

令和 6 年 6 月 18 日現在

機関番号：32682

研究種目：基盤研究(B)（一般）

研究期間：2020～2023

課題番号：20H01816

研究課題名（和文）反応拡散系とその特異極限系に現れるパターンダイナミクスの数理解析

研究課題名（英文）Mathematical analysis of pattern dynamics of reaction-diffusion systems and their singular limit problems

研究代表者

二宮 広和 (Ninomiya, Hirokazu)

明治大学・総合数理学部・専任教授

研究者番号：90251610

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 13,400,000円

研究成果の概要（和文）：本研究課題では、反応拡散系の解のダイナミクスを決定するための解析手法の開発と普遍的な数理構造の抽出を行った。単独反応拡散系については、1次元進行波解の速度の特徴づけ、多次元全域解の構成を行った。複数成分の反応拡散系については、特異極限問題の解のダイナミクスを調べた。ダイナミクスを扱うことのできる特異極限問題として反応界面系を導入し、1次元空間における反応界面系の解の大域挙動は3種類に分類できることを示した。また、非一様場における多次元空間の反応拡散系のパターンダイナミクスの特徴付けの準備として、面積保存平均曲率流を研究し、定常解の情報やある条件下でのダイナミクスを調べることに成功した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

多くの現象が、非線形偏微分方程式で記述されるが、その解の挙動は、数値計算を行わないと分からない場合がほとんどである。この研究課題では、解のダイナミクスを調べるために、解のダイナミクスがわかる新しい特異極限問題を導入した。また、単独反応拡散方程式の全域解の性質を抽出する手法を開発した。こうした手法の開発を重ねることで、将来的に非線形偏微分方程式の解挙動を表現する数学的言語が確立される。

研究成果の概要（英文）：In this research project, we developed an analysis method to determine the dynamics of solutions in reaction-diffusion systems and extracted universal mathematical structures. For single-component reaction-diffusion equations, we characterized the velocity of traveling wave solutions in a one-dimensional space and constructed entire solutions. For multiple-component reaction-diffusion systems, we investigated the dynamics of solutions to singular limit problems. Introducing the reaction interface system as a singular limit problem capable of handling dynamics, we proved that the global behavior of solutions to reaction interface systems in one-dimensional space can be classified into three types. Additionally, as a preparation for characterizing pattern dynamics of reaction-diffusion systems in multi-dimensional non-uniform media, we studied area-preserving mean curvature flow and successfully examined information on stationary solutions and dynamics under certain conditions.

研究分野：非線形偏微分方程式

キーワード：反応拡散系 自由境界問題 パターンダイナミクス 進行波解 特異極限問題

1. 研究開始当初の背景

多くの自然現象は、非線形放物型偏微分方程式で記述される。それらの非線形偏微分方程式を数値計算することで、多くの情報が得られている。数値計算で得られる情報は、与えられたパラメータや初期条件によって拘束されるため、数学的に解のダイナミクスを決定することは、非線形放物型偏微分方程式の理論的研究における重要な問題のひとつとなっている。しかし、比較的簡単と考えられる反応拡散系でさえ、解のダイナミクスを決定できていないのが現状である。実際、単独の反応拡散系である Allen-Cahn-Nagumo 方程式でも空間次元が2次元以上になるとわかっていないことが多い。未知変数が複数ある FitzHugh-Nagumo 方程式などでは、もっと複雑になることが容易に想像できる。そのため、反応拡散系に小さなパラメータを適切に導入すると、遷移層をもつ解が現れ、遷移層の運動の極限がみたす自由境界問題が得られる。これは特異極限問題と呼ばれる。つまり、特異極限問題として現れる自由境界問題の解であるダイナミクスを調べることで、反応拡散系の解の情報を得ようとする試みが1980年代からなされ、自由境界問題の解の存在定理などは整備されてきたが、解のダイナミクスについては得られてこなかった。自由境界問題の解のダイナミクスに関する情報を数学的に得ることも難しいためである。

一方、ダイナミクスを数学的に扱う手法としては、伝播する状況を捉える研究が盛んに行われるようになってきた。一定速度で移動する進行波解や非一様な媒質中での伝播を捉える全域解などの研究である。しかし、適用できる方程式は限られており、まだ全体的な理解は進んでいない。

