

# 日本数理生物学会 ニュースレター

第100号

2023年5月





## 第8回数理生物学交流発表会

2023年3月10日(金)～11日(土) オンライン (zoom)

[https://wpp.shizuoka.ac.jp/kazunorisato/wp-content/uploads/sites/266/2023/03/8th\\_program20230310\\_0311.pdf](https://wpp.shizuoka.ac.jp/kazunorisato/wp-content/uploads/sites/266/2023/03/8th_program20230310_0311.pdf)

佐藤一憲\*

3年連続でのオンライン開催となってしまいました。この時期は、他の研究会や学部入試との関係で、日程調整がなかなかつかないことも一因です。しかし、ようやく対面での集会の開催が増えていますので、来年度はぜひ皆さんと現地でお会いできればと考えています。

2名の参加者から参加記を寄せていただきました。お名前の50音順に掲載させていただきます(学年や所属は発表会当時のものです)。このような発表会を通じて、参加者の皆さんは他大学の参加者の研究から大きな刺激を受けてくれていることを実感しています。

### ■ 竹澤 大樹 (静岡大学工学部数理システム工学科学部4年 佐藤研究室)

他大学の方々の研究発表を数多く聴講することが出来て、普段の学生生活では出会えなかった新しい発見をすることが出来ました。

それは、スライドの作り方や発表の仕方、研究テーマの選び方に大学の特色が出るということです。自分と同じ大学の学生とは若干異なる趣味嗜好が発表から溢れていて、他大学の学生の人間味を感じることが出来、楽しかったです。

この度私は『配送距離による物流拠点戦略について』というテーマで発表させて頂きました。学外で発表する機会が今までなかったので、参加する前は緊張していました。しかし発表を終えてみると、緊張の中での発表経験が、「研究者としての自分」を成長させてくれたと思います。質疑応答の時間では、異なる専門知識を持つ学生が集ったからこそ生まれた質問や指摘が、

\*静岡大学工学部

自分の研究に対する「新しい切り口」を与えてくれました。知的好奇心を掻き立てられる刺激的なイベントでした。

学生時代最後に心が躍る経験が出来て、良い思い出になりました。嬉しかったです。主催者の佐藤先生をはじめとする関係者の方々に厚く御礼申し上げます。

### ■ 八嶋 泰生 (東京海洋大学大学院海洋科学技術研究科 修士2年)

数理生物学交流会に参加させていただきありがとうございました。私は交流会に3回目の参加になりましたが、コロナ禍ということもあり学外で発表する機会が少ない中で、毎年このような自分の研究内容を発表したり、他の人の発表を聞く場を設けていただき、非常に貴重な経験になりました。

私は、「クサフグの毒量推定手法に関する数理的研究」という題目で発表させていただきました。私は数理モデルを用いてクサフグがどのようにして猛毒を獲得しているのかという研究を発表させていただきました。発表や質疑応答を通じて新たなアイデアや自分の中で気付かなかった点を知ることができ、このような多くの人の前で発表や質疑応答をした経験は大学院卒業後にも活かされていくと思います。学外の数理生物学を学んでいる同世代の学生の発表を聞き、自分と同じように数理モデルを生態学の研究に用いている人だけでなく、コロナウイルスなどの感染症研究や、ゲーム理論など幅広い分野で用いられていることなどを知ることができ、新たな知見を広げることができる良い機会になりました。

最後に、このような交流会を企画・開催していただいた佐藤一憲先生をはじめとする先生方に厚く御礼申し上げます。

## 【特集】

## 2022年度 卒業論文・修士論文・博士論文

## 卒業論文

## 松尾 光晟

九州大学理学部生物学科数理生物学研究室

**がんコロニーの複数化に及ぼす免疫系の効果：数理的  
研究**

がんは、現在日本において最重要の死因であり、約2人に1人が生涯に発症する。その原因や仕組みについて様々な研究が進められている。近年注目を浴びているのが、がん免疫の関係である。がんは、遺伝子の変異によって無秩序に増殖するようになるが、通常は免疫によって排除される。逆に、がんは、免疫を抑制することで対抗し、やがて免疫の攻撃をかいくぐって増殖するようになる。本卒業研究では、免疫ががんにどのような影響を及ぼすのかについて数理モデルを用いて議論した。まず、1つのがんコロニーのモデルにおいては、がんによる免疫抑制なしでは、コロニーは大きくなれないが、がんが免疫を抑制する力が大きくなると、突然に大きくなる非線形の変化を起こす。次に、がんが2つのコロニーをもつ状況を調べた。2つのコロニーの場所が近く、両者に共通する免疫の働きで抑制されるときには、2つが共に大きくなるか小さいままとなる。距離が離れてそれぞれを抑制する免疫があるときには、片方のコロニーが大きく他方は小さいという状況も現れる。その挙動は免疫細胞の移動によって強く影響される。以上から、がんコロニーが免疫を抑制するために、周りのコロニーの成長をもたらすことが示唆された。がんコロニーが同じ器官でもしくは転移した先で多数が急速に現れるのは、大きながんが免疫を抑制し、単独では成長できない他のコロニーの成長を促した結果の可能性がある。

## 修士論文

## 石森宥佑

北陸先端科学技術大学院大学 知識科学系 橋本研究室

**偽善的企業を抑制する市場に関する研究— 評判に着目  
した進化ゲームによるシミュレーション — 企業の経**

済活動とその社会的影響への関心が高まる中、企業のCSR声明とその活動が矛盾するような企業偽善と呼ばれる企業の非倫理的な活動が問題視される。本研究では、偽善的企業を抑止し偽善をしない誠実な企業が

適応的となる市場の条件を協力的行動の進化の文脈により明らかにする。見知らぬ他者への協力的行動を説明する間接互恵性を進化させる有効な概念として、評判による他者へのラベリングがある。評判概念の導入が偽善的企業の抑止に寄与しうるのかを、進化ゲームモデルを構築しシミュレーション実験により分析した。各企業は声明（社会的に良い声明を出すかどうか）と活動（社会的に良い活動を実施するかどうか）および利益率についての戦略をもつ。消費者は企業の評判に対する感度を持ち、企業の評判と製品価格をもとに購入する製品を選択し、その結果が両者の利得に反映される。企業と消費者の行動履歴が評判として蓄積し、高い利得を得ている主体の戦略が模倣により広がる場合に、どのような戦略をとる企業の頻度が増加するのかについてシミュレーションにより分析した。その結果、偽善的な企業が市場を占めると消費者の企業の評判への感度が高まり製品価格が上昇し、そこに誠実な企業が侵入し感度が低下することにより、誠実企業が定着できることがわかった。本研究の結果は、評判概念を導入して感度が高まることで協力的（被偽善的）市場が成立するのではなく、評判への感度が高い消費者が多いことが企業の偽善的な振る舞いを助長してしまうことを意味する。誠実な企業が進化するためには、企業の評判を重視するのではなく評判と製品の品質のバランスを重視する消費者が増加することの必要性を示唆している。

## 大金旦人

北海道大学理学院数学専攻

**運動を制御するための適切なフィードバックについて**

神経系は莫大な感覚情報の中から運動構築に運用される特に必要な感覚（感覚入力）を選んでいると考えられ、修士論文ではその数理的仕組みの体系化を目的とした。ここでは、運動構築を作用と状態によって捉えることし、主導原理として、

$$(\hat{\sigma}(t)H) > H \quad (1)$$

を考える。状態は、上半身のハミルトニアン  $H$  作用は作用素  $\hat{\sigma}(t)$  であるとし、感覚入力に依存したある演算子である。作用素  $\hat{\sigma}(t)$  は物理的には下半身による上半身への力学的な作用を意味している。すなわち式(1)は、左辺と右辺の関係性を満たす作用素を求める

方法を提示するものである。式(1)の妥当性は力学シミュレーションにより検証された。これらの考察により、運動構築は、力学的な作用を目標方向に変換できるように活用することであると理論的に理解される。

## 菱田温規

京都大学理学研究科

**反応ネットワークの構造変化が酵素による代謝調節システムに及ぼす影響の解析** 細胞内では数千の化学反応

が複雑な化学反応ネットワークを形成しており、これらのネットワークの振る舞いが細胞機能を実現している。細胞は酵素の発現量や活性を調節することでネットワークの振る舞いを調節している。ネットワークに対して「構造感度解析」を用いることで、ネットワーク制御におけるモジュール構造である部分構造、「緩衝構造」を発見することができる。本研究では、ネットワーク構造の改変が振る舞いの制御メカニズムに与える影響を、構造感度解析の観点から研究した。その結果、反応の追加による緩衝構造の変化が従う一般則を発見し、ネットワーク構造が振る舞いの調節メカニズムに与える影響を理論的に予測することが可能となった。

## 八嶋泰生

東京海洋大学大学院海洋科学技術研究科海洋管理政策学専攻資源解析学研究室  
**クサフグの毒量推定に関する手法の数理的研究 Mathematical Study of Methods for Estimating the Poisonous Content of Puffer Fish** クサフグの

TTX 獲得方法の中で TTX を多量に貯蔵する中間捕食者が果たす役割を明らかにし、毒量の推定手法の開発を目的として研究をおこなった。微量の TTX を貯蔵している餌生物と、TTX を多量に貯蔵する中間捕食者、餌生物と中間捕食者の両方を捕食する最上位捕食者を仮定し、捕食-被食モデル式と TTX 貯蔵量に関する式を構築した。その後、捕食圧を変化させたときの最上位捕食者の TTX 量の変化を調べた。その結果、TTX 量は餌生物への捕食圧を増加させると減少し、中間捕食者への捕食圧を増加させると増加する結果となり、クサフグは中間捕食者を多く捕食することで、より多くの TTX を獲得している可能性がある。

## 博士論文

## 我妻 奎太

新潟大学大学院 医歯学総合研究科 国際保健学分野

**Disentangling the relative role of nonpharmaceutical interventions and climate variability in driving transmission dynamics of respiratory virus infection in Japan (呼吸器ウイルス感染症の伝搬動態を駆動する環境及び行動因子の解明)** 感染症の伝搬動態を駆動する外的要因を明示的に識別

し、因果推論並びに確率的予測を行う洗練された数理統計モデルの定式化は、医学研究において極めて肝要であり、公衆衛生政策の策定に期する重要な基礎的証拠となり得る。歴史的には、理論疫学の枠組みで感染症の流行ダイナミクスを評価する取り組みが主流であるが、時空間階層モデルや時系列回帰モデルに代表される環境疫学の数理的理論を疾病動態の定式化へ応用を試みた研究は極めて稀である。本稿では、感染症疫学と環境疫学の双方の手法を融合し、日本で疾病負荷の高い呼吸器ウイルス感染症（新型コロナウイルス、インフルエンザ、RSウイルス）に焦点を当て、伝搬動態を規定する環境及び行動因子の解明を目指した。

## 柴崎 祥太

Department of Fundamental Microbiology, University of Lausanne

**微生物の群集機能を最適化するための二つの枠組み** 発

酵食品やアルコール飲料の生産、バイオテクノロジー、さらには健康など多くの場面で微生物は人類に利益をもたらす。このような利益の最適化において、個体数あるいは進化動態による障害は数多く報告されている。すなわち、時間と共に、微生物がもたらす利益の生産性が減少するという問題が生じる。この博士論文では、環境変動(第二章)及び階層的な空間構造(第四章)をもちいて微生物群集の機能を効率的に最適化する理論的な枠組みを示す。また、環境変動も空間構造も、種多様性や群集安定性などの生態学の基礎的な面に影響することが知られている。例えば、環境条件が悪化すると、微生物の個体数が減少して人口学的な揺らぎの効果が強まり、種多様性に最終的に影響を与える(第三章)。階層的な空間構造では、上流に位置する種は、下流の種に影響を与えることができる。特に、下流の種の個体数を大きくするような上流の種の影響は、下流の群集の安定化に寄与することが因果推論により示唆される(第五章)。これらの研究結果は、環境変動と空間構造の重要性を、応用及び基礎微生物生態学において示すものである。

# インタラクティブな場としての数理学・コミュニケーション試行

小島響子\*

## 1. はじめに

私は名古屋大学 異分野融合生物学研究室にて、サイエンスコミュニケーションを担当しています。約2年前の着任時に、このJSMB ニュースレターにて「サイエンスコミュニケーションとは何か」について考える寄稿を行いました。2年が経過して今振り返ると、コロナ禍とも被り「コミュニケーション」というものが見直されてきた期間だったと思います。今回は、そのような社会情勢下での約2年間の数理生物学に関する広報活動を振り返り、数理生物学研究を発信する上で課題について記していこうと思います。

## 2. 数理生物学研究を社会に発信する方法

私の属する「異分野融合生物学研究室」では、次世代教育の観点から、非科学的なコミュニティ、特に若者にリーチすることを目標の一つにしており、教育機関の広報としても大きな目標だと考えています。しかし、その場合、プレスリリースを通じた新聞掲載や、ウェブサイトに掲載するといった従来の方法だけでは効果が見込めません。情報を得る手段は多様化し、特に若年層ほどSNSや動画コンテンツ類を日常的に使用しているからです。そこで、当研究室においては、発信の多様化とコンテンツの拡充に取り組んでいます。例えば、普段の研究室としての活動内容や最新研究の発信・セミナーなどの案内などは、Twitter を中心に行っています。また、Apple Podcasts や Spotifyなどを媒体としたPodcastでは、「異分野融合」をテーマにしたサイエンスに関わる先生方へのインタビューを配信し、研究者のお人柄や考え方にフォーカスしたライトな内容を発信しています。そして、数理生物学の難しいイメージを噛み砕き、学生向けに発信する目的では、VTuberを利用したYouTubeコンテンツを発信することにしました。こうした取り組みはまだ改善と拡充の途中ではありますが、現在、数理科学研究の広報を行う上で、2つの課題があると感じています。ひとつは「言語の翻訳」、もうひとつは「ステークホルダーマネジメント」です。

## 3. 言語の翻訳

昨年度の秋に、第二回未来社会創造事業シンポジウム「社会課題は数理学で解決できる!?-企業課題と数理研究をつなぐ-」が、名古屋大学にて開催されました。企業とアカデミアをつなぐためのチップスを話し合うパネルディスカッションがあり、企業の人も多く参加されていました。現場の声からは、「臨床医学と数学は使う言葉が違う」という意見や、チームメイトとの意思疎通がまず難しいと感じる、という感想など、「齟齬」に関するリアルな意見がたくさん出ていました。こうした当事者間の問題意識から、数理の世界と、社会、現場、産業界をどのように繋いでいくのか、を率直に議論する必要性や、その課題が「共通言語の咀嚼」にあることも確認されました。これは、対企業に限らず、より大きな母体となる一般の人、特に、学生や若年層といった当研究室の広報対象との間でも似通った壁があると思います。すなわち、数理科学の分野自体が、アカデミックな世界としての線引きが強くあり、その言語的障壁とコミュニケーションの不足から、難解でわかりづらいイメージがあるということです。この「言語」の違いを解消する一つの手段として、可視化と専門用語を噛み砕くことが必要だと考えています。まとめると、「言語の翻訳」とは、数理科学の世界で「当たり前」として共有されていることが、非科学的なコミュニティにとってはそうではない可能性があることを前提に、専門用語をはじめとする言葉や概念を咀嚼し、擦り合わせていくことを示しています。「翻訳」は、言語的な言い換えだけでなく、切り口の再設定やデザインなども含まれます。例えば私自身の業務の中では、対象層を呼び込むためのセミナーのフライヤーを作成する時に、数理科学のモチーフと、一般的な関連イメージを連想させるようなデザインを心がけています。また、Podcastでは、気になるトピックを非専門家の立場から率直に伺い、トピックも研究者という「人」が見えるような切り口を設定しています。こうした翻訳の精度と効果を高めていくことが自身の目標の一つです。

中でも、今回取り上げたい取り組みとして、VTuberを利用した「数理研究の視覚化」があります。数理研究を実際にわかりやすく表現する際に難しいことの

\*名古屋大学

一つに、実験分野などと比較して視覚的な表現が難しいということが挙げられます。数理的な言語は専門外の人にとって難解な中、情報的な敷居の高さにつながっていると感じます。これに対して試みているアプローチが、動画にして数式の内容を可視化する配信です。当研究室の研究は、数理モデルとコンピュータシミュレーションを駆使しており、例えばコロナ禍では、COVID-19 患者の体内のウイルス動態を解析したり、ウイルス量のシミュレーションを行っています。このモデルや解析結果を、可視的に・感覚的に再現するために、動画内では多くの翻訳を行なっています。数式や専門用語をむやみに使用しないで噛み砕いた表現するといった、わかりやすい「言語翻訳」はもちろん、対象層にとってどういった点で関係する研究であるのかといった、共通性を意識してもらえようなストーリーの翻訳をしています。動画の対象層としては、若年層、特に科学に興味があるけれど知識などはあまりない段階の中高～大学生ですが、現在感染症研究の社会的興味が高いことを考えて、特に専門外の一般人にとってもとつきやすい内容を目指し、試行錯誤しています。

