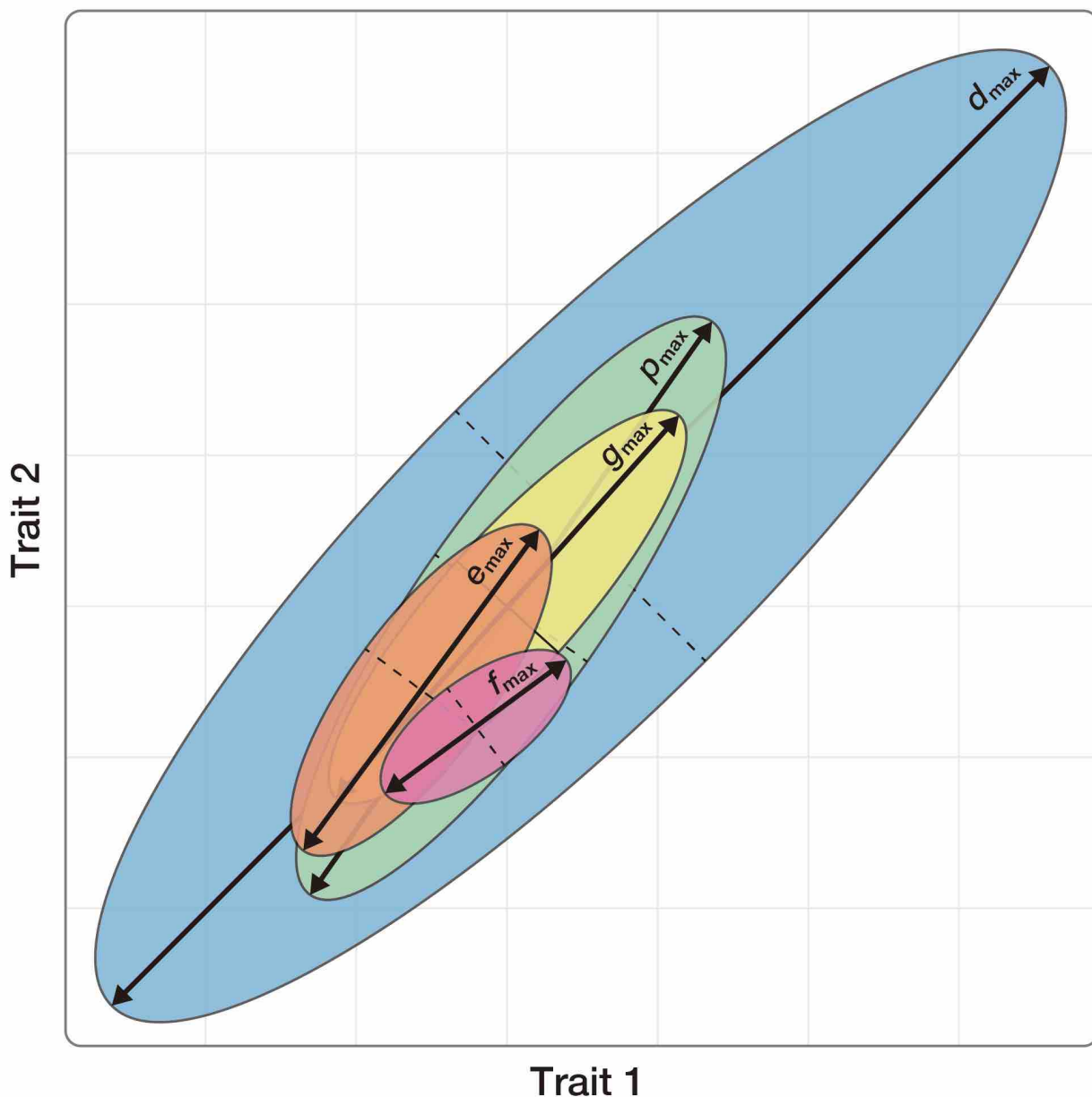




新学術領域研究

進化の制約と方向性

～微生物から多細胞生物までを貫く表現型進化原理の解明～



表紙:表現型の揺らぎと進化の関係を表した概念図。 f_{max} :同一遺伝子型・同一環境での表現型揺らぎ、 e_{max} :環境摂動による表現型の揺らぎ、 g_{max} :集団内での遺伝的多様性による表現型変化、 p_{max} :異なる集団間での遺伝的多様性による表現型変化、 d_{max} :異なる種間での表現型変化をそれぞれ表す。
(図:千葉大学 高橋佑磨)

目次

新学術オンライン議論シリーズ:表現型揺らぎをめぐって	古澤 力・入江 直樹	1
表現型の「揺らぎ」の定義と定量	高橋 佑磨	3
古澤先生、入江先生とのディスカッション	鈴木 孝幸	6
新学術オンラインディスカッションをして	石川 由希	8
細胞ターンオーバーを介した表現型制約とその分子基盤の解明	大澤 志津江	10
オンラインディスカッションの報告	田中 幹子	11
腸内感染と運動性の揺らぎが導く細菌病原性分泌装置への進化の実験的解明	寺島 浩行	13
「揺らぎ」オンラインディスカッションを受けて	石川 麻乃	15
連載エッセイ(29)「鬼太郎」と「攻殻機動隊」のなかの幽霊 - 心身二元論の行方	倉谷 滋	17

新学術オンライン議論シリーズ: 表現型揺らぎをめぐって

古澤 力(理化学研究所/東京大学)

入江 直樹(東京大学)

本新学術領域では、進化学全体における普遍的な原理を探求するため、分子から生態系レベルにわたる多様な生物材料と、多様な進化現象(遺伝子発現プロファイル進化、環境耐性進化、発生進化、共生進化等)を対象として、比較的短い時間スケールで観察される「表現型揺らぎ」と長期的な時間スケールで起こる表現型進化の制約や方向性との関係を明らかにしようとしています。このときに問題となるのは、様々に異なる進化現象から、どのようにして共通の理解が得られるかという点です。分子から生態系といった異なる階層の現象から普遍的な性質を切り出すためには、適切な抽象化が必要となります。つまり、異なる階層間で何が本質的に同じと捉えてよく、何が無視してよい差異であるのかを定義する必要があります。こうした定義を曖昧としたままに、何となくのアナロジーで議論を進めることの危険性を、多くの領域メンバーや評価委員の先生方が感じているかと思います。そこで今回、古澤・入江が主導して、公募班代表と少人数で議論をする場を設け、表現型揺らぎと進化過程に関してどのような理解に至り得るかを議論しました。本ニューズレターでは、それぞれのオンライン議論の内容を紹介します。

それぞれの班代表との議論の詳細については、次ページ以降を参照して下さい。以下、それらの議論で俎上に上がったトピックについて、現状での理解を簡単に述べます。まずは本領域における「表現型揺らぎ」の定義についてです。揺らぎという用語自体は集団遺伝学で用いられる場合もありますが、ここでは表現型揺らぎを遺伝的な多様性が原因で生じる個体間の表現型の変動ではなく、遺伝的変異に起因しない個体間や時間軸上の表現型の変動として用います。Standing variation による表現型の分散はこの定義に含まれませんが、Fluctuating asymmetry は含みます。また、同一環境での表現型揺らぎとは異なりますが、環境変動に起因する表現型の変化(Reaction norm)は含むとします。この表現型揺らぎの大きさと、進化的な応答の大きさに正の相関関係があることが理論・シミュレーションからの予測であり、実験的な検証が進んでいます。

ここで一つ注意すべき点は、表現型の揺らぎをどのようにして計測するかという問題です。実験的に計測している量が、注目している表現型の揺らぎを適切に反映しているかを注意深く検証する必要があります。例えば、個々の細胞レベルでの遺伝子発現量の揺らぎは、多数の細胞集団から抽出した RNA やタンパク質の平均値から定量することは出来ません。また、定量的な実験には誤差が避けられませんが、その誤差の大きさが着目する表現型揺らぎよりも大きい場合には、その後の解析には大きな困難が伴います。入江班が行っている、実験誤差と表現型揺らぎの定量的な評価が参考になるかと思います。揺らいだ量を解析するからこそ、実験系の揺らぎに適切に対応をしなければならず、そのための実験デザインが必要となります。

