

TABLE OF CONTENTS

Newsletter of the Japanese Society for Mathematical Biology	No. 102	Feb. 2024
年頭のご挨拶	時田恵一郎	1
【2023年研究奨励賞受賞者特別寄稿】		
1. 備忘録	藤本 悠雅	3
2. フィールド研究者と生態学を「覗きこもう」	伊藤 公一	10
【特集記事】		
数でとらえる数理生物学会		17
原稿募集のお知らせ		21
学会事務局からのお知らせ		22
編集後記		24

日本数理生物学会

ニュースレター

第102号

2024年2月



年頭のご挨拶

時田恵一郎*

コロナ禍もようやく明けたかなと思っていたところ、元日に能登半島で震度7の大地震が発生し、甚大な被害が出ました。ご家族を含め会員の皆様の中にも被災された方がおられるとお聞きしております。心よりお見舞い申し上げるとともに、一日も早い復興を願ってやみません。不穏な年明けとなりましたが、学会事務局としましては、会員の皆様、特に若手研究者の方々を盛り立てる事業を引き続き積極的に展開して参りたいと思いますので、本年もどうぞよろしくお願いたします。

現事務局の任期も残すところ後半の1年となりました。昨年末にはe投票による次期会長・次期運営委員選挙がオンラインで実施され、山内淳さんが次期会長に選出され、同時に副会長に就任されました。これにともない、瀬野裕美前会長が副会長を退任されました。瀬野前会長の4年に渡るご尽力に感謝申し上げます。また、中田行彦前幹事長には引き継ぎの後もSlackの学会ワークスペースに残っていただき、折々に現事務局を助けて頂きました。ありがとうございました。

なお、選挙につきましては、e投票にアップロードする会員名簿の(会員の異動にともなう地区変更などの)アップデートなど煩雑な作業があったこともお聞きしております。選挙管理委員会には、黒澤元幹事長、瓜生耕一郎会計幹事の他、三木健さんにもご参画いただきました。遅滞なく選挙を進めて頂きありがとうございました。

昨年は4年ぶりに奈良女子大学において年会对面開催されました。同時にオンラインでの口頭講演も実施され、本会初のハイブリッド開催となりました。大会実施委員長の瀬戸蘭美さんの大会報告書(ニュースレター第101号)にもあるように、参加者数、発表者数ともにコロナ以前の水準以上に復活して大変な盛会となりました。Confitによる参加申込・演題登録の利便性向上は会員の皆様も実感されたのではないかと思います。また、皆様の中にもハイブリッド授業の難しさを痛感されている方も少なくないと思いますが、会期中は音声・映像のトラブルもなく会場とオンライン参加者のシームレスな質疑応答が実現されていたの

は大変印象的でした。八面六臂の活躍で年会对面を大成功に導いた瀬戸さんに改めて厚く御礼申し上げます。年会では研究奨励賞受賞者の伊藤公一さん(北大)と藤本悠雅さん(総研大)の授賞式と受賞講演も行われました。お二人の研究内容につきましては、本号掲載の受賞報告をご覧くださいと思います。

今年の年会は中岡慎治大会実行委員長のもと北海道大学で開催される予定です。事務局も全面的にサポートして参りたいと思っております。皆様も奮ってご参加ください。また、その際は、座長やポスター賞審査員などへのご協力もお願いいたします。さらに、合わせて開催される予定の数理生物学若手の会にも学会から資金援助をしたいと考えております。若手・学生会員の皆様は奮ってご参加の上、同世代の仲間たちと「銀の龍の背」に乗る準備に勤しんでもらえればと思います。

昨年は6月27日から7月1日にかけて韓国済州島で第8回日中韓印数理・理論生物学国際会議(CIJK2023)が開催されました。JSMBを代表して私もCo-Chairとして参画しました。この会議には中国、インド、日本、韓国、ベルギー、アメリカから過去最大の270名もの参加登録があり、6つのプレナリー講演、29のミニシンポジウム、4つの一般講演セッション、43件のポスター発表が行われました。JSMBからは巖佐庸さん、李聖林さんがプレナリー講演を、岩見真吾さん、瀬戸蘭美さん、中岡慎治さん、中田行彦さん、守田智さんが招待講演者としてミニシンポジウムを企画・運営してください。JSMBのプレゼンスをおおいに示してくださいました。改めて厚く御礼申し上げます。

また、昨年のCIJK2023に際しては、ファンドを持たない若手研究者・大学院生の会員のために、「若い芽を育む会」からの寄付金を使って旅費宿泊費を助成するという新たな事業を展開しました。他国の若手・大学院生はポスター発表の方がほとんどという状況下で、助成を受けた7名の日本人の若手・大学院生の方々は全員立派に口頭発表されていて、大変頼もしく感じたことを記憶しております。これらの方々の参加報告は、学会ホームページにJSMB Bulletinsというページを作り公開しておりますので、是非御覧ください。

次回のCIJK2025国際会議は、望月敦史大会会長の

*名古屋大学大学院情報学研究科

もと、本会年会と融合し、さらに従来の4カ国以外にも広くアジア諸国の参加者を募って「アジア数理・理論生物学国際会議」として京都で開催する予定です。すでにJSMB会員を中心にLOCも構成されており、近日中に会場も決定し、1st circularも全世界に配布される予定です。この会議についても、ファンドを持たない若手研究者・大学院生の会員のために参加登録費の補助などを行う予定です。

なお、今年は北米数理生物学会 (SMB) と韓国数理生物学会 (KSMB) の合同大会も韓国ソウルで開催されます。こちらでもJSMBを代表して時田と李聖林さんが大会運営委員として参画し、望月敦史さんのプレナリ講演も行われます。近場でSMB会員と交流する絶好の機会でもありますので、奮ってご参加ください。この会議についても、ファンドをもたない若手研究者・大学院生の会員の旅費宿泊費等を助成する予定です。

ニュースレターにつきましては、すでに昨年10月から新しい編集委員会に引き継がれております。前編集委員会の岩田繁英委員長、大泉嶺さん、酒井佑禎さん、2年間ご苦勞様でした。個人的にも様々な新たな企画の記事を楽しく拝見しました。新しい編集委員会

の三浦岳委員長、今村寿子さん、内海邑さん、國谷紀良さん、これから2年間どうぞよろしくお願いいたします。三浦委員長は、Overleafというクラウド上での \LaTeX 編集システムを導入され、ニュースレター編集作業のDX化をさらに推進してくださっています。実は本稿もOverleafにログインして書いておりますが、複数人による編集作業とその履歴を一元管理することができて大変便利です。個人的にも、共同研究者と同時並行で論文を書き進め校正するのに大変重宝しております。会員の皆様もニュースレターに寄稿される際は是非Overleafを使って頂ければと思います。

昨年は学会ホームページをWordPressに移行しました。これによりクラウド上での複数の管理者による同時編集が可能になりました。また、翻訳プラグインにより12カ国語での閲覧が可能となっております。上記のJSMB Bulletinsは学会紀要として会員の皆様からの各種記事を全世界に公開していく予定です。

気の重い新年の幕開けとなりましたが、よりよい学会にしていくためにこの一年も事務局ともども努力して参りたいと思います。会員の皆様のご支援ご鞭撻をどうぞよろしくお願いいたします。

【2023年研究奨励賞受賞者特別寄稿 1】

備忘録



藤本悠雅*

1. はじめに

この度研究奨励賞をいただいたこと、大変光栄に思います。賞の名に恥じないよう、しかれど賞の名に満たされもしないよう、これからより一層励んでいく所存です。この場をお借りして、これまで自分と共同研究をしてくださった指導者の方々、普段から学会から私生活に至るまで自分と仲良くしてくださっている方々にお礼申し上げたいと思います。

そしてありがたくも自由に寄稿する機会をいただきました。何を書くべきかとても迷いましたが、他に書くこともありませんので、今までの自分の研究について背景も交えながら語ってみようかと思えます。振り返ってみればみるほど失敗ばかりで、賞の威信を損なわないか心配になるほどですが、それでも、自分よりも年少の方々には一人の失敗を反面教師にしてもらうくらい、逆に年配の方々には一人の不出来な学生がどのような思考回路をしているのか知ってもらうくらいにはなるかもしれません。

2. 自己満足な理解

自分は宮崎の片田舎で育ちました、特に小学校の前半年なんかはその最たるもので、1学年1クラスのみで9人、全校生徒足しても50人という村に住んでいました。こうなるともうすごいのです、どこから侵入したのか部屋に天井から蛇が落ちてきて職場の親に電話をするような大騒ぎになったこともあり、ちょっと百足や蜂が出たくらいではそれほど驚かなくなってしまう。とにかく人と人ならざるものの生態がそこらで交わっているという感じで、それで生物の生態に興味を持ったことが最終的に数理生物学を志すきっかけに…と書き出したところなのですが、そんなことはありません（田舎のエピソードは全て本当ですが）。幼少の頃から好きで得意だったことは、辺境生活とは無縁で、算数とコンピュータゲームでした。ドラえもん「○○がわかる」みたいなシリーズの漫画で四則演算をマスターし、個人的にお気に入りだったのはつるかめ算のような問題でした。当時は、頭の数と足の数

だけからツルとカメの頭数が求められるというのが逆説的で、けどパズルのように解くことができ、とても面白いと思ったのです。コンピュータゲームについても同じ理屈が成り立ちますが、おそらく物事のルールを理解して何らかの正解を導くことが好きだったのだと思います。ただ、中途半端に頭が回ったため、あまり人の言うことを聞いたり人からものを習ったりせず、全て自分の中で理解ができてればいいという下手な成功体験を得てしまいました。そんな自己満足な理解は大学に入るまでは通用しましたが、その先で大きな困難をもたらすことになりました。

3. 勉強の仕方がわからない (B1-3)

挫折は大学に進学直後に訪れました。というよりは、挫折はとっくに発生しており、大学生活で初めて表面化したと言った方が正しいのかもしれませんが。高校の頃ろくに教科書や参考書で勉強していなかったのが災いして、大学で習うことが全く理解できなかったのです。高校と大学の授業の最大の違いは、学習課題の多様性と抽象性にあると考えています。高校の頃は一つの科目を一直線に深めていくものですし、目的としても問題が解ければよいというものでした。一方で、大学では同時並行して様々な分野を学ぶ必要がありますし、最終的なゴールが現象を理解することにあるため学習の実感が得られにくいということもあります。他にも、サークル活動や友人づきあいなどでそもそも勉強を疎かにしてしまったことなど言い訳が効かない要因もありますが、私の成績は最悪なものでした。

試験の点数が悪すぎて行ける学科にはあまり選択肢はなく、進学振り分けでは後期教養の統合自然科学科に進みました。その理由はそれでも基礎的な理論を学んでみたいと思ったからに尽きます。しかし、今はその選択に心の底から感謝しています。受けてみたら数学（確率論や力学系）や物理（統計力学）の授業内容が性に合ったこと、理論に進む上で必要な知識が学べていない危機感がようやく芽生えたことが理由で、B3くらいから毎日徹夜で教科書を読むようになりました。初学でわからないこと自体は仕方ないのですが、どのように努力すればわからないのがわかるようになるかがわからないのは理不尽に辛いことでした。最

*総合研究大学院大学 先導科学研究科 特別研究員（学振PD）、東京大学 生物普遍性研究機構 客員研究員、CyberAgent AI Lab 協働研究員

最終的に私が気づいた学問の学習法は以下のようなものでした。

- 数学とは、定義から定理を導く学問である¹⁾。よって途中で躓いたときには定義に立ち返れば必ず理解することができる。
- 物理とは、自然現象を数式で定義する学問である²⁾。その定義に基づき定理を導き、その後定理を自然現象に還元しなければならない。

信じられないかもしれませんが、私はこのような自明なこともわかっていなかったのです。しかし、この自明なことを知りたかった後悔があり、ここに記しておこうと思います。

現在私が研究で取り扱う枠組みになっているゲーム理論にもこの頃に出会いました。学科の授業にない分野に関する参考書を読んでみようと思ったことがきっかけでした。ゲーム理論は、複数の個人が独立に行動選択をし、その結果として各個人が利得を得ることを考えます。各個人の最適な行動選択、すなわち解を導くのがゲーム理論の目的です。この解概念のうちの一つがかの有名な Nash 均衡になります。Nash 均衡は各個人がそこから戦略（行動選択）を変えても利得が上らない状態として定義されます。しかし、ここで一般に利得が全員の行動に依存する状況を見ると Nash 均衡を導くのはややこしい問題になります。個人の最適な行動（最適応答と言います）は他者の行動に依存して変化するため、全員が最適な戦略をとる状態を探すことはとても困難になるのです。言い換えると、たとえ個人が自分の行動選択を最適化しても、Nash 均衡にたどり着くことは困難であるということになります。

