

## 科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成25年4月10日 現在

機関番号：15501

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2010～2012

課題番号：22560448

研究課題名（和文） 確率システム制御理論に基づく感染症制御とその応用

研究課題名（英文） The Infection Control based on the Stochastic Optimal Control Theory and Its Application

研究代表者

石川 昌明 (ISHIKAWA MASAOKI)

山口大学・大学院理工学研究科・教授

研究者番号：30201916

研究成果の概要（和文）：本研究では人口の空間的移動，環境・天候等の変化に起因した感染率・死亡率等の揺らぎやワクチン接種人口を考慮した感染症伝播モデルの構築法を確立し，感染症伝播過程への外乱の影響を明らかにした．さらに，ワクチン接種率を制御入力と考え，確率システム制御理論を応用し，ワクチン接種の費用・副作用や感染者人口を可能な限り最小にする最適ワクチン接種戦略の設計法を確立した．数値シミュレーションにより確立した最適ワクチン接種戦略の有効性を検証した．

研究成果の概要（英文）：In this research, we have established the stochastic vaccination model which describes the spread of infection taking account of random fluctuations in the infection or the death rates caused by the environmental change and have clarified the influence of the random noise on the spread of infection. Moreover, we have constructed the stochastic optimal vaccination system which minimizes the side-effect and the cost of vaccination and the infected population. The efficiency of the proposed optimal vaccination strategy is verified by the numerical simulations.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2010年度	1,300,000	390,000	1,690,000
2011年度	900,000	270,000	1,170,000
2012年度	1,000,000	300,000	1,300,000
年度			
年度			
総計	3,200,000	960,000	4,160,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：電気電子工学、制御工学

キーワード：感染症モデル，確率システム，ワクチン戦略，確率最適制御，確率最大原理，分岐，シミュレーション

### 1. 研究開始当初の背景

21世紀は感染症の時代とも言われ、効果的な感染症の予防・抑制戦略立案が極めて重要になっている。従来、感染症伝播過程やワクチン接種戦略に関して数理的・生物学的側面から活発に研究が行われているが、それらの理論的研究の大半は決定論的モデルや人口の空間的移動を無視したモデルによる研究であった。さらに、感染症制御問題においてはワクチン接種人口がモデルに陽に反映されていなかった。そのため、人口の空間的移動、環境・天候等の変化に起因した感染率・死亡率等の不規則な揺らぎやワクチン接種人口を考慮した感染症伝播モデルを構築し、実際に即した観点から感染症伝播過程の理論的解析が必要であった。

### 2. 研究の目的

人口の空間的移動、環境・天候等の変化に起因した感染率・死亡率等の不規則な揺らぎやワクチン接種人口を考慮した感染症伝播モデルを構築し、実際に即した観点から感染症伝播過程の理論的解析を行う。さらに、ワクチン接種率を制御入力と考え、確率システム制御理論を用いて、ワクチン接種コストや感染者人口から構成される評価関数を最小にする最適制御系を設計し、確率システム制御理論の立場から感染症伝播過程の解析・制御および感染地域や感染者数の予測を行い、効果的な感染症抑制戦略立案に貢献することを目的にする。

### 3. 研究の方法

以下の各項目について研究を行った。その方法を列記する。

- (1) 感染症制御のためのモデルの明確化：環境変化等に伴う感染率の揺らぎや人口の空間移動を考慮した従来の感染症伝播モデルにワクチン接種者を考慮し、図1に示されたような相互関係に対して、環境変化等に伴う感染率等の揺らぎや人口の

空間移動を導入し、ワクチン接種による感染症抑制制御のための基礎モデルを確立する。

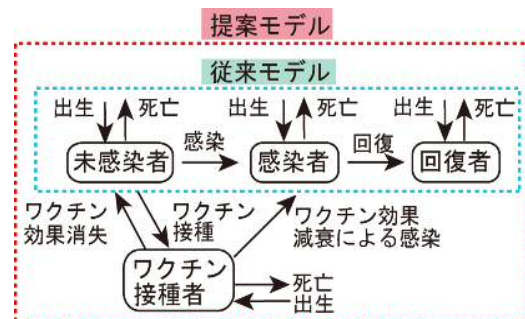


図1 各個体群間の相互関係

- (2) 外乱の感染症伝播への影響と感染者の安定性の明確化：提案モデルに基づき感染率、増殖率、死亡率の揺らぎの感染症伝播過程への影響をシミュレーションにより明らかにする。また、感染期間内に感染者1人が生産する2次感染者数(基本再生産数と呼ばれる)が1より大きくなると感染者が定在する状態が安定になるが、基本再生産数が1より小さくなれば感染者0の平衡状態が安定になり、感染症の流行は抑制・阻止できる。しかし、ワクチン接種による感染症制御においては基本再生産数が1より小さくても感染者が定在する状態が安定となる場合がある。そこで、本研究では確率安定性理論を用いて感染者の平衡状態の安定性を明らかにする。
- (3) 感染地域・感染者数予測手法と感染症制御系設計法の明確化：構成した感染症伝播モデルを用いたシミュレーションによる感染速度・感染地域および感染者数の予測手法を明らかにする。さらに、ワクチン接種率を制御入力、感染者、未感染者などの人口を状態変数と考え、(1)で確立した確率モデルに確率システム制御理論(確率最大原理または確率動的計画法)を応用し、感染症伝播過程に対する最適

