

## 環境－社会物理学を適用した感染症の流行現象とワクチン接種ジレンマに関する研究

福田，枝里子

<https://doi.org/10.15017/1654934>

---

出版情報：九州大学，2015，博士（工学），課程博士  
バージョン：  
権利関係：全文ファイル公表済

氏 名 : 福田 枝里子

論 文 名 : 環境—社会物理学を適用した感染症の流行現象とワクチン接種ジレンマに関する  
研究

区 分 : 甲

## 論 文 内 容 の 要 旨

1918年から1919年にかけて世界的に大流行したスペインかぜは、記録上人類が経験した最も深刻なインフルエンザ・パンデミックである。その後アジアかぜ(1956-1957)や香港かぜ(1968-1969)が広範囲な被害をもたらし、近年では重症急性呼吸器症候群;SARS(2002-2003)や新型(豚)インフルエンザ(2009-2010)が記憶に新しい。そして2012年に流行が深刻化した中東呼吸器症候群;MERSは、2015年現在も猛威を振っている。現在ますます都市域の人口密度の増加が進み、また長距離移動手段の発展により世界のスモールワールド化が加速しており、容易に人類全体への脅威となりうる感染症流行問題に対して有効かつ実行可能な施策を見出すことは世界的急務である。

人間社会で流行する感染症に対する防疫策を見出すためのアプローチは様々であるが、その中で感染症の流行現象を数理モデルによって理解・予測しようとする研究(理論疫学)は基礎的研究分野の一つであり古くから遂行されている。感染症伝播ダイナミクスを記述する数理モデルを用いてワクチン接種や隔離などの介入行為を評価することは、公衆衛生上極めて重要なテーマの一つである。

広域伝播する感染症の流行を防止・抑制する強力な手段の一つとして、先制的ワクチン接種による感受性人口の免疫化が挙げられる。ワクチン接種による免疫獲得者の増加は、接種者本人の感染(発症)や重篤化を予防するだけでなく、未接種者の感染リスクの低減に貢献し、さらには集団免疫(感染症の流行を防止できるほどの高い接種率が達成されている社会状態)という公共財を誘導する。しかしながら、我が国における季節性インフルエンザワクチン接種政策のように、ワクチン接種が個人の自主性に委ねられている社会においては、ワクチン接種に関する個人の意思決定が接種・感染コストなどのリスク評価や他人の接種行動による影響など複合的な要因に左右されてしまうため、社会的に最適な接種率が自律的に達成されるとは限らない。あるいは仮に高い接種率が達成されたとしても、高い接種率による感染リスクの低下という公共財的恩恵が個人の接種を行う方向へのインセンティブを低下させ、逆に未接種のまま公共財にフリーライドして自身の感染を逃れるという方向のインセンティブを増加させてしまう。これは、任意接種政策下においてワクチン接種に関する社会的ジレンマ(ワクチン接種ジレンマ)が生じてしまうということの意味しており、このジレンマの存在は、ワクチン接種という公衆衛生上の問題においても個人の意思決定が社会に重大な影響を及ぼすということの意味する。

従来、感染症の流行に関する研究は疫学、公衆衛生学、および統計学を中心に行われてきており、上述のような個人の意思決定という自由度は考慮されていなかった。そこで近年、適応的な意思決定理論を扱う進化ゲーム理論を中心として理論疫学、ネットワーク科学、および社会物理学などを学際的に取り入れることにより、感染症の流行とそれに伴う社会的ジレンマを、感染症流行の数理モデルに意思決定主体(個人)間の社会的相互作用を組み込んだモデルとして扱う研究が活発化している。このようなモデルは「ワクチン接種ゲーム」と総称され、その枠組みを適用・拡張することで、流行抑制効果の試行錯誤的な検証が行われている。