2. 研究の目的

本研究課題は、反応拡散系の解のダイナミクスを決定するための解析手法の開発と普遍的な数理解造の抽出を行うことを目的としている。反応拡散系は、反応項と拡散項よりなる非線形偏微分方程式である。その問題を設定するにあたっては、

未知変数の数
非線形性
空間の次元
領域の形状や状態

が主要なパラメータとなる。本研究課題では、主に未知変数の数と非線形性に注目して、ダイナミクスがどのように変化するかを調べている。しかし、研究の範囲が広いので、以下の3つのテーマに絞った。

- テーマ1. 単独反応拡散方程式の全域解の特徴付け
- テーマ2. 特異極限系の適切性・収束性・全域解の特徴付け
- テーマ3. 複雑領域におけるパターンダイナミクスの数理解析

テーマ1では、これまでの研究で得られた進行波解や全域解の構成手法を拡張する。テーマ2では、主に2成分系のパターンダイナミクスを考察するために、特異極限問題として得られる界面方程式(自由境界問題)のパターンダイナミクスを考察する手法を開発する。この結果をもとに、特異極限をとる前の非線形放物型偏微分方程式のパターンダイナミクスの情報を解析する。テーマ3では、非一様な媒質における反応拡散系の解のダイナミクス、解の摂動による影響や新しいパターン形成のメカニズムの開発を行う。テーマ1からテーマ3がつながることで、より複雑な非線形放物型偏微分方程式に適用できる手法の数学的基礎を構築する。

3. 研究の方法

テーマ1としては、1次元単独反応拡散方程式の解のダイナミクスについて取り扱う。単独の反応拡散方程式では、最大値原理が成り立つので、比較関数をうまく構成することで、優解や劣解が構成できる。また、進行波解の満たす方程式は2階の常微分方程式となるため、相平面法を使うことができる。これらの手法を用いて進行波解や全域解の特徴づけを行う。また、ここでの知見をもとに、多数の平衡点をもつ進行波解の速度の特徴付けを行う。また多次元空間における単独反応拡散方程式の進行波解や全域解の構成を行う。

次に、複数成分の反応拡散系では、一般に比較定理が成り立たず、リャプノフ関数も存在しないので、ダイナミクスを決定するには、特殊な状況を考察する必要がある。そのため、テーマ2では、反応拡散系に小さなパラメータを導入する。適切に小さなパラメータを導入すると、遷移層をもつ解が現れ、遷移層の運動の極限がみたす自由境界問題が得られる。つまり、特異極限系として現れる自由境界問題の解である領域のパターンダイナミクスを調べることになる。多くの自由境界問題において、領域のパターンダイナミクスの情報を得ることは難しい。従って、特異極限系の解の挙動の情報が得られるように反応拡散系に小さなパラメータを適切に導入する必要がある。研究代表者等は Chen-Kohsaka-Ninomiya(参考文献[1])において「反応界面系」という新しい特異極限系を提案した。これは、空間をパラメータとする無限連立常微分方程式とこの未知変数を外力に含む平均曲率流よりなる系である。しかし、この方程式は Hadamard の意味で適切な初期値問題になっていない。これまで知られていた特異極限系で得られていた解の評価を、この反応界面系では期待できないことが一因である。そのため、初期条件に制限を加え

る必要があるが、解の挙動は調べやすい特徴を持っている。まず、1次元空間の反応界面系の解の大域挙動の特徴付けを行う。さらに、外力付き曲率流のダイナミクスを解析する手法の開発を行い、2次元以上の空間における反応界面系の解析に拡張していく。

テーマ3では、次元と領域の形状がパターンダイナミクスに与える影響を調べる。まず、領域が外部領域の場合を考え、外部領域の幾何学的形状に依存して、伝播がどのように変化するかを調べ、伝播するための障害物の配置に関する条件を調べる。また、非一様な媒質における反応拡散系の解のダイナミクスを調べるために、非一様場における面積保存曲率流のダイナミクスを調べ、反応拡散系へと発展させる。また、心室細動時に大きな電気ショックによって除細動を行うが、カオス的な状況に大きな摂動を加えることで正常な状況に引き戻す現象が散見される。解の摂動による影響について調べるために、複素 **Ginzburg-Landau** 方程式を取り扱う。最後に、新しいパターン形成のメカニズムの開発を行うために、等拡散による拡散誘導不安定性について考察する。

