

架空生物「オリガミバード」による生物進化の擬似体験系

～教材としての有用性，さらに進化の究極形を求めて～

梶谷 正行

帝京大学理工学部バイオサイエンス学科

概要

生物は遺伝子のランダムな突然変異から徐々に変化し，そこにその環境で生存に有利な形質が選抜されていく過程が加わり，進化していく。しかし，その仕組みを具体的にイメージすることは難しい。山野井は，この進化の仕組みを実感できる教材として，「オリガミバードで学ぶ進化」系を考案した。バイオサイエンス学科では，この教材を使っている。実験系のアクティブラーニングに反転授業的な要素と仮説検証型の要素も入れてみた。アンケート調査に基づくと，受講生らは進化の仕組みを理解してくれたようである。また，ほぼ全ての学生がこの教材を高く評価しており，彼らの知的好奇心を刺激しかつ記憶に残るものであったと言える。また，この系での進化の究極形を突き止めるべく，考える全ての組合せでオリガミバードを作成して飛ばし，飛行距離に影響を与える要素の探求を試みた。その結果，飛ばないことと強い相関を示す形質は見つかったが，逆に飛ぶタイプには特定の傾向は見つけられなかった。

1. はじめに

オリガミバードをご存知だろうか？名前が似ているので，「折り紙の折り鶴に何か関係あるの？」と聞き返されることが多い。しかし，両者は全く異なるもので，オリガミバードはゲーム感覚で進化の仕組みを学べる教材である。開発者は山野井（現・白鷗大）で[1, 2]，日本進化学会の教育啓蒙賞（2012 年）を受賞したシステムであり，高校生物の教科書にも探究活動の事例として収録されている[3]。このオリガミバードの正体は，ストローの胴体にゼムクリップの嘴，紙製の前羽と後羽からなる架空生物である（原型は参考文献 4 参照）（図 1：ヤガミ製の教材キットを用いて作成した親鳥（P 世代）の写真を示した）[4]。遊び心からなのであろう，この架空生物には“*Avis papyrus*”という学名までつけられている。

生物の進化には，時間がかかる。まず遺伝情

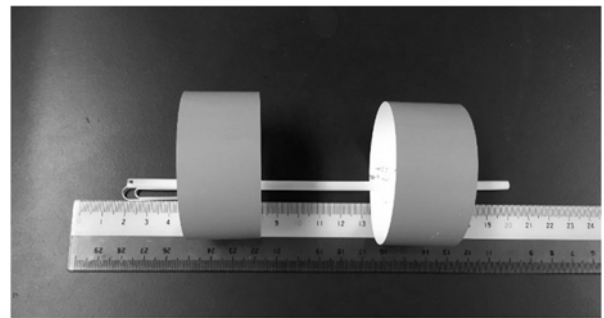


図1 オリガミバードの外観

報に変異が生じて遺伝子型が変化し，表現型の変化につながっていくのだが，変異はランダムに生じ，その結果として生じる表現型も多様である。そのような個体の中から，その生存環境に有利な形質を持つものが生き残って，変化が固定されて分化し，代を重ねるうちに元の集団とは生殖も不能となって，先祖とは異なる種へと進化していく。本来なら時間がかかるこの進化の仕組みを，短時間にかつランダム性も持たせた実験システムに改良したのが，「山野井による改良型オリガミバードの系」である[1, 2]。

山野井が開発した系を，本キャンパスにおいても 2014 年度から導入し，バイオサイエンス学科の学生たちに受講させている。本稿では，まず「オリ

Simulation system of biological evolution using an imaginary creature “Origami Bird”: Usefulness as a teaching material and analysis for the ultimate form of evolution

Masayuki Kajitani

Department of Biosciences, Faculty of Science and Engineering, Teikyo University

ガミバード」の教材研究の事例報告を行う。後半では、オリガミバードの進化の究極形はいったいどんな形になるのか、学生らが取り組んだ探求活動の成果を報告する。

2. 進化を学ぶ系としての実践例

2.1 改良型オリガミバードとは

「山野井のオリガミバード」の系を、より詳しく紹介しておく。この系におけるオリガミバードは、変化可能な5つの形質を持っている(表1:羽のサイズは「幅×長さ」で示してある)。変化はまず遺伝子情報に変化(変異)が生じ、それがタンパク質の変化につながり、最終的に表現型が影響を受ける。それを具体的にイメージできるよう山野井は、どの遺伝子がどのように変化し、その結果、どの形質がどのように変化するかを2つのルーレット(図2:ヤガミ製の教材キットに付属している)と指定の変異対応表を組み合わせたシステムに構築した[5]。タンパク質を構成するアミノ酸は20種類あるが、遺伝子であるDNA塩基(AGCTの4種)3残基分の並び順によって決定され、その暗号対応表がコドン表である。山野井の系の変異対応表には、このコドン表の概念も導入されている。