以下、該当チャンネルです。率直なご意見ご感想をいただけますとありがたいです。<https://www.youtube.com/channel/UCcClooks4fW5f3G6AgCgO9Q>



#### 4. 対象層とのステークホルダーマネジメント

先に紹介した未来社会創造事業シンポジウムでは、日本では他の先進国と比べ、産学連携の歩みが遅れている現状についても指摘されていました。産学連携では、互いにどのような役割を担い、関係性を構築するかの模索が必要だとされていました。これはよく「ステークホルダーマネジメント」と呼ばれますが、サイエンスコミュニケーションの文脈で考えると、独りよがりの発信ではなく、相互に有益なより良い関係を築くことを意味していると思います。プレスリリースの関係者とのコミュニケーションや、ターゲットオーディエンスとのオープンなコミュニティの構築もまた、このステークホルダーマネジメントに入ってくると言えます。しかし、学術機関に属するVTuberの取り組みが、どこまで関係構築という意味でインタラクティブになれるかは考える必要があり、今後の課題でもあ

ります。

#### 5. まとめ

対面で行われる、人対人の従来のコミュニケーションから、ここ数年の中でオンラインでのコミュニケーションに置き換わったものがいくつかありました。リモートワークの導入、面接や音楽イベント・飲み会などのオンライン化から始まり、メタバースを利用した就活説明会や大学院説明会など、コミュニケーションの範囲が拡張し、自身のアバターを利用したバーチャルな世界を実際に体験する人も増えました。KDDI株式会社が昨年度に行った、YouTubeをはじめとした動画配信サービスの利用についてのアンケート1では、コロナ禍で動画配信サービスの利用率が上がっていることがわかります。さらに、「コロナ禍以降（2020年1月以降）興味関心を持つようになったコンテンツについて、また実際に利用したものを教えてください。」という問いに対し、10代・20代・30代を中心に「自由視点の映像」「マルチアングル映像」「バーチャル空間」などへの関心・普及が広がっていることが明らかにされています。メタバースの話題性の高まりもあり、「VR映像」については、30代の29.0%が興味関心を持ち、実際に利用したという回答が21.0%になっています。今後、AIやメタバース等の技術発展と浸透で、コミュニケーションがさらに変質していく中で、従来の学術広報はどう変化に対応していけるのでしょうか。バーチャル化が必ずしもオープンコミュニケーションを可能にするとも限らず、そのコンテンツ次第ではオンライン上でいわゆる「閉じコン」になることもあると思います。異分野やリアルワールドとの風穴を常に開けながら、アカデミアの一般社会に対する閉鎖性を解す取り組みをしていきたいです。古代ギリシア時代以降、数学がこれまで技術革新とともに科学分野と融合し、数理科学が発展してきたという意味では、数理科学という分野自体が、数学と他の科学のいわば「インタラクティブな場」でした。このような性質を持つ数理科学が、今後社会の中でもインタラクティブな場となりさまざまなアクターと融合していくことは、分野自体の発展にも繋がっていくと思います。数理科学のサイエンスコミュニケーションは、まだ私自身勉強中の身ではありますが、今後も試行錯誤していきたいです。ご指導ご鞭撻のほど、よろしく願いいたします。

#### 参考文献

- [1] 「コロナ禍以降 10代は39.0%が“動画配信サービスの利用”が「増えた」、 “音楽配信サービスの利用”は10-30代が顕著に増加する結果に。」(PR TIMES, 20220912) <https://prtimes.jp/main/html/rd/p/000000784.000034485.html>

【科学史対談～外から見た数理生物学～】

## 第4回 数理・データ・実装につながる科学への展望

語り手：李聖林<sup>\*</sup>，聞き手：有賀 暢迪<sup>†</sup>

### 企画趣旨

数理生物学ニュースレターの企画として対談企画を2022年2月号から始めております。これまで対談企画はありましたが、今回の対談ではインタビュー対象となる先生方の経験を残しておきたい，“数理生物学とは何か”について改めて考えるきっかけにしたいという2つの意図を持って企画しました。そのため、本企画では学会員ではなく、科学史を専門とする一橋大学言語社会研究科の有賀暢迪先生に聞き手をお願いしました。有賀先生を聞き手として迎えることにより、この対談が数理生物学を客観的な視点から捉えるきっかけになることを期待しています。研究成果を社会的に還元するという命題の比重が増えて、定性的な結果だけでなく定量的な結果を求められることも増えてきました。特に、数理生物学会の中でもmodel drivenな研究報告のみならずdata drivenな研究報告も多くなってきていると感じます。その流れの中で、対談をする先生方の経験や考え方を伺うことが学会員の皆様の今後の研究活動の糧になるのではないかと企画いたしました。対談企画の第4弾は、数理生物学をベースとして皮膚疾患への応用や細胞・発生の数理モデルに関する多様な研究分野でのご活躍されている京都大学の李聖林先生にお話を伺いました(2022年10月7日にオンラインで実施)。

### 対談

#### 数理科学への興味と実験科学への接近

**有賀：**それでは李聖林先生にお話を伺います。先生が初めて数理生物学とであったところから実験系との融合研究を見据えるまでになった経緯を伺えますでしょうか。

**李：**私は高校の頃から数学は好きでした。ただ、記号自体に具体的な現象論的意味を見出すことが難しく、自分の中では行き詰った感じがありました。理解しているようで理解していないので理解するために自分の中で何かイメージを作ろうとしていましたがすごく難しく、自分の中ですっきりしないまま大学に入って、4年間を過ごしましたがすっきりしていないままです

<sup>\*</sup>京都大学

<sup>†</sup>一橋大学



図1 写真：李聖林先生に質問をされる有賀先生

た。韓国にいるときは数理生物学という学問が存在することを知りませんでした。その後、4年間の専業主婦の期間を挟んで日本で数理生物学という学問を聞くようになりました。その間、自分の中で勉強を続けたい、という気持ちはありましたが、人生思う通りに行かないのが普通で、現実的には勉強ができない状況でした。その時、たまたま重定南奈子先生の「侵入と伝播の数理生態学」という本を見つけました。その時まで自分の中では数学と生物は、全く異なる分野で接することのない学問分野だと思っていましたので、一つの言葉なっていることが本当に不思議でした。高校のときは数式の記号で具体的なイメージがつかなかったものが重定南奈子先生の本を読んだとき、数式が全部現象に置き換わって、まるで数式が生きているように感じました。それに、私は数学で偏微分方程式をやってきたので重定南奈子先生の本はまさに反応拡散系の動物の移動・拡散でちょうど分野もあてはまった感じでした。この本を読んだ瞬間に私は数理生物学をやりたいと思い、それが私が数理生物学に進んだきっかけです。その後、旦那が岡山大学に就職したので、岡山大学を第一希望にしました。でするので、やりたい事ははっきりしていましたが岡山大学には自分がやりたい学問をされている先生は正直言うといませんでした。そこで、環境科学研究科のホームページを見て数理生物学会の会員と記載のあった先生の所を志望しました。

**有賀：**すると修士の頃は、自分のやりたい数理生物学はほとんど独学だったのですか。



図2 写真：2009年、最初のOxford滞在時の李聖林先生

**李:** まさにそういう感じで、修士の頃は数理生物学会関連のミーティング、学会、セミナーに参加して、そこから学んでいきました。ですが、独学でやろうとすると自分の知識の延長戦になってしまいました。最初に論文を書いたころは数学の定理、証明が入っていたりして、数理モデリングをやりたいけれども独学では十分に学べないという感覚がありました。ですが、そこで大学を移ることは家族が離れて暮らすことになるため考えられませんでした。最終的に家族と一緒に暮らして数理生物学を学ぶためにはどうすればよいかを考えた結果、家族を連れて海外に一緒に暮らせばいいんじゃないかという発想にいきつきました。それからは、旦那に大型研究費をとってもらうために努力してもらい、自分はDC1をとると1年半は海外に行ってもいいという条件があるのでDC1をとることを目標にしました。その結果、Oxford大学に1年限定で留学をすることになりました。そこで、ある意味本物の数理生物学を学んだことになりました。今から思い返すと、Oxfordに行かなかったら数理生物学の変な研究者になったか、研究者になれなかったかもしれないと思うぐらいOxfordの1年間の経験はすごく貴重な経験でした。

**有賀:** 私は数理生物学のことがよくわからないのですが、Oxfordを留学先として選択した理由は何かあったのですか。

**李:** 数理生物学のバイブルのような本で、MurrayのMathematical Biologyがあります。その本の著者がOxford大学であったことがきっかけです。そこでOxford大学を調べたらPhilip Maini先生がみえる数理生物学センターが出てきました。次にやったことはMaini先生にメールを送ることです。まずは興味があることを伝えて、日本での学術振興会の研究員が取れたら1年ぐらいOxfordに行きたいと打診しました。そこで、Maini先生は見ず知らずの学生からのメールにも丁寧に返信してくださった結果、1年ぐらいOxfordに行くことになりました。これは裏話ですが、Maini

先生は偉い先生なので忙しくて面倒を見てくれないのではないかなと思っていました。ちょうど、Oxfordに行く3か月前にエジンバラでヨーロッパの数理生物学会がありました。その時に3日間ぐらい大学によってもよいか打診していました。その時、タイミングよくビジターとしてたまたま韓国人の先生がOxford大学に滞在されていたので、Oxford大学にどんな先生がいますかと伺ったらGaffneyという若い先生がいて、賢くていい人だよと教えてもらいました。いろいろとGaffney先生の論文を調べたうえでGaffney先生にスーパーバイザーをお願いすることにしました。若い分ディスカッションできる時間がたくさんあるだろう、と感じたためです。それがきっかけでGaffney先生を自分のスーパーバイザーにつけてほしいとMaini先生にメールをしたら快く受け入れてくれました。その後は直接話をして、何がしたいのか、興味があることに関する話をして共同研究が始まったという経緯です。

**有賀:** 先ほど、Oxfordに行かなければ基礎ができていなかったのではないかと、という話が出たかと思いますが、実際に行ってみてMathematical Biologyの基礎ができていなかったと思われましたか？

**李:** 感じました。モデリングの研究をすることや数理生物学の研究をすることは数理科学という工場を使って、研究として構築して進めるかが非常に重要になりますが、その流れはどんな本を見ても書かれていません。Oxfordで私はスーパーバイザーのGaffney先生と週1回1時間だけ定期的なミーティングを持ちました。毎週Gaffney先生と議論をし、彼から次はこういうことを調べてきて、という話をして、次回までにその方向線で研究を進める、という形でした。その時は、自分の意見を挟むとかいうよりは、ひたすら相手の意見を聞き研究を進めるという感じでした。ですが、そうしたことを繰り返していきながら1年間で論文を3報書きあげました。3報書くとも基礎が固まっていてDiscussionの時間も短くなるし、自分から提案するやり取りもできるようになっていきました。ですので、そう考えるとそれまでは基礎ができておらずOxfordに行っても議論をすることで基礎が固まった実感はありました。

**有賀:** 今の話は研究のやり方を教えてもらうことに関して、一番理想的なやり方だと思いました。特に、最初の基礎をするとき、自分の言いたいことややりたい仕事を横に置いて、やり方を叩き込まれた方が生産的だろうと思います。他方で、自分自身の興味や、本当はこういうことやりたいことはなかったのですか？

**李:** アイディアを思いついてGaffney先生に提案したりすることはやっていました。その提案での議論も良い教育になりました。今では、学生たちに、「うちは数理研究をやっているけど、必ず研究の軸を生物に立てないと変な研究になるよ」と言っています。です

が、Oxfordに行ったとき、私はまだ数学に軸がありました。よく、数理研究者が間違いやすいところは、数学が軸になってしまうことです。そこを、間違えてしまうと数理設計などツールをどこに使うかばかりを考えてしまいます。ただ、数理生物学の本質がどこにあるかを考えると、やはり、新しい生物学を数理によって生み出すところ、にあるので軸を生物におかないと研究の価値・意味を見失ってしまいます。私がOxfordにいた時に新しいことを思いついてGaffney先生に話をしたときに、Gaffney先生は生物学的なコンテンツは何なのか尋ねられて何も答えられませんでした。そこで、生物学的なコンテンツはないかもしれないけど数理的に面白くないか、と言いつつ、彼は生物学的なコンテンツがはっきりしない研究はやってもいい研究にならないので、やらない方がいいよといわれたこともありました。

**有賀:** 今のお話で大事なことは、生物学や数理科学では何が問題になっているかということはかなり広く知っていることが重要になると思います。この中で、色んな研究を知るといふか色んな研究を見る情報の収集の仕方をOxfordに滞在中に教え込まれたということですか。

**李:** 生物学の知識が浅かったので、数理生物学をやるときに方向性が定まりませんでした。Oxfordの人と研究をしながら、生物学の知識と世の中の流れを読むことってすごく大事だなって感じました。研究をしながら、自分の中の生物学の知識や考え方が蓄積されると同時に共同研究者と議論をしながら生物学的にこの考え方は普通ではなくて、別のものが重要になるという知識を次々に取り入れることができました。Oxfordの滞在中に、先端にいるなど感じたのは、その時代に融合研究が始まる波がきていることを実感したことでした。世界の実験系の人々は数理研究者に会うためにどこに行けばいいのかわかると言われた時にやはりOxfordの数理生物センターっていうのがブランドで、皆さんがわかりやすい場所になっていました。そこは実験家の方も出張しており、私もそこでいろんな実験家の人とも会うことができました。日本ではその当時、まだ数理生物学でメジャーな分野は生態系で、細胞とか生命科学に近い分野はまだマイナーな感じでした。でも、Oxfordで1年過ごしてみると、将来は生命科学の時代になるかもしれないという予感を感じました。自分は日本で生態系の問題を取り扱っていましたが、Oxfordでは生命系の問題を中心にやっていました。その後、Oxfordの留学が終わって研究者として生き残るためには自分の色を付ける必要性について考えていました。私は生態系の問題もすごく面白いと思っていてそれもやり続けたかったし、生命科学の問題もすごく面白く感じていました。しかし、両方やっていくと自分の色がどっちなのかわからなくなると思ったので、一つに

絞る必要があると考えていました。そのときに、これからは生命科学の時代になるかなと思い、生命科学に絞りました。

**有賀:** そうすると、帰国後の博士課程や学振のポストドクではOxfordのやり方で生命科学的な問題に取り組んでいく方向を基本的として研究をされてきたのですか。

**李:** それがそうではありませんでした。帰国して、日本で披露しようと思って議論したら、日本人には受け入れられないと思いました。国によって、アカデミックの視点というか文化の違いがあると感じました。わかりやすく言えば、日本のアカデミックはオタクが好きですよ。だから、研究の独自性をものすごく評価する雰囲気があります。だからOxfordで一先懸命研究して、論文いっぱい書いて発表しても返ってくるリアクションが薄い感じでした。言葉にはされませんが、面白けれど、それはあなたの研究ですか、Oxfordの研究じゃないの、という空気感を覚えることがありました。Oxfordに行き基礎を学んで、そこからずっとOxfordと共同研究を続けたら自分は日本では見てもらえないじゃないかと考えてOxfordとの共同研究を一時的に中断する決断をしました。そこで、日本の数理生物学でどういう学問が受け入れられるか、を見回していたら日本で定量生物学があがってきていました。だから、実験系のデータを使うような研究が、この先の流れになるのではないかと感じました。そこで、学振PDをとったので、柴田達夫さん<sup>1)</sup>に連絡をして学振PDの受け入れ先をお願いをしました。理化学研究所の多細胞システム形成研究センター(CDB)に入ったことで、異分野融合研究を始める出発点、基礎が始まりました。そこで、その次に考えたのは日本で生き残るためには自分なりの自分の研究を貫かないといけないことだというのがありましたので、ひたすらそれを考えていました。

**有賀:** 正直にいうと、最初予想していたことよりも遥かにいろんな意味で面白いです。今の話に絡むかもしれませんがOxfordから帰国されて学振をやられていた頃ですが、生命系に関する話題を数理的に研究されている方たちは日本国内では他にいらっしゃいましたか。

**李:** 望月敦さんや小林徹也さんの他、東大の方で既にやっていた方がいました。

これも、日本の独特な文化だと思いますが、数理生物学という学問が生まれたときに、欧米では真っ先に数学がそれを認めて受け入れました。数学の一部の新しい学問として数理生物学を認めて、数理生物学を専

<sup>1)</sup>2010年頃理化学研究所の多細胞システム形成研究センター: CDBで理論家として初めて研究室代表:PIになった

門とする人がすべて、数学科に所属している感じです。ですが、日本で数理生物学やっている方で数学科にいる方は多くありません。日本の流れとしては、京大の物理系の先生方が数理生物学を始められた第1世代でそこからお弟子さんが生まれた感じです。その影響で日本の数理生物学で生命科学をやっている方も結構いたと思いますが、皆さんバックグラウンドが物理などで数学ではありませんでした。一方で、私はやはり数学系の出身なので自分のベースはやはり数学系に置こうと思いました。ですが、数学のベースで自分がやりたい生命科学の数理モデリングをやっている研究者を日本で見つけようとしたらいなかったという理由でもOxfordの留学という選択肢につながりました。