4. 研究成果

テーマ1としては、単独反応拡散方程式

$$u_t = \Delta u + f(u)$$

の進行波解を考察した。まず、1次元進行波解について説明しよう。進行波解は一定速度で形状を変えずに移動する解なので $u(x, t) = \phi(x - ct)$ の形になっている。従って、 ϕ は、

$$-c\phi' = \phi'' + f(\phi)$$

をみたすことになる。 c は進行波解の速度である。非線形項 f によって、速度は決定される。 0 と 1 が安定な双安定系を考えよう。その場合、 0 と 1 が等ポテンシャルである場合とそうでない場合で状況は大きく異なる。等ポテンシャルの場合、 $c = 0$ となるが、等ポテンシャルでない場合は、存在すれば、 $c \neq 0$ となる。研究代表者・二宮は、研究協力者・伊藤涼と非線形項と速度の関係性を相平面法を用いて調べた。また、多数の平衡点をもつ進行波解の速度の特徴付けや非有界な進行波解の特徴付けなどの結果を得た。口頭発表(参考文献[2])を行い、現在、論文を執筆中である。2次元以上の空間では、等ポテンシャルでない場合、平面進行波解と呼ばれる進行波解 $\phi(x \cdot n - ct)$ が存在する。複数の平面進行波解を組み合わせることで、V字型進行波解や角錐型進行波解が存在する。研究分担者・谷口は、角錐型進行波解の存在定理や安定性に関して調べて、著書や論文にまとめた(図書[Taniguchi 2021])。また、角錐の面の数を増やすことで、進行方向に軸対称な多次元進行波解の存在についての別証明を与えた。さらに、等ポテンシャルな場合、平面進行波解の速度は 0 になるが、形状によって進行波解になる場合がある。谷口氏は、進行方向に軸対称でない進行波解の構成に成功した(雑誌論文[Taniguchi 2020])。また、多次元全域解については、二宮は凸領域から等距離に等高面をもつような全域解の構成に成功した([Ninomiya 2021])。さらに、Francois Hamel氏と共同で、Allen-Cahn-Nagumo方程式の遠方で 0 に収束する全域解の特徴付けに成功した。遠方で 0 に収束する条件があれば、 0 でない全域解は、遠方で 0 に収束する定常解 ω 、 ω と 0 あるいは 1 をつなぐ全域解に限ることがわかった(雑誌論文[Hamel-Ninomiya 2021])。また、二宮と谷口は、これまでの研究から n 次元進行波解と $n-1$ 次元全域解に関係性に関する結果を得て、日本数学会で学会発表[谷口 2024]を行い、論文を投稿した。

テーマ2では、反応拡散系に適切に小さなパラメータを導入し、その特異極限系として現れる自由境界問題の解である領域のパターンダイナミクスを調べた。まず、単位法線に依存する外力をもつ平均曲率流のコンパクトな進行波解の特徴付けを二宮と物部で行った(雑誌論文[Monobe-Ninomiya 2021])。次に、参考文献[1]で提唱したFitzHugh-Nagumo方程式の特異極限問題である反応界面系を用いた。この方程式系は、

$$V = W(v) - \kappa$$

$$v_t = g(1_{\Omega(t)}, v)$$

で与えられる。 $\Gamma(t)$ は界面、 $\Omega(t)$ は $\Gamma(t)$ で囲まれた領域、界面界面 V は法線速度、 κ は平均曲率、 $1_{\Omega(t)}$ は、 $\Omega(t)$ の特性関数である。第1式は、外力 $W(v)$ をもつ平均曲率流方程式であり、第2式は、空間をパラメータとする無限連立の常微分方程式系である。これを反応界面系と名付けた。参考文献[1]では、2次元進行スポット解を構成している。しかし、この方程式はHadamardの意味で適切な初期値問題になっていない。進行波解の存在は進行波解である特徴を用いることで示すことが可能となっていた。初期関数に条件がないと適切な初期値問題とならない。研究代表者はYan-Yu Chen, Chang-Hong Wu氏と初期関数を制限することで、1次元反応界面系の初期値問題の適切性を示した。また、弱解の存在、一意性および大域的存在を示した(雑誌論文[Chen-Ninomiya-Wu 2022])。また、1次元空間であるため界面の個数が定義でき、この単調非増大性を示した。これを用いて解の大域的挙動を調べ、以下の3通りに限ることを示した(雑誌論文[Chen-Ninomiya-Wu 2021])。