本領域では分子から動植物・あるいは生態系まで様々な研究対象を扱っていますが、その全ての研究で上の定義に従う表現型揺らぎを定量することは難しいと考えています。一方で、表現型揺らぎの解析を直接的に行わなくても、発生拘束や進化の方向性に関与するメカニズムを明らかにする研究は、進化現象の理解を通じて領域全体に貢献することになるでしょう。揺らぎという用語の使用範囲を恣意的に拡張し、領域の方向性に無理に合致させる必要はありません。その研究から何を主張すべきなのか、それが領域の研究のどの部分と関連するかを個別に考えてく必要があるかと思えます。

時間の関係で全ての計画班・公募班とこのような議論が出来ていませんが、今後もこの活動を継続し、領域内における議論の土台を構築していくことを計画しています。領域会議や理論情報交換会、若手ワークショップなどで繰り返しこのような議論が行われ、今後も行われていくこととなりますが、領域メンバーの協力をお願いしたいと考えています。最後になりますが、年末の忙しい時期にオンラインでの議論とニュースレターへの記事執筆に協力して頂いた班代表の皆様に感謝します。

表現型の「揺らぎ」の定義と定量

公募研究

「多次元形質空間におけるマルチレベルな表現型のゆらぎの統合と進化の方向性の予測」

研究代表者 高橋 佑磨(千葉大学)

個々の形質は互いに独立していることはなく、遺伝子ネットワークの共有や遺伝子の多面発現効果、遺伝子間のゲノム上での物理的な連鎖などのさまざまな原因によって互いに相関する。例えば形質 A が大きい場合、形質 B も大きくなるというような状況である。このような形質間の遺伝相関を生じさせる遺伝的基盤は、形質 A と B の値の自由な組み合わせを制約する。その結果、発現可能な表現型の組み合わせの中で standing variation が形成され、その変異を利用して選択に応答することになるので、小進化や大進化(系統の多様化)の方向性が制約される可能性がある。一方で、遺伝相関は、多次元の形質空間内で集団内の standing variation の方向性を制約したり、表現型可塑性や発生ノイズなどの非遺伝的な表現型のばらつきの方向性をも決定づける可能性がある。だとすれば、発生ノイズなどのミクロな表現型変異と種間差のようなマクロな表現型のばらつき方には何らかの方向性があり、互いに関連していると考えられる。すなわち、少し言いすぎかもしれないが、発生ノイズの生じやすさが、進化の方向性をある程度決めているとも言えるかもしれない。少し控えめにいえば、発生ノイズの方向性から進化の方向性が予測できる可能性があるのである。これが、私たちが現在遂行中の研究プロジェクトの主軸となるアイデアである。このアイデアと本新学術領域のキーワードである「揺らぎ」や「進化の方向性」は非常に相性がよかった。このような背景から、私たちの研究課題は、「多次元形質空間におけるマルチレベルな表現型の揺らぎの統合と進化の方向性の予測」となった。このとき、各レベル(種間レベル、種内レベル、遺伝子型内レベルなど)見られる表現型のばらつきは、種多様性、種内変異などの伝統的な呼び方があることは認識しつつも、キラキラワードの「揺らぎ」で一緒くたにして、見栄えする賑やかなタイトルをこさえようとしたのである。それが功を奏したか(はわからないが)、幸運にも採択していただいたわけである。が、一方で、それがきっかけで古澤さんと入江さんに“呼び出された”のである。援護射撃が必要と考えた私は、連携研究者のルンド大学の坪井さんにも参加してもらい(現地時間の5時にもかかわらず!)、古澤さん、入江さん、坪井さん、そして私の4人での11月にウェブミーティングが開催されることとなった。前置きが長くなったが、これが事の顛末である。

さて、このミーティングは私や私の研究プロジェクトにとって非常に多くの収穫があった。一方で、ここで議論された内容が、本領域に関わる多様な研究分野の方々が共通理解をもって有益な議論する上でとても大切な内容を含んでいたと考えるので、ここに記録として残し、共有しておきたい。本ミーティングでは、主に3つのことについて話し合われた。そのうちひとつは私たちの研究の今後の発展の方向性に関する具体的な話題であったので割愛するとし、読者の方々とも関連が大きい以下のより一般的な2つの話題について報告しておきたい。

1. 「揺らぎ」の定義について

この言葉については、もともと厳密な定義がないことをいいことに、私は、「あらゆる表現型のばらつき」に対して使ってしまったが、やはりその状況はあまり好ましくはないという意見を頂いた。私も最初の領域会議に参加したときに、「揺らぎ」の意味が多様に使われていることに、たしかに、違和感を覚えていた。種間の表現型の差異に対して「揺らぎ」を使ったり(私など)、種内の遺伝的変異(standing variation)を「揺らぎ」と呼んでみたり、ある遺伝子の機能的な不確実性を「揺らぎ」と呼んだり、分子の不安定性を「揺らぎ」と呼んだり、はたまた表現型可塑性を「揺らぎ」と呼んだり、発生ノイズを揺らぎと呼んだりしていたのだ。今回のミーティングでは、まず、これらの「表現型のばらつき」のうちどれが「本領域が注目する『揺らぎ』」なのか、というところから議論が始まった。なお、今回の議論では、分子の不安定性や生態系における揺らぎなどの現象とのすり合わせは諦め、「表現型レベルの揺らぎ」の共通の理解を模索した。

まず、「揺らぎ」の候補となる「ばらつき」を列举し、大きい順に並べてみた。この点にはあまり異論はなく、種間の形質のばらつき>種内集団間の形質のばらつき>集団内の遺伝的な形質のばらつき $\geq$ 表現型可塑性による環境間での形質のばらつき>発生ノイズによる形質のばらつきの順である。問題はどこで線引きをするかということであるが、4人の中での共通の理解は、種間での表現型変異や種内の集団間の表現型変異、集団内の遺伝的な表現型変異に対して「揺らぎ」という言葉は不適切であるというものであった。これらは、揺らぎと明確に区別する意味で、それぞれ、種多様性(種間変異)、種内変異(集団間変異や集団内変異、standing variation)などと呼ぶべきであろう。では、環境応答としての形質変化、すなわち、表現型可塑性による形質のばらつきは「揺らぎ」と呼べるだろうか。私は、「揺らぎ」=「生物学的なノイズ」という意識があったので、表現型可塑性、すなわち環境応答は、「揺らぎ」ではないと考えた。一方で、異なる意見も出された。理由はいくつかある。1つ目は、遺伝的か非遺伝的かで線引きするのが妥当ではないかというものであった。これは一理ある。2つ目は、少々消極的な理由であるが、「発生ノイズ」だけを「揺らぎ」としてしまうと「揺らぎ」がカバーする範囲が狭すぎて、これをテーマにした研究をしている構成員が少なくなってしまうというもの。これも一理ある。あまりに狭い定義にするのも実用的ではない。3つ目は、技術的問題が絡む。すなわち、発生ノイズを測定することが難しいという問題だ。生物学の研究をしている以上、測定値にはそれなりに大きな測定誤差が含まれる。また、実験者が気づいていないわずかな環境変化が形質のばらつきに関わっていることを否定することは難しい。そのため、発生ノイズとその他の技術的ノイズを切り分けることができず、発生ノイズを評価することが一般に難しい。評価できないのであれば、概念的に定義できても、役に立たない。このような議論が続き、最終的には、遺伝的か非遺伝的かで、「変異」と「揺らぎ」を区別するのが良いという暫定的な結論に達した。もちろん、なかば折衷案のように決まった線引きとも言われかねないので、さまざまな意見があろうかと思う。「環境応答としての表現型のばらつき」+「発生ノイズ」を「広義の揺らぎ」とし、発生ノイズだけを「狭義の揺らぎ」とするのが妥当かもしれない。いずれにせよ、当該領域の価値を最大限にアピールし、かつ、正しい理論的な発展をもたらすための定義については、引き続き議論されるべきであると感じた。