### 数理科学と実験科学の融合

**有賀:** 数理科学と実験科学の融合ということに絡んで、2022年に李聖林先生が応用数理に「生命科学における応用数理の変革」というタイトルの文章を書いています。その中で、今は生物の実験と数量を融合した研究がすごく普通になっているという話をされています。これに関して、最近の研究でというのがその数理と実験の融合であるのか具体的な例から伺っていいかなと思います。

**李:** 2021年から在籍している京都大学のヒト生物学高等研究拠点(ASHBi)は、数学者がマイナーで実験系がメジャーな研究所で、共同研究が気軽にできる場所です。これまで、実験系との共同研究はやってきましたがどちらかというと、数理モデルの研究者が実験系のドアをたたいて共同研究をさせてもらうような感じでした。その時は、研究者としていろんな経験を積むことができ、コミュニケーションのとり方や研究の引っ張り方のような融合研究を進めるうえで必要なコツをつかむことができました。

私の中で、融合研究の形は少なくとも2つに分類することができると考えています。一つは、実験家が新しいことを発見して事実の裏づけをするためのツールが必要であるときに、数理モデルを使って裏付け作業をする形です。もう一つは、実験系の研究者が全く思いつかないことを数理モデルから発見をして、仮説として提案し、実験研究者に実験をやってもらいその事実の裏付け作業をしてもらうという、もう一つのパターンがあると思います。私の融合研究のこだわりはどちらかというと後者になります。生命現象を説明するために使う数理科学ではなく、生物学者が気づいてない、新しい生物学を生み出す数理をやりたい、というのが自分の軸としてあります。一般的に実験系との融合研究についても同じで、基本的には彼らが全く気づいてないメカニズムを、数理モデルを構築し新しい概念を提示することで数理モデルが予測したメカニズムに注目してもらうことを目指す研究をしています。



図3 写真：数理系と実験系の融合研究に関するお話をされる李聖林先生

**有賀:** 今の二つのタイプに関して、発見的な意味での数理の役割をおっしゃったと思います。最近の数理生物学の研究者で、発見的なことを重視している研究者は多いと感じますか。

**李:** どちらかというと説明に軸をとる数理研究が多いいかな、というのが私の印象です。数理で驚くことが見つかって、それを実験系の研究者に持っていったら実験系の研究者は面白いと思うかもしれません。ですが、そもそも実験ができるかどうか、実験系の研究者にとっては問題になります。もし、できたとしてもエネルギーと時間をかけて、本当に期待したような結果がでるか確証がない状況になってしまいます。その意味で、数理はあくまでも数理なのでその結果から人を動かすことは非常に難しいです。なので、数理をメインに持っていく研究スタンスを保つことはすごく難しいですね。ですから、融合研究のプロジェクトが走り出すとき、私は実験家が1ミリも動いてくれないような最悪の場合も想定して、必ず理論だけで閉じる論文が書けるような道筋を戦略的にとるようにしています。そこで、実験家が動いてくれたらすごく意味のある、インパクトのある結果になります。理想としてはそのように持っていく方向に努力するけど、理論で閉じてしまう結果になる場合もあります。私の経験でも成功した場合と、失敗した場合の両方があります。ドアを何度も叩いて、結局反応してくれなかった場合も結構ありましたし、その中でいくつかの研究がうまくいったって感じですね。

**有賀:** そうすると、研究の興味は、数理で閉じることがあまり面白くないと思っただけという感じですか。

**李:** 面白くないということではありません。自分の中では面白く感じていましたし、その研究の価値は十分ありますが、数理だけで閉じる研究は今の世の中ではあまり脚光を浴びなくなっています。誤解を恐れずに言えば評価されにくい状況があります。そうい

う意味もあって、できるだけ実験まで融合してそれを守っていききたいという気持ちもあります。あと、やはり数理研究で閉じてしまうと、「数理の仮説だね」と言われて終わってしまうことが研究者としては悔しいです。今では数理研究は生命科学の発展に重要な役割を果たしているという認識が共通認識として、広まっていると思います。ですが、私が生命科学の数理生物学を始めた頃は、数理生物学者は数学者からは数学ではないと言われ、生物学者からは生物学ではないと言われてきたことにコンプレックスを持っている世代だと感じています。

**有賀:** 少し意地悪な質問になるかもしれませんが、生命科学を解明するために数理である必要はありますか。例えば、物理は物理現象を解明する学問ですし、社会科学でも社会現象を明らかにする学問だと思います。その中で、結果的にその生物を選ばれている理由はありますか。

**李:** 実は高校のとき生物は大嫌いでした。なので、今の生命科学が好きな自分が不思議だと思っています。やはり、きっかけは本当に重定先生の本との出会いの感動が全てですね。それで、数理生物で生命現象をやってみると、どんどん不思議でたまらなくなりました。脳も持っていない、思考することもできない細胞が秩序のある複雑な世界を作り出す仕組みを数理的な観点から見ると、とても面白いと感じます。私が反応拡散方程式を好きな理由もここにありますが、反応と拡散という二つのシンプルな仕組みで、ものすごく複雑な模様が生成されることにすごく魅力的に感じています。

**有賀:** 反応拡散系という言葉が出てきましたが、生命現象に対して数理モデル的にアプローチするときアプローチは何通りもあると思います。その中で、これが自分のやり方だというような得意な手法はありますか。

**李:** 反応拡散系で表現できるものは得意ということになります。ただ、やはりさきほども言ったように、数理生物学は生物学に軸を立てないと意味のないものになる可能性があるため、全ての現象を自分が得意とするツールで全部当てはめることは、まずあり得ませんし、できないこともあります。だから、現象を見てみると、これは反応拡散系の現象だ、とか違う手法を適用した方がいいとか自分で見分けがつくようになります。そうなると、その違う手法が専門じゃないと手をつけられないみたいなこともあります。ですが、京都大学に移って、グループを大きく形成できる環境になり、私と全然違うことを専門にしてきた若手をラボに受け入れられる環境になりました。そうすることで、研究の対象と幅が以前よりも広くなりました。

**有賀:** 経験や勘でこのモデルがいけるかいけないかという判断ができるのですか。



図4 写真：楽しそうに質問をされる有賀先生

**李:** まず、自分が得意とするメソッドでいける問題はすぐ目に入ってくるので今の自分には見つけやすいです。一方、これは自分のメソッドではなくて違うメソッドだな、というのは現象が明らかにしてくれることもあります。とはいっても、新しい視点を入れて従来手法では解決できない問題を解決できるのではないかと、という少し冒険的な考えも持っています。

**有賀:** 具体的に研究された話で今の話をもう少し深く聞いていきたいと思います。蕁麻疹の研究をされていたかと思いますが、個人的に面白いと感じました。面白いと思うと同時にこのテーマをそもそもやろうと思ったきっかけやどのように数学的にいける、と思われたのか伺えますでしょうか。

**李:** 多分期待する答えとは全く違う答えが出てくると思います。まず、その研究を始めたきっかけは広島大学で助教としていた時でした。広島大学病院の皮膚科の先生が蕁麻疹の湿疹の模様はチューリングパターンじゃないかっていう話を、ある会議で私のことを知っている理学研究科の研究科長<sup>1)</sup>に相談したようです。チューリングパターン形成が有名すぎるあまり、反応拡散系の研究をやっている研究者は全員チューリングパターンを研究していると誤解されることは良くあることです。そこで、研究科長から私にメールで医学部の皮膚科の先生がチューリングパターンに興味があるから会ってほしいと連絡があって、広島大学病院に行って、その先生に会いに行きました。しかし、見せてもらったのは患者さんの皮膚の湿疹の写真ばかりでした。まず、蕁麻疹の写真をみた時に感じたことは、こんな不規則な模様はチューリングパターンではないという確信でした。一方で、生物学的に知られているメカニズムは何ですかと聞くと、ほとんど分かっていない、と言われました。特に蕁麻疹はヒト特有の病気であるのでその皮疹の模様は動く模様になっているのでお医者さんも説明するための時系列のデータがありませんでした<sup>2)</sup>。3時間の議論の後、広島大学病院から広島駅

<sup>1)</sup>化学の先生

<sup>2)</sup>蕁麻疹の模様は動くため診察時の止まった模様しか把

まで戻るバスが大体20分～25分ですが、バスの後ろに座って頭真っ白な状態で1～2時間を感じたことをいまだに覚えています。生物学的なベースの情報が全くない、しかもチューリングパターンでもない変な模様の写真しかない状況で数理モデルの構築は完全に無理な状況でした。そこで、考えの転換を起しました。そして、自分の研究室に戻って自分がやっていた研究プロジェクトを全て後回しにして、蕁麻疹の数理モデルの作成に入りました。まず生物学的なベースの情報が一切ない状況であれば、とりあえずこの模様を再生できるエッセンシャルな数理モデルを作り、基本的な仕組みを提案をしようと考えを切り替えました。通常の数理モデリングの手法は、少なくとも基本的なデータがあり、このデータをもとに構築して現象を説明する方向に動きますが、蕁麻疹の研究は現象を見て数理モデルを通じてファクターを逆推定しようとする方向で研究を進める真逆の考え方の研究でした。

**有賀:** どのくらいで結果が出ましたか。

**李:** 自分は今まで色々な反応拡散系のモデルをやってきましたので、その知識がすごく生かされました。まず、今までの反応拡散系のどんなモデルを当てはめてもこの模様はできないことは確実でした。だから、それらを全て候補から除外させることはできました。その後は、もう本当に頭の中でのイメージですよ。こういう現象を再現したいということで、一つずつ組み立ていきました。組みあがったらシミュレーションを回して違うなと感じたら修正することを繰り返して、2～3ヶ月ぐらいたったときに、患者さんの模様にそっくりなものが一応できました。それを医学部の先生に見せたら、先生が「蕁麻疹だ」とおっしゃるので、それでできたって思いました。ですが、最初作ったモデルは2種系でした。なぜかという、反応拡散系では1種系では解が安定ではないので、定常状態のパターンは現れません。その数学的な基礎知識があったので、私もとりあえず模様を生成するためには少なくとも2種系以上必要だって考えていました。だけど、共同研究者の医学部の先生が、数式が複雑すぎて理解できないから、2つの式を1つにできないとか言うのです。そのとき、白い巨塔<sup>1)</sup>の影響もあったため、医学部の先生に気圧されて、「わかりました、頑張ります」、って普通に言ってしまいました。研究室に戻って、ずっと式を眺めていたら、この式は一つにシンプルファイしても実際の解のダイナミクスは変わらずに保ち、違う式として表現できることに逆に気づけま

握できない。

<sup>1)</sup> 白い巨塔は山崎豊子の長編小説で1963年9月15日号から1965年6月13日号までサンデー毎日に連載された医局制度の問題点や医学界の腐敗を追求した社会は小説である。1966年の映画化以来何度か映像化された。



図5 写真: 蕁麻疹の研究に関する話をされる李聖林先生

した。それで、モデルがさらにシンプルになって1行で書けるようになり、蕁麻疹のモデルができました。

**有賀:** 次の段階としてその式が一体何を意味しているかを解釈する必要があるかと思いますが、そちらの展開は何かありましたか。

**李:** ここでoxfordでの基礎が役に立ちました。つまり、単にモデルを立てることが目的ではなくて、モデルを構築する段階で基本的な式が生物学的意味を持つようにしました。蕁麻疹について調べたら、ヒスタミンという物質が一番医学系では注目されるような物質であることがわかりました。ですので、モデル自体をヒスタミンの濃度で表していました。ヒスタミンの濃度で表したので、モデル自体がヒスタミンがどのような相互作用をするものかを表現するものになっています。実はそのモデルを作ったときに、医学部の先生がびっくりしたのはヒスタミンの抑制効果が入っていたことでした。空間的な模様を作るためには、ポジティブフィードバックがあるところでネガティブな抑制が同時にバランスをとるようにモデルを作らないと空間的な模様は生成されないという考えが直感的にありました。ですので、私のモデルはバスフィードバックにネガティブフィードバックを組み合わせた形になっています。ネガティブフィードバックが、初期は強く効いてあとはあんまり効かない過程を表現して、その過程が重要になっています。蕁麻疹が様々な模様を生成するっていうところには、おそらくヒスタミンのネガティブフィードバックの影響が主に関わっているかもしれないということをお話しました。そうしたら、今まで医学系の常識では病気が発症するのは、犯人となる物質がポジティブフィードバックでどんどん濃度が高くなるのが常識だったので、ネガティブフィードバックが重要という考えは、臨床医学の先生方の常識を覆すものになっていたので数理研究者としては意味のあるいい仕事したと思いました。

**有賀:** パターンから出発して、中身がわからないのにモデリングをするケースは多いのでしょうか少ない

のでしょうか。

李: すごく珍しいと思います。空間模様を生成するモデルを作ることは基本的に難しいので、だから、ほとんどの数理モデルは、既に数学的にこういうような条件を満たせばパターンができる条件に合わせた式を組み合わせたことが一般的です。しかしながら、この蕁麻疹の模様はその条件をすべて満たしません。だから、私の経験から、今まで知られている構造では表せない模様だということだけは、逆にヒントになり、それを生み出したものなので、ここは正直言うと数理生物学のパターン形成の人間としては自慢ができます。

編集部: 別の研究で、空き家問題を取り上げた研究があると思います。社会的には空き家問題がそれをどうして認識したのか、そちらに関してどのように数理モデルを構築したのかについて伺えますでしょうか。

李: まず、着想に至ったのはNHKの年末スペシャルで日本の30年後をやっていて、3件に1つが空き家になる、ということを知ってショックを受けたことがきっかけです。番組の後に移動しながら、社会問題を数理モデリングする、というのは発想的にないと思いました。そこで、こういう社会問題を数理で捉えることを数理モデル化したら面白いかな、という着想を得ました。でも、社会現象をどういう数学ツールで結びつけていいのかという点で学問のベースが存在しないから2年ぐらい頭の片隅に入れておきました。その時に、九大の佐竹さんが集中講義に来てくださって、カナダの森の話をしていただきました。その話を伺っていたときに、急に私の中で森が空き家に代わって10分後にモデルが構築できました。

社会問題も開拓されていない数理生物学の分野であり、開拓する余地が大きくあると思います。実はその辺もすごくやりたいと思いますがまだ手を付けられていません。今回コロナの感染症によって数理科学がいかに社会科学に繋がっていくかという、ことが明らかになったと思います。今回のCOVIDでは感染者数とか感染症だけに注目した数理研究でした。ですが結局ずっと問題として横たっていたのは社会との両立をどうするかって話だと思います。そういうことを考えると社会を全部取りこんだ数理モデル化は今後必要だと思います。

有賀: 広島大学時代で他に、実験系とか臨床系の方とかと研究したりとかそういうのは他にもありますか。

李: 落合さん<sup>1)</sup>という遺伝子の研究をしている若手の研究者と共同研究をしました。実はその研究も数理的に面白いことを見つけたので、それで論文投稿したら、おそらく実験系のレフェリーが「This is not biology」という一言でリジェクトしてきました。それで腹が立ち毎日文句ばかり言っていました。そして

ら、落合さんから、聖林さんは何を実験で示したら面白いと思いますか、と聞かれて、私が実験で示せたらよいと思うことを伝えたらやってみようということになりました。その時の結果は、実験系の研究者にとってはインパクトが強い結果でした。遺伝子の研究やられている方は分子生物学なので、細かいところをよくみています。各細胞核に含まれる遺伝子(クロマチン)が空間的にどこに位置するかは遺伝子発現や最後の機能決定に重要ですが、空間的に激しく変化する現象があります。その現象に私が提唱したのが、細胞の核の変形がクロマチンの空間的再配置の現象を促している、ということでした。ですが、生物学やっている人はミクロの世界ばかり見ているからかそんな発想は思いつかないし、面白いと言ってくれるけど、信じてくれませんでした。数理的にそのように言えるだけで、検証では本当にそうかなという感じでした。検証ができるかという問いがきっかけで、実験で実際にそれができるとことを示しましたが、すごいリジェクトをくいました。批判が、実験が信じられない、だからもっと細かい実験やあり得ない実験を全部やりなさい、という実験系のレフェリーのコメントが返ってきました。その論文は最終的にどちらかというと理論系がメインのジャーナルに投稿しましたが内容はうけていました。

### 融合研究の発展と今後の展望

有賀: Oxford大にもう1回留学をした理由は研究の流れをもう1回キャッチアップしたいというモチベーションで行かれたってことですか。

李: 1番目の目的は日本から離れて研究するためという目的で、行き先を再びOxfordにした理由はストレスが溜まるらな一番居心地がいい所がOxfordであったことと、土地勘があり、定着のための時間を最短にして研究に集中できること、10年前に行ったときから変わらずOxfordの数理生物学研究所は最先端の情報が集まる場所であることでした。自分は子供を抱えているなどに出張ができないので、世界の数理生物学の情報が集まる場所に自分がいたら、その情報が全て集まり新しい情報を入れられるな、と思ったのでOxfordに行きました。Oxfordに行くことで数理生物の流れを感じることができて、帰国後に京都大学に移ることになったのでタイミング的にもよかったですと感じています。