- (i) 0 に収束する
- (ii) 複数のパルス解に収束する
- (iii) 複数パルス解と2つのフロント解に収束する

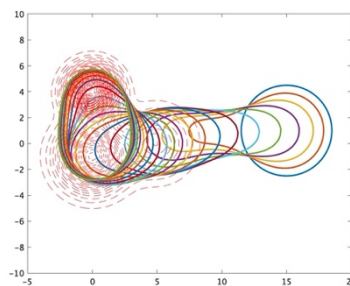
現在、2次元以上の空間における反応界面系の適切性や解の挙動を研究分担者・物部氏と調べている。また、より一般的な反応界面系の考察を行っているところである。さらに、二宮は、研究分担者・三竹と平均曲率流の断面の族とみなす多層平均曲率流に関する研究を行った(雑誌論文

[Mitake-Ninomiya-Todoroki 2020]). さらに、三竹は、凝結・分裂モデルに現れる Hamilton-Jacobi 方程式に対する長時間挙動や外力付グラフ型平均曲率流方程式の一般化コーシー・ディリクレ問題の解の長時間挙動についての結果を得た(雑誌論文[Mitake-Zhang 2021, Gomes-Mitake-Tran 2022]). また、分担者・飯田は、特異極限解析を用いることで、線形拡散のもとでは安定な空間パターンが存在しない捕食者・被食者系において、探索についての2戦略をもつ捕食者を考慮し、被食者発見頻度に応じてその2戦略を切り替える効果を導入することによって安定な空間パターンが形成されることを見出した(雑誌論文[Iida-Izuhara-Kon 2023]).

テーマ3では、次元と領域の形状がパターンダイナミクスに与える影響を調べている. 外部領域における単独の Allen-Cahn-Nagumo 方程式の伝播現象を考察した. 一般に障害物があると、伝播が遮られるが、周期的な障害物があることによって伝播が起きる障害物誘導伝播を俣野博氏と研究し、論文を執筆中である(学会発表[二宮 2021]). また、非一様な媒質における反応拡散系の解のダイナミクスを調べるために、非一様場における面積保存曲率流を Roger Lui 氏と考察した. 面積保存曲率流は、Gage によって 1986 年に考察された(参考文献[3]). これを非一様媒体へ拡張した方程式

$$V = \frac{2\pi a(x, y)}{\int_{\Gamma(t)} a(x, y) ds} - \kappa.$$

を考察した. ここで、 V は界面 $\Gamma(t)$ の法線速度、 a は媒質の非一様性、 κ は平均曲率、 s は界面 $\Gamma(t)$ の弧長パラメータ、積分は界面 $\Gamma(t)$ 上での積分である. 従って、外力項 $2\pi a(x, y) / \int a(x(s), y(s)) ds$ は、時間と場所に依存していることに注意する. この方程式は、走化性物質がある場合の細胞運動や界面活性剤を含む溶液中での油滴の運動を表現すると考えられる. 空間一様な場合には、円に収束することが Gage によって示されている(参考文献[3]). しかし、非一様場における界面の運動は、右図のように複雑であることが数値計算によりわかった. ここで、点線は、 a の等高線で、実線が界面である. そのため、まず雑誌論文[Lui-Ninomiya 2022]にあるように定常解について調べた. さらに、雑誌論文[Lui-Ninomiya 2022]では、界面が大域的に存在するための条件を調べた. 現在、ダイナミクスに関する研究を論文にまとめ、論文を投稿中である(学会発表[二宮 2024]).



また、心室細動時の電氣的除細動のように、カオス的な状況に大きな摂動を加えることで正常な状況に引き戻す現象を数学的に理解するため、当時の博士後期課程の学生・伊藤隼氏との共同で、カオスを引き起こすような複素 Ginzburg-Landau 方程式を取り扱った. 複素 Ginzburg-Landau 方程式では、単位円周上を回る安定周期解が存在するが、カオス的な状況も共存する場合がある. カオスを示すような解に十分大きな摂動を加えると安定周期解に収束することを示した. つまり、初期関数の相平面への射影した集合が、開角有限かつ十分遠くにあれば、安定周期解の吸引域に入っていることを示した(雑誌論文[Ito-Ninomiya 2023]).

