

科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和 6 年 6 月 13 日現在

機関番号：34504

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2019～2023

課題番号：19K03594

研究課題名(和文)社会性昆虫の巣造りに対する数理モデル - 多因子走性系に発現する対称性崩壊 -

研究課題名(英文) Analysis of a mathematical model for the nest construction of social insects

研究代表者

大崎 浩一 (Osaki, Koichi)

関西学院大学・理学部・教授

研究者番号：40353320

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)：社会性昆虫であるシロアリならびにミツバチの営巣過程を模した2つの数理モデルを研究しました。これらのモデルは3因子反応拡散移流系に分類されます。特にその移流は生物の走性に起因し、走性系に対する数理解析には、これまで研究代表者らが発展・整備させてきた2因子系に対する手法が有効です。本研究では、3因子昆虫走性系に新規に現れる数理解析的困難を明らかにし、それらの困難の一部を含む問題である解の時間大域的存在性と有限次元大域アトラクターの存在性、解のダイナミクス、特に解のパターン形成におけるモード解析について研究を推し進めました。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究では社会性昆虫の営巣に関する数理モデルの基本的性質を明らかにしました。数理モデルの性質が明らかとなれば、その結果を現象の理解に役立てることができ、数理モデルを研究することの利点には、現象を予測し、さらに制御できる可能性が広がることなどがあります。本研究で扱った数理モデルは社会性昆虫の営巣に関する走性モデルですが、走性は昆虫のみならず白血球やがん細胞などにも存在しており、本研究を含む基礎研究が様々な自然現象の予測と制御へとつながる可能性があります。

研究成果の概要(英文)：We studied two mathematical models that describe the nesting processes of social insects, specifically termites and honeybees. These models are classified as three-component reaction-diffusion-advection systems. The advection in these models is particularly due to the taxis behavior of the insects, and the methods developed and refined by the principal investigator for two-component systems are effective for the mathematical analysis of such taxis systems. In this study, we identified new mathematical difficulties that arise in the three-component insect taxis systems. We advanced research on issues that include some of these difficulties, such as the global-in-time existence of solutions, the existence of finite-dimensional global attractors, the dynamics of solutions, and especially mode analysis in pattern formation of solutions.

研究分野：非線形解析学

キーワード：Deneubourg系 Keller-Segel系 走化性 走性 時間大域解の存在 パターン形成 反応拡散系 ミツバチ

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 (共通)

1. 研究開始当初の背景

走性とは、生物が外部からの刺激に向かって運動を起こす性質をいい、刺激の種類によって走化性や走光性といったものがあります。細胞性粘菌や大腸菌などの微生物は化学物質に対する走性(走化性)を持っており、飢餓状態になると自ら化学フェロモンを分泌して仲間にシグナルを送って集合体を形成し、訪れた危機に対応することが知られています。これら2つの微生物の集合体形成に対しては、細胞性粘菌には Keller-Segel 系(J. theor. Biol. 26(1970))が、大腸菌には三村・辻川系(Mimura and Tsujikawa, Physica A 230(1996))がそれぞれ提案されており、これまで多くの数理解析が行われてきました(ここでは著名なレビュー論文を2編挙げるにとどめます: Hillen and Painter, J. Math. Biol. 58(2009); Bellomo, Bellouquid, Tao and Winkler, Math. Mod. Meth. Appl. Sci. 25(2015))。これら微生物の走化性は、その生物が発する化学物質に直接反応して起こるため、上述2つの走化性系は、生物密度と化学物質濃度を2因子とした系となっています。本研究では、社会性昆虫、特にシロアリならびにミツバチの営巣に関する走化性の数理解析を行ないます。シロアリは家屋を蝕む害虫として有名ですが、熱帯や乾燥地帯においては、土砂を巣材料とした巨大なアリ塚を形成することで知られます。またミツバチは、自らが分泌するミツロウを次々と付着し、平行に並んでぶら下がる巣(コム)を形成します。これらの営巣過程に対して、シロアリには Deneubourg 系(Insectes Socias 24(1977))が、ミツバチには S \forall v{k}arka-Deneubourg-Beli \forall '{c}(J. theor. Biol. 147(1990))によるミツバチ営巣モデルがそれぞれ提案されており、ともに3因子走化性系となっています。Deneubourg 系は特に、介する化学物質が自らが分泌するものではありません。近年このような走化性系は間接走化性系(indirect chemotaxis system)と引用されます。したがって Deneubourg 系の解析は間接走化性系の研究としても位置付けられます。空間2次元三村・辻川系は減衰作用がなければ Keller-Segel 系と一致します。空間2次元 Keller-Segel 系には、走化性係数をパラメータとして解の時間大域存在と有限時刻爆発との間に閾値があることが知られています(例えば、Nagai-Senba-Yoshida, Funkcial. Ekvac. 40(1997), Horstmann-Wang, Eur. J. Appl. Math. 12(2001)等)。しかし空間2次元3因子間接走化性系の場合、1つの式を楕円型となるような種の近似をした0次減衰の系において、閾値は同様に存在するものの、それは時間大域存在と無限時刻爆発(L^∞ -ノルムで)を分けるものであり、爆発状況が緩和されるという興味深い結果が得られています(Tao-Winkler, J. Eur. Math. Soc. 19(2017))。一方、超線形減衰を有する場合は、Li-Tao(App. Math. Lett. 77(2018))によってスモールネスなしでの時間大域的有界存在が示されています。本研究で取り扱う1次減衰の Deneubourg 系の解析は、この種の研究の流れに寄与するものとなります。一方、ミツバチ営巣モデルにも1次減衰の項があり、この解析についても走化性系という範疇での新たな研究として位置付けられます。