また、仮に Nash 均衡が達成されたとしても、それが集団全体の利得が最大化されない場合があります。その例も有名な囚人のジレンマであり、それは二人の囚人がそれぞれ罪を自白するか黙秘するかを次のようなルールの下で迫られる状況を考えます。

- 両方とも黙秘をした場合には罪は2年ずつである。
- 片方だけが罪を自白をした場合には、自白をした方は釈放（罪は0年）し、黙秘をした方は罪は5年。
- 両方とも罪を自白をした場合には罪は4年ずつである。

このルールの下では、相手の選択に関わらず個人の最適な行動は自白をすることだと確認できます。にも関わらず、二人とも自白をするよりは、二人とも黙秘する方が得です。よって、個人が自分の利益を大きくす

る戦略をとって Nash 均衡を達成しても、全体合計の利益が損なわれる（ゆえにジレンマと言います）状況が存在するわけです。ちなみに、この囚人のジレンマには部分的な解決法があります。ジレンマを解消して両者合計の最大利得を達成する鍵は、同じゲームを何回もプレイすることです。慣例として黙秘=協力、自白=裏切りと言い換えますが、個人が前回相手が協力してきたら協力を、裏切ってきたら裏切りを返すというしっぺ返し戦略をとることを考えます。今、相手がかしっぺ返し戦略を使うと仮定すれば、自分は裏切った分だけ裏切り返されてしまうだけなので、長い目で見れば協力をし続けるのが最善になります。よって、両者がしっぺ返し戦略を使えば協力が Nash 均衡になるのです。

このように、ゲーム理論では個人の最適性から全体の均衡を求められなかったり、全体の均衡が全体の最適性と矛盾したりします。私が強くゲーム理論に惹きつけられたのは、そこに個と全体の複雑な関係性についての哲学的な問いが含まれていると感じたからです。なんでも自己満足に理解をしていた自分ですから、当時抱いていた最大の疑問も「社会（=全体）のルールが人（=個）を規定する一方で、人が社会のルールを作っているなんて不思議だなあ」なんて素朴なものでした。ゲーム理論にはそのような疑問でも数理的に議論できる懐の深さがあると感じたのです。

4. 研究の仕方がわからない (B4)

卒業研究では、沙川貴大さん³⁾に指導してもらいました。あの情報熱力学の沙川さんです。卒業研究で研究室見学に行ったときに、階層ゲームという、個人は集団にコストを支払い、集団間では個人から集めたコストを使って競争をするゲームを勧められました。自国民の税金を使い、国同士が資源を巡って武力競争をする状況を考えればイメージしやすいと思います。このとき一つの国の中では、各国民は他の国民の税金にたどり着きたいので、国全体のためには税金を納めるべきなのに納めたくないというジレンマがあります。一方で、国の間では、資源を巡る上で優位にたつために、世界全体のためには軍拡の税金を集めるべきではないのに集めたいというジレンマがあります。このように、個人レベルと集団レベルで逆の目的、そして逆のジレンマが存在しています。この言わば階層的ジレンマは私にはとても不思議なテーマに思えました⁴⁾。

³⁾ 学生時代、指導教員に先生をつけないことを教育されました。ここでは、尊敬と感謝の気持ちとは独立に全員「さん」づけで呼ばせてください。

⁴⁾ つけ加えて、本当に偶然ですが、B1のときに社会実験のアルバイトで同じような階層ゲームにプレイヤーとして参加していたことから運命めいたものを感じたのです。

¹⁾ そもそも私は定義と定理が違う概念だと気づいていませんでした。それまでは両方とも自然に成り立つ概念のことだと思っていました。

²⁾ 当時は数学か物理のことばかり学んでいたため、このような極端な分類をしてしまいました。しかし、これと同じことは数理生物学にも言えると思っています。

課題をもらったまでは良かったのですが、研究はすぐに停滞しました。先行研究を読んでみると階層ゲームのモデルには様々なバリエーションがあり、結果もモデルに応じて大きく変化したため、とても混乱したのです。それでも階層ゲームにおいて普遍的な性質みたいなものを導いてやろうともがいていましたが、何も進まないまま3ヶ月が過ぎてしまいました。ある日、とうとう沙川さんが痺れを切らして「まずはモデルを決めないと話にならないよ。例えば、個人の戦略をコストとして…」とモデルを提案してくれました。そう言われて、ようやく私は「新しいモデルを作り、新しい現象を出現させ、その現象を調べること」が研究になると気づきました。任意の望ましい結果を出すモデルは作れると考えていたので、この何でもない気づきが自分には衝撃的でした。その問題が解決してからはとても速いものでした。沙川さんが与えてくれたモデルは残念ながら新しい現象が出るものではありませんでした。そこで、私は雑学から、人口の大きい集団ほど α のべき乗にしたがって集団間の競争に有利になるというLanchesterの法則をモデルに組み込むことを考えました。すると、この α の値によって、最適な集団サイズが変わり、個人が利得を最大化しようと集団を組み変えることによって、一つの集団に固まったり複数の集団に分裂したりするふるまいが見られたのです。通常の階層ゲームでは個人のNash均衡を調べることが目的になるので、Nash均衡での利得を上げるために個人が集団を組み替えるというのは新しい視点でした。この研究は修士以降に引き継がれて、自身初の論文[1]になりました。このFujimoto, Sagawa, Kanekoという豪華なメンツに支えられて出版された論文は、残念ながら大きな反響を得られませんでした。反省点はたくさんありました。階層ゲームについての先行研究がたくさんあったこと、その中で自分の設定の妥当性が際立っていなかったこと、得られた結果と現実との対応が弱いことなどです。しかし、まずは自分で新しいモデルを作ってみる、新しい現象を出してみる、結果を図に出力してみる、論文として文章にまとめてみる、そういう経験そのものに価値があったと思っています。

5. 発表の仕方がわからない (M1-2)

私は修士と博士を金子邦彦さんの指導の下で過ごしました。金子さんは私に階層ゲームを続けることを勧めており、私も初めはその勧めに従っていましたが、すでに階層的ジレンマ自体は未知な現象ではないと判明してからはモチベーションが下がっていました。

私が思いついたのはやはり素朴なアイデアで、ゲーム理論と力学系を組み合わせて個人間の戦略の読み合いを表現するというものでした。前回は沙川さんにモデル構築の最も基礎的な部分を提案してもらったので、

実質的に今回が初めてのモデルでした。当時は自分でも何をやっているのか分かりませんでした。今振り返ると心の理論をゲーム理論でやりたかったのだとわかります。心の理論を理解するには、以下のような思考実験を考えるのが早いと思うので紹介します。

- 三人全員に黒い帽子を被らせます。
- もし他の二人が白い帽子を被っていたら、手を挙げるよう命じます。
- 自分の帽子の色がわかったら言ってください。

一番頭のいい人が自分の帽子の色は黒であると気づきます、というも以下のように考えるからです。「自分の帽子がもし白だとすると、他の二人は『もし自分の帽子が白ならばもう一人が手を挙げるはずである。そうならないということは自分の帽子は黒である』と気づくはずである。そうならないということは自分の帽子の色は黒である」という具合です。この思考実験が教えてくれるのは、心の理論では自分の中に他人を作ることによって初めて導き出せる結論が存在するということです。心の理論をゲーム理論に取り入れることによって、集団は新しい均衡に到達できるのではないかと考えたわけです。

具体的には、個人が連続値の行動を持つゲームを考えました。例えば、二人の個人 X, Y がコスト $x, y \in \mathbb{R}$ の支払いを決めるような状況を想像すれば良いと思います。そして、個人 X が相手の行動 y に対して自分の行動 x を与える関数 $x = f(y)$ を自分の心の内部に戦略として持ちます。 Y も同様に $y = g(x)$ を与える関数 g を戦略として持ちます。ここで、 X が相手の心の関数 g に対してより良くなるように関数 f を変化させれば、相手の心を読み取って新しい自分の心を生成していることとなります。それをお互いに実行することで、心の理論をゲーム理論に取り入れることを試みたのです。

新しい試みだけではなく、今回は私自身が自信を持って面白い結果を出すこともできました。この関数 f の定義の中には3章で紹介した最適応答(f^B)も含まれます。この f^B は特に相手の行動それぞれに合わせて自分の最適な行動を決める心を表しています。この f^B に対して最適な関数 g^L はある定数関数として与えられます。つまり、 g^L は相手の行動に依存せず自分からある行動を決める心を表しています。面白いのは、逆も然りで f^B が g^L に対して最適な関数になっているという点です。これは、 f^B 「相手に合わせて自分が最適な行動を決定する心」と g^L 「相手に合わせず自分が率先して行動を決定する心」が互いに最適な関係をとることを示しています。さらに面白いのは、 f^B と g^L により達成される均衡がNash均衡とズレることです。このような主従関係の最適性を議論できるのは面白いのではないかと信じていました。

これらのモデルと結果を研究室セミナーでお披露目しましたが、これが問題を巻き起こしました。私のス

ライドにイントロダクションがなくモデルから始まったからです。怒るというよりは呆れ果てるという感じで、イントロがないことに全員から総ツッコミが入り、たしか20分くらいは最初のスライドから進むことがありませんでした。モチベーションを問われますが、私にもこれが何をしたいモデルなのかがわかっていないので碌なディフェンスができるわけありません。結局、情けで無理矢理スライドを進ませてもらいました。ところが開始の空気とは全く裏腹に、セミナーの内容は研究室メンバーから絶賛してもらえました。単純にコンセプトが面白いと思ってもらえたとか、あるいは関数同士が動いていくのがとある金子研のOBの研究で有名な「関数マップ」の研究を彷彿させたとか。幸いなことに、たとえイントロの欠けている文脈づけがなされていない研究であっても、何か面白い問題を考えようとしている、あるいは新しい枠組みを作ろうとしているものは受け入れられるべきという寛容さが金子研には漂っていました。その寛容さに私は何度も救われてきましたし、人の研究にもそういう寛容さを持つようと思います。ちなみに金子さんも面白いと感心してくれましたが、後日「Norbert Wienerはアルコール中毒で手が震えていたから制御の理論を作った。君は、(あんなイントロのないセミナーをするなんて)人の心がわからない!だから、人の心を読む理論をやったんだねえ…」とひどい皮肉を受けました。そういう研究室でもありました。

しかし、これをまとめた論文 [2] もあまり反響を得られませんでした。それは自分が論文を書く中で薄々勘づいていたことでした。一番は f^B と g^L により達成される均衡がすでに Stackelberg 均衡として知られていたことだと思います。また、こういう心の理論をゲーム理論的に取り入れようとする試み自体はいろいろな形でなされており、その優劣性を示すことができなかったこともあります。それと関数があり複雑に動いてくれず、関数マップのコンセプトを活かしきれなかったことも要因だと思います。曖昧に面白いものに対する研究界隈の評価はシビアです。やはり同じ研究でもそのイントロ、すなわち位置付けによって価値が大きく変わってくると思います。この失敗から、論文を書くなら文脈を示して新規性を明確にしようという意識が大きくなったと思います。

6. 満足のいく研究、でも失敗 (D1-3)

運がいいことにリベンジの機会はすぐに訪れました。心の理論の力学系が囚人のジレンマゲームのような離散的な行動があるゲームにも適用できることがわかったのです。これまで「心の理論」の力学系などと偉そうなことを言ってきましたが、結局それは3章で取り扱ったしっぺ返し的一般化戦略、すなわち reactive 戦略を使う個人間の学習でした。一般化というのは、

個人の戦略が相手が前に協力をしたか裏切ったかそれぞれに対し、別の確率 $x_C, x_D \in [0, 1]$ で協力し返すことができるという意味です。実際に、しっぺ返し戦略は reactive 戦略の特殊な例で $(x_C, x_D) = (1, 0)$ に該当します。

このような reactive 戦略同士の学習を定式化するのは技術的に困難です。一つには、自分の行動選択によって将来のゲームにおける互いの行動が変化するので、どの行動が得かを議論するのが難しいからです。もう一つには、条件付きでしか使われない複数の戦略変数 x_C, x_D を同時に学習していく必要があるからです。その定式化を実現したのが、関数を導入する見方でした。個人 X の戦略は x_C, x_D によって与えられる関数 f で記述することができます。そして、定常状態の X, Y の関数 f と g の交点が達成されると考えることができ、互いに相手の関数との交点で最大利得を達成するように自身の関数を動かすものと学習過程を解釈できたのです。

面白い結果として、片方が片方を一方的に裏切る搾取的な状態が達成されることがわかりました。そこで、搾取する側は相手が協力しても確率的に裏切り返すという、しっぺ返しよりも心の狭い戦略をとります。一方で、搾取される側は相手が裏切っても確率的に協力し返してしまうという、しっぺ返し線よりも心の広い戦略をとります。さらに面白いのは、この搾取的な状態が初めは似通っていた戦略をとる個人間で、片方はより心が狭くなり、片方はより心が広くなることで対称性を破って発生するという点でした。