2. 「揺らぎ」の定量について

広義の揺らぎについては、表現型可塑性を含むということであれば、さまざまな環境に曝露し、発現される表現型(形態や遺伝子発現など)を測定・比較してあげればよい。一方、狭義の揺らぎを実験的に評価するのは簡単ではない。無論、考え方としては、ある特定の遺伝子型のクローン個体を用いて、一定の環境下で発生させ、そこで得られた個体の表現型のばらつきを評価すればよいのであるがここには実験的な困難が2点ある。まずは、一般的な有性生殖の種では、近交系統を創設したとしても、遺伝的変異を完全に除去するのは難しい。さらに、一定の環境で飼育したとしても、飼育者のハンドリングノイズや未知の環境要因が飼育容器間で異なったり、飼育時期によって個体ごとに少しずつ異なる環境を経験してしまう可能性を棄却するのが難しいためである。要するに、遺伝の影響でも環境の影響でもない表現型のばらつきが存在することを示すことが非常に難しい。そのような中、私たちは生物の左右性に着目し、発生ノイズによる狭義の表現型の「揺らぎ」を定量することを試みている。生物は完全な左右対称であることは少ない。このとき、左右は完全に同じ遺伝子型であると同時に、卵の時期から死亡するまでつねに同じ環境に曝されたと考えられるので、左右性の乱れは、ランダムな発生ノイズに由来する可能性が高いと言える。一見これは、正解のように感じていたが、議論を重ねていくうちにそうでないこともわかってきた。すなわち、いくら同じ個体だからといっても左と右が経験してきたものが同じ保証はまったくないのである。障害物や他個体と接触した回数は、左右で違うかもしれない。こうなると、もうきりがない。発生ノイズを検出することは不可能のようにも思えてくる。とはいえ、左右で見られる発生上の非対称性は、考えうる限りもっと発生ノイズに近い測定値を得られているとも考えられる。今後、揺らぎの「定義」とともに、揺らぎの「評価方法」についても議論が続けられることを期待する。今回、このような議論の機会を用意してくださった古澤さんと入江さんに心から感謝いたします。

古澤先生、入江先生とのディスカッション

公募研究

「仙椎-後肢ユニットの形態の制約と個体間の位置のゆらぎを生み出す分子機構の解明」

研究代表者 鈴木 孝幸(名古屋大学)

11/9 に計画班の古澤先生、入江先生と新学術領域の研究内容についてのディスカッションを行った。最初に本新学術領域の共通のテーマである「揺らぎ」について話し合った。本新学術領域の中で参加者が着目している「揺らぎ」について様々なレベルの揺らぎがあるが、私の注目している揺らぎは、マクロな形態の揺らぎと、遺伝子発現の揺らぎであることを説明した。具体的には私の研究では四肢動物の後肢が接続する脊椎骨である仙椎の位置が、同じ種内においても、その位置が体の前後軸上に沿って異なる個体が存在するという例を提示した。ヒトでは5つの腰椎の後方に第一仙椎があるが、4つ、または6つの腰椎を持つヒトも存在する。ヘビは後肢が退化しているが仙椎が存在する。シマヘビでは仙椎の位置が個体間で最大14脊椎骨分異なる個体が存在する。これは共通の発生プログラムによって形成されているはずであるが、この仙椎の位置の個体間の「揺らぎ」を生み出すメカニズムを解明することが本研究の目的であり、これが私の研究で注目している、表現型の「揺らぎ」と言っているものであることを説明した。脊椎骨の形が決定されるメカニズムとしては、これまで転写因子群であるHox遺伝子群がそれぞれの脊椎骨が形成される領域に特異的に発現することで、種を越えて共通な、それぞれの脊椎骨の個性(場所)が決定される(Burke et al., 1995)とされて来た。この知見を踏まえ、次に私の研究で明らかにしたニワトリ胚における腰椎と仙椎の境界を決める遺伝子候補としての、Hoxa11遺伝子の発現を誘導するGDF11の作用について議論を行った。GDF11はニワトリ胚において将来の腰椎と仙椎の境界に発現するHoxa11遺伝子の発現に先立って、前体節中胚葉の後端で発現する。このことからGdf11の発現量が個体間でゆらぐことで、表現型としてHoxa11遺伝子の発現領域の揺らぎに起因する、仙椎の位置の個体間の「揺らぎ」が生み出されるという仮説を説明した。ディスカッションでは、Gdf11の発現量の個体間の違いを「揺らぎ」と私が定義をしていたが、その定量的な測定方法についてsuggestionを頂いた。遺伝子発現の「揺らぎ」を定量するためには、まずは今回対象とするGdf11遺伝子の発現量と同等な「ゆらがらない」遺伝子を探索し、その遺伝子の発現量と比較する必要があるとの意見を頂いた。そうしないと、遺伝子の発現量自体が異なるもの同士を比べても個体間で遺伝子発現量の違いを議論することは難しいであろうという、統一見解を得た。この議論の方向性は、本新学術領域で遺伝子発現の「揺らぎ」の定量化を試みている他の班員の研究にも役に立つ内容であると思う。また、これまで私は将来の脊椎骨の領域となる細胞を生み出す前体節中胚葉と言う細胞群(原腸陥入後の中胚葉の一部)を単離し、そこに発現する遺伝子の発現量を定量していたが、体の前後軸形成過程において、Gdf11の発現の揺らぎは体の後側形成のシステムの一部であるため、それに含まれない前側の脊椎骨の形成に関わる遺伝子と発現量を比較する必要性もご指摘頂いた。このようなディスカッションを通して、私は本新学術領域全体の共通課題とも言える、個体間の遺伝子発現の「揺らぎ」を正確に定量化するための方法論

について有意義な意見交換を行い、今後の定量 PCR を用いた遺伝子発現の「揺らぎ」の定量的な測定方法についての実験の方向性を見出すことが出来た。

さらに、今回表現型としての個体間に仙椎の位置の「揺らぎ」が生み出されるメカニズムとして、Hoxa11 の発現を誘導するための Gdf11 遺伝子の発現量の揺らぎと、その GDF11 のシグナルを受け取る細胞側のシグナル伝達の揺らぎがあり、それが Hoxa11 遺伝子の発現量の揺らぎを生み出していると言う 2 つの着目点を提示した。ディスカッションの中では、これらの実際の 2 つの「揺らぎ」を解析して行くことも重要だが、この研究を通して『発現が揺らぎ易い遺伝子は、進化しやすいか(進化に関わりやすいか)』と言えるかという、一般論化することへも常に考えをめぐらせておくべきとの suggestion を頂いた。脊椎動物では、遺伝子の発現は複数のエンハンサーによって協調的に制御されていることが近年の研究により次々と明らかになっている。このような種間の遺伝子発現制御機構の共通性と違いを解析して行くことで、種間の遺伝子発現のタイミングや領域が異なるメカニズムや、表現型の違いが生み出された進化の仕組みが少しずつ明らかになっていくのではないかと思った。実際に実験を行っている、目の前の実験を成功させることに意識が行きがちであるが、実際に得られたデータから正確に何が言えるのか、言えないのか、また進化に関わるどの局面を反映した結果であるのかを大局的に見る必要性も議論して頂き、大変有意義なディスカッションとなった。生物を研究している以上、注目している現象になんらかの「揺らぎ」が生じているのはどの現象にも見られることだと思う。進化の方向性を考えるためには、その揺らぎの個体間又は種間の違いを定量的に調べることは必須であり、その違いを生み出すシステム上の制約と許容されるルーズさのメカニズムを解明することが本領域の推進に必要であると感じた。本新学術領域の私の研究内容を親身になって議論して頂いた古澤先生、入江先生に深く感謝したい。