有賀: 2つ質問があります。一つは10年前と直近で行かれたときと向こうの状況は10年で変わったと思いますか。もう一つは、分野というか数理生物学の動向として、10年前と今回で新しくこういうことが変わったと感じられたことがありますか。

李: 10年前に行ったときはまだ組織が小さかったですよね。中に教員が3人いるような組織でしたが、この10年間でテニユアの教員が7人の大きな組織なっ

<sup>1)</sup>現在は、九州大学の教授。

ていたことが大きく変わったことです。行ったときに感じられたのは、データ科学との融合が既に始まっていた。数理生物学は現象論的に数式を立ててサイエンスを論じるような学問ですが、データサイエンスに関してはそのデータをどう扱うかどう解釈するかということですごく成長してきた学問だと思います。生命科学の分野でも以前は取れなかった実験データを取れる時代になってきました。実験のテクニックが発展してきて、その溢れている情報をどう解釈するかというデータサイエンスから解釈された結果をどう構造的に数理モデリングに持って行って生命科学の全体を見ようとするかという学問の構築の流れがこの先増えていくのかなと感じました。2019年に行ったときは既にそれを感じて、日本に戻ったら私もそのような研究で道筋を立てて進めていかないといけないなど考えていました。それが日本に戻って、京都大学に移ったら、まさに最先端のデータサイエンスをやっているグループがいて、インタラクションがインタラクティブにできています。そういう意味では自分が見たものを、実行できる環境ができたのでOxfordの訪問は得られたものが大きかったと思います。もう一つの違いは、私が10年前行ったときは学生の立場でした。ですが、研究者の立場になって行ったときは、日本、イギリス、世界の研究機関と連携を結んで進めることが自分がやるべきことなのかなと考えました。そういう意味で、ちょうどアメリカからサバティカルできた研究者が1人いて、たまたま私の訪問時期と重なって仲良くなり連携を結ぶ事ができた点もよかったです。

**有賀:** 数理モデルでのアプローチは見ているものが割と大きなものが研究の特徴になっていると感じたのですがいかがでしょうか。

**李:** まさにそうですね。数理モデル研究もいろいろありますが、私はターゲットとして、現象や、その物が持つ物の形、ある意味、目に見える視覚情報を生かしたいという気持ちが強くあります。その視覚情報から全く見えないところのミクロレベルの情報を結びつけることができたら、人間は視覚情報でその背景に今何が起きているかということがわかるだろうというのが研究の軸になっています。蕁麻疹の研究はそれで発展してきています。皮膚は人間の最大の臓器で、皮膚病は目に見える湿疹が必ず皮膚の表面に現れるという一番わかりやすい病気でもあります。ですから、生体の中で何が起きているか全く見えないけれども、数理モデルを使って皮疹の状態から生体内を推定できる研究を目指していきたいと思っています。

**有賀:** 私はデータのシミュレーションの歴史をかじったことがあります。コンピュータでシミュレーションをする時に、一つの側面として数式として解くことはできないけどシミュレーションの中では計算ができる

ということがあります。だけど、それだけではなくシミュレーションの結果の画像というビジュアルを提示することで強いインパクトがあるように見られることが大いにあると思っています。それが徐々にできるようになってきたことからシミュレーションっていう方法がかなり強くなってきていると、私は感じています。私は昔ながらの数理生態学にあるロトカ・ボルテラ方程式で結果のグラフィック表示にそんなに重要性があるのかは若干疑問があります。一方で、お話を伺っているとシミュレーション結果を図示ということが重要ではないかと私は感じましたが、いかがでしょうか。

**李:** はい、まさにそういうことになると思います。だから私の今の研究の方針が成り立っているのも、昔は目に見えなかったものも全部イメージングして見えるようになってきているからだだと思います。見えるデータを生かそうというのが一つのスタンスになっています。だから、パソコンの技術が発展してこなかったら、この研究自体も成立していないものだし数理生物学研究自体、数値計算が発達しなかったらそもそも成り立ってない学問だと思います。

**有賀:** 応用数理の巻頭言<sup>1)</sup>で「現象・理論・実装」と「生物実験・データ科学・数理科学」の3位一体の研究という言い方をされていると思います。これは、私も今後の展開が楽しみだなと思っています。その一方で、そのデータ科学の発展があり、他方でその実験が増えてきたときに数理系の研究者に求められることややることも変わってくるのではないかな、と思っています。今ご自分が考えていることや今後もっとこういうふうにならぬ研究者になるのではないかなという点について思うところを伺いたいのですがいかがでしょうか。

**李:** やはり、データ科学は発展しています。数理やモデリング手法も今までだったら実験データを用いて数理モデルを構築して現象を見ますという流れになっていると思います。ですが、データの見方という手法面でデータ科学と数理モデリングの融合ができる可能性があるのではないかなと思います。だから、この先の数理モデリング研究は、実際にデータを取って、実際にこれを使えるかどうか医学なら医学の治療に結びつけられるかどうかって本当に実装可能かどうかという手前まで来ている感じがします。だから、昔のように現象論的にこういう可能性がりますよ、と閉じる研究ではなくて、実際のデータを用いて、そのデータと数理科学を繋げて、もう明日でも実装に結びつけていくことがこの先重要になってくると思います。データ、データ科学、数理科学、あと最後の実装ですねある意味、工学って言ってもいいかもしれないです。そういう感じで学問が一本化されて、この先に進めていけないといけないし、そういう方向性で加速するだろ

<sup>1)</sup> 応用数理, 32(2), 2022

うし進んでいくと個人的には思います。

**有賀:** 数理生物学を学び始めた人たちに向けて、数理モデルのこういうところが研究をしていて、面白いと思いますということを伺いたいと思います。

**李:** やはり、実験系の人を驚かせるところが魅力です。実験系の人たちが全然思いつかない、想像がつかないところを数理モデルの研究でつかんで、こうではないですか、っていったときの彼らの驚きを見るのが楽しいですね。だから、数学、数理研究って重要だよということを伝えたいと思います。

**有賀:** 本日はありがとうございました。

**李:** ありがとうございました。

**【李聖林先生略歴】**

2000年 韓国 釜山国立大学数学科卒業  
 2002年 韓国 釜山国立大学大学院数学科卒業  
 2008年 岡山大学大学院環境学研究科修士課程修了  
 2008年 日本学術振興会特別研究員 DC1  
 (2008年4月～2010年3月)  
 2008年 イギリス Oxford 大学・数理生物学センター  
 留学(2008年11月～2009年9月)  
 2010年 岡山大学大学院環境学研究科博士課程  
 早期修了  
 2010年 日本学術振興会特別研究員 PD  
 東京大学大学院数理科学研究科  
 理化学研究所 CDB  
 広島大学大学院理学研究科  
 (2010年4月～2014年3月)  
 2014年 4月 広島大学大学院理学研究科・助教  
 2016年 JST さきがけ研究員  
 (兼任:2016年10月～2020年3月)  
 2017年 広島大学大学院理学研究科・准教授  
 2020年 広島大学大学院統合生命科学研究科・教授  
 2021年 京都大学高等研究院・教授  
 現在に至る

## 【科学史対談～外から見た数理生物学～】

## 第5回 物理科学を通してみてきた数理生物学

語り手：時田恵一郎<sup>\*</sup>, 聞き手：有賀 暢迪<sup>†</sup>

## 企画趣旨

数理生物学ニュースレターの企画として対談企画を2022年2月号から始めております。これまで対談企画はありましたが、今回の対談ではインタビュー対象となる先生方の経験を残しておきたい、“数理生物学とは何か”について改めて考えるきっかけにしたいという2つの意図を持って企画しました。そのため、本企画では学会員ではなく、科学史を専門とする一橋大学言語社会研究科の有賀暢迪先生に聞き手をお願いしました。有賀先生を聞き手として迎えることにより、この対談が数理生物学を客観的な視点から捉えるきっかけになることを期待しています。研究成果を社会的に還元するという命題の比重が増えて、定性的な結果だけでなく定量的な結果を求められることも増えてきました。特に、数理生物学会の中でもmodel drivenな研究報告のみならずdata drivenな研究報告も多くなってきていると感じます。その流れの中で、対談をする先生方の経験や考え方を伺うことが学会員の皆様の今後の研究活動の糧になるのではないかと企画いたしました。第5弾の対談企画は、複雑系科学を通じて様々な手法を用いて生態学、社会システム等々新しい研究領域を開拓し要とされている名古屋大学の時田恵一郎先生にお話を伺いました(2022年12月13日にオンラインで実施)。

## 対談

## 始まりの物理科学

**有賀:** 本日は名古屋大学の時田恵一郎先生にお話を伺いたいと思います。初めに時田先生の研究の経歴などを伺っていききたいと思います。時田先生は早稲田大学の理工学部応用物理学科を卒業されているということですが、元々物理に興味があったのでしょうか？

**時田:** 元々は人工知能とか脳科学に興味があったのですが、物理の成績が一番良かったので物理学科に行くことにしました。ですので、初めから物理が一番好きという感じではなかったですね。ある日同級生に誘われて非線形力学とかカオスを研究していた相沢洋二先生の研究室訪問に行きました。そこで、ニューラ



図1 写真：インタビューをする有賀先生

ルネットワークとか脳のシステムを数理モデルで扱えるという話を聞いて、物理学科でも元々興味があった脳科学のようなことが出来るのだと思いました。しかも次の日にちょうどセミナーに来られた津田一郎さんという脳の研究をされている方の話を聞いたらめっちゃ面白くて、それで相沢先生の研究室に行って神経回路を卒論でやろうと思ったんです。そこから修士論文まではニューラルネットワークの研究をしていました。

**有賀:** その研究室では人工知能の先駆けのようなことを主に研究されていたのですか？

**時田:** 全然違うんです。相沢研でニューラルネットの研究を始めたのは私が最初でした。相沢先生は元々カオスの研究をされていた人で、Prigogine<sup>1)</sup>の研究室にも留学されていたりした方なのでメインはカオス理論です。ただ、応用物理学科には大照先生と言って機械学習の研究をされている先生のような工学系のラボも結構あって、応用物理の学科ですが理論物理の先生と工学系の先生と半々くらいの感じでした。

**有賀:** 工学系のラボもあったという事ですが、先生ご自身の卒業研究は理論的な研究だったのですか？

<sup>\*</sup>名古屋大学<sup>†</sup>一橋大学

<sup>1)</sup>イリヤ・プリゴジン (Ilya Prigogine, 1917年1月25日 - 2003年5月28日)。ロシア出身のベルギーの化学者・物理学者。非平衡熱力学の研究で知られ、散逸構造の理論で1977年のノーベル化学賞を受賞した。



図 2 写真：インタビューを受ける時田先生

**時田:** 理論とシミュレーションの両方です。ニューラルネットワークがどんなふうに学習していくかを研究していました。今から思えばすごくちょっとした話ですけど、でも相沢先生にも面白いアイデアを沢山いただいていた面白い研究ができたかなと思っています。

**有賀:** シミュレーションも行われていたとのことですが、当時の大学のコンピューター環境はどのような感じのものでしたか。

**時田:** 私が学部に入ったときはPC-9800<sup>1)</sup>というパソコンが売られ始めた頃で、頑張ってバイトして買い、PCを買ってからはプログラミングのバイトをずっとしていました。色々なシステム開発のひ孫請けみたいなことをやっている企業でバイトしていたので、そういう意味ではパソコンは初期の頃からずっと触り続けています。それと、当時ワークステーションが大学に入っていました。ワークステーションが大学にあるのは、当時としてはすごく画期的で、恐らく当時は東大にも入ってなかったのではないかな。ネットワークでちゃんと繋がったワークステーションが1台研究室に置かれていました。ただOSがUNIXで、UNIXとか誰も触ったことがないから使える人が全然いませんでした。私は当時バイトでUNIXも使っていたので独占させてもらって、セルオートマトンのプログラムを書いたり色々なシミュレーションを動かしたりして遊んでいましたね。ディスプレイも当時としてはすごく大きくて高解像度のディスプレイが入っていましたね。

**有賀:** その後博士課程に進学してからは早稲田から東大に移られたと思いますが、東大ではどういった研究室に所属されていましたか？

**時田:** 金子邦彦先生と言ってカオス複雑系が専門で、複雑系の研究会を主宰していた先生の研究室に移りました。修士学生の頃に相沢先生に連れて行ってもらったカオスやファジー関係の国際会議で金子先生の講演を聞いた時にめちゃくちゃ面白いことやっているなど

思いました。それで私がM2のときに金子先生が助教授に昇任されて学生を指導することができるようになったので移りました。

**有賀:** そうすると金子先生の最初の学生ということになるのですね。金子先生の研究室ではどのような研究をしたのですか。

**時田:** 博士課程でもニューラルネットワークの研究をしていました。最初は津田さんが研究されていたカオス-ニューラルネットワーク関連の研究をやるのかなと思っていましたが、あとで(2021年)ノーベル物理学賞を受賞することになるスピングラスの理論をニューラルネットワークに応用するという、統計力学のマニアックな話を博士課程では研究していました。

**有賀:** その研究テーマ自体は国内で他に研究している方はいなかったのでしょうか。

**時田:** そんなことはなくて、それこそ80年代からニューラルネットワークのブーム、第2次AIブームというのが起こっていました。特にイスラエルの有名な理論物理学者たちが連想記憶ニューラルネットワークは実は統計力学で解けますという論文を出しました。それで、多くの物理学者がニューラルネットワークの研究に参入してきた時代でした。物理学会にもニューラルネットワークというセッションができたぐらいに流行っていました。

**編集部:** 流行ということに関して数理生物学でも流行がありここ10年ぐらいの間でも出てきているのかなと思います。流行に関してはどう思われますか。面白いものに群がるのは良いのですが、数理生物の中で本質的な軸となるものがあつた方がいいのかなとも思いますが、時田先生はいかがお考えでしょうか。

**時田:** そうですね。最近も物理屋が、COVID-19のモデルなんて簡単だからみんなバンバンシミュレーションして論文を大量に書いているじゃないですか。ああいうのを見るとちょっといい加減にしろよとは確かに思いますね。あと、ニューラルネットに対する理論的な研究では日本には甘利先生というヒーローがいましたが、甘利先生の先駆的な研究が当時は世界中に知れ渡るといった感じにならなかったんです。再発見的な結果を欧米の人たちが持っていったところがあって、だからすごく難しいけど、やっぱり研究者の興味に基づいてやるしかないのかなとは思いますが、でも、にわかサッカーファンみたいなだけだとやっぱり駄目なので、やはり阪神ファンみたいなのがいる必要は絶対にあると思います。

**編集部:** 物理学者が多く参入してきたというお話ですが、カオスや複雑系の背景にある物理現象はどのようなものだったのでしょうか？

**時田:** 元々は三体問題というものが100年以上前からありました。そういう自由度が大きくなると単純な周期解以外の何か謎の現象が起こるということを物理

<sup>1)</sup>NEC (日本電気、現在はNEC パーソナルコンピュータに分社) が1982年から2003年まで日本市場向けに販売していたパーソナルコンピュータ。98 (きゅーはち) やPC-98 などと呼称されることもある。

学者はおぼろげながら感じてはいました。その中で、60年代70年代ぐらいに自由度が2, 3程度の単純な式からカオスが出てくるといふ事が色々な分野で同時多発的に見つかりました。そこで Philip Anderson というノーベル物理学賞を受賞した統計物理学者と経済学者が組んで、世の中で起こっている複雑な現象の背後には実はカオスを含め色々な数理的に共通の背景があるのではないかということを出してサンタフェ研究所が設立されました。その研究所に色々な分野の人が集まって研究が始まりました。金子先生もサンタフェ研究所に滞在されたことがあり、生物でも見られる複雑な現象もその背後には実はカオスを生み出すようなシンプルな原理があるのではないかと考えていました。そのような考えが世界中にも広がって今に至るという感じですかね。

**有賀:** そうすると時田先生としては、物理学の中でやっているという意識だったのでしょうか。

**時田:** そうですね。複雑系研究会は、京都大学の基礎物理学研究所<sup>1)</sup>が旅費などのサポートも含めて運営をしていました。日本では特に物理学者が中心に複雑系の研究をしていたので物理学の中で研究しているという意識でした。

**有賀:** という事は東大での所属も物理教室の中という事になるのでしょうか。

**時田:** そこは違いました。金子研は駒場の旧教養学部にありました。金子先生自身は東大の理学部の物理の研究室出身ですが、非平衡統計力学という新しい分野に興味があったみたいで、それでアメリカに留学しましたが帰国したときには駒場に着任されました。