本研究は、任意接種政策下における感染症流行問題の解決・改善に向け、社会のワクチン接種率を十分に向上

させ、かつ維持させるために実行可能かつ有効な施策提言に資することを最終的な目標としている。そのためにはまず、ワクチン接種ジレンマが持つ基本特性を理解し、その特性に基づいてジレンマ状況を解消・緩和するために検証すべき知見を選別し、その有効性を検証することが求められる。本論文は、そのような“橋渡し研究”として、ワクチン接種に伴うジレンマに関して疫学パラメータの値（すなわち想定する感染症の種類）や集団の空間（ネットワーク）構造の依存性の視点から解析を行い（第2章）、個人間の接触パターンを複雑ネットワークで表現し、感染症伝播ダイナミクスを記述する数理モデルに個人間の意思決定ダイナミクスを組み込んだ相互浸透的マルチエージェントモデルで構築されたワクチン接種ゲームの枠組みを用いて、選別した先行研究の知見の社会的有効性を検証した結果（第3章から第5章）を一巻にまとめたものである。

第1章では、感染症流行問題における社会的ジレンマが顕在化している背景について言及した上で、先行研究の問題意識や分析視点を当該領域における基礎的事項や概念と共に示しつつ、先行研究と本研究の位置付けと意義を整理する。

第2章では、感染症の流行に曝された集団のワクチン接種の意思決定による生じるワクチン接種ジレンマの基本的な性質を明らかにするため、ゲーム理論的手法を適用したジレンマの定量的解析を試みている。疫学パラメータの値や集団の空間（ネットワーク）構造がジレンマの数理構造や強さに及ぼす影響について論究すると共に、現実との対応として、とりわけジレンマが強く出現したパラメータ領域の代表的な感染症である「インフルエンザ」との対応について言及している。

第3章では、ワクチン接種ゲームの枠組みを用いて、インフルエンザを想定した「感染症へのリスク評価方法」がワクチン接種の意思決定ダイナミクスに与える影響について検討している。具体的には、今シーズンの社会全体の疾病情報が集団中に提示されているものと仮定し、その疾病情報に基づいたリスク評価方法による意思決定モデルと従来の意思決定モデルの比較を行っている。リスク評価方法の違いがもたらすインフルエンザ流行防止・抑制への有効性について、集団のネットワーク構造および接種コストの依存性の視点から論究している。

第4章では、インフルエンザを想定したネットワーク上の感染症の流行において、「ワクチン接種に関する意思決定を常に保持する主体（エージェント）の存在」が集団のワクチン接種の意思決定ダイナミクスに与える影響について、ワクチン接種ゲームの枠組みを用いて検討している。自身や周囲の疾病状況に影響されることなく常に接種する戦略をとり続けるエージェントは感染症拡大を抑制する上では“良きロールモデル”として他のエージェントの意思決定に影響を与え、一方頑なに非接種戦略をとり続けるエージェントは“悪いロールモデル”としての影響を周囲に及ぼす。このような2種類のロールモデルが他の個人の意思決定に与える影響の強さおよび結果として形成される集団のワクチン接種者の空間的分布について、集団中の各ロールモデルの割合、集団のネットワーク構造、および接種コストの依存性の視点から論究している。

第5章では、インフルエンザの流行を抑制するためには「個人はどのような社会的繋がりを持つエージェントと意思決定に関する相互作用をすべきか」を明らかにするため、感染症が直接伝播する“感染症伝播ネットワーク”と、健康状態やワクチン接種戦略の情報が伝達され、そのネットワークを介してワクチン接種の意思決定を行う（実際の感染ルートにとどまらない）“情報伝達ネットワーク”の一致・不一致が集団のワクチン接種の意思決定ダイナミクスに与える影響について、ワクチン接種ゲームの枠組みを用いて検討している。まず、2種類のネットワークが一致しない場合の基本的影響を明らかにするため、感染症伝播ネットワークの正則性（次数の均一性）および接種コストの依存性の視点から論究している。さらに、2種類のネットワークの次数分布の正負および一致・不一致の影響を明らかにするため、スケールフリーネットワークを対象として流行抑制効果の次数分布依存性の視点から論究している。

第6章では、以上で得られた結果に対する結論を整理すると共に、本研究の有用性や今後の課題について言及している。