



# 2021年度 MIMS研究集会

## 現象と数理モデル

### ~数理モデリング学の形成に向けて~

2022年1月24日ー25日

ハイブリッド開催：明治大学中野キャンパス+Zoom

## 講演要旨集

## 研究集会趣旨

これまで現象数理学分野では、生物学や化学などの自然科学に限らず、医学・工学や社会科学など、現代社会の複雑な現象に対して数理モデルを用いて数値解析または数学解析を行うことで、その現象の理解を目指してきた。現象数理学において、数理モデルは現象と数学をつなぐ橋渡しのような存在であり、数理モデルの質が研究の結果や考察に大きく影響することから、現象を理解する上で最も重要な役割を担っていると考えられる。しかしながら、「数理モデル」という言葉は一人歩きし、統計学分野での数理モデルと微分方程式などで記述される決定論的数理モデルなどの違いやそれぞれの使い方を他分野の研究者が理解しづらい状況となっており、現時点では実験系・社会学系および数学の分野では数理モデリングを行う研究者の数は限られている。

本研究集会は、前回に引き続き、今一度、数理モデリングの心得を整理し、良い数理モデルとは何かを実験系と数学の両面から考え直し、学問として体系化する方法を考える。特に、今回は、各研究者が、自らの数理モデルに対する哲学を議論することで、数理モデリングの本質について議論する。

組織委員:

出原浩史(宮崎大学)

小田切健太(専修大学)

物部治徳(岡山大学)

田中吉太郎(はこだて未来大学)

中村和幸(明治大学)

岩本真裕子(同志社大学)

# プログラム (敬称略)

## 1月24日 (月)

- 9:50 オープニング
- 10:00 session1 (座長: 岩本)  
**出原浩史 (宮崎大学)**  
「数学からみた数理モデルあれこれ」  
**伊藤浩史(九州大学)**  
「概日リズムのゆらぎ」
- 11:30 お昼休憩
- 13:00 session2 (座長: 小田切)  
**西浦博(京都大学)**  
「オミクロン株の伝播と重症化の数理モデル」  
**中村和幸 (明治大学)**  
「時系列・時空間データの持つ不確実性とモデリング」
- 14:40 session3 (座長: 物部)  
**西森拓(明治大学)**  
「アリコロニーにおける労働補償性の数理モデル」  
**北畑裕之(千葉大学)**  
「自己駆動粒子の形状と運動の関係: モデリングを通じた理解」
- 16:30 session4 (座長: 物部)  
**本田直樹 (広島大学)**  
「Marrの3レベルに基づくデータ駆動生物学」

## 1月25日 (火)

- 10:00 session5 (座長: 出原)  
**岩本真裕子 (同志社大学)**  
「生物の感情・行動と数理モデル」  
**田中吉太郎(はこだて未来大学)**  
「パターン形成に関わる本質的な積分核のネットワークからの導出」
- 11:20 お昼休憩
- 13:00 session6 (座長: 田中)  
**井上雅世 (明治大学)**  
「ネットワーク上のダイナミクス解析」  
**物部治徳 (岡山大学)**  
「外来種の駆除に関連する数理モデルとその解析」
- 14:40 session7 (座長: 中村)  
**中野直人(京都大学)**  
「時系列埋め込みでモデリング~機械学習との関連」  
**小田切健太 (専修大学)**  
「細胞集団動態の数理モデリングと高精度計測データの活用に向けて」
- 16:10 クロージング

## 数学から見た数理モデルあれこれ

宮崎大学 出原浩史

最初の講演ということもあり、本研究集会の趣旨について説明する。本研究集会の世話人がこれまで複雑現象の解明のための数理モデルや数理モデリングについて議論してきた経緯があり、その経緯を簡単に紹介する。複雑現象の解明のための数理モデリングという観点では、数理モデリングを行う研究者それぞれが自身の「良い数理モデル」の尺度を持っていると考えられる。その尺度は研究者それぞれであり、統一したものはないと思われる。そのため、複雑現象の解明のために精力的に数理モデルを用いている研究者に講演していただき、数理モデリングの哲学について語ってもらう機会とする。本講演では現在の数理モデリング研究が抱える難しさなどについての問題提起をしたい。

