

令和 6 年 6 月 3 日現在

機関番号：14501

研究種目：若手研究

研究期間：2019～2023

課題番号：19K14594

研究課題名（和文）構造化感染症モデルの数学的性質の解析と疫学的考察への応用

研究課題名（英文）Mathematical analysis and epidemiological application of structured epidemic models

研究代表者

國谷 紀良（Kuniya, Toshikazu）

神戸大学・システム情報学研究科・准教授

研究者番号：60713013

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,300,000円

研究成果の概要（和文）：感染症の流行を表す数理モデルの内、集団に属する個体の年齢や性別、位置などの異質性を考慮できる構造化感染症モデルに焦点を置き、その数学的性質を解析することで、流行の有無を左右する閾値条件や、再帰的な流行の波を表す周期解の発生条件などについて新たな知見を得た。また、新型コロナウイルス感染症（COVID-19）に関するデータにモデルを適用することで、流行予測や政策効果の検証などに関する疫学的知見を得た。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究で得られた成果は、感染症の流行に伴う被害を効果的に減少させる観点から社会貢献に繋がると考えられる。また、数理モデルには普遍性があるため、COVID-19などの特定の感染症に限定されず、将来の様々な感染症の流行に対応可能な基礎理論の構築に、本研究は貢献したと言える。また、本研究で構築した異質性を含むモデルに関する理論は、現代社会に日々蓄積される大規模かつ多様なデータの有効活用に繋がる点で意義があると考えられる。

研究成果の概要（英文）：In this study, we focused on structured epidemic models, which enable us to consider the heterogeneity such as age, sex, location of individuals in population. We performed mathematical analysis and obtained conditions for the occurrence of the outbreak and the recurrent epidemic waves. Moreover, we applied our models to the data of COVID-19 and gained insights on the epidemic prediction and intervention evaluation.

研究分野：数理生物学

キーワード：感染症 数理モデル 基本再生産数 異質性 年齢構造 空間構造 流行予測 政策効果

様式 C - 19、F - 19 - 1 (共通)

1. 研究開始当初の背景

年齢、性別、位置などの個体ごとの異質性を考慮できる構造化感染症モデルは、現代社会に蓄積されている大量のデータを有効活用する上で重要な役割を担うと考えられる。しかし、偏微分方程式系として記述される構造化感染症モデルは、常微分方程式系のモデルと比較して一般に解析が困難であり、数学上の未解決問題が多く残されていた。また、同モデルを疫学的考察に利用した応用研究の数は限られていた。

2. 研究の目的

構造化感染症モデルの数学的性質を明らかにするとともに、同モデルを疫学的考察に応用して感染症制御のための新たな知見を得ること。特に、数学的性質に関しては、感染症流行の指標値である基本再生産数 R_0 に注目し、 $R_0 < 1$ ならば感染症の無い自明平衡解が大域的に漸近安定であり、 $R_0 > 1$ ならば感染症が存在するエンデミックな非自明平衡解が大域的に漸近安定である、という閾値定理が成り立つかどうかを明らかにすることを目指した。

3. 研究の方法

主な研究の手順は以下の通りである：

- (1) 構造化感染症モデルを構築し、基本再生産数 R_0 を導出する。
... 数学上の未解決問題が残されている構造化感染症モデルを偏微分方程式系として定式化する。モデルの次世代作用素のスペクトル半径として R_0 を導出する。
- (2) R_0 の観点からモデルの数学的性質を解析する。
... 関数解析や力学系の理論を用いて、感染症の根絶や定着を意味する各平衡解の存在と安定性などの数学的性質を、 R_0 の観点から解析する。
- (3) 異質性を含むデータを収集し、モデルを利用して疫学的考察を行う。
... 国立感染症研究所や厚生労働省などによって公開されているデータを利用し、 R_0 の推定や政策評価などを行う。

