

令和 5 年 6 月 27 日現在

機関番号：12401

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2017～2022

課題番号：17K05358

研究課題名（和文）確率過程に基づくモデルの数理医学応用に関するイノベーション

研究課題名（英文）Innovation for mathematical medical applications of models based on stochastic processes.

研究代表者

道工 勇 (DOKU, Isamu)

埼玉大学・教育学部・教授

研究者番号：60207686

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,400,000円

研究成果の概要（和文）：本研究は確率過程に基づくランダムな数理モデルを構築し、医療分野に適用し、特異な現象の数理的理解を深め、数理医学の発展に寄与することを目指すものである。ガン免疫応答に関する局所消滅性の特徴付けでは、ガン免疫応答を記述する環境依存型モデルを提案し、免疫細胞によりガンが局所的に駆逐される様子に対応する局所消滅性をモデル的に再現することに成功した。次に腫瘍免疫上重要な「免疫能の飽和性」という限界値の存在を、モデル論的に証明することを目指し、直接的に示す代わりに極限で出現する定性的モデルの有限時間での消滅性を導出することで間接的に限界値の存在を示すことができた。

研究成果の学術的意義や社会的意義

確率過程に基づくランダムな数理モデルを構築し、それを医療科学分野の個別問題に適用し、モデル解析的手法を駆使して医療分野特有の現象の数理的理解および数理科学的解釈を深めることで、新領域である「数理医学」の発展に大いに寄与することができる好例を与えている。また、ガン細胞に対する免疫応答を記述する環境依存型モデルを提案し、免疫細胞によりガン細胞が局所的に駆逐される様子に対応する局所消滅性をモデル的に再現することに成功したことで、ガン免疫応答に対する数理医学的な新たな研究の道筋を開いたという意味合いがある。

研究成果の概要（英文）：This research is a theoretical study that is aiming at contribution to the mathematical medicine, by establishing a random model based upon stochastic processes, applying it for various problems in the medical field, and deepening the mathematical understanding to peculiar phenomena. As for the characterization problem of local extinction for tumor-immunological response, we have succeeded in proposing environment dependent model to describe cancer immune response, and also in realizing, in the sense of modelling, local extinction which just corresponds to the situation that the effector group drives away the cancer cells. Next we try to prove the existence of the limit called saturation point of immunity, and we have succeeded in showing the existence of the limit indirectly by deriving the local extinction in finite time for the qualitative model obtained in the limit, instead of showing it directly.

研究分野：確率論、関数方程式論

キーワード：数理医学 確率過程モデル ガン免疫応答 環境依存型モデル 局所消滅性 免疫細胞エフェクター群
分枝過程 極限操作

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。

1. 研究開始当初の背景

(1) (学術的背景) ここ数年、ガンのシステム生物学的研究の急速な進展があり、がん特有な生理現象の機序の解明を目指したモデル論の研究が近年盛んに行われるようになってきた。とりわけ、ガン細胞に関する分子生物学的機序の解明が躍進しており、数理的研究が医学・医療関連分野においても積極的に展開される状況に変化するなど、ガンに対する数理医学的研究を推進するための研究環境が成熟し整ってきているのが現状である。

(2) (研究開始前の準備状況) 本研究に先だち、異なるタイプではあるが、研究代表者はガン細胞に対する免疫エフェクター群の作用を記述する確率モデルについて研究してきている。例えば、[1](2011), および[2](2011)では腫瘍免疫応答を免疫細胞のエフェクター群の視点からではなく、ガン細胞数の増減を直接記述する確率モデルを構築することにより、免疫細胞の生体防御の働きを標的ガン細胞数減少勾配への作用として導入し、その生存性を論じた。また[3](2013), [4](2012)では免疫応答の数式化部分を改良して場所ごとの免疫作用の変動を考慮し、環境因子により応答場全体が一変してしまう様子を記述できるように拡張を行った。さらに [5](2014), [6](2014), および[7](2013)では確率方程式を用いたモデル化による数理医学的アプローチにより、ガンの血管新生を数理細胞学的に論じた。これらの経験を踏まえて、今回提案する環境依存型モデルに辿り着いた。この研究ではガン細胞と周囲の免疫作用との競合結果に応じて系の状態推移を記述できる環境依存型モデルを導入し、そのスケール変換極限により超過程を導出し、その数理モデルを詳しく解析した結果、今までに次の知見が得られた。(cf. [8] (2016))