2. 研究の目的

本研究ではまず、これらの数理解析モデルを解析する上で新規に発生する数理解析上の困難を明らかにします。特に、ともに3因子であることに加えて、Deneubourg 系においては1次減衰しか持ち合わせておらず、さらに1つの方程式には拡散項がない(これは partly dissipative, 部分散逸などと引用されます)といった特徴があり、これらが如何に解析上の困難を生むのか、また同様にミツバチ営巣モデルにおいても1次減衰しか持たず、それに加えて退化型拡散を有するといった性質があり、これらに起因する困難が如何に生まれるのかを従来の2因子系との比較において明確にします。それと同時に、これら3因子系に時間大域解が存在するか、そしてその場合の解の挙動、特に有限次元大域アトラクターは構成できるか、また解のパターン形成は如何ようであるかといったことについても対称性崩壊の観点から調べます。本研究では、3因子走化性系に内在する解析的困難に対して、これまで研究代表者らが駆使してきた2因子走化性系に対する手法を発展させることでその一部を克服し、現象のメカニズム解明に寄与するとともに非線形解析学分野の発展に貢献することも目指します。研究代表者はこれまで、上述の Keller-Segel 系ならびに三村・辻川系に対する数理解析を行ってきました。特に、空間2次元における三村・辻川系においては、時間大域的有界存在ならびに有限次元大域アトラクターの存在を示しました(Osaki, Tsujikawa, Yagi and Mimura, Nonlinear Anal. TMA 51(2002))。三村・辻川系は2次の減衰作用を持ちますが、これがもたらす強い抑制効果によって一般次元における三村・辻川系の時間大域存在をも保証できることが、後になって Winkler 教授(Comm. PDE 35(2010))によって示され一定の解決をみました。研究代表者は時間大域存在の文脈において、減衰は何次まで緩められるかという問題について考え、 α 次減衰を有するロジスティック項 $u - u^\alpha$ を導入して、さらに化学物質の分泌オーダーを1より小とした中で、 $\alpha \geq 3/2$ まで緩められることを示し(Nakaguchi and Osaki, Nonlinear Anal. TMA 74(2011))、加えて空間3次元にまでこの議論を展開して、有限次元大域アトラクターも構成しました(Nakaguchi and Osaki, DCDS-B 18(2013))。この減衰次数を下げる試みは、解空間を弱解にまで広げるなどして今も続けられています(例えば、Vigiarolo, Nonlinear Anal. RWA34(2017))。一方、いわゆる放物・楕円型走化性系においては解の爆発に関して元の系よりも多くが判明しており、本研究課題との関連でいえば、1次減衰では爆発を抑制できないことが示されています(Nakaguchi and Osaki, Nonlinear Anal. TMA 74(2011); Winkler, J. Math. Appl. Anal.

384(2011)) . この事実を根拠に , Deneubourg 系ならびにミツバチ営巣モデルには解の爆発が生じると予想しています . しかし本研究期間においては解の爆発を理論的に示すことは目指さず , 如何なる条件下で時間大域存在が保証されるかという課題に注力します .