4. 研究成果

(1) 年齢構造を含むモデル

年齢構造を含む SIR 感染症モデル(集団全体を感受性 S, 感染 I, 回復 R に区分するモデル)において、基本再生産数 R_0 が 1 より大きい場合、感染症の定着を意味するエンデミックな平衡解が安定であるかどうかは明らかではなく、モデルに課す仮定によっては不安定となる場合もあることが知られていた。本研究では、感染率が感染者の年齢に依存し、特定の年齢層において高くなるという仮定の下で、 $R_0 > 1$ の場合にエンデミックな平衡解が不安定化して、再帰的な流行の波を表す周期解が発生する条件を調べた。文献 [1] では、系をフレドホルム型の積分方程式に変換した上で解析を行い、数値計算によって周期解が存在するパラメータ領域を得た。文献 [2] では、感染率が切断指数分布で与えられる場合に注目し、エンデミックな平衡解における感染力と回復率の差が小さければ、周期解が存在することを示した。

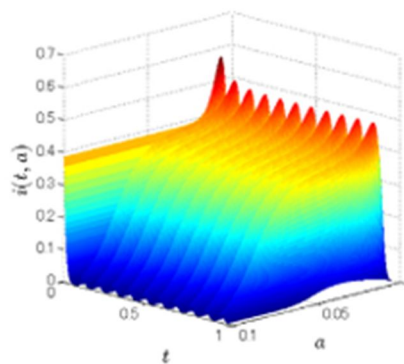


図1 周期解に収束する感染人口

(2) 空間構造を含むモデル

空間構造を含むモデルは反応拡散方程式系として定式化され、考える空間領域や境界条件に応じて解の挙動は多様になることが知られている。文献 [3] では、感染後の経過時間の影響と空間構造を考慮した SIR 感染症モデルにおいて、空間領域の境界上に個体がないことを意味するディリクレ境界条件のもとで、基本再生産数 R_0 が感染症の根絶と定着を意味する各平衡解の存在や安定性を左右する指標値となることを示した。文献 [4] では、ワクチン接種の影響を考慮できるように拡張したモデルに対して同様の解析結果を得た。文献 [5] では、感染症の地理的な伝播を意味する進行波解の存在に関する条件と、波の速度の最小値に関する評価を得た。

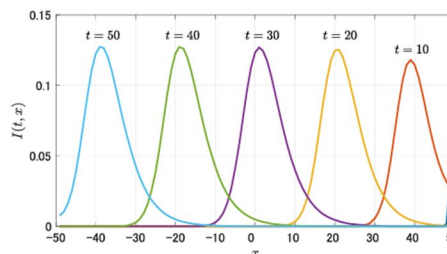


図2 進行波解に収束する感染人口

(3) 行動変容を考慮したモデル

遅延微分方程式系における時間遅れが周期解をもたらすことはよく知られている。文献 [1] では、感染者数が増えたときに人々が行動制限を行い、減ったときに制限を緩和するという意味での行動変容を考慮したモデルを構築し、感染者が報告されるまでの時間遅れ（潜伏期間など）と、再帰的な流行の波を意味する周期解との関係を調べた。結果として、同モデルにおいては基本再生産数 R_0 が 1 以下ならば感染症の無い自明平衡解が大域的に漸近安定であり、1 より大きいならばエンデミックな平衡解が唯一存在するが、行動制限が強く、時間遅れが大きい状況では、周期解が発生する可能性があることを示した。

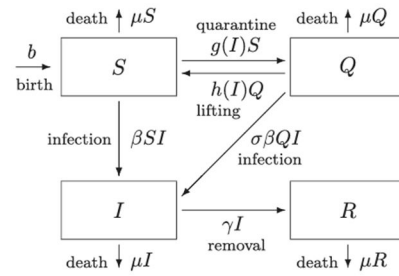


図 3 行動変容のモデルの遷移図

(4) 新型コロナウイルス感染症 (COVID-19) への応用

研究期間中に発生した新型コロナウイルス感染症の流行 (COVID-19) に対し、リアルタイムで公開されたデータと数理モデルを利用することで、様々な疫学的考察を行った。文献 [2] では、流行初期のデータを用いて、基本再生産数 R_0 の推定と流行予測を行った。文献 [3] では、国内の第一回目の緊急事態宣言の防疫効果の推計を行った。文献 [4] では、検査隔離のモデルを構築し、社会距離政策と検査隔離を併用することの有効性を検証した。文献 [5] では、ワクチンの量が限られている際の配分戦略として interval extension strategy および half a dose strategy を採用した場合の国内の報告数、入院数、死亡者数の変化についてのシミュレーションを行い、それらの戦略の有効性を検証した。