新学術オンラインディスカッションをして

公募研究「神経ネットワークにおける揺らぎと進化的保存性の関係」

研究代表者 石川 由希(名古屋大学)

この度は新学術ニュースレターを寄稿する機会をいただき、ありがとうございました。実は、私は先日までこのオンラインディスカッションが公募班全員の義務であると信じ切っており、先日の領域会議でこれが一部の班でしか行われていないことを初めて知って大変驚くと同時に、なぜ自分が選ばれたのか、なにか怒られるようなことをしたのかと少し複雑な気分になりました。もちろんオンラインディスカッションそのものはとても有意義であり、領域研究をどのように進めたら良いのかを改めて考えるととても良い機会になりました。そこでここでは、私の研究内容を簡単にご紹介し、当日議論したことや考えたことを共有させていただきます。

本領域における私の研究は、ショウジョウバエのフェロモン選好性の進化に揺らぎがどのように寄与しているのかを検証することです。モデル生物であるキイロショウジョウバエ(キイロ)のオスは、メスの持つ体表フェロモン 7,11-HD (7,11-heptacosadiene) によって求愛活性を上昇させますが、姉妹種オナジショウジョウバエ(オナジ)のオスは、7,11-HD によって求愛活性を劇的に低下させます。この2種の生息域は重複しており、また F1 雑種は不妊であることから、このフェロモン選好性の種間差は生殖隔離に大きく寄与すると考えられています。では、このフェロモン選好性の逆転はどのような神経機構によって成立したのでしょうか？私はこれまで、オナジ型のフェロモン選好性を示す F1 雑種オスを用いてこの謎に取り組み、雑種において特定の神経接続が喪失している可能性を見出しました。キイロでこれまで調べられてきたフェロモン選好性をコードする神経回路をあわせて考えると、この神経接続の喪失がフェロモン選好性の逆転に寄与している可能性が高いと考えられます。一方、神経接続の強さは経験や学習によって可塑的に変化することが知られています。神経接続の進化的喪失の背景には、この神経接続の可塑性の強さ(揺らぎやすさ)がなにか関連しているかもしれない、というのが私の研究のアイディアです。

さて、古澤さん、入江さんとのオンラインディスカッションは 11 月 16 日朝 10 時から始まりました。「古澤さんと入江さんが全員を担当しているんですか？」「そうだよー」「大変ですねえ」「いやーまああ…」といったやり取りで始まったと記憶しています(実はこの「全員」が指す意味が、私と古澤さんたちで全く違ったわけですが…会話というのは難しいものですね)。最初の話題は『石川班の領域研究において揺らぎとはなにか、どのようにして定量するのか』ということでした。私の扱っている現象では、神経接続は GRASP 法(GFP Reconstitution Across Synaptic Partners, シナプス間 GFP 再構成法)によって可視化されるため、この GFP シグナルのばらつきを揺らぎの指標として扱おうというのが私の計画です。サンプルごとの染色状態の僅かなブレなどを補正する定量法も既に確立できましたが、一方、本当に GRASP 法で揺らぎが捉えられるのかはまだわかりません。GRASP 法で捉えられなかった場合は、光遺伝学と Ca²⁺イメージングを組み合わせる方法を検討するつもりです。そのあたりについては、古澤さんと入江さんからそれなりに納得が得られたのでホッとしました。また、神経接続の揺らぎと行動の揺らぎの対応関係についても話題に上がり

ました。行動を長く扱っていると見慣れてしまっていますが、行動の表現型はばらつきが多い傾向があります。このばらつきは、観察対象の入力刺激の変動等によって生じる一過性のものと、観察対象の神経回路(神経接続)の個体差(=本研究で扱いたい揺らぎ)が混ざって表出したものです。今後揺らぎを扱う上では、前者と後者をうまく分離する方法が必要になるかもしれません。現状考えられるのは、行動と神経接続のデータを単一個体からセットで取り出すことであり、これは根性があればなんとかできそうです。また入力刺激についてもより均一に与えられるよう実験系を見直してみたいと思います。さらに、入江さんからは『揺らぎ』という言葉の使い方を統一したい」という問題提起がありました。私は博士課程で表現型可塑性に関する研究をしていたので、そのあたりはまあさすがに理解していますよと言いたかったのですが、前々回の領域会議で最後に話した訪花性ショウジョウバエの話題で『揺らぎ』の誤用をしていたことを指摘されてしまいました。確かにそのときのスライドには「地域集団の違い→揺らぎの研究ができる?」と書かれており、ゲノムに基づかない変動／ばらつきのことを指す、本領域の『揺らぎ』の定義とは合っていません。『揺らぎ』の定義は理解していたはずだったのですが、最近得られた研究成果をみんなと共有したいという欲求と、揺らぎと結び付けないと発表してはいけないんじゃないかという強迫(?)観念が相まって誤用に至ったと思われます。このような指摘のあとだったので、前回の領域会議では他班の『揺らぎ』の使い方特に注意が向いてしまいました(これが入江さんの戦略だったのかもしれませんが)。今年度からスタートした公募班のメンバーはこのような用語の使い方に慣れていないため、どこかで機会を設けて改めて議論したほうが良いのかもしれないな、と感じました。これ以外にも、今の仕事をどのようにまとめたいかや、どこが売りにしたいかなど、新学術領域とは少し離れた、しかし重要なことについても率直な議論ができ、とても楽しかったです。特に私は、神経科学の研究室に属しており、進化生物学の議論を出来る機会が少ないため、エスタブリッシュされた進化生物学者が2人もがっちり自分のためだけに議論してくれることは本当にありがたく、これだけでも領域に入れた意味があったなと思えました。

今後このような機会を全班に拡大するの否かは総括班のキャパシティ次第だと思いますが、ディスカッションに呼ばれた方はぜひ怖がらず腕まくりをして楽しく議論していただきたいと思います。この度はありがとうございました！

細胞ターンオーバーを介した表現型制約とその分子基盤の解明

公募研究「細胞ターンオーバーを介した表現型制約とその分子基盤の解明」

研究代表者 大澤 志津江（名古屋大学）

多細胞生物の発生は、様々な攪乱のもとでも何とかそのプロセスを正常に維持しながら最終的には決まった形・大きさ・機能をもつ組織／器官を形作る、きわめてロバストなシステムです。ここで、発生中の生体が外的・内的攪乱に対処する際、発生のプロセスに遅れが生じることがあります。たとえば、ショウジョウバエ幼虫期において、成虫原基に損傷が起こると組織はそれを直ちに修復しますが、その間、幼虫期の発生が一時的に中断されます。個体発生は時間軸に沿った精密かつ計画的な形作りのプロセスであり、その時系列の異常は重大な破綻を引き起こし、表現型の揺らぎを生み出す可能性があります。すなわち、生体は発生遅延を何らかの機構で補正して正常発生を実現する仕組みを備えていると考えられますが、その実体はいまだ不明です。

私たちは、幼虫期に顕著な発生遅延を示すショウジョウバエ変異体 Minute (※リボソームタンパク質遺伝子の機能欠損変異をヘテロに持つ一連の変異体の総称) を起点とした解析を行い、(1) 幼虫期のショウジョウバエが発生遅延を起こした際に、その遅延を補正する細胞集団挙動「細胞ターンオーバー」が翅原基で誘発されること、および、(2) この細胞ターンオーバーを遺伝学的に抑制すると、翅脈パターンや形態異常などの種々の表現型が成虫翅に出現することを見いだしました。これらの事実は、細胞ターンオーバー機構の偶発的なエラーが多様な表現型を出現させ得る可能性を示唆しています。そこで本研究領域では、表現型制約を行うこの未知の細胞集団挙動の分子基盤とその役割を解析し、さらにはその破綻によって「表現型の揺らぎ」が引き起こされる仕組みを明らかにすることを目指しています。