- 制御システムを設計する手法を確立する。
- (4) 感染症制御系の設計法の明確化：本研究ではワクチン接種率を制御入力，感染者，未感染者などの人口を状態変数と考え，(1)で確立した確率モデルに確率システム制御理論(確率最大原理または確率動的計画法)を応用し，感染症伝播過程に対する最適制御システムを設計する手法を確立する。
- (5) 感染症制御系の妥当性の明確化と改善：(3)で確立した感染症制御系の有効性をシミュレーションにより検証する。同時に制御誤差を評価し，制御性能を検証する。制御性能が悪い場合には複数回のワクチン接種制御方式を検討する。さらに，感染からの経過時間(感染歳)を取り入れたモデルを構成し，制御系全体の改善を行う。
- (6) 研究成果の応用の明確化：感染症制御系の適用範囲・条件を明確にし，一般的な感染症制御への応用範囲を明らかにする。
- (7) 以上を総括すると各年度ごとの研究項目とその方法は図2のようにまとめられる。



図2 研究項目とその手法

#### 4. 研究成果

- (1) 感染症伝播過程の確率モデルの構成：未感染者，感染者，回復者，ワクチン接種者の4個体群に対して外乱の影響と各個体群の空間的移動を考慮した相互関係を

考え，各個体群密度の時空間的変化を確率解析に基づいて確率反応拡散方程式として，モデル化した。

- (2) 感染症伝播過程の安定解析：(1)で構成した4個体群の確率モデルを用いて，シミュレーションにより外乱の感染症伝播やワクチン接種への影響を解析した。感染期間内に感染者1人が生産する2次感染者数(基本再生産数という)が1より小さくなれば感染者0の平衡状態が安定になり，感染症の流行は抑制・阻止可能と考えられるが，ワクチン接種による感染症制御においては基本再生産数が1より小さくても感染者が定在する状態が安定となる場合がある。そこで，外乱やワクチン接種の平衡解の安定性への影響やワクチン接種下において感染症伝播を阻止可能な基本再生産数を解析した。
- (3) 感染症制御系の基本設計：ワクチン接種率を制御入力，感染者，未感染者，回復者およびワクチン接種者を状態変数として，感染者密度分布とワクチン接種率からなる2次評価関数を設定し，確率最大原理を応用し，最適制御系の設計を行った。
- (4) 感染症制御系のシミュレーション：構成した感染症制御系の有効性をシミュレーションにより検証した。まず，有限差分法を用いて，制御系を差分化し，シミュレーションを行い，制御誤差を評価した。
- (5) 成果の公表：上記の成果を学会で発表し，他の専門家との意見交換を行い，提案した感染症制御系の改良点を検討した。具体的には日本応用数学会，日本生態工学会，日本計算工学会，日本シミュレーション学会など横断的分野における国際会議および国内会議で成果を発表した。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 15 件)

