
目次

会長就任挨拶	稲葉寿	2
【第2回 私と方程式】 Turing パターン	三浦岳	3
【第2回 数理生物学四方山話】 ロトカ・ヴォルテラとともに歩んだ私の40年	難波利幸	13
【第4回 数理生物学対談「合原一幸 教授」】 「好きなこと」だけを研究テーマに	合原一幸, 岩見真吾	18
【第3回 著者による最新論文の日本語解説】 野外魚類群集における種間相互作用ネットワークの変動とその安定性への影響	近藤倫生	27
【第4回 トラノマキ企画】 女性から見た科学者像 -私が思う研究者-	生駒千乃	30
【第2回 ホットスポット企画】 第一回数理生物学夏の学校開催記	山口諒	32
2019年国際学会スケジュール		36
卒論・修論・博論の原稿募集のお知らせ		38
学会事務局からのお知らせ		39



会長就任挨拶： 発足 30 年の節目を迎えて

稲葉 寿*

日本数理生物学会会員の皆様、明けましておめでとうございます。本年1月から2年間、会長を務めさせていただくこととなりました。事務局幹事長は東京海洋大学の岩田繁英さん、会計は東京工業大学の中丸麻由子さん、庶務は首都大学東京の立木佑弥さんと国立社会保障・人口問題研究所の大泉嶺さんをお願いすることとなりました。事務局共々、どうぞよろしくお願いいたします。今年度のJSMB大会は、中丸麻由子さんに大会委員長をお引き受けいただき、東京工業大学において9月14日から16日に開催される予定となっています。昨年はシドニーにおけるSMBとの合同大会でしたから、2年ぶりの国内大会になります。多数の会員の皆様の積極的な参加を期待しています。

さて、今年はJSMBの前身である数理生物学懇談会JAMBが1989年に発足してから30年の節目に当たります。そこで、当時のことをご存じない若い方々も増えたと思いますので、少し過去をふりかえってみたいと思います。いうまでもなく、1989年は、1月の昭和天皇の崩御によって平成がはじまり、6月には天安門事件、11月にはベルリンの壁が崩壊して東西冷戦は終結に向かうという、まさに時代の転換期でありました。個人的には89年の11月に留学先のライデン大学で学位を得て、ようやく研究者としてスタートした年でした。オランダに前年から滞在していたので、数理生物学懇談会の発足の過程は知らなかったのですが、手元にある「数理生物学懇談会ニュースレター」第1号(1989年10月1日)所載の三村先生の記述によると、その前年にオクスフォード大学数理生物学研究所を再訪した折、そのような組織の必要性を滞在中のサイモン・レビンSMB会長(当時コーネル大)に説かれ、帰国後、同年10月の京大数理研の研究集会「Mathematical Topics in Biology」で趣旨説明をおこなったところ、多数の賛同を得て、89年に寺本英、山口昌哉両先生の呼びかけによって懇談会が発足したと記されています。同レターには発足時の会員80名ほどの名簿が掲載されています。両先生を含め、すでに亡くなられた方のお名前を見ると、時の流れと感慨を禁じ得ません。今日の学会の基礎を築かれた方々に、あらためて感謝を

申し上げたいと思います。

さてニュースレター第1号には寺本、山口両先生による巻頭言も掲げられています。寺本先生は「理論的モデルは、理論屋の単なる思考の遊びではなく、モデルは仮説や理論を導くもの、あるいは仮説や理論そのものであって、むしろその主な利点は予測能力のある科学を新しく生み出すことである、という信念をモデル研究者自身ももてるようになってきた」と、数理生物学の進歩を評価する一方で、Werner and Mittelbachの「動物が実際にどのような能力を持っているか、そして何が重要な問題なのかということとは無関係な、取るに足らないような理論が蓄積する危険を避けるために、理論は経験的な研究と協力して発展させることが重要である」という言葉を引いて、理論倒れを戒めています。しかし最近の数理生物学会の発展をみると、この警告は杞憂に終わっているようです。とくに過去10年間を考えると、計算可能性、実験可能性の長足の進歩によって、それまで定性的な研究で終わっていたような分野でも、実験系とのコラボレーションによって定量化が進み、理論の検証が可能になってきています。また、理論疫学のように、現実の感染症対策の理論的支柱として、80年代後半以降に急激に発展した分野もあります。もはや数理モデルを「たとえ話」と卑下したり、揶揄する向きはなくなりました。

数理モデルは、若い世代にとっては計算機や統計解析と同様に、ごく一般的な解析ツールになってきたといえましょう。しかしもし数理モデルがパッケージ化された方法論にすぎないなら、はじめから生物学、疫学、医学などの個別科学に参入するのが早道でしょうし、キャリアパスとしても有利でしょう。数学者は数学の世界に戻っていつてしまうでしょう。数理生物学の成熟化は皮肉にも個別対象科学への解体過程を招き寄せてるとは言えないでしょうか。こうした危機を突破する力は、やはり強力な異分野コラボレーションによって新しい方法論を絶えず編み出していくことにあると思います。JSMBが次世代生命科学の数理イノベーションのプラットフォームとして発展するように、微力ながら力を尽くしていきたいと思います。

*東京大学大学院数理科学研究科

【第2回 私と方程式】

Turing パターン

三浦岳*

1. はじめに

Turing パターンは数理生物学でよく使われる道具で、私より解説するのに適切な人はいると思うのだが、数理モデルと現象の関わり部分は、現場に身を置いていたのでそれなりに詳しい。本稿では、数学と生物学との関連が、できるだけ人の顔を介してわかるような形で紹介する¹⁾。

2. 定義と支配方程式

Turing²⁾ という用語は、人によって自発的パターン形成一般に使ったり、反応拡散系全般に使ったりする場合がある。数理生物学の世界では、2変数以上の反応拡散方程式のうち、拡散によって自発的に周期構造を形成するもの（拡散誘導不安定性と呼ばれる）が Turing 系と呼ばれる。本稿では、

$$\frac{\partial u}{\partial t} = f(u,v) + d_u \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} \quad (1)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} = g(u,v) + d_v \frac{\partial^2 v}{\partial x^2} \quad (2)$$

のような2変数の Turing 系について述べる [1]。

3. 数値計算

Turing 系に限らず、モデルを理解するには方程式を眺めるより、まずは数値計算で挙動を再現する方が近道である。ここでは数値計算の方法として陽解法、陰解法の二種類について簡単に説明する。

3.1 陽解法

この系の挙動を理解するには、まず数値計算（計算機シミュレーション）で挙動を再現するのが簡単であ

*九州大学大学院医学研究院

¹⁾ 予めお断りしておく、記憶を元あまり調べずに書いているので網羅的な情報ではない。自分で直接会った人や使ったことのある手法に偏っており、引用すべきなのに抜けている仕事もかなりあると思われる。予め差し引いて読んでいただけると幸いである

²⁾ イギリスの数学者 Alan Turing の晩年の仕事 [1] から来ている。Andrew Hodges の書いた伝記 [2]（映画「イミテーション・ゲーム」の原作）を昔読んだが、数学的な記述が正確なのと LGBT に対する偏見がないので感心した記憶がある。のちにわかったのだが Hodges 自身数学者で LGBT だった。

る。短い時間 Δt の間に $u(x,t), v(x,t)$ がどのように変化するか考えてみる。微小領域内で独立して起こる反応の部分 $(f(u,v), g(u,v))$ は、

$$u(x,t + \Delta t) = u(x,t) + \Delta t f(u(x,t), v(x,t)) \quad (3)$$

$$v(x,t + \Delta t) = v(x,t) + \Delta t g(u(x,t), v(x,t)) \quad (4)$$

となる。次に、隣接する微小領域間の相互作用部分 $(d_u \frac{\partial^2 u}{\partial x^2}, d_v \frac{\partial^2 v}{\partial x^2})$ については、濃度の高い方から低い方に、濃度差に比例する速度で物質が移動すると考えて

$$u(x,t + \Delta t) = u(x,t) + d_u \frac{\Delta t}{\Delta x^2} (u(x + \Delta x, t) - u(x,t) + u(x - \Delta x, t) - u(x,t)) \quad (5)$$

$$v(x,t + \Delta t) = v(x,t) + d_v \frac{\Delta t}{\Delta x^2} (v(x + \Delta x, t) - v(x,t) + v(x - \Delta x, t) - v(x,t)) \quad (6)$$

と書ける。適当なプログラミング言語で配列を用いて初期分布 $u(x,0), v(x,0)$ を定義し、(3)(4)(5)(6) を再帰的に適用してやると、数値計算で系のダイナミクスを再現することができる。簡単に試せる方法およびパラメータセットは [3][4] を参照されたい。また、 $\Delta t, \Delta x \rightarrow 0$ とすると元の方程式 (1)(2) を導ける。

3.2 陰解法

陽解法の数値計算で計算量のボトルネックになるのは基本的に拡散項の部分である。これは、拡散係数によって Δt の最大値が決まっているからである。計算を早く行うために Δt を大きくしすぎると、1ステップごとに隣接する小領域の濃度の大小関係が逆転するという現実では起こりえないことが起き、結果として計算が発散する。この制約は計算の次元が上がると飛躍的に厳しくなるので、数値計算が現実的な時間で終わらなくなるという問題が生じる。これを防ぐために、拡散の計算に1ステップ後の値を用いるというやり方がある。これは、時間方向で後退差分を用いていることに相当する。

$$u(x, t + \Delta t) = u(x, t) + d_u \frac{\Delta t}{\Delta x^2} (u(x + \Delta x, t + \Delta t) - u(x, t + \Delta t) + u(x - \Delta x, t + \Delta t) - u(x, t + \Delta t)) \quad (7)$$

$$v(x, t + \Delta t) = v(x, t) + d_v \frac{\Delta t}{\Delta x^2} (v(x + \Delta x, t + \Delta t) - v(x, t + \Delta t) + v(x - \Delta x, t + \Delta t) - v(x, t + \Delta t)) \quad (8)$$

のような数値スキームを陰解法という。

ここで、 $u(x, t), v(x, t)$ から $u(x, t + \Delta t), v(x, t + \Delta t)$ を具体的に計算する方法を説明する。空間分布を離散化したものをベクトルで表して

$$\vec{u} = (u(0), u(\Delta x), u(2\Delta x) \dots u(N)) \quad (9)$$

$$\vec{v} = (v(0), v(\Delta x), v(2\Delta x) \dots v(N)) \quad (10)$$

$$\vec{k}_u = d_u \Delta t / \Delta x^2 (-2, 1, 0, \dots, 1) \quad (11)$$

$$\vec{k}_v = d_v \Delta t / \Delta x^2 (-2, 1, 0, \dots, 1) \quad (12)$$

とすると、(7, 8) は畳み込み * を用いて

$$\vec{u}(t + \Delta t) = \vec{u}(t) + \vec{k}_u * \vec{u}(t + \Delta t) \quad (13)$$

$$\vec{v}(t + \Delta t) = \vec{v}(t) + \vec{k}_v * \vec{v}(t + \Delta t) \quad (14)$$

と書くことができる。 $\vec{e} = (1, 0, 0 \dots 0)$ を用いると

$$(\vec{e} - \vec{k}_u) * \vec{u}(t + \Delta t) = \vec{u}(t) \quad (15)$$

$$(\vec{e} - \vec{k}_v) * \vec{v}(t + \Delta t) = \vec{v}(t) \quad (16)$$

となる。 $\vec{K}_u = \vec{e} - \vec{k}_u, \vec{K}_v = \vec{e} - \vec{k}_v$ として両辺をフーリエ変換し、「周波数領域では畳み込みはただの掛け算になる」という性質を用いると

$$\hat{u}(t + \Delta t) = \frac{1}{\hat{K}_u} \hat{u}(t) \quad (17)$$

$$\hat{v}(t + \Delta t) = \frac{1}{\hat{K}_v} \hat{v}(t) \quad (18)$$

という形となり、初期分布 $\vec{u}(0), \vec{v}(0)$ がわかればダイナミクスを計算できる。これらは実空間では、逆フーリエ変換をかけて

$$\vec{u}(t + \Delta t) = \mathcal{F}^{-1} \left(\frac{1}{\hat{K}_u} \right) * \vec{u}(t) \quad (19)$$

$$\vec{v}(t + \Delta t) = \mathcal{F}^{-1} \left(\frac{1}{\hat{K}_v} \right) * \vec{v}(t) \quad (20)$$

となる。陽解法と比べて一見計算量が増えそうに見えるが、フーリエ変換部分はFFTを使えば高速に計算でき、 Δt を2-3桁大きくしても計算が発散しないので、特に二次元、三次元の数値計算で威力を発揮する³⁾。

³⁾陰解法の理解に関しては広島大学の小林亮先生の作った `fles_fft` という数値計算ライブラリのソースコードと添付文書が非常に役に立った。もっと組織的に勉強するのであれば北大の長山雅晴先生がまとめた文書がある。

このような数値計算のスキームは瑣末な技術的事項に見えるかもしれないが、実はモデルの理解に役立つ。例えば後述のカーネルを用いたパターン形成のモデルには、陰解法の計算で使う道具がほぼそのまま出てくる。まず、 $\mathcal{F}^{-1} \left(\frac{1}{\hat{K}} \right)$ は、デルタ関数を初期値とする拡散方程式の時刻 Δt の解と思うと直感的に理解しやすい。各微小領域の中にいる u 分子は、拡散によって時刻 Δt 後には $\mathcal{F}^{-1} \left(\frac{1}{\hat{K}} \right)$ のような分布になる。分子間の相互作用はないと考えるので、時刻 Δt 後の分子の分布は、これらの分布を足し合わせたもの（畳み込み）となる。さらに、このカーネルの形状をメキシカンハット型にすると後述のカーネルを使ったパターン形成のモデル [5] とほぼ同等のものになる。このモデルでは、カーネルの逆フーリエ変換が後述の dispersion relation になっているが、これも陰解法の数値計算を理解しておく直感的にわかりやすい。

4. 数理解析

上述の数値計算で系の挙動を再現できたとして、なぜそのような挙動を示すのか、具体的にはどのような波長のパターンが生じるのか、二次元で stripe, spot になるのはどのような場合か、などを理解するには数理解析が必要である。以下では線形安定性解析、弱非線形解析、特異摂動法について簡単に説明する。

4.1 線形安定性解析⁴⁾

まず、どのような条件で自発的パターン形成が起きるのか理解するための線形安定性解析について説明する。系 (1)(2) の平衡点を $(0, 0)$ として、平衡点の周りで反応項を線形化する。

$$\frac{\partial u}{\partial t} = f_u u + f_v v + d_u \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} \quad (21)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} = g_u u + g_v v + d_v \frac{\partial^2 v}{\partial x^2} \quad (22)$$

ここで、行列とベクトル

$$\mathbf{u} = \begin{pmatrix} u \\ v \end{pmatrix}, \mathbf{A} = \begin{pmatrix} f_u & f_v \\ g_u & g_v \end{pmatrix}, \mathbf{D} = \begin{pmatrix} d_u & 0 \\ 0 & d_v \end{pmatrix}$$

⁴⁾線形安定性解析は、2002-2004年に留学中、OxfordのCentre for Mathematical Biologyに時々通っているうちに身についた。ただPhilip Mainiさんから何か習ったわけではなく、まとまって考える時間があったので頭の中で遊んでいるうちになんとなくできるようになっていたというのが正しい。Mainiさんは当時から温厚な方で、分野全体の歴史や動向に詳しくだったので、何がすでにやられていて何がやられていないかを確認するのにとても役に立った。そのとき感じたのは、線形の解析はほぼやり尽くされているのかと思いきや、実験の観点から知りたいことは意外と手付かずであることである。誰かから学習するのではなく、自分が知りたいことを素直に追いかける方が結局新規性があることができると思う。

を用いると

$$\frac{\partial}{\partial t} \mathbf{u} = \mathbf{A} \mathbf{u} + \mathbf{D} \frac{\partial}{\partial x^2} \mathbf{u} \quad (23)$$

と書くことができる。

ここで、このような線形の方程式の解は

$$\mathbf{u} = \mathbf{u}_0 e^{\lambda_k t} \sin kx \quad (24)$$

のような形になる。(23)に代入すると

$$\lambda_k \mathbf{u} = \mathbf{A} \mathbf{u} - k^2 \mathbf{D} \mathbf{u} \quad (25)$$

となるので、逆行列の存在しない条件 (行列式 = 0) を用いて λ と k の関係を

$$\lambda_k = \frac{1}{2}(f_u + g_v - d_u k^2 - d_v k^2) \pm \frac{1}{2} \sqrt{4f_v g_u + (f_u - g_v + (d_v - d_u)k^2)^2} \quad (26)$$

のように算出することができる。

ここで、線形パラメータが

$$f_u + g_v < 0 \quad (27)$$

$$f_u g_v - f_v g_u > 0 \quad (28)$$

$$d_v f_u + d_u g_v > 0 \quad (29)$$

$$(d_v f_u + d_u g_v)^2 - 4d_u d_v (f_u g_v - f_v g_u) > 0 \quad (30)$$

という条件を満たしているとき、波数0では $\lambda_k < 0$ で、ある波数の範囲では $\lambda_k > 0$ となる [6] (このような波数と成長速度の関係を dispersion relation という)。係数が (27)-(30) を満たす場合、特定の波数成分のみが成長し、他の波数成分が減衰するので結果として周期構造が形成される。

(27)-(30) の条件を満たすには、 $d_u < d_v$ が必要である。さらに、 $d_u \ll d_v$ であれば (29),(30) は自動的に成り立つ。このことから、拡散係数の差が Turing 不安定性の成立には大切である。最近になって、3変数以上の系であれば必ずしも拡散係数に差がなくても Turing 不安定性を作ることができるという報告があるが [7]、2変数に帰着させると結局実効拡散係数に差がある場合もあって [8]、重要であることには変わりがないと思われる。

(27)-(30) の条件を満たすパラメータの符号の組としては、 $f_u > 0$ (u が activator) の場合

$$(f_u, f_v, g_u, g_v) = (+, -, +, -) \quad (31)$$

$$(f_u, f_v, g_u, g_v) = (+, +, -, -) \quad (32)$$

の二組がある。(31)のほうを activator-inhibitor 系、(32)のほうを substrate depletion 系という⁵⁾。(31)の

方が有名だが、実際には u と v の位相が逆になる (32) という組み合わせも可能である。実際に四肢の骨格形成で出てくるモデルは (32) を使っている。

これらのパラメータから、生成される構造の波長は

$$\frac{2\pi}{k_{max}} = 2\pi \sqrt{\frac{d_u d_v (d_v - d_u)}{-d_u d_v (f_u - g_v) + (d_u + d_v) \sqrt{-d_u d_v f_v g_u}}} \quad (33)$$

として計算することができる [10]。ただ、 $f_u \sim d_v$ を実験的に全て計測するのは困難なので、次元解析による大雑把な量の推定の方が実は役立つ。 $f_u \sim g_v$ の反応項パラメータは $1/s$ の次元を持つ。拡散係数 d_u, d_v は m^2/s の次元を持つ。したがって、反応係数のオーダーを f 、拡散係数のオーダーを d とすると、生成されるパターンの大体の大きさは

$$\sqrt{d/f} \quad (34)$$

となる。例えば発生の文脈でのパターン形成を考えると、シグナル因子の溶液中での拡散係数のオーダーは $100 \mu m^2/s$ 、反応の特徴時間 ($= 1/f$) は $10h = 36000s$ なので、生成される構造のオーダーは $2mm$ 程度となるはずである。しかし実際に生成される構造の特徴長さは $100 \mu m$ オーダーなので、拡散係数を減少させる何らかの仕組みが必要なのが見える。

また、線形安定性解析の使い方として、パターンの出現速度も見積もることができる。周期構造の形成される実験系によっては、実験操作でパターンの出現時期が変わる場合がある。このパターンの出現時期は最大固有値

$$\lambda_{max} = \frac{d_v f_u - d_u g_v - 2\sqrt{-d_u d_v f_v g_u}}{d_v - d_u} \quad (35)$$

に対応する (λ_{max} は $1/\text{時間}$ の次元を持つ。(24) 参照) ので、この値の増減を見ることでパターンの出現速度の定性的変化を見積もることができる [10]。

4.2 弱非線形解析

以上の線形の解析に用いているのは平衡点周りで線形化した方程式なので、時間が経つと振幅が無限大に

Meinhardt が再発見した論文 [9] で初めて出てくる。Meinhardt 氏は名古屋で近藤滋先生が組織したシンポジウムと、明治大学の集中講義でお会いしたが、このスキームを自分が初めて提案したという点に非常にこだわりを持っておられた。明治大で「Turing 系には activator-inhibitor 系と substrate depletion 系がある」とうっかり喋ったら、次の日、「Turing のオリジナルの論文には activator-inhibitor とは一言も書いていない。私の論文で最初に出ている」という趣旨の長い pdf ファイルが送られてきた。このファイル、結構いろんな方がもらっているらしい。ついおっくうで返事をせずにいたら最近鬼籍に入ってしまった。悪いことをしたと思ったので、同じような記載をしている論文が査読に回ってきたら指摘するようにしている。

⁵⁾ これらの activator-inhibitor という言い方はもともと Turing のオリジナルの論文 [1] にはなく、Hans

発散し、定常状態は扱えない。定常状態の性質を知る方法として、弱非線形解析がある。これは、波数成分のうち最も早く成長する k_{max} 成分のみが大きくなり、あとはすぐに減衰すると考えて無視して非線形項の効果を考えようというものである。まず簡単な例として、定常状態の振幅を求める問題を考える。(22) に、飽和を表す $-cu^3$ 項を加えた

$$\frac{\partial u}{\partial t} = f_u u + f_v v - cu^3 + d_u \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} \quad (36)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} = g_u u + g_v v + d_v \frac{\partial^2 v}{\partial x^2} \quad (37)$$

という支配方程式の定常解について考えてみよう。この場合、非線形項 $-u^3$ は $\sin kx$ 以外の波数成分にも影響を及ぼすので本来は解けない。しかし、この項は三倍角の公式を用いて

$$\sin^3 kx = -\frac{1}{4}(3\sin kx - \sin 3kx) \quad (38)$$

として、 $\sin kx$ と $\sin 3kx$ の項に分解できる。ここで、 $\sin 3kx$ の成分が線形の領域の効果ですぐに減衰して無視できるとすると、近似的に定常状態での $\sin kx$ 成分の振幅を算出することができる。まず、支配方程式を

$$\frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} = \mathbf{A}\mathbf{u} + \mathbf{C}(\mathbf{u}) + \mathbf{D}\mathbf{u} \frac{\partial^2 \mathbf{u}}{\partial x^2} \quad (39)$$