3 . 研究の方法

(1) Deneubourg 系の解の時間大域存在とパターン形成 .

Deneubourg 系は上で述べた通り , 部分散逸作用を持ちます . 系が部分散逸作用を持つということとは対応する因子に平滑化効果がない , すなわち解作用素がコンパクト性を持たないことを意味します . 本研究ではこの困難に対して , 解作用素の要素でコンパクトでない部分が残りの散逸部分から得られるコンパクト作用素の摂動とみなせることを示し , 有限次元大域アトラクター (その定義からコンパクト) を構成します . 研究代表者らは , 1 次減衰しか有さない Deneubourg 系には , Tao-Winkler (J. Eur. Math. Soc. 19 (2017)) にみられるような 0 次減衰の場合と同様 , 解の無限時刻爆発が起きると予想しています . そこで本研究では , まず初期値の L^1 -ノルムに関するスモールネス条件下での解の時間大域的有界存在を示します . 特にこのとき , アトラクター構成に向けて解の一樣評価を得るよう計算を進めます . 一方 , 解のパターン形成については , 細長い領域において定数定常解が対称性崩壊を起こしてストライプパターン解へと発展するものをこれまで発見しています . これを足がかりにし , 他のパターンの発生可能性 , 特に対称性崩壊という視点に基づくパターン選択の問題について考察します .

(2) ミツバチ営巣モデルの解析 .

ミツバチ営巣モデルに関して時間局所解の構成をまず行ないます . 上で述べた通りこのモデルも 1 次減衰しか持たないため解が爆発する可能性があります . 本研究では時間局所解における解の存在時間が有限ならば , いかなるノルムが発散するのかを調べます . また数値的にもその証左となりうるノルムの振る舞いが追跡できないかを探求します .

(3) エージェントベースモデルの解析と営巣過程の観察 .

ミツバチの営巣初期段階に対応するマルチエージェントベースモデルを前研究期間内に構成しましたが , その成果発表を行なっていくことで最新情報の収集と交換を行ないます . またミツバチの観察実験も行なってコームの異方性発生の起源について探り , ミツバチ営巣モデルのように明示的な異方的作用を持たない数理モデルの構成を目指します .

4 . 研究成果

(1) **Deneubourg** 系の解の時間大域存在とパターン形成の研究に関して , 以下の成果を得ました : 空間 1 次元有界区間における時間大域存在とグローバルアトラクターの構成(雑誌論文[7]) , 空間 2 次元有界領域における初期値のスモールネス条件下での時間大域存在とグローバルアトラクターの構成(雑誌論文[4]) , 長方形領域において数値解が爆発するための条件を不安定モードの視点から考察(学会発表[20]) . また , 走性項の取扱いに関する関連研究として次の成果も得られました : 空間 1 次元 **Keller-Segel** 系に対する解の漸近挙動(雑誌論文[3]) , および長方形領域における三村・辻川系の解のパターン形成(雑誌論文[5]) .

(2) ミツバチ営巣モデルの解析に関して , 以下の成果を得ました : 長方形領域において解の時間局所解の一意存在を示し , 加えて解の存在時間が有限の場合 , いかなるノルムが発散するかを理論的に示して , 数値的にもその証左となるノルムの振る舞いを確認(学会発表[7, 18, 19]) . ミツバチの営巣に関して , 異方的なコーム形成の前段階として小さな粒状のミツロウ塊が準周期的に壁面に付着されることを観察実験において確認しました(雑誌論文[2]) . そこでコーム異方性の発生に関するモデルであるミツバチ営巣モデルから明示的な異方的作用を取り除くことで , ミツバチがミツロウ塊に等方的に誘引されるといった新たな数理モデルを提案しました(学会発表[1, 2, 5, 8, 9, 11, 13, 14, 16]) . これは本課題の発展研究として今後も継続して取り組んでいきます .

