

令和 6 年 9 月 24 日現在

機関番号：35302

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2021～2023

課題番号：21K03318

研究課題名(和文) 差分方程式の概周期族解の存在とCOVID-19後遺症による機能性EDモデルの研究

研究課題名(英文) The existence of A_p -almost periodic solutions to difference equations and a study of functional ED models due to COVID-19 sequelas

研究代表者

濱谷 義弘 (Hamaya, Yoshihiro)

岡山理科大学・研究・社会連携センター・教授

研究者番号：40228549

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,200,000円

研究成果の概要(和文)：EDモデル構築に必要な血液・リンパ液中体内感染症離散モデルの漸近安定性、及び有限時間遅れを持つSIRとSEIR拡散反応型偏微分方程式の漸近安定性を示しこれらを論文に掲載した。また、テストステロン分泌の時間遅れを持つ制御モデルの漸近安定性の研究の副産物として、ワニの生存戦略についての離散モデルの漸近安定性の結果を得た。さらに、上記制御モデルの概周期存在定理を構築して、パリの国際会議で発表し論文を投稿した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

昨今、COVID-19感染の後遺症としてテストステロン減衰による機能性ED症候群の発症例が取り沙汰されている。その解明対策のため、既存モデルより現実的な新しいテストステロンの制御モデルを構築し、モデルの定性的性質を数学的に証明して、数値的シミュレーションを行うことで、COVID-19感染の後遺症によるテストステロン減少に伴う機能性ED症候群に現れる概周期的現象、第2波流行以後の流行継続の現象をとらえ、その時系列的減衰及び、ED回復のメカニズムを研究する点が学術的独自性を持つ意義であること共に社会的な重要性のある意義である。

研究成果の概要(英文)：We show the asymptotic stability of the blood and lymph model of infectious diseases in a body, and SIR and SEIR type of the reaction diffusion partial differential equations with finite delay.

Moreover, we consider the existence theorem of almost periodic solutions and the asymptotic stability of control model with a time lag of testosterone secretion, announced at the International Conference of Difference Equations and Applications of Paris and submitted a paper, in 2022.

研究分野：大域的解析学

キーワード：COVID-19のSIR感染症モデル COVID-19のSEIR感染症モデル 体内感染症離散モデル ワニの生存戦略離散モデル 概周期族解

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属します。

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

1980年代まで、時間遅れを持つ関数微分方程式の概周期解の存在についての研究が盛んに行なわれてきた。1994年(AMS ミーティング)から米国を中心に、関数差分方程式の定性的理論の研究が流行し、研究代表者濱谷は関数差分方程式の解の全安定と概周期解の存在について研究を始め、2020年まで66編(COVID-19関連の投稿中3編を含む)の研究論文がある。2000年以降、中国のC. Zhang(Almost Periodic Type Functions and Ergodicity, Kluwer Academic Pub. and Sci. Press, 2003)や故テキサス大名誉教授 C. Corduneanu(Almost Periodic Oscillations and Waves, Springer, 2009)を中心に、常微分方程式に対して概周期族の解の存在定理が問題とされた。2012年、濱谷は、線形ボルテラ型差分方程式の擬概周期解の存在定理を指数漸近安定の下で示した。また、2015年にはテストステロンの制御モデルについて発表した(招待講演)。2018年、濱谷は、優対角行列の条件を使い、一般の線形差分方程式の概周期解の存在条件を得た。また、分担者齋藤と共に、二階堂やK. J. Arrowによる古典的経済モデルの概周期解の存在定理も得た。以上の経緯のもと2021年以降、濱谷は、時間遅れを持つ差分方程式によるEDモデルの概周期族の解の存在条件の研究と、COVID-19感染の後遺症によるテストステロン減少に伴う機能性ED症候群の新しいtanh型数理モデルの研究を始めた、Y. Hamaya, On the asymptotic behavior of AP_r almost periodic solutions of an erectile dysfunction model, 投稿中)。

2. 研究の目的

本研究の目的は、昨今のCOVID-19感染の後遺症としてテストステロン減衰による機能性ED症候群の発症例が取り沙汰されている中で、その解明対策のため、既存モデルより現実的な新しいCOVID-19の後遺症を考慮した、黄体形成ホルモン放出ホルモン:LHRTのtanh型のy-軸と対称な関数によるテストステロンの制御モデルを構築し、モデルの定性的性質を数学的に証明して、数値的シミュレーションを行うことで、COVID-19感染の後遺症によるテストステロン減少に伴う機能性ED症候群に現れる概周期的現象、即ち第2波流行以後の流行継続の現象を捉え、その時系列的減衰及び、ED回復のメカニズムを研究する。