超過程を定めるパラメータの1つであるドリフト項の符号により、ガン細胞強襲下における正常細胞の長時間生存性に違いが出る。

超過程モデルは1次元では無条件に局所消滅性を呈するため、確率1でガン発症となり、2次元以上ではマルコフ系の性質の違いにより、ガン発症傾向(条件付き共存可)かガン発症確定かに分かれることが判明した。

超過程モデルにおける2つのパラメータ(モデル決定因子)双方の値による違いは微妙でガン発症か発症傾向かに分かれ、またパラメータの値が同じ状況下でも空間次元の違いにより、ガン発症傾向か正常状態かと結果に差が出ることも判明した。

最後に、今までに考案したモデルとの効用を比較して、今回提案を考えている確率モデルの方が免疫飽和性、局所消滅性、生存性及び環境考慮などすべての点において優れていることがわかった。

2. 研究の目的

本研究は確率過程に基づく数理モデルを構築し、それを医療科学のトピックに応用し、モデル解析を通じて現象の解明を助け、現象の理解を加速しようという数学的な理論研究である。ガンに対する免疫応答を記述する環境依存型モデルを提案し、ガン細胞が免疫細胞から成るエフェクター群により局所的に駆逐される様子に対応する「局所消滅性」を、モデル決定因子の言葉で特徴づけることを目指す。合わせて腫瘍免疫学上重要な「免疫能の飽和性」という限界値の存在をモデル論的に証明することを目標に、数理現象面の詳細な解析を進める。

研究代表者は、細胞の形質転換期及びガン化細胞の無秩序増殖期を対象として、エフェクター群の腫瘍免疫応答に興味があり、免疫細胞群によるガンへの細胞障害性の働きを記述

する数理モデルを構築し解析することにより、免疫現象を数理的に理解すると同時に、免疫現象の定性的性質をモデル論的に説明することを目指している。本研究では、この基本理念に基づいてガン細胞に対する免疫応答を記述する環境依存型の確率モデルを提案する。このモデルの解析により、腫瘍免疫学において指摘されている「免疫能の飽和性」という限界値があることを理論的に証明することを目指す。またエフェクター群の免疫作用によりガンが局所的に駆逐される状況に対応する概念として確率過程の消滅性([3],[9],[10])と呼ばれる性質があるが、構築した確率モデルが局所消滅性をもつこと及びその数理的特徴付けを与える。さらにモデル論的立場から生存性および共存性に関する結果について詳細な解析を行う。特に、モデル論的に重要な

- (1) 「免疫能の飽和性」という限界値の存在証明
- (2) ガン細胞が免疫作用により駆逐される状況に対応する「局所消滅性」の特徴付け
- (3) 生存性および共存性に関する出現条件の同定

について詳細解析を通して理論的に明らかにする。

上記(1)については、超過程モデルにおける決定因子パラメータの値による違いは微妙でガン発症か発症傾向かに分かれることから、免疫能の飽和性由来の原因であることが強く示唆されたが、完全な存在証明を与えるまでには至っていない。したがって、腫瘍免疫学上重要な「免疫能の飽和性」という限界値があることをモデル論的に明らかにすることを目標とする。

上記(2)については前研究の早い段階から、ガン細胞がエフェクター群の免疫作用により局所的に駆逐される状況に対応するモデルの「局所消滅性」に注目して研究を進めてきたが、この数理的背景は微妙である。実際、1次元では無条件に局所消滅性を呈し確率1でガン発症となるのに対し、2次元以上では系のマルコフ性の違いにより、ガン発症傾向(条件付き共存可)かガン発症確定かに分かれることがモデル論的には面白い結果である。次元が2以上では調和関数論的議論により局所消滅性が出現することは意外性があるが、超過程の決定要素に関する言葉で条件が記述できなかった点は残念であった。従って、われわれの確率モデル(超過程)がガン細胞に対する免疫作用を記述する数理モデルとして十分に機能しうることを主張するためには、モデルの決定因子の言葉で局所消滅性の出現条件を記述することが必要である。

