



Evolutionary Theory for

**CONSTRAINED & DIRECTIONAL DIVERSITIES**

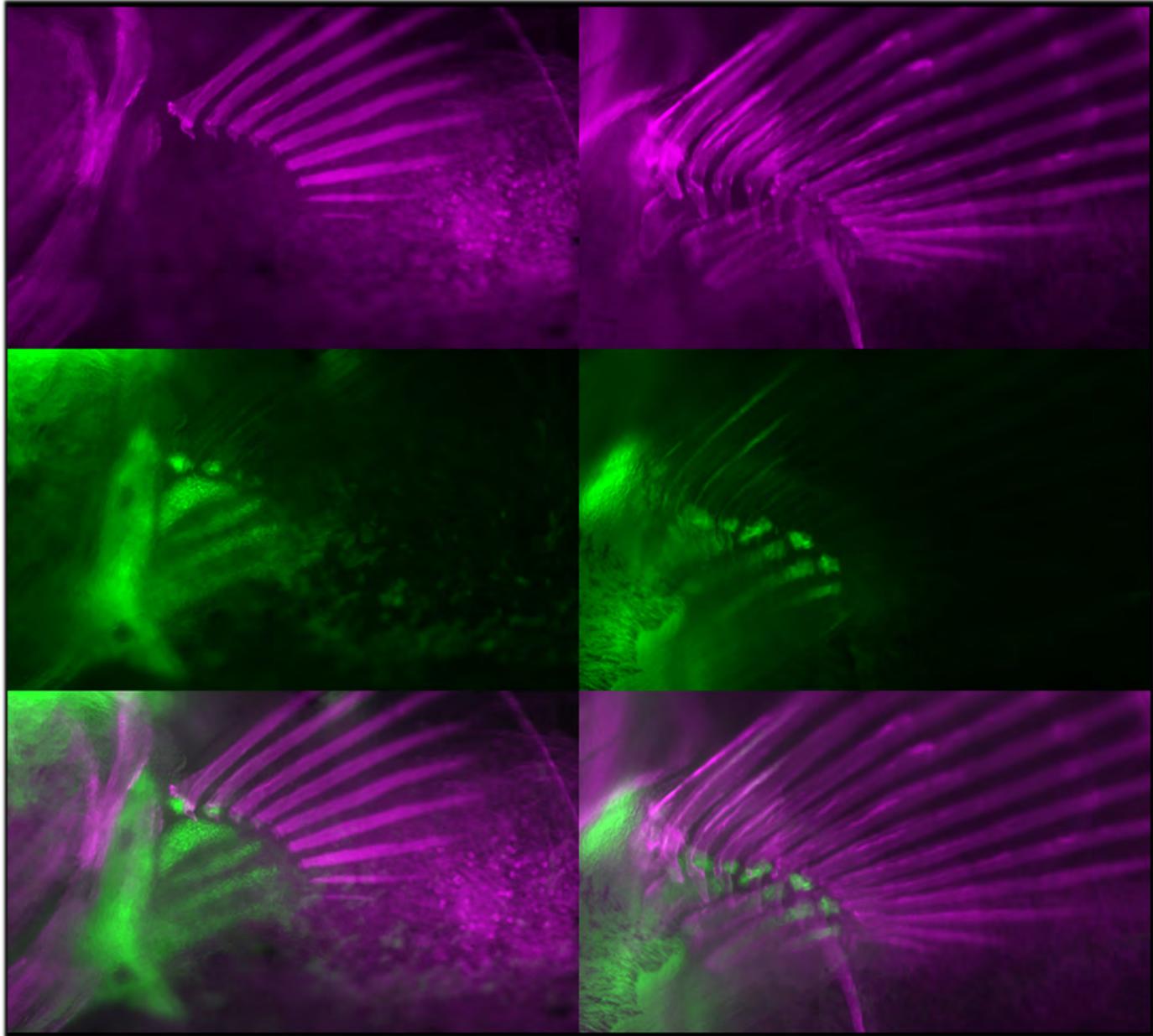
Grant-in-Aid for Scientific Research on Innovative Areas

Constrained & Directional Evolution Newsletter Vol. 4 No. 4 (2020)

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～



シンポジウム「表現型進化を制約しうる発生基盤」開催報告

表紙:ゼブラフィッシュの胸ヒレ骨格の軟骨と硬骨

ゼブラフィッシュの胸ヒレの鰭条と担鰭骨の関係を解析するため、col2a:EGFP(軟骨細胞)のトランスジェニックフィッシュとAlizarin Red染色(硬骨)により、その発生過程を観察した。基部担鰭骨の骨化前(左)と後(右)で、先端担鰭骨の形成位置が鰭条根本から基部担鰭骨側に変化している。

(東北大学 阿部玄武)

## 目次

進化学会シンポジウム「表現型進化を制約しうる発生基盤」開催報告	上坂将弘、内田唯	1
シンポジウム「表現型進化を制約しうる発生基盤」概要		2
ゼブラフィッシュ胸ヒレ鰭条の前後軸パターンと条鰭類胸ヒレ骨格の進化傾向	阿部玄武	3
顔は発生原基の組合せ:哺乳類の鼻は爬虫類の口先	東山大毅	4
脊椎動物胚の進化を方向付けうる表現型の頑健性	内田唯	5
計算機実験で探る進化制約のしくみ	香曾我部隆裕	6
表現型拘束の進化的起源とその進化に対する制約	佐藤匠哉	7
連載エッセイ(25) 科学とSFの狭間:レプリカントの作り方(1)	倉谷滋	8

# 進化学会シンポジウム

## 「表現型進化を制約する発生基盤」開催報告

2020年9月6日から9日にかけて、第22回日本進化学会年会在初のオンライン大会として開催されました。今回は、本新学術領域共催シンポジウムとして「表現型進化を制約する発生基盤」を開催したので、その報告をさせていただきます。

