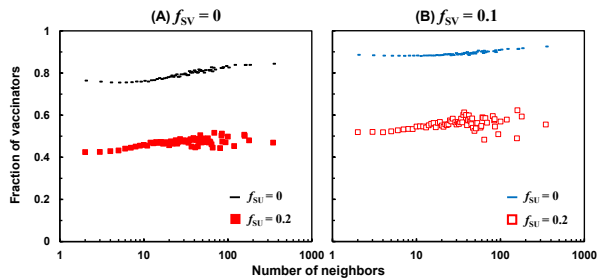


図4: 図3における $C_f=0.2$ のときの BA-SF 上の隣人数 (度数) 別のワクチン接種率。

クラスター形成を妨げることが可能となり、結果としてネットワーク上のどこで初期感染者が発生したとしても広域伝搬を抑制することが可能となるからである。SV と SU がともに集団中に存在しない場合は、ワクチン接種者のクラスターが小さく（すなわち集団のワクチン接種率が低く）、ネットワーク中にまんべんなく分布していないため感染が広域に拡大している（図2(A)）。一方、SV と SU がともに集団中に存在する場合では、SV の存在によりエージェントの模倣によるワクチン接種行動が促進されているだけでなく、サイズは小さいもののワクチン接種者のクラスターがまんべんなく分布し、大きな感受性エージェントのクラスターが形成されることを抑制している（図2(D)）。これは、個人の模倣行動とネットワーク上での局所的相互作用により、少ない割合の SV が感染症の蔓延抑制に大きく寄与したことを意味する（詳細は文献[6]を参照のこと）。

3.2 BA-SF

図3(A1)および(A2)は、 $f_{sv}=0$ の場合の相対的ワクチン接種コスト C_f の値に対する f_{su} 別の均衡のワクチン接種率と最終感染者の割合である。 $f_{su}=0$ の場合は文献[5]の結果に対応し、正方格子の結果と同様、ある C_f における集団中の SU の割合が増加するほどワクチン接種率が低下し、その結果として最終感染者の割合が増加していることが分かる。図4(A)は $C_f=0.2$ 、 $f_{sv}=0$ における f_{su} 別の隣人数（度数）に対するワクチン接種率である。図2(A)を見ると、全体的な傾向として SU の存在の有無に関わらず高次数者（ハブ）ほどワクチン接種率が高いが、 $f_{su}=0.2$ の場合と $f_{su}=0$ の場合と比較すると、あらゆる次数についてワクチン接種率が低くなっているだけでなく、必ずしも高次数者ほど高接種率でない（ハブのワクチン接種率にばらつきがある）ことが分かる。これは、次数にべき性を持つ BA-SF 上の集団中から、SU がランダムに選ばれることに原因がある。一般に、SF ネットワークでは低次数者であるほど数として多く存在し、ハブであるほど数は少ない。よって、ある高次数を持つエージェントのうち一人でも SU に選ばれれば、それはその次数におけるワクチン接種率の大幅な減少を招く。加えて、高次数者のワクチン接種率の低下は、集団の大多数を占める低次数者の（ハブの非接種戦略を模倣するという）模倣行動により集団全体のワクチン接種率の減少を引き起こす。この2点の理由により、図4(A)のような結果が得られたと考えられる。

図3(B1)および(B2)は、 $f_{sv}=0.1$ の場合の相対的ワクチン接種コスト C_f の値に対する f_{su} 別の均衡のワクチン接種率と最終感染者の割合である。 $f_{su}=0$ の場合は文献[6]の結果に対応し、 $f_{sv}=0$ の場合と同様、 f_{su} が大きいほど、ある C_f におけるワクチン接種率は低下しているが、正方格子の結果と比較して、集団中に SV および SU が存在しない場合に対する最終感染者の割合の増加がより大きいことが分かる（図1(A2), (B2)および図3(A2), (B2)）。これは、SF 上