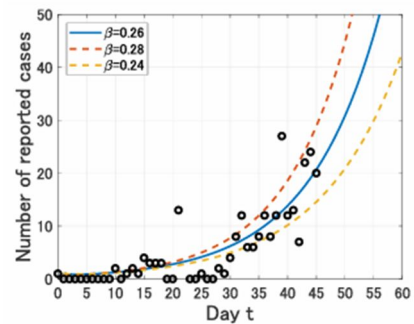


図 4 流行初期のデータによる予測

< 引用文献 >

- T. Kuniya, Hopf bifurcation in an age-structured SIR epidemic model, *Appl. Math. Lett.* 92 (2019) 22-28.
- T. Kuniya, H. Inaba, Hopf bifurcation in a chronological age-structured SIR epidemic model with age-dependent infectivity, *Math. Biosci. Eng.* 20 (2023) 13036-13060.
- A. Chekroun, T. Kuniya, An infection age-space-structured SIR epidemic model with Dirichlet boundary condition, *Math. Model. Nat. Phenom.* 14 (2019) 505.
- J. Wang, R. Zhang, T. Kuniya, A reaction-diffusion Susceptible-Vaccinated-Infected-Recovered model in a spatially heterogeneous environment with Dirichlet boundary condition, *Math. Comput. Simul.* 190 (2021) 848-865.
- M. Adimy, A. Chekroun, T. Kuniya, Traveling waves of a differential-difference diffusive Kermack-McKendrick epidemic model with age-structured protection phase, *J. Math. Anal. Appl.* 505 (2022) 125464,
- M. Adimy, A. Chekroun, 國谷紀良, 免疫保持期間と拡散を含む Kermack-McKendrick モデルにおける進行波解の存在, *数理解析研究所講究録* 2262 (2023) 19-26.
- T. Kuniya, Recurrent epidemic waves in a delayed epidemic model with quarantine, *J. Biol. Dynam.* 16 (2022) 619-639.
- T. Kuniya, Prediction of the epidemic peak of coronavirus disease in Japan, 2020, *J. Clin. Med.* 9 (2020) 789.
- T. Kuniya, Evaluation of the effect of the state of emergency for the first wave of COVID-19 in Japan, *Infect. Dis. Model.* 5 (2020) 580-587.
- T. Kuniya, H. Inaba, Possible effects of mixed prevention strategy for COVID-19 epidemic: massive testing, quarantine and social distancing, *AIMS Public Health* 7 (2020) 490-503.
- Y. Tokuda, T. Kuniya, K. Shibuya, Potential impact of alternative vaccination strategies on COVID-19 cases, hospitalization, and mortality in Japan during 2021-2022, *J. General and Family Med.* 22 (2021) 311-313.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計37件（うち査読付論文 32件 / うち国際共著 21件 / うちオープンアクセス 24件）

1. 著者名 Jinliang Wang, Wenjing Wu, Toshikazu Kuniya	4. 巻 198
2. 論文標題 Analysis of a degenerated reaction-diffusion cholera model with spatial heterogeneity and stabilized total humans	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Mathematics and Computers in Simulation	6. 最初と最後の頁 151-171
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.matcom.2022.02.026	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 該当する
1. 著者名 Mostafa Adimy, Abdennasser Chekroun, Toshikazu Kuniya	4. 巻 102
2. 論文標題 Global asymptotic stability for a distributed delay differential-difference system of a Kermack-McKendrick SIR model	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Applicable Analysis	6. 最初と最後の頁 3463-3475
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1080/00036811.2022.2075352	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 Toshikazu Kuniya, Tarik Mohammed Touaoula	4. 巻 102
2. 論文標題 Global dynamics for a class of reaction-diffusion equations with distributed delay and non-monotone bistable nonlinearity	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Applicable Analysis	6. 最初と最後の頁 3946-3970
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1080/00036811.2022.2102488	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 Toshikazu Kuniya	4. 巻 16
2. 論文標題 Recurrent epidemic waves in a delayed epidemic model with quarantine	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Journal of Biological Dynamics	6. 最初と最後の頁 619-639
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1080/17513758.2022.2111468	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 Jinliang Wang, Wenjing Wu, Toshikazu Kuniya	4. 巻 203
2. 論文標題 Global threshold analysis on a diffusive host-pathogen model with hyperinfectivity and nonlinear incidence functions	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Mathematics and Computers in Simulation	6. 最初と最後の頁 767-802
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.matcom.2022.07.013	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 該当する