という形にしておく。ここで

$$\mathbf{C}\left(\begin{pmatrix} u \\ v \end{pmatrix}\right) = \begin{pmatrix} u^3 \\ 0 \end{pmatrix}$$

である。

波数 k_{max} の $\mathbf{A} - k^2 \mathbf{D}$ の固有値を λ_1, λ_2 ($Re(\lambda_1) > Re(\lambda_2)$) とする。つまり $\lambda_{max} = \lambda_1$ とし、それぞれに対応する固有ベクトルを $\mathbf{w}_1 = \begin{pmatrix} u_1 \\ v_1 \end{pmatrix}, \mathbf{w}_2 = \begin{pmatrix} u_2 \\ v_2 \end{pmatrix}$ として、

$$\mathbf{C}(\mathbf{w}_1) = c \begin{pmatrix} u_1^3 \\ 0 \end{pmatrix} = c_1 \mathbf{w}_1 + c_2 \mathbf{w}_2$$

となる c_1 を求めておくと、三次項が各固有値成分に働く効果を計算できる。具体的には、 \mathbf{w}_1 成分の振幅を $a_1(t)$ として $\mathbf{u} = a_1 \mathbf{w}_1 \sin kx$ を (39) に代入すると

$$\frac{\partial}{\partial t} a_1 = \lambda_1 a_1 - \frac{3}{4} c_1 a_1^3 \quad (40)$$

となって、定常状態での \mathbf{u} の振幅

$$\sqrt{\frac{4\lambda_1}{3c_1}} \mathbf{w}_1 \quad (41)$$

を求めることができる。線形領域の不安定性が強ければ λ_1 が大きくなって振幅が増し、飽和の効果 c_1 が大

きくなれば振幅が減少することから、定性的な性質が理解できる。

次に、弱非線形解析の主要な使い道の、stripe-spot selection について考えてみよう。二次元の周期構造は、縞模様 (stripe) の他に水玉模様、網目模様 (spot) も出現する。この差はどこからくるのだろうか？これを理解するため、二次項 qu^2 を加えた

$$\frac{\partial u}{\partial t} = f_u u + f_v v + qu^2 - cu^3 + d_u \Delta u \quad (42)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} = g_u u + g_v v + d_v \Delta v \quad (43)$$

という二次元の Turing 系を考える。

この系を用い、波数 k_{max} となる解のうち、 60° ずつ角度の異なるもの3つを組み合わせた解

$$\mathbf{u}(x, y, t) = a_1 \mathbf{w}_1 \cos kx + \quad (44)$$

$$a_2 \mathbf{w}_1 \cos\left(\frac{1}{2}kx + \frac{\sqrt{3}}{2}ky\right) +$$

$$a_3 \mathbf{w}_1 \cos\left(\frac{1}{2}kx - \frac{\sqrt{3}}{2}ky\right)$$

を考える。この解では $a_1 \neq 0, a_2 = a_3 = 0$ とすると stripe パターン、 $a_1 = a_2 = a_3 \neq 0$ とすると spot パターンになる。 a_1, a_2, a_3 の時間発展を考え、stripe, spot 解それぞれが安定となる条件を考えれば良い⁶⁾。先程同様、まず支配方程式を

$$\frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} = \mathbf{A}\mathbf{u} + \mathbf{Q}(\mathbf{u}) + \mathbf{C}(\mathbf{u}) + \mathbf{D}\Delta \mathbf{u} \quad (45)$$

という形にしておく。ここで

$$\mathbf{Q}\left(\begin{pmatrix} u \\ v \end{pmatrix}\right) = q \begin{pmatrix} u^2 \\ 0 \end{pmatrix} \quad (46)$$

である。先程同様、二次項が各固有値成分に与える効果を計算するため

$$\mathbf{Q}(\mathbf{w}_1) = q \begin{pmatrix} u_1^2 \\ 0 \end{pmatrix} = q_1 \mathbf{w}_1 + q_2 \mathbf{w}_2$$

となる q_1 を求めておく。(44) を (45) に代入して波数 k_{max} の項のみを残し、 a_1, a_2, a_3 の方程式に直すと

$$\frac{da_1}{dt} = a_1 \lambda_1 + a_2 a_3 q_1 - \frac{3c_1}{4} (a_1^3 + 2a_1(a_2^2 + a_3^2)) \quad (47)$$

$$\frac{da_2}{dt} = a_2 \lambda_1 + a_1 a_3 q_1 - \frac{3c_1}{4} (a_2^3 + 2a_2(a_1^2 + a_3^2)) \quad (48)$$

$$\frac{da_3}{dt} = a_3 \lambda_1 + a_1 a_2 q_1 - \frac{3c_1}{4} (a_3^3 + 2a_3(a_1^2 + a_2^2)) \quad (49)$$

⁶⁾数理生物学の文脈でこの stripe-spot selection を扱っている Bard Ermentrout の有名な論文 [11] があるのだが、この論文ではなぜか 90° 回転させた余弦波2つを組み合わせた $r \cos x + s \cos y$ という解を使っている。この解だとそもそも反転対称性があるし、本文と同様の解析をしても q が残らない。なにかおかしい気がするのだが、ちゃんとロジックを追っていない。

となる⁷⁾。これらを用いて stripe, spot の場合の定常解を求めてみる。stripe の場合、

$$a_1 = \pm \sqrt{\frac{4\lambda_{max}}{3c_1}}, a_2 = a_3 = 0 \quad (50)$$

となる。さらに、(47)(48)(49) の Jacobian

$$\begin{pmatrix} \frac{\partial}{\partial a_1} \frac{\partial a_1}{\partial t} & \frac{\partial}{\partial a_2} \frac{\partial a_1}{\partial t} & \frac{\partial}{\partial a_3} \frac{\partial a_1}{\partial t} \\ \frac{\partial}{\partial a_1} \frac{\partial a_2}{\partial t} & \frac{\partial}{\partial a_2} \frac{\partial a_2}{\partial t} & \frac{\partial}{\partial a_3} \frac{\partial a_2}{\partial t} \\ \frac{\partial}{\partial a_1} \frac{\partial a_3}{\partial t} & \frac{\partial}{\partial a_2} \frac{\partial a_3}{\partial t} & \frac{\partial}{\partial a_3} \frac{\partial a_3}{\partial t} \end{pmatrix} \quad (51)$$

に (50) を代入し、固有値が全て負になる条件を求めると

$$|q_1| < \sqrt{3c_1\lambda_{max}}/2 \quad (52)$$

となる。したがって、stripe 解は q_1 が小さい時は安定だが、 q_1 がある閾値を超えると不安定になる。

spot 解についても同様の解析を行うと、定常解は

$$a_1 = a_2 = a_3 = \frac{2(q_1 \pm \sqrt{q_1^2 + 15c_1\lambda_{max}})}{15c_1} \quad (53)$$

となる。この解の線形安定性をみるため、(51) に (53) を代入し、固有値が全て負になる条件を求めると

$$|q_1| > \sqrt{3c_1\lambda_{max}}/4 \quad (54)$$

となる。したがって、spot 解は q_1 が小さい時は不安定だが、 q_1 がある閾値を超えると安定になる。 $\sqrt{3c_1\lambda_{max}}/4 < |q_1| < \sqrt{3c_1\lambda_{max}}/2$ では両方の解が安定になるので、初期値依存で stripe, spot のどちらかになったり、領域が広い時は一部が stripe, 残りが spot になったりする。

stripe-spot selection については、系の反転対称性による直感的理解が可能である。

$$\bar{u} \rightarrow -u \quad (55)$$

$$\bar{v} \rightarrow -v \quad (56)$$

という、パターンの図と地を反転する変換を考える。stripe パターンは反転しても同じく stripe パターンだが、spot パターンはメッシュ状のパターンになって、定性的に異なるパターンとなる。二次項 q が存在しない場合は変換 (55)(56) でも全く同じ支配方程式が出

てくるが、二次項が存在すると定性的に異なる支配方程式が出てくる。パターンに反転対称性があれば支配方程式にも反転対称性があるはずなので、 $q=0$ では stripe パターン、 $q \neq 0$ では spot パターンになる。

4.3 特異摂動法による定常解の構成

Diffusion-driven instability の条件 (27)-(30) より、 $d_u < d_v$ となる必要があるが、この差が非常に大きい場合を考える。具体的には小さい量 ϵ^2 を用いて、 $d_u = \epsilon^2, d_v = 1$ となる場合を考える。このような場合、不安定化幅は一般に広がって先程のような弱非線形性解析は使えない。また、実際に生じるパターンも通常の $\sin kx$ とは異なり、エッジが強調されたような形状になる。このような系で使えるのが特異摂動法である。この方法では、 u が空間的に急峻に変化し、 v の変化がゆるやかとみなせる部分 (inner solution) と、 u がゆるやかに変化する部分 (outer solution) に分ける。(1)(2) において $d_u = \epsilon^2, d_v = 1$ とする。 $\epsilon \rightarrow 0$ のとき、outer solution の支配方程式は

$$0 = f(u, v) \quad (57)$$

$$0 = g(u, v) + \frac{\partial^2 v}{\partial x^2} \quad (58)$$

となる。inner solution の支配方程式は、 u が急激に変化する領域に注目するために空間座標を引き延ばして $\xi = x/\epsilon$ として変形すると

$$0 = f(u, v) + \frac{\partial^2 u}{\partial \xi^2} \quad (59)$$

$$0 = \frac{\partial^2 v}{\partial \xi^2} \quad (60)$$

となる。

さらに、 $f(u, v)$ の非線形性を区分線形関数で表し

$$f(u, v) = \begin{cases} -f_u u + f_v v - 2f_u & (u < -1) \\ f_u u + f_v v & (-1 \leq u \leq 1) \\ -f_u u + f_v v + 2f_u & (1 < u) \end{cases} \quad (61)$$

$$g(u, v) = g_u u + g_v v \quad (62)$$

とすると、それぞれの範囲では解くことができる。これらの解を繋ぎ目で滑らかにつなぎ合わせて解を構成することで、解の具体的な形を知ることができる。この場合は

$$u(x) = 2e^{\sqrt{f_u}(x-1/2)/\epsilon} + \frac{2f_u g_v}{p} + \frac{2f_v g_u}{p} \cosh\left(\sqrt{\frac{p}{f_u}} x\right) \operatorname{sech}\left(\sqrt{\frac{p}{2f_u}}\right) \quad (63)$$

$$v(x) = \frac{2f_u g_u}{p} \left(\cosh\left(\sqrt{\frac{p}{f_u}} x\right) \operatorname{sech}\left(\sqrt{\frac{p}{2f_u}}\right) - 1 \right) \quad (64)$$

⁷⁾簡単に書いたが、三角関数ベースで計算すると $3^3 + 3^2 = 36$ 個の項が出てくる。 e^{ikx} を用いると $6^3 + 6^2 = 252$ 個の項が出てくる。この問題、三次元バージョンもあって、stripe-spot よりもさらに多彩なパターンが出てくる [12]。経験上、このような「難しくないが面倒臭い」問題はあまり数学者は考えてくれない。私自身は Mathematica 使いで、この種類の問題を機械にやらせることができるのが強みになっていると思う。

となる ($p = -(f_u g_v + f_v g_u) > 0$) [13]。

この方法は、成長領域上の Turing パターンで要素が増加する場合に、山と谷の部分がどちらが分裂するかを解析的に理解するのに使われた [14]⁸⁾。また自分では、枝芽の発生で Doublefoot と呼ばれる多指症のミュータントマウスで通常と定性的に異なる細い指が出現することに着目し、拡散係数の差が大きく、さらに成長領域上であればこのような mixed mode パターンが生じることを示すために使った [13]。

5. 生物系への応用

5.1 動物の縞模様

動物の体には、縞模様がみられることが多い。このような縞模様の形成メカニズムに関して、古くから Turing パターンであるという仮説が立てられてきた⁹⁾。ただ、数学者の間でのみ仮説として扱われており、生物学者が顧みることは少なかった。

その後、1990年代に Turing パターンが化学者の手によって人工的に作り出されるというブレイクスルーがあり [16]¹⁰⁾、生物では Turing パターンは存在しな

⁸⁾ Crampin さんは私が留学中にちょうど Oxford にいたので、直接やり方を教えてもらった ([14] は u と v が慣用的な使い方と逆で結構読みにくいのだが、「何か理由があって u を inhibitor にしたんだけどもう理由を忘れちゃったよ」と言っていたのを覚えている)。もともと Gillian のラボの Doublefoot ミュータントマウスのモデルを書くはずが結局理論だけで D 論を書いたと聞いた (あまり意識していなかったが、その後を私が引き継いだような形になっている)。その後、家庭の事情でニュージーランドに移って今はおもに電気生理のモデルを扱っている。

⁹⁾ この縞模様に関して文献的に迎って一番最初に出てくるのは J. Murray の論文なのだが、実は時系列で最初に言いたしたのは Edinburgh の Jonathan Bard だったらいい。しかし Bard は系の数理解析ができず、時間がかかっているうちに論文は Murray に先を越された、という経緯を留学先のボスの Gillian Morriss-Kay から聞いた (Gillian がたまたま Bard と再婚した直後だったのでいろいろ個人的な話が聞けた)。のちに彼が出した論文 [15] でも、使っている方程式の線形安定性解析をしてみると実は $\lambda_{max} = 0$ となるパラメータセットを使っていて、Diffusion-driven instability の条件を満たしていない。初期ノイズのうち特定の波数成分のみが成長せずに残って、あとは消えていくというような系になってしまっている。新規性のあるアイデアを思いつく人と、数学的にモデルを整備する人は異なる場合があるという良い例である。

¹⁰⁾ この系で使われているのは CIMA 反応という化学反応だが、activator に当たる分子はヨウ素 (I) である。ヨウ素の空間分布を可視化するためにデンブングルを用いたのだが (デンブングルにヨードをかけると紫色になるアレである)、結果としてヨードが動かないゲルに吸着されて実効拡散係数が下がったためにパターンが

いのか、という期待が高まった。その際に出たのが現阪大の近藤滋先生のタテジマキンチャクダイの皮膚模様の論文である [17]。この経緯は近藤先生ご自身の著書 [18]¹¹⁾ を参照されたい¹²⁾。この系の数理的な部分のインパクトとしては、成長領域でのパターン形成が挙げられる。この仕事では Turing 系が働いている領域が成長していったら何が起こるのかを数値的にみているが、このような領域成長は生物特有の問題でありこれまで研究されてこなかった。以後、領域成長を扱った仕事の数多くが出た (例えば [14,13,19,20])。

その後、魚類の皮膚の系では activator や inhibitor にあたる分子はなかなか見つからず、関係する分子がわからなくてもできる縞の異方性 [21] や stripe-spot selection に関する仕事 [22] が出る時期が続いた。結局 2012 年になって、魚の縞模様は拡散性シグナルの相互作用ではなく、細胞が突起を伸ばして細胞間相互作用を起こすことで形成されることを近藤先生自身が示した [23]。これ以後、個々の細胞の非局所効果を表すのにより適した、カーネルを用いたモデル方程式の研究へとつながっている [5]。

この仕事とは別に、皮膚パターンに Turing 系を用いる例が今でも見られる。例えば、トカゲの皮膚パターンの時系列変化を反応拡散系のような連続モデルから cellular automata のような離散モデルへの遷移として捉えた論文は最近話題になった [24]¹³⁾。

5.2 四肢骨格

我々の四肢の骨格は、近位 (体幹の近く) から遠位 (先端) に向かって、1 本 (上腕骨)-2 本 (橈骨、尺骨)-5 本 (指の骨) のように増加していく。この指の位置は個別の遺伝子で指定されているわけではなく、特定の領域にほぼ一定のサイズの構造を作るメカニズムが存在することが古くから言われてきた。

私が知る限り、四肢骨格の理論モデルの最初のもは Edingburgh 大学の D. Ede が発表している [25]¹⁴⁾。

出た。拡散係数の差の重要性はここでも見られる。

¹¹⁾ この本に出てくる「ダースペーダー」H 先生は最近ノーベル医学生理学賞を受賞した。朝日新聞に載っていた JST の説明会のエピソードは私も目撃した。

¹²⁾ 私自身が近藤滋先生と知り合いになったのはこの論文が出た 1995 年頃である。大学院生だった私はこのような学問の流れを知らず、模様を見ただけでなぜメカニズムの証明になっているのか理解できなかったので直接聞きに行った。京大医学部近くの満佐留という定食屋で昼ご飯をおごってもらって色々教わった。以後様々な局面でお世話になっている。

¹³⁾ たまたまこの論文の referee をしたのだが、連続-離散の関係の部分より、曲面の補正など無駄にハイテクを使って 4 年間ひたすらトカゲの皮膚パターンを観察していて、アホな人達だ、と大変好感を持ったのを覚えている。

¹⁴⁾ 2002 年に一度スコットランドの Dundee の学会で会っ

しかしこの論文では自発的パターン形成を用いているわけではない。Turing パターンに近い形態形成のメカニズムが四肢で働いているのを最初に指摘したのは New York Medical College の Stuart Newman である [26]¹⁵⁾。

このあと、培養系を用いた実験的な検証が Stuart Newman のグループによって行われた [28]。これは主に、ニワトリ胚の四肢の原基の微小集積培養を用いて行われた。この解析によって、activator にあたる分子の候補はいくつかリストアップされてきたが、inhibitor にあたる分子はあまり良い候補が見つかっていなかった。私個人はこれらを受けて、博士論文でマウスの微小集積培養系を用いて、パターンの幅を制御したり、activator の候補の一つを同定したりした [29,30]¹⁶⁾。Stuart Newman のグループは他にも、進化的に出現する四肢の骨格構造の近位-遠位軸のパターンも同時に説明しようとするモデルを発表した [31]。これは2変数で周期構造がさらに時間的に振動するような形になっており、一見 Turing-Hopf は2変数では生じないので不思議に見えるが、これは、 $k=0$ 近傍で固有値に虚部があるようなシステムをうまく使って再現できる ($k=0$ で λ の実部が正になるので、厳密には Turing 系ではない)。

近年になって、CRG Barcelona の James Sharpe らによって、計算モデルを用いた仕事が続けて2報出た¹⁷⁾。最初の論文では、これまで単純に、成長する肢

芽の先端のみでパターンが生じるとされてきたモデルを、肢芽全体で均等にパターン形成が起きる、という過程に置き換え、この条件で数値計算を行うと、肢芽の先端近傍ではパターンの生じる特徴長さが長くなると生体内の形態は再現できない、というものである [33]。さらに2年後、実際に activator と inhibitor の候補をスクリーニングで同定し、それら3遺伝子の相互作用で Turing instability が生じることを示した [7]。これらは最先端の実験技術と数値計算、数理解析まで組み合わせた稀有な例だが、これでもまだ本当にこれらの分子が Turing 系を構成しているかは議論がある。

5.3 毛、羽毛

毛や羽毛の発生に関しても、昔から Turing パターンであるという主張がなされてきた。この件で実験と理論を組み合わせた融合研究のさきがけとなったのが Cheng-Ming Chuong による仕事 [34] である¹⁸⁾。彼らはニワトリ皮膚の再構成培養系を用いて、各毛包の原器が自己組織化で形成されることを示した。また、遺伝子間相互作用を実際にシグナル分子をロードしたビーズを培養系に埋めて局所刺激を行い、モデルと同様の反応が起こることを示した¹⁹⁾。

2005年には、Richard O. Prum らが、毛包の周期構造だけでなく鳥の羽毛の枝分かれ構造もほぼ同じモデルで形成できることを示した [35]²⁰⁾。基本的には Gierer-Meinhardt 系を成長領域で走らせて枝分かれ構造を作らせており、成長領域上の Turing パターンのク

たことがある。記念写真を撮っておけばよかった

¹⁵⁾この論文で用いられている支配方程式では一変数の反応拡散方程式で定常解の議論をしている形になっており、実は自発的パターン形成を起こさない。アイデアは良かったのだが、数学的には間違っていたわけである。のちにこの点は Hans Othmer らによって指摘され [27]、数学的に正しいモデルが以後用いられるようになった。サイエンスが誤りを修正していく過程であるという良い例である。

¹⁶⁾私がD論を出した2000年前後に、Newmanさんが一度ラボに来てくれたことがある。京大の竹市雅俊先生のところに研究打ち合わせに行く途中に立ち寄ってくれて、議論してもらった。夜は京都を案内したが、竹市先生のところはどうだったか尋ねてみたら、「色々親切に教えてくれて、帰りは車を自分で運転してくれたりしたのだけれど、私の理論のところは全然聞いてくれなかった」と若干凹んでいた。その時の印象が強くて、私自身はかなり後になるまで竹市先生を避けていた。いまは普通に本人ともお弟子さんとも議論をする。

¹⁷⁾2002年に留学した際に Jonathan Bard に紹介されて以来付き合いがある (Bard に「crazy Japanese が来る」と言われたような)。もともと頭頸部発生のラボにいたが、KO ラボの定型的な研究が嫌になって Optical CT を自分で開発して独立した。子供時代に SHARP の MZ-80 をいじってコーディングのスキル

を身につけたとか、私の review [3] を読んで自発的パターン形成を扱えるようになったとかで (社交辞令かもしれないが)、かなり親日的である。このあたりの経緯は [32] 参照。

¹⁸⁾松江で行われた発生物学会で一度お会いしたが、もともと Edelman という免疫のエライ先生の元で育ったためかものすごく腰が低く、どんな人でも仲良くできるという感じの方だった。本人は理論モデルに関して深い理解をしている訳ではないが、他分野の方とうまく共同研究を回していた。進化の人と組んだダーウィンフィンチのくちばしの話もセンスが良いと思う。

¹⁹⁾この実験を実際に行ったのが延世大学の Hang-Son Jung さんである。Lewis Wolpert ラインの人なので自分で理論的なことはできないが、自己組織化関係のモデリングには理解がある。先日じつは大学の先輩であることが判明して死ぬほど飲まされた。さすが韓国は儒教の国である。

²⁰⁾Prum さんは近藤滋先生が名古屋大学で行なったシンポジウムでお会いして、温泉で色々話をした。彼自身は鳥類学者で、モデル部分は Meinhardt が作っている。彼からは「鳥類の頭蓋骨の縫合線は湾曲していないはずだ」と言われ、大型の鳥類ではそんなことはないのでは、と思いつつちゃんと反例を見つけていない。

ラスに属する。しかし、同じモデルを使って多様なパターンを説明できるようになったという面で優れた仕事である。

5.4 歯

我々の歯は様々な形をしているが、発生段階ではほぼ同じ大きさの構造が並んでいる。動物の歯の並びを見ると、ほぼ同じサイズの歯が等間隔で並んでいるように見えることがある。また、個別の臼歯の形状を観察しても、種によっては美しい labyrinthine パターンが見られる。これらのことから、歯の形状を Turing パターンと見る仕事も古典的に存在する [6]。