表1 変化する形質の一覧

変化する形質	変化のパターン				備考
	その1	その2	その3	その4	
クリップの数	0個	1個	2個	—	重心の位置が変化
羽の位置	端から2cm	端から3cm	端から4cm	—	
前羽のサイズ	1cm×18cm	2cm×26cm	3cm×20cm	4cm×30cm	主に発生する揚力が変化
後羽のサイズ	1cm×18cm	2cm×26cm	3cm×20cm	4cm×30cm	
羽の色	青	赤	—	—	影響のない中立的な変化

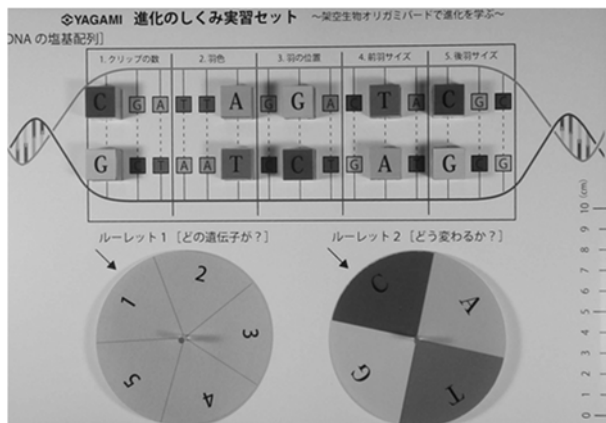


図2 変異をもたらす2つのルーレット

実験系の導入当初は手作りの系であったが、山野井監修のもと、株式会社ヤガミが教材キットとして2015年から市販し始めた[6]ため、今では我々もそのキットを用いて実験をしている。

2.2 授業の指導案

予備検討の段階で親鳥から始め、玄孫の代まで取り組んだ結果、必要な時間は約1時間であった。実際の進化は徐々に進むので時間がかかるものだが、このオリガミバードの系ではそれが1時間という短い時間で劇的な変化を目撃できることがわかった。そこで、実際の授業では、(1)10分間の導入部で全体像を解説し、(2)実習本番に60分間、その後(3)結果発表と考察に20分間、という時間配分を行い、後日、指定のレポートをまとめてもらう、という形で実施した。

本来なら進化を扱う単元の流れの中の1コマとして、このオリガミバードの系を扱うべきだが、カリキュラム上の余裕がない。実験の前後の指導に十分な時間が取れないので、事前に資料を配布し、かつ反転授業の要素として、山野井により公開されている実験内容のYouTube画像を閲覧し[7, 8]、さらにテキストの関連部分を読んでおくことを課しておいた[9]。さらに、この系でどういう形が良く飛ぶか、あるいは飛ばないのかを事前に考え、進化の傾向を予想しておくようにも指示を出しておいた。また、実施後のレポートのまとめ方も、専用の実験記録シートを渡して、具体的に示した。

2.3 実際の実施例

オリガミバードの系は、2014年度から、2年生の教職課程の学生を対象にした「生物学実験」で実施している。受講生はここ数年、10人以下と少ない。そのような中、2016年の冬、当時の1年生に対し「基礎遺伝学」(担当は高山)の中で、79名の学生(欠席者を除いた出席者の実数)を対象に実施する機会を得た。