(3) エージェントベースモデルの解析と営巣過程の観察に関して , 以下の成果を得ました : ミツバチの営巣初期段階に対応するマルチエージェントベースモデルを前研究期間に構成しましたが , その成果発表を行なうとともにその際に様々な情報収集と交換を行ないました(雑誌論文[1] , 学会発表[3, 17, 21, 22]) . また , 招待を受け当該研究のレビューを行なって新たな観察実験の成果も報告しました(雑誌論文[6] , 学会発表[4, 6, 10, 12, 15, 17, 21, 22]) . 特に本研究において研究分担者である鳴海孝之氏は形の科学会において奨励賞を受賞しています(その他[3]) . またメディアからも出演依頼を受けて自己組織化という視点から研究成果の紹介を行ないました(その他[1]) . 本エージェントベースモデルにおいては , ミツロウの異方的伸展は現在までに自発的には発生しておらず , 外部から何らかの力が働いてこれが生じると仮定しています . 異方性発生の起源を考察することが改めて重要であることが分かりました . 一方 , コームの異方的成長が領域形状に依存する可能性を成果発表時に指摘していただき , 円柱領域においても平板状のコームが形成されることを観察実験し論文にまとめています(雑誌論文[2]) .

〔雑誌論文〕(計7件)

- [1] T. Narumi, T. Akiyama, M. Kageyama, K. Uemichi, H. Honda, and K. Osaki, An agent-based modeling and simulation for the first stage of honeycomb construction, *Journal of Physics: Conference Series* 2207 (2022) 012013. doi:10.1088/1742-6596/2207/1/012013 (Mar 28, 2022), 査読有.
- [2] 秋山拓海・寺井大貴・陰山真矢・鳴海孝之・大崎浩一, 円柱状の巣箱におけるミツバチの営巣, *兵庫生物* 16, 1-4, (Dec 31, 2021), 査読有. <http://hyogobio.sakura.ne.jp/gakkai/wp-content/uploads/2024/04/160101-Akiyama.pdf>
- [3] Satoru Iwasaki, Koichi Osaki, and Atsushi Yagi, Asymptotic convergence of solutions for one-dimensional Keller-Segel equations, *Osaka University Knowledge Archive: OUKA*(Dec 11, 2020), 査読無. <https://hdl.handle.net/11094/77680>
- [4] E. Nakaguchi, K. Noda, K. Osaki and K. Uemichi, Global Attractor for a Two-Dimensional Chemotaxis System with Linear Degradation and Indirect Signal Production, *Jpn J. Ind. Appl. Math.*, 37(1) (2020), 49-80, (Online First: July 31, 2019), 査読有.
- [5] T. Aoki and K. Osaki, Bifurcations with Multi-Dimensional Kernel in a Chemotaxis-Growth System, *Scientiae Mathematicae Japonicae (SCMJ)* 82(2), 155-169 (Nov 01, 2019); online ver. e-2017-19, (Nov 20, 2017), 査読有.
- [6] 鳴海孝之・陰山真矢・上道賢太・本多久夫・大崎浩一, ミツバチの営巣初期過程に対するエージェントベースモデル, *昆虫と自然* 54(9), 35-37, (Aug 01, 2019). 査読無(招待寄稿).
- [7] K. Noda and K. Osaki, Global attractor and Lyapunov function for one-dimensional Deneubourg chemotaxis system, *Hiroshima Math. J.*, Vol.49 No.2, 251-271(July, 2019), 査読有.

〔学会発表〕(計22件)