上記(3)については、超過程のパラメータの違いや次元の違いにより生存性・共存性の結果が分かれ、かなり細かい分類になったことは一定の評価ができるが、数理的にはまだ不十分である。モデル論的には得られた数学的な結果をガン免疫応答本来の言葉に翻訳して初めて数理モデル導入の意義が認められるからである。ゆえに生存性・共存性に関する出現条件の同定は不可欠な作業である。

3. 研究の方法

第1のトピック「免疫能の飽和性」の存在証明、第2の「局所消滅性」の特徴付け、第3の「生存性・共存性」の出現条件に対する研究比重は、当初から40%:30%:30%で遂行する。第1のトピックについては、全研究の約前半は純粋に数学的な研究として超過程モデルの有限時間消滅などの抽象的定理の導出を目指し、後半では得られた結果をガン免疫の確率モデルに適用し、生存性の結果と合わせてモデル解析を行う形で最終目標の飽和性の理論的証明を行う。第2と第3のトピックについては、確率モデルに付随して定まる非線形の微分方程式系の解の解析を中心に、非退化性や正值性に関する結果と比較定理の導出とを合わせて統合的に、単純なものから徐々に複雑なケースを扱えるように順次拡張しながら、特徴付けや出現条件の同定を進める。

[平成29年度]

第1のトピック「免疫能の飽和性」の限界値の存在証明

測度値分枝マルコフ過程を構成する際のラプラス推移汎関数(Dynkin:AnnProb 21(1993))を利用して、極限過程の生成作用素にマルチンゲール問題による特徴付けを与える。手法

的には概ね論文 Doku:FE J TheoStat 9(2003) で用いた道具を少し改良することで達成できる見込みである。この結果に基づいて構成過程の定性的性質を1つ1つ具体的に調べると同時に、典型例である超ブラウン運動に関する結果 : Dawson et al. LNM 2012 と比較検討することにより有限時間消滅性について解析を実施する。それに基づいて抽象的な有限時間消滅に関する定理の導出を目指す。

第2のトピック「局所消滅性」の特徴付け

一言で云うと、確率モデルに付随して定まる非線形の微分方程式系の解の性質：非退化性や正值性を調べて、解に関する比較定理の導出と合わせて局所消滅性を導くのであるが、超過程が複雑になればなるほど、裏の確率論的背景が微妙に絡んでくる。例えば、超拡散では分枝拡散過程の長時間での局所漸近挙動が極限過程である超拡散の局所消滅性に対して支配的である。(cf. Engländer et al. AnnProb 32(2004)) われわれの確率モデルは上述のような長時間高密度極限操作によって導出したものではなく、相互作用粒子系に対する特異極限操作により導出したもので、確率モデルの局所消滅性を統御する背景の確率論的因子が陽には不明である点が解析を困難にしている。これに関しては、Doku:Trans JSIAM 26(2016)の変分アプローチが有効で、この枠組みを最大限利用することで粒子系パラメータの追跡調査を実施することが可能となり、ひいては決定因子の同定に繋がると予測している。

第3のトピック「生存性・共存性」の出現条件の同定

確率モデルの特徴付けに現れる非線形微分方程式の解を用いて、モデルの生存確率の指数評価式の導出(cf. Dawson et al. AnnProb 23(1995))を目指す研究方向を考えている。この導出には方程式の境界値問題の評価など技術的に難しい点もあるが、成功すれば、有用な近似評価公式が得られ、初期状態の如何により生存の可能性が予見できる創始者支配の成立が図られ、[8]道工(2016)に習いこの公式の精密化ができれば、生存性の出現条件の同定に繋がると予想している

第1,2,3トピックに対する研究比重は、当初から40% : 30% : 30%で遂行するつもりであり、研究が順調に進行した場合は、この比重とスケジュールを維持する。途中で一方が予想外の良い結果を達成する見込みが出た場合、あるいは逆にどちらか一方がクリティカルな状況に陥った場合には、比重の割合を適宜変更して臨機応変に対応しながら研究を遂行する。研究期間の後半以降にどちらか一方の研究に支障をきたした場合には、順調な方に優先権を与え、一方だけでも当初の成果達成にこぎつけるように最大限の努力を計る。