最後に、新しいパターン形成のメカニズムの開発を行うために、Turing 不安定性について考察した. Turing 不安定性は、常微分方程式系で安定だった平衡点に、拡散項を付けることにより不安定化する現象である. パターン形成において大変重要なメカニズムである. この不安定性は、拡散係数が異なる必要があった. 一方、Gray-Scott モデルのように拡散項が等しい場合にもパターン解の存在は知られており、パターン形成の新しいメカニズムの発見が求められていた. 研究代表者は、拡散係数が等しい場合に安定定数定常解が不安定化する非線形項の例を構成した(雑誌論文[Ninomiya 2024]). 現在、この結果を拡張し、非線形性の一般化について研究を行っている.

参考文献

1. Y.-Y. Chen, Y. Kohsaka and H. Ninomiya, “Traveling spots and traveling fingers in singular limit problems of reaction-diffusion systems”, *Discrete and continuous dynamical systems. Ser. B* 19, Number 3 (2014), 697 – 714
2. 伊藤涼：反応拡散方程式の非有界な進行波解, 日本数学会 2022 年度秋季総合分科会
3. M. Gage, “On an area-preserving evolution equation for plane curves.” *Nonlinear problems in geometry* 51 (1986): 51-62

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計30件（うち査読付論文 30件 / うち国際共著 16件 / うちオープンアクセス 2件）