- [1] 陰山真矢・秋山拓海・大崎浩一, 等方型ミツバチ営巣モデルと異方的パターンの形成, *数学と現象 in 山中湖*, 山梨, Feb 03, 2024.
- [2] 陰山真矢・秋山拓海・大崎浩一, 等方型ミツバチ営巣モデルに対する数値シミュレーション, *日本応用数理学会 環瀬戸内応用数理研究部会 第27回シンポジウム*, 岡山理科大学岡山キャンパス, Dec 23-24, 2023.
- [3] 鳴海孝之, ミツバチの巣作り: 数理モデルによるアプローチ, *ミツバチサミット2023 シンポジウム「関西ミツバチ大学〜つくばで知ろう! 学ぼう! 関西のミツバチ研究: 生理学から数学まで〜」*, つくば国際会議場, Nov 19, 2023. 【招待講演】
- [4] 小川 亮・鳴海孝之, ハニカム構造と数理モデル, *ミツバチサミット2023*, つくば国際会議場(茨城), Nov 18-20, 2023.
- [5] 陰山真矢・秋山拓海・大崎浩一, ミツバチ営巣の数理モデルと平行なコームの形成, *ミツバチサミット2023*, つくば国際会議場, Nov 18-20, 2023.
- [6] 松本泰明・森田善久・陰山真矢・大崎浩一, コロニー形成の数理モデル構成を目指して, *ミツバチサミット2023*, つくば国際会議場, Nov 18-20, 2023.
- [7] Atsushi Yagi, Takumi Akiyama, Maya Kageyama, and Koichi Osaki, Asymptotic Behavior of Solutions for Honeycomb Construction Model, *The Fifth Workshop on Interdisciplinary Sciences (WIS2023): a Satellite Meeting of the 10th International Congress on Industrial and Applied Mathematics (ICIAM 2023 Tokyo)*, Kyushu Univ., Ito Campus, Sep 14, 2023.
- [8] 陰山真矢・秋山拓海・大崎浩一, 等方的なミツバチ営巣モデルにおける解の異方的パターン形成, *第1回福知山数理・データサイエンス研究会*, 市民交流プラザふくちやま・京都, Aug 17-18, 2023.
- [9] Maya Kageyama, Takumi Akiyama, and Koichi Osaki, A PDE model for the first stage of honeycomb construction (poster), *OKO (Oxford, Kyoto, and Ohio universities) International Symposium 2023: Mathematical Biology from Genes to Cells to Humans*, Kyoto Univ., Aug 28-31, 2023.
- [10] 古井 啓裕・鳴海 孝之, Boid モデルにおける自己駆動力の役割, *西日本非線形科学研究会 2023*, KDDI 維新ホール(山口), July 15, 2023.
- [11] 陰山真矢, デイジーワールドモデルとミツバチ営巣モデルに対する解析と数値シミュレーション, *信州大学 数理科学談話会*, 長野, May 10, 2023.
- [12] 河合聡志・陰山真矢・大崎浩一, ミツバチ巣箱の音声クラスタリング: Sound Clustering for a Beehive, *SSI2022(計測自動制御学会 システム・情報部門 学術講演会, スペシャルセッション SS08: ODE や PDE に基づく大自由度系の解析と制御)*, 近畿大学, Nov 25-26, 2022.
- [13] 秋山拓海・陰山真矢・大崎浩一, ミツバチ巣の異方的成長に関する数理モデルの改良と解析: Modification and Analysis of a Mathematical Model for Anisotropic Growth of Honeycomb, *SSI2022(計測自動制御学会 システム・情報部門 学術講演会, スペシャルセッション SS08: ODE や PDE に基づく大自由度系の解析と制御)*, 近畿大学, Nov 25-26, 2022.
- [14] 秋山拓海・陰山真矢・大崎浩一, ミツバチ巣の異方的成長に関する数理モデルの改良と解

析: Modification and Analysis of a Mathematical Model for Anisotropic Growth of Honeycomb (poster), 数学・数理科学専攻若手研究者のための異分野・異業種研究交流会(日本数学会・日本応用数理学会主催), Online, Oct 29, 2022.

[15] 古井 啓裕, 鳴海 孝之, Boids モデルによる群れの形成とその軌跡, 西日本非線形科学研究会 2022, 九州大学 伊都キャンパス (福岡), July 09, 2022.

[16] 秋山拓海・大崎浩一, ミツバチ巣の異方的成長に関する数理モデルの改良と解析, 第7回数理生物学交流発表会(Online), Mar 11, 2022.

[17] Takayuki Narumi, Maya Kageyama, Kenta Uemichi, Hisao Honda, and Koichi Osaki, An Agent-Based Modeling and Simulation for the First Stage of Honeycomb Construction, XXXII IUPAP Conference on Computational Physics, online, Aug 04, 2021.

[18] 秋山拓海・大崎浩一, 数理モデルを用いたミツバチ巣の異方性発生メカニズムの解析, 西日本非線形科学研究会 2021 (Online), June 26, 2021.

[19] 秋山拓海・大崎浩一, 数理モデルを用いたミツバチ巣の発生メカニズムの解析, SCI-TECH Research Forum, Kwansei Gakuin Univ. (Online), Nov 21, 2020.

[20] 島川雄太郎・大崎浩一, Deneubourg 走化性系の解析と数値シミュレーション, 第12回サイエンスフェア in 兵庫, ニチイ学館・甲南大学ポートアイランドセンター, Jan 26, 2020.

[21] Takayuki Narumi, Kenta Uemichi, Hisao Honda and Koichi Osaki, An Agent-Based Model for Understanding Symmetric Alignment of Honeycomb, Symmetry: Art and Science -11th Congress and Exhibition, Kanazawa, Nov 26, 2019.