[平成30年度以降]

第1のトピック「免疫能の飽和性」の限界値の存在証明

前年に引き続き、前半は超過程モデルの有限時間消滅などの抽象的定理の導出を目指す。後半は前半で得られた諸結果をガン免疫の確率モデルに適用して、モデルの生存性の結果と合わせてモデル解析を行う。具体的にはエフェクター群の免疫作用に上限値を設定した際に、ガン細胞の無秩序増殖の結果、免疫反応に拘わらず限定された領域においては確率1でガン発症状態へ移行することを数理現象論的に示すことにより、最終目標である免疫能の飽和性という限界値の存在証明を行う。

第2のトピック「局所消滅性」の特徴付け

前年に引き続いて、相互作用粒子系の極限操作で出現する超過程に対して、元の環境依存型モデルの決定因子パラメータの追跡調査を Doku:Trans JSIAM 26(2016)の変分アプローチの手法を利用することにより実施する。さらに超過程のマルチンゲール問題の特徴付けに出現する決定因子の状態を解析することにより、超過程に関する数理現象が決定因子の言葉に翻訳可能になることを期待している。これに成功すれば、超過程の局所消滅性に

関する決定因子による特徴付けも得られると考えている。

第3のトピック「生存性・共存性」の出現条件の同定

前年に引き続いて、超過程のラプラス推移汎関数による特徴付けに出現する非線形微分方程式の解を利用して、モデルの生存確率の指数評価式の導出を試みる。次に適当な境界値問題を設定することによりモデル論的に有用な近似評価公式の導出を計る。この公式により創始者支配の成立が成される。この近似評価公式を精密化することにより、超過程のRangeのコンパクト性と合わせて生存性の出現条件が同定される。共存性もほぼ同様なストーリー展開により得られる。

4. 研究成果

本研究は確率過程に基づくランダムな数理モデルを構築・提案し、それを医療科学分野の個別問題に適用し、モデル解析的手法を駆使して医療分野特有の現象の数理的解明理解および数理科学的解釈を深め、新領域である「数理医学」の発展に寄与することを目指す数学的な理論研究である。

本研究の第1テーマである「ガン免疫応答に関する局所消滅性の特徴付け問題」では、ガン細胞に対する免疫応答を記述する環境依存型モデルを構築・提案し、免疫細胞達から成るエフェクター群によりガン細胞が局所的に駆逐される様子に対応するモデルの局所消滅性を数理モデル的に再現することに成功している。その最終目標である局所消滅性のモデル決定因子の言葉による特徴付けに関しては、決定因子による部分的特徴付けを導いた。特徴付け問題として一応の解決を見た。

第2のテーマは、腫瘍免疫学上極めて重要である「免疫能の飽和性」という限界値の存在を、ガン免疫応答に関する環境依存型モデルに対して数理的に証明することである。しかしこのテーマは理論的に難しい問題であることが研究を進める中で判明した。そこで研究方針の見直しを行い、直接的に示す代わりに極限移行操作により得られる定性的モデルの有限時間での消滅性を導出することで間接的に免疫能飽和性の限界値の存在を主張する道筋をとることにした。より具体的には、スケール変換極限操作で出現する超過程と呼ばれる分枝過程に対して、免疫作用に上限値を設定した場合、ガン細胞の無秩序増殖の結果、免疫応答の適合度に拘わらず、ある限定領域において確率1でガン発症状態へと移行することを数理現象論的に示すことができた。このことにより最終目標である免疫能の飽和性という限界値の存在を間接的に証明できたと考えている。