設定がシンプルであること、非自明な解析を含んでいること、現象が面白いこと。自分としては初めて満足のいく渾身の論文 [3] になりました。しかし、レビューにはあまりウケませんでした。くやしかったため、本研究を拡張し、reactive 戦略では相手の行動しか参照できなかった点を一般化し、プレイヤー間で参照できる情報に非対称性がある状況を考えました。そして、情報の非対称性がプレイヤー間の搾取関係にどう関係するかを分析しました。しかしこれも、物理のより専門的な雑誌にしか通らず [4]、さらに悔しい思いをするだけでした。今振り返ってあえて要因を述べるなら、論文執筆の質が低かったように感じます。そのようなレビューを実際にももらいましたし、今見ると論文の構成や数式がゴチャゴチャしてテクニカルペーパーに映ります。それと、そのような自分の執筆力不足を差し置いて述べるなら、そもそも学習過程を力学的に分析するのは実験検証性が低く、あまり物理の分野では重要視されないのかもしれないかもしれません。物理の分野で戦いたければ、もっと派手なダイナミクス現象が必要なのだと思います。言い換えれば、最適化の論文としてではなく、力学系の論文として勝負するしかないということです。

しかし、余談ですが、最近は少しは状況が好転してきたように感じます。学習の力学系が評価されるのは計算機科学の分野にありました。3章で述べたように、一般に Nash 均衡を求めるのは（計算量的に）複雑な問題であり、個人の学習から Nash 均衡に到達できる学習アルゴリズムが求められています。それに付随して、学習アルゴリズムの力学的な挙動自体も興味を持たれているのです。今回のモデルは性質の良いアルゴリズムの一つである replicator dynamics を取り扱っており、このアルゴリズムにプレイヤーが過去の履歴を参照して行動を決めるしっぺ返し戦略のような能力を一般に組み込んだこと [5]、さらにプレイヤー間にこの能力差があることで Nash 均衡に到達することができるという力学的に面白い現象も得られたこと [6] が評価され、トップ会議に通すことに成功しました。内容を変え場所を変え、諦めず筆を引き続けることは重要だと思います。

7. 論文の書き方がわからない (PD1)

博士取得も迫る中、行き先に迷っていた私に伊藤創祐さんは少しの間なら居ても良いと声をかけてくれました。私が沙川研で B4 をやっているときに、伊藤さんは D3 としてときどき来ており、交流が続いていたという縁もあり、お世話になることにしました。とはいえ、伊藤さんの研究テーマは純粋な物理である熱力学でした。せっかくだから何か一つやってみようと思いつきで始めたのが、熱力学における部分エントロピー生成の最小化問題をゲーム理論の観点から考えるというものでした。エントロピー増大則（＝熱力学の第二法則）はみなさんもよくご存じのことだと思います。エントロピー生成はエントロピーの時間増分のことを表しており、情報熱力学という分野では、このエントロピー生成を部分系ごとに分割するということがなされます。部分エントロピー生成として分割することによる旨味は、片方の部分系が別の部分系に部分エントロピー生成を押しつけることで、その部分系内ではエントロピーが減少するという、一見すると第二法則が破れている現象を記述できる点にあります。この研究で私が考えたのは、全系としては達成しなければならぬ課題があり、その課題をこなす上で部分系にエントロピー生成が発生する状況です。エントロピー生成は熱散逸にもつながるため、最小化されるべきものです。部分系としてはプレイヤーとして自身の部分エントロピー生成を最小化しながら全系としての課題を達成しなければならないという、ゲーム理論的な視点が熱力学の問題に導入されるのです。

テクニカルな計算から、タスクを達成するためのエントロピー生成が、部分系 X と Y それぞれが行わなければならないエントロピー生成 Σ_X^{min} , Σ_Y^{min} 、そして二つの部分系どちらがやっても良いエントロピー生成

Σ_{XY} の3つの量に分割できることがわかりました。さらに、部分系間にタスクを重視する程度の差があることで、片方の部分系がもう片方に Σ_{XY} を多く押しつけることがわかりました。このようなエントロピー生成の押し付けは実際の生物でも観測されている現象で、このような現象が部分系が進化することから得られることを示しました。

説明を読んで一目瞭然だと思いますが、本研究は私がこれまでやった中では最も正統派物理に近いものです。計算や結果に関してはすぐに方が付きましたが、それを論文にまとめるときに伊藤さんからたくさん注文がつかまりました。一番大きいのは数式に関することでした。物理的に意味のある量を変数として定義し、添字にその次元を適切に表すよう意味を持たせること。次元の計算を理解しやすくするために、ベクトルや行列による表記を検討すること。などなどです。結局これらの意味は数式を物理的に意味があるように構築することに尽きるのですが、やってみると意外に難しかったのです。おそらくそれまでは明確な先行研究のない論文を書いていたため、数式に嘘さえなければ多少好きに数式を用いて良いというお目溢しをもらっていたのだと思います。レターとして通用するような文章構成の指導などを受けながら、論文は何度も書き直されることになりました。しかし、悪いことに査読に恵まれませんでした。レター形式からフルペーパー形式に書き直すなど何度も大幅な加筆訂正を行う羽目に陥りました。しかし、その論文もようやく出版されました [7]。内容自体は初めにやったことと全く変わらないのですが、数式表現や文章構成に関しては格段に良くなったと感じています。論文出版まで長く根気強く指導してくれた伊藤さんにはとても感謝していますし、自分にも論文を何度も直す根気がついたと思います。

8. ようやく研究者に (PD2-)

以上の失敗と改善があつての現在です。総研大で学振 PD をさせてもらっています。共同研究者の大槻久さんは学位論文の副査をしていただいております、その審査のコメントの的確さから金子研の学生に「金子さん以上に藤本研究を理解している」と評されたほど私の研究をつぶさまで読み込んでくれていました。いろいろやりたいテーマはありましたが、大槻さんは私に間接互惠を提案してくれました。間接互惠は囚人のジレンマで取り扱った直接互惠よりも大規模な社会における協力メカニズムです。直接互惠と違い、そこではある個人が他人に協力を行っても、同じ個人から協力が返ってくるとは限らないため、しっぺ返し戦略のようなものは使えません。その代わりに、個人は他者に協力したことを第三者に good と評価してもらい、その第三者から協力してもらいます。評判を通じて第三者から間接的に協力をやりとりするので、間接互惠と呼

ばれています。

大槻さんはこの間接互惠のフロンティアにある問題を示してくれました。それは個人が評判を独立に持つ private 評価と呼ばれる状況の間接互惠でした。これまでは主に（言語などを仮定して）全員が他人への評価を一致させている public 評価と呼ばれる状況が理論的に取り扱われていました。このときには、ある個人は全員から good と評価されているか、bad と評価されているかの2通りを考えれば良いです。一方で private の場合にはある個人についての評価は全ての個人から独立に決めることができるため実質無限通りの個人が存在し得ます。この private 評価の間接互惠は理論的取り扱いが困難なことから主に計算機によって議論されてきました。

この private 評価を解析するアイデアは、個人が他人からどのくらいの割合で good と思われているかの goodness $p \in [0,1]$ を導入することでした。この goodness p は連続的な値をとるため、先述の無限通りの個人を特徴づけるに足ります。さらに、個人が協力するか裏切るによって goodness がどのように遷移するかのミクロな確率過程を考えました。ポイントは協力したか裏切ったかに依存して、その個人の次の goodness が f^C と f^D の2種類の map で与えられるということでした。この確率過程から、集団全体における p の頻度分布 $\phi(p)$ のマクロな時間発展を与え、 ϕ の平衡状態を解きました。面白いことは、2種類の map は単純であるにも関わらず、それらが確率的に作用することから、平衡状態の分布が無数の Gaussian の和で表される複雑な形をとるという点です。このような map による複雑な確率過程は反復関数系 (Iterated Function System) として複雑系で取り扱われる領域になります。本研究は private の間接互惠を分析するのに反復関数系の理論を持ち込めたという点が面白いと思っています。

間接互惠には幾多ものレギュレーションがあります。単に単一の評価ルールが存在する状況を考えるもの [8]、別の評価ルールが侵入することを考えるもの [9]、評価ルールを広範にするもの [10] などなどです。特にこの2本目の論文 [9] については、private 評価下、つまり言語によるコミュニケーションを封じられた場合でも協力が進化的に安定であることを示唆しています。これは過去の定説に反しており、インパクトのある結果になっています。これまで何度も論文を投稿した結果悉くリジェクトされてきて良い思い出がなかった PNAS 誌に投稿しましたが、全てのレビュワーに支持されずんなりとアクセプトされました。成功例を詳しく振り返ることはしませんが、自分としてはこれまでの失敗を振り返り、

- 問題意識が共有されるイントロ
- 問題を議論するための最小限なモデル
- 物理的な意味がわかる数式

- 結果を導く際の面白い数学パズル
- 結果の現実への意義

程度の問題はあれ、これらの条件を満たせるよう努めました。しかし今になって思えば、この private 評価の間接互惠は私の能力で解決可能な範囲ギリギリに位置する最適な問題でした。結局、（それが読み通りだったとしても不思議とは思いませんが、）大槻さんの課題の与え方が良かっただけなのかもしれません。

9. これから

金子さんは研究者に必要なのは、運・鈍・根だとおっしゃっていました。鈍感さと根性についてはともかく、幸運を感じたことは（科研費の申請や論文の査読結果などをみるに）あまりありませんでした。しかし、これまでの指導教員や共同研究者は全員そのときの私に一番必要なものを見極めて自分を導いてくれたように思います。紙面の都合上登場させられないのが残念ですが、これまでの研究室のメンバー、あるいは研究によって交流ができた方々も自分を研究面でも精神面でも支えてくれました。その意味では私にとっての運の良さは人間関係にあったのではないのでしょうか。

共同研究をする、プレゼンをする、論文にまとめる。健全な研究生活において人との関わりは避けられません。多くの失敗のおかげで、前よりは人の心がわかるようになったかと思えます。認めたくはありませんが「君には人の心がわからない」という金子さんの言葉は実に的を射ていたのかもしれない。こうして今振り返ってみると、自分の中だけで理解できていれば良いと思っていた自分を少しは鳥瞰できている気がします。

自身の研究の面倒くらはようやく見られるようになったかと思えますが、一つ問題が解決すると必ず新しい問題が浮上するものです。最近では学生の論文の共著者として、他人の研究や論文にアドバイスをすることになりました。どのように現象を分析するか、どのようにモデルを記述するか、どのように論文を書いていくか、私がアドバイスするのはかつて自分が受けてきたものばかりです。ここまで失敗ばかりの自分がどの口でアドバイスをしているのか…そもそもなぜこんな恥辱にまみれた寄稿を赤裸々に綴っているんだっただか……よくわかりません。まあ、いつしか自分がわからない人の心を忘れて図に乗った発言をしないために書いたのでしょう。そんな備忘録とさせていただきます。と思います。

参考文献

- [1] Yuma Fujimoto, Takahiro Sagawa, and Kunihiko Kaneko. Hierarchical prisoner's dilemma in hierarchical game for resource competition. *New Journal of Physics*, Vol. 19, No. 7, p. 073008, 2017.
- [2] Yuma Fujimoto and Kunihiko Kaneko. Functional

- dynamic by intention recognition in iterated games. *New Journal of Physics*, Vol. 21, No. 2, p. 023025, 2019.
- [3] Yuma Fujimoto and Kunihiko Kaneko. Emergence of exploitation as symmetry breaking in iterated prisoner's dilemma. *Physical Review Research*, Vol. 1, No. 3, p. 033077, 2019.
- [4] Yuma Fujimoto and Kunihiko Kaneko. Exploitation by asymmetry of information reference in coevolutionary learning in prisoner's dilemma game. *Journal of Physics: Complexity*, Vol. 2, No. 4, p. 045007, 2021.
- [5] Yuma Fujimoto, Kaito Ariu, and Kenshi Abe. Learning in multi-memory games triggers complex dynamics diverging from nash equilibrium. In *Proceedings of the Thirty-Second International Joint Conference on Artificial Intelligence, IJCAI-23*, pp. 118–125, 8 2023.
- [6] Yuma Fujimoto, Kaito Ariu, and Kenshi Abe. Memory asymmetry creates heteroclinic orbits to nash equilibrium in learning in zero-sum games. In *The 38th Annual AAAI Conference on Artificial Intelligence, AAAI-24*, 2024, in press.
- [7] Yuma Fujimoto and Sosuke Ito. Game-theoretical approach to minimum entropy productions in information thermodynamics. *Physical Review Research*, Vol. 6, No. 1, p. 013023, 2024.
- [8] Yuma Fujimoto and Hisashi Ohtsuki. Reputation structure in indirect reciprocity under noisy and private assessment. *Scientific Reports*, Vol. 12, No. 1, p. 10500, 2022.
- [9] Yuma Fujimoto and Hisashi Ohtsuki. Evolutionary stability of cooperation in indirect reciprocity under noisy and private assessment. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, Vol. 120, No. 20, p. e2300544120, 2023.
- [10] Yuma Fujimoto and Hisashi Ohtsuki. Who is a leader in the leading eight? –indirect reciprocity under private assessment–. *arXiv preprint arXiv:2310.12581*, submitted.
-