歯のモデル研究で特筆すべき例として、上述の Salazar-Ciudad さんによる周期構造を形成する遺伝子ネットワークの進化という一連の研究がある [36,37]。これは、転写因子および拡散性のシグナル因子を含む遺伝子ネットワークを持った細胞を空間的に並べたものを一個体とする。各世代で複数個、遺伝子ネットワークにランダムに変異を入れた個体を作成し、そのうち周期構造を生成したものを次世代に残す、という形で遺伝子ネットワークを進化させた。このようなやり方でネットワークを進化させた場合、筆者らは 2 種類のやり方が出現したと主張している。一つは Hox 遺伝子のように、1 つの遺伝子が 1 つの構造を決めているようなやり方 (hierarchical)、もう一つは Turing パターンのような自発的パターン形成 (emergent) である。彼らの主張では、進化的には emergent クラスのメカニズムが最初に出現し、進化が進むに連れて hierarchical なメカニズムに置き換わっていくというものだった。この論文は最初地味な進化発生学の専門誌に乗ったのだが、Stuart Newman さんが意義を発見して Nature で紹介したりして有名になった。四肢の骨格の形成では進化的に古い魚類などの生物では骨格の原基は周期性が前面に出ているのに対し、新しい哺乳動物では個別の骨格要素のアイデンティティの方が前面に出ている。このような、実際の進化の過程を再現しているのではないかという側面から四肢で Turing 系を使っていた人達 (私を含めて) には非常にインパクトがあった²¹⁾。

²¹⁾ただこの話の困ったところは、この過程を他のグループが再現できていないところである。Salazar-Ciudad さんは基本的に正規の理論教育を受けていないので (私も受けてないが) モデル部分がかかなり荒い。その後、阪大の藤本仰一さんなど、東大の金子邦彦研究室ラインの人達がネットワーク科学で使われるモデルの枠組みを用いて同様の仕事をしているが [38][39]、Turing パターンは出現していない。アイデアだけで消えていくのか理論的なバックグラウンドをもっと堅気の理論家が構築してくれるのか、もう少し評価に時間がかかると思われる。

5.5 左右差

我々の体は表面から見ると左右対称だが、体内には実は左右差がある。たとえば心臓は身体の左側に寄っているし、肝臓は右側に寄っている。世の中には内臓逆位という状態の方も存在するが、非常に頻度は低い。このような、身体の左右差の起源は発生生物学上の大問題だったが、1998年に野中らが原腸陥入時の Hensen node 付近に繊毛が生えていて、一定方向に流れを生み出すことで左右差を作り出すという発見をした [40]。2006年に中村らは、この大元の微弱なシグナルを増強するために Nodal と Lefty が activator, inhibitor となっている Turing 系を用いている報告をした [41]。モデル部分は現京大の望月敦史さんが作っている。発現が transient になるような工夫がされているが、大元のメカニズムは半周期の Turing パターンである。

さらに2012年には、上述の Nodal と Lefty の拡散係数の差を実際に計測した論文が出た [42]。前述の拡散係数の差に関する条件が昔から問題になっていたので、遂に直接計測の結果が出たかと思ったのを覚えている。morphogen の分布を可視化して拡散係数を計測するタイプの研究が流行ったのが少し前だったので、実験系の人だと FRAP で拡散係数を見ただけでなぜ Science に載るのだ、と不審に思った方もいると思うが、これは前述のような理論研究の流れが背景にある。

6. おわりに

以上にあげた例の他にも、肺の枝分かれ形成 [43]、植物の葉 [44][45]、口蓋ヒダ [46]、亀の甲羅 [47] など、数多くの例がある。いろいろなことがやり尽くされているように感じるかもしれないが、生物学側の要請から考えていくと、まだまだ新しいことはあると思う。若い方には是非楽しく遊んでいただきたいと思う。

また、弱非線形性解析に関して、原理は知っていたがこれまできちんとフォローしていなかったが、この機会に自分で一から再構成した。協力してくれた大学院生の杉原圭さんと学部学生の河村真理さんに感謝して本稿を終える。

参考文献

- [1] A M Turing. The chemical basis of morphogenesis. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series B, Biological Sciences*, 237(641):37, 1952.
- [2] Andrew Hodges. *Alan Turing: The Enigma*. Vintage, 1994.
- [3] Takashi Miura and Philip K. Maini. Periodic pattern formation in reaction-diffusion systems: an introduction for numerical simulation. *Anatomical science international*, 79(3):112–123, 2004.
- [4] Takashi Miura. *発生の数理*. 京都大学出版会, 2015.
- [5] Shigeru Kondo. An updated kernel-based Turing

- model for studying the mechanisms of biological pattern formation. *Journal of Theoretical Biology*, 414(C):120–127, feb 2017.
- [6] James D Murray. *Mathematical Biology II - Spatial Models and Biomedical Applications*. Springer, 2003.
- [7] J Raspopovic, L Marcon, L Russo, and James Sharpe. Digit patterning is controlled by a Bmp-Sox9-Wnt Turing network modulated by morphogen gradients. *Science (New York, NY)*, 345(6196):566–570, 2014.
- [8] T Miura. Modulation of activator diffusion by extracellular matrix in turing system. *RIMS Kokyuroku Bessatsu B*, 3:165–176, 2007.
- [9] Hans Meinhardt. A theory of biologicaln pattern formation, dec 1972.
- [10] Takashi Miura and P.K. Maini. Speed of pattern appearance in reaction-diffusion models: Implications in the pattern formation of limb bud mesenchyme cells. *Bulletin of mathematical biology*, 66(4):627–649, 2004.
- [11] B Ermentrout. Stripes or Spots? Nonlinear Effects in Bifurcation of Reaction-Diffusion Equations on the Square. *Proceedings of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 434(1891):413–417, 1991.
- [12] Hiroto Shoji, Kohtaro Yamada, Daishin Ueyama, and Takao Ohta. Interconnected Turing patterns in three dimensions. *Physical Review E*, 72(6):46212, 2007.
- [13] Takashi Miura, Kohei Shiota, Gillian Morriss-Kay, and Philip K. Maini. Mixed-mode pattern in Double-foot mutant mouse limb - Turing reaction-diffusion model on a growing domain during limb development. *Journal of Theoretical Biology*, 240(4):562–573, 2006.
- [14] Edmund J Crampin, E A Gaffney, and P K Maini. Mode-doubling and tripling in reaction-diffusion patterns on growing domains: a piecewise linear model. *J. Math Biol.*, 44(2):107–128, 2002.
- [15] J Bard and I Lauder. How well does Turing’s theory of morphogenesis work? *Journal of Theoretical Biology*, 45(2):501–531, 1974.
- [16] V. Castets, E. Dulos, J. Boissonade, and P. De Kepper. Experimental evidence of a sustained standing Turing-type nonequilibrium chemical pattern. *Physical Review Letters*, 64(24):2953–2956, 1990.
- [17] Shigeru Kondo and Rihito Asai. A reaction diffusion wave on the skin of the marine angelfish Pomacanthus. *Nature*, 376(6543):765–768, 1995.
- [18] 近藤滋. 波紋と螺旋とフィボナッチ. 学研プラス, 2013.
- [19] S. Seirin Lee and E. A. Gaffney. Aberrant Behaviours of Reaction Diffusion Self-organisation Models on Growing Domains in the Presence of Gene Expression Time Delays. *Bulletin of Mathematical Biology*, 72(8):2161–2179, 2010.
- [20] S. Seirin Lee, E. A. Gaffney, and R. E. Baker. The Dynamics of Turing Patterns for Morphogen-Regulated Growing Domains with Cellular Response Delays. *Bulletin of Mathematical Biology*, 73(11):2527–2551, 2011.
- [21] Hiroto Shoji, A Mochizuki, Yoh Iwasa, Masashi Hirata, Tsuyoshi Watanabe, Syozo Hioki, and Shigeru Kondo. Origin of directionality in the fish stripe pattern. *Developmental Dynamics*, 226(4):627–633, 2003.
- [22] Seita Miyazawa, Michitoshi Okamoto, and Shigeru Kondo. Blending of animal colour patterns by hybridization. *Nature Communications*, 1(6):1–6, 2010.
- [23] Masafumi Inaba, Hiroaki Yamanaka, and Shigeru Kondo. Pigment pattern formation by contact-dependent depolarization. *Science*, 335(6069):677, 2012.
- [24] Liana Manukyan, Sophie A. Montandon, Anamarija Fofonjka, Stanislav Smirnov, and Michel C. Milinkovitch. A living mesoscopic cellular automaton made of skin scales. *Nature*, 544(7649):173–179, apr 2017.
- [25] O K Wilby and D A Ede. A model generating the pattern of cartilage skeletal elements in the embryonic chick limb. *Journal of Theoretical Biology*, 52(1):199–217, 1975.
- [26] S A Newman and H L Frisch. Dynamics of skeletal pattern formation in developing chick limb. *Science (New York, NY)*, 205(4407):662–668, 1979.
- [27] Hans G. Othmer. On the Newman-Frisch model of limb chondrogenesis. *Journal of Theoretical Biology*, 121(4):505–508, 1986.
- [28] Sherry A. Downie and Stuart A. Newman. Morphogenetic differences between fore and hind limb precartilagel mesenchyme: relation to mechanisms of skeletal pattern formation. *Developmental Biology*, 162(1):195–208, 1994.
- [29] Takashi Miura and K. Shiota. Extracellular matrix environment influences chondrogenic pattern formation in limb bud micromass culture: experimental verification of theoretical models. *The Anatomical Record Part A: Discoveries in Molecular, Cellular, and Evolutionary Biology*, 258(1):100–107, 2000.
- [30] Takashi Miura and Kohei Shiota. TGF β 2 acts as an ‘activator’ molecule in reaction-diffusion model and is involved in cell sorting phenomenon in mouse limb micromass culture. *Developmental Dynamics*, 217(3):241–249, 2000.
- [31] J Zhu, Y T Zhang, M S Alber, and Stuart A Newman. Bare bones pattern formation: a core regulatory network in varying geometries reproduces major features of vertebrate limb development and evolution. *PLoS ONE*, 5(5):e10892, 2010.
- [32] Seema Grewal. An Interview with James Sharpe. *Development*, 145:1–4, 2018.
- [33] Rushikesh Sheth, Luciano Marcon, M Félix Bastida, Marisa Junco, Laura Quintana, Randall Dahn, Marie

- Kmita, James Sharpe, and Maria A Ros. Hox genes regulate digit patterning by controlling the wavelength of a Turing-type mechanism. *Science (New York, NY)*, 338(6113):1476–1480, 2012.
- [34] Han-Sung Jung, Philippa H Francis-west, Randall B Widelitz, Ting-xin Xin Jiang, Sheree Ting-berreth, Cheryll Tickle, Lewis Wolpert, and Cheng-ming Chuong. Local Inhibitory Action of BMPs and Their Relationships with Activators in Feather Formation: Implications for Periodic Patterning. *Developmental Biology*, 196(1):11–23, 1998.
- [35] Matthew P Harris, Scott Williamson, John F Fallon, Hans Meinhardt, and Richard O Prum. Molecular evidence for an activator-inhibitor mechanism in development of embryonic feather branching. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 102(33):11734–11739, 2005.
- [36] I. Salazar-Ciudad, R. V. Solé, and S. A. Newman. Phenotypic and dynamical transitions in model genetic networks II. Application to the evolution of segmentation mechanisms. *Evolution and Development*, 3(2):95–103, 2001.
- [37] I. Salazar-Ciudad, S. A. Newman, and R. V. Solé. Phenotypic and dynamical transitions in model genetic networks I. Emergence of patterns and genotype-phenotype relationships. *Evolution and Development*, 3(2):84–94, 2001.
- [38] Koichi Fujimoto, Shuji Ishihara, and Kunihiko Kaneko. Network evolution of body plans. *PLoS ONE*, 3(7), 2008.
- [39] Takahiro Kohsokabe and Kunihiko Kaneko. Evolution-development congruence in pattern formation dynamics: Bifurcations in gene expression and regulation of networks structures. *Journal of Experimental Zoology Part B: Molecular and Developmental Evolution*, 326(1):61–84, 2016.
- [40] S Nonaka, Y Tanaka, Y Okada, S Takeda, A Harada, Y Kanai, M Kido, and N Hirokawa. Randomization of left-right asymmetry due to loss of nodal cilia generating leftward flow of extraembryonic fluid in mice lacking KIF3B motor protein. *Cell*, 95(6):829–837, 1998.
- [41] Tetsuya Nakamura, Naoki Mine, Etsushi Nakaguchi, Atsushi Mochizuki, Masamichi Yamamoto, Kenta Yashiro, Chikara Meno, and Hiroshi Hamada. Generation of Robust Left-Right Asymmetry in the Mouse Embryo Requires a Self-Enhancement and Lateral-Inhibition System. *Developmental Cell*, 11(4):495–504, 2006.
- [42] P. Muller, K. W. Rogers, B. M. Jordan, J. S. Lee, D. Robson, S. Ramanathan, and A. F. Schier. Differential Diffusivity of Nodal and Lefty Underlies a Reaction-Diffusion Patterning System. *Science*, 336(6082):721–724, 2012.
- [43] Denis Menshykau, Conradin Kraemer, and Dagmar Iber. Branch mode selection during early lung development. *PLoS Computational Biology*, 2012.
- [44] Hironori Fujita, Koichi Toyokura, Kiyotaka Okada, and Masayoshi Kawaguchi. Reaction-Diffusion Pattern in Shoot Apical Meristem of Plants. *PLoS ONE*, 6(3):e18243, mar 2011.
- [45] Akiko Nakamasu, Hokuto Nakayama, Naomi Nakayama, Nobuhiko J Suematsu, and Seisuke Kimura. A developmental model for branching morphogenesis of lake cress compound leaf. *PLoS ONE*, 9(11):e111615, 2014.
- [46] Andrew D Economou, Atsushi Ohazama, Thantrira Porntaveetus, Paul T Sharpe, Shigeru Kondo, M Albert Basson, Amel Gritli-Linde, Martyn T Cobourne, and Jeremy B A Green. Periodic stripe formation by a Turing mechanism operating at growth zones in the mammalian palate. *Nature Genetics*, 44(3):348–351, 2012.
- [47] Jacqueline E Moustakas-Verho, Roland Zimm, Judith Cebra-Thomas, Netta K Lempia Inen, Aki Kallonen, Katherine L Mitchell, Keijo Ha Ma La Inen, Isaac Salazar-Ciudad, Jukka Jernvall, and Scott F Gilbert. The origin and loss of periodic patterning in the turtle shell. *Development*, 141:3033–3039, 2014.
-

【第2回 数理生物学四方山話】

ロトカ・ヴォルテラとともに歩んだ私の40年

難波利幸*

1. はじめに

1970年に京都大学理学部に入学した私の数理生態学との出会いは3回生の終わりの頃だった。1972年の12月に岩波書店から、岩波講座「現代物理学の基礎」の第9巻として『生命の物理』が刊行された。当時の京大理学部は、学科制が廃止され、学部の教育課程は大まかに数理系、物理系、生物系の三つの系に分かれていた（現在の系はもう少し細分化されているようだから私の記憶違いかもしれない）。漠然と物理学を志して京大に入学した私だが、入学後は本当に怠惰な学生だった。しかし、持つべきものは友人である。生物系の友人たちが、この本を輪読したいのだが、生物系の学生だけで読むのは自信がないので、物理系のおまえも入ってくれと声をかけてくれたのだ。

この本は、大沢文夫先生の「構造と機能」、寺本英先生の「エネルギー・情報転換系」、齋藤信彦先生の「非周期秩序系としての生体」、西尾英之助先生の「情報と論理」の4部構成だったが、私が引かれたのは寺本先生が書かれた第II部の中の、「生物集団の個体数変動」と「生物集団の統計力学」だった。物理系に所属してはいても、不勉強で物理が全く身につけていなかった私が感激したのは、こんなに簡単な数学で生物集団の動態について、こんなにも美しい結論を導き出せるのかということだった。今から思えば不勉強故の不純な動機だが、こうして私は数理生態学を目指すことになる。

その後私は、生物物理学教室の寺本英先生と数学教室の山口昌哉先生の二つの研究室で卒業研究に相当するゼミに参加することになる。山口先生の所では、『生命の物理』と同じく1972年に刊行された山口先生のご著書『非線形現象の数学』を読み、その後の人生を通じてLotka-Volterraの世界にどっぷりとつかることになる。寺本研究室では、大阪大学基礎工学研究科の大学院進学後もゼミに参加させていただくことになる。当時は、ルネ・トムやクリストファー・ジーマンのカタストロフィー理論、ロバート・メイによるカオスの発見など、数理科学の世界に新しい潮流が生まれつつある時代だった。その中で示される先輩院生たちの手際の良い論文紹介やディスカッションでの鋭い指摘に

自らのふがいなさを感じることで何とかモチベーションを維持していたのが当時の私だった。

2. 大阪大学での院生時代

大学院でも寺本研究室を目指したが、2年続けて不合格となり、大阪大学基礎工学研究科生物工学専攻の鈴木良次先生の研究室で拾っていただけることになった。当時の鈴木研究室には助教授として佐藤俊輔先生、助手として小林欣吾先生、末田 統先生がおられた。コンピュータを使って点字を触覚ディスプレイに表示する研究をされていた末田先生を除くと、脳、神経、運動などの幅広い分野でものづくりから理論までを研究されていた鈴木先生、神経系の周期振動や確率的応答を研究されていた佐藤先生、情報理論とその応用を中心に研究されていた小林先生と、理論色の強い研究室だった。懐の深い鈴木先生のもとで、先輩には生物物理学や生理学など幅広い研究をされ後に名古屋大学医学系研究科教授になられた曾我部正博さん、視覚の情報処理の研究をされ後に京都大学文学部心理学教室教授になられる乾敏郎さん、後輩には大学院時代はサーカディアン・リズムの研究などをされていたがその後ATR（国際電気通信基礎技術研究所）で神経科学の様々な分野で業績を上げられている川人光男さん、大学院博士課程から九州大学に移って集団遺伝学の研究を始め九大教授となられた舘田英典さんなど、多士済々な面々が在籍していて大いに刺激を受けた。

そうはいっても鈴木研究室は神経系の研究を中心とする研究室なので、入学時は当然神経モデルの研究をしなければならないだろうと思っていた。しかし、入学後佐藤先生に提示されたのは、以前に卒業研究でやられていたというパッチ状環境におけるロトカ・ヴォルテラの捕食者・被食者モデルだった。その卒業研究の数値計算の結果は、一様な環境でもパッチ間の拡散的移動によって非一様なパターンができるというものだった。私はその結論に違和感を覚えたが、佐藤先生も結果に疑問を持っていたから私の所に持ってこられたのかもしれない。佐藤先生、小林先生のご指導の下で研究を始めた私は、空間的拡がりを持たないロトカ・ヴォルテラの捕食者・被食者モデルの保存量が、パッチ状環境ではリアプノフ関数になることを見つけ、この

*大阪府立大学大学院理学系研究科

系は漸近的には空間的に一様な振動に落ち着くことを示すことができた。しかし、ロトカ・ヴォルテラの保存量を使うというアイデアは、1975年にジム・マレーさんによって空間連続モデルで発表されていることを後に知り、大きな成果というわけにはいかなかった。

次の研究をどうしようと思った私が目にとめたのは、コピーしたまま机の上に積んであった論文の一つの Gurney and Nisbet (1975) だった。生態学の拡散モデルでは、プランクトンの大発生（ブルーム）を説明するために、どのくらいのパッチサイズがあればブルームが起こるかという問題が、領域内では個体群は指数成長と拡散をし、境界で密度が0になるという条件をつけたモデルで研究されていた。しかし、この設定では吸収壁を境に環境が無限に悪くなるという不自然さがあったので、Gurney と Nisbet は、無限領域で、成長率 $G(x)$ が中心部では正、周辺に行くと負という条件で反応拡散モデルを考えた。彼らのモデルのうちの二つ、random motion model と directed motion model を空間変数 x が1次元の場合に書くと、

$$\frac{\partial u}{\partial t} = G(x)u + \lambda \frac{\partial}{\partial x} \left(u^n \frac{\partial u}{\partial x} \right) \quad (1)$$

となる。ここで、 $n=0$ ならば通常の線形拡散、 $n=1$ ならば拡散係数が密度に依存し空間的排除効果を含む非線形拡散になる。Gurney と Nisbet は、数値計算のために $G(x)$ が二次関数であることを仮定したので、 $G(x) = A - Bx^2$ とすると、 $|x| < \sqrt{A/B}$ ならば $G(x) > 0$ 、 $|x| > \sqrt{A/B}$ ならば $G(x) < 0$ となる。 $G(x)$ が二次関数で $n=0$ の時には、このモデルは量子力学的調和振動子と等価となりエルミート多項式を用いて解くことができる。解は線形拡散の性質を反映して、無限遠 $|x| \rightarrow \infty$ にまで尾を引く。Gurney と Nisbet は、 $n=1$ の非線形拡散の場合にも解は無遠にまで尾を引くとしたが、私はこれに疑問を持った。

偏微分方程式についてはフーリエ解析の初歩程度しか知らなかった私だが、モデル(1)には定常解があり、 $G(x)$ が二次式ならば定常解も多項式で書けるのではないかと思ひ込んだのだ。無知であるが故の大胆さだが、次元解析をしてみると $G(x)$ が二次式ならば定常解 $u_s(x)$ は四次式でなければならないことが分かる。こうして私は、定常解

$$u_s(x) = \begin{cases} \frac{B}{28\lambda} (x - L_{ST})^2 (x + L_{ST})^2, & |x| \leq L_{ST}, \\ 0, & |x| > L_{ST}. \end{cases} \quad (2)$$

ただし、 $L_{ST} = \sqrt{7A/B}$ 、を得ることができた (Namba 1980)。つまり、個体群密度は $G(x) > 0$ となる好適な環境の $\sqrt{7}$ 倍の範囲までは正となるが、その外では密度が0で個体群は存続できない。なぜ $\sqrt{7}$ なのかは説明がつかず、マジックナンバーの一つだと言ってくれる方もいた。

次に私が取り組んだのは、当時は甲南大学におられた三村昌泰さんから与えられた課題だった。それは、競争関係にある2種の個体群の動態のモデルで、生息域の中央部では2種が競争しながら拡散し、左端では種1のみが存続し、右端では種2のみが存続するという、ディリクレ境界条件付きの反応拡散問題だった。三村さんはこの問題を数学的に厳密に解析することはまだされていなかったが、一方の拡散係数が非常に小さいと仮定して特異摂動法を使えば、無限領域では進行波解が現れることを知り、そしてその条件もご存知の上で、私に有限領域で計算してみないかと持ちかけられたのだ。