では具体的に、細胞集団挙動による表現型制約と、その破綻による表現型の揺らぎの仕組みを理解していくにはどのようなアプローチを取り得るのか、私たちは RNA-seq 解析および RNAi スクリーニングにより、それらを担う遺伝子群を単離・同定する試みを開始していました。そうした中で 10 月下旬に、古澤力先生よりメールでご連絡をいただき、古澤先生・入江先生に Zoom で議論いただくという、とても貴重な機会を頂きました。議論の過程で、細胞ターンオーバーを介した表現型制約の詳細な記述・定量的解析を行う、具体的には、細胞ターンオーバーの異常により出現する“隠れた”表現型の特徴づけを行い、またパターン形成に関わる遺伝子群の乱れを詳細に解析することで数理モデルを構築し、細胞ターンオーバーが表現型の揺らぎを“ならす”仕組みを明らかにする、あるいは、細胞ターンオーバーが表現型の“capacitor”として機能することを実験的に示すという興味深いアプローチを議論の過程でご提案いただきました。また、本領域における「表現型の揺らぎ」の定義が、議論を通じて明確となったことも、大きな収穫の1つでした。今回の議論を踏まえ、私たちが着目する細胞集団挙動の理解を多角的に深めていくことで、本領域の達成目標である、「進化における表現型の制約や方向性の理解」に少しでも貢献していきたいと思えます。

オンラインディスカッションの報告

公募研究

「酸素で生じた「ゆらぎ」が「パターン形成プログラム」へと進化した分子基盤の解明」

研究代表者 田中 幹子(東京工業大学)

2020年12月14日、15日に開催された領域会議に先立ち、本領域で提案させて頂いた公募研究の内容について、計画研究班の入江直樹氏と古澤力氏と議論させて頂く機会がありましたので、ご報告させて頂きます。議論は、11月25日にオンラインで開催され、私の研究内容の説明に加え、私の研究課題で揺らぎと定義している現象についての意見交換となりました。本領域では、表現型の揺らぎと進化における制約と方向性を説明する進化理論を構築することを目標としていますので、それぞれの班での揺らぎの定義を正確に把握した上で、成果をカテゴライズしていくことは、統一理論を構築するために必要な作業かと思われます。

私の班では、羊膜類の四肢の形成過程で指間の組織を細胞死によって分離する指間細胞死の進化プロセスの解明を目的として研究を行っています。指間細胞死は羊膜類ではパターン形成に不可欠な発生現象ですが、両生類の場合、指の分離は、それぞれの指原基が増殖することによって行われます。しかし、我々は、前回の公募研究において、両生類の肢芽においても、高濃度酸素環境に曝されると指間の組織で細胞死が起こることを見出しました(Cordeiro et al., 2019 Dev Cell)。このことは、両生類の指間には元々細胞死が生じうる分子的な背景は揃っており、酸化ストレスに応答した可塑的变化として生じた指間細胞死が、羊膜類では四肢のパターン形成に不可欠な発生プログラムへと進化したことを示唆しています。両生類の肢芽では、酸素濃度に応じて細胞死が可塑的に起こることから、私の班では、可塑的变化を揺らぎと定義していました。領域内の研究の主流は、転写産物量の揺らぎが表現型進化を導きうるのかを検討するものが多いように思います。一方、本研究で扱うストレス応答反応は、ストレスに応答したタンパク質の質的变化の段階が多く含まれており、転写産物量の揺らぎが見られるのは、下流のターゲットになると予想されます。また、羊膜類における指間細胞死がパターン形成に不可欠となっているのは、それぞれ独立に生じたと思われる指-指間パターン形成を行う Bmp シグナル経路がストレス応答反応を促す ROS を伴う経路を何らかの形で制御するようになったためであることが考えられます(Cordeiro et al., 2019)。そのため、少なくとも本研究課題では、細胞死が四肢のパターン形成に組み込まれるように進化したプロセスを理解するために明らかにすべき点は、下流のターゲットの転写量の揺らぎではなく、(その転写の揺らぎを生じさせている)ストレス応答シグナル経路の上流と考えています。オンラインディスカッションでは、入江氏と古澤氏から、両生類で見られる細胞死は、ストレス応答反応であるので、揺らぎはストレス応答反応と定義するのが正確ではないかとご提案頂きました。両生類の細胞死がストレス応答反応であるのはご指摘の通りであることから、議論中はそれで問題ないかと感じていました。しかし、班会議の準備をしている段階で、両生類での細胞死をストレス応答と定義すると、最初から両生類の細胞死はストレス応答経路(ROS 経路)だけの制御を受けていて、パターン形成経路(Bmp 経路)が関係ないとわかっているかのような印象

を受けることに気づきました。そこで、今後は、両生類でみられる細胞死については、ゲノム変化を伴わずに世代内でおこる形態変化の定義である可塑的变化という言葉を使用することにしました。今回議論させて頂いたことで、本研究課題における揺らぎの定義を明確とすることができました。本研究を遂行することにより、遺伝子の転写レベルの揺らぎを生み出す上流経路の制御機構の変化も進化の原動力の一つのなりうることを示すことで、本領域の目指す進化理論の構築に貢献したいと思います。

腸内感染と運動性の揺らぎが導く細菌病原性分泌装置への進化の実験的説明

公募研究「腸内感染と運動性の揺らぎが導く細菌病原性分泌装置への進化の実験的説明」

研究代表者 寺島 浩行(名古屋大学)

【領域での研究】

多くの細菌は環境中に存在するので、例えばヒトの腸内に入ってきて、日和見細菌として外に排出される。しかしながら、病原性分泌装置を持つ細菌は、宿主細胞に対して病原性を発揮し、感染症を引き起こす。では、この病原性分泌装置は、どのような進化を経て獲得されたのか？病原性分泌装置の一つである III 型分泌装置は、病原性大腸菌 O-157 やサルモネラ菌などの腸管病原性細菌が持っている。細胞膜上のタンパク質分泌複合体が、自分自身の細胞外注射器構造を構築するために構成タンパク質を細胞外へと分泌する。構造構築後、宿主細胞表面に穴をあけ、細菌側から宿主細胞内へと病原性タンパク質を送り込む。この III 型分泌装置と起源を同一とされているのが細菌べん毛である。細菌べん毛は、細胞外に長く伸びた線維状のタンパク質複合体であり、運動器官として機能する。両者には、構成タンパク質の立体構造・ストイキオメトリーやアミノ酸配列に相同性があり、同一起源から発生したと考えられている。私は、細菌べん毛が細菌界に広く分布していることに対して、III 型分泌装置は哺乳類などの高等生物に対しての病原性に関わっていることから、べん毛から進化し病原性分泌装置としての新規形質を獲得したものと推測した。

本研究領域では、べん毛から病原性タンパク質を分泌させることによって、べん毛の機能を III 型分泌装置へと進化させることを目指している。また、それによって、べん毛から III 型分泌装置への形態進化・機能進化を明らかにする。

【議論】

病原性の発生の仕組みについて：私の研究においては、病原性を減弱させた変異体をマウスへ継続感染させることによって、病原性を回復する変異体の取得を目指している。しかしながら、マウスに定着できるようになった菌は、むしろ病原性が低下している可能性があることを指摘された。私は、宿主への定着は感染においてポジティブに働く場合とネガティブに働く場合があると考えている。宿主細胞への付着・定着・拡散は、接触によって病原性を発揮する III 型分泌装置の機能発揮の前提条件である。また、べん毛による運動性が感染に重要なことは多数の細菌で報告されており、べん毛による運動性によって宿主への付着・定着・拡散が促進されている。そのため、病原性を減弱させた変異体は、腸内細菌叢との競争において排除されてしまうが、継続感染実験により、より定着できる・より病原性を発揮できる変異体では、べん毛による運動性や病原性タンパク質の分泌に影響を与えるような変化が生じていると期待される。これによって、病原性が生じる仕組みについて議論するとともに、べん毛が III 型分泌装置のように機能するような変異体の取得を目指したい。