において感染症の蔓延を抑制するためには、スーパースプレッターとなり得る高次数者であるほど自主的なワクチン接種を行うことが最終感染者の割合の抑制という観点において重要だからである[7]。図4(B)は $C_f=0.2$ 、 $f_{sv}=0.1$ における f_{su} 別の隣人数（度数）に対するワクチン接種率である。図4(A)の結果と同様、高次数者であるほどワクチン接種率が高い傾向にあるものの、SV が存在しているにも関わらず、SU の存在によりあらゆる次数のワクチン接種率は大きく低下していることが分かる。前述したように、ハブのワクチン接種率の低下は感染症の大きな蔓延を引き起こす。それは、SU に選ばれたハブの非接種行動によりハブだけでなく集団の大多数を占める低次数者の非接種行動も促進されるためである。以上より、感染症の流行という観点から見ると、SV の存在による正の効果よりも、SU の存在による負の効果の方がはるかに強力であったと言える。

4 結論

今回、常にワクチン接種を行う頑固な接種者（SV）および常にワクチン接種を行わない頑固な非接種者（SU）の存在が個人のワクチン接種行動および感染症の蔓延にどのような影響をもたらすのかを検討した。その結果、SV および SU の効果の現れ方はネットワーク構造およびワクチン接種コストに大きく依存することが明らかとなった。

正方格子上では、ワクチン接種コストのほぼ全域について、わずかな割合の SV が空間的に散らばって大感染を防止する効果を発揮し、たとえ SU が SV よりも多く集団中に存在したとしても、双方が存在しない場合よりも感染の程度が軽微で済むことが分かった。一方、BA-SF 上では、中程度以下のワクチン接種コストの範囲において、高次数者が SU に選ばれることで集団のワクチン接種率が大きく低下し、たとえ SV が集団中に存在したとしても感染の拡大を防止することは厳しいことが分かった。

以上のことから、政府や自治体などが感染症の流行を抑制するための介入行動を検討する際には、ネットワーク構造やワクチン接種コストだけではなく、SU の存在を考慮に入れた上で適切に介入行動を施す（例えば補助金を投入して SV を選ぶ）必要があると言えよう。

謝辞

本研究の一部は科研費萌芽研究 (#25560165)、立石科学技術振興財団による。記して謝意を表する。

参考文献

- [1] R. M. Anderson and R. M. May, *Infectious diseases of humans: Dynamics and Control* (Oxford University Press, New York, 1991).
- [2] P. Fine, J. Clarkson, *Am. J. Epidemiol.* **124**, 1012 (1986).
- [3] C. T. Bauch, A. P. Galvani, D. J. D. Earn, *Proc. Natl. Acad. Sci. U. S. A.* **100**, 10564 (2003).
- [4] M. Brisson, W. Edmunds, *Med. Decis. Making* **23**, 76 (2003).
- [5] F. Fu, D. I. Rosenbloom, L. Wang, M. A. Nowak, *Proc. R. Soc. B* **278**, 42 (2011).
- [6] X. T. Liu, Z. X. Wu, L. Zhang, *Phys. Rev. E* **86**, 051132 (2012).
- [7] E. Fukuda, S. Kokubo, J. Tanimoto, Z. Wang, A. Hagishima, N. Ikegaya, *Chaos, Solitons Fractals* **68**, 1 (2014).
- [8] V. A. Jansen, N. Stollenwerk, H. J. Jensen, M. E. Ramsay, W. J. Edmunds, C. J. Rhodes, *Science* **301**, 804 (2003).
- [9] D. T. Gillespie, *J. Phys. Chem.* **81**, 2340 (1977).
- [10] A. L. Barabási and R. Albert, *Science* **286**, 509 (1999).
- [11] G. Szabo and C. Toke, *Phys. Rev. E* **58**, 69 (1998).
- [12] M. J. Keeling and K. T. D. Eames, *J. R. Soc. Interface* **2**, 295 (2005).
- [13] M. L. Ndeffo Mbah, J. Liu, C. T. Bauch, Y. L. Tekel, J. Medlock, L. A. Meyers, A. P. Galvani, *PLoS Comput. Biol.* **8**(4), e1002469 (2012).