具体的には、反応拡散方程式

$$\frac{\partial u}{\partial t} = \varepsilon^2 \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + (a - u - b_1 v)u, \quad (3)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} = \frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + (1 - v - b_2 u)v. \quad (4)$$

を、 $(x, t) \in (0, L) \times R^+$ で、境界条件

$$u(0, t) = a, v(0, t) = 0, u(L, t) = 0, v(L, t) = 1$$

のもとで考えるという問題だった。さらに、仮定 $1/b_2 < a < b_1$ を置き、生息域の各点で $(a, 0)$ と $(0, 1)$ が双安定であると仮定する (Namba and Mimura 1980)。

無限空間と違って、有限空間では空間的なずらしに対して不変な解を得ることはできないので、進行波解は存在せず、時間がたてば波の進行は止まってしまう。差分法でこのモデルを解いていた私は、無限空間で進行波解が存在するかしないかに対応して、有限空間でも解の進行の仕方と止まり方に二つのパターンがあることに気づいた。そこで、見よう見まねで特異摂動法に取り組むことにした。

$\varepsilon = 0$ のとき、 $\partial u / \partial t = 0$ を満たす(3)の定常解を、 (u, v) の相平面上に $a - u - b_1 v = 0$ の枝と $u = 0$ の枝の二つの枝を使って

$$\hat{u} = h(\hat{v}) = \begin{cases} h_1(\hat{v}) = a - b_1 \hat{v}, & 0 \leq \hat{v} < \beta \\ h_0(\hat{v}) = 0, & \beta < \hat{v} \leq 1 \end{cases} \quad (5)$$

のように構成することができる。ここで、 \hat{u} は $\hat{v} = \beta$ を境に二つの枝をつないでいるので、 $0 < \beta < a/b_1$ では不連続性を持っている。この \hat{u} を、(4)に代入して、 v の定常問題を考えると以下のことが分る。

- (i) $0 < \beta < a/b_1$ を満たす任意の β に対して、解 $(\hat{u}(x; \beta), \hat{v}(x; \beta))$ が存在する。
- (ii) 不連続点の x 座標 $l(\beta)$ を $\hat{v}(l; \beta) = \beta$ と定義すると、
 - (a) $l(\beta)$ は β の単調増加関数で、 $\beta = a/b_1$ で最大値をとる。
 - (b1) $\delta = a^3 b_2 / b_1^2 < 1$ ならば、最大長 $l(a/b_1)$ は L によらず有界。

(b2) $\delta = a^3 b_2 / b_1^2 \geq 1$ ならば、最大長 $l(a/b_1)$ は L の単調増加関数で L とともに無限大に発散する。

特異摂動法なので、本来は $\varepsilon \neq 0$ の時に、不連続点の近傍を空間的に引き延ばして解析する必要があるが、このモデルの挙動の本質はここまででつきている。

このモデルでは、生息域の各点で $(a, 0)$ と $(0, 1)$ が双安定で、左端は v が絶滅する $(a, 0)$ に固定され、右端は u が絶滅する $(0, 1)$ に固定されている。このとき、 u の方が拡散係数がずっと小さいという条件の下で、 $\delta = a^3 b_2 / b_1^2$ が1より小さいか大きいかによって系の挙動が二つに分かれる。 $\delta < 1$ ならば、 L が大きくなっても $u > 0$ の領域は有界で広がらないが、 $\delta > 1$ ならば、 L とともに $u > 0$ の領域は拡がり、領域が無限大の極限では進行波解が現れる。つまり拡散移動を含む偏微分方程式の意味では、 $\delta < 1$ ならば u が相対的に弱く生息域は限られているが、 $\delta > 1$ ならば移動の遅い u の方が相対的に優勢で生息域をどんどん拡げていくのだ。

この三つの研究を中心に学位論文を書き上げ、無事に学位を取得することができた。当時も就職難の時代だったが、幸運にもポストドクならぬオーバードクターを1年経験しただけで専修大学に教養の数学担当の教員として就職することができた。

3. 専修大学の時代

専修大学に行ってから最初に手がけたのは、周期的に変動する環境における種間競争の問題だった。生態学を代表する研究者の一人、エヴリン・ハッチンソンが、1961年に、季節的に変動する環境では2種の競争種の優劣が季節によって変わることによって共存が可能になるというアイデアを提出していて、それを数理モデルで確かめようとしたのだ。 $u_i(t)$ を2種の競争種の個体群密度、 $b_i(t)$ を内的自然増加率、 $a_{ij}(t)$ を種内及び種間の競争係数とし ($i, j = 1, 2$)、ロトカ・ヴォルテラ型の競争モデルを考える。

$$\frac{du_1}{dt} = \{b_1(t) - a_{11}(t)u_1 - a_{12}(t)u_2\}u_1, \quad (6)$$

$$\frac{du_2}{dt} = \{b_2(t) - a_{21}(t)u_1 - a_{22}(t)u_2\}u_2. \quad (7)$$

ここで、 $b_i(t)$ 、 $a_{ij}(t)$ はすべて周期 T の周期関数とする。このモデル(6)(7)では、一方の種が絶滅する二つの自明な周期解 $(u_1^*(t), 0)$ と $(0, u_2^*(t))$ を簡単に計算することができ、 $[f(t)]$ を関数 $f(t)$ の時間平均とすると、それぞれの自明な周期解は $[b_2] > [a_{21}u_1^*]$ ($[b_1] > [a_{12}u_2^*]$) ならば不安定になる。このモデルは既に何人かの研究者に研究されており、たとえばJ.M. クッシングは、 $[b_2]$ をパラメータとすると、これが閾値を超えると、 $(u_1^*(t), 0)$ から共存周期解が分岐することを示していた。

しかし、競争における優劣の季節的な逆転に興味があった私は、 $b_i(t)$ や $a_{ij}(t)$ の時間平均よりも位相差に

注目すべきだと考えた。そして、各パラメータが平均値に固定されている一定環境では、(1) 種1のみが存続し種2が絶滅する場合、(2) 種2のみが存続し種1が絶滅する場合、(3) 初期値に依存して一方の種が存続し他方の種が絶滅する場合、(4) 2種が共存する場合、のどの場合にも、季節的に変動する環境で各パラメータの位相を変えてやると、共存が実現する場合も実現しない場合もあることを発見した。2種共存の条件は、二つの自明な周期解がどちらも不安定になることなので、 $[b_1(t)] > [a_{12}(t)u_2^*(t)]$ かつ $[b_2] > [a_{21}(t)u_1^*(t)]$ となる。これをパラメータ間の位相差を使って解釈すると、内的自然増加率 $b_1(t)$ のピークのおおよそ四分の一周期後に種1の個体数 $u_1^*(t)$ はピークを迎える。このとき種1の1個体あたりの種2に対する悪影響 $a_{21}(t)$ が小さければ $[b_2] > [a_{21}(t)u_1^*(t)]$ の右辺が小さくなって種2は侵入しやすくなる。これは種1についても同様である。つまり、内的自然増加率よりも競争係数の位相が進んでいて先にピークが現れれば、個体数のピークには1個体あたりの悪影響の谷が重なることになり、2種は共存しやすくなる。

このモデルを研究していたもう一組の研究者に de Mottoni と Schiaffino がいた。このモデルを幾何学的に研究した彼らが巧妙な数値例で示したことは、 $(u_1^*(t), 0)$ と $(0, u_2^*(t))$ の一方が安定で他方が不安定な場合、一定環境下での競争からの類推ではどちらか決まった1種が必ず絶滅する場合でも、安定な共存周期解があり得るということだった。つまり周期的に変動する環境では、どちらか一方が絶滅する状態と共存状態が双安定になることがあり、一方が絶滅する状態に相当する相平面の境界上の解の安定性だけではモデルの漸近挙動は決まらないということだ。この結果に興味を持った私は、同じ結果をパラメータの位相差を変えることによって実現しようと試みた。種2が絶滅する状態が安定で種1が絶滅する状態が不安定だとすると、 $b_1(t)$ に比べて $a_{21}(t)$ の位相は遅れていて、 $b_2(t)$ に比べて $a_{12}(t)$ の位相は進んでいることになる。このように、 $b_1(t)$ と $a_{21}(t)$ の間の位相差と $b_2(t)$ と $a_{12}(t)$ の間の位相差を固定しても、 $b_1(t)$ と $a_{21}(t)$ の組と $b_2(t)$ と $a_{12}(t)$ の組の間の位相差という可変なパラメータが残る。そして、絶滅する可能性のある劣位の競争種 $u_2(t)$ が存続することができる理由は、種1からの1個体あたりの競争圧 $a_{21}(t)$ が強い時期に、自らの個体数 $u_2(t)$ が大きくなるように内的自然増加率 $b_2(t)$ の位相を合わせることで、競争によるダメージは大きくても絶滅に至るほど個体数を減らさずに済むよう、あらかじめ個体数を増やしておくことだった (Namba 1984)。

次に私が考えたのは、上述のように、周期的に変動する環境では、境界上の周期解の一方が安定で絶滅の可能性があっても、安定な共存周期解があり得るなら、たとえ境界上の周期解がどちらも安定で2種共に絶滅

する可能性があったとしても、安定な共存周期解があり得るのではないかということだった。そして、共存周期解を解析的に求めることができる2種の関係が完全に対称な場合に、境界上の周期解二つと共存周期解、計三つの周期解が安定で、他に二つの正の不安定周期解が存在する場合を発見することができた。この場合にも、一定環境ならばあり得ない多重安定性があることになる。こうなると、残るもう一つの場合、境界上の二つの周期解が共に不安定で、2種が必ず共存する場合には多重安定性は現れないのかという興味がわいてくる。さまざまに位相差を変えて試行錯誤をしたのだが、なかなか目指す解は見つからなかった。このときに助け船を出してくれたのが、当時は大阪市立大学におられた高橋智さんだった。彼は、2種のパラメータの位相が完全に逆転している極端な系で、境界上の周期解は二つとも不安定で、かつ位相が反転した二つの安定共存解と不安定な正の共存解が一つある場合があることを教えてくれたのだ。こうして、周期的に変動する環境では、いかなる場合でも境界上の解の安定性、つまり侵入条件だけでは系の漸近状態は決まらず、内的自然増加率と競争係数の位相差を精査する必要があることが分かった (Namba and Takahashi 1993)。

話は前後するが、1987年頃のことだったろうか。京大の重定南奈子さんから、イタリアの非線形拡散方程式の専門家アルベルト・テセイさんが来日し、まず広島三村さんの所に向かうので、成田空港に迎えに行き、羽田空港で広島行きの飛行機に乗せてくれないかという依頼を受けた。そのときは何故か成田着の飛行機が遅れ、テセイさんが着いたときにはタクシーを飛ばさなければ広島行きの便に間に合わない時間になっていた。そのタクシーの中、また広島、京都の旅を終えて新幹線で東京に戻ったテセイさんを案内して浅草観光などをしながら、いろいろと話をする機会に恵まれた。彼との話の中で直接出てきたわけではないが、そのとき私は Gurney と Nisbet の directed motion model を、互いに空間的に排除し合う2種の競争者系に拡張できないかと考えた。

そうしてできたモデルが

$$\frac{\partial u_1}{\partial t} = d_1 \frac{\partial^2}{\partial x^2} [(u_1 + \alpha_1 u_2) u_1] + g_1(x) u_1, \quad (8)$$

$$\frac{\partial u_2}{\partial t} = d_2 \frac{\partial^2}{\partial x^2} [(u_2 + \alpha_2 u_1) u_2] + g_2(x) u_2, \quad (9)$$

である。ここで、1種系の時と同様に $g_i(x)$ は中心部では正で周辺部では負となるような関数である。しかし、どちらも2次関数だとしても、 $g_1(x)$ と $g_2(x)$ を独立に変えたのでは、とてもこの問題を解くことはできない。そこで私は、考え得るもっとも簡単な場合として、

$$g_2(x) = \beta g_1(x), \quad g_i(x) = r_i \left[1 - \left(\frac{x}{x_0} \right)^2 \right] \quad (10)$$

を仮定することにした。この条件の下では、 $\tilde{u}_2(x) = \gamma \tilde{u}_1(x)$ を満たす共存解が存在する可能性がある。 $\tilde{u}_2(x) = \gamma \tilde{u}_1(x)$ を (8) と (9) に代入すると \tilde{u}_1 について二つの方程式が得られ、二つの方程式の定常解が整合するという条件から、

$$\gamma = \frac{d_1 \beta - d_2 \alpha_2}{d_2 - d_1 \alpha_1 \beta} \quad (11)$$

と決まる。定常解の正值性のためには $\gamma > 0$ でなければならないことから、 $\tilde{u}_2(x) = \gamma \tilde{u}_1(x)$ を満たす共存解が存在するための二つの条件

- (i) $\alpha_1 \alpha_2 > 1$ かつ $\frac{d_2}{d_1} \frac{1}{\alpha_1} < \frac{r_2}{r_1} < \frac{d_2}{d_1} \alpha_2$,
(ii) $\alpha_1 \alpha_2 < 1$ かつ $\frac{d_2}{d_1} \alpha_2 < \frac{r_2}{r_1} < \frac{d_2}{d_1} \frac{1}{\alpha_1}$,
が得られる。

そして数値計算の結果分かったことは、 $\alpha_1 \alpha_2 > 1$ の時には、 $\beta = r_2/r_1$ を小さいほうから大きくしていくと、まず u_2 が絶滅し、次に u_2 が絶滅する解と u_1 が絶滅する解が双安定になり、最後に u_1 が絶滅する。 $\alpha_1 \alpha_2 < 1$ の時には、 $\beta = r_2/r_1$ を小さいほうから大きくしていくと、まず u_2 が絶滅し、次に2種が共存する解 ($\tilde{u}_1(x), \tilde{u}_2(x)$) が安定になり、最後に u_1 が絶滅する。ここで、 α_1 と α_2 は、互いに相手を空間的に押しつけるという意味での種間競争の強さを表している。したがって、上の結果は、 β あるいは r_2 をパラメータとしてみると、種間競争が種内競争より強いときには種2が絶滅する状態に続いて双安定性が現れ最後に種1が絶滅する状態が現れること、種間競争が種内競争より弱いときには種2が絶滅する状態に続いて共存状態が現れ最後に種1が絶滅する状態が現れることを意味している。つまり、ここでは空間的に相手を押しつける意味での競争を考えているが、分岐構造は、通常のリトカ・ヴォルテラ型の相手の成長率を減らすという意味での競争の場合とまったく同じなのである。きわめて単純なモデルで実際の生態系への応用の面では疑問符がつくかもしれないが、数学的には非常にきれいな結果だった (Namba 1989)。この研究は、当時毎年夏に合宿形式の研究会を行っていた Computation & Analysis 研究会の信州の山荘での集会で発表したが、山口先生にお褒めいただき、三村さんにはすぐに論文を書いてテセイに送れと言っていただき、大変うれしく思ったことを覚えている。

その後私は、寺本先生に大阪女子大学で数理生態学の教員を公募しているので応募しないかと声をかけていただき、応募したところ幸いにも採用していただけることになった。

4. 大阪女子大学、大阪府立大学の時代

専修大学は文系の学部しか持たない私学で、私は卒業研究を担当することも院生の指導をすることもなかった。大阪府立の大阪女子大学に勤務するようにな

り（その後大学統合で大阪府立大学の所属になった）、まじめで熱心な学生たちのおかげで私自身も刺激を受け新たなテーマに挑戦することができるようになった。その中で、大阪外国語大学を卒業後、子育てが一段落してから大阪女子大学に学士入学し、学部を1年で中退して大学院に進学した異色の学生、田辺久美さんと共同研究を紹介する。

田辺さんと取り組んだのは、いわゆるギルド内捕食のモデルである。ギルドとは原義は中世の同業者組合だが、生態学では同じえさを（同じやり方で）利用する捕食者の集団を意味する。 N_1 を資源あるいは被食者とし、 N_2 と N_3 がともに N_1 を食うとき、 N_2 と N_3 は同じギルドに属することになる。このとき、もし N_3 が N_1 だけではなく N_2 も食べば、同じギルドに属する種をえさとして利用することになり、これをギルド内捕食とよぶ。この系では、 N_2 と N_3 は同じ被食者 N_1 をめぐる消費型の競争をし、 N_1 と N_2 は共通の捕食者 N_3 が媒介する見かけの競争をする。そして、 N_1 と N_2 と N_3 のできる食物連鎖では、上位捕食者 N_3 の中間消費者 N_2 への抑制効果が N_2 の N_1 への摂食圧を弱める正の間接効果である栄養カスケードが現れる。ロトカ・ヴォルテラ型のギルド内捕食のモデルは、

$$\frac{dN_1}{dt} = (b_1 - a_{11}N_1 - a_{12}N_2 - a_{13}N_3)N_1, \quad (12)$$

$$\frac{dN_2}{dt} = (-b_2 + a_{21}N_1 - a_{23}N_3)N_2, \quad (13)$$

$$\frac{dN_3}{dt} = (-b_3 + a_{31}N_1 + a_{32}N_2)N_3, \quad (14)$$

である。

この系には、潜在的には五つの定常状態、

(i) $(0, 0, 0)$,

(ii) $(r_1/a_{11}, 0, 0)$,

(iii) $(r_2a_{12}/a_{12}a_{21}, (r_1a_{21} - r_2a_{11})/a_{12}a_{21}, 0)$,

(iv) $(r_3a_{13}/a_{13}a_{31}, 0, (r_1a_{31} - r_3a_{11})/a_{13}a_{31})$,

(v) 共存平衡状態

$$(N_1^*, N_2^*, N_3^*) = (N_1^{*n}/D, N_2^{*n}/D, N_3^{*n}/D)$$

がある。ただし、

$$N_1^{*n} = r_1a_{23}a_{32} + r_2a_{13}a_{32} - r_3a_{12}a_{23},$$

$$N_2^{*n} = -r_1a_{23}a_{31} - r_2a_{13}a_{31} + r_3a_{11}a_{23} + r_3a_{13}a_{21},$$

$$N_3^{*n} = r_1a_{21}a_{32} + r_2a_{12}a_{31} - r_2a_{11}a_{32} - r_3a_{12}a_{21},$$

$$D = -a_{12}a_{23}a_{31} + a_{13}a_{21}a_{32} + a_{11}a_{23}a_{32}.$$

$D < 0$ の時に、共存平衡状態が存在するためには、各種の平衡密度の分子 N_i^{*n} が負でなければならず、固有多項式の定数項の因子に D が含まれるため、正の固有値が現れて共存平衡状態は不安定になる。また、ギルド内捕食者 N_3 が絶滅する定常状態(iii)での固有値の一つが因子に N_3^{*n} を含み、ギルド内被食者 N_2 が絶滅する定常状態(iv)での固有値の一つが因子に N_2^{*n}

を含むのでどちらも安定、つまり双安定になる。

$D > 0$ の時には、(iii)と(iv)は不安定で、共存平衡状態は正の実固有値を持たないが、 $a_{12}a_{23}a_{31} - a_{13}a_{21}a_{32}$ が正から負に符号を変えるときHopf分岐が起こり、パラメータの値によってはさらに周期倍分岐を経てカオスが現れることがある(Tanabe and Namba 2005)。これは、1978年にVanceに発見され1979年にGilpinによって確認された1捕食者-2被食者系のカオスに続いて、3種ロトカ・ヴォルテラ系では2例目のカオスの発見である。ギルド内捕食系では、基底の資源から上位捕食者にエネルギーが流れる経路に、中間消費者を経由する経路と資源から捕食者へ直接流れる経路の二つがある。上記の結果は、 $a_{31}/a_{13} < (a_{21}/a_{12})(a_{32}/a_{23})$ 、つまり直接経路に比べて間接経路の効率が良いときには、 $D > 0$ で、カオスが現れることはあっても2種の捕食者のどちらも絶滅することがないことを意味する。最近、食物網の構成要素としてギルド内捕食が重要であることがわかってきているが、上記の結果は食物網の安定性にとっても重要な性質だと思われる。

5. おわりに

私はロトカ・ヴォルテラに魅せられてこの世界に入り、非線形拡散モデルやII型あるいはIII型の機能の反応を含むモデルを扱うことはあっても、基本的にロトカ・ヴォルテラの世界を彷徨ってきた。それでも、ギルド内捕食のカオスのように、3種系や4種系にはまだまだ分かっていないことがたくさんある。たとえば、2種の競争モデルは誰もが知っているが、3種競争系になると、リミットサイクルがいくつまで存在するかは今でもオープンプロブレムである（これまでは3個のリミットサイクルを持つ例が発見されている）。最近私が興味を持っているのは、多数の種を含むロトカ・ヴォルテラ系を使って、種間相互作用、特に間接効果が生物多様性にどのような影響を及ぼすかを明らかにしようとする問題である。ロトカさんとヴォルテラさんは、私に今しばらく楽しむ時間を与えてくれそうである。我が研究人生を振り返る機会を与えてくれた岩見真吾さんをはじめとするニューズレター編集局の皆さんに感謝しつつ筆を置くことにする。

参考文献

- [1] Namba, T. (1980) *J. Theor. Biol.* **86**, 351-363.
- [2] Namba, T. (1984) *J. Theor. Biol.* **111**, 369-386.
- [3] Namba, T. (1989) *J. Math. Biol.* **27**, 1-16.
- [4] Namba, T., and Mimura, M. (1980) *J. Theor. Biol.* **87**, 795-814.
- [5] Namba, T., and Takahashi, S. (1993) *Theor. Popul. Biol.* **44**, 374-402.
- [6] Tanabe, K., and Namba, T. (2005) *Ecology* **86**, 3411-3414.