**有賀:** なるほどわかりました。次に博士号を取られた後のことについてお聞きしたいのですが、94年に大阪大学理学部に助手として着任されて、後にサイバーメディアセンターに移られていますけどどういった経緯で移られたのでしょうか。

**時田:** 最初は理学部物理学科の物性理論の研究室の助手をやっていました。サイバーメディアセンターは共同利用機関と言ってスパコンを学外の人にも利用してもらおうといった組織ですが、全学の情報教育を担うためにその組織の研究室を増やそうという話が出てきました。そのとき、理学部物理から人員を出すことになりました。当時私は物理学科で研究室のサーバーの管理をしていたので、サイバーメディアセンターに移っても楽しいよね、みたいなことを言われました。それで当時一緒にタンパク質の研究をしていた助教授の菊池誠先生(現サイバーメディアセンター教授)と2人で移ることになりました。私は正直全貌がわかっていなくて、助手のままサイバーに移ると思っていま



図3 写真: 楽しそうに質問をする有賀先生

した。ただ年度初めに辞令を受け取りに行ったら「今日から助教授」って言われて、しかも理学部物理学科の授業もやらないといけなくなりました。私は助手のままだろうからやることは変わらないだろうと思っていたのに超伝導の無茶苦茶難しい理論の講義を泣きながら準備したことを覚えています。

**有賀:** それは大変でしたね。今のお話の中で菊池先生と一緒にタンパク質の研究をしていたというお話がありましたが、早稲田や東大のときは基本的にずっとニューラルネットワークの研究をされていて、阪大に行かれてから新しいテーマで研究をされたという事でしょうか。

**時田:** そうですね。東大にいたときも金子先生といろいろと話をしてゲーム理論の話や生物のシミュレーションなどもやっていましたが、結局物にならなくて論文も書かずに阪大に移っちゃいました。タンパク質の話も東大にいた頃から研究していて学会発表もしていましたが結局論文にできませんでした。ですが、スピングラスと呼ばれる合金の研究理論が実はタンパク質にも使えるのではないかという話が出てきました。私は博士論文でスピングラス理論をニューラルネットワークの解析に応用する研究をしていたので、海外学振の申請書に Harvard でタンパク質の進化とかデザインとかを統計力学的な方法で研究している Eugene Shakhnovich 先生の研究室に行ってスピングラス理論を使ってタンパク質の研究をしたいと書いて出したら当たりました。

**有賀:** 海外にはそれまでにも研究の関係で行かれたことはありましたか。

**時田:** その前の年に、阪大にベンチャービジネスラボラトリーという部局ができて、大学発ベンチャーを作ろうというのを始めていました。今考えるととても先駆的な制度だと思いますが、そこで旅費を出すから

<sup>1)</sup>1949年の湯川秀樹のノーベル物理学賞受賞を記念して設立された物理学の全国共同利用機関

海外の大学発ベンチャーについて調べてこい的な話が理学部に回ってきました。ボストンはベンチャーが沢山あって大学とかも密接に関係しているし、時田くん Harvard の先生と共同研究したいと言っていたよねと言われて3ヶ月ほど行きました。

**有賀:** なるほど。それで翌年から2年間 Harvard に行っていて、そこで研究されていたということですが、研究テーマは今お話にあったタンパク質の研究をされていたのですね。

**時田:** そうですね。その研究室はタンパク質のデザインというものをほぼ世界で最初に始めたラボでした。当時の多くの研究者は折りたたみ問題という与えられたアミノ酸配列に対してそれがどういう立体構造をとるかという事をシミュレーションしていました。でも、そのラボはそれだけではなくて逆問題、ある形に折りたたむアミノ酸配列を探さない、という問題を定式化して、それに対する物理学的洞察を加えた理論を研究していました。それは進化の問題とも関係していて、すごく面白いと思ってなにか新しいことができないかなと思ひ立ちました。

**編集部:** 今のお話に合ったタンパク質の折りたたみ問題って確か1980年代ぐらいから結晶構造解析の技術がすごく上がって、X線当てて跳ね返ってきたものをフーリエ変換してコンピューターで構造解析するみたいなのが出来上がった時代があったと思います。ですが、配列からどう折りたたむかというのと結晶構造解析と、どちらが主流になったのでしょうか。

**時田:** 与えられた配列からどういう立体構造にたたむのかっていうのが、理論研究者たちが取り組んでこられた問題ですよ。でも最近は AlphaFold2 という AI が出てきて、それはほぼ解決した事に実はなっています。

**編集部:** 折りたたむだけじゃなくて実は配列上はあるけど途中でスプライシングで切られることや DNA に書いてあることがそのままタンパク質になっているわけではないこともありますよね。そういうことも含めて解決したということですか。

**時田:** 遺伝子からいきなりどういう分子ができて、どういう立体構造ができてどういう機能を果たすのかというのはまだ解決したとはいえないと思います。ただ、とりあえずアミノ酸配列が与えられた時にどういう形になるのかというのは、AlphaFold2 を使うと一瞬で教えてくれるという状態になっているのが現状です。今は問題がさらにその先の、どういう機能を果たすかを予測するとか、あとは逆に薬とかを作りたいときは要求機能が先にありますよね。どういう形にしたいかみたいな、それが先に与えられたときにそれを實現するアミノ酸配列は何かという逆問題、デザインの問題というのが今進んでいます。



図4 写真: Harvard 滞在時について楽しそうに話をされる時田先生

### 数理生物学との接近

**有賀:** Harvard の話がちょっと出ましたが、2003年から2004年にかけても再び Harvard に留学されていますが、これはまた違う研究室なのですか？

**時田:** そうです。当時タンパク質の話と並行して、数理生物学のモデルにもちょっと興味が出てきて、群集生態学モデルも始めました。そうしたら、Harvard にちょうど Martin Nowak さんが大金持ちからのファンドをもらってラボを構えるという話が流れてきて、数理生物でも巖佐先生とか佐々木頭先生も滞在していましたね。私も Harvard に2年間行っていたときのボストン生活がとても楽しかったので、また行きたいと思って今度は文科省の在外に応募したらまた採択されました。それで Harvard の Nowak 研に行きましたけど、Harvard 大学のキャンパスの中じゃなくて Harvard スクエアっていう商業施設が大学の前に広がっていますが、その超豪華商業ビルの最上階を借り切って研究室を構えているところで、めちゃめちゃ面白かったですね。

**有賀:** ここで初めて、数理生物のお話が出てきたと思うんですけども、時田先生はどちらかという物理の側からずっと研究されてきている中で、その延長で数理生物に出会ったと思うのですが、分野としての数理生物というものが当時の先生にはどのように見えたのか、今までされてきたこととどういうところが同じだったり違ったりするというふうに思われたか、そのあたりはいかがですか。

**時田:** Robert May っていう実はロジスティックカオスの発見だけじゃなくて、ランダム行列理論っていう理論物理の分野から出てきた話を群集生態学のシンプルなモデルに当てはめて有名な論文を書いていました。このランダム行列は実はニューラルネットワークとかタンパク質の分野でもめちゃくちゃ使われていた理論です。そういうこともあって May の論文を読んで物理の技術が生物にも使えるのではないかと、っていうのはずっと思っていました。それでレプリケーター方程式の種間相互作用がランダムな場合について研究を始めま

した。そうした中で数理生物学懇談会に参加したらシミュレーションだけじゃなくって割と数学的にきっちり生物の問題、特に群集生態学的なモデルの研究をしている人がいっぱいいることがわかって、そこから毎年参加するようになりましたね。

**有賀:** ここまでの話で、阪大に移られてからタンパク質の話であったり数理生物のテーマに取り組みられたりというお話でしたが、阪大の時代にその他に取り組みられた事はありますか。

**時田:** 実はタンパク質の研究も2本論文書いただけでその後は全然やっていません。最近学生が当時の論文を読んで発展させられませんかね、みたいな話になって、またやっていますぐらいの感じです。ですので、サイバーに移ってからは基本的には群集生態モデルを統計力学的に扱うというテーマでずっと研究しています。

### 今後の研究テーマの展開

**有賀:** 経歴という意味では最後に2013年から名古屋大学に移って、複雑系科学専攻というある意味原点に戻ってこれたというような感じも受けるのですが、阪大から名古屋大学に移られて何か変わったことなどはありますか？

**時田:** 私は学生時代からとにかくプログラミングとかがすごく楽しくて、阪大サイバーに移ってからもそういう情報学的な興味はずっと持ち続けていて、理学部物理の授業だけでなく情報科学に関する授業とかもやったりしていました。そうした中でシミュレーションの歴史の話の授業の中で盛り込んだりしていました。最初は弾道計算から始まり、戦艦大和の中でそろばんの達人が何人もいて弾道の計算やっていたのだよ、みたいな話を授業で話していました。ただ当時は、情報学と物理は自分の頭の中で割と切り分けてやっていました。でも名古屋大学に移って、今所属している情報学研究科は当然情報学がマジョリティーで、そういう分野の先生の話聞くようになってから物理と情報学との関係というのをすごく気にするようになってきました。実際に若い人は情報物理学と言って実は熱力学第2法則の中には情報が組み込まれているというような話をやり始めるようになっていて、割と物理と情報科学という分野がすごく身近な感じになっています。そういう視点を名古屋大に移ってから常に意識するようにはなりましたね。

**有賀:** なるほど。研究テーマとしては阪大時代とあまり変わらないのでしょうか。

**時田:** 自分自身の研究テーマとしては相変わらず群集生態学の理論モデルですが、学生の研究テーマは必ずしもそのネタではありません。そもそも情報学部から上がってくる学生なので物理の授業とかもそんなにないですし、物理好きがくるわけでもありません。昨今のAIとか機械学習とかにすごく興味を持っている

学生が来るのでそれに合わせてテーマを決めているという感じですね。

**有賀:** 今は複雑系科学専攻というところの所属ですが、これまで取り組まれてきた研究テーマが広い意味で複雑系の観点で議論できるというようなことを大学のWebサイトにも書いていらっしゃると思います。そうしたテーマに対するアプローチの仕方、特に数理解析とシミュレーションとおそらく両方されていると思いますが、その中で自身のアプローチ上の哲学みたいなものがあれば伺いたいです。

**時田:** 基本的には私は割と自閉的なところがあって、独りでちまちまノートに式を書くのが好きですね。シミュレーションも自分でちゃんとプログラムを書いて動かすというのがすごく好きです。ですので、そういう自分が楽しくやっていける方向性で研究していきたいなどは常に思っています。だから数学的に攻められるところはとにかく頑張って攻めていきます。でも、やっぱりたいいの複雑系の問題って非線形の問題だったりするから手で解けない場合なんてものはいくらでもあります。そういう場合にはスパコンとかを使ってシミュレーションをやりたいなという感じですかね。

**有賀:** 最初から全部シミュレーションでやればいいのかというふうにはやっぱりお考えにならないということですかね。

**時田:** 他分野の、特に物理学以外の人にはそういったことをよく言われるんですけど、私はやっぱり物理の人の考え方が刷り込まれちゃっているのだと思います。いろんな他分野の人と話すとき、こんな面倒くさい手計算しても結局最後はシミュレーション結果と突き合わせているのだから最初からシミュレーションだけでいいじゃないか、みたいなことも言われます。でも数学的に固い結果を出すのが良いという教育を受けて育ったっていうのがあるのかなと思いますけどね。

**有賀:** 先生の自身のこれまで書かれている論文の中だと、数学の部分と、シミュレーションの割合というかわエイトはどういう感じなのでしょう。

**時田:** 個人的にはどっちかだけで全部完結するっていうのはあまりありませんが、気持ちとしては7:3ぐらいの感じで数学ですかね。まあ、実は、一番引用されている研究はシミュレーション研究ですけどね。ただ、手計算でできるところはとにかく頑張るってやりたいたいという感じですね。

**有賀:** 先ほど固い結果という言い方をされていましたが、シミュレーションだと必ずしもこの固い結果にならないという感覚があるということになりますか。

**時田:** そうですね。計算物理学という分野がこの30年ぐらいで普通になったと思います。物理では理論の方がとてつもない精度の話をするのでシミュレーションで答えを出すことはすごく大変ですよ。例えば、3次元イジングモデルって厳密解がありません。2次

元まではありますが3次元の相転移温度って分からないのですよ。それで、そのシミュレーションをして、小数点以下5桁まで求めましたとか6桁まで求めましたみたいなことをずっとやっている人がいますね。他にも色々なすごく重要な問題に対してやっぱり手計算だけでは結果が出ないのでシミュレーションをやるって人はいます。そういった人たちを見てみると、シミュレーションで答えを確定させることはすごく大変だというイメージがありますね。

**編集部:** シミュレーションと計算の関係について質問をさせていただきたいのですが、近似計算した値、例えば平均場近似とシミュレーション結果を比べたら、これぐらいずれていて精度はこのぐらいだったという発表をしたとして、シミュレーションも含めて全部近似なのだからそれらを比較することに何の意味があるのかという質問をされた場合に時田先生でしたらどのように返したり受け止めたりしますか。

**時田:** そうですね。私もそういう質問をしたくなる場面は結構ありますが、答える側だったとしたら、実は平均場理論って近似じゃない場合もありますよという話をします。モデルによっては厳密解が平均場理論で求められる場合もありますよね。あと、理論がまだ近似だけど、その近似を上げていく努力というのはすべきでその途中という事です。だからシミュレーションとはやっぱり戦っていかないといけないと、両方が進歩しなきゃいけないのでその途中で比べるというのは良いことだと思います。

**編集部:** シミュレーションと戦う上で数式での解析から出てきた結果の方が真の値に近い可能性があるということですか。

**時田:** 近さについては分かりません。三次元イジングモデルはおそらく解析解がないとみんな思っていますよね、実はもうシミュレーションで段々その数値がわかってきましたが、その数値って我々がよく知っている $e$ とか $\pi$ とかそういったものの組み合わせで出てきそうにないのです。基本的にはもうモデル設定がそういうものになっているのではないかというふうに言われています。ですので、今、アナリティックに攻める人はほとんどいません。ただ、モデルによってはまだいける可能性はあると思います。だからその途上である近似解と今のシミュレーションでできる最大の精度の解を比べるというのはすごく大事な試みだと思います。

**編集部:** 数式として厳密に導いた解析解と、シミュレーション結果のどちらを重視するかに関して、どちらも大事である中でも、時田先生はアナリティックに導かれるものが本当の解に近いとお考えですか。

**時田:** 問題によると思いますよ。3次元イジングモデルについてはもうみんな諦めていると思いますが、問題ごとに色々なアプローチがあっていいと思います

し、先ほども言った一番引用されている私の論文はシミュレーション研究です。でもそこで出てきた結果にピンときて、これアナリティックに解けるのではないかなと思って書いた論文が物理学者の間では評価されているのでやはり問題によると思いますね。

**有賀:** 今のお話で対象によっていろんなアプローチがあって良いということでしたけれども、特に複雑系を考えると非常に様々な分野の現象を、ある意味同じような形で扱えるというのが一つのポイントになりますが、例えば生態系の問題と神経回路の問題では適したアプローチの仕方が違ってくるということがありうるのではないかなと思ったのですがそれはいかがですか。

**時田:** 全くその通りだと思いますね。実際複雑系的なことをやっている人の中には実験をやっている人もいますし、どういうアプローチをするかというのは限定されてないと思いますね。

**有賀:** それは研究者個人の好みによることも結構大きいのでしょうか。

**時田:** それだけだと思います。もうみんな自分の好みにかけていると思いますよ。

**編集部:** それで言うと、時田先生はあんまりこだわらないということですか。

**時田:** 実は私はそもそも対象にこだわってないんですよ。群集生態系とかタンパク質とか対象はなんでもよくて、例えば本の中の単語の数の分布や都市の人口の分布がなぜかみんな傾きがマイナス1のべきになっているというZipfの法則というのがありますが、何かそういうものを見つけないのです。私は群集生態の発表をするときに将棋のタイトル保持数の分布とかも見せたりします。そうすると全然生態学と関係ないと思う人が多いと思いますが、私の中では背後にある数学は多分繋がっているのではないかってずっと思っています。

**有賀:** 様々な現象でよく言われますね。例えば数式の形が同じになるとかってことがありますけれども、先生はその背後にはさらに同じようなメカニズムがあってそういったことが成り立つというふうに思われているのか、単に同じような数理的な構造があるということ自体が本質的なことなのだと思うのかそのあたりはいかがですか。

**時田:** どちらかというと背後に同じメカニズムがあるからだと思っている節はあります。ただ、背後にあるメカニズムが全然違うのにたまたま数式が同じ形になることもありますよね。だから必ずしも数式が同じだからとか、解が同じだから現実に起こっていることが同じかっていうと、多分そうではないと思います。特に、これは絶対言わないといけないと思いますが、結局のところ理論は徹頭徹尾仮説です。だから手で解けたりシミュレーションで何か出てきたりしたからといってそれは仮説にすぎません。ある前提のもとで

何か計算したらそれになりましたと言っているだけで、その前提が肯定されたわけじゃ全然ないですよ。だから、最終的には実験でしっかりと実証されないと科学としては完結していないと思っています。でも私には実験の才能もないしお金もないので、とにかく仮説を量産しているというだけのつもりで研究しています。