III 型分泌装置の起源について：III 型分泌装置の進化過程について、私は、べん毛が変化していった結果だと考えている。しかしながら、その経路が直接的なものか、べん毛機能を喪失した遺伝子群からの水平伝播であるかは不明である。たとえば、共生細菌などで運動器官としての機能を喪失したべん毛遺伝子群を獲得したことで III 型分泌装置へ変化したことは十分あり得る。また、相同性の観点からは、細胞膜上の輸送装置本体は非常によく似ているが、針構造の部分については、他の分泌装置とよく似た部分も存在するなど、必ずしも起源を推定できているわけではない。このような点から、機能喪失したべん毛を中心に新しく再構築された可能性もある。しかしながら、まずはべん毛機能と病原性の回復を指標に、III 型分泌装置の進化過程と病原性の獲得について研究を進めたい。

【今後の研究について】

マウスへの継続的感染実験を行う。感染力を失った III 型分泌装置欠損変異体がマウス腸内で定着するような変異体や、病原性タンパク質がべん毛から分泌され細胞障害を起こす様な変異体の取得を目指す。また、別アプローチとして、線虫を用いた感染実験系の構築を行う。線虫はライフスパンの短い動物であり、病原性細菌の感染実験などにも使われる。そこで、線虫への摂餌による感染を行い、進化実験を行う。また、進化には時間がかかるので、変異原処理による突然変異導入も検討する。最後に、病原性が回復する・宿主に定着しやすくなるなどの取得変異体の変異位置の同定とメカニズムを明らかにし、病原性が生じる仕組みと、べん毛から III 型分泌装置への進化過程に必要な変化を推定する。

「揺らぎ」オンラインディスカッションを受けて

公募研究「トランスクリプトームのゆらぎがもたらす新規ニッチへの進出能力」

研究代表者 石川 麻乃(国立遺伝学研究所)

まず初めに、オンラインディスカッションの機会を作っていただいた古澤さん、入江さんに深く御礼申し上げます。お二人が明るく気さくで率直な雰囲気を作ってくださったお陰で、久しぶりに学会発表後の昼休みのような自由で濃密な時間を過ごすことができました。ありがとうございました。ニュースレターに寄稿するよう依頼をいただきましたので、議論の内容についてご報告いたします。

「ゆらぐか、ゆらがないか？」今期、幸運にも本領域に公募班として採択していただく前から、この話題が領域内で盛んになされていることは、聞き及んでいました。以前から本領域に参加していた研究仲間たちが、領域と全く関係のない飲み会にまでこの話題を持ち込んで、「ゆらぐ！」「ゆらがない！！」と大激論を交わしていたからです。10月末に古澤さんから「揺らぎの概念を整理したい」とメールをいただいた時には、私にもついにこの時が来たか…と怖いような嬉しいような複雑な気持ちになりました。

一方で、揺らぎの概念に関して言えば、それ自体に、領域と私の研究課題の間でそこまで混乱があるとは考えていませんでした。私は元々、アブラムシという表現型可塑性の権化のような昆虫を扱って学位を取得したため、本領域の本分である”揺らぎ”や可塑性と、遺伝的な多型との違いやそれらの関係性についてよく議論してきましたし、そこから生まれた問題意識が本領域での私の研究課題のコアでもあるからです。アブラムシはクローン繁殖をする代表的な昆虫で、同じ遺伝型から環境に応じていくつもの表現型を産出します。この環境条件と表現型とをつなぐ運命決定機構として、どんな遺伝子やどんなホルモンが機能しているのかを解析するのが私の学位論文の主なテーマでした。一方で、博士課程の後半でより興味をそそられたのは、可塑性や揺らぎ自体がどんな分子遺伝機構により進化するのかと、それらが自然界において多様性の創出をどう制約し、方向づけるのか、でした。そこで本領域では、この問題意識に根ざし、異なる可塑性／揺らぎを持つトゲウオを比べることで、その違いを生むゲノム領域／遺伝的変異を同定し、揺らぎがどのように進化するのか、また、それらが多様性をどう制約し、方向づけるのかを検証するという研究課題を設定しています。異なる揺らぎを生む遺伝基盤を探るためには、揺らぎと遺伝的な多型の関係性を解析する必要があるため、これらを概念的にも解析的にも明確に区別する必要があります。

このため、当日のお二人との議論は、より実質的な、1)揺らぎをどのように定量するか、と、2)どんな揺らぎを定量するか、という話題を中心に展開されました。1)については、12月に開催された領域会議でも集中的に議論された点ですので詳細は割愛しますが、領域内でも最も野生に近いであろう生物種を対象にしているという点、また、世代が長く、ゲノム編集などを用いた解析の際には遺伝的背景を揃えるのに時間がかかるという点からも、揺らぎをきちんと定量できるよう実験

／解析する必要があるということを改めてご指摘いただきました。一方で、12月の領域会議でも紹介しましたが、ディスカッション後に、研究対象とする2つのトゲウオ集団の全ゲノム配列のリシーケンスデータを確認した結果、これら2つの集団のヘテロ接合度の割合はほとんど変わらないことが分かりました。これは、この2つの集団間の揺らぎの違いが単なる遺伝的多様度では説明できないこと、また、この2集団が異なる揺らぎを生むゲノム領域／遺伝的変異を同定する良いモデルであることを改めて示すものだと考えています。2)については、揺らぎが多様性をどう制約し、方向づけるのかを検証するために、具体的にどんな環境刺激に対する揺らぎを定量するのかを議論・確認しました。すでに進めている淡水／海水応答性の eQTL 解析に加え、研究計画の主目的である「揺らぎの差が新規ニッチへの進出能力を規定している」という仮説の検証に向けて、浸透圧、栄養条件、温度、日長条件という4軸に絞ったイトヨのトランスクリプトームの“状態空間”を描くことが一つ目のゴールになるのではないかと一致しました。いずれの話題についても、目先の結果だけに囚われすぎず、大きなビジョンを持って研究を進める具体的な後押しをいただきました。

現在は、オンラインディスカッションの内容を踏まえ、淡水／海水応答性の eQTL 解析や繁殖形質の日長応答性の喪失の遺伝基盤の解析に加えて、複数の淡水環境刺激に対するトランスクリプトーム応答解析によるイトヨの“状態空間”の把握を進めています。オンラインディスカッション前には、早く結果を出さないといけないと気ばかりが焦っていましたが、ディスカッションを経て、今一度研究を俯瞰し、新たな活力を注入していただけた気持ちです。新しいデータが出ましたら、またご相談に乗っていただけたらと思っています。改めて、どうもありがとうございました。

「鬼太郎」と「攻殻機動隊」のなかの幽霊 - 心身二元論の行方

倉谷 滋

「私たちは、似たもの同士だ」

士郎正宗原作『攻殻機動隊』より、人形つかいの台詞

いまさらいほどのことではないが、映画や文学の世界ではやたらと霊魂や、幽霊や、何らかの「精神的存在」が登場する。妖精や天使もそうだし、コリン・ウィルソンによる著作、『精神寄生体』などその最たるものだ。これまで、心身二元論に関しては山のように議論され、科学的立場からは「霊的実在」が否定されているにも拘わらず（例えば、『脳のなかの幽霊』の一読をお勧めする）、それがアニメや映画ではなぜこれほど大手を振ってまかり通っているのか、それ自体文化論的には面白い題材だと思うが、むしろ、自らそういった物語世界の中にあえて飛び込んで考察し、科学的に吟味するのが楽しいのではないかと思う。

■ 鬼太郎の魂

「肉体から魂が取り外せる」という理屈は、古今東西ありとあらゆる説話や物語に用いられた。『君の名は。(2016年、東宝)』もその例外ではない。ここであらかじめ断っておくと、この二元論問題を扱ううえで、私の大好きな水木しげるの妖怪漫画は別扱いにすべきだと思っている。というのも、「妖怪世界」がそもそも「霊体」や「この世とあの世」、「生と死」のような宗教的概念群を前提に成り立っており、さらにそれが水木ワールドにおいては水木氏独特のルールに従って構造化しているように見えるからだ。