【第4回 数理生物学対談「合原一幸 教授」】

「好きなこと」だけを研究テーマに

語り手 : 合原一幸*

聞き手 : 岩見真吾†

はじめに

数理生物学会ニュースレターの新しい試みとして、いわゆる“大御所”と呼ばれる先生方との対談企画を行っております。編集長の岩見が聞き手となって、日本数理生物学会編集部のメンバーと共に東奔西走し、語り手となる大御所を直撃します。研究の話はもちろん、先生方が大切にしているポリシー、若い会員が知らない昔話、また、これからの数理生物学会の在り方など、存分に語ってもらおうと思います。先生方が非常にお忙しいのは百も承知ですが、もしも依頼があった場合には、是非、対談のお話をお受け頂ければ嬉しいです。さて、第四弾では、日本を代表する数理工学者、東京大学の合原一幸先生を直撃しました。なお、今回の対談は、京都大学ウイルス・再生医科学研究所の小柳義夫所長のご厚意で、所内のセミナー室をお貸し頂けたので、一部公開対談となりました。皆様、是非お楽しみ下さい：

岩見 今日はお忙しい中ありがとうございます。よろしくお願ひします。

合原 よろしくお願ひします。

岩見 おそらく1時間ちょっとぐらいだと思います。

合原 1時間はかからないんじゃない？30分ぐらいでしょ。

岩見 でも結局いつも結構長くなるんですよ。盛り上がってくると。盛り上がらなかつたらすみません(笑)。まずはじめに、先生の研究の経歴というか、どういうところから始まって今の研究に至ったかっていうのを少し教えていただければと思うんですけども。

合原 それは長くなるよ(笑)？

“三代目”から研究者へ

岩見 全然OKです(笑)。一番初めは数理工学ですか？

合原 いや、僕は学部は電気系の強電(電気エネルギーの輸送、およびその機械的エネルギー・熱エネルギー)

ギーへの変換を扱う電気工学の部門の俗称)なんですよ。

岩見 あ、そっちなんですね。

合原 なんてかって言うと、うちの実家が、発電所や大きな工場とかの電気工事をする電気設備の会社で、おじいちゃんが作ったからから僕三代目で(笑)。だから若い頃から、周りの電気工事士さん達から三代目と呼ばれながら育ちました。

岩見 三代目ってすごい響きですね(笑)。

合原 僕は人に親分肌とか言われるんだけど、それは三代目だから(笑)。で、三代目として後を継がないといけないので、東大工学部の電気工学科で勉強するために東大に行った。

岩見 それでなんですか！すごいですね。



図1 東京大学教授 合原一幸先生

合原 そのまま4年生になって、そこで就職してたらもっとリッチな人生を送ってたんだけどね。だからここは1つの分岐点だったんだよね僕自身の。当時、東大の電気(現在の電気系工学専攻)には推薦制度ってのがあって、大学院入試を受けなくても何人か大学院に行けたんですよ。

岩見 あ、学部から院ですか。

合原 そうそう。それで、「行けるんだけどどうしますか」って言われたので、まあどうせ跡継ぐんだから5年間ぐらいは一番好きな研究しようかなと思って。で、僕は元々生物好きだったので、ここでついに生物の研究と繋がりが出来た。

岩見 なるほど。そこでなんですかね。

*東京大学生産技術研究所

†九州大学大学院理学研究院生物科学部門

合原 子供の時から僕は昆虫少年なので。そういえば、数理生物学会って昆虫少年みたいな感じの人があんまりいないような気がするんですけど、いるんですかね？なんかフィールドで虫を追いかける感じの人があんまりいない気が...

岩見 そういう人は生態学会にたくさんいるイメージですね。

合原 ああ、そっちなんだね。まあ、それは置いて、そういう経緯で5年間だけ生物のことをやろうかなど。当時、生体工学という分野があってね、まあ生物というよりは医学に近い、医用生体工学とかそういう感じの分野があって、電気電子系で生物っぽいことをやれるのはそこしかなかった。ただもう一つ、大学院で本来の電力系の方をやるっていう選択肢もあって、かつ、推薦の話を伺った先生が電力系だったんで、そこは相当悩んだんですよ。でも結局生物の方に行った。で、そこで出会った宇都宮敏男先生（東京大学・名誉教授）がとてもいい先生で、要するに何にも指導しない。今の僕と全く一緒。その先生見て、（放任主義は）いいなって学んだ。だからテーマも全部自分で決めるんですよ。で、机は用意してあげますと。

岩見 場所だけ提供するんですね（笑）。

合原 うん、好きなことをやりなさいと。それで好きな研究をやる。で、最初は循環器系のモデルとかもちょっとやってたんだけど。

岩見 へえ！そうなんですか。

合原 うん、結構面白いんだよ循環器系も。毛細血管の部分まで入れるともものすごく複雑なネットワークで、ネットワーク理論的に面白いんですよ。あと、ショートカットするルートとかもあってそれはそれで割と面白かったんですけど、当時、甘利俊一先生（東京大学・名誉教授）が、雑誌「数理科学」（サイエンス社）で、甘利先生が言うところの数理脳科学の基礎みたいな内容の連載をしてたんですよ。それ読んで、ああもって面白いなと思って、脳の理論に興味を持った。

岩見 修士の初めはまだ甘利先生は指導教官じゃなかったんですか？

合原 博士まで違う。ポスドクで甘利研に入った。

岩見 あ、そうなんですか！それは知りませんでした。

合原 それで甘利先生の神経統計力学っていう理論を独学でやって、修士論文を書いて、それを甘利先生に見せたら面白がってくれて、その辺から脳寄りになってくんですよ。

岩見 そういう流れだったんですね。

合原 甘利先生のこの理論ってのは一種の統計力学で、神経の数を無限大に持って行ってマクロな式を導くわけだけど、僕がやったのは甘利先生の単純なマカロック・ピッツ型ニューロンモデルにヒステリシスを持たせたモデル。まあ不応性みたいなもんなんですけど。それを入れた時にマクロな振る舞いがどう変わるかっ

ていうのを調べたら、かなり違うんですよ。

岩見 なるほど。

合原 分岐集合でいうと、マカロック・ピッツだと、カスプカスタロフになる。当時カスタロフ理論ってのがあってね、勾配系の分岐理論なんですけど、ヒステリシスを入れるとバタフライカスタロフが出てくるんですよ。

岩見 バタフライカスタロフっていうのはなんなんですか？

合原 蝶の羽みたいな形の分岐集合。僕は虫の中でも蝶が好きなので、すごく嬉しかった。バタフライカスタロフを折り紙で折ったりしてね。それでその時に思ったのは、ニューロンをちょっと複雑にするとマクロな振る舞いがすごい変わるけど、そもそも本当のニューロンってどれくらい複雑なのかなって。

岩見 確かにそうですね。

合原 それで博士課程に行って、その辺を勉強し始めた時に、松本元先生（当時、電子技術総合研究所）が東大に講義に来られたんですよ。理学部の方にね。僕は工学部だったんだけど、面白そうだったから行ってみたわけ。それで、終わってからずっと議論とかしてたら、いっぺん見に来いって言われて、それでヤリイカの実験を見た。

岩見 あ、そこでヤリイカなんですか。

合原 それで実際の神経がどれくらい複雑か知りたかったんで、具体的な研究になったって感じ。ラッキーだったのは、松本先生ってゴッドハンドって言われてたぐらい神経の切り出しがうまくて、ものすごい綺麗なデータが出るんですよ。その神経を使えたので、世界で最初に、ヤリイカの神経で僕らはカオスを発見できた。それで、学位論文はそのヤリイカの神経の振る舞いと、その数理モデルの Hodgkin-Huxley 方程式の解析だった。

岩見 今日講演でおっしゃってたあのクリティカルスローイングダウンの。（この日は、京都大学数理解析研究所で行われた「第15回生物数学の理論とその応用」にて、合原先生が「感染症やがんへの数理工学的アプローチ」と題して特別講演を行った。）

合原 そうそう、あれはあの時の。

岩見 にしてもイカあんな風に綺麗に出るんですね。

合原 ヤリイカはものすごい綺麗に出る。それもまあ松本先生のゴッドハンドのおかげなんだけど（笑）。

岩見 そこが一番初め生物に行ったところという。

合原 そうだね。

岩見 で、その後は甘利先生の所に。

合原 うん。それで、普通D3で就職するじゃないですか。で、ちょうど僕の指導教員の宇都宮先生の定年退官と僕の卒業が一緒だったんですよ。だから僕が最後のドクターで。それで宇都宮先生が就職担当だったんで、どうしますかって聞かれて。東京電機大学の小

谷誠先生（東京電機大学・名誉教授）から来いって誘われてたんだけど、ただ甘利先生のところで勉強したかったので、一年待ってくださいと（笑）。いい時代だった。

岩見 すごいですね（笑）。

合原 今は学振のポスドクって3年ぐらいあるじゃないですか。当時1年だった。

岩見 ああ、そうなんです！

合原 だからその学振のポスドクで1年間甘利先生のところにいて、それから電機大に就職した。

岩見 ちょっと全然勘違いしてました。博士の頃から甘利先生なのかと思ってました。

合原 違うんですよ。

岩見 そこからどれくらいで東大に戻られたんです？

合原 僕のキャリアは割と10年単位が多くて、東大に、博士とポスドク入れてちょうど10年、そのあと電機大に行って10年。で、電機大って電子回路めちゃくちゃすごい学生とか、プログラミングものすごい学生とかいるんですよ。だから結構面白い研究ができて。あと卒論生とか、今だと研究室ごとに数人とかだけど、当時その縛りがないので、ある時は研究室の卒論生が数十人だった（笑）。

岩見 数十人?! 6人とかでも大変なのに、数十人! どうするんですか、数十人の卒論生。

合原 数十人は無理やろ? そもそも僕は指導しないんだし（笑）。グループに分けて、グループ形式で研究をやってもらった。

岩見 なるほど、そういう風にするんですね。

合原 で、誕生日ごとに飲み会やってたから、ほぼ毎週で楽しかった。やっぱ数十人いると結構優秀な学生も混じってるので、電機大の、母校の教授になってる教え子もいますよ。

岩見 先生が指導した学生って全部合わせると、間違いなく覚えてないと思うんですけど、オーダーでいうと1000…?

合原 いや1000はいないと思うけど、電機大に10年いて1年30人いたとして300人ですよ。流石に東大だとそんなにいないけど、ただうちは異常に博士の数が多いで... まあ相当です。全然覚えてないけど（笑）。僕名前って覚えられないんだよね。名刺交換するじゃないですか。で、ちょっと見てからしちゃうでしょ。しまったらもうすでに忘れてんの（笑）。

岩見 どうやったら名前覚えてもらえるんですか？

合原 ...よくわからない（笑）。で、おまけに結構僕は顔がくどいから、向こうは覚えてるんだよね。だからあちこちで挨拶をされて、名前とか覚えてないからなるべくすり抜けようとするんだけど、そのまま会話になったりするじゃない。だから必死になって話しながら思い出そうとするんだけど。結局最新の名刺くださいとか言って（笑）。

岩見 最新の名刺（笑）!

合原 だいたい変わってないんだけどね。

岩見 それなかなかいいですね!

合原 だから人の顔と名前覚える才能が全くないんですよ。まあ覚える気もないんだけど。そもそも覚える必要もないよね、政治家じゃないんだし。

岩見 そうですね。重要な人はそのうち覚えていきますからね。話は少し戻るんですけど、先生は完全放任主義なんですか？

学生ほったらかしで有名な研究室

合原 放任主義です。それはもうさっき話した宇都宮先生がそうで、それが良かったっていうのと、甘利先生もそうなんです。電機大の後は甘利研の助教授になったんだけど、甘利先生もほったらかして、あまり指導はしないと。つまり、あの研究室に行くと指導してもらえないってのを、もう全員知ってるわけ。そういう学生が来るから、みんな優秀なんですよ。

岩見 めちゃくちゃ優秀ですよ。

合原 まあ伸びる学生はほったらかすと予想外の方向に伸びたりするので、とてもいいのです。

岩見 名だたる先生が出てますよね。

合原 うん。特に数理だから、実験だったらやっぱ実験のテクニックとかあると思うんですけど、まあそんなに教えなくてもね。もちろん議論とかはしょっちゅうしますけど。フリータイムってのを毎週設けて、議論したい人は誰でも来なさいって言って。議論したい人は来るわけね。だからその議論がないと、研究室セミナー以外では2年間ほとんど話さずに終わる学生もいる。増田（増田直紀: Senior Lecturer at University of Bristol）みたいに毎週のように来る学生とかもいるし。僕は、小学校から大学院まで運動部にいたので、その習慣で学生の名前は呼び捨てです。すみません。で、増田や平田（平田祥人: 東京大学・准教授）とかしょっちゅう来る。おまけにどんどん論文書くので、僕の土日はそのチェックでつぶれる。

岩見 ああ、すごいですね。ちなみに、先生さきほど昆虫少年っておっしゃってましたけど、やっぱり蝶が大好きなんですか？あと僕フクロウってのも聞いたことあるんですけど。

合原 あれは、岩波（岩波書店）の知り合いの編集者が企画を持ってきて、「集める!」っていう本を出しますと。その企画書を見たら、8人の人が自分のコレクションの自慢をするという内容。こんな本売れないじゃないですかって言ったら、「いや先生、今こういう本が売れる」って。やっぱり売れなかった（笑）。で、僕本当の趣味は他にあるんですけど、本当の趣味って人に教えたくないでしょ。だから二番目の趣味のフクロウグッズを書いたんだけどね。それ岩波アクティブ

新書っていうんですよ。今はもう岩波アクティブ新書そのものがなくなっちゃった。たぶん軒並み売れなかったんでしょね（笑）。でも僕自身は嬉しいし、出張で地方の本屋さん行くと売れ残ってたりするんだけど、絶対買うね。

岩見 ははは（笑）

合原 僕しか買ってないと思う（笑）。

岩見 これは他にもいろんな先生方が？

合原 例えば、東京医科歯科大学の藤田紘一郎先生（東京医科歯科大学・名誉教授）は寄生虫の専門家なんですけど、彼の趣味は寄生虫の収集なんです。彼のすごいのは、自分のお腹の中でも飼ってるんだよね。

岩見 おお！それはハードですね。

合原 サナダムシ。何メートルもあるんだよ。で、彼が言うには、これ飼ってるから花粉症にならないと。それで僕は花粉症が当時結構ひどかったんで、じゃあサナダムシ飲んだ方がいいですかって聞いたら、いやそれだけのためだったら飲まなくていいかなって。なんか名前つけて飼ってましたよ。キヨミちゃんとか言ってたかな。藤田先生によるとすごい健康になるんだって。寄生虫を体内で飼ってるよ。

岩見 え、それ大丈夫なんですかね。

合原 先生すごいスマートですよ。きっとサナダムシに栄養取られてんだらうね（笑）。やっぱ結構（対談）長くなるなあ。

岩見 そうなんですよ。もう20分経っちゃいました。あとやっぱり合原先生といたら聞いとかなきゃダメなのが、人工知能とかニューラルネットワークとか、その辺の昔の研究と今どういう風に変わってきたかっていうのを、読者みんな興味あると思うんで、できるだけ分かりやすく教えていただけると嬉しいです。

人工知能研究の昔と今

合原 えっと、ニューラルネットワークってのは今までに3回ブームがあって、第2次ブームぐらいの時に僕が研究を非常にアクティブにやってた。その時に書いた「ニューラルコンピュータ」（東京電機大学出版局）って本が僕の本では唯一よく売れた（笑）。で、今のディープラーニングに必要な技術は全部あの本に書いてあるんですよ。

岩見 もう理論自体は結構昔からあるんですか？

合原 だって今ディープラーニングで使ってる誤差逆伝播学習って、原理は甘利先生が1967年に論文書いてるわけで。第2次ブームの時に、ラメルハートとかヒントン達がそれを再発見して、再発見だけではなくて良いアルゴリズムを作ったんです。それで学習の効率が結構上がったんですけど、基本的にディープラーニングに限ると理論的には新しいものはない。ただこの30年で何が変わったかって言うと、学習に必要な

ビッグデータが手軽に使える。それからそれを使って学習するだけのコンピューターパワーがある。この二つなんです。その二つが前とは違って、かつうまく学習させるためのいろんなノウハウがたくさんあって、それを使ってみるとまあいいものができるよ。さらにそれがオープンソースで、いろんなものがある。学習して、いいものができるようになったらそれはどんどん使えばいいわけですから、いいものができるかどうかポイントで。でも理論的には深みがないので、もうちょっとダイナミクスを前面に出したようなAIをきちんと考える必要があるってのが今やってることで、今日の午前中のAMED（日本医療研究開発機構）のシンポジウムはそれだった。



図2 AIの今を語る

岩見 僕はそんなに専門家じゃないので素人知識なんですけど、AIとダイナミカルシステムって相性があまり良くないっていうイメージがあるんですけど。静的なデータに対して結構AIって強いじゃないですか。それを動的なデータに行くってのは結構...

合原 今のAIにとっては難しい。でも脳自体はダイナミカルに情報処理しているので、例えば今のAIで取り込めてない部分ってネットワーク構造なんだけど、ディープニューラルネットってフィードフォワードなんだよ。で、レイヤーがディープになってると。それで入力から出力への写像を作ってるわけ。でも写像という意味では、実は三層で十分なんです。第2層の中間層のニューロン層を十分たくさん増やせば、入力層から出力層への任意の連続写像を任意の精度で近似できるって事は証明されている。だから三層でいいんだけど、ディープでやると結構うまくいくと。（実際の）脳でも小脳は三層なんですよ。で、大脳は割とディープになってるんです。つまり脳も使い分けてる。だからいろんなニューラルネットをうまく使ってるのがおそらく脳で、その中で特にダイナミクスは今のAIにはほとんど取り込んでない。例えば構造がディープニューラルネットはフィードフォワードなんだけど、脳って必ず逆行性の結合持ってるんですよ。だからトップダ

ウンの方向の結合が必ずあって、むしろそっちの結合の方が多かったりするんです。

岩見 それは生理的に結合してるってことなんですか？

合原 うん。その結果、ダイナミクスが生み出される。それからギャップジャンクションってのもあって、ニューロンとニューロンが直接くっついてる。つまり化学シナプスだけでなく電気シナプスで直接結合してるのも結構いろんなとこにあって、そこは全然違う。さらに学習則も、ヘブ学習なんかは昔から使ってきてるんだけど、それ以外にも STDP (Spike-Timing-Dependent synaptic Plasticity) とか、いろんな学習則があるんですよ。それも今の AI には上手く入ってないと。それからさらに、ニューロンの動作モードにも色んな動的モードがあってね、それが今のニューラルネットは単純にマカロックピッツをアナログにしたような静的モデル。だからそのダイナミクスが全然入ってないんですよ。そういう意味で、岩見さんが言ったみたいに現代の AI はダイナミクスが全然取り入れられてない。でもそれは必ずしも相性が悪いわけではなくて、動的な脳の数理モデルがうまく創れてないからです。

岩見 まだじゃあ理論ができてないっていう。

シンギュラリティは到来しない

合原 でも脳はそれをやってるのでね。だから今 WPI (世界トップレベル研究拠点プログラム) の東大 IRCN (ニューロインテリジェンス国際研究機構) で医学部の人たちと一緒にやってるのは、そこをやっぱりきちっと解明したいなっていうのがあって。あとついでに言うとう、シンギュラリティ (技術的特異点: 人工知能が発達し、人間の知性を超えることによって、人間の生活に大きな変化が起こるといった概念) の問題ってのがあるでしょ？

岩見 はい。

合原 で、カーツワイル達は、基本的に脳をデジタルと思ってらるんですよ。

岩見 ほうほう。

合原 そこからして全然違ってらるんだけど、仮にデジタルで近似するって問題を考えたときに、技術的にはもちろんビット数とか処理速度は増えると。でも増えても、AI を実装するのはチューリングマシンだから、脳を実現できるかって言った時に、脳全体の情報処理をアルゴリズム化できなかつたら、別にビット数が増えようと計算速度が上がろうとできないものではないでしょ。だから今のままではシンギュラリティ起こらないんですよ。

岩見 そうですね、マスコミとかは変な方向に持って行ってますよね。

合原 ディープラーニングとかで脳のモデルができ

ちゃってると思ってるけど、そこは全然できてないの

岩見 そうですね。やっぱりその脳の仕組みを模したようなアルゴリズムというか、理論を作っていくってのが一番近道なんですかね。

合原 えっと、脳ってのはいろんな知能を持っているので、その中の特定の能力を取り出して、そこを深めていく、それはできてるわけですよ。単純計算では早い時期に脳を超えてるし、論理もいくらでも深い論理構造を作れると。それから最近のディープラーニングで、静止画の認識に関しては抜群。音声認識もかなりできてますと。そういう段階なんだよね。だからある機能を取り出せば、そこを深めていくことは可能だと。でもそこで取り出しきれないものとか、認識できないものが脳にはたくさんあるので、だからいつまでたっても届かないかなと思う。

岩見 先生は脳科学者っていう風に言われるんですか？そういう風には言われませんか？

合原 学会によってはそう言われちゃうこともあるよね。

岩見 言われちゃう (笑)。

合原 自分では全然思っていないけど。

岩見 先生自身はどのように... 僕とかだったら数理工学者になるんですけど。

合原 僕らは数理工学って呼んでるよね。やっぱり数理工学者ってのが一番しっくりくる。大学院から、やってたこと自体は数理工学だし。甘利先生の論文を基にしてやってたので。

岩見 僕も学部は大阪府立大学の工学部の数理工学科だったんですよ。潰れちゃいましたけど。

合原 あ、数理工学あったんだ。

岩見 あったんです実は。

合原 それはすごいね、あんまりないもんね。

岩見 そうなんですよ、多分、大阪府立大学と東大とあと京大ですかね。なので数理工学科で、物理と数学を半分ずつぐらい勉強できたんです。

合原 九大も作つたらいいじゃない (笑)。

岩見 僕のカじゃどうにもならないです (笑)。

合原 IMI (九州大学マス・フォア・インダストリ研究所) があるから数理工学があってもおかしくないけどね。

岩見 そうですね。まあ個人的には学生の時に両方見れて良かったですね。

合原 うんうん。

岩見 あとやっぱり、理学部の数学だとあんまり応用の方に意識は向かないじゃないですか。で、工学部だと、理学的な勉強ってあまりしないじゃないですか。だから数理工学科ってちょうどバランスが良くて。

数学はリテラシー

合原 あ、そこは重要で、いま東大の教育に関してもいろいろ言ってるんですけど、これまでの教養課程でやってた数学よりももうちょっと上のレベルの数学を、文科系も含めてみんなにやらせるのがいいかなって。

岩見 あ、文科系も入れるんですか。

合原 やっぱある意味リテラシーなので、数学は。アメリカとかはそこに気づいてるでしょ。だからそのレベルを上げないって感じはあるね。例えばAI研究者とかデータサイエンティストがどんどん足りなくなってるのは、そういう教育してないからね。

岩見 確かにそうですね。

合原 だから教育すればいいんですよ。今の学部レベルよりもうちょっと高いレベルの数学を教えた方が良く、数理工学はそこを教えるわけ。3、4年生でね。

岩見 そうですね、やっぱり微積とか線形とかで終わっちゃうんじゃないかと、もっと。

合原 もうちょっと上のレベルね。線形代数でも、学部の教養課程で教える今のレベルのもうちょっと上まで教える方がいい。解析にしても幾何にしても。

岩見 そうですね。やれば結構面白いですからね。

合原 うん、で、ちゃんと教育すればかなりの人が理解できると思うんで、その仕組みを作るのが多分必要です。

岩見 なるほど。その後にやるかどうかは選べばいいと。

合原 うん。そういうことです。だからもうリテラシーですよ。

岩見 確かに。もうそういう時代になってきましたもんね。あといくつかまだお聞きしたいんですけど、先生は数々の大型プロジェクトを成功させてると思うんですけど、やっぱりプロジェクトの間ってのはめっちゃくちゃ忙しいんですか。

合原 めっちゃくちゃ忙しいよ(笑)。どうやってんだってよく聞かれるからさ、簡単なんだと。

岩見 ほう、簡単ですか。

合原 朝9時から夜11時まで、土日もなく働けば、簡単にできる。

岩見 なるほど...(笑)。

合原 ふふ、それができるかどうかです。

岩見 けどそれ強烈ですね。

合原 まあでも夜11時から朝9時まで空いてるんだからね(笑)。睡眠は削れないからね。

岩見 そうですね確かに。

合原 でもまあ僕は6時間でいいかな。僕は6時間で持つんですよ。大体睡眠って1.5時間が単位になるじゃない。

岩見 はい。

合原 だから6時間か7.5時間で、7.5時間寝るのがベストだけど、まあ6時間でも。

岩見 1番しんどかったというか重かったプロジェクトはやっぱりFIRST(最先端研究開発支援プログラム)の合原最先端数理モデルプロジェクトですか?