1. 著者名 Adnane Boukhouima, El Mehdi Lotfi, Marouane Mahrouf, Noura Yousfi, Toshikazu Kuniya	4. 巻 9
2. 論文標題 A general fractional-order viral infection model with cell-to-cell Transmission and adaptive Immunity	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Progress in Fractional Differentiation and Applications	6. 最初と最後の頁 41-63
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.18576/pfda/090103	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 Soufiane Bentout, Salih Djilali, Toshikazu Kuniya, Jinliang Wang	4. 巻 46
2. 論文標題 Mathematical analysis of a vaccination epidemic model with nonlocal diffusion	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Mathematical Methods in the Applied Sciences	6. 最初と最後の頁 10970-10994
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1002/mma.9162	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 K. Shimizu, T. Kuniya, Y. Tokuda	4. 巻 22
2. 論文標題 Modeling population-wide testing of SARS-CoV-2 for containing COVID-19 pandemic in Okinawa, Japan	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Journal of General and Family Medicine	6. 最初と最後の頁 173-181
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1002/jgf2.439	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 Y. Tokuda, T. Kuniya	4. 巻 22
2. 論文標題 Prediction of COVID 19 cases during Tokyo's Olympic and Paralympic Games	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Journal of General and Family Medicine	6. 最初と最後の頁 171-172
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1002/jgf2.465	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 K. Okuwa, H. Inaba, T. Kuniya	4. 巻 18
2. 論文標題 An age-structured epidemic model with boosting and waning of immune status	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Mathematical Biosciences and Engineering	6. 最初と最後の頁 5707-5736
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3934/mbe.2021289	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 J. Wang, R. Zhang, T. Kuniya	4. 巻 190
2. 論文標題 A reaction-diffusion Susceptible-Vaccinated-Infected-Recovered model in a spatially heterogeneous environment with Dirichlet boundary condition	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Mathematics and Computers in Simulation	6. 最初と最後の頁 848-865
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.matcom.2021.06.020	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 該当する

1. 著者名 M. Adimy, A. Chekroun, T. Kuniya	4. 巻 505
2. 論文標題 Traveling waves of a differential-difference diffusive Kermack-McKendrick epidemic model with age-structured protection phase	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Journal of Mathematical Analysis and Applications	6. 最初と最後の頁 125464-125464
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.jmaa.2021.125464	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 該当する

1. 著者名 T. Kuniya	4. 巻 72
2. 論文標題 Structure of epidemic models: toward further applications in economics	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 The Japanese Economic Review	6. 最初と最後の頁 581-607
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/s42973-021-00094-8	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 J. Wang, X. Wu, T. Kuniya	4. 巻 106
2. 論文標題 Analysis of a diffusive HBV model with logistic proliferation and non-cytopathic antiviral mechanisms	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Communications in Nonlinear Science and Numerical Simulation	6. 最初と最後の頁 106110-106110
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.cnsns.2021.106110	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 Y. Tokuda, T. Kuniya, K. Shibuya	4. 巻 22
2. 論文標題 Potential impact of alternative vaccination strategies on COVID 19 cases, hospitalization, and mortality in Japan during 2021-2022	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Journal of General and Family Medicine	6. 最初と最後の頁 311-313
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1002/jgf2.493	査読の有無 無
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 國谷紀良	4. 巻 65
2. 論文標題 年齢構造化感染症モデルの大域安定性と基本再生産数R0	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 システム / 制御 / 情報	6. 最初と最後の頁 311-316
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.11509/isciesci.65.8_311	査読の有無 無
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 A. Chekroun, M.N. Frioui, T. Kuniya, T.M. Touaoula	4. 巻 25
2. 論文標題 Mathematical analysis of an age structured heroin-cocaine epidemic model	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Discrete and Continuous Dynamical Systems Series B	6. 最初と最後の頁 4449-4477
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3934/dcdsb.2020107	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 S. Bentout, A. Chekroun, T. Kuniya	4. 巻 7
2. 論文標題 Parameter estimation and prediction for coronavirus disease outbreak 2019 (COVID-19) in Algeria	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 AIMS Public Health	6. 最初と最後の頁 306-318
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3934/publichealth.2020026	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 該当する