3. 研究の方法

研究の方法としては、まず、次の研究手順により研究を遂行する。

時間遅れを持つ関数差分方程式系の概周期族解の存在定理をある種の安定性の下で次のことを得ることである(Y. Hamaya, Existence of the AP_r of almost periodic solutions of functional difference equations, Nonlinear Analy.に投稿準備中)。また、科研費の交付希望期間内には、tanh型のy-軸と対称な関数を持つ新しい差分方程式系を用いてCOVID-19感染の後遺症によるテストステロン減少に伴う機能性EDモデルを構築し、このED症候群の減衰とEDからの回復の数理的なメカニズムの解明を行うことである(Y. Hamaya, existence of Besicovitch almost periodic solutions of ED to testosterone models, 投稿準備中)。さらに、このEDモデルの感染継続を表す概周期族解の存在を数値的にシミュレーションし可視化を行うことができるシステムの構築を行う。最後に、数学的知識が無いユーザーに対しても、複雑なシミュレーションの結果を提供できる環境を構築することによって、このED生体モデルに応用できる。例えば、神経回路網や感染症の伝播などの数値的シミュレーションにおいては多くのファクターが存在し、実際の現象と比較する為にパラメータの決定が重要である。逆に、得られたパラメータを利用し再び解析す

ることも同時に重要である．これを COVID-19 感染の後遺症によるテストステロンの機能性 ED モデルの概周期族の解の数値的シミュレーションに適應して研究を行う．このような解析を数学的な知識を持たないユーザーに対して扱えるようにできることは，成功した場合にコロナ禍での実用的成果が大きいと期待できる．この達成を科学研究費の交付希望期間内に行う．

まとめ：科学研究費の交付希望期間内に次の研究手順で行う．

(1)時間遅れを持つ概周期族係数の \tanh 型の y -軸と対称な関数による新しい関数差分方程式系を用いて，COVID-19 感染の後遺症によるテストステロン減少に伴う機能性 ED モデルを構築する．

(2)上記 ED モデルの概周期族の解の存在を示し，数値解析的実験を行い，COVID-19 感染の後遺症によるテストステロン減少に伴う機能性 ED 症例群の減衰・回復のメカニズムの数学的解明をする．

(3)一般ユーザーも取り扱えるモデルのシミュレーションを行い，この結果を可視化することができるシステムを構築する．

さらに，本研究を遂行するために以下の分担で研究を行う．

代表者・濱谷は分担者・齋藤と共に，時間遅れを持つ \tanh 型の y 軸対称な関数差分方程式系の解の漸近挙動や擬概周期解，概周期族の解の存在定理と，COVID-19 感染の後遺症によるテストステロン減少に伴う機能性 ED モデルへの応用を担当する．

分担者・河野は COVID-19 感染の後遺症によるテストステロン減少に伴う機能性 ED モデルの数値計算アルゴリズムの数学的妥当性の証明を担当する．さらにこの機能性 ED モデルの数値計算とユーザーインターフェースの開発を担当する．

分担者・齋藤は関数差分方程式の理論面で代表者をサポートし，COVID-19 感染の後遺症によるテストステロン減少に伴う機能性 ED モデルの数値結果の可視化を担当する．

協力者・S. Elaydi と J. Cushing は研究代表者と共に時間遅れを持つ \tanh 型の y 軸と対称な関数差分方程式の解の漸近安定性や，通常の Z 上ではなく数理生体モデルへの応用が容易な Z^+ 上での概周期族の解の存在定理の構築をサポートする．

4．研究成果

はじめに本研究成果の概要を述べる．

ED モデル構築に必要な血液・リンパ液中体内感染離散モデルの漸近安定性，及び有限時間遅れを持つ SIR と SEIR 拡散反応型偏微分方程式の漸近安定性を示し，これらを論文に掲載した．また，テストステロン分泌の時間遅れを持つ制御モデルの漸近安定性の研究の副産物として，ワニの生存戦略について，離散モデルの漸近安定性の結果を得た．さらに，上記制御モデルの概周期解の存在定理を構築して，パリの国際会議で発表し論文を投稿した．

研究代表者と分担者は，研究実施計画書の ED モデルの構築に技術的に必要な拡散反応型偏微分方程式の手本として，COVID-19 の拡散項と時間の遅れ(感染期間)を持つ SIR 感染症モデルを取り扱い，その有界解の漸近挙動，閾値定理を，強最大値原理とリアプノフ汎関数を使った結果として，