【2023年研究奨励賞受賞者特別寄稿 2】

フィールド研究者と生態学を「覗きこもう」



伊藤公一*

1. はじめに

研究奨励賞の受賞の知らせを受けたとき、最初感じたのは「あれ、自分でいいのかな」という戸惑いだった。私は筆の遅さもあって、業績数はそこまでない。研究内容も、ある分野の理論を整理・発展させたスマートな研究というより、実際の生物の振る舞いに上手く寄せようと四苦八苦した泥臭い研究が多い。そんな私が研究奨励賞に選ばれてよいのだろうか、もっとふさわしい人がいるのではないかと正直かなり後ろめたさも感じた。しかし、選んでいただいた以上、選考委員の方々にはそんな私の何かしらの部分を受賞者に値する、と評価して頂いたことになる。では、私の何が評価されたのだろうか？しばし理由を考えた末、これまでの数理生物研究への取組み方や向き合い方、つまり「泥臭さ」こそが評価されたからではないか、と思うようになった¹⁾。

私は、これまでゲーム理論を中心として研究を進めてきた。ご存じの通り、ゲーム理論とは「他人の戦略が自分の利得に影響するような状況における戦略の最適化」を考える数学的手法である。学生の頃こそ、一見単純に見える状況でも時に直感に反する結果を見せるその独特の振る舞いに魅了され、協力の進化を中心とするゲーム理論研究にのめり込んでいた。ところが、研究者として様々な経験を積む中で、数学的な振る舞いよりも、ゲーム理論を使っていかに生態学の現象「切り取る」か、そしてそれを如何にフィールド研究者に伝えるか、ということ自体に面白みを感じるようになった。それ以降、フィールド研究者にも面白がってもらえるような研究内容・研究発表となるように意識的に努力してきたつもりだし、フィールド研究者との共同研究もいくつか立ち上げて実施してきた。もしこうした「泥臭い」取り組みが評価されたなら、ぜひ他の数理生物学者にも紹介したい。そうした考えから受賞講演では、この生態学の現象を上手く「切り取れ

た」と感じた研究例として、フィールド研究者との3つの共同研究 [1–3] を取り上げ、特にその内容に重点を当ててお話をさせていただいた。そして、せっかく生態学分野では様々なフィールド研究者が野外の現象を日々研究しているのだから、彼らの研究成果を「遠くから眺めて」数理研究のアイデアをもらうだけに留まるのではなく、フィールド研究者と現象を「一緒に覗きこみながら」インタラクティブに研究を進められれば、もっと面白い研究ができるのでは、という考えをお話した。

しかし、寄稿でも受賞講演と同じ内容を書いては面白くない。そこでこの記事では、フィールド研究者との共同研究の実際について、書いてみようと思い立った。先に書いておくと、私は決してフィールド研究者との共同研究が上手いわけではない。むしろ、共同研究自体経験不足であり、色々と非効率な進め方でフィールド研究者に迷惑をかけてしまった部分も多々ある。しかし、だからこそ参考になる部分もあるかもしれない。そこで、まず前半部分では、いかにして私の興味が「数学的面白さ」から「生態学との繋がり」へと変わり、現在のスタンスを獲得するに至ったかについてお話したい。その後、後半部分では、具体的にどのようにフィールド研究者との共同研究を始め、進め、苦悶しつつまとめ上げたのか、その経緯についてご紹介する。最後に、フィールド研究者との共同研究を進める上で、重要だと感じた点をまとめる。

2. フィールド研究者と「覗きこみたい」と思うまで

もともと私が数理生物学の道を志したきっかけは、大学3年生のころ、恩師となる山内淳先生が担当されていた「数理生物学」の講義を受講したことだった。生命現象のような乱雑極まりない現象をこんなにシンプルな式できれいに説明できるのか、と感動して数理生物学を学ぼうと思い立ち、山内研究室の門をたたいた²⁾。特に興味を持ったのが、「自身の振る舞いが他

*北海道大学 大学院地球環境科学研究院 特任助教

¹⁾ もう一つ考えた受賞理由は、筆の遅い私に対する「受賞者になった以上、覚悟してこれまで山積みにしてきた研究も論文にして世に出すように」という諸先輩方の叱咤激励だった。鋭意努力しておりますので、もう少しお待ちいただければ。

²⁾ しかし、実はこの講義は山内先生の師匠である巖佐庸先生が元々作られた内容だったことをのちに知ることになる。講義に感動したからこそ研究室に入った私が無然としたのは当然である。

者の利得にも影響を与える状況」に注目するゲーム理論だった。シンプルな構造にもかかわらず直感に反する結果を見せるその奥深さにすっかり魅了され、協力ゲームを始めとしたゲーム理論の研究にのめり込んでいった。

ところで、協力ゲームの研究は多くの場合、状況を高度に抽象化したまま扱う。細かい生態学的背景や具体的相互作用メカニズムはあまり意識せず、単に「プレイヤー」と呼ばれる個体間での「協力」という抽象的な関係にのみ注目して扱うことが多い。私も当初はそうした抽象化に疑問を持つことはなく研究を進めていた。そんな私が、なぜフィールド研究者と研究を覗き込みたい、と思うようになったのか。振り返ると、そうなった原因として大きく二つの要素があったように思う。

一つは、山内先生のご指導である。といっても、山内先生から日々手取り足取りの熱いご指導でみっちり数理の教えをたたき込まれた、というわけではない。むしろ、山内先生は基本的に放任主義で、研究については極めて自由にやらせていただいた。卒業研究生として研究室に配属されても、与えられたテーマをそちのけで当時興味があったサルの社会性についての論文を読みまくっていた³⁾し、大学院進学後も山内先生の助言を聞くのもほどほどに、好き勝手に自分で考えた様々な研究テーマに手を出していたが、それでも特に何も言われなかった。しかし、ひとたび山内先生の部屋へ相談にいくと、どんな内容でもこちらの納得のいくまでとことんディスカッションに付き合ってください。教員としてというよりは、一人の研究者として向き合っていていただき、時に喧嘩腰になりながらもあそこまで熱く議論できたのは、今振り返れば本当に贅沢な時間だったように思う。

そうした議論の中で、しばしば論点としてあがったことの一つが「仮定したものは何か、それは実際の現象や他の仮定との間で整合性がとれるものかどうか」という点であった。当初は、関数の傾きやパラメータの置き方など、数学的な性質にのみ目がいていた私には、関数形の仮定一つにそれほど生態学的な深い意味があるのか、と驚いた覚えがある。数理生物学における数理モデルとは、あくまで生物の一側面を数式の形で切り取ったものであり、だからこそその数式が適切に一側面を切り取れているかどうかは、モデルを立てる人間がどれほど真摯に仮定の持つ意味に向き合っているかにかかっている。この考え方は、間違いなく山内先生から教わったことである⁴⁾。事実、学会など

の場面では私が質問しようとしている内容を先に山内先生が質問してしまうことが今でも多々あるのだが、その内容はしばしば現象と数理モデルの仮定との整合性を問うものである。山内先生から学んだこの数理モデラーとしての姿勢こそが、野外の実際の現象に強く興味を持つきっかけとなったのは間違いない。

もう一つの要素は、学生時代のフィールド研究者に囲まれた環境である。私が学生時代を過ごした生態学研究センターには、10人前後の様々な生態学分野に関する教員が所属しており、それぞれ研究室を主催して学生を指導する形式をとっている。面白いのは、学生部屋については研究室によって分けず、むしろ混ぜる方針を取っていた点である。結果、私は6年間にわたる生態学研究センターでの学生生活を、花や魚、プランクトン、ダンゴムシからキノコまで、実に様々な生物を扱う学生に囲まれて過ごした。これは、様々な面で私にとって大きな学びの場になったと感じている。まず、多様な生物を実際に見ている研究者たちの「現場感覚」を日常的に感じることができた。他の学生の調査の様子を聞いたり、時に実際にフィールド調査にも同行させてもらったりする中で、どんな風に野外調査をしているのか、実際は何が大変で、いかに観察できるのが実際の一部分にすぎないかを体感した。大雨が降れば山や川の様子はそれだけで一変する⁵⁾し、微妙な地形の違いから風の吹き方に至るまで観測データに残っていないものの影響しているような要素が、現場には多々存在する。もちろん、フィールド研究だって現実の一側面を切り取っているに過ぎないのは当然なのだが、そんな「フィールド研究者の発表の外にもまだまだ見えない要素がたくさんある」という当たり前のことに気づかされた。そして我々数理生物学者が立てるモデルが、いかに極端に理想的な条件を「仮定」している危ういものなのか、ということを痛感した。

また、フィールド研究者との議論の仕方、話の広げ方も、学生時代に学んだことである。上述の通り、フィールドの状況は論文やプレゼン発表を聞いても想像できないような環境であることが多い。当初私は、他の学生のフィールド研究を聞いたところで私には状況の想像などできないのだから、せめて研究のストーリーやロジックの部分だけでもフォローしよう、と必死に聞くことに徹していた。しかし、そうしたストーリーやロジックは話し手が現象を整理した後の「成果物」である。それを聞いて私が出せるアイデアも、せいぜい話し手の発想の周辺に制約されてしまうことになる。

に厳しくなりすぎて、山内先生から「伊藤君は厳しいから」とぼやかれるようになってしまった。過ぎたるは及ばざるがごとし。気を付けます。

⁵⁾「昨日まで観察していた淵が土砂で埋まり地形ごとなくなる」というような状況は、数理モデルを相手にしている限り絶対にできない発想だなと感じた。

³⁾ なお、山内研究室は植物学系に属していたのだが、そんなこと気にもしない私は、大学院入試の面接時に「サルがやりたいです」と植物学系の先生方の前で堂々と行って、山内先生を慌てさせた。

⁴⁾ もっとも、今では私の方が現象と数理モデルの整合性

このことにある時気づいた私は、数理生物学者なのだから分からないのは当たり前、と聞き直り、どんどん何でも分からないことを聞いてみることにした。すると、話し手は、今まで見えていなかったストーリーの外に追いやられていた、フィールドの「ややこしい」実状を色々と話してくれるようになった。そして面白いことに、数理モデルとして面白そうなアイデアは、むしろそういった「ややこしい」と解釈の外に追いやられているところにこそ転がっていることが多いのに気が付いた。分からないことはどんなに基本的な内容でも片端から質問して能動的に話を掘り下げ、その中から面白そうな現象、解釈できそうな要素を探す。これが、現在の私のフィールド研究者との議論時のスタンスなのだが、このスタンスを身につけることができたのは、学生時代の私の議論に付き合ってくれた生態学研究センターの学生たちのおかげ⁶⁾なのは間違いない。

さらに、彼らフィールド研究者に数理生物学の研究をどう伝えれば受け入れてもらえるのか、を学んだのは大きい。学生時代、私は研究そっちのけで休憩室に集まり研究談義に興じる、不真面目な学生の筆頭だった。そうした場では当然、聞くだけでなく自身の研究についても話すことになるわけだが、当初私が直面したのは正直で辛らつな他の学生の感想だった。「数式ばかりでよく分からん、結局どういうこと?」「その仮定って現実的なのか?」「こういう要素は無視しているの? いいの?」… 厳しい質問に四苦八苦しなながら、どう説明すれば納得してもらえるのか、試行錯誤する日々だった。学生間だけでなく、教員とも同じような機会はあった。生態学研究センターでは、年に一度全教員に対して研究進捗を発表する機会があるのだが、この際にもモデルの結果の直感的な解釈や、実際に考えている現象との整合性についての厳しい質問⁷⁾に鍛えられた。イメージしやすい例を挙げつつ仮定をしっかりと伝える、怪しい仮定は怪しいと認めたくなくて、それがクリティカルでないことを示す、それぞれのパラメータはきちんと生物学的な意味合いに紐付けて話す。もちろん、これらのことは研究発表時に一般的に注意すべき事柄だが、ことフィールド研究者を相手にする際には、特に重要であることを思い知った。何度もトライ&エラーを重ねる中で、どうすればフィールド研究者たちも分かってくれるのか、そして、どう伝えれば「それは面白い」と言わせることができるのかを学べたのは、生態学研究センターの環境が大きかったと