第3のテーマである「存在性・共存性」の出現条件の同定問題に関しては、存在性・共存性に関する十分条件を導出することで解決ができた。

<引用文献>

- [1] 道工 勇、確率モデルの数理医学への応用、統計数理研究所・共同研究レポート、262巻、2011、105-115
- [2] 道工 勇、ガンの血管新生に関する数理細胞生物学的一考察、(確率モデルによる数理医学的アプローチ、埼玉大学紀要(数学・自然科学編) 60巻、2号、2011、205-217
- [3] Doku, I., Extinction of historical superprocess associated with stable random measure, ISM Res. Rept. 300 (2013), 97--104
- [4] 道工 勇、数理医学的視点に依る腫瘍免疫応答の確率モデル、埼玉大学紀要(数学・自然科学編) 61巻、2012、223--232
- [5] Doku, I., Vessel mathematical model for tumour angiogenesis and its fluctuation characterization equation, RIMS Kokyuroku (Kyoto Univ.) 1917 (2014), 29-36.
- [6] Doku, I. and Misawa, M., The limit function and characterization equation for fluctuation in the tumour angiogenic SDE model, J. SUFE Math. Nat. Sci. 63 (2014), no.1, 115-131
- [7] Doku, I. and Misawa, M., Mean principle and fluctuation of SDE model tumour angiogenesis, J. SUFE Math. Nat. Sci. 62 (2013), no.2, 183-206
- [8] 道工 勇、ガン免疫と環境依存型モデル、日本応用数理学会論文誌、26巻、2016、213--252
- [9] Doku, I., On extinction of measure-valued Markov processes, J. SUFE Math. Nat. Sci. 61 (2012), no.2, 155--172
- [10] Doku, I., On extinction property of superprocesses, ISM Res. Rept. 275 (2012), 34-42.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計23件（うち査読付論文 2件 / うち国際共著 2件 / うちオープンアクセス 23件）

1. 著者名 Isamu DOKU	4. 巻 70(1)
2. 論文標題 Non-Fredholmness for a class of pseudo-differential operators acting on Besov spaces.	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 J. SUFE Math. Nat. Sci.	6. 最初と最後の頁 177-186
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 -

1. 著者名 Isamu DOKU	4. 巻 70(2)
2. 論文標題 Une remarque sur la singularite de la solution pour le probleme de Cauchy avec l'operateur strictement hyperbolique.	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 J. SUFE Math. Nat. Sci.	6. 最初と最後の頁 421-440
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 -

1. 著者名 Isamu DOKU	4. 巻 455
2. 論文標題 An integral formula for the solution to random equations with Levy noise.	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Inst. Stat. Math. Cop. Res. Rept.	6. 最初と最後の頁 43-51
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 -

1. 著者名 Isamu DOKU	4. 巻 69(1)
2. 論文標題 An estimate of the speed of support propagation over time for a certain class of superprocesses.	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 J. SUFE Math. Nat. Sci.	6. 最初と最後の頁 355-362
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 -

1. 著者名 Isamu DOKU	4. 巻 69(1)
2. 論文標題 A note on the wavefront set and propagation of singularities for a class of pseudo-differential operators.	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 J. SUFE Math. Nat. Sci.	6. 最初と最後の頁 363-380
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 -

1. 著者名 Isamu DOKU	4. 巻 69(2)
2. 論文標題 Microlocal properties for a class of pseudo-differential operators with smooth coefficients.	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 J. SUFE Math. Nat. Sci.	6. 最初と最後の頁 455-469
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 -

1. 著者名 Isamu DOKU	4. 巻 69(2)
2. 論文標題 On regularity of solutions to nonlinear partial differential equations.	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 J. SUFE Math. Nat. Sci.	6. 最初と最後の頁 471-483
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 -

1. 著者名 Isamu DOKU	4. 巻 70(1)
2. 論文標題 Non-Fredholmness for a class of pseudo-differential operators acting on Besov spaces.	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 J. SUFE Math. Nat. Sci.	6. 最初と最後の頁 177-186
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 -

1. 著者名 Isamu DOKU	4. 巻 3
2. 論文標題 A probabilistic interpretation of nonlinear integral equations.	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Recent Adv. Integral Eqns.	6. 最初と最後の頁 29-42
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.5772/intechopen.8150	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 Isamu DOKU	4. 巻 68(2)
2. 論文標題 The spectrum of second order elliptic operator and useful integral inequality.	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 J. SUFE Math. Nat. Sci.	6. 最初と最後の頁 495-505
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 -

1. 著者名 Isamu DOKU	4. 巻 69(1)
2. 論文標題 An estimate of the speed of support propagation over time for a certain class of superprocesses..	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 J. SUFE Math. Nat. Sci.	6. 最初と最後の頁 355-362
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 -