進化学会はその名の通り、生物の進化現象を扱う国内の研究者が広く集う学術集会です。この中で進化発生学において私たちがいまだ問題意識のみならず、ここから引出される(ある種の)一般則を伝え議論していくことには大きな意義があるでしょう。このような考えのもとに今回のシンポジウムを企画しました。さらに、本シンポジウムにおいて、以下の点を取り入れたいと考えました。まず進化に制約を与える仕組みを特に扱っている研究者に発表してもらうこと、その対象となる階層がシンポジウム内で多様になること、そして実験ベース・理論ベースの両者が入ることです。このような観点から、特に研究の遂行を実際の現場で牽引する若手5名に登壇を依頼しました。さらに話題提供だけでなく、各自が考えている「表現型進化を制約する発生基盤」(もしくはさらに抽象的な生物の持つシステム)を階層を囲んで統合的に捉えることができるか、実験と理論の双方向での一般化は可能かなどを議論するために、総合討論の時間に具体的な議題を設定することにしました。

実際には時間が押すところもありましたが、(時間枠外の自由参加時間として)総合討論で議論を行うことができました。オンラインという形式もあって、100名を越す方に参加していただき、また多くのコメントや質問を受け、何らかの影響を参加者の皆さんにも受けてもらえたのではないかと期待しております。

同日に、もう1つの本新学術領域共催シンポジウム「システム頑健性と進化可能性」と合同で懇親会を行いました。オンラインで行ったこの懇親会においても、引き続き議論を行うことができました。新型コロナウイルスの流行に伴い、遠方の研究者同士で議論する機会が少なくなっていますが、そのような状況において本会が少しでも有意義なものになれば望外の喜びです。

本ニュースレターでは、以下に企画概要と講演要旨を収録いたします。

シンポジウム企画者 上坂将弘、内田唯

# シンポジウム「表現型進化を制約しうる発生基盤」概要

S03 表現型進化を制約しうる発生基盤  
共催:新学術領域研究「進化制約方向性」

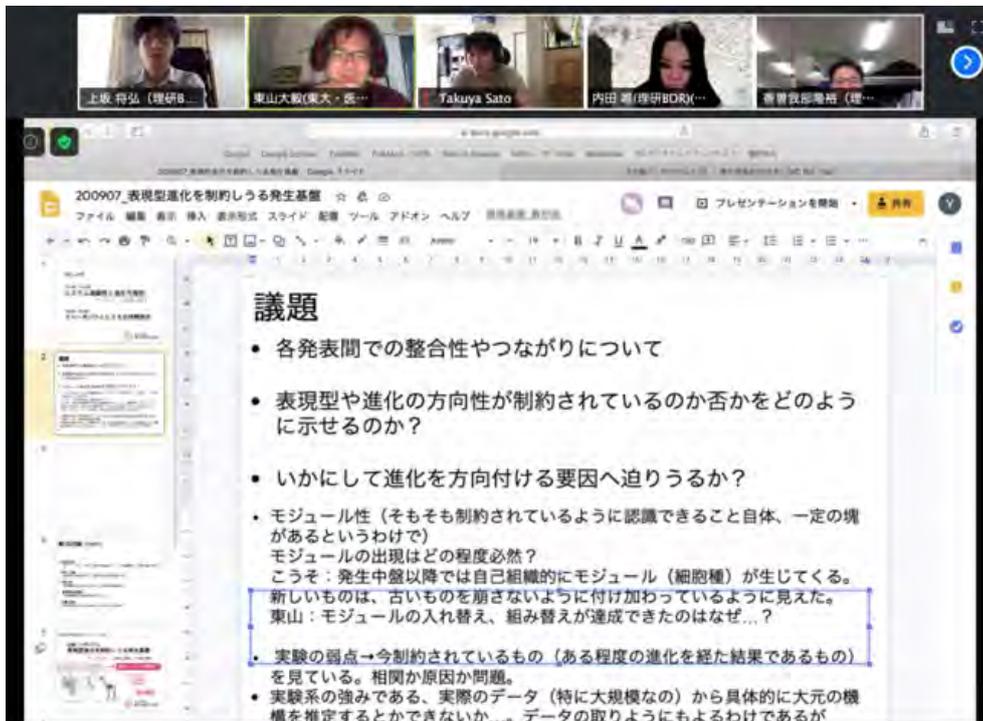
企画者:  
上坂将弘(理研 BDR)  
内田唯(理研 BDR)

講演者:  
阿部玄武 (東北大学)  
東山大毅 (東京大学)  
内田唯 (理研 BDR)  
香曾我部隆裕 (理研 BDR)  
佐藤匠哉 (東京大学)

日本進化学会 第 22 回 オンライン大会  
2020 年 9 月 7 日(月)10:00-12:00

趣旨:

動物の進化では、表現型によって変化しやすさが異なるようだ。この表現型進化のバイアスは、胚発生過程が由来の一端であると考えられるが、どのような性質や条件が原因かまだほとんど明らかでない。本シンポジウムでは、表現型進化を方向付けうる発生現象について、実験から理論解析までの様々なアプローチによる研究について講演を行う。さらに、「いかにして進化を方向付ける要因へ迫りうるか？」という問に対して、遺伝子制御や細胞間相互作用、組織レベルのダイナミクスなど多様な階層を跨いだ横断的な議論を行う。