1. 著者名 Ninomiya Hirokazu	4. 巻 392
2. 論文標題 Example of Turing's instability by equal diffusion	5. 発行年 2024年
3. 雑誌名 Journal of Differential Equations	6. 最初と最後の頁 255 ~ 265
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.jde.2024.02.026	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 Chen Yan-Yu, Ninomiya Hirokazu, Wu Chang-Hong	4. 巻 28
2. 論文標題 Weak entire solutions of reaction-interface systems	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Discrete and Continuous Dynamical Systems - B	6. 最初と最後の頁 6015 ~ 6033
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3934/dcdsb.2022174	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 Ito Shun, Ninomiya Hirokazu	4. 巻 40
2. 論文標題 Spatial homogenization by perturbation on the complex Ginzburg-Landau equation	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Japan Journal of Industrial and Applied Mathematics	6. 最初と最後の頁 823 ~ 841
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/s13160-022-00556-5	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 Iida Masato, Izuhara Hirofumi, Kon Ryusuke	4. 巻 28
2. 論文標題 Cross-diffusion predator-prey model derived from the dichotomy between two behavioral predator states	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Discrete and Continuous Dynamical Systems - B	6. 最初と最後の頁 6159 ~ 6178
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3934/dcdsb.2023098	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 Mitake Hiroyoshi, Sato Shoichi	4. 巻 30
2. 論文標題 On the rate of convergence in homogenization of time-fractional Hamilton-Jacobi equations	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Nonlinear Differential Equations and Applications NoDEA	6. 最初と最後の頁 30-68
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/s00030-023-00880-w	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 Kagaya Takashi, Liu Qing, Mitake Hiroyoshi	4. 巻 30:13
2. 論文標題 Quasiconvexity preserving property for fully nonlinear nonlocal parabolic equations	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Nonlinear Differential Equations and Applications NoDEA	6. 最初と最後の頁 1-28
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/s00030-022-00818-8	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 Izuhara Hirofumi, Monobe Harunori, Wu Chang-Hong	4. 巻 28
2. 論文標題 Spatial segregation of multiple species: A singular limit approach	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Discrete and Continuous Dynamical Systems - B	6. 最初と最後の頁 6208 ~ 6232
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3934/dcdsb.2022215	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 Monobe Harunori, Shimojo Masahiko, Yanagida Eiji	4. 巻 55
2. 論文標題 Spreading and Extinction of Solutions to the Logarithmic Diffusion Equation with a Logistic Reaction	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 SIAM Journal on Mathematical Analysis	6. 最初と最後の頁 2261 ~ 2287
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1137/22M1492544	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 Chen Yan-Yu, Ninomiya Hirokazu, Wu Chang-Hong	4. 巻 324
2. 論文標題 Global existence and uniqueness of solutions for one-dimensional reaction-interface systems	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Journal of Differential Equations	6. 最初と最後の頁 102 ~ 130
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.jde.2022.04.004	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 Lui R., Ninomiya H.	4. 巻 150
2. 論文標題 Stationary solutions of an area-preserving curvature flow in an inhomogeneous medium	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Proceedings of the American Mathematical Society	6. 最初と最後の頁 2095-2105
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1090/proc/15787	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 Lui R., Ninomiya H.	4. 巻 3:42
2. 論文標題 Global existence of solutions of area-preserving curvature flow of a convex plane curve in an inhomogeneous medium	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Partial Differential Equations and Applications	6. 最初と最後の頁 1-16
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/s42985-022-00176-1	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 Jang Jiwoong, Kwon Dohyun, Mitake Hiroyoshi, Tran Hung V.	4. 巻 168
2. 論文標題 Level-set forced mean curvature flow with the Neumann boundary condition	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Journal de Mathematiques Pures et Appliques	6. 最初と最後の頁 143 ~ 167
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.matpur.2022.11.002	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 Gomes Diogo A., Mitake Hiroyoshi, Tran Hung V.	4. 巻 384
2. 論文標題 The large time profile for Hamilton-Jacobi-Bellman equations	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Mathematische Annalen	6. 最初と最後の頁 1409 ~ 1459
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/s00208-021-02320-5	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 Giga Yoshikazu, Mitake Hiroyoshi, Sato Shoichi	4. 巻 316
2. 論文標題 On the equivalence of viscosity solutions and distributional solutions for the time-fractional diffusion equation	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Journal of Differential Equations	6. 最初と最後の頁 364 ~ 386
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.jde.2022.01.057	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 Matsuzawa Hiroshi, Monobe Harunori, Shimojo Masahiko, Yanagida Eiji	4. 巻 71
2. 論文標題 Convergence to a traveling wave in the Igarithmic diffusion equation with a bistable nonlinearity	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Indiana University Mathematics Journal	6. 最初と最後の頁 125 ~ 151