## 概日時計のゆらぎ

九州大学芸術工学研究院 伊藤浩史

睡眠や葉の就眠運動など一定環境下において24時間周期で繰り返される生命現象を概日リズムと呼ぶ。シアノバクテリア細胞集団の概日リズムは低温下では振幅の低減が起こりHopf分岐によってリズムが消失する (Murayama 2018 PNAS)。この集団レベルの振幅低減が細胞レベルでは位相のばらつきによるものなのか、個々の振動子の振幅低減によるものなのかを調べるため、蛍光レポーターを用いた一細胞レベルの概日リズムのダイナミクスの観察を行った。その結果、振幅低減、位相のばらつき、細胞死、リズムの性質のばらつきなどがおこっていることがわかった。特に位相のばらつきの起源を調べるためにランダム外力を受ける位相振動子とその出力系からなる簡単な数理モデルを構築し、周期ゆらぎを解析的および数値的に求めた。その結果出力系のゆらぎが元の振動子のゆらぎより小さくなる可能性が示唆された。実験による検証が今後の課題である。こうした研究は「自然が数理モデルを模倣する」一つの例になっているだろう。

## オミクロン株の伝播と重症化の数理モデル

京都大学大学院医学研究科 西浦博

2021年11月後半に南アフリカ共和国でオミクロン株の流行が探知されて以降、瞬く間に世界中で同株の流行が発生した。日本もその例外でなく、デルタ株を素早く置き換えて2022年1月から流行した。本講演では、その置き換えの数理モデルが再生産方程式に基づいていることを示し、再生核の近似を利用するとGISAIDのようなゲノムサーベイランスで報告されている時系列での特定株の割合を記述できることを説明した。特に、その予測可能性が十分に高く置き換えタイミングがわかること、および、オミクロン株の亜種であるBA.2がどのようなスピードで更なる置き換えを起こしている、それに既存のオミクロン株に対してどれくらい伝播性の相対的増加を認めるのか、ということについて同様のモデルを用いた最近の知見を紹介した。

## 時系列・時空間データの持つ不確実性とモデリング

明治大学 中村和幸

本講演では、統計モデルを中心としたモデルにおけるモデリングのあり方について、特に時系列・時空間データのモデリングに注目して議論する。時系列・時空間データは、静的データとは異なり時間発展の要素が含まれることから、統計科学・データサイエンス分野でも特別な扱いが必要な場合が多い。また、時間発展する現象から得られるデータに対し、数理モデルや統計モデルを用いてモデリングや解析を行う場合、データのもつ不確実性の起源を正確に識別し、その影響度を検討することが重要である。また、得られたモデルの定量的な良さは、一般には予測精度により与える。講演では、このような点について議論を与えた上で、時系列データのみから潜在空間におけるダイナミクスを推論し予測可能なモデルを構築する枠組みについて紹介する。あわせて、最終的なモデリング原理としての予測の良さに加えて、赤池により理念として提案された納度についても議論する。

# アリコロニーにおける労働補償性の数理モデル

明治大学先端数理科学インスティテュート 西森拓 白石允梓 山中治

反応閾値モデルは、社会性昆虫のタスク分担や労働負荷の分散に関して、現象をよく記述する状態間遷移モデルとして知られてきた。ただし、反応閾値モデル自体には、外的刺激に対する各個体の応答性の分布(すなわち反応閾値の分布)についての示唆はなく、各研究者が知りたい状況に応じて反応閾値分布を仮定した上でモデルの解析や数値実験を行わざるを得なかった。とはいえ、反応閾値分布を実験で直接求めることは一般に難しい。今回我々は反応閾値モデルと等価なマスター方程式を導出し、コロオオアリの採餌実験で得た採餌活動度分布から反応閾値分布を導く手法を開発し以下のことを明らかにした。i)採餌刺激に関する反応閾値分布は、正規分布や一様分布と異なり、一部に偏った分布形状を示す。ii)コロニー内の採餌タスクは、ごく一部のワーカーによって担われている。