思っている。

これら二つの要素に恵まれた私は、協力ゲームの研究を進めるうちに、徐々に数学的面白さのさらに向こう側にある、実際の生命現象との「繋がり」の部分を楽しむことこそが、数理モデリングの醍醐味ともいえる面白さなのだと気づいた。そして、自身の研究をフィールド研究者にも話すうちに、その醍醐味部分を彼らと共有できた時、すなわち自分の数理研究でフィールド研究者にも「それは面白い」といわせることができた時、自身の研究でようやく生態学という大きな分野に貢献できた、と強く実感した。こうした経験こそが、協力ゲームという抽象的な研究テーマからスタートしながらも、フィールド研究者と一緒に現象を覗き込み、より生態学としっかりとしたつながりを持った研究を行いたい、彼らを面白がらせ唸らせる研究がしたい、という目標を持つに至った訳である。

3. フィールド研究者との共同研究

さて、ここからは実際に私がフィールド研究者との共同研究をどういった経緯で進めていったのかについて、振り返ってみようと思う。まず、最初にフィールド研究者との共同研究のきっかけをくれたのは、同じ生態学研究センターで一つ後輩の佐藤安弘さんだった。当時私は、植物における協力ゲームの事例として、連合防衛と呼ばれる「ある植物個体の防衛が周辺の植物個体の食害をも低減する」状況についての理論研究を進めていた。私の研究発表を聞いてくれていた佐藤さんは、彼が当時研究していたハクサンハタザオという植物に見られる毛(トライコーム)の有無に関する遺伝的二型の共存が連合防衛によって説明できるのではないか、と気づき、私に話を相談してくれたのだ。

佐藤さんにデータを見せてもらい、確かにゲーム理論で説明できるかも、という感触を得てからまず議論したのが、連合防衛が実現されているメカニズムだった。連合防衛はあくまで観察される食害結果についての用語であり、実際に連合防衛を引き起こすメカニズムは植食者の増殖の仕方から行動パターン、被食防衛のタイプなどによって、実に様々である。そして、佐藤さんの系で働いているメカニズム自体を数理モデルの形で表現しないことには、単なる「協力ゲーム」のモデルに連合防衛の名前を付けただけになってしまい、意味がないだろうと感じたのだ。先行研究で連合防衛のメカニズムにどんなものがあつたかを調べたりしながら、色々議論していたのだが、そのうちに佐藤さんから「毛があると食べにくいからハムシが嫌がっているような気がする。選り好みじゃないですか。」とアイデアを出してくれた。つまり、毛を押しつけて食べるのにエネルギーを使うかもしれないし、食べるのにも時間がかかるから、毛がない方が好きなのだろう、というわけである。ここで思い出したのが、最適餌選

⁶⁾ 研究の話をしてフィールドに連れていっても、私のスイッチが入ると根掘り葉掘り延々と質問に付き合わされ、それでも嫌な顔一つしなかった同期たちには、本当に感謝している。

⁷⁾ もっとも、「指数関数の肩にさらに指数関数が乗っていると、ついていけなくなる。」と言われたときには、さすがにどうしようかと思ったが。

扱理論⁸⁾だった。この理論では、餌を食べて得られるエネルギー量や採餌に必要な時間、そして餌の頻度に注目した理論である。まさに、今見ようとしている毛があることによる影響、そしてゲーム的な相互作用を生み出す頻度依存性を生み出すのにピッタリというわけである。

ところが、思いついてモデルを作ったところで私は困ってしまった。数理モデルを立てることはできた。これを使えば、パラメータによって定性的にどう結果が変わるかは示せるし、具体的なパラメータ値が分かるなら数値的に予測することもできる。しかし、このモデルを一体全体どう彼のデータに当てはめればいいのか、もっと言えば数理モデルを使うことでどんな「新しいこと」が言えるのか、わからなくなってしまったのだ。そんな時に助け舟を出してくれたのも佐藤さんだった。ベイズ推定を使えば、私のモデルのパラメータを推定し、さらに数理モデルの妥当性まで検証できる、という、きっちり自身のデータと私の数理モデルを組み合わせて解析してくれたのだ。結果、この系がハムシの選り好みで説明できそうなこと、そして毛の有無に関する二型の間では、負の頻度依存淘汰が働いていることを証明することができた [1]。終始、優秀な後輩に助けられながらの共同研究であり、共同研究とはどういうものを学ぶとても良い機会であったと思う。同時に、数理研究者の自分には関係ないと思っていた統計的手法が、現実のデータとのつながりを考える上では必要不可欠であることを痛感した。

次に共同研究の機会が巡ってきたのは、それからしばらくしてのことである。日本生態学会年会に参加していた際、咲いている最中に花の色が変化する「花色変化」と呼ばれる現象についての発表を聞いた。私は、これが「花の色に対する評判」という公共財を介した協力ゲームとして解釈できるのでは？と思いつき、その場で発表者である鈴木美希さんに話をもち掛けたのだ。鈴木さんにもアイデアを面白がっていただき、花と送粉者に詳しい望月昂さんにも加わっていただく形で、共同研究としてスタートさせた。研究をスタートさせた当初は、佐藤さんとのプロジェクト同様、数理モデルの結果を統計的手法と組み合わせて実証データとつなげる形を考えていた。ところが、この現象が進化スケールでのもので統計に耐えうるデータに乏しいこと、この現象を説明する仮説自体がまだ議論の最中であることを聞き、純粋な理論研究として進めることにした。

とはいえ、私は当時花と送粉者に関してはあまり馴染みがない現象だった。そこで、最初に始めたのは花

の専門家である共同研究者のお二人に色々と質問を繰り返しながら、現象を理解・整理し、数理モデルを立てる上で重要な要素を見定める作業だった⁹⁾。ところが、質問を重ねるうちに、送粉過程というものが想像以上に複雑な現象であることを理解した。どのくらいの大きさの花を、いつまで、いくつつけるか、蜜の生産量はどうか、無くなったら補充するのか、などは全て送粉に密接にかかわる花の形質だし、送粉者の種類や訪花パターンも多様である。花に蜜が残っているかは訪花頻度によっても変わってくるし、花の適応度計算には柱頭と花粉それぞれの貢献を考慮する必要がある。共同研究者の二人に言わせれば、このいずれもが花色変化に関わりがある要素とのことだが、もちろんそれらの要素全てをモデルに組み込むのは現実的ではない。花色変化を適切に数理モデルとして表現する上でどの要素は無視できて、どの要素は簡略化してもよく、どの要素はしっかりと数式に組み込むべきなのか、その取捨選択は極めて難しい作業となった。この作業を進める中で学んだことは、この取捨選択自体を進める上ではフィールド研究者との相談はあまり効率的ではない、ということである。もちろん、重要な要素は何かを整理したり、簡略化のために置く仮定が妥当かを確認したりする上では、フィールド研究者との連携は重要である。しかし、それらを踏まえた上での最後の取捨選択の判断、言い換えれば「数理モデルを通してみる現象の切り口を決める」作業については、結局は数学的な構造を頭に描きながら思考する数理生物学者にしか判断できないからである。共同研究者の二人を巻き込みつつこの作業を進めたのは、明らかにお二人に不必要な負担をかけるだけで、失敗であった。

ようやくモデルが固まり、解析が進んで結果が出始めると、次は結果の解釈と考察である。この段階でも、私は数理モデルの構造や過程、結果の直感的な意味や可能な解釈などについて、丁寧に鈴木さん、望月さんに説明しながら議論を進めた。モデリングの段階とは異なり、この段階ではフィールド研究者との相談は極めて有意義であった。当初はどう議論してよいか鈴木さんも望月さんも迷っておられたようだが、結果に影響しうる仮定とそうでない仮定の違いや、モデルが想定する状況についての理解が深まるにつれ、より花の戦略や送粉といった幅広い内容における知見や仮説とのつながりのアイデアが出るようになった。それらを踏まえて3人でまとめたディスカッションは、理論だけでなく実証面でも深みのある内容になったのではないかと自負している。反省点を挙げるとすれば、数理

⁸⁾ 学生の頃、粕谷英一先生の「行動生態学入門」で学んだ際に、そのモデルの簡潔さ、結果の明確さに驚き、それ以来お気に入りとなった理論の一つである。

⁹⁾ 元々3人とも所属大学は別であったし、途中で私も海外に赴任したためこれらのやり取りは基本的にオンラインミーティングの形で行った。目の前で図や数式を書くためのホワイトボード機能がないことには苦労したが、大きな困難は感じなかった。

モデルについての仮定や解釈についての説明を、結果の議論に移る前にかなり細部にわたって行ってしまった点である。もちろん、この過程があったからこそ、共同研究者のお二人の理解が深まったのは間違いない。しかし、分野外のお二人にとって数理モデルの全体像までしっかり理解する労力は途方もないものだったと思う¹⁰⁾。そうした労力を先にかけてしまうよりは、結果の解釈を先に進め、必要となるたびにモデルの仮定に立ち戻って解説する、という形で進めたほうが、はるかに時間効率の面ではよかつただろう。

いずれにせよ、この研究ではモデリングから結果の解釈、イントロやディスカッションの検討まで、全工程を共著者である二人のフィールド研究者と共に議論しながら進めた。この丁寧な進め方が、複雑な花色変化の現象を、シグナル理論も踏まえた比較的シンプルなモデルとして記述に成功することにもつながったし、花色変化が生じる重要な要素に訪花者群集の多様性があるかもしれない、というインパクトのある新たな仮説提案という成果 [2] にもつながったのは間違いない。純粋な理論研究においても、フィールド研究者が入ることによって数理モデルや結果の解釈にしっかりとした厚みが出ることを体感した私は、ますますフィールド研究者との共同研究の面白みを感じた。

一度目、二度目はいずれも共同研究をしよう、と最初から考えてプロジェクトをスタートさせたが、三度目のフィールド研究者との共同研究の機会は、不意に始まることになった。当時私は、イギリスのエクセター大学でポスドク研究員をしていたのだが、ある日私のボスである Andrew Higginson から計算アルゴリズムの相談¹¹⁾を持ち掛けられた。この時は、特に深く考えず少し議論して話は終わったのだが、しばらくの間、たびたびこのテーマで議論するようになった。そして、議論するうちに、徐々に数式の構造の話になり、数理モデルの仮定の話になり、具体的な現象のモデリングについての議論となり、最後には「この計算は複雑すぎるので、手伝ってほしい」と言われて、すでにスタートしているプロジェクトに途中参加することになった。これが、サメの活動時間をめぐるフィールド研究者 Yannis Papastamatiou との共同プロジェクトだった。

しかし、この時点でも私は単なる計算の手伝いとして参加するつもりだった。ゆえに、この研究について

は概要を聞いたのみで、詳しい背景情報等はしっかり学ぶことなく計算にのみ集中していた。ところが研究を進めるうちに、このスタイルでは研究が上手く回らなくなってしまった。理由は単純で、現象を上手く数式に落とすモデリングの作業自体が終わっていなかったことに尽きる。光が捕食に与える影響や体温変化における仮定など、モデルの結果と実際の現象については現実に合わせてモデルの修正が必要だった。同時に、様々な要素を複合的にモデルに取り込んでいたため、うまく簡略化できるところは簡略化してパラメータ数を減らす必要もあった。そして、これらの作業を上手く進めるには、モデル構造や計算結果について結果的に今一番理解している私が主導的に動くしかなかった。結局、ある段階でこの結論に達した私は、改めてこの研究の背景となった現象や背景情報について時間をかけて整理・勉強し、Yannisとも直接相談しつつ、モデルの要素の整理から結果の解釈、実際の現象とのつなぎ合わせまで、私が主導的に関わる¹²⁾ことになった。役割分担が不明瞭なまま、プロジェクトを進めてしまったこと、特に私がモデルの構造を最終的に決めたにもかかわらず、計算だけ担当すればよいと考え続けていた認識の甘さが、プロジェクトの進みを大きく遅らせることになったと反省している。おそらく、私がモデルの構造まで変えるレベルで関わると決まった時点で、Yannisも含め3人で改めて研究計画を練り直したほうがはるかに効率よく進んだだろう。

しかし、覚悟を決めた後は、時間がかかってでも現象についてしっかり勉強してからモデルの解析に再度当たったことで、相当に複雑なモデルの結果をうまく整理集約できた。サメ類の活動時間帯の決定要因について、日光、体温変動、そして被食者間とのゲーム的相互作用と、うまくポイントとなる要素を解析可能な範囲で組み込めたとともに、様々なほかの変温動物に対しても拡張可能な面白い研究 [3] になったと思っている。ディスカッションでもきちんと現実の現象とのつながりを示せたばかりか、フィールド研究者が読む雑誌に掲載できたのは、やはりフィールド研究者ときちんと話し合いつつ研究を進められたからこそ、なしえたことだと思う。