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1512/iumj.2022.71.8850	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 H. Ninomiya	4. 巻 41
2. 論文標題 Entire solutions of the Allen-Cahn-Nagumo equation in a multi-dimensional space	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Discrete & Continuous Dynamical Systems - A	6. 最初と最後の頁 395 ~ 412
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3934/dcds.2020364	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 Hamel F., Ninomiya H.	4. 巻 34
2. 論文標題 Localized and Expanding Entire Solutions of Reaction-Diffusion Equations	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Journal of Dynamics and Differential Equations	6. 最初と最後の頁 2937 ~ 2974
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/s10884-020-09936-2	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 Martinson W. Duncan, Ninomiya Hirokazu, Byrne Helen M., Maini Philip K.	4. 巻 82
2. 論文標題 Comparative analysis of continuum angiogenesis models	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Journal of Mathematical Biology	6. 最初と最後の頁 1-34
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/s00285-021-01570-w	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 Chen Yan-Yu, Ninomiya Hirokazu, Wu Chang-Hong	4. 巻 53
2. 論文標題 Global Dynamics on One-Dimensional Excitable Media	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 SIAM Journal on Mathematical Analysis	6. 最初と最後の頁 7081 ~ 7112
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1137/20M1343014	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. Giga, H. Mitake, T. Ohtsuka, H. V. Tran	4. 巻 70
2. 論文標題 Existence of asymptotic speed of solutions to birth and spread type nonlinear partial differential equations	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Indiana Univ. Math. J.	6. 最初と最後の頁 121-156
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 Mitake Hiroyoshi、Zhang Longjie	4. 巻 2
2. 論文標題 Remarks on the generalized Cauchy-Dirichlet problem for graph mean curvature flow with driving force	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Partial Differential Equations and Applications	6. 最初と最後の頁 1-24
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/s42985-020-00066-4	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 Monobe H.、Ninomiya H.	4. 巻 374
2. 論文標題 Compact traveling waves for anisotropic curvature flows with driving force	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Transactions of the American Mathematical Society	6. 最初と最後の頁 2447 ~ 2477
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1090/tran/8168	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 C. Aida, C.-N. Chen, K. Kuto and H. Ninomiya	4. 巻 40
2. 論文標題 Bifurcation from infinity with applications to reaction-diffusion systems	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Discrete and Continuous Dynamical Systems - A	6. 最初と最後の頁 3031 ~ 3055
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3934/dcds.2020053	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 Mitake Hiroyoshi, Ninomiya Hirokazu, Todoroki Kenta	4. 巻 22
2. 論文標題 A level set approach for multi-layered interface systems	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Interfaces and Free Boundaries	6. 最初と最後の頁 383 ~ 400
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.4171/IFB/444	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 Ninomiya Hirokazu, Yamamoto Hiroko	4. 巻 272
2. 論文標題 A reaction-diffusion approximation of a semilinear wave equation	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Journal of Differential Equations	6. 最初と最後の頁 289 ~ 309
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.jde.2020.09.031	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 Taniguchi Masaharu	4. 巻 40
2. 論文標題 Axisymmetric traveling fronts in balanced bistable reaction-diffusion equations	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Discrete and Continuous Dynamical Systems - A	6. 最初と最後の頁 3981 ~ 3995
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3934/dcds.2020126	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 Masaharu Taniguchi	4. 巻 85
2. 論文標題 Traveling fronts in balanced bistable reaction-diffusion equations	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Advanced Studies in Pure Mathematics, The Role of Metrics in the Theory of Partial Differential Equations,	6. 最初と最後の頁 417-428
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 H. Mitake, H. V. Tran, T. S. Van	4. 巻 19
2. 論文標題 Large time behavior for a Hamilton-Jacobi equation in a critical Coagulation-Fragmentation model	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Commun. Math. Sci.	6. 最初と最後の頁 495-512
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 Mitake Hiroyoshi, Zhang Longjie	4. 巻 2
2. 論文標題 Remarks on the generalized Cauchy-Dirichlet problem for graph mean curvature flow with driving force	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 SN Partial Differential Equations and Applications	6. 最初と最後の頁 40
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/s42985-020-00066-4	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 Izuhara Hirofumi, Monobe Harunori, Wu Chang-Hong	4. 巻 82
2. 論文標題 The formation of spreading front: the singular limit of three-component reaction-diffusion models	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Journal of Mathematical Biology	6. 最初と最後の頁 1-33
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/s00285-021-01591-5	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