## 自己駆動粒子の形状と運動の関係：モデリングを通じた理解

千葉大学大学院理学研究院 北畑 裕之

樟脳など界面活性を持つ物質を粒子状にして水面に浮かべると、粒から水面に界面活性を持つ分子が溶け出して濃度場を形成する。この分子によって水面の表面張力が下げられるため、表面張力の場が形成されるとも考えられる。粒子には境界の法線方向に表面張力がはたらく。これにより、粒子が円形であっても、表面張力のバランスが崩れることによって、力やトルクがはたらき、水面上を動き回ることがある。界面活性を持つ分子の濃度場は、粒子の位置のみの関数として決まるわけではなく、これまでの運動の履歴に依存するため、粒子の位置と濃度場を独立変数とした力学系と考えられる。

この系において、粒子の形状に依存した運動様相について、粒子形状を円形からのフーリエモードの摂動で表される形状と仮定して議論した。その結果、2モードの形状の摂動を与えた場合、楕円に近い形状になるが、その短軸方向に動くことを示した。また、3モードの形状の場合には三角形に近い形状になるが、粒子サイズが小さければ頂点の向きに、大きければ辺の向きに動くことを明らかにした。さらには、これらの形状の対称性のみを反映させて、複数の粒子が固定された剛体であると考え同様の解析を行った。粒子2個、3個をつないだ場合に、円形から2モード、3モードのフーリエモードの摂動を加えた場合と定性的には同じ挙動がみられることを明らかにした。

講演ではこれらの解析の詳細を述べるとともに、実験系との対応、数理モデルを導出する際に用いた仮定、近似についても議論する。

## Marrの3レベルに基づくデータ駆動生物学

広島大学 統合生命科学研究科 本田直樹

理論神経科学者であるDavid Marrは、情報処理を行う生命体のシステムの理解には、「計算理論」・「表現とアルゴリズム」・「ハードウェアに実装」の3つのレベルがあると提唱した。本講演ではまず、Marrの3レベルを元にしたデータ駆動的モデリングについて議論し、その一例となる研究の紹介を行った。

近年、脳全体の神経回路構造を解明する大規模なプロジェクトが世界中で進行しており、ヒト、マウス、ショウジョウバエなどのコネクトームデータが高解像度で得られている。このコネクトームデータと遺伝子発現データを統合し、機械学習により解析することで、従来の数理モデリングでは扱うことのできなかつた複雑な軸索配線に潜むパターンを抽出する取り組みについての解説を行った。

## 生物の感情・行動と数理モデル

同志社大学 岩本真裕子

細胞性粘菌からアリやクモ、魚やイカ、鳥、そして人間に至るまで、さまざまな生物の群れの中では特徴的な振る舞いが見られる。特に人間やイカなどの比較的知性が高いと思われる生物では、思考や感情に基づいて局所的な個人の振る舞いのルールが決定されていることが多いように思われる。例えば、群れの中では、他の個体や壁にぶつかりたくない、一方で、群れからはぐれたくない、行きたい方向がある、相手の真似をしたい、周りの状況を見て全く異なる行動に出る、自分と同じ意見の人と繋がりたい、などである。

本講演では、これからの思考や感情に基づく個人の行動を記述した数理モデルをいくつか紹介するとともに、コウイカのボディパターンから感情を分析する方法について紹介する。さらに数理モデルを広めていくにあたって、考えたい事柄についても議論する。

# パターン形成に関わる本質的な積分核のネットワークからの導出

Effective nonlocal kernels on reaction–diffusion networks

はこだて未来大学 田中吉太郎

A new method to derive an essential integral kernel from any given reaction–diffusion network is proposed. Any network describing metabolites or signals with arbitrary many factors can be reduced to a single or a simpler system of integro-differential equations called “effective equation” including the reduced integral kernel (called “effective kernel”) in the convolution type. As one typical example, the Mexican hat shaped kernel is theoretically derived from two component activator-inhibitor systems. It is also shown that a three component system with quite different appearance from activator-inhibitor systems is reduced to an effective equation with the Mexican hat shaped kernel. It means that the two different systems have essentially the same effective equations and that they exhibit essentially the same spatial and temporal patterns. Moreover, we will introduce other applications for pattern formations with this method.