K. Saito, T. Kohno and Y. Hamaya, Asymptotic behavior of delayed SIR epidemic models of COVID-19 with diffusion, Journal of Applied Mathematics and Computation, 7(1), (2023), 112-127

に掲載している．

さらに，有限の時間遅れを持つ SEIR 拡散反応型偏微分方程式の漸近安定性について，

Y. Hamaya and K. Saito, Global attractivity of a delayed SEIR epidemic model of COVID-19 with diffusion, *Journal of Mathematical Sciences*, 271, (2023), 378-399
と, ED モデル構築に必要な血液・リンパ液中体内感染離散モデルの漸近安定性について, 理学の論博研究指導している分担者(経営学博士号を有す)と共に専門誌

K. Saito, and Y. Hamaya, Global stability properties of virus dynamics discrete models, *Journal of Mathematics and Statistical Science* 9, Issue 9, (2023), 26-29
に掲載している .

研究代表者と分担者は、令和3年度の研究計画書の1研究目的、研究方法などに関連する数理生態モデルとして、ワニの生存戦略を表すモデルの漸近安定性について、専門誌、

K. Saito and Y. Hamaya, On the asymptotic stability of discrete crocodilians model, *Advances in Pure Mathematics*, 13 (2023), 211-225

に掲載している .

また、分担者は、一般のSIR感染症の離散モデルの大域的漸近安定性定理を

K. Saito, On the global stability of an SIR epidemic discrete model. *International Journal of Mathematical Analysis*, 17, 2023, no. 3, 119-132

に掲載した .

さらに、研究代表者は、COVID-19のSIR、SEIRモデルの研究の副産物として、ED発症の心理的要因を捉えるために社会科学への応用を考えた

Y. Hamaya, On the global attractivity of a delayed boom model with diffusion
を論文に表し投稿している .

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計6件（うち査読付論文 5件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 4件）

1. 著者名 Saito Kaori, Kohno Toshiyuki and Hamaya Yoshihiro	4. 巻 7
2. 論文標題 Asymptotic Behavior of Delayed SIR Epidemic Models of COVID-19 with Diffusion	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Journal of Applied Mathematics and Computation	6. 最初と最後の頁 112 ~ 127
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.26855/jamc.2023.03.012	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 Saito Kaori and Hamaya Yoshihiro	4. 巻 13
2. 論文標題 On the Asymptotic Stability of Discrete Crocodilians Model	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Advances in Pure Mathematics	6. 最初と最後の頁 211 ~ 225
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.4236/apm.2023.135015	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 Saito Kaori and Hamaya Yoshihiro	4. 巻 9
2. 論文標題 Global Stability Properties of Virus Dynamics Discrete Models	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Journal of Mathematics and Statistical Science	6. 最初と最後の頁 26 ~ 39
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 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 Saito Kaori	4. 巻 17
2. 論文標題 On the Global Stability of an SIR Epidemic Discrete Model	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 -	6. 最初と最後の頁 119 ~ 123
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.12988/ijma.2023.912517	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 Hamaya Yoshihiro and Saito Kaori	4. 巻 271
2. 論文標題 Global Attractivity of a Delayed SEIR Epidemic Model of COVID-19 with Diffusion	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Journal of Mathematical Science	6. 最初と最後の頁 378 ~ 399
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/s10958-023-06527-6	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 Hamaya Yoshihiro and Saito Kaori	4. 巻 Vol. 1, No.41-42
2. 論文標題 Asymptotic behavior of delayed SIR epidemic model of COVID-19 with diffusion	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 The Bulletin of the Information Processing Center	6. 最初と最後の頁 29-40
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 オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計1件 (うち招待講演 0件 / うち国際学会 1件)

1. 発表者名 Y. Hamaya
2. 発表標題 Boundedness and global attractivity to three-species cyclic prey-predator of Volterra type difference equations
3. 学会等名 27th International Conference on Difference Equations and Applications (ICDEA 2022, Paris) (国際学会)
4. 発表年 2022年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

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
研究 分担 者	齋藤 香織 (Saito Kaori)	明星大学・経営学部・准教授	
	(10749922)	(32685)	

6. 研究組織（つづき）

	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
研究 分 担 者	河野 敏行 (Kohno Toshiyuki) (90309534)	岡山理科大学・情報理工学部・教授 (35302)	

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