合原 FIRSTは重かったね。

岩見 規模も凄かったですよね。僕らも入れて頂いたんですけど。

合原 まあ、あの規模でやると、数学をベースにしていろんな分野をカバーする研究ができる。それが僕の一番やりたいことだったので、そういう意味ではあれはやってよかったかなとは思いますが、まあ忙しかったね。

岩見 そうですね。僕はあの時すごいなと思ったのは、これスピンオフの方の話になっちゃうんですけど、周期倍分岐のカオスのやつでドレスを作ったじゃないですか。あれで東京コレクション出たんですよ。

合原 あれは実はFIRSTの前なんです。ちょうどFIRST始まった時に東コレだったので、一応FIRSTの成果にちょっと入ったんですけど。

岩見 あ、ERATO(戦略的創造研究推進事業総括実施型研究)の合原複雑数理モデルプロジェクトの時ですか。

合原 ERATOとFIRSTの間の時。

岩見 東コレってどんな雰囲気なんですか?

合原 あのね、僕舞台にあげさせられたからね。

岩見 ほんとですか!

合原 それでね、ちょうどモデルが8人くらいいたのかな。で、全員着替えるのに3分ぐらいかかるんですよ。3分30秒だったかな。だから僕の役割は、この着替える時間を確保するために3分30秒何か喋ってくださいと。カオスに関して。

岩見 東コレですか(笑)?!

合原 東コレのステージだよ?!

岩見 厳しいですね(笑)!

合原 それで素人相手にさ、3分30秒カオスの話して、その間にモデル達がドレスを着替えて、次のドレスで出てくる。で、注意されたのは、3分30秒より長くても短くても困りますと。ぴったり3分30秒間何か話してさっさと引っ込んでくださいと。もう1つは、聴衆が理解してるかしてないかは全然気にしないで結構ですと。

岩見 なるほど(笑)。

合原 誰も理解してないわけですよ(笑)。だって3分30秒じゃちゃんと話せないし。理系の学生に話しても無理じゃない。それでもまあ一応話したら、全然わかんないとか言って大騒ぎになって。

岩見 ははは(笑)!

合原 でもファッションの人たち面白いと思うのは、それを楽しむところがあって。いい人たちですよ。

岩見 なるほど。

合原 だから全然わかんないってみんな喜んでるわけ。もういろんなファッション雑誌に載ってね。わかんないから。とても面白い人たちだと思いましたよ。

岩見 すごいですね。いやーでも本当に、いつも先生の講演聞いてると、色んなことをされていて多才というか。

自分の興味を脳に問う

合原 まあでも好きなことしかやってないからね。それは学生もそうで、テーマを与えないってのはどういう意味かっていうと、数理なんて別に実験ないからどんな研究でもできるわけですよ。それだったら自分の一番興味があることを、まず自分の脳に問いなさいと。そうすれば、自分が何に興味を持ってるかっていう答えが出てくる。まあなかなか簡単には出ないんですけど、とにかく自分がやりたいと思うテーマ設定をなさいと。で、これを卒論からやらせるんですよ。そうすると、いきなりは出来ないから、大体卒論生は研究の途中で野垂れ死にで終わるわけね。

岩見 野垂れ死に（笑）。

合原 まあ半年しかないからね。でもその経験が重要で、九大もそうだろうけど、入試で勝ち抜いてるから問題与えられたらみんないい点取れるわけ。

岩見 そうですね。

合原 でも問題作った経験がないわけね。ある意味初めて問題を作る経験をするわけですよ。だからそれはできないのが当たり前で、ただ卒論で一回失敗すると、かなり学ぶ。で、修士に入って、修士もだいたいテーマ変えさせるんだだけ。

岩見 あ、変えさせるんですね、それはすごいですね。

合原 まあ本当に好きなことだったら変わらないこともあるんですけど、中途半端に同じことをズルズルやってもね。てか言わなくても変える学生が多いかな。そのまま続ける学生はあんまりいないですね。それでテーマ変えたら、卒論の経験が活きて、卒論よりは先に進んで、野垂れ死ぬと（笑）。

岩見 また野垂れ死ぬんですか（笑）。

合原 こんな感じでうちの学生たちははじめは論文書けないから、DCとかあまりもらえないんだよ。野垂れ死ぬから。でも2回野垂れ死ぬので、まあ学位論文の頃にはまあまあなことをやって出て行くと。そんな流れになってます。

岩見 なるほど。じゃあ僕はちょっとテーマを与えてやらせすぎなのかもしれないですね。

合原 でもまあ、それは研究室のやり方とか、学生さんとのマッチングの問題とかあるので。だって多分僕らのやり方は特異点だと思う。だから甘利先生と僕ぐらいしかちゃんとそれで成功はしてないと思う。

岩見 いやーなかなか厳しいですね普通は。それすごいですね。

合原 うん。でもまあうちは、ほったらかされるので有名だから。ほったらかされてみようじゃないかって肝が据わった学生が来るわけだから。いきなりそれやっても多分難しい。

岩見 そうですね。ずっとほったらかしてきたっていう歴史みたいなものが（笑）。

合原 そうそうそう（笑）。ほったらかされて成長していった前例がいっぱいあるから。

岩見 確かにそうですね。ポストドクの人結構多いですよ先生のところ。

合原 ポストドク多いねえ。

岩見 今何人ぐらいいるんですか。

合原 今はもうだいぶ減ったけど、でも10人ぐらいいますよ。

岩見 おほ、すごいですね。

合原 で、ポストドクはまあ一応プロなので、一応ほったらかすんだけど、あれやってねとかこれやってねとか言うことはあります。プロだから。

岩見 まあそうですね、学位とってて。

合原 うん。学生とはちょっと違うね。

岩見 先生の研究室を出て、この数理生物学会でも中心的になってる先生がたくさんいらっしゃいますよね。

合原 この学会は結構多いんだよね。

岩見 合原先生のところまで学位とってなくても、合原先生の研究室を経由して行って、数理生物学会で活躍されてる先生方とか。

合原 あ、それも多だね。

岩見 めちゃめちゃ多いですね。森下先生（森下喜弘：理化学研究所・ユニットリーダー）と大槻先生（大槻久：総合研究大学院大学・講師）とか。

合原 森下は博士修了生だね。大槻は修士まで。で、中岡（中岡慎治：北海道大学・特任講師）はポストドクで来た。小林（小林徹也：東京大学・准教授）、増田もうちで学位をとってるね。みんな活躍してるよねえ。

岩見 めちゃくちゃ活躍されてますよ。最後になりますが、これいつもお聞きしてて。この先まだまだ研究されると思うんですけど、どういう方向に、どういう風な研究をされるのかという。答えられる範囲で構わないんですけど。

将来の夢は昆虫学者？

合原 僕はね、昔からインタビューの度に結構将来のこと聞かれて来てるんだけど、「将来は昆虫学者になりたい」って答えてきてたんですよ。

岩見 ほうほう。

合原 で、それが変わったのが2007年なんです。2007年に、バンクーバーでneuroethologyの国際会議があっ

たんですね。で、当時あの会議って3年に1回しかなくて結構重要な会議なんです。でも僕は別にそれは意識してなくて、当時、他の研究でバンクーバーにはしょっちゅう行って、たまたま僕が行くタイミングでそのneuroethologyの国際学会があるって分かって、それでたまたま出てみたわけ。そしたらびっくりしたことに、neuroethologyの会議には、現代の昆虫学者がいるんですよ。

岩見 昆虫学者ですか。

合原 うん。僕の昆虫学者のイメージは、子供の時に虫を採って標本箱に並べる、そこから来てる。

岩見 そうですね、虫採り網を持って。

合原 うん。昆虫学者ってのは世界中の秘境に採りに行って、珍しい昆虫で標本箱を飾るんだっていう、そういうイメージだったんですよ。ところがその会議に出てわかったのが、現代の昆虫学者ってのは昆虫の脳をやってると。

岩見 そうなんですか。

合原 たとえば、モルフォ蝶っていう青くてものすごい綺麗な蝶がいて、南米だとそんな珍しい蝶じゃないんだけど、その聴覚をやってるとかね。そんな研究がボロボロあるわけ。それで、あーそっか昆虫学者って今はここにいるんだと思って。で、ふと考えたら、僕って脳のモデルの研究やってるじゃないですか。だから実は彼らがやってるとほとんど近いことやってたわけよ。

岩見 なるほど。

合原 将来は昆虫学者って思ってたんだけど、もうほとんど昆虫学者になってた(笑)。だから夢が叶ってたわけです。知らないうちに。それで、予備校や高校の講演とかちょこちょこやるんだけど、あと学生たちにも話すんだけど、子供の時に夢があって、何らかの事情ですぐには叶わなくても、僕みたいにしつこく50過ぎまで夢を持ち続けてたら、こういう形で叶うことがありますよ。結構偉そうに熱弁をふるってたわけよ。夢をずっと持ち続けろって。とりあえずそれで夢叶ったかなーって思ったんだけど、実はやっぱり叶ってないなって思ったのが...

岩見 叶ってないんですか(笑)。

合原 それは2011年。ブータンシボリアゲハっていうシボリアゲハがいてね。これは1933年と34年にオスが3頭、メスが2頭採られた後、誰も採ってなかった。

岩見 へえ、幻だったんですね。

合原 幻だった。本当に幻の蝶だった。ただ2010年に、ブータンの森林の保護をするような人が撮った写真がネットに流れたんですよ。で、どうもブータンシボリアゲハに見えるわけ。マニア界限で大騒ぎになって(笑)。それで、日本から採集隊が行った。その副隊長が東大の博物館の矢後さん(矢後勝也: 東京大学・助教)。矢後さんって言うんだけど蝶が専門で(笑)。

岩見 ややこしいですね(笑)!

合原 で、彼らが採ったんだよ、2011年に。で、その幼虫とか卵とかその辺までかなり解明してね、これすごい仕事なんですよ。NHKの番組にもなってるよ。

岩見 すごいですね!

合原 ただ、ブータンは仏教国なので、標本なんかは持ち出せないんですよ。

岩見 ああ、なるほど。

合原 でもその後ブータン国王陛下夫妻が日本に来日されたんだよね。その時に、2頭日本に贈呈して下さい、1頭は東大に。で、それを見せてもらったわけ。そしたらもう感動してやっぱり夢叶ってないじゃんって(笑)。

岩見 ははは(笑)。

合原 ほらやっぱり最初の僕のイメージが正しかったんじゃないかって。だから今の夢は、やはり昆虫学者になることです(笑)。

岩見 いやーさすがです(笑)。いいオチがつかしました。今日はありがとうございました。

【合原一幸教授プロフィール】

氏名: 合原 一幸 (あいはら かずゆき)

職位: 東京大学・教授

連絡: aihara@sat.t.u-tokyo.ac.jp

生年月日: 1954年6月23日

略 歴

1977年3月	東京大学工学部電気工学科卒業
1982年3月	東京大学大学院工学系研究科 電子工学専攻博士課程修了 工学博士取得
1982年4月	日本学術振興会奨励研究員
1983年4月	東京電機大学工学部助手
1986年10月	東京電機大学工学部専任講師
1988年10月	東京電機大学工学部助教授
1993年4月	東京大学大学院工学系研究科助教授
1998年4月	東京大学大学院工学系研究科教授
1999年4月	東京大学大学院 新領域創成科学研究科教授
2003年10月	東京大学生産技術研究所教授 現在に至る

業績

(英文原著論文)

1. Takahashi, N., Hirata, Y., Aihara, K. and Mas, P. (2015) A Hierarchical Multi-oscillator Network Orchestrates the Arabidopsis Circadian System. *Cell* 163(1): 148-159.
2. Fujioka, E., Aihara, I., Sumiya, M., Aihara, K. and Hiryu, S. (2016) Echolocating Bats Use Future-target Information for Optimal Foraging. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America* 113(17): 4848-4852.
3. McMahon, P.L., Marandi, A., Haribara, Y., Hamerly, R., Langrock, C., Tamate, S., Inagaki, T., Takesue, H., Utsunomiya, S., Aihara, K., Byer, R.L., Fejer, M.M., Mabuchi, H. and Yamamoto, Y. 617 (2016) A Fully-programmable 100-spin Coherent Ising Machine with All-to-all Connections. *Science* 354(6312): 614-617.
4. Inagaki, T., Haribara, Y., Igarashi, K., Sonobe, T., Tamate, S., Honjo, T., Marandi, A., McMahon, P.L., Umeki, T., Enbutsu, K., Tadanaga, O., Take-nouchi, H., Aihara, K., Kawarabayashi, K., Inoue, K., Utsunomiya, S. and Takesue H. (2016) A Coherent Ising Machine for 2000-node Optimization Problems. *Science* 354(6312): 603-606.
5. B. Schäfer, C. Beck, K. Aihara, D. Witthaut, and M. Timme: "Non-Gaussian Power Grid Frequency Fluctuations Characterized by Lévy-stable Laws and Superstatistics," *Nature Energy*, Vol.3, No.2, pp.119-126 (2018).
6. Ma, H., Leng, S., Aihara, K., Lin, W. and Chen, L. (2018) Randomly Distributed Embedding Making Short-term High-dimensional Data Predictable. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America* 115(43): E9994-E10002.

7. Leleu, T., Yamamoto, Y., McMahon, P., and Aihara, K. (2019) Destabilization of Local Minima in Analog Spin Systems by Correction of Amplitude Heterogeneity. To be published in *Physical Review Letters*.
など 512 編

(著書・総説)

1. 合原一幸 (1988) 『ニューラルコンピュータ-脳と神経に学ぶ』東京電機大学出版局
2. 合原一幸 編著 (1990) 『カオス-カオス理論の基礎と応用』サイエンス社
3. 合原一幸 編著 (2004) 『脳はここまで解明された-内なる宇宙の神秘に挑む』ウェッジ
4. 合原一幸, 神崎亮平 編著 (2008) 『理工学系からの脳科学入門』東京大学出版会
5. 合原一幸 編著 (2015) 『暮らしを変える驚きの数理工学』ウェッジ
6. 合原一幸 編著 (2017) 『人工知能はこうして創られる』ウェッジ
など 著書110件 総説・解説313件

(賞など)

1. 日刊工業新聞技術・科学図書優秀賞 1991年10月
2. (財)国際AI財団・AI学術研究賞 1992年11月
3. 日本神経回路学会・平成9年度論文賞 1997年11月
4. 東京テクノフォーラム21・ゴールドメダル賞 2000年4月
5. Daiwa Adrian Prize 2010 2010年12月
6. 日本応用数理学会・2016年度業績賞 2017年6月
など 22件

【第3回 著者による最新論文の日本語解説】

野外魚類群集における種間相互作用ネットワークの変動とその安定性への影響

紹介論文

“M. Ushio et al. Fluctuating interaction network and time-varying stability of a natural fish community, *Nature*, 554: 360-363 (2018).”

近藤倫生*

1. はじめに

生態系には多様な生物種が共存しているが、いかなる生物種も他の生物種とは無関係ではない。共存する生物種間には互いの個体群密度に影響を及ぼす相互作用が存在しており、生物群集は巨大な相互作用系（群集ネットワーク）として捉えることができる。環境変動や種間相互作用の影響を受けて個体群密度は変動するが、その変動にも秩序がある。自然生態系における生物の個体群密度には、いつ頃増えて、いつ減少するといった変動の規則性があるのが普通で、突然に特定の生物種が大発生したり絶滅したりといった無秩序な変動はあまり見られないように思われる。このような個体群・群集動態に見られる「安定性」がいかにしてもたらされるかは生態学における古典的な課題であり、種間相互作用やその変動性が群集の安定性に影響を及ぼすことが理論的に予測されている [2, 3]。

自然生態系を対象に、種間相互作用が群集安定性に及ぼす影響を実証的に明らかにした研究はほとんど存在しない。その理由は3つある。第一に、種間相互作用は個体群密度の間に生じる関係性であり、関係性それ自体を直接に観察することはできないためだ [4]。個体群密度の間に生じる種間相互作用を明らかにするには、取り除き実験などの野外操作実験が求められる [5]。しかし、種間相互作用は時空間変動するため、自然生態系において共存する多様な生物の間に働く種間相互作用を正しく評価することには大きな困難が伴う。第二に、野外における個体数変動の安定性評価が難しい。群集動態は種間相互作用によってのみ駆動されているわけではない。したがって種間相互作用が群集安定性に及ぼす影響を評価するには、環境変動等の効果を排除した安定性評価が求められる。第三に、種多様性・種間相互作用・個体数変動の安定性の間の因果関係を明らかにすることにも困難が伴う。種間相互作用、個体群動態を観察できたとしても、自然生態系に無数に存在する種間相互作用を増減して安定性への影響を評価する操作実験を行うのは容易ではないためである。

今回紹介する M. Ushio et al, *Nature*, 554: 360-363 (2018) では、野外で得られた魚類の個体数変動の

データのみから、EDMという非線形力学系理論をもとにした時系列データ解析手法を駆使することで種間相互作用を検出し、またそこから評価される群集構造の安定性とその他群集を特徴づける指標との因果推論を行うことによって、非常に興味深い結果を導いている。

2. 時系列データを基にした群集生態学

本研究では、多種個体群の時系列データのみから、種間相互作用ネットワークの構造が群集安定性に及ぼす影響を評価することを試みた。これは従来の捕食-被食・相利・競争といった個体レベルで観察される行動から種間相互作用を特定しようとするアプローチとは大きく異なっている。種間相互作用とは個体群密度の間に生じる個体群レベルの相互作用であり、個体レベルで生じる行動のみからは決められない。個体レベルの相互作用がどのように個体群レベルの相互作用にスケールアップするかには、状況依存性が存在するためだ [4]。種間相互作用が個体群密度の間に生じる関係性であるならば、個体群密度の変動からそれを検出しようという試みは自然なアプローチであるように思われる。

このアプローチにおいて重要な役割を果たすのが Empirical Dynamic Modeling (EDM) と呼ばれる時系列データ解析手法である [7]。このデータ解析手法は非線形力学系理論、より具体的には時間遅れ埋め込み (lagged coordinate embedding) を利用した状態空間の再構成 (State Space Reconstruction) [8] に基づいている。この手法ではシステムの動態を記述するために特定の数理モデルを仮定せず、それを高次元の空間における状態の遷移として表現する。生態学で研究されるシステムは多くの場合、多数の要素が相互作用して駆動する高次元の力学系と考えられるが、多くの場合、すべての要素を正確に観測することはできない。このような限られた観測のみからはシステムの状態を正しく特定することが不可能のように思われるが、上記の時間遅れ埋め込みはそれを可能にする。「観測できる限られた要素の時間遅れ値」を「観測できなかった要素」の代わりに利用して構成される状態変化のアトラクタは、オリジナルのアトラクタの基本的な特徴を保存していることが保証されているためである。シス

*東北大学大学院生命科学研究所

テムを構成する要素の時系列は、それ自身の中にシステム全体の状態に関する情報を持っているのである。

EDMの枠組みではこれまで、この時系列データに含まれる情報を利用することで、システムの複雑性評価や動態の短期予測、因果推論、相互作用の強度・符号の推定などを可能にする方法等が提案されている [7]。本研究では、多種時系列データから種間相互作用を検出したり、群集構造と安定性の間の因果関係を評価するために Convergent Cross Mapping (CCM) と呼ばれる因果推論手法 [9] を、そして種間相互作用の量的評価を行うために S-map と呼ばれる手法 [10] を利用した。さらに、群集の安定性評価のため、推定された種間相互作用強度を基にして「局所リアプノフ安定性」を計算する手法を提案し利用している。局所リアプノフ安定性とは、生態系の状態（種組成）が本来の軌道から少し外れてしまったときに、そのズレが拡大する程度（元の軌道に戻るかどうか）を表す指標と考えることができる。

3. 舞鶴湾の魚類群集データからわかること

本研究の対象となった舞鶴湾は、京都府北部に位置する湾口 700m、面積 23 平方キロ、最大水深 20m の小さな湾である。舞鶴湾では、京都大学の益田氏により、2002 年より 2 週間に一度の潜水調査が欠かさず実施されてきた [11]。岸から 10m ほど離れた場所（水深 1-10m）に幅 2m・長さ 600m の調査ラインが設けられ

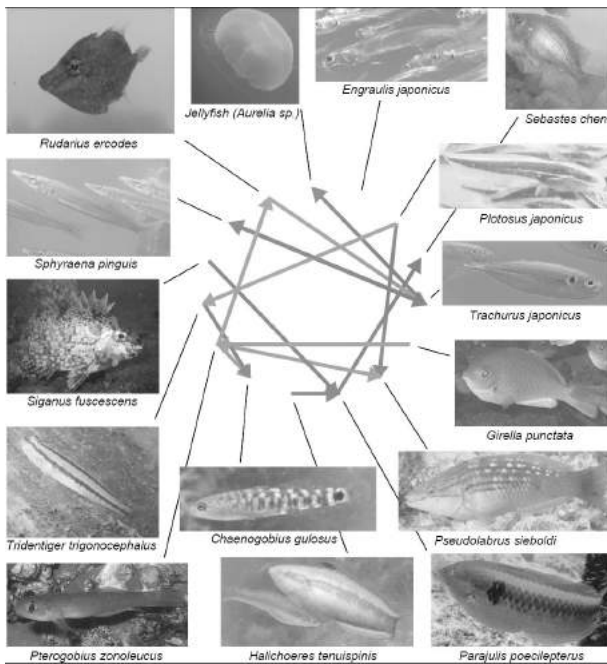


図1 本研究の対象となった舞鶴湾の15種の生物と、個体数変動データから明らかになった生物種間の14の関係性（種間相互作用）。矢印は影響を与える種から、影響を受ける種に向かって引かれている。Ushio et al. (2018) より [1]。