¹⁰⁾ 私が理解することを求めた、というよりお二人が非常に積極的に数理モデルを理解しようとしてくださったから、という面もあったが、それでもやはり本質的でない部分についてまでは深入りした議論は避けるべきだったと思っている。

¹¹⁾ 幸いなことに、彼はとても私の計算能力を買ってくれていて、複雑な計算が絡む場合はしばしば私に相談を持ち掛けてくれていた。

¹²⁾ ある意味 Andy のプロジェクトを奪ってしまった訳だが、彼はその方が良いとむしろ積極的に薦めてくれた。この件に限らず、イギリスでのポスドク生活を大いに楽しめたのは、ひとえに受け入れ教員である彼の人柄のおかげだった。

4. 一緒に「覗き込む」にはどうすればよいか

以上が、受賞講演でお話しした3つのフィールド研究者との共同研究の経緯である。冒頭にも書いた通り、私は決してフィールド研究者との共同研究が上手いわけではないことは、ご理解いただけたと思う。しかし、それでも、こうした経験をしたからこそ、どうすればうまく共同研究を進められるのか、学ぶことも多かったと感じている。そこで、フィールド研究者との共同研究に興味のある若手研究者の方々向けに、私が共同研究を進める上で大事だと感じた7つのポイントについて、最後にまとめてみたいと思う。

4.1 研究シード探しは自分から

「数理研究者と一緒にやれば何かできそう」と考えてくれるフィールド研究者は多いが、数理モデルをどう使えばよいか、どんなことができるのか、具体的なイメージを持っていることはまれである。だからこそ、フィールド研究者と共同研究を立ち上げるなら、数理生物学者の側から積極的に話を持ち掛けて、研究シードを探しに行くべきだと感じている。数理研究者である自分にはフィールドのことが分からないのは当たり前、と聞き直り、分からないことは細かく聞くことを躊躇しないことが肝要だと思う。彼らも生き物が大好きで研究しているだけあって、興味を持っての質問には好意的な対応をしてくれる。

4.2 話を聞くときは先入観を持たずに

フィールド研究者に質問を重ねて現象への理解を深めていく段階では、何となく理論や力学的構造について見当を付けながら聞いてしまいがちである。しかし、仮に思いついたとしても、あえてそうした先入観を持たず話を聞くことを心掛けている。最初に聞いたときはシンプルで理論通りの現象に感じて、丁寧に掘り下げるうちにまるで違う構造を持っており、しかも存外奥が深い面白い現象であった、ということもしばしばあるからである。

4.3 仮定と考慮すべき点は最初に詰める

数理モデリングは多くの仮定を重ねて数式を立てていくが、フィールド研究者と話しているとそうした仮定を根本から崩しかねない話が飛び出てきた、ということがかなりの頻度である¹³⁾。途中まで解析してから仮定が成り立ってなかった、というケースはもちろんやり直しになるし、数理モデルの結果を見ながらモデルの数式や仮定を見直したり、結果と現実の整合性を検証したりする際にも非効率である。だからこそ、

まず現象の中で置いていい仮定はどのようなものか、現実と整合性の取る際に意識すべき部分はどこにあるのか、といった内容についてはフィールド研究者と相談しつつ、一番最初にしっかりと詰めておくことをお勧めする。

4.4 モデリング時の取捨選択は一人で

フィールド研究者との共同研究の難しさの一つは、彼らの現象をどう簡略化するか、という部分にあると感じる。通常の研究と異なり、現象を実際に目の当たりにしている人と一緒に研究する以上、どうしても彼らにも納得してもらえらる程度には上手く現象をとらえつつ、かつ解析可能な複雑さにとどまっている、というバランスを上手くとる必要があるためである。そうしたこともあって、数理モデルを構築する際は、つついフィールド研究者に妥当性を確認しながら進めていきたくなる。しかし、フィールド研究者と相談しながらモデルの立式を進めると、考慮すべき要素は際限なく出てくるため、時間がいくらあっても足りなくなる。もちろん、使ってよい仮定や基本的に考慮すべき力学といった「部品」レベルでの確認はフィールド研究者と議論して事前に確認しておくべきであるが、そのうちのどれを使い、どれはモデルから切り捨てるのかを選択するべきか、という判断は数理生物学者一人でやった方が良く感じている。

4.5 フレームワークにはこだわらず時に大胆な簡略化を

上述の通り、フィールド研究者との共同研究では数理モデルがしばしば複雑になる傾向にあるが、複雑になりすぎてきたな、と感じたときは、モデルのフレームワークまで含めた大胆な見直しを考えてみるのにもいい機会かもしれない。自身の研究を振り返っても、例えば確率過程の厳密な計算から状態の遷移のみに簡略化する、といった、モデルのフレームワーク自体の見直しによって助けられてきたことがしばしばある。モデルを立てた当初は厳密な計算がどうしても必要だ、と感じても、全体を見渡してみると実はそうでもなかった、というのはよくある¹⁴⁾ので、あまり最初に立てたモデルの形には捉われないことがポイントかもしれない。

4.6 結果の使い方は先に考えておく

数理モデルを立てて解析する前に、「解析結果をどう使うのか」を慎重に考えた方が良く。これはどんな研究でも当たり前ではあるのだが、ことフィールド研究者との共同研究では、現象を数理モデルとして表

¹³⁾フィールド研究者からすると、数式一つにそんな深い仮定があるとは思えないわけで、当然ともいえるが、この解析はゼロからやり直し、と冷や汗をかけたことは一度や二度ではない。

¹⁴⁾もっとも、これはモデルの全体像を見渡すことを忘れて一つの物事に集中してしまいがちな私固有の問題なのかもしれない。とはいえ、フィールド研究者に「ここが大事」と力説されるとついつい自分でもその部分の仮定の見直しに思い至らなくなるのも事実である。

現することに頭がいっぱいで、そのモデルをどう使うかが曖昧なままだった、という失敗を何度かやらかした。たとえ上手く数理モデルを立てられたとしても、フィールド研究者がすでに示している事実を数理モデルで再現しても意味がない。動態の変化がある特定のパラメータによって引き起こされていることを示す、新しい仮説を提示する、統計的手法と組み合わせて実証データから数理モデルのパラメータを予測する。何でもよいので、何ができると嬉しいのか、その目的を達成できる構造の数理モデルになっているかは、計算を始める前に一度冷静に問い直すべきである。でないと、モデルの結果を前にして、フィールド研究者と「そりゃそうだよね」と話し合っただけになりかねない。

4.7 現象を記述できる「引き出し」をたくさん持つ

先行研究、それも今注目している現象とは一見関係のなさそうな現象の為の理論・数理モデルにおける「数式の置き方や考え方」が、今見ている現象を上手く数式として表現する上で参考になった、という経験をこれまで何度かしてきた。フィールド研究者の話から研究のシードを引き出す過程や、現象を数理モデル

¹⁵⁾重要である、といいながら、忙しくなると最初にできなくなるのもコレ。きちんと自分で時間を取って雑誌を眺める時間を作ることの重要性を、ひしひしと感じている。

でいかにうまく表現するか試行錯誤する過程では、この「数理モデルの発想やアイデア」の知識量が一番重要な要素なのではないかと感じている。日常的に幅広く数理生物学の研究について情報収集¹⁵⁾、自分の数理生物学者としてのアイデアの「引き出し」をより多く持つことが、フィールド研究者の何気ない話にも反応できる良い「共同研究者」になれる近道なのではないかと考えている。

以上が、私の考えるフィールド研究者と共同研究を進める上で大事な7つのポイントである。本寄稿記事が、今後フィールド研究者との共同研究を目指す若手研究者への参考になれば幸いである。

参考文献

- [1] Yasuhiro Sato, Koichi Ito, and Hiroshi Kudoh. Optimal foraging by herbivores maintains polymorphism in defence in a natural plant population. *Functional Ecology*, Vol. 31, pp. 2233–2243, 12 2017.
- [2] Koichi Ito, Miki F. Suzuki, and Ko Mochizuki. Evolution of honest reward signal in flowers. *Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences*, Vol. 288, p. 20202848, 1 2021.
- [3] Koichi Ito, Andrew D. Higginson, Graeme D. Ruxton, and Yannis P. Papastamatiou. Incorporating thermodynamics in predator–prey games predicts the diel foraging patterns of poikilothermic predators. *Journal of Animal Ecology*, Vol. 91, pp. 527–539, 3 2022.

【特集記事】

数でとらえる数理生物学会

数理生物学会 NL 編集部

1. はじめに

数理生物学会はヘテロなバックグラウンドの研究者からなる学術団体です。実験側でも、空間スケールの大きな生態学、疫学から、より小さな構造を扱う発生生物学、細胞生物学まで、理論側でも数学、物理、情報の各分野から人材が集まっています。年會に参加するとキーパーソンがなんとなく把握できるのですが、自分の専門分野外だと誰が何をした人なのかよくわからない、ということになりがちです。

今回、Scopus で取得した定量的なデータで数理生物学会がどのような研究者の集団なのか可視化する企画を立てました。編集部として読者がどのような人達なのかを把握する必要があったというのが最初の動機だったのですが、データそのものが読者にとって興味あるものなのではないかという観点から、特集記事として掲載します。

研究評価に関するサンフランシスコ宣言 (Declaration of Research Assessment, DORA) に則り、citation index、impact factor、h-index、獲得予算は定量化に用いません。

2. 数理生物学会の特徴

数理生物学会の特徴はいくつか挙げられると思います。

- 分野が新しい分、若い人の多い学会である。
- 日本国内にいくつか研究が活発な拠点がある。
- 理論を用いていれどどのような生物学の分野でも含まれるので、数多くの分野で構成される。
- 初期の頃は数理解析がきちんとできるミニマルなモデルが尊ばれていたが、現実を反映した若干複雑なモデルに重心が移り、最近ではデータ駆動型研究や計算モデルが多い。

今回の解析では、このような主観的な印象が実際にデータでもみることができるか試してみました。

3. 方法

2023 年 10 月時点での数理生物学会の会員名簿を学会事務局から入手し、手動で Scopus ID を調査しました。次に Scopus の API を用いて、数理生物学会のメンバーの出版した論文の情報を JSON フォーマットで

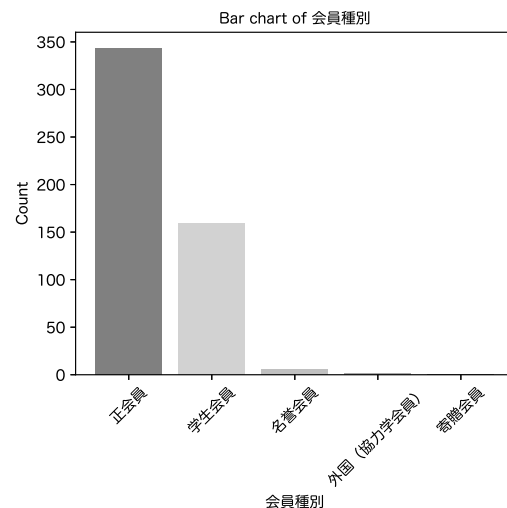
一括ダウンロードしました。さらに論文のタイトル及び出版年の情報を抽出して解析に用いています。実際に使用できているのは会員の 60% (300 人) 程度です。

解析に混入する誤差の原因として研究者の同定の誤りがあります。我々のデータ処理中、同姓同名の方の Scopus ID を誤って用いてしまった場合があります。また、学会員と同姓同名の医学系の研究者の方が Scopus 内で混同されていて、1960 年代の産業医学の論文が数多く紛れ込んでいたことがありました。可能な限りこれらの要因は排除していますが、多分まだ誤りが混入しています。学術論文並の精度は期待せず読んでいただければと思います。

4. 結果と考察

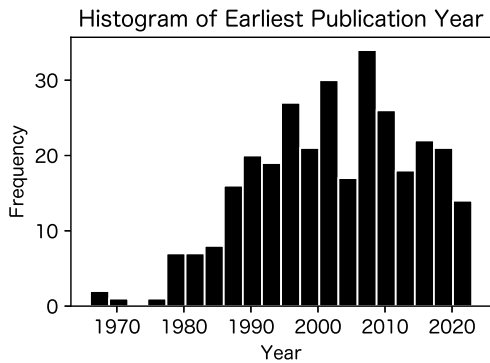
4.1 会員構成の基本的な情報

まず、会員種別で学生会員が 1/3 を占めているのが特徴的です。「会員が若い」という印象の一助になっていると思われます。

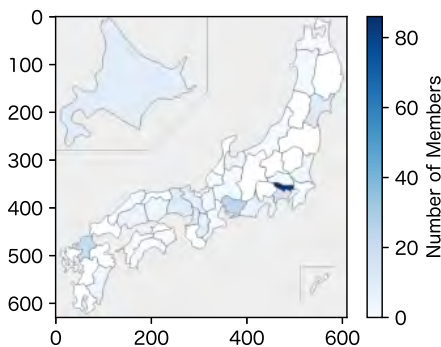


次に、Scopus 上のデータを用いて数理生物学会の学会員の年齢を推定してみます。このために、Scopus 上で追える最も古い論文の出版年 (Earliest publication year) を算出しました。これによって、ほぼアカデミアに入ってから何年経過しているかを推定することができます。このデータだけから見ると、2010 年代ぐらまでは exponential に増えているが、後は横ばいもしくは減少傾向に見えます。対応する日本の人口ピラ