Zoom による総合討論の様子

## ゼブラフィッシュ胸ヒレ鰭条の前後軸パターンと条鰭類胸ヒレ骨格の進化傾向

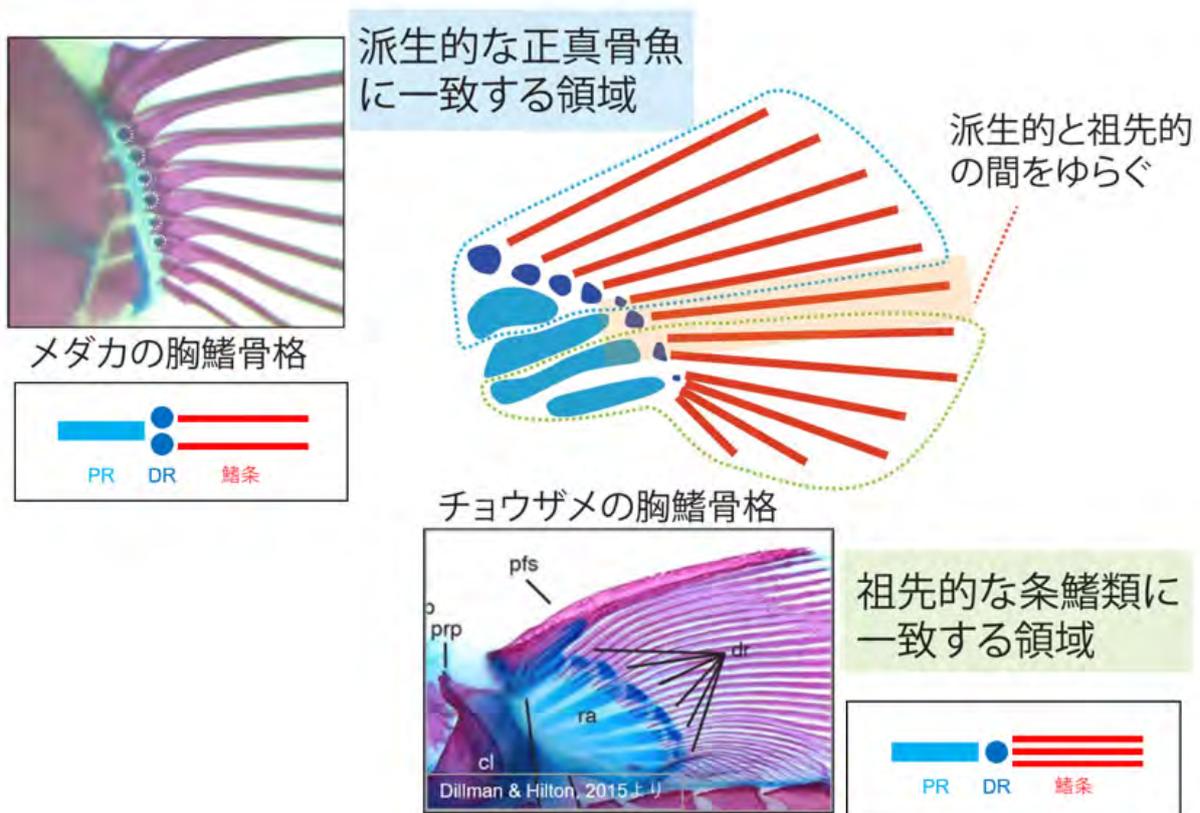
### Evolutionary developmental relationship between AP-pattern of pectoral fin ray in zebrafish and transition of the skeletal pattern of pectoral fin in ray-finned fish

○阿部玄武、田中祥貴、梅田哲也、田村宏治(東北・院生命)

硬骨魚のヒレは基部側の担鰭骨と先端側の鰭条によって構成される。骨化の様式が異なるそれらは、しかしながら近年その細胞系譜と発生メカニズムに共通性が認められるようになった。その内鰭条は多様性に富んだ構造で、器官の発生や機能を形態進化に結びつける興味深いモデルとなる。例えば、胸ヒレ鰭条は多くの魚種で個体ごとに本数のゆらぎが見られる。また鰭条は魚類が様々な環境に適応するのに多様な形態も示す。我々は最近、ゼブラフィッシュの胸ヒレ鰭条が本数のゆらぎ方で前後3つの区画に分けられることを報告した(Hamada et al., 2019)。この前後軸パターンにおいて、前側は派生的な、後側は祖先的な条鰭類で見られる鰭条-担鰭骨接続を示していた。つまりゼブラフィッシュの胸ヒレはその変遷途中を示している可能性がある。発表では、この条鰭類胸ヒレ骨格の進化傾向とゼブラフィッシュ胸ヒレ鰭条の前後軸パターンの関係を発生メカニズムの観点から議論したい。

分類: 発生・形態進化

キーワード: 鰭条、ヒレ発生、形態進化



#### 条鰭類の胸ヒレの鰭条・担鰭骨の関係

ゼブラフィッシュの胸ヒレの鰭条と先端担鰭骨の関係は、前側から 1:1、中部の 1:1 or 1:2、後方の 1:many と、3つの領域に分けられる。そしてこの領域は、前側が派生的な正真骨魚(メダカ)と同じ対応関係になっており、また後方の 1:Many という領域が祖先的な条鰭類(チョウザメ)に見られる形質である。さらに、中部の領域において、前方と後方で見られる傾向が揺らいでおり、ゼブラフィッシュの胸ヒレは祖先的と派生的の中間の形質を示している。

## 顔は発生原基の組合せ: 哺乳類の鼻は爬虫類の口先

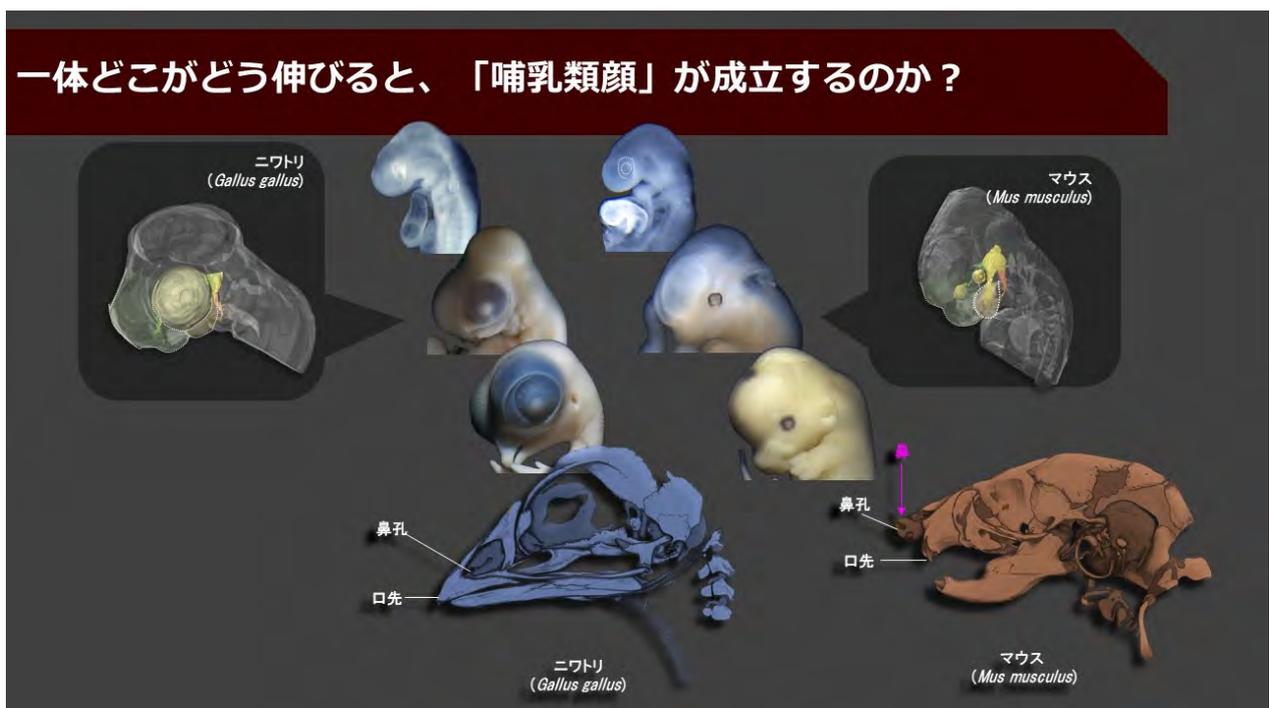
Vertebrate face as the composition of primordia: mammalian nose is reptilian jaw-tip

○東山大毅、栗原裕基(東大・医)

顔の真ん中に鼻がある—これは鼻を独立に動かして「嗅ぐ」ことを可能にした、有胎盤哺乳類の特徴である。では、トカゲやニワトリのように「上あごに鼻孔が開いただけの顔」から哺乳類顔に至るにはどんな変化があったのか？ 我々は鼻を持つ”哺乳類顔”が、顎口類に共有される顔面突起の組み方のズレで生じたことを、発生学的な実験や胚、化石を含めた比較から示した。祖先的には上あごの先を構成していた胚原基(内側鼻隆起)が、哺乳類では鼻として顎から独立し、代わりに新規な口先が別の原基(上顎突起)より構成される。この原基の組み方の差は、末梢神経のような解剖学的構造の位置関係とも符合した。上記の通り、顔面形態は、発生モジュールたる顔面突起どうしの曲げ伸ばしと組み方で決定づけられ、これらによる制約を逸脱することはどうも難しいらしい。その背景の機構はまだ定かではないが、本会をきっかけに新たな議論が進めば幸いである。

分類: 発生・形態進化

キーワード: 脊椎動物、哺乳類、モジュール



脊椎動物の頭部は顔面突起の組合せで成り立つ。その組合せが哺乳類では大きくズレたようだ。しかしその背景の機構はまだ定かではない…

## 脊椎動物胚の進化を方向付けうる表現型の頑健性

### Phenotypic robustness that may bias the evolution of vertebrate embryogenesis

○内田唯 1,2、入江直樹 2(1 理研 BDR、2 東大・院理)

動物の胚発生過程は自由に進化してきたわけではないようだ。脊椎動物では発生中期(咽頭胚期)が種間で強く保存されており、またこの時期はボディプラン要素が出揃うことから数億年スケールの形態進化をバイアスする可能性も指摘されている。しかしなぜ咽頭胚期が強く保存されるかは明らかでない。我々は「咽頭胚期では表現型が頑健であるため進化的多様性が生じづらい」という仮説を立てた。この議論では、表現型の頑健性と表現型の進化的多様性の相関が前提となる。本研究では表現型を遺伝子発現状態とし、同じ遺伝的背景での表現型の差と、表現型の進化的多様性を発生段階ごと計測した。咽頭胚期では頑健性・多様性いずれも小さく、仮説を支持する結果が得られた。ここから、変異によらない表現型の頑健性が長期の進化に影響する可能性が浮上している。このような頑健性の進化的な起源など明らかでないことはまだ多いが、解明に向けて議論をしたい。

分類: 発生・形態進化

キーワード: 発生拘束、進化発生、揺らぎ

## 発生中期の変更しづらさが、ボディプランの保存に寄与する可能性がある



## Question

脊椎動物の咽頭胚期はなぜ保存されるのか？

遺伝子発現状態の類似性

Irie N & Kuratani S, Nat. Commun., 2011  
Irie N et al., Dev Cell, 2011  
Chap AN & Adryan B, PLoS ONE, 2013  
Yang et al., Nat Genet., 2013  
Hu et al., Nat. EcolEvol, 2017

非常に多様な環境に適応した脊椎動物の間でも、発生中期(咽頭胚期)は強く保存される。特にこの発生時期はボディプランの構成要素が出揃う時期であり、ボディプランの保存の観点からも注目されている。本研究では咽頭胚期が保存される原因を追う。

# 計算機実験で探る進化制約のしくみ

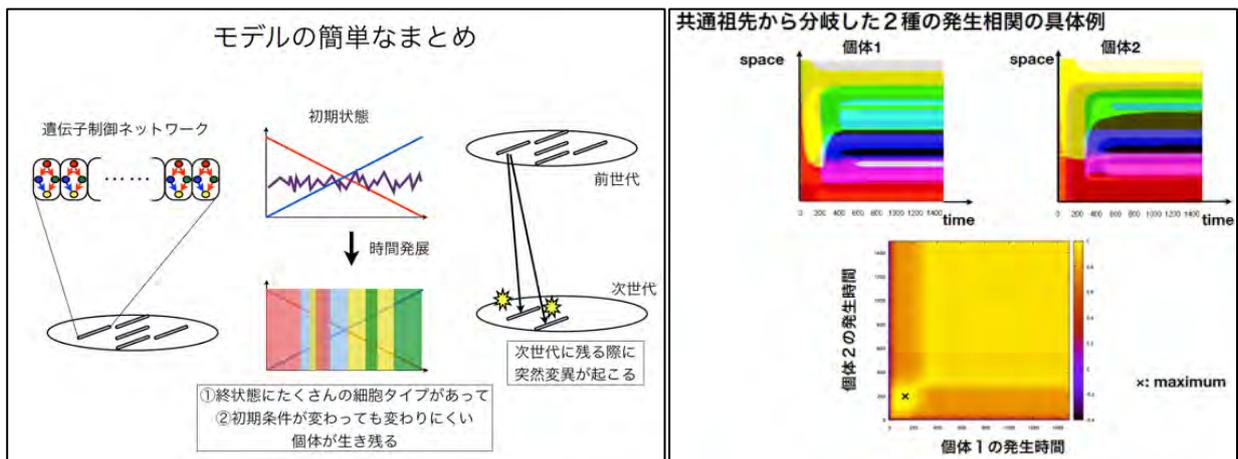
## Search for mechanism of constraint in evolution from numerical simulation

○香曾我部隆裕1、倉谷滋1、金子邦彦2(1 理研 BDR、2 東大・総合文化)

発生過程は進化を経てかたちづくられてきたものである。発生過程の進化に制約があることは観察事実から示唆されているが、その仕組みについてはよくわかっていない。祖先種の遺伝子発現制御に関する情報が得られないこと、進化実験に非常に長い時間がかかるということからその解明は困難であると思われる。これを解決する手法として進化シミュレーションが近年注目を得つつある。今回我々は空間パターンを制御する遺伝子ネットワークを計算機上で繰り返し進化させて比較した。並列に進化させた個体同士の発生中の遺伝子発現状態を比較した結果、発生の中期が最も類似する、すなわち発生砂時計の様子を観察することができた。その仕組みを調べたところ、発生初期のゆらぎを逡減させて発生過程を安定させる仕組みに関係があることがわかった。発表ではこれら結果と先行研究を踏まえ、進化に制約を与えるる発生のしくみについて議論したい。

分類: 発生・形態進化

キーワード: 進化シミュレーション、遺伝子ネットワーク



本研究で行った進化シミュレーションの概略図

進化シミュレーション結果の例  
共通祖先から分岐した2種の発生ダイナミクス  
の相関が中期に最大値を持つ。

## 表現型拘束の進化的起源とその進化に対する制約

### An evolutionary origin of phenotypic restriction and its constraint on the evolution

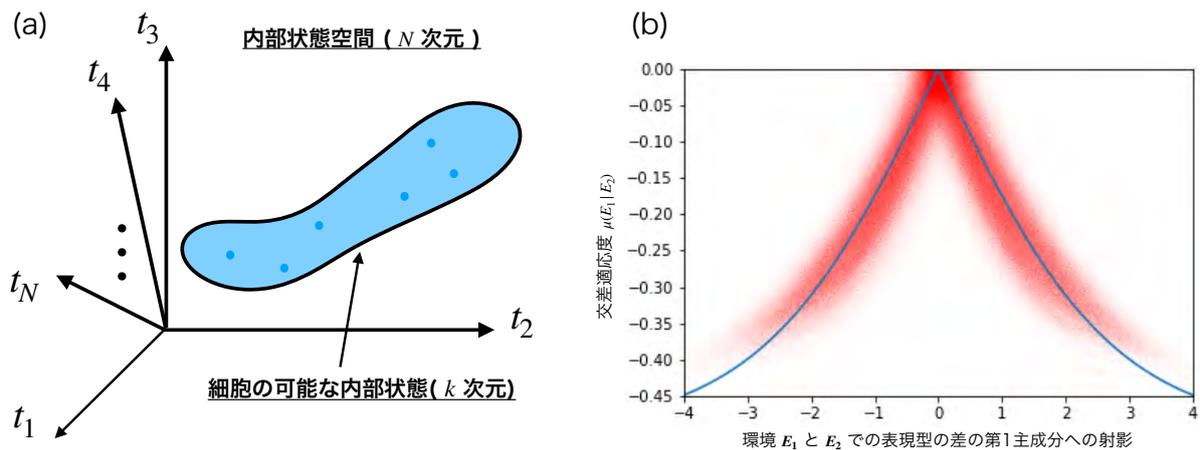
○佐藤匠哉 1, 金子邦彦 2

1,2 東大総合文化, 2 生物普遍性機構

近年、細胞の環境変化に対する応答・進化におけるトランスクリプトーム変化は、遺伝子の数と比較して非常に少数の方向でしか変化しないことが実験において示唆されている(Kaneko et al. 2015, Horinouchi et al. 2017)。我々はこれまでに、この現象に対する理論的な表現を与え、細胞モデルの進化シミュレーションにおいて、実際にそのような性質(表現型拘束)が獲得されることを示した。しかしながら、表現型拘束が進化に対してどのような制約をもたらすのかについては議論されてこなかった。そこで本発表では、細胞モデルの進化シミュレーションにおける表現型拘束の獲得について紹介した後、表現型拘束が細胞のストレス環境進化においてどのような拘束を与えるかについて、現在我々が行っている細胞モデルの進化シミュレーションの結果を通して議論する。