1. 著者名 T. Kuniya, Y. Nakama, Y. Tokuda	4. 巻 21
2. 論文標題 Demand and supply of invasive and noninvasive ventilators at the peak of the COVID-19 outbreak in Okinawa	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Journal of General and Family Medicine	6. 最初と最後の頁 98-101
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1002/jgf2.336	査読の有無 無
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 T. Kuniya, H. Inaba	4. 巻 7
2. 論文標題 Possible effects of mixed prevention strategy for COVID-19 epidemic: massive testing, quarantine and social distancing	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 AIMS Public Health	6. 最初と最後の頁 490-503
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3934/publichealth.2020040	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 T. Kuniya	4. 巻 5
2. 論文標題 Evaluation of the effect of the state of emergency for the first wave of COVID-19 in Japan	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Infectious Disease Modelling	6. 最初と最後の頁 580-587
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.idm.2020.08.004	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 T. Kuniya, T.M. Touaoula	4. 巻 17
2. 論文標題 Global stability for a class of functional differential equations with distributed delay and non-monotone bistable nonlinearity	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Mathematical Biosciences and Engineering	6. 最初と最後の頁 7332-7352
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3934/mbe.2020375	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 該当する

1. 著者名 Dimitri Breda, Toshikazu Kuniya, Jordi Ripoll, Rossana Vermiglio	4. 巻 85
2. 論文標題 Collocation of next-generation operators for computing the basic reproduction number of structured populations	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Journal of Scientific Computing	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/s10915-020-01339-1	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 該当する

1. 著者名 J. Wang, J. Wang, T. Kuniya	4. 巻 347
2. 論文標題 Analysis of an age-structured multi-group heroin epidemic model	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Applied Mathematics and Computation	6. 最初と最後の頁 78-100
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.amc.2018.11.012	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 T. Kuniya	4. 巻 92
2. 論文標題 Hopf bifurcation in an age-structured SIR epidemic model	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Applied Mathematics Letters	6. 最初と最後の頁 22-28
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.aml.2018.12.010	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 K. Okuwa, H. Inaba, T. Kuniya	4. 巻 16
2. 論文標題 Mathematical analysis for an age-structured SIRS epidemic model	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Mathematical Biosciences and Engineering	6. 最初と最後の頁 6071-6102
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3934/mbe.2019304	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 M. Adimy, A. Chekroun, T. Kuniya	4. 巻 479
2. 論文標題 Coupled reaction-diffusion and difference system of cell-cycle dynamics for hematopoiesis process with Dirichlet boundary conditions	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Journal of Mathematical Analysis and Applications	6. 最初と最後の頁 1030-1068
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.jmaa.2019.06.066	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 J. Wang, F. Xie, T. Kuniya	4. 巻 80
2. 論文標題 Analysis of a reaction-diffusion cholera epidemic model in a spatially heterogeneous environment	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Communications in Nonlinear Science and Numerical Simulation	6. 最初と最後の頁 104951
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.cnsns.2019.104951	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 T. Kuniya	4. 巻 9
2. 論文標題 Prediction of the epidemic peak of coronavirus disease in Japan, 2020	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Journal of Clinical Medicine	6. 最初と最後の頁 789-789
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3390/jcm9030789	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 A. Chekroun, T. Kuniya	4. 巻 14
2. 論文標題 An infection age-space-structured SIR epidemic model with Dirichlet boundary condition	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Mathematical Modelling of Natural Phenomena	6. 最初と最後の頁 505-505
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1051/mmnp/2019048	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 Abdennasser Chekroun, Toshikazu Kuniya	4. 巻 269
2. 論文標題 Global threshold dynamics of an infection age-structured SIR epidemic model with diffusion under the Dirichlet boundary condition	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Journal of Differential Equations	6. 最初と最後の頁 117-148
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.jde.2020.04.046	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 該当する