その実際であるが、まずヤガミ製の教材キットを用いてオリガミバードを作成し、実験室横の廊下で飛ばし、その飛行距離を記録させた。その親鳥を

元に変異を起こした子孫を飛ばして、その生息環境が「オアシスが少なく離れているので、遠くまで飛べないと生き残れない」と仮定した選択圧をかけることでより遠くまで飛べるタイプ、あるいは逆に「オアシスが多いので、飛べなくても生き残れる」と仮定して飛翔能力が低下していくタイプを選抜させていった。どちらの選択圧を採用するかは、全体で偏らないよう班ごとにあらかじめ指定した。このサイクルを繰り返すと、実験開始時の親鳥(P世代)は約3m飛ぶが、選択圧をかけて選抜していくと、子(F₁世代)、孫(F₂世代)、曾孫(F₃世代)…と代替わりさせるたびに飛翔距離が変化し、玄孫の代(F₄世代)には、平均すると飛ぶタイプが5m前後、飛ばないタイプは2m前後に近づいていった(図3:実線は「より遠くまで飛ぶ」方向へ、点線は「飛ばない」方向へ選択圧をかけている系での結果の一例である)。

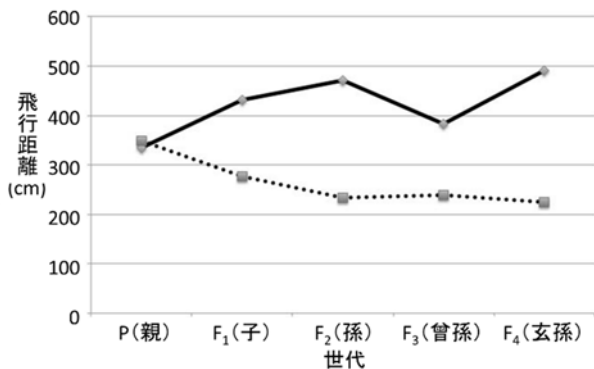


図3 オリガミバードの結果例

この時の結果にも表れているが、進化は一定の方向に、後戻りなく進むのではなく、時々、停滞したり、あるいは、先祖返りしたりする場合もある。変化はランダムであり、場合によっては、進化も浮動することを表していると言える。過去には、目的論的な進化の力が働くという定向進化説もあったが、今は否定されている。

2.4 受講生らの反応

この時の受講生らは、「高校時代に進化を学んだか」という問に対し、7割弱の学生が「学んだ」と答えていた。そのような学生が、このオリガミバードの系で進化の仕組みを学ぶと、「ランダムな変異」と「選択圧による選抜」による「変化の積み重ねで種が分化する」という進化の基本認識に対し、その認識が実習の前後で変化したのかという問に対し、5割強の学生が「変化した」と答えた。(図4)無記名の小テストも実験の前後で実施したが、正答率が向上しており、進化の仕組みに関する最初の段階の理解が深まったようである。

同時に予習の状況についても調査したのだが、YouTubeの画像[7]は約5分間と短いせいも影響したのか、6割の学生が見た上で実験に臨んでいた。しかし、指定テキスト[8]の関連ページ(第3部「進化」中の第16章「進化のしくみ」)を事前に読んだ上で臨んだ学生は2割強に止まっていた。事

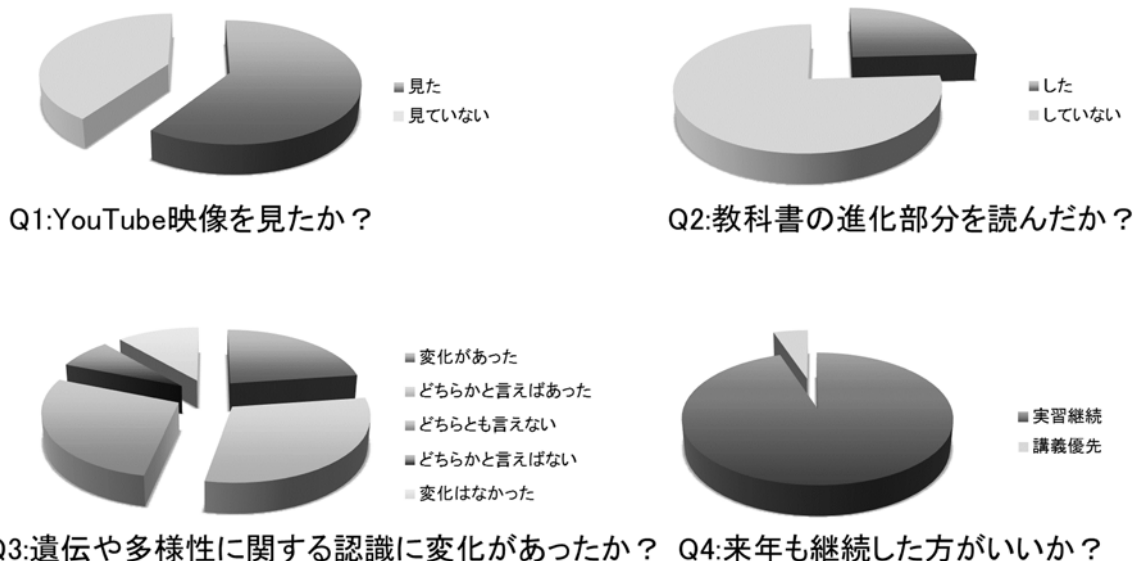


図4 アンケート調査結果の概要

図4 アンケート調査結果の概要

前学習を促す工夫が必要であること痛感させられた。

余談となるが、子どもの頃、紙飛行機を飛ばして遊んだことがないのか、飛ばし方がぎこちない学生がかなりいた。飛ばし方によっても飛行距離が違ってくことは容易に想像できるが、これもランダムな選択圧の一種と考え、あえて飛ばし方は指導しなかった。

3. 進化の究極形を求めた取り組み

3.1 進化の究極形

仮説検証型の要素も取り入れるため、このオリガミバードの系でどのような形状が飛ぶのか、あるいは逆に飛ばないのか、自分なりに考えて、結果を推察しておくようにと事前に指示を出していた。しかし、受講生らはバイオサイエンス学科の学生であり、航空力学など学んでいない。さらに、紙飛行機の飛ばし方そのものも知らない学生がいる。したがって、彼らも考えるポイントが分からず、「羽が大きいものが飛ぶような気がする」というレベルの議論しかできていないようであった。かくいう私も同じような状況であったが、参考文献 10 で少々勉強させていただいた[10]。

実施例を増やして、進化の傾向を把握したいと考えていた頃、2017 年度の卒業研究生の一人、後藤亮が「バイオとコンピュータとが絡むような研究してみたい」と申し出てきた。そこで、このオリガミバードの PC シミュレーターの話[5]を提供したところ、興味を示してくれたので、シミュレーターの各形質(要素)の「飛行に及ぼす係数を検討してみよう」となった。5 種の形質のうち(表 1 参照)、「羽色」は理論的には影響を与えないはずであり、これを除外した残り 4 種の形質、(1)クリップの数、(2)羽の位置、(3)前羽サイズ、(4)後羽のサイズ、以上全部を組み合わせると $3 \times 3 \times 4 \times 4 = 144$ 種のオリガミバードが誕生する。これを、他のテーマに取り組んでいた学生らの協力も得て、定期的に飛行実験に取り組み、卒業研究レポートにまとめた[11]。適度な広さを確保し風の影響を避けるため、地域経済学科棟の

1 階ロビーを平日の午後、使わせていただいた。

3.2 究極形のタイプ

実験は、1 個体を作るたびに、それを 1 人が 10 回ずつ、2 人で飛ばし、都合 20 回の記録から平均値とその標準誤差を求めた。144 種の飛行実験の総数は約 3 千回となる。また、実施にあたっては、区分しやすいように各個体の識別番号「 $N_1N_2N_3N_4$ 型」を付した。4 桁の数値は、左からクリップの数(0,1,2 の 3 通り)、羽の位置(2,3,4 の 3 通り)、前羽の幅(1,2,3,4 の 4 通り)、後羽の幅(1,2,3,4 の 4 通り)を表す(表 1 参照)。たとえば、「1234 型」はクリップが 1 個、羽の位置が端から 2cm、前羽のサイズが幅 3cm、後羽のサイズが幅 4cm である。この表記法に従うと、親鳥(P 世代)は「1333 型」となる。

飛行距離の平均値のみだが、その結果をグラフ化した 1 例を図 5 に示す。変化する要素が 4 種もあるので、結果を図示するのも苦労するが、図 5 では、前羽のサイズを固定して、他の要素を変化させると飛行距離がどのように変化するかを見ようとした。横軸に「 $N_1N_2*N_4$ 型」をそれぞれ配置し、折れ線は「**1*型」、「**2*型」、「**3*型」、「**4*型」を結んで示してある。図 5 には標準誤差は載せていないが、ほぼ全ての種で 10~30cm の範囲にあり、10cm 未満が 12 種、40cm 以上が 6 種であった。オリガミバードの種というよりは用いた個体で、その固有の飛行距離を正確に捉えたものと考えている。