[学会発表] 計22件 (うち招待講演 18件 / うち国際学会 14件)

1. 発表者名 Hirokazu Ninomiya
2. 発表標題 Turing's instability by equal diffusion
3. 学会等名 MATRIX-RIMS Tandem Workshop: Evolutionary Partial Differential Equations and Applications (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 H. Ninomiya
2. 発表標題 Dynamics of area-preserving curvature flow in heterogeneous media
3. 学会等名 East Asia Workshop on Nonlinear Evolution Equations (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 H. Ninomiya
2. 発表標題 Turing 's instability by equal diffusion
3. 学会等名 Turing Symposium on Morphogenesis (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 谷口雅治
2. 発表標題 Traveling front solutions of dimension n generate entire solutions of dimension $(n - 1)$ in reaction-diffusion equations
3. 学会等名 日本数学会
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 H. Mitake
2. 発表標題 On asymptotic growth rate of solutions to level-set forced mean curvature flows with evolving spirals
3. 学会等名 East Asia Workshop on Nonlinear Evolution Equations (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 Hirokazu Ninomiya
2. 発表標題 Example of Turing 's instability by equal diffusion
3. 学会等名 13th AIMS conference (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 二宮広和
2. 発表標題 等拡散によるパターン形成の例
3. 学会等名 日本数学会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 二宮広和
2. 発表標題 非一様場における面積保存曲率流のダイナミクス
3. 学会等名 日本数学会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 二宮広和
2. 発表標題 面積保存曲率流のダイナミクス
3. 学会等名 北陸応用数理研究会2023 (招待講演)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 H. Ninomiya
2. 発表標題 Dynamics of area-preserving curvature flow in an inhomogeneous medium
3. 学会等名 BIRS conference: Interfacial Phenomena in Reaction-Diffusion Systems (22w5165) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Harunori Monobe
2. 発表標題 Compact traveling waves for a mean-curvature flow with driving force
3. 学会等名 A ReaDiNet seminar dar on reaction-diffusion system in biology (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 H. Ninomiya
2. 発表標題 Area-preserving curvature flow in an inhomogeneous medium
3. 学会等名 An Online Conference on Recent Topics in Reaction-Diffusion System, Biology, Medicine and Chemistry (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 H. Mitake
2. 発表標題 On the equivalence of viscosity solutions and distributional solutions for the time-fractional diffusion equation
3. 学会等名 The Hong Kong University of Science and Technology, PDE seminar (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 H. Mitake
2. 発表標題 On weak solutions to first-order discount mean field games
3. 学会等名 OIST Analysis Seminar (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 H. Mitake
2. 発表標題 時間分数拡散方程式に対する粘性解と超関数解の同値性
3. 学会等名 京都大学NLPDEセミナー（招待講演）
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 二宮広和
2. 発表標題 反応拡散系の世界
3. 学会等名 日本数学会（招待講演）
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 H. Mitake
2. 発表標題 凝結・分裂モデルに現れるハミルトン・ヤコビ方程式
3. 学会等名 第 38 回 九州における偏微分方程式研究集会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 H. Mitake
2. 発表標題 Large time behavior for a Hamilton-Jacobi equation in a critical Coagulation-Fragmentation model
3. 学会等名 2020 Seoul-Tokyo Conference（招待講演）（国際学会）
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 H. Mitake
2. 発表標題 退化粘性 Hamilton-Jacobi 方程式の長時間挙動
3. 学会等名 2020 年度「微分方程式の総合的研究」(招待講演)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Harunori Monobe
2. 発表標題 Fisher-Stefan problems and the singular limit of reaction-diffusion systems
3. 学会等名 Czech-Japanese Seminar in Applied Mathematics (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Harunori Monobe
2. 発表標題 Fast reaction limit of a three-components Lotka-Volterra competition-diffusion system
3. 学会等名 "An online conference on mathematical biology" ReaDiNet (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Harunori Monobe
2. 発表標題 Fast reaction limit of three-components reaction-diffusion systems and free boundary problems describing population dynamics
3. 学会等名 Interfacial Phenomena in Reaction-Diffusion Systems (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2020年

〔図書〕 計1件

1. 著者名 Masaharu Taniguchi	4. 発行年 2021年
2. 出版社 Mathematical Society of Japan	5. 総ページ数 170
3. 書名 Traveling Front Solutions in Reaction-Diffusion Equations	

〔産業財産権〕

〔その他〕

http://www.isc.meiji.ac.jp/~nino38/index.html https://www.math.okayama-u.ac.jp/~taniguchi/publications/index.html
--

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	飯田 雅人 (Iida Masato) (00242264)	宮崎大学・工学部・教授 (17601)	
研究分担者	谷口 雅治 (Taniguchi Masaharu) (30260623)	岡山大学・異分野基礎科学研究所・教授 (15301)	
研究分担者	物部 治徳 (Monobe Harunori) (20635809)	大阪公立大学・大学院理学研究科 ・准教授 (24405)	

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	三竹 大寿 (Mitake Hiroyoshi) (90631979)	東京大学・大学院数理科学研究科・准教授 (12601)	

	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
研究協力者	伊藤 涼 (Ito Ryo)		
研究協力者	塚本 悠暉 (Tsukamoto Yuki)		

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7件

国際研究集会 Geometric Aspects of Partial Differential Equations	開催年 2023年～2023年
国際研究集会 14th Taiwan-Japan joint workshop for young scholars in applied mathematics	開催年 2024年～2024年
国際研究集会 Pattern dynamics appearing in mathematical biology	開催年 2023年～2023年
国際研究集会 One-day workshop on PDEs and related topics	開催年 2024年～2024年
国際研究集会 BIRS conference: Interfacial Phenomena in Reaction-Diffusion Systems (22w5165)	開催年 2022年～2022年
国際研究集会 Modeling and Mathematical Analysis of Dynamics of Patterns	開催年 2021年～2021年
国際研究集会 Interfacial Phenomena in Reaction-Diffusion Systems	開催年 2020年～2020年

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			
その他の国・地域	National Taiwan University	National Yang Ming Chiao Tung University		
米国	Worcester Polytech Institute	University of Wisconsin-Madison	Carnegie Mellon University	
フランス	University of Aix-Marseille			
英国	Oxford University			