分類:その他

キーワード:表現型進化、トレードオフ



(a) 表現型拘束の概念図。細胞の環境変化への応答・進化における内部状態変化は、その構成要素種数に比べて非常に低次元の空間に拘束されている。

(b) 表現型拘束の存在下での進化における交差適応度(環境 E1 において進化した個体の環境 E2 での適応度) は、その表現型拘束方向の情報にコードされている。

## 科学とSFの狭間：レプリカントの作り方

「お気に召しまして、そのフクロウ？」  
「人造ですか？」  
「もちろん、違いますわ」  
「さぞかし、高価なんでしょうな」  
「ええ、とても。秘書のレイチェルです」

映画『ブレードランナー』（1986）のオリジナル・シナリオより

倉谷 滋

人造人間を作るという本格的、かつ根源的な夢想の始まりは16世紀東欧ユダヤ人によるカバラ神秘思想的な「ゴーレム」の創造だろうが、そのいわゆる「ゴーレム信仰」もまた古くキリスト教以前の時代に遡るらしい。それが時を経て形を変え、錬金術師が創成を試みた「レトルトの中のホムンクルス」や（それはキリスト時代にすでに夢想されていた）、最初期のSFにおいて科学者の手になる「フランケンシュタインの怪物」と相成るわけだが、この変遷には「人工的にヒトを作る」という同じ命題に対し、呪術と科学がそれぞれどのような方法論をイメージし、歴史の上でそのイメージがいかに変化してきたか、その過程が如実に表れているように思える。

怪物の夢想の歴史を語った種村季弘が引くように、それはヘルムート・ズヴォボダの提唱した「人造人間創造の三系譜」と符合することになるらしい。そのひとつは、ゴーレムの属する魔術的・神話的系列であり、第二は精巧な機械仕掛け、つまりロボットの系列、そして第三が臓器移植や細胞培養、遺伝子操作などを含む生物学的系列で、フランケンシュタインからレプリカントに至るまで、バイオ人造物のすべてがここに含まれる。「荒ぶる神」としての「初代ゴジラ」、それを迎え撃つ機械工学の粋を集めた「メカゴジラ」、さらにバイオテクノロジーが産みだしたゴジラの仇敵、「ピオランテ」という系譜もまたこれと符合するのが興味深い。それもひとつのテーマと

はなりうるだろうが、とりあえず以下では、人造人間を扱ったSFのなかで、とりわけ第三の系譜にまつわる現代的諸問題を見ようと思う。

むしろ、その過程の本質は自然観の科学的進歩にほかならない。が、それでも人格や靈魂や意識といった、「人間を人間たらしめているもの」に対する畏怖の中味だけは古代からさほど大きく変わってはいないように見える。

『フランケンシュタイン』に飽きた現代人として、いまだに『鋼の錬金術師』を楽しむことができるように。あるいは、種村季弘のいうように「神あるいは神々が人間を創る創造行為と、人間が人造人間や人工の怪物を造る行為との間には、何かしら無気味な、その終局に得体の知れない虚無がとぐろを巻いて待ち受けていそうな並行関係がある（種村季弘『怪物の解剖学』を参照）。

いずれにせよ、人間はダ・ヴィンチ以前より、「ヒトが作られる過程」としての妊娠・出産という現象に果てしない興味を示してきた。この現象こそが、「創造」にまつわる未知の本質を孕んでいるのであり、初期の解剖学はまさにそれを知るためにこそ存在した。状況は物理化学でも同様で、長らく動物の肉体を構成する物質と、非生物を作るものとの間には超えがたい一線があると考えられてきた。それが誤りであるとわかることによって発展した分野がいわゆる有機化学である。生体を作

る分子が無機物から合成されることにより、生命が科学的に脱構築されたのである。ならば、生命創造は新しい科学で扱うことが可能だということになる。少なくとも原理的にはそれは正しいと信じられ、現代生物学は唯物論的、還元主義的思想のもとに成立している。SFにおける生命観もこれに従う。しかし、いざそれに従って生命創造を実践しようとなると、そこには理想化された自然観とは別のレベルにある、いくつかの由々しき問題が浮上してこざるを得ない。現実存在する困難さは、SF世界においても困難なのだ。

まず、科学的に不可能な技術や、自然法則の中に見る限界の確信犯的無視、もしくは逸脱こそが、SFをSFとして成立させている。たとえば、自然現象における限界の例として、「動物の進化的巨大化は必然として頭打ちにならざるを得ず、その結果、映画に見るようなサイズの怪獣は進化し得ない」と説明した。が、ここでいう「科学的に不可能な技術」というのがまたちょっとくせ者で、原理的にそもそも不可能な技術の例として、おそらく「ワープ航法」は期待できない公算が高く、タイムマシンもそれと似た理由でおそらくできないと今のところは考えられている。が、それは科学の発達によって後付け的に言えること、未解決問題のどれが可能で不可能なのか、根本のところでは「誰も知らない」と身構えておいた方がいい。あくまで、「いま、不可能と考えられていることが、科学の発達の結果、できたとしたら」という仮定に基づいて書かれた小説やドラマがSFなのである。では、何を可能にすれば「人造人間」ができるのか。