**有賀:** 今の話も踏まえて、最初はカオスや力学系が流行っていた頃からの話から始まって今ちょっと最後複雑系の話まで持ってきましたが、伝統的な意味では物理学とは問題意識がちょっと違う問題に属することだと思います。そういう問題に取り組むにあたって、特に面白いと思われる点がどういうところにあるのかっていうのを最後に伺いたいと思います。

**時田:** 物理ってすごく保守的に進んできていますよね。だけど非平衡統計力学や複雑系とか数理生物もそうですが、従来の物理が完成してなかった分野と実はかぶっています。ですので、数理生物や複雑系の研究をすることで物理学がこれから解決していかなくちゃいけない問題に対するいろんなヒントがフィードバックできるのではないかってずっと思っています。でもこれまでの物理の建付けを全く無視したところでやっても多分あんまり建設的なことにはならないだろうと思っているので、物理で出てきた様々な方法論を使って複雑系の問題を扱うという事をやってきたつもりです。

今後に関しては、最近、牛のゲップに含まれるメタンガスを2050年までに80%削減するというムーブメントのプロジェクトの末席に加えてもらって、牛のルーメン（第1胃）の中の細菌叢のデータを解析しているところです。牛のルーメン液を、細菌叢ごとシーケンサーに入れてどういう菌がどれくらいいますみたいなデータがバンバン上がってきているんです。その時系

列データも取れるようになってきています。それに関連して、マウスの腸内細菌叢のデータを使ってロトカ・ボルテラ方程式の種間相互作用行列の要素を推定する論文を学生が見つけたのですが、その相互作用行列の要素の分布をグラフにしてみたら、Robert Mayの理論に出てくるランダム行列になっていました。なるほどと思ってそこいらへんの、データ駆動型の研究をやっているところなんです。

**有賀:** 本日はどうもありがとうございました。

**時田:** どうもありがとうございます。

#### 【時田恵一郎先生略歴】

- 1989年 早稲田大学理工学部応用物理学科 卒業
- 1991年 早稲田大学大学院理工学研究科物理学及び応用物理学専攻 修士課程修了
- 1994年 東京大学大学院理学系研究科相関理化学専攻博士課程修了
- 1994年 大阪大学理学部 助手
- 1996年 ハーバード大学客員研究員（学振海外）
- 2000年 大阪大学サイバーメディアセンター、大阪大学大学院理学研究科（兼任） 助教授
- 2002年 大阪大学大学院生命機能研究科（兼任） 助教授
- 2003年 ハーバード大学客員研究員（在外）
- 2007年 大阪大学サイバーメディアセンター  
大阪大学大学院理学研究科（兼任）  
大阪大学大学院生命機能研究科（兼任）  
准教授
- 2013年 名古屋大学大学院情報科学研究科 教授
- 2017年 名古屋大学大学院情報学研究科 教授  
現在に至る

---

**【数理モデルのロストテクノロジー】**
**第5回 金融工学の栄枯盛衰  
～数理モデルは何を見逃したのか～**

 大泉 嶺\*
 

---

**1. はじめに**

ロストテクノロジーとは、現在その知識や技術を継承する人物や文献等の欠如によりかつて存在した製造物を再現する事が出来なくなってしまった事を言う。Wikipedia を調べればダマスカス鋼という古代インドで開発された鉄の鍛え方<sup>1)</sup>や、戦艦大和の巨大な砲身を製造する技術などが例として挙げられている。こうした技術が喪失される理由は様々なものがあるが、戦艦大和の主砲の場合は大艦巨砲主義が現代戦時において優位ではなくなった為製造されなくなった。これは戦時の戦略の変化（空母やミサイルなどの出現）によって別の技術が重視された結果である。また、最近のウクライナ戦争を見るとドローン技術が戦術的役割を増している。

科学の世界でもこうした忘れ去られた知識や概念がある。筆者はこうしたかつて流行し、現在見なくなった数理モデルのテクニックを発掘するのが趣味の一つである。数理モデルにおけるロストテクノロジーは、例えその分野で関心が薄れたとしても異分野の数理モデルの解析や構築において役立つ場合があるかもしれないと期待しているからだ。また、かつてはみんなが知っていた知識がその分野をもう一度輝かせる可能性もある。そういう訳で勉強はしたが、まだ自分の研究で使っていない絶版あるいは書店で見かけなくなった本に載っている興味深い数理モデルの方法論をこの場を借りて紹介したい。

第5回は金融工学の栄枯盛衰について、徒然なるままに紹介しよう。金融工学は現在も投資モデルの構築や解析において現役の分野である。この分野をロストテクノロジーと呼ぶことは多くの経済学者や関連する応用数学者、証券アナリストを敵に回す上、勘違いした理系優越主義者と呼ばれてしまうことであろう。であるから、このシリーズとして紹介してしまえば誤解を招くことになるが、もう既に何稿かロストテクノロジーではないものを扱っているし、本稿に関しても最大限金融工学という分野に敬意をもって執筆するつもりである。筆者は経済学も金融工学もずぶの素人であ

る。一方、金融工学は筆者が自身の研究で用いる確率微分方程式を勉強する上で度々例題として教科書に登場してきた。数式を理解する上で、この分野の教科書や歴史や第一人者の伝記などを読んでいたため、素人とはいえ“門前の小僧習わぬ経を読む”までには至ったと思う。

今回、金融工学をテーマに選んだ理由は、その栄枯盛衰にある。90年代後半～00年代後半までの間、生物学では分子生物学（クローン羊やヒトゲノム計画最盛期の頃）が、文学部では心理学が人気を博したように、経済学では金融工学が人気を博していた。株式の分散投資には確率論による理論が存在し、それを制する者は金融市場における投資で大もうけ出来ると当時の学生は夢見てたことだろう（そんな話を当時の経済学部友人が語っていた記憶がある）。実際、2000年代初頭、アメリカ市場は金融を中心に大きく拡大し、世界経済は金融を中心には語れない時代であった<sup>2)</sup>。この金融工学の夢を打ち砕いたのは21世紀最初の恐慌となったリーマン・ショックである。

ヒトゲノム計画が終わったとき、20世紀にSFで育った若い世代が期待するほど人間の理解が深まったわけではなかったし、クローン人間が身近にもならず、21世紀最初に完結した大型プロジェクトに肩透かしを食らった私のような当時の学生同様、リーマン・ショックも数理の限界を多くの経済学者に見せつけたのであった。

このリーマン・ショックについては後述するが、数理モデルが現実世界で活用されるとき、我々は何を見極める必要があるのだろうか。金融工学が辿った歴史を紐解き数理モデルの持つ意味を再考できれば幸いである。

---

 \*国立社会保障・人口問題研究所

<sup>1)</sup>シリアのダマスカスで製造された刀剣がこの鉄鋼を用いていたのが名前の由来である。

<sup>2)</sup>日本ではIT革命に乗り遅れ、バブル崩壊以後続くデフレ不況の最中であったが…。



## 2. 株式と株価の基本知識

数理生物学者にとって最も馴染みが無い分野の一つは株式ではないだろうか？そこで、株式に関する基本的な知識をここで紹介する。

企業は事業拡大や維持を狙って株式を発行する。株式は銀行の借入れとは異なり、企業は特定の利子を払う必要は無く、また返済期限や義務は無い。その代わりに、株式を購入した人・会社（株主）に持株数に合わせて配当金を支払わなければいけない。配当金の額に関しては、株主総会によって決定される。基本的には利益を多く出している企業は配当金も高くなる仕組みである。また、株式は証券取引所を介して取引され、企業が発行する株式を直接買い付けるだけでなく、株主間でも持ち株の取引が行われる。先述のように配当の高い株式は、それだけで価値があり、株主間の取引価格も高くなる。これを株価と呼ぶ。国全体の平均株価が上昇しているときは、市場が活発であることを表している「とされ、」経済発展の指標となる。実際に全株価の平均は物理的に算出が難しく、多くの場合、東証平均株価指数 (TOPIX) やダウ平均株価などサンプルされたいくつかの企業の平均株価から算出される指標が用いられる。ただし、コロナ禍などの景気低迷時期には金融政策がとられるため、一時的に株価が上がる事がある。しかし、これらは実体経済（現実の経済活動の活発化）を表しているとは言えないことは明らかである。

## 3. 金融工学前夜

こうした株式市場の動向は、株式の売買を考える株主にとって最も重要な情報である。そこで株式の動向の分析を行う専門職がある。それが証券アナリストである<sup>1)</sup>。金融工学という分野が登場する前（例えば1980年代の日本）、経済学者や証券アナリストたちが

<sup>1)</sup> 著者の父もかつてそうであった。

どのように株価の変動を分析していたかという、過去の株式変動に線を引いてトレンドを算出したり、過去の変動を分析し、現在に当てはめたりと、とにかく過去のデータを分析して将来の株価を予測する事が主流だったようである。

このような分析は日々時間と共に変化する株価の変動の予測には不向きだったようで、多くの場合予測は外れたか、(株式売買にとって) 意味の無い分析に終わった。株式を買うことは企業に対する投資であるだけでなく、株主にとっては株価の下落と配当金の下落といったリスクを伴う資産運用である。株式で利益を上げようとする株主を含む投資家にとって、株価変動に伴う資産の安定したリスク管理は切実な願いである。

## 4. 金融工学の基本的な考え方

では、安定したリスク管理とは何だろうか？株取引にはリスク管理として様々な取引方法がある。例えば先物取引である。これは将来の売買を現時点で取り決めた価格で取引する方法である。例えば売り手と先物契約を結んでおけば、売買が成立する期日（満期）にガソリンなどの値段が暴騰しても、契約時の値段で取引できるのでこの場合買い手にとって売買価格の上限リスクを管理（ヘッジ）できる。逆に、価格が下落した場合でも売り手は契約時の値段で買い取られるため、売り手に取っては下落リスクをヘッジすることになる。

さらにこの先物取引におけるリスクをさらにヘッジする取引として、金融工学を知る上で最も重要な取引方法の一つであるオプションを紹介しよう。このアイディアは金融工学の根幹を成すので、例を挙げて説明する。

コイントスを使って私と貴方が1,000円の昼食をかけて勝負するとする<sup>2)</sup>。表が出れば貴方の勝ち、1,000円分のランチを私が奢る。逆に裏が出れば、貴方は1000円のランチを私に奢らなければならない。このゲームはフェアなゲームであり、私と貴方の取り分の期待値は、

$$-1,000 \times \frac{1}{2} + 1,000 \times \frac{1}{2} = 0,$$

0円であり、リスクは1,000円である。しかし、もし貴方の持ち合わせが800円しかなく、裏が出たときに支払いが出来ない場合、賭けを降りたいと考えるだろう。

「コインの表が出れば賭けは続行する」が「裏が出た場合は賭けを降りたい」という提案は私としては到底受け入れられない。なぜなら、その提案に乗った場合私の取り分の期待値は

$$-1,000 \times \frac{1}{2} + 0 \times \frac{1}{2} = -500,$$

<sup>2)</sup> この場合「一時の娯楽に供するものを賭けたにとどまる」ため賭博法違反にならない（刑法186条1項但し書き）

であり、賭けに乗ること自体が損であるからだ。しかし、この提案に“あるルール”を付け加える事で、フェアなゲームにする事が出来る。それが、提案を受ける側(私)が“表が出たら賭けに乗る権利を、貴方に売る”事によって成立する。貴方がコインの裏が出たときに賭けを降りるという条件によって得られる期待値は

$$0 \times \frac{1}{2} + 1,000 \times \frac{1}{2} = 500,$$

となるので、先に“表が出たら賭けに乗る権利”として私に500円払えば、私は期待損失(-500円)を補填できるので、どちらの期待値も0円となる。この“賭けに乗る権利”を金融工学ではオプションと呼ぶ<sup>1)</sup>。オプションを使った事によって当初の昼食を賭けたゲームがどのように変わったのかを解説していこう。私は既に500円をオプション料として受け取っているため、仮にコインの裏が出て私が勝った場合、貴方は賭けを降りるので私の手元には500円残る。逆に、コインの表が出て貴方が勝った場合、貴方は1,000円のランチを食べることが出来るが、私は受け取った500円があるため、実質私の損失額は500円に抑えられる。

こうしたオプションを資産とみなして売買する取引をオプション取引と呼ぶ。オプションを用いれば例えば貴方の持ち合わせが1,000円に満たなくても1,000円のランチを賭けた勝負に参加する事が出来るのである<sup>2)</sup>。

もう一つ重要な点を強調しておく、当初のゲームではリスクが1,000円だったにも関わらず、オプションを用いる事によってリスクが500円に下がった点である。この取引は明らかにリスクをヘッジ(管理)していると言えよう。

さて、こうしたオプションは先物取引においても重要な役割を果たす。先物取引の契約は満期に必ず売買を成立させる義務を負うので、買い手にとっては大暴落した証券や売り手にとっては予想外に高騰した株式など本音では取引を控えたいものでさえ契約に沿って売買しなければならぬ。つまり投資家はオプションによってこうした市場の変動におけるリスクから資産を守りたいわけである。

しかし、コイントスによる昼食を賭けたゲームのように掛け金とコインの表裏の確率を使ってオプションの値段を決定したように、変動する株価のような証券に対してどのように最適なオプション価格の設定をすべきであろうか? この問題に取り組んだ人物がフィッシャー・ブラック(Fisher Black 1938~1995)とその同僚たちである。

## 5. 株価の数理モデル

オプション取引は、金融工学という分野が確立する前からあった。ブラック-ショールズの公式以前の証券取引では、各証券会社が独自に算定したオプション価格が採用されており、価格決定の基準となる理論は無かったようである。そこで、ブラック・ショールズ方程式の生みの親であるブラックとマイロン・ショールズ(Myron S. Scholes 1941~)は、市場において最適なオプション価格を決定する方法論に取り組むことにした。もし、そんな方法があれば市場における最適なオプション価格より高い値段を提示する証券会社とは取引をせず、逆に適正価格より安い証券会社と取引をする事によって期待利回りを上げる事が出来る(後述するLTCMが実際その方法で投資ファンドを運営することになる)。研究者にはなかなか無い商魂たくましい動機だが、彼らにはそれを可能とする数学的背景があった。ブラックの大学時代(ハーバート大学)に物理学を教えていたのがなんとあのジュリアン・シュウインガー(Julian Seymour Schwinger 1918~1994)である。シュウインガーは物理学を勉強した人なら誰もが知る量子電磁気学における繰り込み理論などの功績でR. ファインマンと朝永振一郎と共にノーベル物理学賞を受賞している(まあ、その量子論の講義もギリギリで単位を取る程度であったようだが)。実はブラックは一回大学を退学しており、後に応用数学でPh.D.を取るようになる。勿論、金融工学に詳しい読者に言い訳しておく、ブラックの理論に最も影響を与えたのはCAPM理論<sup>3)</sup>の創始者の一人であるジャック・トレイナー(Jack Treynor 1930~2016)である。

さて、話を適正なオプション価格に戻すと、満期における株価に依存する事は予想が付くだろう。前節の例で行けば、ランチの値段が高くなれば、当然オプションの値段も高くなるわけだ。では株価はどのように変動するだろうか。戦争や疫病無い安定な市場の平均株価や、毎年の流行などに左右されない大企業の株価などはその変動は正規分布に従うことが観測されている。株価(stock)を $S$ 、平均変化率 $r$ 、ボラティリティ<sup>4)</sup> $\sigma$ とすると、株価の変化率は次の方程式に従う:

$$\frac{dS_t}{S_t} = rdt + \sigma dB_t, \quad S_0 = s. \quad (1)$$

ここで $B_t$ はBrown運動(詳細は第3回もしくは4回を参照)。オプション取引などによる期待収益を $C(t,s)$ (オプションを0円とした場合の収益)とすれば(これをデリバティブ(derivative)と呼ぶ)、Itoの公式より<sup>5)</sup>,

<sup>1)</sup>より正確には“表が出たときに奢って貰う権利”である。

<sup>2)</sup>この場合貴方が負ければ、昼食はとても質素なものになるだろうけど。

<sup>3)</sup>資産ポートフォリオの最適化を決める統計的手法

<sup>4)</sup>株価変化率の標準偏差

<sup>5)</sup> $\phi(t,s)$ をオプションとすると、その期待収益 $C(t,s)$ は

$$dC(t,s) = \left( \frac{\partial}{\partial t} C(t,s) + rs \frac{\partial}{\partial s} C(t,s) + \frac{\sigma^2}{2} s^2 \frac{\partial^2}{\partial s^2} C(t,s) \right) dt, \quad (2)$$

となる。このとき、Brown 運動の期待値は 0 である。一方、期待収益の差分  $dC(t,s)$  は平均変化率  $r$  に比例して、時間と共に増加するので、以下の関係が成り立つ：

$$dC(t,s) = rC(t,s)dt. \quad (3)$$

式 (2) と (3) より、デリバティブの期待収益  $C(t,s)$  は以下の偏微分方程式に従う。

$$rC(t,s) = \frac{\partial}{\partial t} C(t,s) + rs \frac{\partial}{\partial s} C(t,s) + \frac{\sigma^2}{2} s^2 \frac{\partial^2}{\partial s^2} C(t,s). \quad (4)$$