- ① M. Ishikawa, Stochastic Optimal Vaccination Strategies in the SIRV Model, Transactions of the Institute of Systems, Control and Information Engineers, Vol. 25, No. 12, pp. 343-348, 2012 (査読有)
- ② M. Ishikawa, Optimal Control Problems for the Stochastic SIR Model under Vaccination, ICIC Express Letters, An International Journal of Research and Surveys, Vol. 6, No. 8, pp. 1-7, 2012 (査読有)
- ③ M. Ishikawa and Y. Takai, Simulation Analysis of Spatio-temporal Patterns in Stochastic Plankton-fish Systems International Journal of Innovative Computing, Information and Control, Vol. 8, No. 3, pp. 2183-2191, 2012 (査読有)
- ④ M. Ishikawa, Simulation Analysis of the Optimal Vaccination Strategy in the Stochastic Infectious Model, Proceedings of the 31st JSST Annual Conference, pp. 640-645 in USB Flash Drive, JSST 2012 (査読有)
- ⑤ 石川 昌明, 治療率を考慮した確率感染症モデルにおける最適ワクチン接種戦略, 第 55 回自動制御連合講演会論文集, 論文番号 1018, in CD-ROM, 2012 (査読なし)
- ⑥ 石川 昌明, 確率 SIRV モデルにおける最適ワクチン接種戦略, 第 17 回計算工学講演会講演論文集, 論文番号 100016, in CD-ROM, 2012 (査読なし)
- ⑦ 石川 昌明, 確率感染症モデルとその最適制御, 第 12 回計測自動制御学会制御部門シンポジウム論文集, 論文番号 0005, in CD-ROM, 2012 (査読なし)
- ⑧ 石川 昌明, 確率感染症モデルの最適制御, 第 54 回自動制御連合講演会講演論文集, in CD-ROM, 論文番号 100044, 2011(査読なし)
- ⑨ 石川 昌明, 外乱を考慮した感染症伝播過程のシミュレーション解析と最適制御, 日本応用数学会 2011 年度 年会発表論文集, pp. 237-238, 2011 年 (査読なし)
- ⑩ 石川 昌明, ワクチン接種と外乱を考慮した感染症伝播過程のシミュレーション解析, 第 55 回システム制御情報学会研究発表講演会講演論文集, in CD-ROM 2011 年 (査読なし)
- ⑪ M. Ishikawa, On the Simulation Analysis for the Stochastic Infectious Model with Vaccination, International Journal of Innovative Computing, Information and Control, Vol. 7, No. 1, pp. 3-12 2011(査読有)
- ⑫ M. Ishikawa, Stochastic Optimal Control of an SIR Epidemic Model with Vaccination, Proceedings of the 43rd International Symposium on Stochastic Systems Theory and Its Applications, pp. 24-25, 2011(査読有)
- ⑬ M. Ishikawa, On the Spatio-temporal Structure in the Stochastic Diffusive SI Model, International Journal of Innovative Computing, Information and Control, Vol. 6, No. 1, pp. 63-73, 2010 (査読有)
- ⑭ 石川 昌明, 強アリー効果を伴う確率感染症モデルの挙動解析, 第 15 回計算工学講演会論文集, Vol. 15, No. 1, pp. 425-428, 2010(査読なし)
- ⑮ 石川 昌明, アリー効果を伴う確率感染症モデルのシミュレーション解析, 第 54 回システム制御情報学会研究発表講演会講演論文集, in CD-ROM, 2010 (査読なし)

[学会発表] (計 11 件)

- ① 石川 昌明, 治療率を考慮した確率感染症モデルにおける最適ワクチン接種戦略, 第 55 回自動制御連合講演会, 京都大学, 京都, 2012. 11. 17
- ② M. Ishikawa, Stochastic Optimal Vaccination Problems for an SIR Model with Saturated Treatment, The 44th International Symposium on Stochastic Systems Theory and Its Applications, Kokushikan University, Tokyo, 2012. 11. 2
- ③ M. Ishikawa, Simulation Analysis of the Optimal Vaccination Strategy in the Stochastic Infectious Model, The 31st JSST Annual Conference, Integrated Research Center, Kobe, 2012. 9. 28
- ④ 石川 昌明, 確率 SIRV モデルにおける最適ワクチン接種戦略, 第 17 回計算工学講演会, 京都教育文化センター, 京都, 2012. 5. 30
- ⑤ 石川 昌明, 確率感染症モデルとその最適制御, 第 12 回計測自動制御学会制御部門シンポジウム, 奈良県文化会館, 奈良, 2012. 3. 15
- ⑥ 石川 昌明, 確率感染症モデルの最適制御, 第 54 回自動制御連合講演会, 豊橋技術科学大学, 豊橋, 2011. 11. 19

- ⑦ 石川 昌明, 外乱を考慮した感染症伝播過程のシミュレーション解析と最適制御, 日本応用数理学会 2011 年度年会, 同志社大学, 京都, 2011. 9. 15
- ⑧ 石川 昌明, ワクチン接種と外乱を考慮した感染症伝播過程のシミュレーション解析, 第 55 回システム制御情報学会研究発表講演, 大阪大学コンベンションセンター, 大阪, 2011. 5. 19
- ⑨ 石川 昌明, 確率プランクトン系における魚による捕食の時空間パターンへの影響, 第 53 回自動制御連合講演会, 高知城ホール, 高知, 2010. 11. 4
- ⑩ 石川 昌明, 強アリー効果を伴う確率感染症モデルの挙動解析, 第 15 回計算工学講演会, 九州大学医学部百年講堂, 福岡, 2010. 5. 28
- ⑪ 石川 昌明, アリー効果を伴う確率感染症モデルのシミュレーション解析, 第 54 回システム制御情報学会研究発表講演会, 京都リサーチパーク, 京都, 2010. 5. 21

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

石川 昌明 (ISHIKAWA MASAOKI)  
山口大学・大学院理工学研究科・教授  
研究者番号: 30201916

### (2) 研究分担者

( )

研究者番号:

### (3) 連携研究者

( )

研究者番号: