



Evolutionary Theory for

CONSTRAINED & DIRECTIONAL DIVERSITIES

Grant-in-Aid for Scientific Research on Innovative Areas

Constrained & Directional Evolution Newsletter Vol. 1 No. 2 (2017)

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～



公開シンポジウム「進化の制約と方向性」開催報告

目次

領域代表挨拶 No evolution, no biology	倉谷 滋	1
公開シンポジウム「進化の制約と方向性」開催報告	古澤 力	3
公開シンポジウム「進化の制約と方向性」概要		4
講演要旨		
「発生機構の揺らぎと新規形態獲得」	倉谷 滋	6
「脊索動物胚発生の分子発生システムゆらぎと進化的保存性の関連解明に向けて」	入江 直樹	7
「摂動実験を用いた食虫植物の捕虫葉進化機構の解明」	長谷部 光泰	8
「昆虫－微生物共生可能性の探索と分子基盤の解明」	深津 武馬	9
「多様な選択圧下での大腸菌進化実験による揺らぎ－応答関係の定量解析」	古澤 力	10
「進化のゆらぎ応答理論の確立と多階層・発生過程への展開」	金子邦彦	11
公開シンポジウム感想記		
「キックオフシンポジウム『進化の制約と方向性』に参加して」	福島 健児	12
「『進化の制約と方向性』キックオフシンポジウム感想」	樋口 真之輔	13
「キックオフシンポ感想記」	内田 唯	15
「新学術領域『進化制約方向性』キックオフシンポジウムに参加して」	奥出 絃太	16
「キックオフシンポジウム『進化の制約と方向性』感想」	井坂 諭紀雄	17
連載エッセイ（2）「巴里自然史博物館滞在記：今に残る骨董品」	倉谷 滋	19

領域代表挨拶

No evolution, no biology

みなさま、お達者ですか。領域代表の倉谷です。先般は、新学術領域「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～」キックオフ・シンポジウム（2017年10月1日、東京大学山上会館にて）にお集まりいただき、誠にありがとうございました。計画班を代表して、厚く御礼申し上げます。

予想以上の盛況ぶりに、計画班員一同嬉しい驚きを隠せず、感激いまだ醒めやらぬ、といった風情。生物進化をめぐり、とりわけ会場では若い研究者の方々による熱いディスカッションが花開き、つくづく「開催してよかった」と、しみじみ思い返している次第であります。いうまでもなく、これからが本番。過去数年間、じっくりと熟成させた課題にいよいよ本格的に取り組み、新しい進化の理論構築へ向けて飛び立つばかりであります。それが成功するもしないも、次世代を担う若い皆さんのモチベーションとパッションあつてのこと。何卒、今後ともよろしく願います。

進化は、生物学における永遠の中心命題であります。いまさらドブジャンスキーを引くまでもなく、「進化なきところに生物学もなく、科学思想もない」のです。そして、生物進化現象が物理化学的基盤を持つであろうことも、また自明のことでもあります。それが単に物質還元的な意味での基盤であるのか、いや、現象の振る舞いそれ自体に、スケールや時間を越えて通底する何らかの作用機序、共通の法則が、単なるアナロジー以上のものとして存在しうるものなのか、そんなことを考えさせられるシンポジウムであったとしたら、それは我々の望外とするところ。まさにそれこそがいまだ語られることのなかった問題の本質であろうと考えます。ボディプラン、遺伝的同化、安定化選択、発生負荷、発生拘束、キャナリゼーション、相同性、反復、コ・オプション、発生システム浮動、ファイロタイプ、大進化と小進化、進化的ノヴェルティ……。これら諸概念が、進化生物学者達の頭のなかをぐるぐると巡り、それらを新たに構築された概念的枠組みの中で体系化しなければならない。そんな、焦りやもどかしさを感じている方も多いのではないかと思います。

進化論は、人類史における自然観の熟成（それはいまでも続いています）における一里塚であり、それなくして人類の知の進歩もまたあり得ない。同時に、実験データと理論がこれだけ整備された時代も、いまだかつて訪れたことはない。ダーウィン以降の進化生物学者達にとって、「ゲノム」という言葉は、長らく一種の概念でしかありませんでしたが、いまやそれを手に取って見ることもさへできる。刻々と変化する動物胚のなかに発現するすべての遺伝子を網羅的に眺め、比較することすら可能になり、胚に発現する遺伝子を、なんと非モデル動物を用いて操作することもできるようになりました。

しかし、精密で膨大なデータも、健全な研究コンセプトなしには命を持ちえず、方針のない考察では、自ら情報の渦の中に溺れるのみです。なにより、生態学や、比較解剖学や、発生生物学や、細胞生物学など、異なった専門分野をひとつの同じ文脈の下に扱い、これ

まで見出されることのなかった論理と因果の糸を引きずり出さねばなりません。幸いなことに、いまでは学際的な研究スタイルが決して型破りではなく、むしろ当たり前の光景になってきました。いうなれば、進化共通の文脈の上で、さまざまに異なった専門的アイデアが、まさに個々の生物学者の頭の中で統合され、すべての情報をジャグリングしつつ、実証的に進化を観察し、考えることのできる時代が、ついに到来したのであります。それが可能になったのは、高々ここ 20 年ほどのこと。つまりいま、現役の研究者をやっている、あるいは目指している皆さんは、とんでもなくラッキーなのです。私は私で、いまから 20 数年前、ホックス遺伝子の発見を皮切りに、目の前で「エヴォデヴォ」が誕生するのを目の当たりにし、試したいアイデアや実験がいくらかでも降ってくるような時代を経験しました。その時、自分のことを途轍もなくラッキーだと思いましたが、いまの若い人たちも、じつはそれに似た状況にいるのです。あとは、やる気の問題です。

とはいえ、まだまだ足りない要素はあります。まして、この広大な生物学の問題が、僅か数人の力で何とかするとは到底思えません。今回は、「進化の制約と方向性」を前面に押し出し、このきわめて本質的な問題へのいくつかの異なった視点やアプローチを提示してみましたが、それらに違和感や距離を感じた方々もおられたかも知れません。しかし、そんな方々のアイデアこそ、この領域に今後必要となってくるものであるような気がします。どんなに破天荒なアイデアにも、何らかのノヴェルティと意義はあり、それをかたちにするには勇気とチャンスが必要です。この領域が、そんな勇気ある者たちが大きく羽ばたく機会を見出す場とならんことを・・・。

2017 年 10 月 3 日
神戸ポートアイランド、理化学研究所にて
昼食後に書く

領域代表・倉谷

公開シンポジウム「進化の制約と方向性」開催報告

平成 29 年度に発足した新学術領域「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～」の背景と研究目的を、研究者・学生等へ広く紹介するために、同年 10 月 1 日に東京大学本郷キャンパスにおいて、公開シンポジウム「進化の制約と方向性」を開催しました。本領域の目的は、表現型進化がどのように拘束されているか、その背後にあるメカニズムが何であることを明らかにすることにあります。特に、短期的な時間スケールで観察される表現型の揺らぎと、長期的な時間スケールで起こる表現型進化の拘束の関係に着目して、表現型の変わりやすさに通底するロジックを解明し、それらの知見に基づいた新たな進化学理論の構築を目指します。シンポジウムでは、領域代表による概要説明に続き、表現型揺らぎと進化に関する理論的な背景が説明され、その後にそれぞれの計画班代表が研究計画の紹介をおこないました。

本領域の特色は、微生物から動物や植物に至る様々な生物種を対象とした進化研究と、物理学を背景とした理論研究の融合を志向する点にあります。シンポジウムでは、領域が包含する研究分野の多様性も反映したものであると思われますが、進化学・発生学・生態学・理論生物学・生物物理学・生物情報学など様々な分野から 133 名もの参加者を集めました。特に学生や若手研究者の参加が目立ち、新たな学術領域の立ち上げにふさわしい活発な議論が行われました。質疑応答では、表現型揺らぎと進化がどのように相関するか、進化研究における先行概念との整合性はどのようになっているか、といった領域の根幹にかかわる本質的な問題から、表現型揺らぎの計測はどのように可能か、といった領域参画のための実際的な質問まで、様々な切り口からの議論が展開されました。また、シンポジウム終了後には意見交換会が開催され、そこでも熱心な討議が続けられました。

いうまでもなく、新学術領域が目指すのは、個別研究の寄せ集めではありません。領域内での様々な相互作用に触媒された、新たな概念の創出が求められています。今回のシンポジウムはまだ領域発足直後であり、研究計画の方向性において研究者間に隔たりが残っていたことは否めません。しかしシンポジウムにおいて繰り広げられた、特に若手研究者による活発なディスカッションは、その隔たりを埋める議論や研究がこれから展開されていくことを十分に予感させるものでした。今後、新たな領域メンバーが加わることにより、そうした相互作用がさらに活性化することを期待します。

平成 29 年 10 月 4 日
新学術領域「進化の制約と方向性」
関連集会担当 古澤 力

公開シンポジウム「進化の制約と方向性」

日時：10月1日（日曜日）13:30-17:15

場所：山上会館 2 階大会議室（東京大学本郷キャンパス）

13:30-13:50 倉谷滋（理化学研究所）

領域の概要

13:50-14:30 古澤力（理化学研究所）/金子邦彦（東京大学）

「進化の制約と方向性をどのように理解するか：理論的背景」

14:30-14:45 コーヒーブレイク

14:45-15:05 倉谷滋（理化学研究所）

「発生機構の揺らぎと新規形態獲得」

15:05-15:25 入江直樹（東京大学）

「脊索動物胚発生の分子発生システムゆらぎと進化的保存性の関連解明に向けて」

15:25-15:45 長谷部光泰（基礎生物学研究所）

「摂動実験を用いた食虫植物の捕虫葉進化機構の解明」

15:45-16:00 コーヒーブレイク

16:00-16:20 深津武馬（産業技術総合研究所）

「昆虫—微生物共生可能性の探索と分子基盤の解明」

16:20-16:40 古澤力（理化学研究所）

「多様な選択圧下での大腸菌進化実験による揺らぎ—応答関係の定量解析」

16:40-17:00 金子邦彦（東京大学）

「進化のゆらぎ応答理論の確立と多階層・発生過程への展開」

17:00-17:15 質疑応答/まとめ

17:30-19:30 意見交換会

場所：山上会館 1 階談話室（ラウンジ ハーモニー）



（左）倉谷領域
代表による領
域の概要説明



（右）会場にお
ける若手や学
生からの活発
な質疑の様子



満員の会場の様子 後方には多数のパイプ椅子が追加された



入江計画班代表による講演



意見交換会において盛り上がる議論

発生機構の揺らぎと新規形態獲得

倉谷 滋（理化学研究所 倉谷形態進化研究室）

生物進化における揺らぎと方向性は、新規パターンの獲得や進化的な発生プログラムの変更において、どのように示唆されるだろうか。進化において大きく変化するパターンの発生は、個体発生時間のなかでも、それだけ大きな揺らぎを示すのか。あるいは、それは揺らぐことの少ないと想定される拘束されたステージ、つまり「ファイロティピック段階」をやり過ごし、器官・構造のモジュラリティが増加したのちに発生するようプログラムされているのだろうか（言い換えれば、ヘッケルの発生反復の法則は、一般的に正しいのか）。

当研究室では、スッポン *Pelodiscus sinensis* を用いることにより、カメの甲の進化を扱ってきた。甲は、羊膜類の脊椎と肋骨を用いた構造でありながら、それが単なる変形、すなわち「個別適応：Idioadaptation」で説明できないため、なんらかの発生過程の変更によるボディプラン進化「アロモルフォーゼ：Aromorphose」がそこに関わるのではないかと推測されてきた。かつて私たちはその本質が、肋骨の「軸部閉じ込め axial arrest」と、体壁の折れ込みによるものとし、甲の進化の「折れ込み説：folding theory」を世に問うた。

基本的に折れ込みによってできるカメの甲は、筋と骨格の間に祖先的結合を残している。典型的には、体壁筋から直接に分化した前鋸筋と、その肋骨、肩甲骨との関係にそれが見出せる。が、甲進化に伴い、結合の場所を大きく変えた筋もある。それが胸筋と広背筋群である。これらの筋に関しては、相対的位置関係や、要素間の繋がりによって推定される、古典的な形態学的特殊相同性が失われてしまっている。

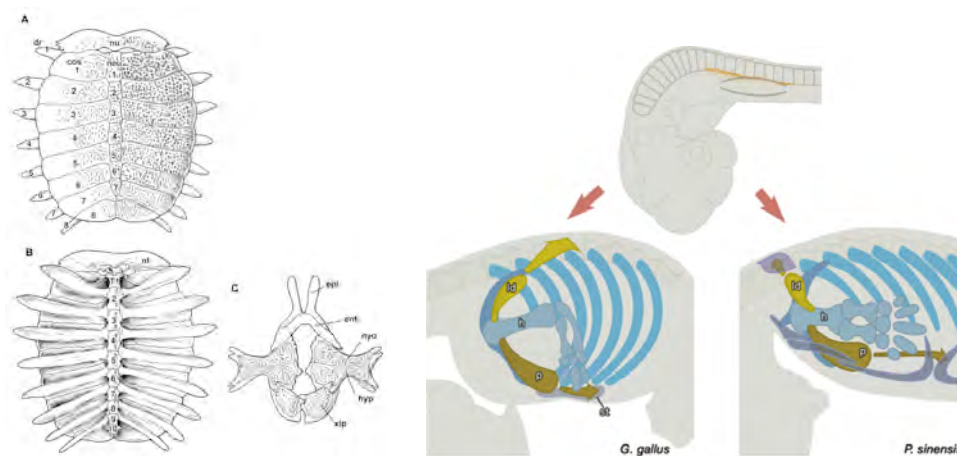


図 A-C はスッポンの甲の骨格。左側に背甲の背面 (A) と腹面 (B) と示す。C は腹甲。右は、移動性の四肢筋群の近位表層の要素が、ニワトリ (*G. gallus*) とスッポン (*P. sinensis*) において、形態学的に異なったパターンへと分化することを示す。

興味深いことに、これらの筋は他の筋と異なり、*Lbx1* を発現する四肢筋前駆細胞集団の一部として肢芽から伸長して発生する。筋骨格系の発生のうち個々の筋が骨格系（腱）との結合関係を確立する機構については未解明な点が多く残されているが、上述のカメの甲進化に伴う筋・骨格系結合関係の変化様式からは、発生時における細胞の状態や配置が乱されても変化しない「硬い」結合部分と、「柔らかく」決定されている結合部分があると予想される。この発生機構の構造に見る硬軟が、ボディプラン進化に方向性を与える背景となる可能性を、今後追求する。

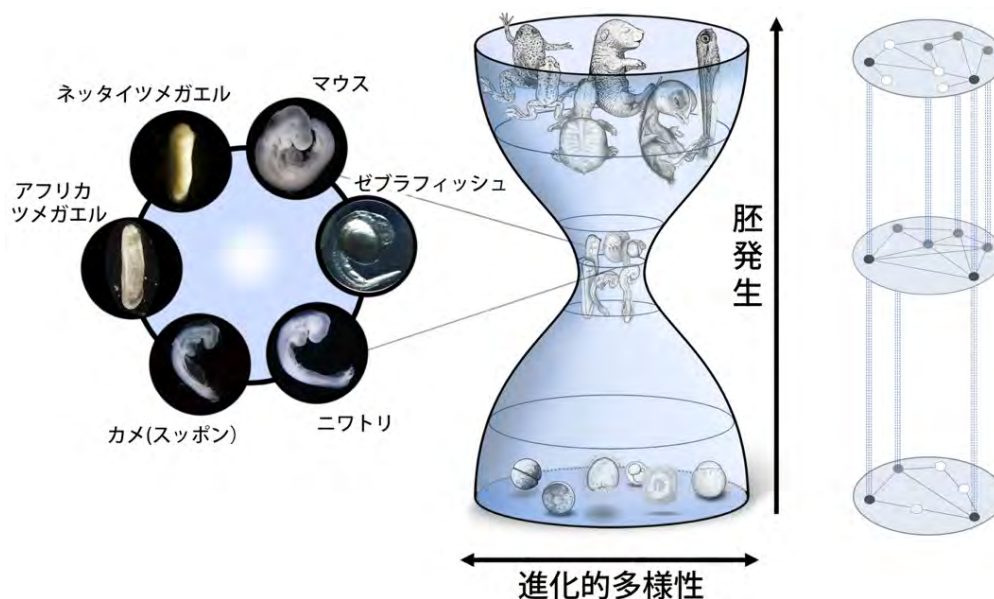
脊索動物胚発生分子発生システムゆらぎと進化的保存性の

関連説明に向けて

入江 直樹（東京大学大学院 理学系研究科/生物普遍性研究機構）

本計画研究では数千万年から数億年という進化時間スケールでの発生過程の保存性について、現生の脊索動物でみられる表現型揺らぎという非常に短い時間スケールのデータから推定・理解を目指している。時間スケールの差があまりに大きく無謀なことのように見えるが、DNA の取り得る組合せという観点から考えると、そうとも言い切れない。仮に大腸菌を地球大のサイズを維持したまま 40 億年分裂させても、理論上可能な DNA の組合せからすると何百万桁もオーダーが異なるほど生物は限られた試行回数しかとっていない試算になる。生物は手持ちの遺伝情報から大きく逃れることはできず、むしろ、ここまで限られた試行回数でこれだけ多様化したのが不思議に考えた方が良くかもしれない。

脊椎動物は、5 億前以上前に出現して以来、さまざまな形の姿に多様化してきたが、基本的な解剖学的特徴はほとんど変わっておらず、その原因は明らかになっていない。これに対し、発生砂時計モデルは、脊椎動物の基本構造を決定づける胚発生期が進化を通して多様化してこなかったことに原因があるとしてきたが、依然としてなぜその胚発生過程が進化を通して保存されるのかについては不明のままだった。最近の我々の研究により、この保存の仕組みとして、「使い回し遺伝子」による多面拘束が関与している可能性が浮かび上がってきた(Hu *et al.* Nature Ecology & Evolution 2017)。脊椎動物の基本構造がつけられるプロセスには使い回し遺伝子が多く、それが原因で基本構造の多様化が制約されてきたというシナリオが考えられる。今後は、こうした遺伝子群や表現型の揺らぎという観点から研究を展開することで、制約進化理論構築への足がかりとしたい。



摂動実験を用いた食虫植物の捕虫葉進化機構の解明

長谷部 光泰（基礎生物学研究所）

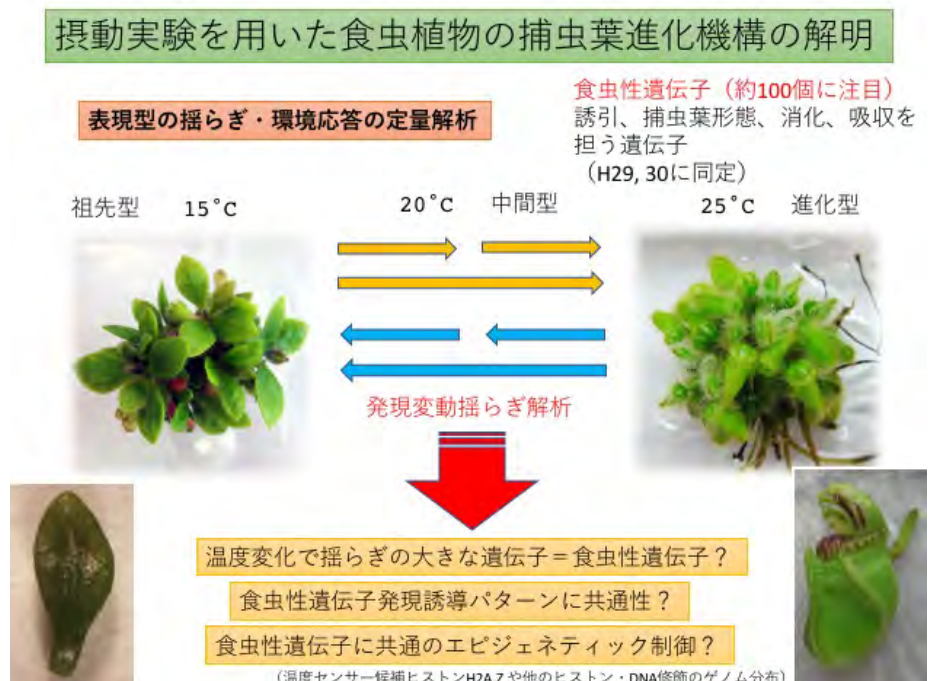
ダーウィン以来の進化研究が、未だに解明しきれていない問題として、一つ一つの形質は適応的ではないが、いくつかの形質があわさることによって始めて適応的になる複合適応形質がどのように進化するかがある。複合適応形質はいろいろな生物に見られるが、複数の形質が確率的な突然変異の蓄積のみによって一斉に進化するのには困難であろうと考えられてきたものの、これまで妥当な代替仮説が存在しなかった。食虫植物の持つ食虫性は、小動物を誘引、捕獲、消化、吸収することではじめて適応的になるので、複合適応形質の典型例である。

我々は、フクロユキノシタを 15℃で培養すると捕虫機能を持たず光合成に特化した平面葉を形成し、25℃で培養すると捕虫葉を形成することを発見し（Fukushima *et al.* 2017, Nat. Eco. Evo.）、食虫性進化における祖先型と派生型にそれぞれ相当する平面葉と捕虫葉の個体内比較を可能とした。食虫植物の複合適応形質が進化した機構として、2つの仮説を設定した。一つは、環境変動などに伴う発現ゆらぎの大きな遺伝子ほど適応進化に関与しやすいという「揺らぎ応答進化理論」に基づき、食虫植物の祖先種で、誘引、捕獲、消化、吸収能力の責任遺伝子が大きな発現ゆらぎを持っていた可能性である。もう一つは、食虫性とは別の機能を持っていた祖先型遺伝子が、共通エンハンサーや共通エピジェネティック制御を獲得することで、捕虫葉での機能を獲得した可能性である。両者は相反する仮説ではなく両方が成立する可能性もある。具体的に下記の研究を計画しているので紹介したい。

(1) ゲノム情報と遺伝子操作技術（ウイルス誘導遺伝子サイレンス系を確立済み）を用い、フクロユキノシタの食虫性に必要な4種類の形質を担う遺伝子を特定する。

(2) フクロユキノシタに環境摂動として温度および日長変化を与え、食虫性関連遺伝子の発現ゆらぎを測定することで「揺らぎ応答進化仮説」が適用可能かを検証する。

(3) 食虫性関連遺伝子が共通のエピジェネティック制御を獲得して進化した可能性を検証するため、食虫性関連遺伝子制御領域の配列比較から共通配列を探索するとともに、植物の温度感受に関わるヒストンバリエント H2A.Z のゲノム上での占有領域を調べ、共通エンハンサーの獲得やエピゲノム制御によって4形質が進化した可能性について検証する。



昆虫－微生物共生可能性の探索と分子基盤の解明

深津 武馬（産業技術総合研究所）

生物界において微生物との共生関係は普遍的に見られ、重要な生物機能を有する。このような共生関係がどのように始まり、不安定な初期段階からさまざまな中間段階を経てより安定な関係を構築し、相互依存や新規生物機能を発達させることにより、今あるような共生システムが確立したのかは、進化生物学における未解明の問題である。従来の共生研究はすでに高度に確立した共生関係を対象としてきたが、近年の申請者らの研究により、環境中には特定の宿主生物、例えば半翅目昆虫のチャバネアオカメムシ *Plautia stali*（図）などに潜在的な共生能力を有する自由生活性細菌が普遍的に存在することがわかってきた（Hosokawa *et al.* 2016 *Nat Microbiol* 1, 15011）。このような環境中の「潜在的共生細菌」「共生可能細菌」の全貌を把握するとともに、既知の「必須共生細菌」や「任意共生細菌」と比較解析し、さらにはそれらを宿主昆虫に継続的に感染させて実験共生進化させることにより、共生進化の条件や可能性、さらにはその促進要因や制約機構を探る。

(1) **共生可能性進化実験モデルの探索および確立**：我々が先行研究で確立したチャバネアオカメムシを主たるモデル系として、共生可能性の機構および進化に関する実験を遂行するとともに、他種カメムシ類なども含め、より有望な実験系の探索をおこなう。

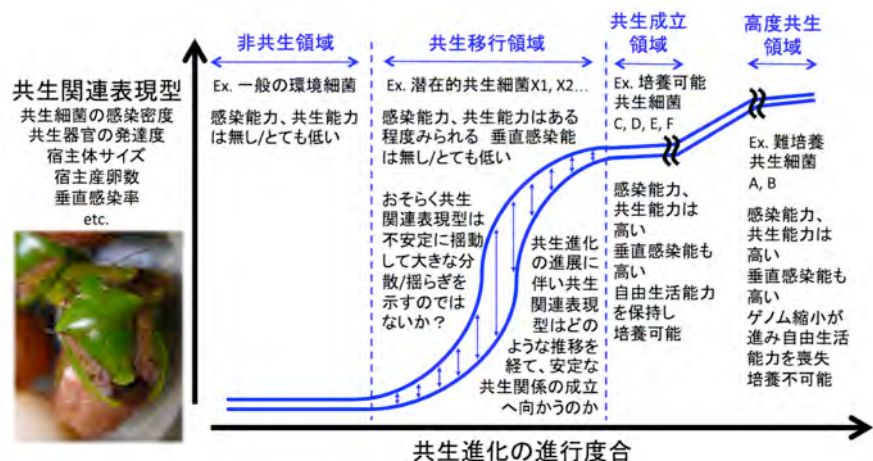
(2) **共生可能細菌群の探索、分離、解析**：共生細菌除去幼虫を日本各地の土壌試料に曝露、スクリーニングすることで、環境中の共生可能細菌群を網羅的に探索、分離、同定する。

(3) **共生能力に関わる分子機構の解析**：比較ゲノム解析や RNAseq 解析を駆使して、共生能力に関わる可能性のある遺伝子群を探索する。細菌側の遺伝子については遺伝子破壊や形質転換により、宿主側の遺伝子については RNAi やゲノム編集により、それぞれ機能解析をおこなうことによって共生関連遺伝子を同定し、共生能力の分子基盤を解明する。

(4) **共生能力と共生関連表現型の相関進化解析**：異なる細菌間で競争感染実験を実施して、相対共生能力を定量化する。これら異なるレベルの共生能力を示す細菌類について、感染密度、局在、垂直感染率、宿主共生器官の形態や大きさなどの相関、分散、揺らぎを測定し、共生能力と揺らぎ応答の関係について種間レベルで明らかにする。

(5) **共生可能細菌の実験進化学的解析**：共生可能細菌に感染させた昆虫系統を飼育維持し、適応度の高い個体を選抜して体内細菌を次世代に感染させることを継続的に繰り返して進化実験をおこなう。時系列を追って共生能力の

向上の推移を記録するとともにグリセロールストックとして保存し、競争感染実験や表現型効果の相関、分散、揺らぎ測定をおこない、共生能力と揺らぎ応答の関係について種内および進化系列レベルで明らかにする。



多様な選択圧下での大腸菌進化実験による揺らぎ-応答関係の定量解析

古澤 力 (理研 QBiC/東大 生物普遍性研究機構)

本研究では、大腸菌を用いた進化実験により、表現型揺らぎと進化の方向性が持つ関係を定量的に解析する。さらに、細胞モデルの計算機シミュレーションと融合することにより、揺らぎ-応答関係がどのように成り立つかを解析し、その背後にある表現型の変化に通底するメカニズムを明らかにする。本研究は以下の4つのテーマから構成される。

(1) 多様なストレス環境下での大腸菌進化実験

ラボオートメーションを用いた進化実験システムを用い、数百種類程度の異なるストレス環境下での植え継ぎ培養による進化実験を行う。その進化過程の表現型・遺伝子型変化の網羅的解析から、表現型変化にどのような制約が存在するか、定量的に明らかにする。

(2) 特定の遺伝子発現量を適応度とした大腸菌進化実験

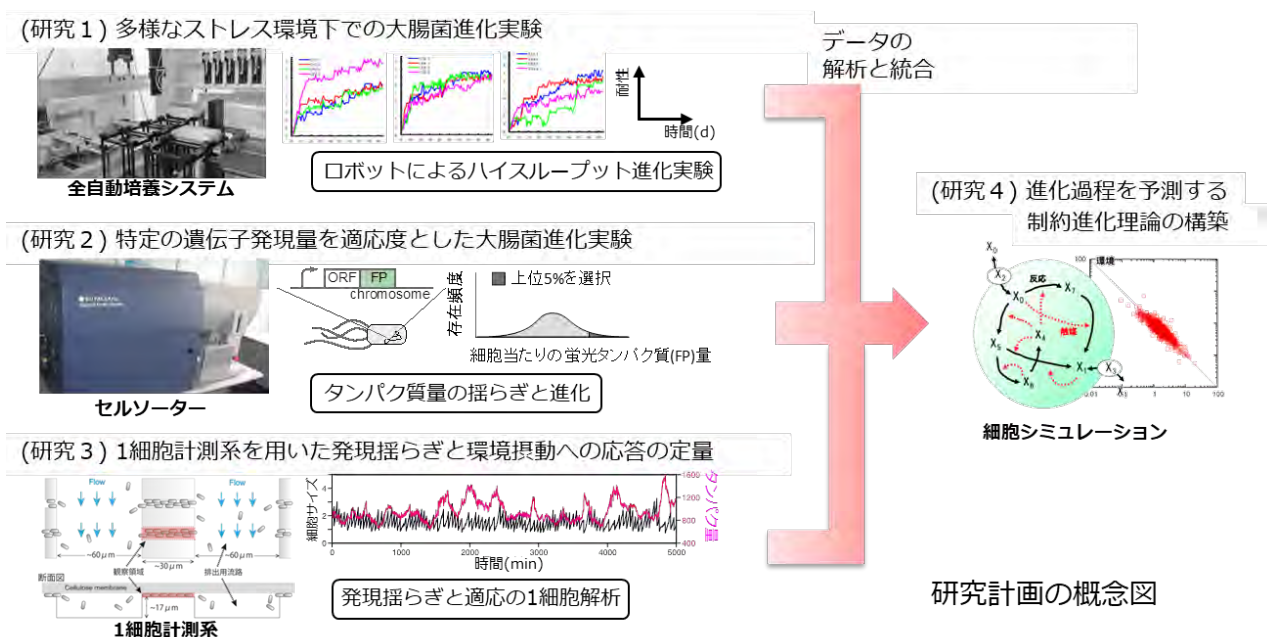
ある特定の遺伝子を蛍光タンパク質で標識した大腸菌集団から、セルソーターを用いて発現量に応じて細胞を選択することにより、注目する遺伝子発現量を適応度とした進化実験を行う。この進化実験を様々に異なる遺伝子について行い、選択前の発現揺らぎと、選択圧をかけたときの変化し易さの関係を明らかにする。

(3) 1細胞計測系を用いた発現揺らぎと環境摂動への応答の定量

数百世代程度にわたり細胞の系統を追うことができる1細胞計測系を用い、大腸菌の様々な遺伝子について、発現量の揺らぎと環境変化を与えた場合の発現応答を計測することにより、揺らぎ-応答関係がどのような時空間スケールで成り立つかを解析する。

(4) 大腸菌の進化過程を予測する制約進化理論の構築と応用

上記(1)~(3)の定量データを統合し、大腸菌の表現型と遺伝子型の変化がどのように制約され、揺らぎ-応答関係がどのような形で成り立っているかを解析し、制約進化理論の構築を試みる。



進化のゆらぎ応答理論の確立と多階層・発生過程への展開

金子 邦彦（東大 総合文化） 藤本 仰一（阪大 理）

この 20 年ほど進めてきた表現型進化理論を振り返り、今後の研究計画を述べた。

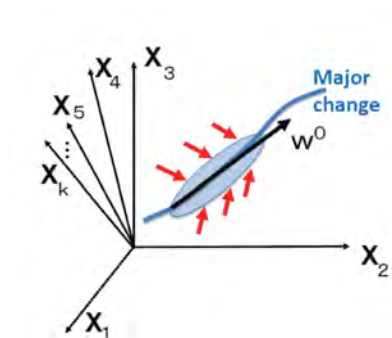
（１）表現型進化のポテンシャル理論の完成：

これまでの理論、実験の共同作業から、進化を通して安定した表現型が形作られる結果として、状態空間で表現型の変わりうる領域が非常に限られていき、その結果、環境変化、遺伝的変異、外部擾乱による表現型変化が強く相関してくることを示してきた。それを発展させて状態変化の低次元化の普遍性、条件を求め進化の拘束と方向性の定量的定式化、安定性と可塑性の変化の理論を定式化する。この結果をもとに環境、遺伝子変化の変数として主要な表現型の地形を表現する理論を統計熱力学の手法を参考にしつつ定式化する。

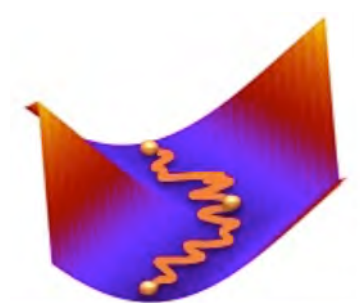
（２）階層進化理論：種間の相互作用を含む、分子—個体—生態系の階層をまたがるシミュレーションを行ない、階層間の整合性により、個体集団としての進化の拘束と方向性、集団レベルでの揺らぎ応答関係、多種相互作用による表現型可塑性と共生進化の起こりやすさを調べていく。

（３）進化発生対応の理論：動植物の発生過程を模した力学系モデルを用い、ボディプランの進化シミュレーションを行い、安定した発生過程が進化して際に見られる発生過程と進化過程の対応関係を明らかにする。さらに具体的には昆虫の発生そして、花器官配置の制約と揺らぎの理論解明を行っていく。

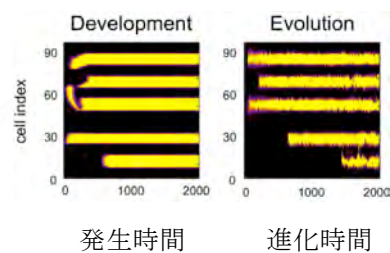
以上の結果から各班の実験への指針を与えるとともに、実験結果の解析も行っていく。



高次元状態空間の中で
表現型のとりうる領域の制約



成長速度の遺伝子変数、
環境変数に対する地形



縞形成における進化発生対応

キックオフシンポジウム「進化の制約と方向性」に参加して

University of Colorado Denver
School of Medicine, David Pollock lab
Postdoctoral Fellow 福島 健児



『We have to take turns doing your tasks. But, I mean, it's only botany. It's not real science.』 これは、映画 *The Martian* (2015)において、宇宙船パイロット Rick Martinez が火星に取り残された植物学者 Mark Watney へ宛てたメッセージの一部である。植物学はソフトサイエンスであって、ハードサイエンスの堅牢性とは一線を画する、というのがこのセリフの意味する側面だ。文脈上はただのジョークであって文面通りの悪意はないが、植物を研究する私にとっては耳が痛い冗談である。この新学術領域が根差す進化学も、ソフト・ハードの区別の上では多少の揶揄を込めてソフトサイエンスに分類されることが多いように感じる。植物の進化を扱う私にとっては重ねて耳が痛い話だが、ただの軽口と受け流しては分野の発展もそれまでだ。今回のキックオフシンポジウムを聴講して、この新学術領域は進化学がソフトサイエンスの殻を破るための一歩となる可能性を感じたので所感を述べる。

本新学術領域の柱となる仮説は次のとおりである。「短期的な形質のゆらぎ（たとえば転写産物量の分散値）が、より長期的な進化においてその形質値がアクセス可能な範囲（たとえば自然選択によって到達可能な最大転写産物量）と相関する。」 換言すれば、短期的ゆらぎから進化の方向性や制約が予測可能になるかもしれない、というわけである。古澤博士の発表からは、大腸菌の進化実験が仮説検証の先陣となるであろうことが伺われた。一方、発生や共生など、多細胞生物の複雑な生命現象にどう切り込むかが大きな課題となるだろう。短期的ゆらぎに関しては、概ね領域内で共通するアプローチが示されたように思う。定量しがたい形質の代理通貨として、網羅的な遺伝子発現情報を用いてゆらぎを捕捉することが可能なようだ。

より難しく、成熟した見解も得られていないように感じたのは長期的進化における方向性や制約の定量である。多細胞生物進化の方向性や制約は、乱雑な進化プロセスの中から先人がその慧眼によってようやく捉えたパターンである場合も多い。これらはよく抽象化を伴って解説され、代表的な個別研究がタイプ標本のように関連付けられもするが、定量的な測定と数学的表現を重視した客観的解釈には困難を伴うこともしばしばある。入江博士は動物の胚発生について、やはり網羅的な発現情報を駆使して発生段階ごとに長期的な制約の大小を定量することに成功していたが、すべての班で同じアプローチが採用できるわけでもなさそうだ。進化の方向性や制約はなかなか正体を見せてくれない概念であるが、それらを汎用的な数値での議論に誘い出せたとき、新たな学術分野として萌芽するのだろう。この課題をどう乗り越えるか、領域の手腕に期待している。

さらに、上述のような課題を各班が各個撃破したとして、得られた知見からどのような統一見解が導かれるのだろうか。そもそも妥当な比較が可能なのだろうか。たとえば、大腸菌の薬剤抵抗性におけるゆらぎ一応答と脊椎動物のボディプランにおけるゆらぎ一応答は、どのような単位をもってして比較可能になるのであろうか？ 妥当な数値的比較が叶わないのだとしたら、このアプローチは生物全般に通底するような理論を導く着眼ではない

のだろうか？それとも、量的比較を介さずとも統一解釈に至る活路があるのだろうか？いくつもの困難を突破してはじめて成功が見えてくる、いわばギリギリを攻めた研究であると感じた。そこから、科学の地平を押し広げようとする熱意が伝わってくる。

今後科学が更なる発展を遂げれば、今でさえ多分に曖昧性を伴うハードサイエンス・ソフトサイエンスの区別は過去のものとなり、Rick Martinez のジョークは意味を失うのかもしれない。本新学術領域のキックオフシンポジウムに参加して、進化学においてそのような変化が進む可能性を垣間見た。

「進化の制約と方向性」キックオフシンポジウム感想

神戸大学大学院理学研究科 生物学専攻 博士課程 2 年
理化学研究所 倉谷形態進化研究室 研修生
樋口 真之輔



シンポジウムに参加することにした理由は、所属研究室がどこへ向かおうとしているかをもっと詳しく知りたいという、純粋な好奇心からであった。私自身は「脊椎動物における内耳の進化」を研究しており、これが大きな文脈中でどうにかして位置づけられうるのか、考えたかったのだ。

1～2 世代でおこる「ゆらぎ」を外挿することで進化の方向性、さらには「制約」を推定できる。これが本領域の作業仮説であると理解した。古澤先生の理論的背景に引き続いて 5 つの計画班の先生から発表があったが、ここでは理論的背景についての感想を中心に述べたい。なぜなら個々の話はとても興味深い一方、それが「進化の制約と方向性」にどう結びつくのか、私には上手く説明できないからである。代わりに後半では、シンポジウムに参加して膨らませた私の妄想を書き留めておきたい。

シンポジウムの前半で、制約の背景にあるメカニズムと進化の方向性をどのように理解するかと問題提起を行ったのは古澤先生であった。ここで紹介された、遺伝子の発現量を表す多次元座標上を想定し（次元数は遺伝子数に等しい）、ある個体の状態を 1 点で表し、世代を経たときの点の軌跡を進化とするモデルは分かりやすい。点はバネで固定されたブラウン粒子のような振る舞いをし、バネの強さ（選択圧）と力（ゆらぎ）を加えたときの变化量は比例するというのも、直感的には理解できた。

引き続いて登場した細胞を模したシミュレーション：

"多数の酵素が多数の代謝物を産生し、酵素の発現量がゆらぐことにより代謝物量も揺らぐ。ある代謝物量が多いものが適応的だということにして、世代を重ねると適応度やゆらぎがどのように変化するか？"

も興味深い。そこから得られる教訓は、進化速度と適応度のゆらぎ（分散）の比例関係であり、進化前と進化後（世代を経た後）では、環境を更に変化させた場合に進化可能な方向がより限られるということだ。換言すれば、強い選択圧を受け、進化すると拘束が強くなる。これは deep homology や、空を飛ぶ脊椎動物はすべて前肢を変化させているのはなぜか、結合一致の法則に反する筋（カメの胸筋など）が生じうるのはなぜかという、倉谷先生が紹介された問題を説明しうると感じた。

問題は、モデルはあくまでモデルであり、それが示唆することは面白いけれど、還元論という批判は免れないとも感じたことだ。上述の細胞内における酵素と代謝物のモデルにおいて、数世代までは良いが、世代数を限りなく大きくした時の適応度は発散してしまうのか、ある点に収束するのか、収束するとすればその値が示唆することは何か、が気になった。あとで古澤先生に伺ったら、ある値に収束するということがあった。1つのある代謝物量がそのまま適応度を反映するという設定なので、究極的にはその代謝物製造マシンになるのだろう。先生曰く「面白くない結論」だそうだ（私もそう思う）。もちろん、世代を限りなく経るうちに環境が全く変わらないなどということはないので、生物のある側面を切り取ったモデルにさらにありえない想定をするのも無理はある。一方で、これは設計趣旨からして「淘汰圧を掛けて世代を経るほどにゆらぎは小さくなる」ことを示したいがためのモデルで、想定 of 結論が出て然るべきだろう。それ以上に、意図していなかった側面から世代と適応度やゆらぎの関係を見いだせるとさらに興味深いのだが（時間の関係で割愛されたのかもしれないけれど）。

加えて気になったのは「ゆらぎとはなにか問題」である。生命現象は化学反応であり、化学反応レベルでのゆらぎは避けられない。それは細胞内の代謝物量、エピジェネティクス的な修飾、塩基配列、をゆらがせるだろうし、筋前駆細胞の移動経路も同様だろう。すべて究極的には物理化学反応の結果だから、見ているものは同じはずだが観察対象が違うので、はたして様々な対象を観察した異なる研究者の間で結論が一致して、当初の目的である進化の制約と方向性を明らかにすることができるのだろうか。纏めるために相当な努力が必要であると感じた。

あとはシンポジウムを聞いていて膨らんでしまった妄想、私自身の研究対象である内耳について勉強していることを基に、シンポジウムの内容にフックしてブレインストーミング的に書いてみたい。内耳という構造は形態の進化を研究するのに、筋や骨に並んで優れた対象だと考えていたが、今回の話を聞いてその思いを強くした。

内耳、特に三半規管それ自体の発生は、管がそれぞれ他の2つに直交するように厳密にコントロールされている。顎口類はすべて三半規管をもち、知られている限り二次的にそれを失ったものはいない。どんな環境に棲息していても自らが移動することにより慣性力が生じるためであろう。ただし変化しないのはクリスタ（膨大部稜）の数と管が互いに直交することであり、管のつながり方は系統によってけっこう異なる。哺乳類や魚類では前半規管と後半規管が8の字になっており、そこに外側半規管がついているように見えるが、鳥類では「8」のつなぎ目が短く、外側半規管の一端がそのつなぎ目に開口している。さらに厄介なのは軟骨魚類で、前半規管と外側半規管が8の字になっているものが多く、半規管のつながり方（とりあえず4つのタイプに分類されている）はダイナミックに変化するようで、これらは系統に関係なく独立に似たパターンが出現する^[1]。半規管のつながり方と食性とは相関があるという知見はあるが、その進化発生学的な観点からの研究はない。本シンポジウムでいうところの制約がクリスタと管を3つ作ることだとすると、耳胞の上皮シートの形態変化・癒合がどのように起こるか、そのタイプが食性と関わりがあるとすれば、ある特定の淘汰圧のもとで特定の形態の進化の方向性を解析するためのモデルとなりうるのではないかと。

もう一つ、内耳の中を満たす内リンパ産生における、神経堤細胞の遊走のゆらぎが与える影響についてである。哺乳類の内耳にある蝸牛の中央階を満たす内リンパを産生する血管条と呼ばれる組織は、盛んにイオン輸送をおこなっている。血管条中には神経堤由来の

メラノサイトがあり，これが遊走できないと内リンパが正常に産生されなくなり，その動物は難聴になる^[2]。哺乳類以外では血管条にメラノサイトが存在しないようだが，ではどのようにメラノサイトが耳の中の奥まった場所に遊走するようになったのか。哺乳類の共通祖先における神経堤細胞の移動経路のゆらぎがこれを可能にしたとも考えられるが，その情報がどのように DNA に固定されたのか（それは飛躍しすぎとしても，神経堤細胞が内耳に移動できるようになった胚環境の成立過程）は問題になりうる。

シンポジウムに参加して，なにか面白いことが起ころうとしていることを肌で感じた。が，結局のところそれがどのように纏まろうとしているのかは見通せなかった。見通せないからこそ新学術領域なのかもしれないけれど。「ゆらぎ」を仮定することで進化の方向性やそれを可能にした分子的基盤を明らかにするという発想は興味深く，これにめげず，振り落とされずに研究を進めていきたい。

文献

[1] Klimley, A. P. (2013). *The biology of sharks and rays*. University of Chicago Press.

[2] Kim, H. J., et al. (2013). Precise toxigenic ablation of intermediate cells abolishes the “battery” of the cochlear duct. *J Neurosci.* 33(36), 14601-14606.

キックオフシンポ感想記

東京大学大学院 理学系研究科
動物発生学研究室
博士課程 1 年 内田 唯



現在広く受け入れられている見方では、進化は環境の要請や偶然の作用によってある対立遺伝子が集団に広まっていくプロセスだ。ここでは、生物はいかにも柔軟に任意の方向へと進化していくように捉えられる。つまり、進化を駆動するのは選択や遺伝的浮動といった作用であり、生物はあくまでも無方向的にバリエーションを生み出し受動的に任意の方向へと進化していく（それまでの進化過程で獲得された遺伝子や制御方法をもとに変化するという制約は課すとしても）。実際のこれまで起こってきた進化では、例えば形態など、表現型の多様化の起こり方にパターンや方向性のムラがあるように観察される。しかしこの点は、あくまでも進化の履歴と偶然の産物だと見なされるか、あるいは正の淘汰の強さ、ニッチの多様さといったところで説明されるだろう。生物自身の内的な性質によって表現型進化の方向性が規定される可能性は、大々的には議論や検証の対象にされてこなかったと言える。

本新学術領域「進化制約方向性」では、個体に観察される性質（表現型揺らぎ）と表現型進化の制約がどのように相関するか解明し、表現型進化を方向づける要因・機構の理解を目指す。今回のキックオフシンポジウムでは、比較形態・発生・複合形質・共生・実験進化・理論といった各班が、それぞれの着目する階層での「揺らぐ表現型」と「制約されている（ような）表現型進化」を紹介し、抱負を述べた。さらに、領域全体として目指す、

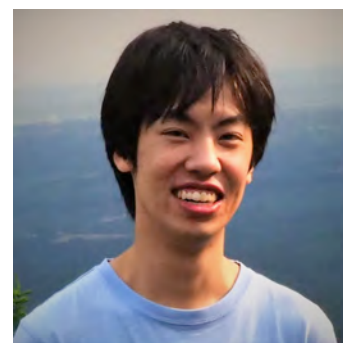
これらの階層を合わせ統一的に説明しうる理論を構築するという目標も提示された。特に複雑化した多細胞生物では、形態や発生・共生など様々な階層にパターンや一定の方向性が観察されるものの、自身の内的な性質に基づく具体的な説明はメジャーとは言えない。一方、大腸菌を用いた進化実験からは生物内在的な制約については示されてきたが、これらの知見を多細胞生物へ適用することを目指す向きはこれまでなかった。これら様々な階層・進化的時間スケールで示唆される制約を、理論生物学による揺らぎ応答関係によって統一的に説明できる可能性が探られる。目指すところは、様々な階層・進化時間スケールの表現型揺らぎの観測とそれをもたらす実態としての生物学的機構を見つけることだ。これらの意気込み等を聞いて、ようやく生物自身の性質に制約を受けた進化に関し大きく研究が進む（そして自分も切込むような研究ができる）かもしれないと気分が弾んだ。会場も椅子が足りないほど盛況であったことを見ると、この動きを待ちかねていた人口は多いのだろう。異なる階層で起こる別個の事象と捉えられていることが大きな枠組みの中でつながりうること自体に強く興奮するが（真理に近づくからだろうか）、もしかすると今後の進化に対する予測性にもつながるかもしれないと考えるとなお魅力的だ。私自身は脊椎動物の発生における制約に興味を抱いている。伝統的な発生学のアプローチのように関与する遺伝子やカスケード・その作用をつまびらかにすることはできないだろうが、反面、大まかな傾向として脊椎動物全体が従う進化の法則とその機構を記述できるかもしれない。さらに希望的なことをいうと、発生のアウトプットである形態の進化にも言及できるかもしれない。

この領域で、様々な階層を貫く進化的制約とその実態を記述する理論が完成された暁には、次には拘束自体の進化も具体的なアプローチの対象にできるかもしれない。原子生命から多細胞生物が進化する上で、必然的に拘束が生じうるのか？系統間にある（ように見える）拘束の強さの違いは、共通祖先からいかに生じてきたのか？多くのことを科学の俎上に乗せられる可能性を感じた。

新学術領域「進化制約方向性」キックオフシンポジウムに参加して

東京大学大学院 理学系研究科 生物科学専攻
産業技術総合研究所 深津研究室
修士課程 2 年 奥出 絃太

2017 年 10 月 1 日（日曜日）に東京大学本郷キャンパスの山上会館において、新学術領域「進化制約方向性」のキックオフシンポジウム『進化の制約と方向性』が開催されました。開始 10 分前には会議場の定席 100 が埋まり、その後補助席や立ち見の参加者が溢れるほどの大盛況でした。勉強中の身で大変恐縮ではありますが、本シンポジウムの開催報告をさせていただきます。



はじめに、領域代表である倉谷滋先生が本新学術領域の概要を紹介された後、古澤力先生が、『進化の制約と方向性』を考えるにあたっての理論的な背景を説明されました。表現型の進化には限界・拘束があり、その進化の方向性や変わりやすさには「表現型の揺らぎ

の大きさ」が相関することなど、普段ウェットな実験ばかり行っており物理学的な理論に疎い私にもイメージしやすい話が繰り広げられました。

続いて「進化を理解する」という共通の”方向性”を向きながらも、理論生物学から実験生物学、微生物や昆虫から脊椎動物など幅広いアプローチ・材料で挑戦されている計画研究班の6名の先生方が、本新学術領域に関連した「揺らぎ」「制約」「進化方向性」などの観点からそれぞれの研究を紹介されました。

一倉谷滋先生は「発生機構の揺らぎと新規形態獲得」として、脊椎動物を材料に筋骨格系の配置の揺らぎについて。一入江直樹先生は「脊索動物胚発生の分子発生システムゆらぎと進化的保存性の関連解明に向けて」として、遺伝子発現情報から見た、脊索動物の胚発生過程における制約について。一長谷部光泰先生は「摂動実験を用いた食虫植物の捕虫葉進化機構の解明」として、食虫植物フクロユキノシタを材料に、食虫葉と普通葉における温度による表現型の揺らぎについて。一深津武馬先生は「昆虫—微生物共生可能性の探索と分子基盤の解明」として、カメムシとその共生細菌を例に、共生できる細菌/できない細菌という共生進化の制約について。一古澤力先生は「多様な選択圧下での大腸菌進化実験による揺らぎ—応答関係の定量解析」として、様々な薬剤ストレス下における、大腸菌の薬剤耐性に関する進化の揺らぎ・方向性について。一金子邦彦先生は「進化のゆらぎ応答理論の確立と多階層・発生過程への展開」として、得られる様々な実験結果に対し、理論・シミュレーションの観点からどう展開していくかについて。

各発表後の質疑応答や合間のコーヒブレイク、そしてお酒を交えた懇親会においても参加者の議論は絶え間なく続いていました。進化における「制約」「揺らぎの大きさ」「方向性」とは何を指しているのか？演者によっても定義は異なるように感じられると同時に、まだ確立途中にある本新学術領域がどのように展開していくのか、多くの参加者が思いを巡らせたことでしょう。『進化の制約と方向性』という新学術領域がまさに”進化”していく過程を目の当たりにしている、そんな一員として関わることができて非常に嬉しく思います。

余談ではありますが、懇親会終了後も6人の計画研究班の先生方が本郷三丁目のスターバックスのテラス席を囲んでいるのを目にしました。本新学術領域「進化制約方向性」は、もう始まっています・・・！

キックオフシンポジウム「進化の制約と方向性」感想

東京大学大学院 理学系研究科
物理学専攻 古澤研究室
修士課程1年 井坂 諭紀雄

私はこれまで、セミナーなどの場面で、大腸菌の進化やその進化を理論的に定式化するのかについて何度か聞く機会があった。表現型の揺らぎと進化的な拘束に相関がある、大腸菌の環境変化に対する進化に拘束があるというのは実に興味深い話ではあるが、やはり進化と



いえば、より身近な真核生物の進化がどう記述されるのかに興味があった。大腸菌のような原核生物の進化の法則が、より複雑な真核生物においてどのように適用されるのか、どのような修正が必要になってくるのか、その一部でも理解できたらと密かに期待して、本シンポジウムに参加した。

物理を学んでいたので、生物的な **terminology** はなかなか **follow** しきれない部分もあったが、全体として、個々の生物に対して個々のスケールでの制約を評価し、その実態を探ろうとしているように感じられた。異なる生物において得られた現象論的な拘束が統一的な理論としてどう記述されるのか、まさに生物の普遍性、生命とは何かに迫る研究だと言えるだろう。正直なところ、そのような普遍性が存在するのかどうかは不明であり、難しい課題であると考えられるが、とりあえず自分なりに考察してみようと思う。

生物の状態は十分な次元の状態空間上の 1 点に **map** されるとする。状態空間は生物によって様々であり、単細胞生物であれば遺伝子発現や細胞の形状などであり、多細胞であれば、細胞間相互作用や 3 次元的な細胞の配置なども含まれるだろう。このような状態空間上で生物の状態の時間発展は 1 次元的な軌跡を描くだろう。状態空間上の各点では、その点が表す生物の状態と、対象とする環境に応じた **fitness** が評価できるとする。**fitness** による実効的な状態の制限が表現型の拘束であると考えられる。

遺伝子型に対して表現型は一意ではないのでなんらかの分布に従っていると考えると、遺伝子型に対する **fitness** の確率分布が形成できる。この確率分布の地形が進化的拘束に対応しているのではないかと考えられる。仮にこの関数形が与えられたとすれば、個々の生物がどのような進化過程を経て、なぜそれが可能であったかの一端が見えるのではないだろうか。私の直感では表現型が大きく変わるような進化は **fitness** の山から山への移動であり、間には深い谷があるように想像される。その谷を越えられるかどうかは個々の生物の実効的な表現型の揺らぎに依存していると考えられる。ここまで考えてふと思うことがある。そもそも上記のようなことが本当に起きているのか、それを実際に検証するにはどうすればいいのかなどという議論は置いておいたとしても、果たしてここから生物の普遍性がわかるのだろうか。あるいはわかった気になるのだろうか。個人的には微妙だと感じている。

このように、問題提起さえも私にはままならないこの新学術領域が、今後、どのような発展をしていくのか、是非注目していきたいと思う。

連載エッセイ（2）

巴里自然史博物館滞在記：今に残る骨董品

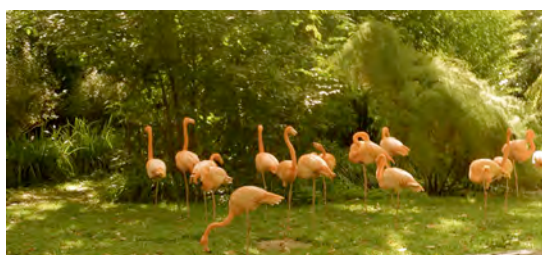
最初に書いた日：2012. Oct. 31

倉谷 滋

2012 年末から 2013 年にかけて私が通っていたパリ国立自然史博物館（le Muséum national d'histoire naturelle: MNHN）というのは、物理的にはいわゆるパリ植物園（le Jardin des Plantes de Paris）の中に位置しているが、博物館に植物園が所属しているというのが本来的には正しい。私の居場所は博物館所属の「生理学研究分館」における Giovanni Levi 博士の遺伝学研究室なのだが、事の成り行きというか、研究上つながりの深い古生物学者、Philippe Janvier 博士の研究室にも同時に机を持つことが出来た。そうだけでなく、私が古生物学ラボに入り浸ったであろうことは容易に想像が付くだろう。

生理学分館は、ヨーロッパで最古の動物園のひとつ、あるいはメナジュリー

（ménagerie）に接している。この動物園、一説に依ると 19 世紀初め、巴里で疫病が蔓延した折、菌を媒介するのが街に屯する雑多な動物ではないかという説が流布し、解剖学者のエティエンヌ＝ジョフロワ・サンチレルがその囲い込みを発案、ナポレオンの支持を得てなつたと伝えられるらしい。



メナージュリーのフラミンゴ

この動物園はある意味、それ自体が「骨董」である。動物より、動物を収める檻や、爬虫類昆虫館（Vivarium）の飼育部屋の作りにこそ注目すべきである。喩えていうなら、映画「ハリー・ポッター」の第 1 作目において、古風な動物園の爬虫類館からニシキヘビが逃げ出すシーンがあったが、あの建物より更に一段クラシック度を増強した感じだと思えばよい。無論、園の規模は決して大きくはな

い。現在のスタンダードからすればむしろ遊歩道のようにさえ見える。しかし、それがまたいいのである。19 世紀の人々がどのように動物を見ていたのか、まるでタイムスリップでもしたかのように体験できる。



爬虫類館

タイムスリップというのなら、アカタテハ *Vanessa indica* や蜜蜂 *Apis mellifera*、そしてスズメバチに擬態した花虻のたかる植え込みに囲まれた、国立自然史博物館 Muséum national d'Histoire naturelle (MNHN) の古生物学・比較解剖学分館もまた、エッフェル塔と同時期に建造された当初の姿をそのまま今に留める超一級の骨董品である。何でも近年老朽が著しく、建て替えの予定があると、確か数年前から聞いていたが、今でも工事の兆しはない。Janvier 博士によると、財政的に改築がままならず、相変わらず同じ建物で何とかやっているのだそうだ。少なくとも私はそれを聞いてほっとした。私はこの、19 世紀末の状態をそのまま保持した建築物がいつまでも無くならないで欲しいといつも願っていたのである。博士もまんざらでもないようであった。

あれは 2007 年の巴里での国際脊椎動物形態学会（ICVM8）であったか、前回ここを訪れたときには、発掘したてのバジロザウルス（*Basilosaurus*）をクリーニングしている最中であった。この動物はゼウグロドンという

哺乳類の名も持ち、じっさいそっちの方が相応しい。「サウルス」と名が付いていても、れっきとした哺乳類。古い鯨の仲間なのである。それがどこへ行ってしまったのかと博士に聞くと、ちゃんと完成したとのこと、展示室に置いてあるのを見せてくれた。

確かに、全体的な印象は大型海棲爬虫類、とりわけ一見モササウルス (*Mosasaurus*) に似る。しかし、それが哺乳類である証拠には、顎が単一の骨より成り、哺乳類のそれに特徴的な突起を備え、そこには一定数の、場所によって形を変える、明らかに異歯性の複雑な歯が生えている。爬虫類には通常、単純な杭状の歯しか生えないのだ。ついでに、頸椎数も哺乳類的である。さらに、哺乳類に典型的な形の肩胛骨…。Richard Owen よろしく、バジロザウルスが哺乳類であることを自分の眼で確かめたのち、これまで幾度も眼にした展示物を確認する。

トキの全身骨格標本もまた健在。

あらためてゆっくり見学すると、これまで気がつかなかったものが幾つもある。例えば、さまざまな動物の臓器や脳の液浸標本の展示コーナー。残念なことに、新しい法律により、アルコールやホルマリンなどの液体に付けた標本の展示が禁止となっただけ。何でも、漏れ出した蒸気が人体に有害だからということらしい。今は何とか以前のまま置いているが、いずれ撤去を余儀なくされるのだそう。こんな具合に、市民と本物の科学の距離はどんどん隔たって行くのである。ある種の危険やきわどさを伴った「本物」に間近に触れ、そのことによって刺激され、育てられたかつての科学少年としての私は、必要以上に神経質となった現代社会の犠牲となるであろう、これからの子供達を思い、「良いものはそのまま残したい」と望むのみ。ここには、私の子供の頃の夢が確かに眠っているのだ。



上：バジロザウルス全身骨格。横に立つは Janvier 博士；
下：バジロサウルス頭部

例えば、キュヴィエの解剖した骨標本の数々。彼独特の標本作製の方法は、分解した骨要素を、丁寧に昆虫用の標本箱に並べて行くと言うもの。加えて、ジョフロワから送られたエジプトのミイラから復元したという、ネコと



上：キュヴィエの手になる解剖標本；下：エジプトのミイラより、トキとネコ

Constrained & Directional Evolution Newsletter Vol. 1 No. 2

発 行 : 2017 年 10 月 15 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/>