

免疫損失を考慮したワクチン接種ゲームにおける社会ジレンマの分析

西村樹¹, 立川雄一^{1,2}, 内海忍¹, 谷本潤^{1,3}

¹九州大学大学院 総合理工学府 総合理工学専攻

²エム・アール・アイ リサーチアソシエイツ(株)

³九州大学 総合理工学研究院 環境工学部門

概要

SEIRS を基に無症候と有症候状態に加え, 入院と免疫状態を導入したコンパートメントモデルを定式化し, これに Bauch の Behavior モデルに基づくワクチン接種ダイナミクスを加味した Vaccination Game を構築した. Social Efficiency Deficit; SED を解析することでモデルダイナミクスの背後に社会的ジレンマが生じるかを定量的に同定した. その結果, 無症候性感染者の割合やその感染力の割引率に伴い無駄なワクチン接種や不足なワクチン接種に起因する内訳の異なる社会的ジレンマが確認された.

Social dilemma analysis on a vaccination game based on SEIRS process plus Behavior model

Itsuki Nishimura¹, Yuichi Tatsukawa^{1,2}, Shinobu Utsumi¹, Jun Tanimoto^{1,3}

¹Interdisciplinary Graduate School of Engineering Sciences, Kyushu University

²MRI Research Associates Inc.

³Faculty of Engineering Sciences, Kyushu University

Abstract

A new SEIRS-base ODE (Ordinary Differential Equation) model is built, where asymptomatic and symptomatic infectious compartments, hospitalized state and immune state are additionally introduced, which is dovetailed with a behavior model that defines the vaccination rate as time-variable. We also apply Social Efficiency Deficit; SED, and quantitatively identify whether or not social dilemma taking place behind the model dynamics. As a result, SED with different breakdowns resulting from wasteful or insufficient vaccination due to the rate of asymptomatic people and their discounted rate of infectivity is confirmed.

1. 緒言

免疫消失を考慮した SEIRS プロセスにワクチン接種意思決定ダイナミクスを Bauch の Behavior モデル[1]で考慮した Vaccination Game ([2])を構築し, 社会ダイナミクスの背後に潜在するジレンマの構造を解析した結果を報告する.

2. モデル

S:感受性, E:曝露, I_A:無症候性感染, I_S:

有症候性感染, H:入院, IM:免疫の6状態から構成されるプロセスに Behavior モデルに従うワクチン接種率 x を融合したモデル(図1)を構築した(表式を図2に示す). 本報では, 無症候性感染の生起率 p と有症候感染の感染率に対する無症候感染の比 q を主なパラメータとする. ダイナミクスは, 各コンパートメントおよび変数 x が Disease Free もしくは Endemic

相になるまで追跡し、総感染者数、総ワクチン接種者数を同定。感染コストに対して正規化したワクチン接種コストを仮定することで、該エピソードの諸パラメータ設定に対する社会総コスト(Average Social Payoff; ASP)を求め、これを ASP^{NE} とする。一方、諸パラメータ設定そのままに x を変動させ、ASP 最大(社会コスト最小)となる社会最適となる ASP^{SO} を求める。両者のギャップが Social Efficiency Deficit (SED) [2] である。SED はジレンマの存否を示し、正值は Behavior モデルによる均衡が社会最適に対して劣位で改善可能であることを表意するから、すなわち社会ジレンマの大きさを意味する。