ミッドと並べて表示すると、ほぼ同様の推移をしているように見えます。前述のように、出版論文の情報では出てきにくい学生会員が多いことで若く見えるのかもしれません。



さらに、会員がどの県に分布するのか、ヒートマップで表示してみました。この分析は、勤務地の所在地を人力で取り出したものです。圧倒的に東京が多く、あとは旧帝大や理研が存在する都道府県で多少多いようです。それ以外でも宮崎県とか奈良県とか茨城県とか、研究者のコロニーが時々存在する県があって実感と一致します。京都府と石川県が少ないのは意外でしたが、若くて良い研究者がいるのでまた増えていくことと思います。

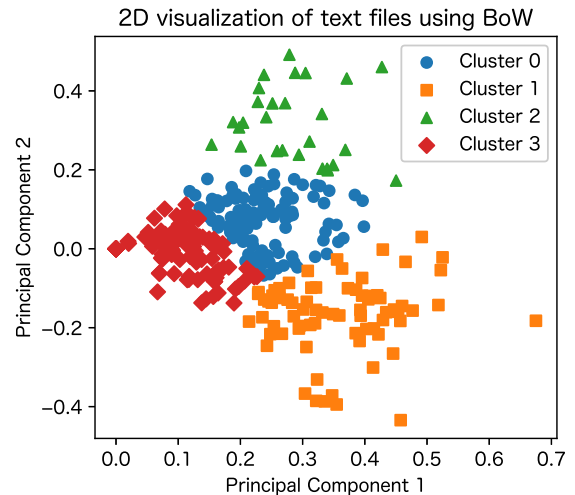


4.2 論文タイトルの用語頻度による研究者のクラスタリング

数理生物学会は異分野融合領域なので、専門外のセッションに入ると、一体何をやっているのかなかなか理解できないことがあります。体感で生態学、細胞生物学-発生生物学、疫学、応用数学ぐらいに分かれています。

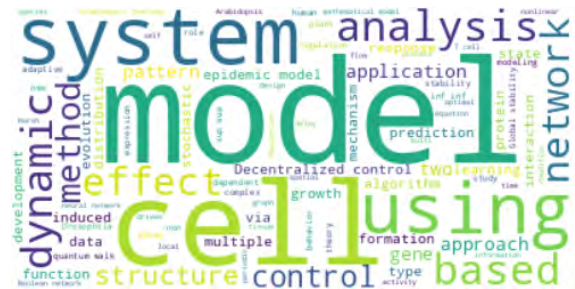
そこで、数理生物学会の各構成員を、出版している論文のタイトルの用語頻度でクラスタリングをかけてみました（論文のアブストラクトを使えるともう少し精度が上がるのですが、自動的に取得するには若干ハッキングが必要なので今回は用いていません）。手法は古典的な Bag of Words を用い、さらに TF-IDF transformation と TruncatedSVD を用いて次元削減を行いました。クラスタ数は Elbow method を用いて

$k=4$ としました。Silhouette score は 0.4 です。

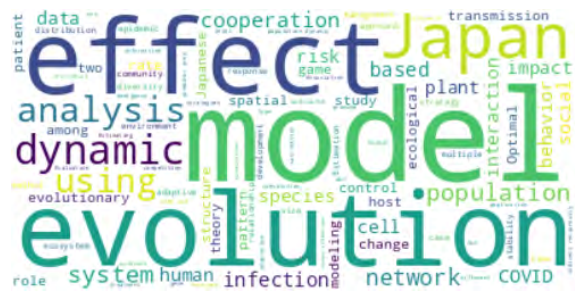


体感ではもう少しきちんとクラスターストに分離するのではないかと考えていましたが、意外とひとかたまりになっています。次に、それぞれのクラスターストで用いられている用語を WordCloud にして表示してみました。

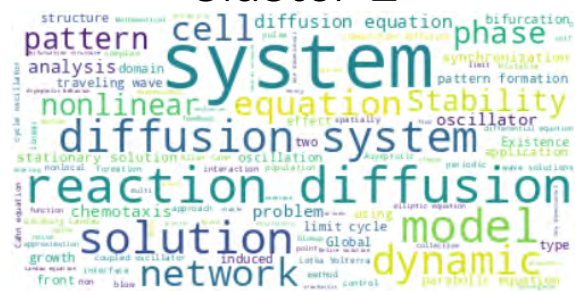
Cluster 0



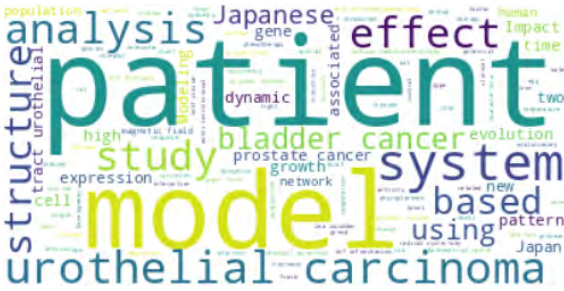
Cluster 1



Cluster 2



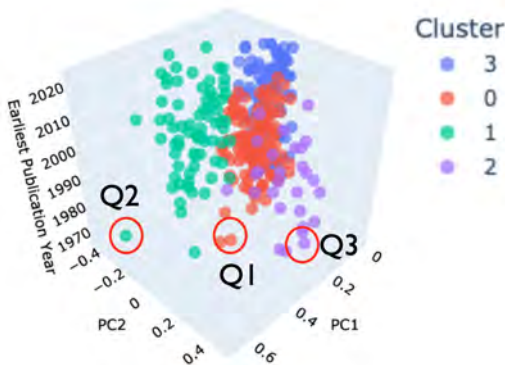
Cluster 3



クラスター0がマイクロ系、クラスター1がマクロ系、クラスター2が応用数学系、クラスター3が医学系のように見えますが、そもそものクラスタリングがはっきり分かれていないので断言できません。逆に言うと、論文のタイトルぐらいの情報だと意外と用いている語彙は近いということになりそうです。ポジティブに解釈すると、数理生物学会で分野が違うから関係ないセッションと思っていたても、行ってみると意外と共通のテーマや使える手法が見つかったりするかもしれません。

もちろん、単に技術的にクラスタリングがうまく行っていない可能性もあります。現在は古典的なPCAとBag of wordsを用いて、単語間の意味の距離等を考慮していないという側面があります。また、異なる分野で同じ用語を別の意味で使っている場合もあります（例：“differentiation”は発生生物学では分化だが数学では微分）。基盤モデルを用いて単語の意味を距離に反映させたり、単語別ではなく n-gram を使ったりできればもう少し分離できるかもしれません。

さらに、クラスターの色を保持したまま、z 軸を Earliest publication year にして三次元の散布図を作成しました。これは、時間軸を加えることで研究者の系統関係のようなものを追えるのではないか、という期待を持って行いました。学問分野の中での研究者の系統図をたまに見かけますが、ああいうものが自動的に作れないだろうか、という意図です。



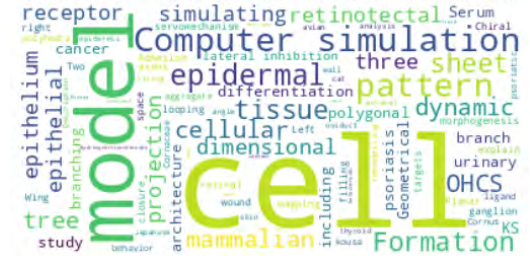
クラスターの下端で各分野のパイオニア的な人が検出できましたが、外れ値になってしまう方もおられました。標準化がうまくいっていないのかもしれませんが。また、それぞれの分野での分布を見ると大体 Earliest

publication year のヒストグラムと同じような形になるのですが、応用数学系のクラスターだけ上方でデータ点が減る（若い人が少ない）のが気になりました。数理モデルを扱っていると数学的な問題で困ることは結構あるので、数学バックグラウンドの若い方も増えてほしいと思います。

さてここで簡単なクイズです。以下の WordCloud は、観察できたパイオニアの方々の全論文のタイトルのコーパスから生成したものです。どなたかわかるでしょうか？（答えは WordCloud の右肩に小さく表示しています）

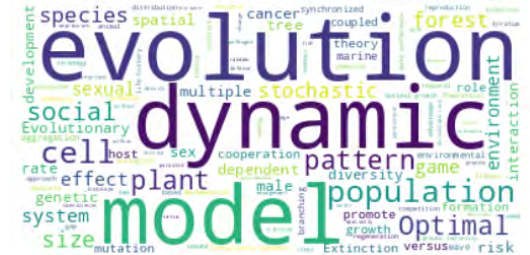
Q1: 発生のモデリングで著名な方です。

Old member 0, Scopus ID: 7402102763, Name: honda hisao



Q2: 解析で外れ値になってしまった方ですが、Word-Cloud で一目でわかるかもしれません。

Old member 1, Scopus ID: 57204609229, Name: iwasa yoh



Q3: 応用数学クラスターの方です。

Old member 2, Scopus ID: 6601945130, Name: matano hiroshi

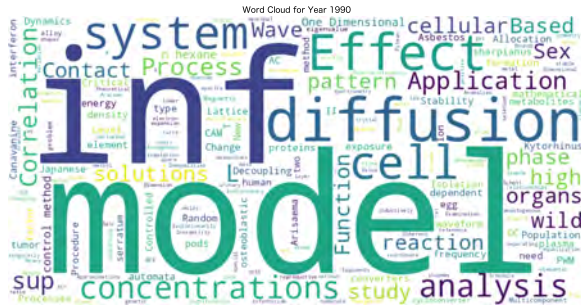


4.3 流行の変遷

学問分野の中でも扱う現象には流行り廃りがあります。このような流行を可視化するため、さまざまな年代での数理生物学会の学会員の publish した論文のタイトルから stop word を除去したのちに WordCloud を作成しました。このうち、1980年代以前に関しては Scopus の誤りによる単語の汚染がみられるので今回は用いていません。

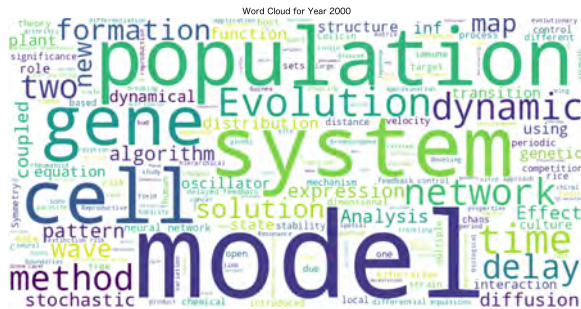
年代を通して“model”，“dynamics”というキーワードが登場するのは数理生物学会らしいところでは

4.3.1 1990年



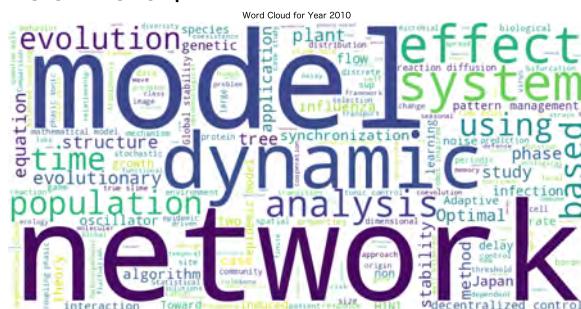
“inf”, “sup” や “analysis” が前面に出てきていて、この時期は応用数学の色が強かったことが伺えます。また、この時代はマクロ系の勢いの方が強かったと思いついていましたが、思ったより “gene”, “cell” などのミクロ系の用語も入り込んできています。“diffusion” に関してはミクロ系の分子の拡散以外にマクロの生物拡散の研究を検出しているようです。

4.3.2 2000年



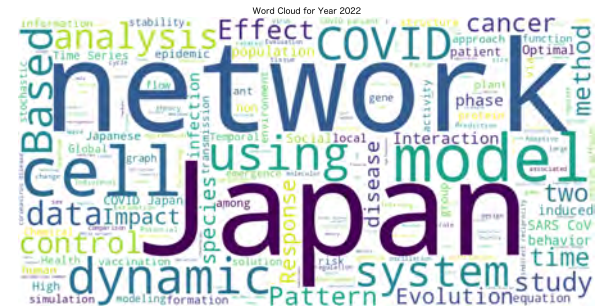
この頃はまだ数理生物学では発生学、分子生物学系のモデルは少なかった印象があるのですが、思ったより “gene”, “cell” のようなキーワードがすでに存在します。一方で “population” も大きく出ていて、マクロ系の研究の反映も伺われます。また、“system” というのはこの時期に勃興してきたシステム生物学を反映しているのかもしれませんが。応用数学系の “delay” が入っているのもちょっと懐かしく思いました。