## ネットワーク上のダイナミクス解析

明治大学 井上雅世

複雑ネットワーク上の情報伝達プロセス（ダイナミクス）を、定量的に記述する手法について紹介する。例えば脳のように、複雑ネットワークにおいては、ネットワーク構造が既知の場合でも情報伝達の仕方には無限通りの可能性があるため、スタティックな構造の情報だけではネットワークをどのように使って情報を伝達しているかという機能面を理解することはできない。機能面の理解には情報伝達ダイナミクスを直接かつ定量的に解析することが必要である。本発表ではcovid-19感染者数データを例として、動的モード分解を用いた次元圧縮の解析結果と問題点、その解決を目指し取り組んだ改良点について報告する。また、現在抱える問題点についても共有し広く議論したい。



# 外来種の駆除に関連する数理モデルとその解析

岡山大学 物部治徳

本講演では、数理モデリングの考え方および外来種駆除に関する数理モデリング、その解析結果の一部を紹介する。数理モデリングに関しては、数学者の視点から数理モデリングのあり方や今後の取り組み方について発表を行う。

外来種駆除に関する数理モデルの話では、最初にFisher-KPP方程式や質量作用の法則に基づく単純なモデリングの方法の説明を行い、その後、特別なケースとして反応拡散方程式系の特異極限法(具体的には、急速反応極限法)を考え、縮約方程式として、ある自由境界問題が導出されることを紹介する。実は、この特異極限として現れる方程式はFisher-Stefanモデルと呼ばれており、三村-山田-四ツ谷(1986)やDu-Lin(2010)らによって異なる視点から数理モデルが考案されている。このことから、本講演で考えた外来種駆除の数理モデルは、Fisher-Stefan問題の異なる解釈を与えたことになる。

# 時系列埋め込みでモデリング～機械学習との関連

京都大学国際高等教育院 中野直人

時系列データの遅延座標埋め込みとは過去の時系列の履歴を含めた形でベクトル化する手法である。特に部分的な変数の観測データから力学系全体を再構成することを目的として用いられてきた。Takensの埋め込み定理やそれに続く研究が遅延座標埋め込みの数学的正当化を与え、その理論的な信頼性に基づいて支配法則が明瞭にはわからない観測データに対してその力学を推定する試みが様々な分野で見られることとなった。これはデータ駆動モデリングに他ならない。時系列解析手法としては、動的モード分解やKoopmanモードとの数理的な関係性が見出され、さらにReservoir Computingをはじめとする機械学習的手法との関連も報告されるなど、遅延座標埋め込みはさらなる広がりを見せている。本発表では時系列埋め込みを用いたモデリングについて、手法の適用の仕方や観測と埋め込みの理論的な構造など、発表者の最近の機械学習的手法の取り組みと合わせて報告したい。

# 細胞集団動態の数理モデリングと高精度計測データの活用に向けて

専修大学 小田切健太

近年、細胞が様々な機械的刺激（外力）を識別して応答することが分かり、その仕組みを生体内の様々な機能に利用していることが明らかにされつつある。培養した血管内皮細胞に直線状の傷を作り、伸展刺激を加えて創傷治癒過程を調べると、創傷修復のための細胞移動速度が大幅に増加して、伸展刺激を加えなかった場合と比べて創傷修復時間が短縮された。

本講演では、ATPやCa<sup>2+</sup>濃度のリアルタイムイメージングを基にして、細胞集団への機械的刺激によるATP放出とそれに伴うCa<sup>2+</sup>濃度変化、およびCa<sup>2+</sup>への応答による細胞集団の移動をあらわに考慮した創傷治癒の数理モデルとシミュレーション結果を紹介した。細胞集団のモデルとしてはCellular Potts Model (CPM)を用い、ATPおよびCa<sup>2+</sup>の濃度変化は反応拡散方程式で記述される。細胞成長や接触抑制の効果を組み入れることで、伸展刺激により放出されるATPがトリガーとなって創傷閉鎖が促進される結果を再現した。