図 5 から、飛行距離が 2m 以下の「飛ばないタイプ」は全部で 42 種(全体の 29%)もあり、一定の傾向があるように見える。すなわち、クリップが付いていない系(0***型)はまず飛ばないことがつかめた。個体の重量と揚力のバランスが悪いからではないか、と考えている。また、クリップが 1 個付いていても、前羽が 4cm である(1*4*型)と飛ばない。もしかすると、羽の材質が柔らかくサイズも大きいので、飛行中に変形しやすく、発生する揚力が乱れるのではないかと考えている。実際にビデオ撮影をして、画像解析で検証すべきであった。

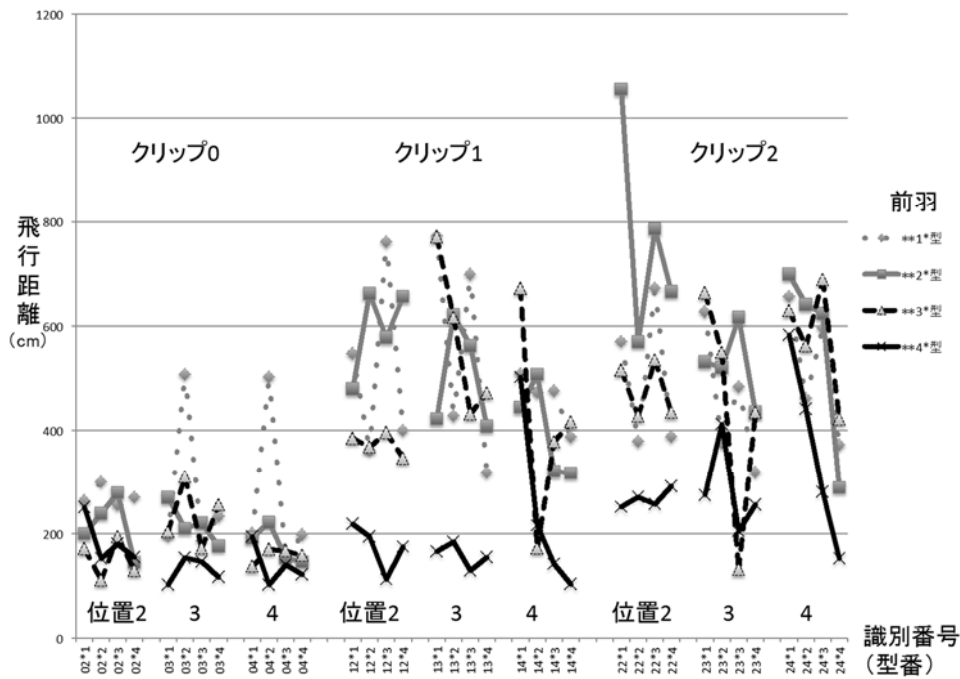


図5 オリガミバードの飛行距離に影響を及ぼす形質

一方、飛行距離が 7m 以上の「飛ぶタイプ」は、10m 以上も飛ぶタイプ(2221 型)も出現しているが、全体で 5 種類(3%)と少なく、一定の傾向を持たずに散在している状況にある。基準を 6m 以上に下げると 22 種(15%)になるが、クリップ 1 個の場合には羽の位置が端より、クリップ 2 個になると中央よりになる傾向があるように見え、重心の位置がポイントとなりそうである。しかし、飛ぶタイプと一つの形質だけが異なるタイプ、すなわち「近縁の種(亜種)」に相当するタイプもそれなりに飛ぶかという、そうとは限らない。また、クリップ 2 個で前羽が 2cm の系(2*2*型)は、飛ぶタイプが多かった。全体を見回し、共通する形質を強いて挙げれば、「飛ばないタイプ」の逆で、クリップが必ず付いていて、前羽が小型のタイプであろうか。特定の傾向がはっきり見えてこないことをポジティブに捉えれば、飛ぶタイプへの進化の方向性は一つではない、とも言えそうである。