これを Black-Scholes 方程式とよぶ。

## 6. オプション取引の種類と Black-Scholes の公式

式 (4) だけでは解を与えるには不十分である。この方程式を解くためには、適切な初期条件あるいは終端条件か、または境界条件を与えなくてはならない。ブラックとショールズの原著 [9] ではワラント債 (warrant) と呼ばれる満期に株式会社の新株を直接先物取引できる権利について扱っているが、数式上同じであるオプション取引を説明する。満期  $T$  に株  $s$  を価格  $K$  で証券会社を通して購入する先物取引に対するオプションをコール・オプションと呼ぶ。逆に満期  $T$  に価格  $K$  で売却する先物取引におけるオプションをプット・オプションと呼ぶ。コールにしてもプットにしても、いくつかオプションには種類があり、取引権が満期  $T$  で有効であるオプションをヨーロッパ型コール (プット)・オプション (European call (put) option) 呼び、満期までの期間いつでも権利を行使して取引できるオプションをアメリカ型コール (プット)・オプション (American call (put) option) と呼ぶ。他にもアジア型などいくつかあるが [3], 前出の 2 つ (4 つ?) が代表的なオプションである。ワラントとの違いは取引相手が直接の投資先か証券会社を通じたものかの違いである。ヨーロッパ型コール・オプションを数式で表せば以下の通りである。

$$(s-K)_+ := \begin{cases} s-K & s \geq K \\ 0 & s < K \end{cases} \quad (5)$$

$$C(t,s) = \mathbb{E}_{S_T=s}[\phi(t,S_t)],$$

と表せる。Ito の公式は次で与えられる：

$$dC(t,s) = \mathbb{E}_{S_T=s} \left[ \left( \frac{\partial}{\partial t} \phi(t,S_t) + rS_t \frac{\partial}{\partial s} \phi(t,S_t) + \frac{\sigma^2}{2} S_t^2 \frac{\partial^2}{\partial s^2} \phi(t,S_t) \right) dt + \sigma S_t dB_t \right].$$

ヨーロッパ型プット・オプションは株価が取引価格  $K$  よりも低いときに権利を行使する方が利益となるので下記の境界条件となる。

$$(s-K)_- := \begin{cases} K-s & s \leq K \\ 0 & s > K \end{cases} \quad (6)$$

ヨーロッパ型のオプションは満期  $T$  においてのみ、行使権利があるのでヨーロッパ型コール・オプションの適正価格は式 (4) とともに次の方程式の解で与えられる。

$$rC(t,s) = \frac{\partial}{\partial t} C(t,s) + rs \frac{\partial}{\partial s} C(t,s) + \frac{\sigma^2}{2} s^2 \frac{\partial^2}{\partial s^2} C(t,s), \quad (7)$$

$$C(T,s) = (s-K)_+. \quad (8)$$

Feynman-Kac の公式を用いれば (7) の解は次の統計的表現を持つ。

$$\mathbb{E}_{S_T=s} [(S_T - K)_+ \exp\{-r(T-t)\}].$$

式 (7) の左辺は満期までの期間、利子による利益を割り引く効果を持っている。つまり、ヨーロッパ型コール・オプション  $C(t,s)$  の価格設定は純粋な変動による収益 (risk premium) を表している。境界条件を (8) から (6) に変更すればプット・オプションの適正価格を算定できる。

ヨーロッパ型のオプションに関しては解析的に解くことが出来る。実際にヨーロッパ型コール・オプションの適正価格を導いてみよう。変数を次のように変換する。

$$\tau = T - t \quad (9)$$

$$x = \ln \left\{ \frac{s}{K} \right\} + \left( r - \frac{\sigma^2}{2} \right) (T - t) \quad (10)$$

この変数変換でデリバティブの時間微分項は以下のようになる。

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t} C(t,s) &= \frac{\partial \tau}{\partial t} \frac{\partial}{\partial \tau} C(\tau,x) + \frac{\partial x}{\partial t} \frac{\partial}{\partial x} C(\tau,x) \\ &= -\frac{\partial}{\partial \tau} C(\tau,x) - \left( r - \frac{\sigma^2}{2} \right) \frac{\partial}{\partial x} C(\tau,x) \end{aligned} \quad (11)$$

同様に、1 次、2 次の株価  $s$  による偏微分も次のように変換される。

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial s} C(t,s) &= \frac{\partial x}{\partial s} \frac{\partial}{\partial x} C(\tau,x) = \frac{1}{s} \frac{\partial}{\partial x} C(\tau,x) \\ \frac{\partial^2}{\partial s^2} C(t,s) &= \frac{\partial}{\partial s} \left( \frac{1}{s} \frac{\partial}{\partial x} C(\tau,x) \right) \\ &= -\frac{1}{s^2} \frac{\partial}{\partial x} C(\tau,x) + \frac{1}{s^2} \frac{\partial^2}{\partial x^2} C(\tau,x). \end{aligned} \quad (12)$$

これらの変換式 (11), (12), (13) を式 (7) に代入すれば以下となる：

$$rC(\tau, x) = -\frac{\partial}{\partial \tau} C(\tau, x) + \frac{\sigma^2}{2} \frac{\partial^2}{\partial x^2} C(\tau, x). \quad (14)$$

最後に

$$C(\tau, x) = Q(\tau, x) \exp\{-r\tau\} \quad (15)$$

とおいて式(14)に代入すれば、最終的にBlack-Scholes方程式は以下の熱方程式に帰着される<sup>1)</sup>。

$$\frac{\partial}{\partial \tau} Q(\tau, x) = \frac{\sigma^2}{2} \frac{\partial^2}{\partial x^2} Q(\tau, x), \quad Q(0, x) = (K \exp\{x\} - K)_+. \quad (16)$$

熱方程式の解法は分野とその立場によっていくつか異なるアプローチがあるが、本稿ではFourier変換を用いた解法を紹介する。関数 $f(x)$ のFourier変換 $\hat{f}(\xi)$ を次で定義する。

$$\hat{f}(\xi) := \int_{-\infty}^{\infty} dx f(x) \exp\{-i\xi x\}$$

式(16)の両辺をFourier変換すると下記の常微分方程式が得られる<sup>2)</sup>：

$$\frac{d}{d\tau} \hat{Q}(\tau, \xi) = -\frac{\sigma^2}{2} \xi^2 \hat{Q}(\tau, \xi), \quad \lim_{\tau \downarrow 0} \hat{Q}(\tau, \xi) = \hat{Q}(0, \xi) \quad (17)$$

変数分離法を用いれば方程式(17)の解は、

$$\hat{Q}(\tau, \xi) = \underbrace{\hat{Q}(0, \xi)}_{\textcircled{1}} \underbrace{\exp\left\{-\frac{\sigma^2}{2} \xi^2 \tau\right\}}_{\textcircled{2}},$$

となる。Fourier変換は畳み込みの演算に対してよく知られた公式がある：

$$\hat{f}(\xi) \hat{g}(\xi) = \int_{-\infty}^{\infty} dx \exp\{-i\xi x\} \int_{-\infty}^{\infty} dy f(y) g(x-y).$$

②に関して変換前の関数を求めればよい。逆変換は次で与えられるので、

$$f(x) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} d\xi \hat{f}(\xi) \exp\{i\xi x\}$$

以下のように計算される<sup>3)</sup>。

$$\begin{aligned} & \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} d\xi \exp\left\{-\frac{\sigma^2}{2} \xi^2 \tau + i\xi x\right\} \\ &= \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} d\xi \exp\left\{-\frac{\sigma^2}{2} \tau \left(\xi - \frac{ix}{\sigma^2 \tau}\right)^2 - \frac{x^2}{2\sigma^2 \tau}\right\} \\ &= \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} d\eta \exp\left\{-\frac{\sigma^2}{2} \tau \eta^2 - \frac{x^2}{2\sigma^2 \tau}\right\} \end{aligned}$$

<sup>1)</sup>  $t \rightarrow T$  ならば  $\tau \rightarrow 0$  であること、また  $\tau = 0$  のとき  $s = K$  ならば、 $x = 0$  となることに注意。

<sup>2)</sup> 我々が期待する解は  $\lim_{x \rightarrow \pm\infty} Q(\tau, x) = 0$  となることに注意。

<sup>3)</sup> しれっと複素解析を用いたが、虚部はこの積分において消える。

ここで、Gauss積分の有名な公式：

$$\int_{-\infty}^{\infty} dy \exp\{-\alpha y^2\} = \sqrt{\frac{\pi}{\alpha}}, \quad \alpha > 0.$$

を用いれば、

$$\begin{aligned} & \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} d\eta \exp\left\{-\frac{\sigma^2}{2} \tau \eta^2 - \frac{x^2}{2\sigma^2 \tau}\right\} \\ &= \frac{1}{\sqrt{2\sigma^2 \pi \tau}} \exp\left\{-\frac{x^2}{2\sigma^2 \tau}\right\} \end{aligned} \quad (18)$$

この式(18)は熱方程式(16)の基本解と呼ばれている。よって、熱方程式(16)の解を得る。

$$\begin{aligned} Q(\tau, x) &= \\ & \frac{1}{\sqrt{2\sigma^2 \pi \tau}} \int_{-\infty}^{\infty} dy (K \exp\{y\} - K)_+ \exp\left\{-\frac{(x-y)^2}{2\sigma^2 \tau}\right\} \\ &= \frac{1}{\sqrt{2\sigma^2 \pi \tau}} \int_0^{\infty} dy (K \exp\{y\} - K) \exp\left\{-\frac{(x-y)^2}{2\sigma^2 \tau}\right\} \end{aligned} \quad (19)$$

さらに変数を

$$q = \frac{y-x}{\sigma\sqrt{\tau}},$$

と変換する事で、

$$\begin{aligned} Q(\tau, x) &= \\ & \frac{K \exp\{x\}}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\frac{x}{\sigma\sqrt{\tau}}}^{\infty} dq \exp\left\{-\frac{q^2}{2} + \sigma\sqrt{\tau}q\right\} \\ & - \frac{K}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\frac{x}{\sigma\sqrt{\tau}}}^{\infty} dq \exp\left\{-\frac{q^2}{2}\right\} \end{aligned} \quad (20)$$

式(20)の右辺第1項に対してさらに変数変換をする。

$$p = q - \sigma\sqrt{\tau}.$$

式(15)の関係より、

$$\begin{aligned} C(\tau, x) &= \\ & \frac{K \exp\{x - (r - \frac{1}{2}\sigma^2)\tau\}}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\frac{x}{\sigma\sqrt{\tau}} - \sigma\sqrt{\tau}}^{\infty} dp \exp\left\{-\frac{p^2}{2}\right\} \\ & - \frac{K \exp\{-r\tau\}}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\frac{x}{\sigma\sqrt{\tau}}}^{\infty} dq \exp\left\{-\frac{q^2}{2}\right\} \end{aligned}$$

Gauss積分の対称性<sup>4)</sup>より、元の変数に戻すと $(\tau, x) \rightarrow (t, s)$ 次の公式を得る：

$$C(t, s) = sN(d) - K \exp\{-r(T-t)\} N(d - \sigma\sqrt{T-t}), \quad (21)$$

$$\begin{aligned} N(u) &:= \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^u dz \exp\left\{-\frac{z^2}{2}\right\}, \\ d &:= \frac{\ln\left\{\frac{s}{K}\right\} + \left(r + \frac{\sigma^2}{2}\right)(T-t)}{\sigma\sqrt{T-t}}. \end{aligned}$$

<sup>4)</sup>

$$\int_{-a}^{\infty} dz \exp\left\{-\frac{z^2}{2}\right\} = \int_{-\infty}^a dz \exp\left\{-\frac{z^2}{2}\right\}$$

式(21)をBlack-Scholesの公式と呼ぶ。

## 7. Black-Scholesの公式と経済学への衝撃

株式投資とは、株式会社の持つ将来性や経営方針に期待する事で株式を購入し、その会社に運転資金を供給する行為である。冒頭にも書いたが、利益を上げ配当の高い株は当然株価も高くなる。粉飾決算などの不正の発覚や利益が上がらず、経営が困難に陥っている会社の株価は低くなるものである。かつて、証券アナリストや経済学者達は、こうした会社の経営状況や新事業の立ち上げ、投資家の期待を分析することで株価の変動を予測し、理由付けを行ってきた。

Black-Scholes方程式をはじめとする金融工学は、こうした伝統に“市場の変動に背景は無く、あるのはランダムな要素だけである”と反駁したわけである。実際安定した大企業の株価や、安定した市場では良い近似を与えている。デリバティブがBlack-Scholes方程式(4)を満たさなければならないという帰結は、経済学者だけでなく、物理学者や数学者の関心を一気に集めた。コイントスを使ったランチ賭博の例のように、不公平な取引からオプション価格を算定し、新しいデリバティブとして商品化することが出来るわけだ。

そのための理論が数学の力を借りて完成したのである。

この新しい手法を開発した功績によってショールズとロバート・マートン(Robert Cox Merton 1944~)は1997年、ノーベル経済学賞を受賞することになる。

残念ながら、フィッシャー・ブラックは咽頭癌によって1995年に亡くなっている。

もちろん、彼らの功績が後にノーベル経済学賞に至った理由はこれだけでは無く現実的な背景も関わっている。

ブラックとショールズが発表したBlack-Scholesの公式の論文が掲載された1973年、シカゴにオプション取引の市場(Chicago Board Options Exchange, CBOE)が開設され、取引が急増する事になる。1971年、ドル・ショック、別名ニクソン・ショックと呼ばれるそれまでの固定比率(金1オンス=35ドル)を米国の金保有量が支え切れなくなったことで、固定為替の世界経済体制が大きく揺らぐ事件が起こった。その結果、変動為替制度が導入され、為替リスクが生まれるようになったのである。そうした背景がオプション取引を活発化させた要因の一つである。

## 8. 金融工学の栄枯盛衰

こうしたオプションの価格設定に関する有効な数理モデルの開発は、金融工学の勃興と共に金融工学者を調子に乗らせた。それが1994年にアメリカの投資銀行であったソロモン・ブラザーズ(Salomon Brothers

現citiグループの1ブランド)の証券トレーダー<sup>1)</sup>であったジョン・メリウェザー(John Meriwether 1947年~)を筆頭にショールズとマートンや元FRBの副議長などの著名人ともに立ち上げた投資ファンド:Long-Term Capital Management社、略称LTCMである。金融工学の立役者であるショールズやマートンと共に高度な数学を使った金融理論を基にした投資方法は世界中の富裕層や投資家から期待を集め、大きな資本と共に数年間驚異的な実績を残した。しかし、1997年アジア通貨危機が起こり、その余波で1998年、ロシア金融危機<sup>2)</sup>によって大規模な金融の混乱が起きる。このとき、国際的な投資ファンドとなったLTCMのリスク管理システムが機能せず、結果、同年に経営破綻を起こしてしまう。ちなみにLTCMはロシアが債務不履行を起こす確率は100万年に3回と見積もっていた話は有名だそう。このニュースは当時大きな経済のニュースとして取り上げられた。ブラックは経営破綻を観ること無くこの世を去ったが、メリウェザーの誘いは「リスク管理に甘さがある」と断っていた。

LTCMの経営破綻は金融工学界隈にとって大きなニュースであったが、金融工学自体の人気は衰える事は無かった。なぜなら、90年代後半から00年代、IT革命と呼ばれる時代が始まっていたからである。

GAF(Google(1998年起業)、Apple、FaceBook(2004年起業、現META)、Amazon(1994年起業))やMicrosoftといった当時の新興企業が利益を上げ市場はさらに活発になっていった。2000年初頭にITバブルははじけたが、同時期、アメリカの中央銀行(連邦準備制度)は低金利制度を推進した<sup>3)</sup>。この制度を利用すれば低所得者や信用の低い人でもローンが組めるようになる。これにより不動産市場の価格が急騰した。

いわゆる不動産バブルである。当然、低所得者や信用の低い人はローンの支払いにリスクが生じる。

そこで、金融機関は住宅を担保に高金利で、低所得者や信用の低い人向けのローンを販売を始めた。これをサブプライムローンという。ローンの支払いが滞っても住宅が担保されているので、それを転売することでリスクを回避できるという理屈である。但し、不動産価格が高騰し続ければの話である。さらにアメリカの金融機関はこれをそのまま証券化し、金融資産としてさらに投資家に販売した(住宅担保証券)。