[22] 鳴海孝之・上道賢太・本多久夫・大崎浩一, ミツバチの営巣初期過程に見られる自己組織化, 第87回形の科学会シンポジウム「生物と医学にまつわる物理法則」, 東京慈恵会医科大学(東京都調布市), June 08, 2019.

〔その他〕(計3件)

[1] 鳴海孝之, 「自己組織化で建築される? ミツバチの巣: 自己組織化・無秩序な世界から秩序を生み出す不思議なプロセス」, ガリレオ X(BS フジ), (2023.07.09; 08:28-08:58 放映). YouTube 版: <https://www.youtube.com/watch?si=6DCQeoguFWNu0o0I&v=81InDx4R7Hs&feature=youtu.be>

[2] 大崎浩一, 「関学研究室から: 感染症の数理モデル -キホンのキ-」, 神戸新聞三田版(2021.05.09.掲載). Web 版: <https://www.kobe-np.co.jp/news/sanda/202105/0014309536.shtml>

[3] 鳴海孝之, 形の科学会奨励賞受賞, 形の科学会, June 08, 2019.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計7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 5件）

1. 著者名 T. Narumi, T. Akiyama, M. Kageyama, K. Uemichi, H. Honda, and K. Osaki	4. 巻 2207
2. 論文標題 An agent-based modeling and simulation for the first stage of honeycomb construction	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Journal of Physics: Conference Series	6. 最初と最後の頁 012013: 1-6
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1088/1742-6596/2207/1/012013	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 秋山拓海, 寺井大貴, 陰山真矢, 鳴海孝之, 大崎浩一	4. 巻 16
2. 論文標題 円柱状の巣箱におけるミツバチの営巣	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 兵庫生物	6. 最初と最後の頁 1-4
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 Etsushi Nakaguchi, Kanako Noda, Koichi Osaki and Kenta Uemichi	4. 巻 37
2. 論文標題 Global Attractor for a Two-Dimensional Chemotaxis System with Linear Degradation and Indirect Signal Production	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Jpn J. Ind. Appl. Math.	6. 最初と最後の頁 49-80
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1007/s13160-019-00376-0	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 T. Aoki and K. Osaki	4. 巻 82
2. 論文標題 Bifurcations with Multi-Dimensional Kernel in a Chemotaxis-Growth System	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Scientiae Mathematicae Japonicae (SCMJ)	6. 最初と最後の頁 155-169
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.32219/isms.82.2_155	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 鳴海孝之・陰山真矢・上道賢太・本多久夫・大崎浩一	4. 巻 54
2. 論文標題 ミツバチの営巣初期過程に対するエージェントベースモデル	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 昆虫と自然	6. 最初と最後の頁 35-37
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 -

1. 著者名 K. Noda and K. Osaki	4. 巻 49
2. 論文標題 Global attractor and Lyapunov function for one-dimensional Deneubourg chemotaxis system	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Hiroshima Math. J.	6. 最初と最後の頁 251-271
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 Satoru Iwasaki, Koichi Osaki, and Atsushi Yagi	4. 巻 -
2. 論文標題 Asymptotic convergence of solutions for one-dimensional Keller-Segel equations	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Osaka University Knowledge Archive: OUKA	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) 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27件 (うち招待講演 4件 / うち国際学会 5件)