1. 著者名 Hideki Sano, Toshikazu Kuniya	4. 巻 155
2. 論文標題 Observer design for an infectious disease PDE model considering reinfection	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Automatica	6. 最初と最後の頁 111091-111091
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.automatica.2023.111091	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 Toshikazu Kuniya, Hisashi Inaba	4. 巻 20
2. 論文標題 Hopf bifurcation in a chronological age-structured SIR epidemic model with age-dependent infectivity	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Mathematical Biosciences and Engineering	6. 最初と最後の頁 13036-13060
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3934/mbe.2023581	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 Mostafa Adimy, Abdennasser Chekroun, Toshikazu Kuniya, Hanene Meghelli	4. 巻 46
2. 論文標題 Global stability of a SEIR discrete delay differential difference system with protection phase	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Mathematical Methods in the Applied Sciences	6. 最初と最後の頁 17818-17838
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1002/mma.9533	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 Jinliang Wang, Meiyu Cao, Toshikazu Kuniya	4. 巻 74
2. 論文標題 Dynamical analysis of an age-space structured malaria epidemic model	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Zeitschrift fur angewandte Mathematik und Physik	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/s00033-023-02097-4	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 該当する

1. 著者名 Mostafa Adimy, Abdennasser Chekroun, 國谷紀良	4. 巻 2262
2. 論文標題 免疫保持期間と拡散を含むKermack-McKendrickモデルにおける進行波解の存在	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 数理解析研究所講究録	6. 最初と最後の頁 19-26
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 無
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 該当する

1. 著者名 Toshikazu Kuniya, Yasuharu Tokuda, Haruyo Nakamura, Takuhiro Moromizato, Kenji Shibuya	4. 巻 23
2. 論文標題 Estimating COVID 19 herd immunity in Japan at the beginning of the seventh wave: Transitioning from a pandemic to an endemic	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Journal of General and Family Medicine	6. 最初と最後の頁 295-298
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1002/jgf2.573	査読の有無 無
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 -

[学会発表] 計31件 (うち招待講演 15件 / うち国際学会 9件)