サブプライムローンの借り手の返済が住宅担保証券保有者の利子として収入になる仕組みである。この時代アメリカの経済はウォール街(マンハッタンにある

<sup>1)</sup>市場で実際に証券を売買するプロ

<sup>2)</sup>ロシアのルーブル暴落によって対外債務不履行が発生した事で、アジアを含む新興市場に大きな混乱が発生した。

<sup>3)</sup>これはクリントン政権時代にグリーンズパンFRB議長が進めた政策である。

ニューヨーク証券取引所近辺)を中心に動いていたと言っても過言ではないだろう。金融工学に賭ける期待も大きかったはずだ。

だが、2007年それは起こった、低所得者によるローンの支払いが案の定滞り中、不動産バブルがはじけたのである。その結果、証券化されたサブプライムローンは焦げ付いた(不良債権化すること)。大手金融機関や投資会社が、多額の借入れを行ってこの住宅担保証券を購入していたため、これらの焦げ付きは金融市場に大きな打撃となった。そして、投資銀行グループ最大手であるリーマン・ブラザーズ(Lehman Brothers Holdings Inc.)が経営破綻し、21世紀初の世界恐慌を招いたのである。

LTCMの経営破綻もサブプライムローンの焦げ付きも全て、過度の楽観とリスク管理の甘さが原因である。Black-Scholesの公式においても運用上もっとも議論の焦点となるのはボラティリティ $\sigma$ の算定である。

これまでの株価の推移から推計したところで、今後も同様のボラティリティを持つとは限らない。また、これまでのアジア通貨危機やロシア金融危機、リーマン・ショックなどの金融危機が単純なランダムネスより起こったと考える事も社会科学としては強引に思える。リスク・ヘッジ(管理)を目的とした金融工学の理論が運用面でリスク管理の甘さを理由に信頼が失墜するというなんとも皮肉な結果となってしまったわけだ。リーマン・ショック以降、世界は金融規制強化と金融機関に関する救済措置をとり、リスク管理が強化された。この一件から金融工学の人気は下火となった。

## 9. 経済学理論と2次のカオス

結局、ブラック・ショールズの公式も万能な理論では無かった。経済学には様々な理論が存在するが、株式市場を正確に記述する理論は無い。恐らく将来的にも現れないであろう。そう言える理由はなぜか、それは経済学が未熟な学問だからとか、そういった類いの話では無い。社会科学全てが内在的に持っている自己相互作用がその原因である。それをこれから説明する。

まず、学問分野における“理論”とは何かについて考えてみよう。理論をネットで調べると、“個々の現象を法則的、統一的に説明できるように筋道を立てて組み立てられた知識の体系”と出てくる。しかし、分野ごとにその意味合いが変わる事を整理しよう。例えば数学で理論と聞くとガロア理論という言葉が浮かぶが、数学そのものが理論体系であるため、大抵、理論と呼ぶらず「確率解析」、「関数解析」、「微分幾何」、「表現論」などと数学の中の小分野として呼ばれている事が多い。数学における理論は「立場表明」に近いと筆者は思っている。筆者がよく使う確率解析では熱方程式や放物型偏微分方程式の解をBrown運動やその方程式を生成する確率過程の統計量として扱う事がある。そうする

ことによって、偏微分方程式に確率論的な解釈を与え、確率論として方程式を眺めようという試みなのだ。一方、これらの解釈は別の分野である偏微分方程式論で解析された結果と何一つ矛盾はしない。つまり、数学上同じ方程式を扱っていても解釈のみが異なるという意味で、数学における理論は数学的視点の立場表明といえるだろう。優れた視点の立場ではこれまで見えなかった数学の問題の解決方法を与えてくれる事がある。

物理学における理論は立場表明とは異なる。むしろ、理論と言え物理と考える読者も少なくないだろう。物理学の理論は数学的正しさよりも(むしろ計算さえ合えば厳密性は重要では無い)、現実の天体の運動や電子の運動に正確な予測を与える法則の記述と共に、かつて信じられていたある程度成功した理論を内包していなければならない。具体的な例で言えば相対性理論は線形近似として古典力学理論を含んでおり、ブラックホールを予言し、質量を持つ物体の運動は光速を超えることを禁止する。これは古典力学理論には無い情報であり、実際の観測結果や実験結果と一致する。物理学では古典力学理論は間違っている理論になる。つまり、理論に優劣があるのだ。また、相対性理論も素粒子の運動を記述できない点で間違っているのだが、それを記述できる量子論も重力を記述できていない。物理学における理論は現実の運動法則を正確に記述し、予測を与えることが優れた理論と考えられている[6]。

生物学における理論といえば進化論であろう。進化論は種の誕生の仕方からその繁栄までの法則を記述しているが、予測は与えることが出来ない。例えば「1000万年後、人類は存続しているのか」やそのとき、「どのような生活史と見た目をしているか」などといった情報を導くことは出来ない。この点を指摘して物理学者の中には、進化論は理論と呼べないと主張する人もいるらしい。進化の法則に関する記述は、観測や実験によって改訂が加えられており、現在も未完成である。優れた進化論の改訂は将来的に何か数値的な予測を与えられるかもしれない。

経済学理論はこれらの中では進化論に似ているところが多いように思われる。ケインズ理論のように需要によって供給が制約されるという、市場の法則を説明しているが、市場の動向を物理学のような運動方程式として予測を行うことはしない(出来ない)。ブラック・ショールズの公式を見ると物理学の理論のように見えるが、実はこれは数学、物理、生物学の理論と全く違う要素を含んでいる。もし、投資家が全員同じブラック・ショールズの公式を用いて投資行動を決めたらどうなるだろうか?その瞬間株価は式(1)に従わなくなり決定論的な値動きに変わるだろう。なぜなら投資家の行動が、予測可能だからだ。社会科学における自己相互作用とは経済学理論そのものが人々の行動を変えてしまうことである。

その歴史的例としてユヴァル・ノア・ハラリは名著：「サピエンス全史」の中で、カール・マルクスの「資本論」が果たした資本家の行動変化を指摘している。資本論は19世紀に産業革命によって生まれた工場労働者の搾取の問題を指摘して、将来的に労働者階級による社会主義革命が起こり、共産主義による公平な社会に世界が生まれ変わる事を予見した。本書によれば実際の工場労働者や農場労働者の労働環境は最悪であり、給料も少なく経営者による搾取が横行していたようである。1917年、ロシアにおいてレーニンによる10月革命が起こりソビエト連邦が誕生したものの、2023年現在では中国、北朝鮮、ベトナム、ラオス、キューバの5カ国が社会主義国家を維持している<sup>1)</sup>が、マルクスの予見は当たらなかったと言って良いだろう。それは、資本論を読み革命を恐れた支配階級が労働者に争議権や団結権、団体行動権を認めたりある程度の福利厚生を行う事で、労働者の不満に応えた事によるものだと説く。

アインシュタインが相対性理論を発表したことで、物理法則が変わることは考えられないが、経済学理論はそれ自体人々の行動に影響を与える場合がある。予測自体が未来に影響を及ぼすことを“二次のカオス(The second order chaos)”と呼ぶ[7]。株価は正規分布にしたがうランダムだと投資家全員が見なせば、株価は決定論に従い、それを出し抜こうと違う選択をすれば再びランダムに見える。これが、究極の株価の理論が存在しないと筆者が思う理由である。

## 10. まとめ

金融工学におけるオプション価格設定の理論は間違いない、経済学の1分野である金融を有効な数理科学に押し上げた素晴らしい理論である。LTCMの倒産やリーマン・ショックによって栄枯盛衰を経験したとはいえ、この功績は変わらない。現在もブラック・ショールズの公式とその後の研究によって生み出された数々のデリバティブが金融業界で使われている。しかし、ボラティリティの算定の難しさは理論の発展ともに未だに未解決な課題である。また、かつて程注目を浴びてはいないが、現在も研究は続いており、確率論学会などで日本における研究をお見受けする機会がある。株式市場という様々なスケールの人間の活動による複雑な動態を、確率という理論で表現した事は慧眼といえるだろう。まさに、“木を見て森を見ず”であった市場に森を見せたに違いない。

一方で、市場は完全なランダムとはえない事も事実だ。ロシア金融危機のように人々の“不安”が一国をデフォルトに導くことがある。日本は1991年のバブル崩壊以降、好景気と呼べるような経験していない。2010

年中国がGDPで日本を抜いたのは経済発展だけでなく、その市場規模が大きいからだ。これらを決めているのは明らかに人口規模とその構造である。90年代、日本は人口ボーナスと呼ばれる時代であり、少子化と相対的に少ない高齢者に加え、人口のボリュームが圧倒的に大きかった団塊の世代(1947~1949年生まれ)が40代という働き盛りだったため生産年齢人口(15歳~64歳)が多く、政府の財政は支出より収入が多い状況だった。EUが通貨統合を行い、域内のビザや関税などを撤廃して大幅に緩和した理由は市場規模でアメリカと日本に対抗したからである。

日本のバブル崩壊もアメリカのリーマン・ショックも全て不動産バブルの崩壊が原因である。また、今年になり韓国も不動産バブルが崩壊し、中国も不動産バブルの崩壊が始まったとされる。バブル崩壊のきっかけは、不動産高騰→政府の規制強化→バブル崩壊とストーリーがどこの国も共通である。日本は当時の大蔵省が91年「不動産融資の総量規制」と「地価税」を導入して不動産売買への期待が落ち、バブル崩壊、アメリカは低金利政策から金利を引き上げることによって低所得者の住宅購入意欲が減ったことでバブル崩壊、韓国も同様に金利引き上げに伴うバブル崩壊、中国は不動産所有を認められていない<sup>1)</sup>にも関わらず、政府規制によって大手不動産会社「恒大集団」が債務不履行となり、それによって連鎖倒産が始まっている。経済におけるイベントはこのように確率論とは言い切れない因果律も存在する。

市場経済は、統計的性質と決定論的性質の両方を併せ持つ。これは、本当の意味で複雑系である[8]。債務者の信用や人々の不動産価格上昇への期待といった数値化する事が難しい社会機運が不動産バブルを形成する点は1モデル屋としては数理経済学のテーマの難しさを感じる場所である。とはいえ、ボーナスが入ればすぐに散在してしまう筆者にとっては株式投資やNISAですら縁遠い話であるので現実的に金融工学と向き合うことは無いであろう。著者が門前の小僧となったのは00年代の確率微分方程式の教科書には必ず応用例や章として金融工学のモデルが紹介されていたからだ。

## 参考文献

- [1] ベリー・メーリング (著), 今野 浩 (監訳), 村井 章子 (訳) (2006). **金融工学者 フィッシャー・ブラック**. 日経BP社.
- [2] 木島正明 (2002). **経済学入門シリーズ/金融工学**. 日経新聞出版社.
- [3] S.E. シュリーヴ (著), 今井 達也 (翻訳), 河野 祐一 (翻訳), 田中 久充 (翻訳) (2006). **ファイナンスのための**

<sup>1)</sup>現在ロシアは一応、資本主義、民主主義国である。

<sup>1)</sup>国から最大70年借用するという形で国民は居住が許される。

- 確率解析 II (連続時間モデル). シュプリンガー・フェアラーク東京.
- [4] 石村 貞夫 (著), 石村 園子 (著) (1999). **金融・証券のためのブラック・ショールズ微分方程式—微分の初歩からやさしく学べてよくわかる**. 東京図書.
- [5] ジョン・アレン・パウロス (著), 望月 衛 (著), 林 康史 (著) (2004). **天才数学者、株にハマる 数字オンチのための投資の考え方**. ダイヤモンド社.
- [6] デイヴィッド ドイツチュ (著), David Deutsch (原名), 林 一 (翻訳) (1999). **世界の究極理論は存在するか—多宇宙理論から見た生命、進化、時間**. 朝日新聞社.
- [7] ユヴァル・ノア・ハラリ (著), 柴田裕之 (翻訳) (2016). **サピエンス全史 (下) 文明の構造と人類の幸福**. 河出書房新社.
- [8] 吉田善章 (著) (2008). **非線形とは何か 複雑系への挑戦**. 岩波書店.
- [9] F. Black, M. Scholes, The pricing of options and corporate liabilities, *Journal of political economy* 81 (3) (1973) 637–654.
-

## 学会事務局からのお知らせ

### 1. 2023年日本数理生物学会年次総会のお知らせ

2023年の年次総会が日本数理生物学会年会(2023年9月4~6日 奈良女子大学)に合わせて開催されます。詳しい日時と場所などについては、BiomathメーリングリストやWebページなどでお知らせします。

議題(予定)

- (1) 2024年度、2025年度の役員について
- (2) 2023年度決算および2024年度予算の執行状況
- (3) その他

### 2. 第18回(2023年度)日本数理生物学会研究奨励賞受賞者のお知らせ

研究奨励賞選考委員会から2023年度研究奨励賞選考の結果が運営委員会に報告され、運営委員会において授賞者が決定しました。受賞者は次の2名です。

伊藤 公一氏 (北海道大学・地球環境科学研究院)  
藤本 悠雅氏 (総合研究大学院大学・  
統合進化科学研究センター)

お二人には、2023年度の日本数理生物学会年会で受賞講演を行なっていただく予定です。

### 3. 会費納入のお願い

日本数理生物学会の年会費(1~12月の1年分)は

正会員 3000円/年  
学生会員 2000円/年

です。会員は年会で発表や学会役員選挙における投票をすることができます。また会員は数理生物学会年会の登録費割引の特典を受けることもできます。今年度または過去の会費が未納の方は、以下の会員管理システムより会費納入をお願いいたします。

<https://jsmb.smoosy.atlas.jp/mypage/login>

会員管理システムよりクレジットカード決済と銀行振込(バンクチェック)による会費納入が可能となっていますので、是非ご利用ください。会員管理システムの操作方法が不明の場合は、学会HPやニューズレター(第93号)をご確認ください。

### 4. 事務関係のお問い合わせ

入会、退会の申し込み、会員情報(所属、住所、ニューズレターの送付先など)の変授賞者更や、会費の納入状況の確認などは会員管理システムより可能となっております。それ以外の事務的なことなど何かございましたら、事務局([secretary@jsmb.jp](mailto:secretary@jsmb.jp))へお問い合わせください。

### 5. 事務局連絡先

幹事長 黒澤 元  
(理化学研究所 数理創造プログラム)  
会計 瓜生 耕一郎  
(東京工業大学 生命理工学院)  
幹事 中丸 麻由子  
(東京工業大学 環境・社会理工学院)  
幹事 山口 幸  
(東京女子大学 現代教養学部)  
〒351-0198 埼玉県和光市広沢 2-1 理研 iTHEMS  
黒澤元 E-mail: [secretary@jsmb.jp](mailto:secretary@jsmb.jp)

### 編集後記

この編集後記を書いている時、インタビュー記事がほぼ完成した状態となり9月号は大きな遅れもなく印刷、配布できるのではないかと考えています。2022年9月号ではインタビュー企画を休載させていただきました。また、2023年発刊時には原稿がまだ完成していませんでしたので、2023年5月号ではインタビュー記事2編を掲載するに至りました。今号では、2022年度の卒業論文、修士論文、博士論文のまとめ、数理生物学交流会の記事、名古屋大学の小島さんによる特別寄稿と様々なテーマの記事が掲載されました。インタビュー企画を進めるにあたって、文字起こしが非常に大変であることを改めて実感しました。最近はやりのAI文字起こしソフトを使ってもうまく認識しなかったり、音声を聞かなければ認識できない言葉、聞いても勘違いしてしまっている言葉も多々ありました。議事録を書く(書かされる?)時には異なる難しさを感じた編集でした。また、編集委員は各自の業務に加えてJSMBニューズレター編集への対応してもらっていますので大変感謝をしております。何だかこの号で最後の担当になったような書きぶりになってしまいました。

たが次の号が現編集委員会で担当する最後の号になりますので楽しみにしていただければ幸いです。

日本数理生物学会ニュースレター No98

2023 年 5 月発行

編集委員会委員 岩田繁英\*, 大泉嶺, 酒井佑楨

(\*が委員長)

siwata0@kaiyodai.ac.jp

国立大学法人 東京海洋大学

〒108-8477 東京都港区港南 4-5-7

発行者 日本数理生物学会

The Japanese Society for Mathematical Biology

<http://www.jsmb.jp/>

印刷・製本 (株)ニシキプリント PDF 版

---



## TABLE OF CONTENTS

Newsletter of the Japanese Society for Mathematical Biology No. 100 May 2023

|  |      |    |
|--|------|----|
| 【第8回 数理生物学交流発表報告記】                                 | 佐藤一憲 | 1  |
| 【特集】2022年度 卒業論文・修士論文・博士論文                          |      | 2  |
| インタラクティブな場としての数理科学・コミュニケーション試行                     | 小島響子 | 4  |
| 【科学史対談～外から見た数理生物学～】<br>第4回 数理・データ・実装につながる科学への展望    |      | 6  |
| 【科学史対談～外から見た数理生物学～】<br>第5回 物理科学を通して見てきた数理生物学       |      | 15 |
| 【数理モデルのロストテクノロジー】<br>第5回 金融工学の栄枯盛衰～数理モデルは何を見逃したのか～ | 大泉 嶺 | 22 |
| 事務局からの連絡   |      | 31 |
| 編集後記   |      | 31 |