1. 発表者名 秋山拓海・陰山真矢・大崎浩一
2. 発表標題 ミツバチ巣の異方的成長に関する数理モデルの改良と解析
3. 学会等名 数学・数理科学専攻若手研究者のための異分野・異業種研究交流会 (日本数学会・日本応用数理学会主催), Online
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 秋山拓海・陰山真矢・大崎浩一
2. 発表標題 ミツバチ巣の異方的成長に関する数理モデルの改良と解析
3. 学会等名 SSI2022(計測自動制御学会 システム・情報部門学術講演会2022)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 河合聡志・陰山真矢・大崎浩一
2. 発表標題 ミツバチ巣箱の音声クラスタリング
3. 学会等名 SSI2022(計測自動制御学会 システム・情報部門学術講演会2022)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 古井 啓裕, 鳴海 孝之
2. 発表標題 Boidsモデルによる群れの形成とその軌跡
3. 学会等名 西日本非線形科学研究会2022
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 秋山拓海, 大崎浩一
2. 発表標題 ミツバチ巣の異方的成長に関する数理モデルの改良と解析
3. 学会等名 第7回数理解生物学交流発表会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Takayuki Narumi, Maya Kageyama, Kenta Uemichi, Hisao Honda, and Koichi Osaki
2. 発表標題 An Agent-Based Modeling and Simulation for the First Stage of Honeycomb Construction
3. 学会等名 XXXII IUPAP Conference on Computational Physics (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 秋山拓海, 大崎浩一
2. 発表標題 数理モデルを用いたミツバチ巣の異方性発生メカニズムの解析
3. 学会等名 西日本非線形科学研究会2021
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 秋山拓海・大崎浩一
2. 発表標題 数理モデルを用いたミツバチ巣の発生メカニズムの解析
3. 学会等名 SCI-TECH Research Forum
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 鳥川雄太郎・大崎浩一
2. 発表標題 Deneubourg走化性系の解析と数値シミュレーション
3. 学会等名 第12回サイエンスフェアin兵庫
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Takayuki Narumi, Kenta Uemichi, Hisao Honda and Koichi Osaki
2. 発表標題 An Agent-Based Model for Understanding Symmetric Alignment of Honeycomb
3. 学会等名 Symmetry: Art and Science -11th Congress and Exhibition, Kanazawa (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 鳴海孝之・上道賢太・本多久夫・大崎浩一
2. 発表標題 ミツバチの営巣初期過程に見られる自己組織化
3. 学会等名 第87回形の科学会シンポジウム「生物と医学にまつわる物理法則」
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 陰山真矢・秋山拓海・大崎浩一
2. 発表標題 等方型ミツバチ営巣モデルと異方的パターンの形成
3. 学会等名 数学と現象 in 山中湖 (招待講演)
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 陰山真矢・秋山拓海・大崎浩一
2. 発表標題 等方型ミツバチ営巣モデルに対する数値シミュレーション
3. 学会等名 日本応用数理学会 環瀬戸内応用数理研究部会 第27回シンポジウム
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 鳴海孝之
2. 発表標題 ミツバチの巣作り：数理モデルによるアプローチ
3. 学会等名 ミツバチサミット2023シンポジウム「関西ミツバチ大学 - つくばで知ろう！学ぼう！関西のミツバチ研究：生理学から数学まで -」 (招待講演)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 小川 亮・鳴海孝之
2. 発表標題 ハニカム構造と数理モデル，
3. 学会等名 ミツバチサミット2023
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 陰山真矢・秋山拓海・大崎浩一
2. 発表標題 ミツバチ営巢の数理モデルと平行なコームの形成
3. 学会等名 ミツバチサミット2023
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 松本泰明・森田善久・陰山真矢・大崎浩一
2. 発表標題 コロニー形成の数理モデル構成を目指して
3. 学会等名 ミツバチサミット2023
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Atsushi Yagi , Takumi Akiyama, Maya Kageyama, and Koichi Osaki
2. 発表標題 Asymptotic Behavior of Solutions for Honeycomb Construction Model
3. 学会等名 The Fifth Workshop on Interdisciplinary Sciences (WIS2023): a Satellite Meeting of the 10th International Congress on Industrial and Applied Mathematics (ICIAM 2023 Tokyo) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 陰山真矢・秋山拓海・大崎浩一
2. 発表標題 等方的なミツバチ営巣モデルにおける解の異方的パターン形成
3. 学会等名 第1回福知山数理・データサイエンス研究会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Maya Kageyama, Takumi Akiyama, and Koichi Osaki
2. 発表標題 A PDE model for the first stage of honeycomb construction
3. 学会等名 OKO (Oxford, Kyoto, and Ohio universities) International Symposium 2023: Mathematical Biology from Genes to Cells to Humans (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 古井 啓裕・鳴海 孝之
2. 発表標題 Boidモデルにおける自己駆動力の役割
3. 学会等名 西日本非線形科学研究会2023
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 陰山真矢
2. 発表標題 ディジーワールドモデルとミツバチ営巣モデルに対する解析と数値シミュレーション
3. 学会等名 信州大学 数理科学談話会（招待講演）
4. 発表年 2023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	鳴海 孝之 (Narumi Takayuki) (50599644)	山口大学・大学院創成科学研究科・准教授 (15501)	
研究分担者	陰山 真矢 (Kageyama Maya) (80824060)	岡山理科大学・理学部・講師 (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
---------	---------