ており、そこに生息するすべての魚種とその数が記録されている。本研究では、14種の魚（マアジ、シロメバル、アミメハギ、カタクチイワシ、ゴンズイ、メジナ、ホシササノハベラ、キュウセン、ドロメ、ホンベラ、チャガラ、アカオビシマハゼ、アイゴ、アカカマス）とミズクラゲの時系列データを利用した。（図1）

まず、これら15種の生物の時系列データを基に、CCMによって生物種間相互作用を検出し、さらに S-map を利用して検出された相互作用の強度を評価した。15種の生物の間からは、様々な強さや符号の計14の種間相互作用が検出された。従来の群集モデリングでは、種間相互作用の強さや符号は時間とともに大きく変動しないと仮定されることも多かったが、本研究から見えてきたのはそれとはまったく異なる様相であった（図2）。多くの種間相互作用は、その強さが時間とともに大きく変動し、ときにはその符号までもが時間によって逆転するケースも見られた。

検出された種間相互作用を基に舞鶴湾の生物群集の局所リアプノフ安定性を評価したところ、興味深い知見が得られた。群集安定性が夏に高まり冬には低下するという季節変動を示すのである。さらにこの群集安定性の季節変動に対して群集構造が及ぼす影響を明らかにするため、種多様性・弱い相互作用の卓越性・相互作用強度といった群集指標と群集安定性の間で CCM による因果推論を行った。すると種多様性や種間相互作用の季節変化が安定性に影響する仕組みが分かった。夏には舞鶴湾に生息する生物の種多様性が高まる。すると、個々の種間相互作用は冬に比べて弱くなり、その影響を受けて群集の安定性が高まるのである。自然生態系において種多様性が、群集安定化することを示す証拠を掴んだのみならず、種間相互作用が緩やかになることが安定化の鍵となっていることがわかったのである。

4. 今後の展開

本研究の意義の一つは、自然生態系における種間相互作用をその時間変化も含めて「ありのまま」捉えたことにある。これまで、野外での種間相互作用の検出には、多大な労力を伴う操作実験などが必要とされてきた。しかし、EDMの枠組みを利用すれば、野外観測から得た個体数変動データのみから複数の生物種間の相互作用を検出でき、その時間変動を示すことができるのである。種間相互作用は生物の個体数変動を理解する重要な要素である。本手法を他の様々な生態系に対しても適用し、その結果を比較することで、野外における種間相互作用やその変動に関するより一般的なルールを見つけることができるかもしれない。

生物群集の安定性を評価し、さらにその変動要因を明らかにしたことも本研究の意義の一つである。本研究から、群集安定性が大きく時間変動するという安定

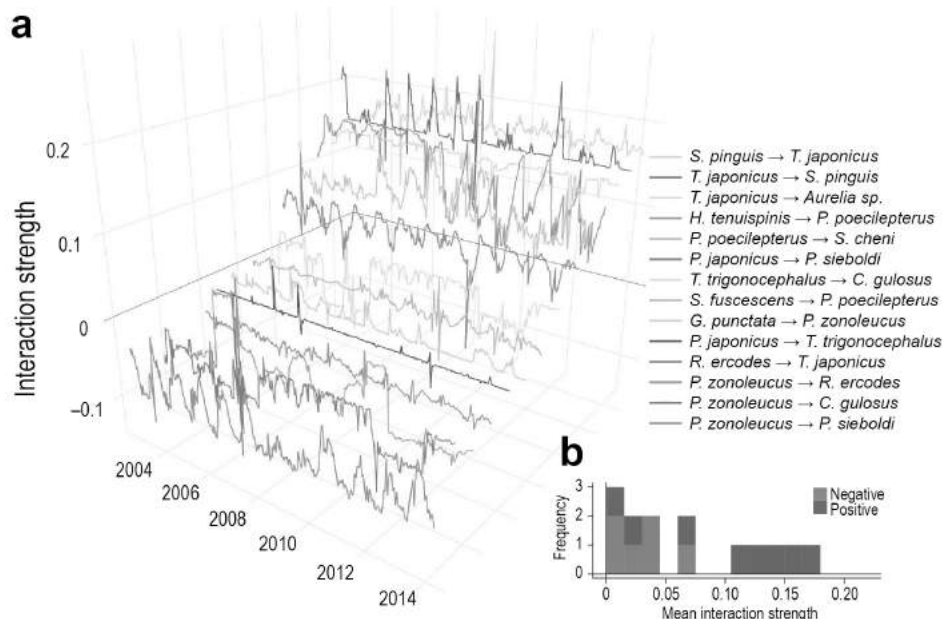


図2 本研究の対象となった舞鶴湾の15種の生物と、個体数変動データから明らかになった生物種間の14の関係性（種間相互作用）。矢印は影響を与える種から、影響を受ける種に向かって引かれている。Ushio et al. (2018) より [1]。

性的変動性が見えてきた。生物群集の安定性が変動するという事は、生態系には外からの攪乱の影響を受けやすいタイミングと受けにくいタイミングがあるということを意味している。人間活動は生物群集に対する攪乱として作用してしまう。しかしこの結果は、同じ攪乱でも、安定性の高い時期であれば生物群集に及ぼす影響を小さく抑えられる可能性を示唆している。このタイミングを正しく捉えることができれば、より効果的に生態系を保全したり生物資源を利用したりすることが可能になるかもしれない。群集安定性の変動性をどうやって生態系保全や生物資源管理に利用していくかは面白い課題のように思われる。

長期の生態系観測データは、生態系の変化や駆動原理を明らかにする上で、有用な情報をもたらす。本研究では2週間に一度・12年間の長期・精細な個体数変動データを利用することで、種間相互作用や生物群集安定性、さらには生態系に安定性をもたらす要因を特定できた。これまでにない速度で生物が絶滅し、生態系の機能不全が進行している。舞鶴湾で行われてきたような生態系観測をもっと広域・多地点で実施することで、生態系の振る舞いの理解が進み、生態系保全を効果的に進めることが可能になるだろう。環境DNAや人工衛星を利用したりリモートセンシング、音響観測など生態系の情報を収集する技術に近年大きな発展が見られるが、この動きと連携したモデリング手法の開発が今後ますます重要になっていくように思われる。

参考文献

[1] M. Ushio, Chih-hao Hsieh, Reiji Masuda, Ethan R Deyle, Hao Ye, Chun-Wei Chang, George Sugihara, Michio Kondoh. Fluctuating interaction network and time-varying

stability of a natural fish community, *Nature*, 554: 360-363 (2018).

[2] May, R. M. Will a large complex system be stable? *Nature*, 238, 413-414 (1972).

[3] Kondoh, M. Foraging adaptation and the relationship between food-web complexity and stability. *Science*, 299, 1388-1391 (2003).

[4] Chamberlain, S. A., Bronstein, J. L., Rudgers, J. A. How context dependent are species interactions? *Ecology Letters*, 17, 881-890 (2014).

[5] Paine, R. T. Food web complexity and species diversity. *American Naturalist*, 100: 65-75 (1966).

[6] Navarrete, S. A., Berlow, E. L. Variable interaction strengths stabilize marine community pattern. *Ecol. Lett.*, 9, 526-536 (2006).

[7] Chang, C.-W., Ushio, M, Hsieh, C. H. Empirical dynamic modeling for beginners. *Ecological Research*, 32: 785-796 (2017).

[8] Takens, F. in *Dynamical Systems and Turbulence* (eds. Rand, D. & Young, L.-S.) 366-381 (1981). doi:10.1007/BFb0091924

[9] Sugihara, G., May, R., Ye, H., Hsieh, C. H., Deyle, E., Fogarty, M., Munch, S. (2012) Detecting causality in complex ecosystems. *Science*, 338: 496-500.

[10] Deyle, E. R., May, R. M., Munch, S. B. & Sugihara, G. Tracking and forecasting ecosystem interactions in real time. *Proc. R. Soc. B Biol. Sci.*, 283, 20152258 (2016).

[11] Masuda, R., Shiba, M., Yamashita, Y., Ueno, M., Kai, Y., Nakanishi, A., Torikoshi, M., Tanaka, M. Fish assemblages associated with three types of artificial reefs: density of assemblages and possible impacts on adjacent fish abundance. *Fish. Bull.*, 108, 162-173 (2010).

【第4回 トラノマキ企画】

女性から見た科学者像 -私が思う研究者-

生駒千乃*

「リケジョ」という単語も世間に浸透し、半世紀前と比較すれば女性の社会進出には目を見張るものがあります。例えば、欧米諸国に目を向けると女性科学者の活躍は顕著であり、分野による偏りを考えても、国際学会に参加するとそれは明らかです。日本国内でも、大学の学部生に占める女性の割合が2018年で45%を超え、過去最高となりました(文部科学省:2018年度学校基本調査)。さらに、大学院生の女性の割合も修士課程が31.3%、博士課程が33.6%で、いずれも過去最高です。このように、研究者の世界も例外ではなく、女性科学者の数が増えつつあり、そのための環境が整いつつあるようにも思います。しかし一方で、女性には出産・育児という大きなライフイベントがあり、男性と比較して自由に研究に専念できない場合も出てきます。そういった意味で、女性科学者のための環境が完全に整っているとは言い難いこともまた事実です。2019年度のニュースレターでは、「女性から見た科学者像-数理生物学とエトセトラ-」と題して、数理生物学会で活躍している様々な世代の女性から見た科学者像について執筆を依頼するリレー企画を開始いたします。第1回目は九州大学理学部生物学科の数理生物学研究室に所属する学部4年生の生駒千乃さんです。生駒さんから見た研究者像や科学者の世界について、彼女らしくすっきりした、そして、ユーモアを交えた読みやすい文章でまとめて下さいました。(編集部)

人生で初めてこのような記事を書きます。九州大学生物学科数理生物学研究室学部4年生の生駒千乃(ゆきの)です。今月号から、女性研究者についての企画が始まります。大事な初回を担当させて頂くことになり、喜びもさる事ながら、主に緊張で震えています。私はまだ学部生で、研究者について話せるようなことは、きっとほとんどないに等しいので、主に「リケジョ」から見た研究者について、お話ししていこうと思います。

まずは、少し私のことをお話しさせてください。私は理学部の「数理」生物学研究室に所属していますが、絶対に文系脳です。幼稚園生の頃から趣味は読書、昼休みは図書館にこもり、好きな教科は国語、部活はずっと合唱部という徹底ぶりでした。一方家では、理科系

科目に触れる機会が多くありました。というのも、私の家ではテレビのチャンネル権は両親にあり、二人ともNHKが大好きだったのです。朝は、朝ドラから有働さんの朝イチ、夕方はニュースやドキュメンタリーがついている、これがいつもの生駒家の居間でした。“ダーウィンが来た!”や“地球ドラマチック”を、必ず兄弟3人揃って見ていたのは良い思い出です。NHK漬けの日々の中、視聴していた番組は生物学・医学の出現頻度がとても高く、私は自然とそれらに興味を持ちました。それに加えて文理選択時、数学担当の先生が好きだったこともあり、理系に進みました。この頃には漠然と、大学では生物学を勉強しようと思っていたのを覚えています。大学は、馬術部がある九州の国立大学ということで九州大学に進学し、無事に今生物学を学ぶことができています。そんな中、苦手な数学と合わさった数理生物学研究室を志望したきっかけは、学部2年生の時に数理生物学研究室の教授であった巖佐先生の“生物数学”という講義を受講したことです。当時の私は“数学”と聞いただけで、もう自分には向いてないと諦め半分で第一回目の講義を迎えました。でもいざ巖佐先生のお話を聞いてみると、一転してとても興味が湧きました。ほとんど毎回、違う題材で数理生物学の話をしてくださるのが、他の専門科目とは違いととても刺激的でしたし、何より先生のお話が聴いていて本当に楽しかったからです。巖佐先生が学会等で不在の際は、ラボの先輩方が自分の研究を学部2年生相手にわかりやすくお話ししてくださり、これもまた新鮮でした。この頃に初めて数理生物学研究室を訪問し、3年生になって配属時期より早く、ラボの先輩である柿添友輔さんに解析方法をお教え頂きながら研究を始めました。“右も左も…”どころではない程の初心者のまま柿添さんに教えて頂いていて、本当に感謝しています。研究室の先輩方は優しい方ばかりで、岩波翔也さんや高木舜晟(みつあき)さんとは、同期であるキム・アジンと一緒に壱岐まで釣り旅行をしたこともありますし、伊藤悠介さんはコーヒーを奢ってくださいます。本当に楽しい研究室です。

この1年間、研究生活の面では、学会に出席させて頂くことが多かったように思います。他のラボの同期は会等に出席したことがないという子が多い中、学会

*九州大学理学部生物学科 数理生物学研究室

【第2回 ホットスポット企画】

第一回数理生物学夏の学校開催記

山口 諒*

数理生物学はその学問の性質上、生物学から数学、工学の各分野に至るまで広い範囲のトピックをカバーしています。数理科学の専門家とその他の分野(生態学, 分子生物学, 疫学など)の専門家が分野横断的に研究を進める昨今、数理生物学を学ぶ学生や若手研究者は全国に散在しており、体系的な数理的手法を習得する機会に恵まれている若手は多くありません。このような背景はおそらく、数理生物学に限らずその他の多くの学術分野でも起きていることと思われます。そこでこのような状況を解決する一つの案として、「若手の会」や「夏の学校」といった、勉強の場を定期的に提供する交流企画が挙げられます。実際に、web上で検索すると多くの「若手の会」がヒットしますし、数理生物学と近い分野では、「生物物理学若手の会」や「生命情報科学若手の会」が精力的に活動されているようです。今回、数理生物学では初めての試みとして夏の学校を2018年8月30日～9月1日の3日間で企画・開催しましたので、ここにその報告として開催記を執筆する機会をいただきました。以下では、開催前の準備から順に時系列で振り返りたいと思います。

開催にあたって

夏の学校開催に先立ち、JSMB Newsletter No. 85の第一回ホットスポット企画にて、数理生物学若手の会(以下、若手の会)の設立という記事を掲載しました。若手の会はメーリングリストによる入退会が可能で、現在は情報交換や質問の場として活用されています。登録者数は20名ほどで、若手の会での企画の募集や宣伝が主ですが、活動の充実とともに利用の幅が広がることを期待しています。「数理生物学夏の学校」(以下、夏の学校)は、その設立間もない若手の会が主催する定期行事として2018年から始めた試みです。本稿の最初に述べた背景に加え、いくつか開催に至った動機についてご紹介します。

まず、2018年度はオーストラリア・シドニーでSMBと合同の国際数理生物学会が開催されるため、JSMBの国内年会がありませんでした。そこで、海外出張の困難な学生を主な対象として、発表・研究交流機会を



図1 数理生物学夏の学校の参加者集合写真。

提供することが重要だと感じました。また、異なる研究背景を持った若手が集まるのですから、各分野の講師を招いた理論講習会もセットにすることで、数理生物学の手法を体系的に学ぶことができる機会を提供することを目指しました。異なる現象に共通の論理構造を発見し、自身の研究にフィードバックするには、ほかの理論研究者との交流が役立つはずですが、このように基礎理論の学習機会の提供や情報交換、新規共同研究の展開といった個人で達成できない課題を解決するのが夏の学校の狙いです。

続いて、開催に伴う場所の選定や費用についてです。今回は、総合研究大学院大学(以下、総研大)の佐々木頭先生に共同代表をご快諾いただき、共催というかたちで講義室や宿舍の手配をお願いすることができました。これらの経費を低く抑えることができたのは、開催にあたって非常にありがたい点です。また、若手の会としても参加者を支援するべく、山口が申請し採択された中辻創智社の会議開催費助成によって、受講者の旅費を全額支給することができました。これらのサポートにより、参加者は金銭的な負担なく夏の学校に参加することが可能となり、初開催の研究集会に参加するハードルを少しでも下げることができたのではないかと考えています。もちろん、これらのサポートは継続的ではありませんので、今後夏の学校を継続していくにあたっては、予算の確保が重要な課題となります。最終的には、Bio-mathメーリングリストや各大学

*首都大学東京・理学研究科 進化遺伝学研究室
Email:ryamaguchi@tmu.ac.jp

の先生方の呼びかけにより、学部3年～博士課程3年までを含む、数理生物学を専門とする学生および若手研究者計20名が参加者として登録しました(図1)。

参加登録の際は、口頭発表の演題・要旨登録のみではなく、事前アンケートを行うことによって参加者のモチベーションの把握にも努めました。図2Aに示すように、参加者の中では修士1年の割合が最も高いですが、研究室に配属されたばかりの4年生も多く、初学者の研究意欲を促進するような集会内容が求められます。また、このように研究を開始して間もない学生が大半であることから、ほとんどの参加者が旅費・宿泊費支援を希望しました(図2B)。続いて、博士後期課程への進学希望度を調査したところ(図2C)、60%の参加者が「ある・少しある」を選択しているほか、「わからない」を選択した参加者も25%おり、このような若手をどのように継続して支援していくのが分野としての課題と言えます。最後に、図2Dと2Eはそれぞれ、参加者の現在の研究トピックと聴講したい研究分野を表しています。どちらも多岐にわたっていることが数理生物学の性質をよく表していますが、中でも生態・進化や感染症動態に興味が集まっているようです。

第一回数理解生物学夏の学校開催！

夏の学校と名打つ研究集会ですから、参加者が勉強と交流に一生懸命になれるよう「よく学びよく遊ぶ」をコンセプトにプログラムを作成しました。実際のプログラム詳細は夏の学校HPにて確認できます(<https://jsmbpys.weebly.com/>)。会期は大学院入試や各学会期間を避けた8月30日～9月1日の2泊

3日と設定しましたが、これは湘南のビーチでバーベキューができるギリギリの日程でもあります。総研大近くの一色海岸は、アメリカメディアのCNNが紹介する「世界のベストビーチ100」にもランクインするほどで、参加者の皆さんには研究とともに夏らしい交流会を楽しんでもらおうという目論見です。

さて、先述の事前アンケートをもとに講師陣は講義内容を検討し、当日は講演内容の資料を配布してレクチャーを行いました。担当講師と講義内容は以下のとおりです(順不同)：佐々木顕先生(総研大・感染症分野)、大槻久先生(総研大・ゲーム理論分野)、佐竹暁子先生(九大・生態分野)、森下喜弘先生(理研・発生分野)、守田智先生(静岡大・ネットワーク理論分野)、山口諒(首都大・進化分野)。各分野の講師が1時間程度の講義を行ったのち、その分野に関連する参加者のショートトークを行います。ショートトークは1人10分という短い時間ですが、参加者間の自己紹介を兼ねるとともに、各分野の講師から必ずコメントをもらえる状況を目指しました。この試みは有意義だったようで、普段話すことができない先生方から貴重なコメントがもたらされたとの意見がありました。参加登録なしの流動的な聴講者を合わせると、合計30名程度が一室に集まるサイズでしたが、参加者一人一人が十分に交流できる規模の集会だったと感じています。

今回は参加者の宿泊施設を総研大に限定したため、いわゆる2泊3日の合宿形式で夏の学校を開催しました。個別の宿泊ではなく、あえて同じ場所に缶詰めになることによって議論や交流が促進される効果もありました。数理モデルを専門に扱う若手研究者にとって

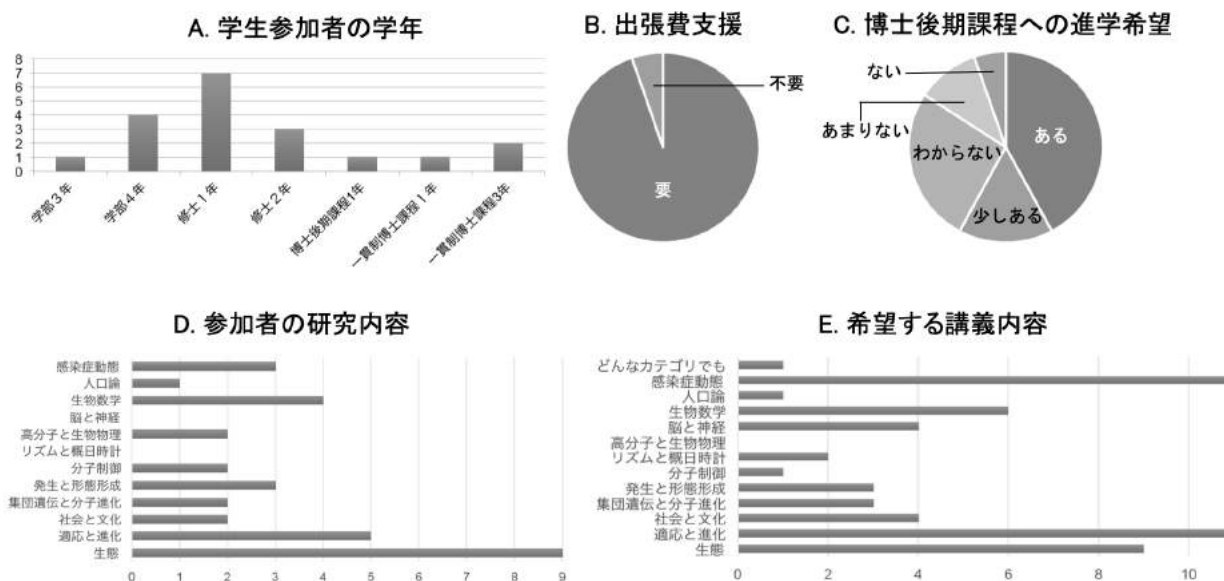


図2. 数理生物学夏の学校参加者への事前アンケート結果。A. 学生参加者の学年分布。B. 旅費・宿泊費支援の希望有無。C. 博士後期課程への進学をどの程度希望するか(5段階評価)。D. 参加者の研究内容カテゴリ(複数回答可)。E. 夏の学校で聴講を希望する講義内容のカテゴリ(複数回答可)。

は、あらゆる生命現象に関する話題に対応し、即座に共同研究提案をできる力を備えていく事が重要な能力になりつつあるため、自身の専門分野以外の参加者とも積極的な交流は重要です。オーガナイザーである私自身も、講義や参加者の皆さんとの交流を、参加者の一人としてとても楽しむことができました。全体を通して大きな問題がなく、盛況のうちに夏の学校を終えることができたのは、第一回目の開催として実りある成果です。