#### ■ ラブクラフトのSF性

ポーやヴェルヌの後継者と目されていた20世紀の怪奇小説家、H. P. ラブクラフトが自ら「コズミック・ホラー（宇宙的恐怖）」と呼んだ「ネクロノミコン世界」。それもまた、ホラー小説のアイテムである以前に、まず「SF的設定」として見るべきだ。彼の小説に登場する太古の宇宙生物、超空間を生身で旅する「大いなる種族」も、模範的なSFの体現者というべきなのである。例えば、小説『闇にささやく者』では、アインシュタインの相対性理論を超える理論を手にし、「エーテル」の中を飛翔する翼を備えたエイリアンが登場するが、これも単なる魔法などではなく、一種の

「ワープ航法」か、それに類した現象と考えるべきなのである。

ラブクラフトは時空に関するさまざまな架空の理論を、彼の空想上の宇宙論として展開した（『クトゥルフの呼び声』『時を超える影』など）。こういうと意外に思われるかも知れないが、どこか稲垣足穂や宮沢賢治とも通ずる作家なのである。これら一連のイメージの背後には、紛れもなくラブクラフトがかのアインシュタインと同時代人であり、1905年の「特殊相対性理論」、1915-16年の「一般相対性理論」の登場や、「冥王星の発見」などを原体験で見ていたことが影響していたらしい。あの頃、まだ世紀末は終わっていなかったのだ。

ここには、典型的な「SFの時代性」が見え隠れする。現代に生きる我々は、「相対性理論は鉄壁だ」と考えがちで、その上で「ワープ航法」を持ち出すことには確かに確信犯的とならざるを得ない。しかし、ラブクラフトの時代はまだそうではなかった。「君は知っているかね。アインシュタインが間違っていたということ……」のような台詞は、20世紀初頭だからこそ、リアルなSFテイストを持ち得た。今ではすっかり忘れ去られている「エーテル」も、ひょっとしたら明日発見されるかも知れず、そうなればアインシュタインも自説を引っ込めるかも知れない。それが20世紀初頭の空想科学的リアリズムだった。いまから見れば当時の世界観・宇宙観はまだまだ「揺れ」ていたのだ。この「揺れ」がおさまって初めて、科学の不可能性は定義される。

科学技術は時代とともに進歩する。したがって、不可能性の一部は、将来的に可能になるかも知れない。実際、過去にはフィクションであった潜水艦は、今当たり前のように建造され、もはやそれがSFのアイテムではなくなった一方、「原理的に不可能」と証明されたことや、そもそも定義や公理に関わることはいつまで経ってもなんともならない。例えば、今後どのように科学が発達しようとも、「円周率を最後まで書き出す」とか、「幾何学的に角を三等分する」などということは原理的にできない。それでもこの世には、「答えが存在せず、非科学的でもあるが、人間だからこそ問いかけてしまう、純粹に人間的な問い」というものが存在する。その所在を教えるのもまた科学であり、SFなのである。

## ■ ファインマンの理想

さて、ここからの問題は「ブレードランナー世界はいつか訪れるのか」、つまり、「本格的なジェネティック・エンジニアリングは可能になるのか」である。これは、思い描いた形通りの人造人間や人造動物を、DNAと人工細胞の設計をベースに実現できるか、という問題なのである。むろん、今のところは不可能だ。が、SFの世界では、多くの文明がそれを可能にしている。まず、超古代文明のアトランティス人がそれを可能にし、一本の染色体でギャオスを作った。同様に映画『スプリース』でも、悪魔とも天使とも付かない、艶めかしい人間の少女に似た生物を産みだしている。そして、21世紀初頭の架空世界のロサンジェルスでは、タイレル社がやはりDNAをデザインし、多くの点で人間に勝る人造人間、レプリカントを生産ラインに載せた。そこでゲノムをデザインしていたのは、J. F. セバスチャンという名のしがない労働者だ。同様に、DNA編集による人造人間・人造生物を扱ったSF作品は他にも多い。さて、ではこの「夢のDNA操作技術」は原理的に可能なものなのか否か。

いつも私が思い出すのは、「作ることでできないものを理解しているとは言えない」という、物理学者、リチャード・ファインマンの言葉だ（What I cannot create, I do not understand; 他にも有名な台詞として「簡単な言葉で説明できないなら、あなたはそれを理解していないのだ - If you can't explain something in simple terms, you don't understand it」がある）。それは、生物学者に対して発せられたものではない。むしろ、近代科学全般における「理解」の概念を普遍化・理念化したものと見た方がよい。真の意味で理解できたのなら、自分でそれを構成できて当然だろうという、エンジニアリング指向の科学哲学をここに汲み取ることができる。

ファインマンのこの警句はおそらく、多くの生物学者にとって耳の痛いものとして響くに違いない。進化発生学者の私でさえ、同じ感慨を持つ。というのも、これまでさんざん遺伝子の機能や発生の機構を解明してきながら、人間はまだ、最も単純な多細胞動物の作製にさえ成功していないからだ。一般社会では、「これまで何十年も、世界中の優秀な科学者達がよってたかって研究してきたのだから、この小さなショウジョウバエをそろそろ人工

的に合成できても良い頃だろう」などと考えられているのかも知れない（私自身、冗談を承知でこれと同じことを口にしたことがある）。以前、ハエのような小動物は自然発生すると考えられていたから、無理からぬことかも知れない。が、昆虫はそんなに簡単な代物ではない。我々ヒトとほぼ同程度か、それに近い謎と困難さを秘めていると思って間違いはない。いまのところ生物学は、人工的に合成したDNAで、生きた「最小のマイコプラズマらしきもの」を作ることができたという段階である（2016年、合成生物学者のヴェンターの研究グループによる）。