4.3.3 2010年



大きな変化として “network” という大自由度系を示唆する単語が前面に出てきます。ネットワーク科学自体が勃興したのはもう少し前のような気がするのですが、論文として出てくるのにはタイムラグがあるのかもしれない。“evolution” などのマクロ的な単語や、“analysis”, “stability” のような応用数学寄りの単語も散見されます。

4.3.4 2022年



この時期の最も大きな変化として、COVID-19の流行に合わせた感染症数理モデルの研究の飛躍が挙げられると思います。“network” も感染症がらみでも出てきます。“Japan” がかなり大きく出ていますが、調べてみるとほぼ感染症絡みの論文で、身近な状況を考える論文が数多く出ていたことを窺わせます。

5. おわりに

本稿の解析にはPythonを用いましたが、コードはほぼ全てCursor¹⁾上でGPT-4に生成させています。近年の道具の進化で、新しい手法を導入するハードルが劇的に下がっているのを感じます。ちなみに4章で計測したトレンドに大規模言語モデルや機械学習はまだ入ってきていません。若い方が積極的に技術を活用してくれれば良いなと思います。

実際にはScopusで論文数、引用数やh-indexの値も使えるのですが今回は載せていません。citation dynamicsがライフサイクルの中でどのように変化するかモデルを書けないか、分野間で差はないか、政策に反映できないか、など、色々思うところはありますが、今後の課題としたいと思います。

最後になりましたが、特集タイトルは有名な教科書の「数でとらえる細胞生物学 (Cell Biology by the Numbers)」のパクリです。気づいた方はおられますでしょうか。

¹⁾<https://cursor.sh>

原稿募集のお知らせ

【卒論・修論・博論 内容要約文（短文）】

卒論，修論，博論の内容要約文（短文）をお送りください。次号ニュースレター103号（2024年5月発行号）に掲載を予定しております。

- 字数：数百字程度（例年は200字から300字程度のものが多いです。）
- 書式：タイトル部分に，卒業論文・修士論文・博士論文の別，論文題目，著者名，所属名の記載をお願いします。
- ファイル形式：テキスト，Word，TeX等
- 締め切り：2024年4月5日

【卒論・修論・博論要旨（長文）】

卒論・修論・博論の要旨（長文）を募集します。卒論・修論・博論の内容をもう少し詳しく紹介したい方は是非こちらの原稿も投稿してください。次号ニュースレター103号（2024年5月発行号）のSupplement(pdf版)として学会webページに掲載します。

- 分量（目安）：卒論・A4で1ページ程度，修論と博論・A4で2ページ程度
 - 書式：タイトル部分に卒業論文・修士論文・博士論文の別，論文題目，著者名，所属名の記載をお願いします。1段組でも2段組でもかまいません。図表や写真も可です（解像度を適切に調整するなどしてファイルサイズが不必要に大きくなりすぎないようにしてください）。
 - ファイル形式：pdf
 - 備考：戴いたPDFファイルをそのままとめます。
 - 締め切り：2024年4月5日
-

学会事務局からのお知らせ

1. 2025年 - 2026年日本数理生物学会役員選挙開票結果

2025年 - 2026年日本数理生物学会役員選挙の投票が、2023年12月21日23:59に締め切られ、締切後に選挙管理委員会で結果を確認した。開票結果は以下の通りであった。(以下敬称略)

有権者数: 508名

【会長選挙結果】

投票者数: 154名 (投票率 30.31%)

投票総数: 154 (有効投票数 152, 白票数 2)

1 山内 淳

(次点: 望月 敦史)

【運営委員選挙結果】

投票者数: 152名 (投票率 29.92%)

投票総数: 2280 (有効投票数 1801, 白票数 479)

※ 会則第3条より、会長当選者は除外。

(地区選出)

1 瀬野 裕美 (北海道・東北)

2 中丸 麻由子 (関東)

3 岩見 真吾 (中部)

4 望月 敦史 (近畿)

5 本田 直樹 (中国・四国)

6 佐竹 暁子 (九州)

(全国区選出)

7 大槻 久

8 入谷 亮介

9 李 聖林

9 黒澤 元

1 1 近藤 倫生

1 2 江夏 洋一

1 3 中田 行彦

1 3 守田 智

1 5 秋山 正和

(次点: 三浦 岳)

選挙管理委員会 (瓜生耕一郎, 黒澤元, 三木健)

2. 大久保賞候補者募集のお知らせ

2025年の大久保賞候補者の推薦をお願いいたします。

大久保賞は、「非常に優れた新規性のある理論研究、優れた概念の提案、困難な理論的課題の解決、理論とデータを統合して生物学を進めた研究者」に対して授与されます。対象となる研究分野は、数理生物学、生物数学、理論生物学および生物学的海洋学です。

大久保賞は、日本数理生物学会 (JSMB) と Society for Mathematical Biology (SMB) とが共同で設立しています。大久保賞は「若手」研究者と「年長」研究者に交互に授与されており、これまでの受賞者は以下の通りです。

2023 Ivana Bosicz, University of Washington (junior)

2021 Michael Savageau, University of California Davis (senior)

2019 Naoki Masuda, University of Bristol (junior)

2017 Yoh Iwasa, Kyushu University (senior)

2015 Joshua Plotkin, University of Pennsylvania (junior)

2013 Nanako Shigesada, Nara Women's University (senior)

2011 Michio Kondoh, Ryukoku University (junior)

2009 Hans Othmer, University of Minnesota (senior)

2007 Fugo Takasu, Nara Women's University (junior)

2005 James D. Murray, University of Washington (senior)

2003 Jonathan Sherratt, Heriot-Watt University (junior)

2001 Simon Levin, Princeton University (senior)

1999 Martin Nowak, Institute for Advanced Study, Princeton (junior)

今回の2025年大久保賞は「年長」研究者を対象としており、2024年中に受賞者を決定した後、2025年のSMBまたはJSMBのAnnual meetingで受賞講演を行うことが予定されています。大久保賞の紹介、若手の定義やより詳しい選考基準については以下の二つのサイトをご覧ください。

<http://www.jsmb.jp/rules-of-akira-okubo-prize/>

<https://www.smb.org/akira-okubo-prize/>

推薦に必要な書類は以下の4つになります。

- 候補者と推薦者の連絡先情報
- 候補者の資質と賞への科学的貢献を説明する4ページ以内の文書
- 候補者のすべての刊行物を含む履歴書
- 他の学会員からの2通の推薦状

これら書類をPDFフォーマットで、SMB Secretary secretary@smb.jp と JSMB 事務局 secretary@jsmb.jp までお送りください。書類提出の締め切りは、2024年3月31日です。

過去の推薦で、受賞に至らなかった人も再推薦可能です（ただし、業績リスト等は要更新）。どうぞよろしくお祈いします。御質問がありましたら、学会事務局まで御遠慮なくお問い合わせください。

3. 研究奨励賞候補者募集のお知らせ

日本数理生物学会 (JSMB) は、数理生物学に貢献している本学会の若手会員の優れた研究に対して、研究奨励賞を授与しております。本賞は、安定した職に就いていない若手研究者のキャリアアップに資することをその目的の一つとしております。本賞の受賞対象となる若手会員とは、学位取得後、実質的な研究歴を開始してから概ね7年以内の方が典型ですが、育児などのライフイベントによる研究中断期間については審査において考慮されます。

この度、2024年（第19回）の候補者の推薦をお願いすることになりました。

研究奨励賞の推薦に関しては、候補者自身が自薦されても、他の方が候補者を他薦されても構いません。研究奨励賞の候補者を自薦または他薦される場合について、次の書類を（送付先）までメールでお送りください。

- (1) 推薦者の名前、住所、電話番号、電子メールアドレス、所属（自薦の場合は不要）
- (2) 候補者の名前、住所、電話番号、電子メールアドレス、所属
- (3) 業績についての推薦者による簡単な説明文、及びそれに関連する主要論文3編以内の別刷またはコピー
- (4) 候補者の簡単な履歴。ただし、様式は問わない。なお、現職が任期付き職である場合、その旨明記するのが望ましい
- (5) 候補者の研究業績リストおよび数理生物学会での活動歴

なお、候補者の業績について照会できる方2名までの氏名・連絡先を記載されても構いません。その方にあらかじめ了解をとる必要はありません。

期日は2024年4月30日を予定していますが状況に応じて延長も検討しています。候補者の推薦をお待ちしております。また、過去の推薦で、受賞に至らなかった人も再推薦可能です（ただし、業績リスト等は要更新）。どうぞよろしくお祈いします。御質問がありましたら、（送付先）まで御遠慮なくお問い合わせください。

（送付先）

日本数理生物学会事務局
E-mail: secretary@jsmb.jp

過去の受賞者（所属は受賞時のもの）

- 2006年（第1回）：若野友一郎（東京大学）
2007年（第2回）：今隆助（九州大学）、西浦博（長崎大学）
2008年（第3回）：大槻久（東京工業大学）
2009年（第4回）：近藤倫生（龍谷大学）、中岡慎治（東京大学）
2010年（第5回）：岩見真吾（JST さきがけ、東京大学）、手老篤史（JST さきがけ、北海道大学）
2011年（第6回）：小林豊（東京大学）、仲澤剛史（京都大学）
2012年（第7回）：佐竹暁子（北海道大学）、増田直紀（東京大学）
2013年（第8回）：波江野洋（九州大学）、大森亮介（Weill Cornell Medical College in Qatar）
2014年（第9回）：三木健（National Taiwan University）、山口幸（神奈川大学）
2015年（第10回）：加納剛史（東北大学）、中田行彦（東京大学）
2016年（第11回）：國谷紀良（神戸大学）、江島啓介（University of Alabama）
2017年（第12回）：水本憲治（University of Georgia）、山道真人（東京大学）
2018年（第13回）：江夏洋一（東京理科大学）、立木佑弥（首都大学東京）
2019年（第14回）：黒川瞬（高知工科大学）
2020年（第15回）：入谷亮介（理化学研究所）、岡田崇（理化学研究所）
2021年（第16回）：阿部真人（理化学研究所）、伊東啓（長崎大学）
2022年（第17回）：山口諒（北海道大学、University of British Columbia）、遠藤彰（London School of Hygiene and Tropical Medicine、長崎大学）
2023年（第18回）：伊藤公一（北海道大学）、藤本悠雅（総合研究大学院大学）

4. 事務局連絡先

事務局幹事長：黒澤 元

会計：瓜生 耕一郎

事務局幹事：中丸 麻由子, 山口 幸

〒 351-0198 埼玉県和光市広沢 2 丁目 1 理化学研究所
数理創造プログラム (iTHEMS) 黒澤元

E-mail: secretary@jsmb.jp

編集後記

日本数理数理生物学会ニュースレターの2024年2月号から6号分を担当することになりました編集委員長の九州大学 三浦岳です。編集委員会としては私に加え九州大学の今村寿子さんと杉原圭さん、神戸大の國谷紀良さんと日大医の内海邑さんで運営して行く予定です。前任の編集委員長長の岩田さん、大泉さん、酒井さんには大変お世話になりました。

編集を引き受けるにあたって、時田先生から依頼があり、オンライン化への移行の可能性を調べました。まず、他の学会でのニュースレターの動向について調べてみました。ニュースレターの形式は学会によって様々で、学術雑誌に匹敵するきちんとした冊子体を発行しているところもあれば、最低限の学会員が共有すべき情報をメーリングリストで回しているだけというところもあり、その中間の形態をとっているところもありました。仕事の引き継ぎの際に、前編集長の岩田

さんから、紙メディアではそれなりの費用がかかるため、オンライン化に移行してその費用を年会費用に回してはどうかという意見が出されました。私個人としては、pdfよりhtmlで読める形にしておいた方が、最近の技術の進歩でボタン一発で母国語に変換できて海外の読者がアクセスしやすいのではないかと考えます。また、カラー図版を使えるのも大きいと思います。そのうち執行部から会員の皆さんへアンケートが回ると思いますので是非ご意見をお聞かせください。

日本数理生物学会ニュースレター No102

2024年2月発行

編集委員会委員 三浦岳*, 今村寿子, 杉原圭,

國谷紀良, 内海邑

(*が委員長)

miura.takashi.869@m.kyushu-u.ac.jp

国立大学法人 九州大学

〒 812-0054 福岡市東区馬出 3-1-1

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