1. 発表者名 T. Kuniya
2. 発表標題 Hopf bifurcation in a delayed epidemic model with vaccination
3. 学会等名 The 13th Asian Control Conference (ASCC 2022) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 國谷紀良
2. 発表標題 隔離と時間遅れを考慮した感染症モデルにおけるホップ分岐
3. 学会等名 日本数学会2023年度年会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 國谷紀良
2. 発表標題 免疫保持期間と拡散を含むKermack-McKendrickモデルにおける進行波解の存在
3. 学会等名 時間遅れ系と数理科学：理論と応用の新たな展開に向けて (招待講演)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 國谷紀良
2. 発表標題 免疫保持期間と拡散を考慮したある感染症モデルにおける進行波
3. 学会等名 日本応用数学会2022年度年会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 T. Kuniya
2. 発表標題 Applications of age-structured epidemic models for intervention evaluation
3. 学会等名 Macroeconomics Workshop (招待講演)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 國谷紀良
2. 発表標題 感染症数理モデルの平衡点の安定性と分岐解析
3. 学会等名 お茶の水女子大学・解析セミナー (招待講演)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 T. Kuniya
2. 発表標題 Prediction and evaluation of COVID-19 in Japan
3. 学会等名 The Seventh International Workshop on Biomathematics Modelling and Its Dynamical Analysis (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 國谷紀良
2. 発表標題 行動変容を考慮したSIR感染症モデルにおけるホップ分岐について
3. 学会等名 2021年度日本数理生物学会年会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 國谷紀良
2. 発表標題 行動変容と感染症の再帰的流行の数理モデリング
3. 学会等名 第24回情報論的学習理論ワークショップ
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 國谷紀良
2. 発表標題 行動変容を考慮したSIR感染症モデルにおける周期解の存在について
3. 学会等名 愛媛大学解析セミナー（招待講演）
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 國谷紀良
2. 発表標題 COVID-19と行動変容の数理モデル
3. 学会等名 神楽坂「感染症にまつわる数理」勉強会（招待講演）
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 國谷紀良, T.M. Touaoula
2. 発表標題 ある時間遅れをもつ双安定な反応拡散方程式の大域挙動
3. 学会等名 日本数学会2022年度年会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 國谷紀良
2. 発表標題 年齢構造をもつ感染症モデルの安定性解析
3. 学会等名 第64回システム制御情報学会 研究発表講演会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 國谷紀良
2. 発表標題 COVID-19の流行初期のデータによる予測とその評価
3. 学会等名 日本応用数理学会2020年度年会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 國谷紀良
2. 発表標題 SEIRモデルによるCOVID-19の初期の流行予測とその評価
3. 学会等名 2020年度日本数理生物学会年会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 國谷紀良
2. 発表標題 行動変容による感染症の再帰的流行の数理モデリングと安定性解析
3. 学会等名 2020年度応用数学合同研究集会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 國谷紀良
2. 発表標題 異なる境界条件下での拡散を含むSIR感染症モデルの解析
3. 学会等名 日本数学会2021年度年会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 T. Kuniya
2. 発表標題 Evaluation of the epidemic prevention effect of non-pharmaceutical interventions for COVID-19 in Japan
3. 学会等名 Modeling infectious disease: COVID-19 and beyond (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 T. Kuniya
2. 発表標題 Global behavior of a multi-group SIR epidemic model with age structure and estimation of R_0 for the chlamydia epidemic in Japan
3. 学会等名 Dynamics, Equations and Applications (DEA 2019) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 T. Kuniya
2. 発表標題 Stability and instability of an age-structured SIR epidemic model
3. 学会等名 The 7th China-India-Japan-Korea International Conference on Mathematical Biology (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 T. Kuniya
2. 発表標題 Global dynamics of a multi-group age-structured SIR epidemic model with an application to the chlamydia epidemic in Japan
3. 学会等名 The Sixth International Workshop on Biomathematics Modelling and Its Dynamical Analysis (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 T. Kuniya
2. 発表標題 An application of a multi-group age-structured SIR epidemic model to the chlamydia epidemic in Japan
3. 学会等名 The 1st Hungary-Japan Workshop on Delay Equations and Mathematical Epidemiology (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 國谷紀良
2. 発表標題 拡散方程式による感染症の伝播強度と空間領域の形状の関係の考察
3. 学会等名 2019年度 応用数学合同研究集会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 國谷紀良
2. 発表標題 拡散方程式と格子モデルによる感染症の伝播強度と空間領域の形状の關係の考察
3. 学会等名 数学と現象 : Mathematics and Phenomena in Miyazaki 2019 (招待講演)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 國谷紀良
2. 発表標題 異なる境界条件下での空間拡散を伴う感染齡構造化SIRモデルの解析
3. 学会等名 日本応用数理学会2019年度年会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Toshikazu Kuniya
2. 発表標題 A delayed epidemic model for behavior change
3. 学会等名 30th International Congress on Industrial and Applied Mathematics (ICIAM 2023) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Toshikazu Kuniya
2. 発表標題 Hopf bifurcation in a chronological age-structured SIR epidemic model
3. 学会等名 12th Colloquium on the Qualitative Theory of Differential Equations (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 國谷紀良
2. 発表標題 年齢依存感染性を考慮したSIRモデルにおけるホップ分岐
3. 学会等名 2023年度 日本数理生物学会年会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 國谷紀良
2. 発表標題 構造化感染症モデルを利用したCOVID-19の疫学的考察
3. 学会等名 日本人口学会 第75回大会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 國谷紀良
2. 発表標題 年齢構造化SIR感染症モデルのエンデミックな平衡解の安定性について
3. 学会等名 Okayama Workshop on Partial Differential Equations (招待講演)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 國谷紀良
2. 発表標題 パンデミックで活躍する数理モデル
3. 学会等名 数学月間懇話会 (第19回) (招待講演)
4. 発表年 2023年

〔図書〕 計1件

1. 著者名 ニコラ・バカエル, 稲葉寿, 國谷紀良, 中田行彦, 竹内康博	4. 発行年 2022年
2. 出版社 東京大学出版会	5. 総ページ数 228
3. 書名 人口と感染症の数理はいかに創られてきたか	

〔産業財産権〕

〔その他〕

研究者のホームページ http://www2.kobe-u.ac.jp/~tkuniya/

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
---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------