1. 著者名 Isamu DOKU	4. 巻 69(1)
2. 論文標題 A note on the wavefront set and propagation of singularities for a class of pseudo-differential operators.	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 J. SUFE Math. Nat. Sci.	6. 最初と最後の頁 363-380
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 -

1. 著者名 Isamu DOKU	4. 巻 2043
2. 論文標題 Survival property for superprocesses and its applications to models.	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 RIMS Kokyuroku (Kyoto Univ.)	6. 最初と最後の頁 6-12
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 -

1. 著者名 Isamu DOKU	4. 巻 67(2)
2. 論文標題 A remark on approximate formula and asymptotic expansion for pseudodifferential operators of Kohn-Nirenberg type.	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 J. SUFE Math. Nat. Sci.	6. 最初と最後の頁 335-340
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 -

1. 著者名 Isamu DOKU	4. 巻 -
2. 論文標題 A probabilistic interpretation of nonlinear integral equation.	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Recent Adv. Integral Eqn.	6. 最初と最後の頁 1-14
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.5772/intechopen/81501.	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 Isamu DOKU	4. 巻 68(1)
2. 論文標題 Some estimates of the symbol and the symbol calculus.	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 J. SUFE Math. Nat. Sci.	6. 最初と最後の頁 307-316
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 -

1. 著者名 Isamu DOKU	4. 巻 68(2)
2. 論文標題 The spectrum of second order elliptic operator and useful integral inequality.	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 J. SUFE Math. Nat. Sci.	6. 最初と最後の頁 495-505
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 -

1. 著者名 Isamu DOKU	4. 巻 66(1)
2. 論文標題 An estimate of survival probability for superprocesses.	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 J. Saitama Univ. Fac. Educ. (Math. Nat. Sci.)	6. 最初と最後の頁 253-263
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 -

1. 著者名 Isamu DOKU	4. 巻 385
2. 論文標題 On compactness for superprocesses.	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 ISM Cop. Res. Rept.	6. 最初と最後の頁 80-87
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 -

1. 著者名 Isamu DOKU	4. 巻 2030
2. 論文標題 A support problem for superprocesses in terms of random measure.	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 RIMS Kokyuroku (Kyoto Univ.)	6. 最初と最後の頁 108-115
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 Isamu DOKU	4. 巻 66(2)
2. 論文標題 A remark on approximate formula and asymptotic expansion for pseudodifferential operators of Kohn-Nirenberg type.	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 J. Saitama Univ. Fac. Educ. (math. Nat. Sci.)	6. 最初と最後の頁 589-598
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 -

1. 著者名 Isamu DOKU	4. 巻 2043
2. 論文標題 Survival property for superprocesses and its application to models.	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 RIMS Kokyuroku (Kyoto Univ.)	6. 最初と最後の頁 6-12
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 Isamu DOKU	4. 巻 66(2)
2. 論文標題 A statistical method based on multivariate analysis in the comprehensive evaluation of achievement test: from the standpoint of principal components analysis.	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 J. Saitama Univ. Fac. Educ. (Math. Nat. Sci.)	6. 最初と最後の頁 599-611
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 -

〔学会発表〕 計6件 (うち招待講演 1件 / うち国際学会 0件)

1. 発表者名 道工 勇
2. 発表標題 レヴィ雑音を伴う確率方程式の解に関する積分公式
3. 学会等名 応用統計学会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 道工 勇
2. 発表標題 レヴィ雑音を伴う確率方程式の解について
3. 学会等名 日本数学会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 道工 勇、橋本隼也、町原秀二
2. 発表標題 確率非線形シュレインガー方程式の H^2 -時間局所適切性
3. 学会等名 日本数学会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 道工 勇
2. 発表標題 ガン免疫に関する数理モデル
3. 学会等名 文部科学省委託事業一環の研究会「医学研究における数理的方法」(招待講演)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 道工 勇
2. 発表標題 ガン免疫の環境依存型モデルEDMにおける局所消滅性に関するある評価
3. 学会等名 日本応用数理学会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 道工 勇
2. 発表標題 ヒストリカル過程の良行経歴パスに関する評価
3. 学会等名 日本数学会
4. 発表年 2019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
---------------------------	-----------------------	----

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