確認しておこう。水木作品のいくつかにおいては、鬼太郎はじめとする登場人物の「魂」が口から「ぼわーっ」と抜け出していくシーンが良く描かれる。見たところそれは気体のような物質で、変形は自由自在、空気よりやや軽いらしく、風船やシャボン玉の中にそれを入れると、ふわふわと宙を漂いながら空に登ってゆく。

面白いのは、妖怪「のっぺらぼう」が他人の顔を盗むとき犠牲者に人魂を食わせること

だ。天ぷらにして喰ってしまったあと、犠牲者の口からその人魂が「その者の顔を付けた状態で」やはり「ぼわーっ」と出てくる。結果、犠牲者は顔を失う。つまり、「人魂」には人間のアイデンティティが見出されており、それが「顔」という個々人に独特のパターンに仮託されているのである。ここに、水木マンガ独特の隠喩の作法を見る思いがする。つまり、「顔が人格を現す」ことのメタファーとして「魂」が用いられている。

別のエピソードでは、鬼太郎が船幽霊の魂が入った瓶のふたをとり、魂を解放すると、船幽霊達がもとの人間に戻る。ここでは、「亡者+魂=生きた人間」という関係式が成り立っており、この魂はいわゆる「生氣」とか「霊魂」とおなじ扱いを受けている。これは、物語における古典的な魂の用法に従っている。

さらに、氏のマンガにおいてしばしば現れる「魂が抜ける」状態は、必ずしも死ぬことと同義ではない。たとえば、魂が抜けた鬼太郎は文字通り気の抜けた状態となるだけで、相変わらず彼は立って歩くこともできれば、普通に会話もできる。ただ、確固としたアイデンティティ（自分が何者であるか）や生きる目的、肉親や友人に対する思いやり、そして何より「やる気」が失せているだけのことなのである（「吸血鬼対牛鬼」）。ということは、少なくとも鬼太郎にとって「魂」とは多かれ少なかれ、生理的・物質的基盤を伴った日常的にいう「気」とか栄養ドリンクのようなものと考えた方がよく、これがなければまともに活躍することができない。それは一面、「ポパイ」におけるハウレン草のような役割を与えられている。

また別の例として、鬼太郎シリーズには「陰魔羅鬼（おんもらき）」という困った妖怪が登場するが、こいつはなんと魂と肉体が分離し、それぞれが別々に行動できるのである。人間

や鬼太郎の魂とは、さらに異なった性質を持つわけである。見たところその魂も悪さをするという点では肉体と変わらず、この妖怪に限っては「心身の分離」と言うより「分身の術」を使うというほうが適切かもしれない。事実、陰魔羅鬼との戦いにおいて、鬼多郎たちは魂を先にたき火で焼き殺してしまうが（！）、残された肉体の方が魂を回復すべく、ねずみ男の魂を奪ってしまう。つまり、魂無き肉体も「魂を取り戻そう」という確固たる意思を持ち続けている。ということは、陰魔羅鬼にとって個のアイデンティティは魂だけではなく、肉体にも宿ることになる。ところが、ねずみ男の人格があまりに強烈で意地汚いもので、陰魔羅鬼の肉体はねずみ男に逆に使われてしまう。ここは、肉体に対する「靈魂の優位性」として理解できる。ねずみ男の性格を良く知っている鬼太郎はあっさりと「ねずみ男版陰魔羅鬼」をやっつけ、魂はねずみ男の体に戻る。再び肉体だけになった陰魔羅鬼を鬼太郎たちが捕まえて封印し、戦いが終わる。

以上から分かるように、水木しげるの描写する「魂」には、さまざまな形と属性が付与され、しかもそれはしばしば物質として登場し、それを破壊すらできる。それはいわば、「実体化した魂」とでもいうべきもののなのである。もちろん以下で考察するのは、このような「寓意としての多様な魂」ではなく、心身二元論的な魂や精神についてである。多くの定型的物語における魂は、「機械としての肉体の操縦者」としての機能において、『鉄人28号』における金田正太郎、『マジンガーZ』における兜甲児、『勇者ライディーン』におけるひびき洸のような主人公たちの存在意義とあまり変わらない。つまり、肉体に対する魂の優位性とアイデンティティが、魂には約束されている。

■ 素子の魂？

典型的には例えば、悪い魔女によってカエルその他に変えられてしまった王子様とか王女様が登場する昔話も、心身二元論の哲学に支配されている。同時に、「人間において真に高潔なのはその肉体ではなく、精神なのである」という考え方も同様、幽体離脱に代表されるあらゆる怪談噺もその類いのものであろう。だからこそ、王子様であるところのカエルにキスすると、煙とともに王子様の姿が回復する。そのカエルに宿った精神が王子様のもの

であれば、いかに姿が醜くともキスできるというのが、二元論に基づくこの手の話の教えであるようだ。「美しいから愛するのか、それとも愛するからこそ美しいのか」のような、分かったような物言いを私は好まないが、ここで語られる「愛」が、文字通り肉体から遊離し、生物学的足場を失った二元論的概念としての、文字通り「空虚な愛」だと気づかねばならない。果たして愛は本当にそんなものであってよいのか。

これと似た設定は、かなりハードなSFにも現れる。例えば、士郎正宗の代表作、『攻殻機動隊』がまさにそれだ。そして、上に述べた肉体不在の「愛」について、その主人公はまさに哲学的レベルで悩む。ちなみに私は、この作品は漫画もアニメも大好きだ。何度見ても飽きない。この話はある意味、「人間の存在はどこまで機械部品で代替できるか」を通じ、「人間とは、生命とは、そもそも何であるか」を逆に問いかけた作品である。

時は近未来。電腦が人間社会にあまねく行き渡り、肉体や脳の機能が機械部品（チップ）で徐々に置き換えられ、その機能効率が最大にまで引き上げられているような、高度に情報化されたネット&サイボーグ社会における刑事アクション物語。この世界ではありとあらゆる知覚情報、例えば極端な話、性感のようなものさえデジタル化され、自由自在に操作できるが、生身の人間に特有の人格・精神だけは手つかずの状態。そしてこの精神が、この物語社会においては「ゴースト」と呼ばれている。

士郎正宗が、いわゆる人間における人格や個のアイデンティティ、もしくは精神や靈魂など、人間のソフトな属性すべてをひっくるめてこの「ゴースト」なる代物に仮託していることは明らかだ。が、それはあくまで表面上のこと。むしろ「肉体に縛られた人間の魂の最後の砦」、人間性を担保しようとする古典的あがきのまさに象徴として、「ゴースト」はあたかも60年代の学生紛争のように、あるいはアイロニーとして、このネット社会に登場している。そしておそらく、その設定は確信犯的ですらある。私のゴーストはそう囁いているのである。

『攻殻機動隊』の英語タイトル『Ghost in the Shell』は、「肉体」に対するものとしての「ゴースト」が機械の入れ物に収まっているという、サイボーグの存在様態を簡潔に形容したものだ。が、同時にそれは心身二元論

や科学における要素還元主義を揶揄したアーサー・ケストラーの著作、『機械の中の幽霊-Ghost in the Machine』をもじったものでもある。でありながら、まさにそのゴーストをめぐる問題が物語を成立させている。サイボーグの脳には電腦化され、機械のチップからなる部分と、生身の脳の組織からなり、精神が宿っていると考えられる部分があるという設定である。