問題の核心は、単に「生物を作ることができるか」ではなく、「DNAの配列から、表現型が予測できるか」ということなのである。つまりそれが、究極の課題であり、それが分からないことには「生物の仕組みが分かった」とは言えない。それが、ファインマンによって示唆されているわけだ。逆に、それが本当の意味で分かれば、生物を一から作ることができるのか、ということにもなる。むろん、おそらくできるだろう。設計理論さえ分かれば、設計図を描くことができるのだから。

## ■ エンジニアリングとしての生物学

DNAの塩基配列から、その持ち主の「顔かたち」を推定できるか、という問題も同じ問題の範疇にある。もしそれができたなら、殺人現場に残された血痕や髪の毛から、犯人の姿を特定することもできるだろう。ただし、そんな便利な話だけでは済まないだろう。そのようなテクノロジーがこの行き過ぎたコンプライアンス社会に一体何をもたらすか、その危険性はすでに映画、『ガタカ：GATACA』その他においてイヤというほど示されている。が、それをさておいても、そのテクノロジーにいたる機構的理解を希求しないではおれないのが科学を手にした人間の性（さが）なのである。何をさておいても、「知らない」ことに耐えられないのが人間なのだから。むろん、このような架空の社会問題は「ブレードランナー世界」ではことごとく無視されている。あの未来世界（実は、これを書いている時点でまさに現代なのだが）は、ああ見えてもまだかなり楽観的な未来予想なのだ。

純粹に科学としてみた場合の「表現型予測技術」という課題には、いくつかの興味深い問

題が付随している。そのひとつは、「果たして、DNAの配列が特定できれば、自動的にその持ち主の姿が一意に特定できるのか」ということだ。多くの生物学者がそれに対し、留保付きで「イエス」と答えるであろう。ただし、ゲノムが決まっても、そこから生ずる表現型がひとつにならないことはすでに知られている。発生中のさまざまな条件や擾乱により、表現型には一定の幅の変異・揺らぎがどうしても伴ってしまう。それを適応に用いている動植物も多い。いや、その揺らぎがあるからこそ生物は進化してきた。進化生物学的には表現型の取り得る、幅を伴った潜在的範囲を「応答規準」という。しかし、それでもなお、多くの場合、ひとつのゲノムがつねに「ある範囲におさまった特定の表現型」として帰結することは確実であり、経験的にもそれが正しいことは多くの事例で確認済みである。なぜなら、一卵性双生児が常に見分けが付かない程に類似した容貌となるからだ。

したがって、「今目の前にあるこのゲノムデータが、どのような顔を作るのか」という問いは、「円周率の最後の数字は何か」というような「原理的なレベルでの不可能問題」などではなく、十中八九、どうやってそこへ辿り着けばよいかまだ分からないとはいえ、この世にその答えが実在していることだけはすでに明らかとなっている問題のひとつだということができる。では、それに対してどのように解法を導けばよいのか。

興味深い解法のひとつとして、AIに頼り、ヒトゲノムのSNP (single nucleotide polymorphism の略。一塩基レベルでの変異) データと容貌の対応関係を「ディープ・ラーニング」によって確立させるという方法があり、実際これを研究している科学者はいる。つまり、指紋と同様、人間個人のゲノムもそれぞれに違っており、そのバリエーションのそれぞれを「異なった独自のSNPセット」として表現でき、そしてそのセットが個々の異なった形(容貌)に帰結するはずだ、ということなのである。ゲノムのバリエーションにはSNPと認識されるもの以外にももちろん、遺伝子の重複や転座などさまざまなものがあるのだが、簡単のために以降では多少乱暴だがSNPのセットとして、

各人のゲノムのバラエティーが表現できると考えておく。

もちろんこの、網羅的にSNPと表現型を対応させるという考えは広義の「GWAS」、すなわちヒトの医療目的でおこなわれている「ゲノムワイド関連解析」と呼ばれるプロジェクトとも大きくオーバーラップする理念だ。2000年代初頭から開始されたこのプロジェクトは、ヒトゲノムすべてにわたる塩基置換と、遺伝的疾患、量的形質をすべてマッピングしようという試みであり、すでにいくつもの疾患原因遺伝子座を同定している。

話をレプリカント作製に戻そう。まず、ひとつのSNPデータのセットが、特定の顔に結びつくことをコンピュータに覚えさせる。そして、同様に次の人物のSNPデータとその顔をインプットする。そうしたAIの経験から、顔情報のない特定のSNPデータが、どのような顔と結びつくかを予想させ、その結果を評価し、それを多数の事例について何度も繰り返す。このようないわゆる「ディープ・ラーニング」を通じ、次第にAIは、SNPデータから、かなり高い確度でその持ち主の顔を再現できるようになるだろうと期待するわけである。しかしそれは、生物学的な理解に至るための正しい方法論といえるのだろうか。この疑問は、GWASについても指摘されることのある、科学的に本質的な悲観論なのである。

ここで先のファインマンの警句を思いだそう。仮に、右に書いたような方法でDNAデータから人間の顔をかなり正確に予想できるようになったとしよう。しかし、それははたして「科学の勝利」と言えるか。おそらくこのようなシステムは、架空の顔を提示すれば、それに最も見合ったSNPセットを示してくれるはずだ。原理的にはそれは十分可能である。従って、我々はDNA編集でもって、分子遺伝学的に顔を好き勝手にデザインすることができるようになる(かもしれない)わけである。では、この作業のどこに「理解」があるのだろうか。むろん、ここには理解などないのである。

つづく

## **Constrained & Directional Evolution Newsletter Vol. 4 No. 4**

発行：2020年9月14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/>