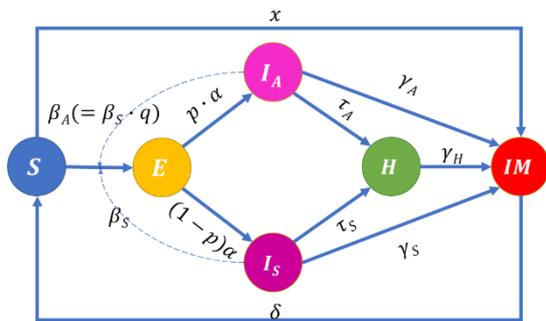


図 1 モデルの概略

$$\begin{aligned}
 \dot{S} &= \delta \cdot IM - (\beta_S \cdot q \cdot I_A + \beta_S \cdot I_S + x) \cdot S \\
 \dot{E} &= (\beta_S \cdot q \cdot I_A + \beta_S \cdot I_S) \cdot S - p \cdot \alpha \cdot E - (1-p) \cdot \alpha \cdot E \\
 \dot{I}^S &= (1-p) \cdot \alpha \cdot E - \tau_S \cdot I_S - \gamma_S \cdot I_S \\
 \dot{I}^A &= p \cdot \alpha \cdot E - \tau_A \cdot I_A - \gamma_A \cdot I_A \\
 \dot{H} &= \tau_A \cdot I_A + \tau_S \cdot I_S - \gamma_H \cdot H \\
 \dot{IM} &= \gamma_A \cdot I_A + \gamma_S \cdot I_S + \gamma_H \cdot H - \delta \cdot IM + x \cdot S \\
 \dot{x} &= \varpi \cdot x \cdot (1-x) \cdot (I_S - \kappa \cdot C_v)
 \end{aligned}$$

p : 無症候感染の生起率 q : 有症候感染率に対する無症候感染比
 β_A : 感染率($S \rightarrow I_A$, $\beta_A = \beta_S \cdot q$) β_S : 感染率($S \rightarrow I_S$)
 τ_A : 入院率($I_A \rightarrow H$) τ_S : 入院率($I_S \rightarrow H$)
 γ_A : 回復率($I_A \rightarrow IM$) γ_S : 回復率($I_S \rightarrow IM$)
 κ : ワクチン接種に対する感度 α : EからIへの変移率
 C_v : 相対的ワクチン接種コスト δ : 免疫損失率

図 2 表式と用語

3. 結果および考察

図 3 は SED と ASP^{NE} , ASP^{SO} を p - q パラメータ平面に描いた結果である。SED パネルに社会ジレンマのある領域 1 と領域 2, ジレンマのない領域 3 を示した。領域 1 は、ワクチン接種

をすることが社会最適となるのに、Behavior モデルに委ねた結果はそこまでの接種率には至らずジレンマとなっていることを意味する。無症候感染者割合が大きく ($p \approx 1$), 無症候感染が有症候感染と同等の感染力を持つ ($q \approx 1$) エリアでよりジレンマが大きくなるのは、「観えない」無症候感染者によりもたらされる感染拡大に接種行動が適応出来ない(本来接種すべきなのにそこまで接種率が上がらない(a)) ことによる。領域 3 と 2 の境界に示す赤線は $R_0=1$ を意味する。 $R_0=1$ より下方にある領域 2 では、社会最適はワクチン接種しないことで達成されるのに、流行初期でワクチン接種するなど過剰なワクチン接種により社会ジレンマが生じてしまうことを示唆している(感染力からしてワクチン接種の必要がないのに、Behavior モデルが過剰な接種行動を生んでいる)。領域 3 では、仮定した Behavior モデルが社会最適と一致するような行動ダイナミクスをもたらしたことにより、SED のギャップがなくなる。

(a) SED (b) ASP^{NE} (c) ASP^{SO}

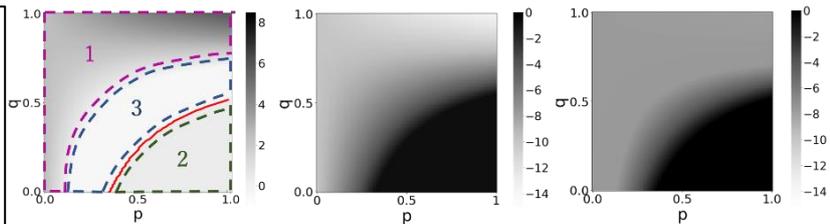


図 3 SED と ASP の p - q ヒートマップ $I_{initial} = 0.0005$, $R_0 = 2.5$, $\alpha = 0.4$, $\gamma_A = 0.3$, $\gamma_S = 0.3$, $\gamma_H = 0.5$, $\beta_S = \gamma_S \cdot R_0$, $\beta_A = \beta_S \cdot q$, $\tau_A = 0.1$, $\tau_S = 0.2$, $\omega = 0.1$, $C_v = 0.5$, $\kappa = 0.1$, $\delta = 0.01$

参考文献

[1] Bauch, C. T., Bhattacharyya, S.; Evolutionary game theory and social learning can determine how vaccine scares unfold, PLoS Computational Biology 8, e1002452, 2012.
 [2] Tanimoto, J.; Sociophysics Approach to Epidemics, Springer, 2021.