サイボーグの脳を解析する研究者たちは、あたかも記憶ディスクを解析するかの如く脳内にダイブするが、このゴースト領域と電腦化可能領域の間には「ゴースト障壁」と呼ばれる一種の結界があり、そこから先へは潜ってゆけない、あるいは潜入が禁じられている。人間個人のアイデンティティーはこのゴーストと同一の、一種の不可侵領域なのである。「タブー」なのである。このゴーストをさらにデジタル化し、ネット空間に移植することにより生物と非生物の間の垣根が取り去られるというラディカルな人間社会進化のいわば立役者となるのが、全身を「義体」、つまり機械の体で置き換えたサイボーグ、主人公の草薙素子少佐というわけなのである。

そういった背景が明らかになるのが、映画『イノセンス』に登場した「ゴーストダビング」という操作技術（初出は、漫画版『攻殻機動隊』第六話の「Robot Rondo」）。単なる記憶情報であれば、それはファイルをダビングするようにコピーや複製が可能だ。が、ゴーストがダビングできるとなると一体どういうことになるか。それはつまり、同じ人格がこの世に二人以上存在してしまうことを意味する。そしてそれは「個の同一性」つまり、アイデンティティーという概念それ自体の否定に繋がる。というわけで、この世界においては「ゴーストをダビングすると、オリジナルが劣化、もしくは死んでしまうため禁止」という設定になっている。なるほど。

ここで気をつけなければいけないが、士郎正宗は決してゴーストが技術的にダビング不可能とっているのではない。それは可能だが（強靱な肉体の持ち主であれば、何度もそれに耐えることができるという）、法的に禁止されているだけなのだ。ならば、それはデジタル情報に置き換えることができ、生身の脳でなくとも別の媒体に移し替えることができるような、何らかの確固とした情報である。そのレベルでは、他の情報と変わりがない。しかし、「コピーしたらオリジナルがダメージを受ける」という

未知の特性を持っていて、そこに精神の不可侵性が担保されている（しかし、やりようによっては可能で、「べつに人間のアイデンティティーが重複してもいいではないか」と、作者が言っているように感じられるときがある）。かくして、『攻殻機動隊』は見かけ上、クラシックな心身二元論を取り込んだSFなのである。案の定、映画『イノセンス』では、露骨に二元論の元祖とも言えるデカルトの話が語られるが、しかしとはいえ、ここで扱われるゴーストは「魂」の概念で代表されるような宗教的、靈的な存在とはひと味違う。作者によれば、ゴーストは少なくともパターンを伴う何らかの構造である。これはこれで、かなりユニークな設定だ。

作者は靈魂の存在を認めているのかいないのか。少なくとも物語の中では、ゴーストはデジタル化可能な情報であるされている。だからこそ、それはネットの中にも棲息できる。電子回路に靈魂が取り憑くという冗談めいた話であれば、TVドラマの『宇宙大作戦』や映画『スキャナーズ』にもそんなエピソードがあったように記憶するが、ゴーストのアップ・ロードというのはそんな、「延長された心身二元論」的現象とはかなり異なっている。他のあらゆる種類のデータと同じく、純粋に0と1からなる情報の束としてゴーストを捉え、コピーや転送が可能なものとして設定されているのである。この、「ゴーストのデジタル的脱構築というタブー」が士郎正宗の真にラディカルな部分であり、それが最もよく現れているのが、おそらく映画にもなった「人形つかい」のエピソードであろう（私は、『攻殻機動隊』の話は実質ここで終わっていると考えている）。

■「人形つかい」の導く進化

それはどういう話か。義体を製造する企業「メガテックボディ社」の工場で、ある日製造ラインが勝手に作動し、一体の成人女性型ロボットを完成させてしまう。そのロボットは素っ裸で工場を抜け出し、交通事故に遭った結果として草薙素子の勤める警視庁公安9課に運び込まれ、電腦技師たちによって解析される。彼らが言うには、その電腦の中にどうやら「ゴーストラしきものが存在する」。

そうこうしているうちに、ロボットは自分で勝手に電源を入れ、喋り始めた。それによると、このロボットのなかの人格こそ、当時世間を賑わしていた天才ハッカー「人形つかい」の正体であると。はじめは「誰かが外部からハッキングしているに違いない」と勘ぐられたが、どうやらロボット「本人」が自前

で出力しているらしい。そこで、生命の定義をめぐる哲学的議論が始まり、ロボットは自分が生命体であると主張し始める。彼（彼女）によると、生命とは「情報の海に発生した一種の結節点」のようなもので、それが自己保存のプログラムを持つ以上、DNAを基盤とした生物学的生命と同様の内容を備えているという。

この議論には、生命の定義だけではなく、あの「チューリング・テスト」が関わる「知性の定義」も混入していて、少々怪しい。いずれにせよ、そもそも生物や生命の定義はそれ自体あまり意味がないと私は考えているので深くは議論しない。おそらく、作者もそう思ったのだろう、草薙素子は人形つかいに誘われるままに彼と融合し、一種の電脳的生殖を果たす。それは、ネット空間の中で情報のみからなる生命が素子由来の変異を取り入れ、さらなる進化を目指すためだった。「進化なき生物学研究には意味がない」と述べたのは遺伝学者テオドシウス・ドブジャンスキーだったが（こっちの方が、むしろ生命の定義により深く関係するだろう）、生命と非生命の間の境界線を意図的に取り除こうとした作者が、進化的視点をストーリーに組み入れたのはまことに卓見であったと言わざるを得ない。アニメ版『攻殻機動隊』では、それが動物進化系統樹として象徴的に描かれている。

詰まるところ「自分はひょっとしたらとうの昔に死んでいて、人間ではなく、ただの機械部品の塊になっているのではないか」と悩む草薙素子は、そう悩んだ時点ですでに人間以外の何ものでもない。しかし同時に彼女は、「人形つかい」と自分が限りなく類似していることも否定できないでいる。生命が特別なのではなく、それが単に物質世界の一樣態に過ぎないのだという囁きを、この時素子のゴーストは聞いている。ある種の一元論が垣間見える瞬間である。同僚の刑事バトーは、「お

まえのチタンの頭蓋には、ちゃんと本物の脳みそが詰まっているじゃねえか」と言うがしかし、それがポイントを外した慰めに過ぎないことを素子はすでに見抜いている。精神活動と物理的な情報のあいだに本質的な差がないことこそが問題なのだ。ならば、それはすでに素子だけの問題ではない。

人間を人間たらしめている自我が常に有機体にしか付随しないのかと問うなら、「それはおそらく違う」と士郎正宗は考えたのだろう。ここが、SFとしての『攻殻機動隊』の「核」である。古い生命観が脱構築されると同時に、草薙素子のアイデンティティーは「人形つかい」と合体してネットに移り、それによって彼女はさらなる自我と覚醒レベルの高みに到達し、その過程は一種の人間社会進化をも意味していた、というのがストーリーの中身である。

さて、心身二元論は一体どうなったか。「有機的肉体を伴わない自我」が存在できるなら、それは「魂がある」ということを意味するのか。残念ながらそうではない。生身の人間の自我が神経回路の活動に依存するのなら、素子の意識も同じこと。電脳空間の中の素子は、やはりいまでも広大なネットのハードウェアなしには存在できない。義体に入るときも、「素子というソフトウェア」をダウンロードしなければ体を物理的に動かすことはできない。彼女の目は、義体のレンズと感光素子、さもなくば防犯カメラその他の視覚メディアからの情報を入力とし、聴覚も同様。これらデヴァイスや電子ネットワークなしに、彼女の五感や思考は一切機能できず、この物語のどこにも「この世を漠然と漂っているアストラルボディ」のようなものは出てこない。かくして、生命と非生命、有機体と機械の境界が脱構築されてもお、心身二元論の落ち着く先はどこにもないのである。

Constrained & Directional Evolution Newsletter Vol. 4 No. 8

発 行 : 2021 年 1 月 25 日

発行者 : 新学術領域研究「進化の制約と方向性～微生物から多細胞生物までを貫く表現型
進化原理の解明～」(領域代表者 倉谷 滋)

編 集 : Constrained & Directional Evolution Newsletter 編集委員会(編集責任者 深津 武馬)

領域 URL : <http://constrained-evo.org/>