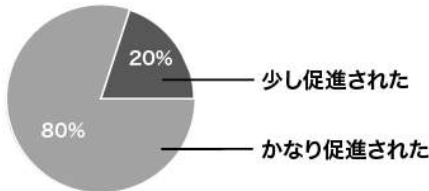
第一回の開催を終えて

夏の学校終了後、参加者全員に参加した感想や内容の改善点などについてアンケートを実施しました(図3)。その結果、日頃と比べ数理生物学者との交流が促進されたと感じた参加者が80%、自身の専門以外のテーマに関する数理的手法を体系的に学ぶ機会の重要性を感じた参加者が95%に昇ることが判明しました。これはまさに夏の学校の開催目的と合致しており、貴重な機会を提供することができたと考えています。また、旅費の支援は十分と回答した参加者が80%(問題ない程度が20%)であり、今回の参加人数に対しては十分なサポートができたようです。続いて、数理生物

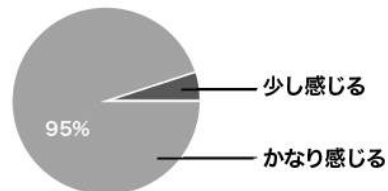
学夏の学校にまた参加したい、または知り合いに参加を勧めたいかという質問に対しては、80%が「かなり思う」を選択し、20%が「少し思う」を選択したことから、参加者のニーズにあったプログラム構成が実現できたと感じています。一方、講義の難易度については「ちょうど良い」が65%となっているものの、参加者の感想にばらつきが見られたほか、講義の方法については各分野を概観する内容と実際に手を動かして計算に挑戦する内容で好みが大きく分かれる結果となりました。また、自由記述の感想欄には、今回取り扱わなかった統計や機械学習に関する講義の要望も見られました。幅広い参加者層すべてに満足してもらえる講義内容は難しいですが、今後の講義内容の参考となる意見です。

上記のような事後アンケートの結果から、第一回数理生物学夏の学校の試みは概ね成功だったと言えます。参加者からの感想の中には、「同年代の学生がどのような研究をしているのか学べてよかった」、「数理生物学会では若手だけで集まることがなかったので非常によい機会だった」、「数理生物学の入門的な内容を学ぶことができた」といった意見が寄せられました。このような集会企画を継続的に行うことで若手の交流をは

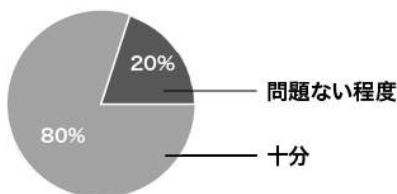
Q.日頃と比べ、数理生物学者との交流は促進されましたか？



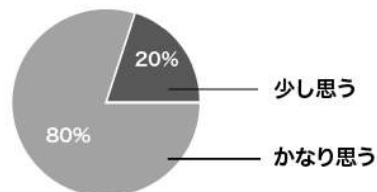
Q. 学際的な数理生物学ですが、夏の学校への参加を通して、自身の研究テーマ以外の数理的手法について学ぶ機会は必要だと感じましたか？



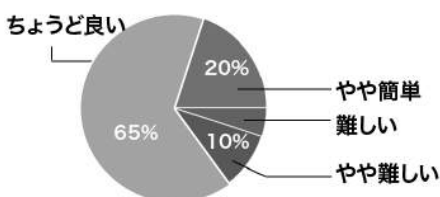
Q. 旅費の支援は十分でしたか？



Q. 数理生物学夏の学校へまた参加したい or 知り合いに参加を進めたいと思いますか？



Q. 講義のレベルはどうでしたか？



Q. 講義は各分野を概観する内容と、実際に手を動かして計算練習をする内容のどちらが好ましいですか？

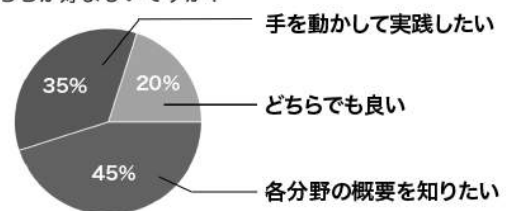


図3. 数理生物学夏の学校参加者への事後アンケート結果。旅費の支援に関する質問は3段階評価、それ以外の質問は全て5段階評価。結果には回答に用いられた選択肢のみを表示。

かり、最終的に研究生産性の向上につながることは若手の会の目標でもあります。そこでこれらの成果を踏まえ、夏の学校は単発の企画で終わらず、2019年度の第二回の開催に向けて間もなく動き出す予定です。このほかにも現在集まっている企画案としては、数理解生物学会期間の前後で行う若手のミニシンポジウムや、講師陣を囲んで学生時代のテーマ選びや研究生活を伺う座談会などが挙げられています。特に前者については、2019年度の数理解生物学会の前日に「第一回数理解生物学若手の集い」と題した研究集会を行う予定です。詳細は下記に掲載しますので、皆さまふるってご参加下さい。このほかの活動案は本稿の読者の皆さまからの案も募集しますので、若手の会のホームページ (<https://jsmbpys.weebly.com/>) にアクセスしてください。若手の会として活動実績を積み上げることで、個人のレベルアップのみならず、数理解生物学分野の若手全体が活発になることを願っています。

最後に、夏の学校の成功には全国からの若手研究者や学生の参加が必須であり、開催および参加者旅費をご支援くださった中辻創智者会議開催費助成および総合研究大学院大学「先導的共働プログラム」に感謝申し上げます。また、講師陣の先生方も学生の参加を第一に考え、皆さん手弁当での参加をご快諾してくださったため、このような素晴らしい会議を実現することができました。この場を借りて心より感謝申し上げます。

数理解生物学若手の会からのお知らせ
「第一回数理解生物学若手の集い」

主催 数理解生物学若手の会

代表者 山口 諒
(首都大学東京 理学研究科)

共催 JST 未来社会創造事業
探索加速型「共通基盤」領域
多階層数理モデルに基づく経時的ゲノム進化
動態の定量的解析基盤の構築

岩見 真吾
(九州大学 大学院理学研究院生物科学部門)

集会名 第一回数理解生物学若手の集い

日時 2019年9月13日 10:00~17:00
(2019年度数理解生物学会前日)

場所 東京大学数理科学研究科大講義室
(駒場第Iキャンパス)

内容 若手研究者を中心とした複数のシンポジウム
開催と研究交流、懇親会。演題募集など詳細
が決まりましたら、改めて各種 ML でお知らせ
いたします。

2019 年国際学会スケジュール

2019 年 4 月

EMBO Workshop - Integrative Biology : From Molecules to Ecosystems in Extreme Environments

April 22-25, Santiago, Chile

Workshop on Mathematical and Statistical Aspects of Molecular Biology

April 25-26, Hinxton, United Kingdom

5 月

9th World Congress on Plant Genomics and Plant Sciences

May 8-9, Phuket, Thailand

7th Workshop on Biostatistics and Bioinformatics

May 10-12, Atlanta, United States

Cell Science and Molecular Biology 2019

May 13-14, Kuala Lumpur, Malaysia

NSF-CBMS Conference : Mathematical Molecular Bioscience and Biophysics

May 13-17, Alabama, United States

8th International Conference on Biodiversity Conservation and Ecosystem Management

May 15-16, Singapore

CMPD5 : The Fifth International Conference on Computational and Mathematical Population Dynamics

May 19-24, Florida, United States

EMBL Conference BioMalPar XV: Biology and Pathology of the Malaria Parasite

May 28-30, Heidelberg, Germany

International Conference on Mathematical Modeling and Analysis

May 28-31, Tallinn, Estonia

ICAMDS 2019 : International Conference on Applied Mathematics and Data Science

May 29-31, Xi'an, China

6 月

Ecology & Evolution of Infectious Diseases

June 10-13, Princeton, United States

BIOMATH 2019 : International Conference on Mathematical Methods and Models in Biosciences

June 16-22, bedlewo, Poland

World Congress on Genomics & Bioinformatics

June 20-21, Brisbane, Australia

Workshop on Mathematical Ecology : Modeling Structured Populations

June 27-28, Queen's University, Canada

AMNS 2019 : Second International Conference on Applications of Mathematics to Non-linear Sciences

June 27-30, Pokhara, Nepal

7 月

NTADES : New Trends in the Applications of Differential Equations in Sciences

July 1-4, St. Constantine and Helena, Bulgaria

IEEE CIBCB2019 : International Conference on Computational Intelligence in Bioinformatics and Computational Biology

July 9-11, Tuscany, Italy

7th International Conference and Workshop on Basic and Applied Sciences

July 15-17, Johor Bahru, Malaysia

ICIAM 2019 : 9th international Congress on Industrial and Applied Mathematics

July 15-19, Valencia, Spain

MMEE 2019 : Mathematical Models in Ecology and Evolution

July 16-19, Lyon, France

12th European Biophysics Congress EBSA

July 20-24, Madrid, Spain

SMB 2019 : Society for Mathematical Biology

July 22-26, Montreal, Canada

8月

Out-of-equilibrium Processes in Evolution and Ecology

August 18-23, Oaxaca, Mexico

AMMCS 2019 : Applied Mathematics, Modeling and Computational Science

August 18-23, Waterloo, Canada

ESEB 2019 : The 2019 Congress of the European Society for Evolutionary Biology

August 19-24, Turku, Finland

CJKI 2019

August 23-27, University of Science and Technology Beijing, China

9月

12th Global Infections Conference

September 9-10, Singapore

EMBO Workshop - Network Inference in Biology and Disease

September 10-13, Naples, Italy

Mathematical Modeling and Computational Methods in Applied Sciences and Engineering

September 16-20, Olomouc, Czech Republic

CMSB 2019 : 17th International Conference on Computational Methods in Systems Biology

September 18-20, Trieste, Italy

ICNAAM 2019 : International Conference of Numerical Analysis and Applied Mathematics

September 23-28, Rhodes, Greece

Conference on Complex Systems 2019

September 30-October 4, Singapore

10月

4th Workshop on Virus Dynamics

October 21-23, Paris, France

BIT's 9th Annual World Congress of Molecular & Cell Biology 2019

October 25-27, Singapore

11月

ICSB 2019 : International Conference of Systems Biology

November 1-5, OIST, Okinawa

2nd International Conference on Microbiology

November 11-12, Istanbul, Turkey

2nd International Conference on Bacteriology and infectious diseases

November 18-19, Bangkok, Thailand

2nd International Conference on Tropical and Infectious Diseases

November 21-22, Bali, Indonesia

12月

NOLTA 2019 : International Symposium on Nonlinear Theory and Its Applications

December 2-6, Kuala Lumpur, Malaysia

EPIDEMICS7 : Seventh International Conference on Infectious Disease Dynamics

December 3-6, Charleston, United States

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 88 号（2019 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：2019 年 3 月 31 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 88 号（2019 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：2019 年 3 月 31 日

【トラノマキ企画】

良い研究をするためには良い研究のできる環境が必須です。研究費の獲得や人材育成、面白いテーマ、コネクション……、など、研究ライフをより向上させるための様々な秘訣やノウハウを紹介する「トラノマキ企画」への原稿を募集しています。

- 分量：特に制限無し。概ね 2、3 ページ程度（文字だけの場合 2000 字で 1 ページ）。
 - 書式：特になし。
 - 内容：
 - ファイル形式：テキスト、Word、 \TeX 等
 - 備考：投稿が多かった場合には掲載時期を調整させていただく場合があります。
 - 締め切り：原稿は随時受け付けております。（次号 88 号 2019 年 5 月発行号に掲載する場合は 2019 年 3 月 31 日、次々号 89 号 9 月発行号に掲載する場合は 7 月 10 日）
-

学会事務局からのお知らせ

1. 新事務局からの挨拶

2019年1月より稲葉寿新学会長(東京大学大学院数理科学研究科)の下、以下の体制で新事務局を運営させて頂くことになりました。

岩田 繁英
(事務局幹事長: 東京海洋大学学術研究院)
中丸 麻由子
(会計: 東京工業大学環境・社会理工学院)
大泉 嶺
(庶務担当幹事: 国立社会保障・人口問題研究所)
立木 佑弥
(庶務担当幹事: 首都大学東京理学研究科)

事務局の運営に携わった中岡慎治さん、江夏洋一さん、佐藤一憲さん、2年間ご苦労様でした。数理生物学会として、2019年度は東京工業大学での年会(9月14日-9月16日)が控えており、2020年度は開催場所を模索中ではありますが年会を開催する予定です。また、他の研究集会に関する情報や事務局に届いたお知らせを随時発信する予定です。新事務局一同、会員のみなさまのお役に立てるような運営を心がけて、新会長を支えていきたいと思っております。どうぞよろしく願いいたします。

2019年1月 第15期事務局幹事長 岩田繁英

2. 新役員(敬略称)

会長 : 稲葉 寿
副会長 : 佐々木 顕
事務局幹事長 : 岩田繁英
会計 : 中丸麻由子
事務局幹事 : 大泉 嶺、立木佑弥

運営委員: 大槻 久、岩見 真吾、近藤 倫生、郡 宏、江副 日出夫、黒澤 元、佐竹 暁子、山内 淳、時田 恵一郎、森下 喜弘、瀬野 裕美、中丸 麻由子、李 聖林、高須 夫悟、望月 敦史

3. 旧事務局からの挨拶

2017年1月より2年間事務局を務めてまいりました。佐々木徹前幹事長・難波利幸前会長をはじめとする前事務局の皆様や、運営委員会のメンバー、学術専門委員の皆様、会員の皆様に支えられて任期を全うすることができました。ご協力、誠にありがとうございました。十分な対応ができないなど、至らないところもあったと思いますが、ご容赦お願いいたします。

この2年間には、2017年の札幌大会(高田壮則大会委員長)と2018年のSMBとの合同大会(オーストラリア・シドニー)の2つの年會が行なわれました。札幌大会は、北海道地区・東北地区合同の主催となりました。SMBとの合同大会では、オーストラリア・シドニーでの海外開催でしたが、日本からの講演者も積極的に参加し盛況の中幕を閉じた大会となりました。いずれの大会も、大会委員長をはじめとする関係者や、たくさんの参加者のおかげで実りあるものになりました。本当にありがとうございました。

以前から脈々と続く事務局のご尽力で、今や事務局の仕事は十分に整備されています。活発な学会員の努力もあり、海外の数理生物学会との合同も含めて、学会の関わる様々な活動も増えてきています。それに応じて、実は事務局の仕事も増えていきます。昨今増加する学内外の業務も相まって多忙を極め、振り返ると、事務局の仕事はまさに自転車操業でした。数ある活動の中でも、たとえば事務局や運営委員会の任期である二年をまたぐ活動では、引き継ぎそのものが整備されておらず、対応に苦心する場面もありました。今後、学会の関わる継続的な活動は、年大会のように学会員の自主的かつ継続的な活動によって、引き継ぎ含めて維持される体制の必要性を痛感しています。これまで続いてきた活動の維持に精一杯で、若手や数理生物学に興味を抱いている他分野の研究者にとって意義のある新たな活動については、十分に下支えできとは言えないかもしれません。その思いから、次期事務局には学会活動のさらなる効率化を進めると共に、色々と新しい企画提案を進めていただきたいと思います。岩田幹事長を中心とする次期事務局も大変かとは思いますが、今後の学会の発展のためにご尽力頂ければと思います。

最後に、この2年間本当にありがとうございました。

2019年1月 第14期事務局幹事長 中岡慎治

4. 第13回日本数理生物学会研究奨励賞

選考委員会は、本年度の研究奨励賞を以下の2名の方に授与することに決定いたしました。

江夏 洋一（えなつ よういち）氏（東京理科大学）

立木 佑弥（たちき ゆうや）氏（首都大学東京）

今年度は5名の候補者がありました。応募時点の職については、大学院生、任期付きの職、常勤の職と多様でした。学位取得後の年数も、未取得から8年と多様でした。第一段審査として、各候補に関する資料を選考委員6名に送って検討していただいた後、受賞推薦者に関する報告書を作成して頂き、選考委員による議論を経て、第二段審査のために3名の候補者に絞りました。

第二段審査においては、3名の候補者について、研究成果のみならず、応募要項にも記載された「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」ならびに「数理生物学会での活動歴」などの観点から、研究奨励賞の受賞に値するかどうかの総合的議論を行いました。その結果、最終的に上記2名の方に研究奨励賞を授与することに決定しました。

江夏洋一氏は、2012年に早稲田大学大学院基幹理工学研究科数学応用数理専攻において学位取得、日本学術振興会特別研究員（DC）および同（PD）に採択されたのち、2015年4月から東京理科大学に勤務し、現在は東京理科大学理学部第一部応用数学科・嘱託助教として勤めておられます。江夏氏の主要な研究テーマは、感染症数理モデルの数学的に厳密な解析であり、解の漸近安定性やパーマネンス（個体種の時間終局的な「共存」状態）を含む大域的な挙動などについて、多くの国際共著論文を含め、応募時点で29報の査読付き論文を発表されておられます。また、本学会の事務局（会計）として、本学会への貢献も大きいものがあります。応用数学の観点から数理生物学ならびに本学会へのますますの寄与が期待されます。

立木佑弥氏は2013年に九州大学大学院システム生命科学府において学位取得、日本学術振興会特別研究員（DC）および同（PD）に採択されたのち、現在は首都大学東京理学研究科・助教として勤めておられます。立木氏はこれまで、植物の生活史進化に関する数理モデル研究に従事され、カオス結合系を用いた樹木の豊凶現象に関する研究や、種子捕食昆虫の休眠延長戦略の共進化動態解析のほか、タケ・ササ類の生活史進化についての新規仮説研究は、Journal of Ecology誌においてEditor's Choiceに選定された後、若手著者

による論文賞 Harper Prize を英国生態学会より授与されています。今後も、数理生物学、フィールド生態学、計算機科学の融合領域において、進化という観点からますますの寄与が期待されます。

上述2名の優秀な若手研究者の受賞が、後進研究者への激励となることを期待します。

以上より、上記2名は、会則における「数理生物学に貢献をしている本学会の若手会員の優れた研究を表彰することにより、研究の発展を奨励しわが国の数理生物学の一層の活性化をはかる」という受賞基準に十二分に値する研究者であることにより、ここに日本数理生物学会研究奨励賞の受賞者として推薦いたします。

なお、今回もいずれも優秀な研究者から応募を頂いており、選に漏れた方も決して引け目を感じることなく、ますますのご活躍を期待しております。

日本数理生物学会研究奨励賞選考委員会

5. 2018年1月以降の入退会者(敬略称)

入会(10名)

- 俣野 博（明治大学先端数理科学インスティテュート）
- 高橋 令子（田附興風会医学研究所 北野病院 リウマチ膠原病内科）
- 中原 智弘（広島大学大学院理学研究科数理分子生命理学専攻）
- 野間田 匡顕（広島大学大学院理学研究科数理分子生命理学専攻理学部）
- 石谷 真希（奈良女子大学理学部化学生命環境学科環境科学コース）
- 澤田 行弘（青山学院大学理工学部数学科博士後期課程基礎科学コース）
- 遠藤 彰（北海道大学）
- 合原 一究（筑波大学システム情報系）
- 中井 貴生（名古屋大学）
- 井内 貴彦（阿南共栄病院）

退会(40名：会費滞納による自動退会含む)

合原 一幸・岸本 一男・蔵本 由紀・土居 伸二・土屋 守正・内村 有邦・大原 隆之・井元 大輔・石塚 信行・Hemma Philamore・翁長 朝功・立尾 樹・鈴木 崇規・櫻井 和弥・伊藤 翔太・伊藤 亜以子・猪師 陸太郎・片山 俊郎・中村 真理・清水 昭信・大橋 順・石田 好輝・Smith E. Charles・仲澤 剛史・山本 哲也・白川 康一・西嶋 翔太・八島 健太・早川 慶紀・小森谷 均・橋本 憲太朗・宇都宮 祥平・服部 佑哉・ユウ ミン・長田 瑞穂・堀部 和也・中田 尚樹・奥野 純平・東 昌彦・三好 星慧
現会員数：409名（2018年12月31日現在）

編集後記

何故だかわからないが、外国で乗るタクシーにはそこはかたない魅力を感じてしまう。ANAの羽田ーパリの直通便では現地時間の夕方に到着してしまうのでタイミングがずれてしまうが、中でも好きなのは、郊外にあるシャルル・ド・ゴール空港からパリ市内に向かう深夜タクシーである。最近では、空港からパリ市内の右岸までが50ユーロ、左岸までが55ユーロと法律で決められている。高速道路の混雑状況に左右されるが、渋滞がない場合は40分程度でパリ市内に到着することもあり、便利で安心できる。共同研究しているINSERM（フランス国立保健医学研究機構）のFabrizio Mammano教授が空港まで車で迎えに来てくれることも多々あるが、タクシーに乗るのも好きである。ドライバーがどのルートを選ぶのかにもよるが、僕が好きなルートでは、マドレーヌ寺院の脇を通り、コンコルド広場を抜けて行く。コンコルド広場から右側を眺めるとシャンゼリゼ通りが見え、通りの先には凱旋門がそびえ立っている。そのままタクシーがセーヌ川を渡れば、橋の途中、右前方にはエッフェル塔がライトアップされている。あまり知られていないがエッフェル塔は、夜のちょうど7時や8時といった時間にキラキラと光り輝く。サンジェルマン地区に向かうのであれば、タクシーは橋を渡って左折する。右側にオルセー美術館が見え、左側には先ほど渡ったセーヌ川の対岸であるがルーブル美術館が見える。夜のセーヌ川は、いたる所がライトアップされていて大勢の人達の憩いの場になっている。パリに帰ってきたんだな、と実感する瞬間である。

また、ロンドン市内のタクシーもお気に入りです。セントパンクラス駅からパディントン駅へのルートが好きです。こちらはほんの15分程度の旅だがロンドンタクシーと呼ばれる特徴的な車がやけに男心をくす

ぐる。ユーロスターでEU諸国からセントパンクラス駅に到着した場合、タクシーでパディントン駅まで移動し、そのままヒースロ・エクスプレスに乗ってヒースロ空港へと向かえる。その他にも、シドニーの高層ビル群を一望できるハーバーブリッジを渡る夜のタクシーや渋滞でどこまでも続く赤いテールランプを脇目に走るソウルで乗る夜のタクシーなども好きである。海外出張が多くなると同じ都市を訪問する機会が増える。そんな時“深夜タクシー”のように、ほんのちょっとした楽しみが僕の滞在を充実させてくれる。そして、翌日からの研究生活を有意義なものにしてくれる。

皆様、私達編集部がお送りしている数理生物学会ニュースレターはいかがですか？楽しんで頂いていますか？編集部が新体制になり1年が経過しました。実は、今月号で4報目となり任期の半分以上を終えることができました。後半戦の後1年、残り2報も全力でお送りして参りますので、どうぞよろしくお願いいたします。

日本数理生物学会ニュースレター No87

2019年2月発行

編集委員会 委員長 岩見真吾・巖佐庸・三浦岳

siwami@kyushu-u.org

国立大学法人 九州大学

大学院理学研究院生物科学部門

〒819-0395 福岡県福岡市西区元岡744

ウエスト1号館9階C棟 数理生物学研究室

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