3.3 新たな問題点

実際に飛ばしてやり終えてから、改めて学生らと議論した。特に飛ぶタイプに一定の傾向を見ることができなかったのは、毎回、個体を作り変

えていたので、羽の付け方に微妙な差異が生じ、本来の数値からずれたのではないかという問題である。丸めた羽をあらかじめ用意しておく、羽を付ける角度を直角に持ち込みやすい補助具を工夫するなど、個体作成の精密性を高めることを意識した改良が必要である。また、羽の柔らかさも影響するなら、その材質を変更することも検討しなければならない。いずれにしろ、単に組み立て飛ばすのではなく、調整をして品質管理にも留意させる必要があった。

卒業研究では飛ばし方も練習の上で実施したが、やはり実験者によって異なることによる影響が大きいのではないかという意見が出た。「オリガミバード発射装置を作れば、一定の条件で飛ばせる」という意見も出た。ゴム銃式やカタパルト式などが容易に思い浮かんだのだが、アイデアを具現化するまでは至っていない。最終的にはやはり「自分で作って、自分で飛ばしてみる」という体験型の面白さがこのオリガミバード系の魅力の一つであり、このままでいいだろうとなった。

また、事前に予想できていなかったのだが、癖のある飛び方を示す個体もあった。大別すると、(1)滑空型:風に乗り、一度上昇して、素直に下

降, (2)弾道型:単に勢いで, ほぼ真っ直ぐ飛ぶ, (3)墜落型:急上昇し, その後, 失速して落下, (4)旋回型:真っ直ぐ飛ばずに曲がり, 時には戻ってくる, (5)錐揉み型:機体が回転しながら落下, 以上5型になる. おそらく, 羽のつけ方に問題があるが事例もあるだろう. しかし, 飛ばし方ではなく, 飛び方に癖があることは想定してなかったもので, 記録されておらず, 実験系設計時の詰め甘さが出た.

4. 教材としての可能性

私が「基礎遺伝学」を担当していた頃, まずはエンドウマメの豆の形がマルかシワか, 色が黄色か緑か, など具体的な形質で遺伝の法則性を復習させた.その後, 遺伝子の正体を教え, その遺伝子の変化がタンパク質の変化につながり, 形質の変化に繋がっていく, という流れで講義を進めていっていた. 遺伝の法則性のところは学生たちも余裕で付いてきていたのだが, 遺伝子やタンパク質の分子レベルの話になると, 急に理解が追いつかなくなるようであった. おそらくは映像的にイメージできないような話題の理解が苦手なのであろう.

そのような学生であるから, さらに分子進化を学ばせようとする, 混乱の度合いに拍車をかけるような状況になることは想像に難くない. しかし, オリガミバードの系は, 少なくとも「種の分化」レベルの仕組みは, 短時間に目で見える形で体験させることができる. このため, 「理解が変わった」と実感する学生が過半数となったものと考えられる(図4参照). さらに, 「この実験系を, 後輩たちにも体験させたほうがいいか」という問いには, ほぼ全員(95%)が「賛成」と答えていた. それだけ, 彼らにインパクトを与えた実習であったと言えるだろう(図4参照).

話は変わるが, 本報告をまとめるにあたり調査したところ, 本実験系が生物系ではない大学教育でも利用されていることを知った. 西川(武蔵野大)は, 進化には確率が大きな影響を与えることに注目し, 数理工学系の「基礎セルフディベロ

ップメント」という科目で採用している[12]. 武蔵野大学の学生らもオリガミバードに熱中したようで, アクティブラーニングの系としての可能性の広がりを見せ始めている. 今後, 工学系, 特に航空力学的な視点からの取り組みもあれば, さらに面白くなると思う.

5. おわりに

高等学校学習指導要領の次期改訂に基づき, 新しい教科書の編集が進んでいる. 生物では, 観察・実験がより重視され, 全体として探究活動が重点化される. 「生物は暗記科目」という誤ったイメージからの脱却を図ろうとしているようである. さらに, 「4単位の生物」では, 生物の進化が前面に出てくるといふ. 進化の単元が, 文字通り教科書の冒頭にくるだけではなく, 生物の共通性と多様性をもたらしめているのは進化の結果であり, それ以降の学習事項においても常に進化の視点から意識することが求められている.

探究活動が強化され, 進化も重視されると, オリガミバードの教材としての有用性がもっと注目されるだろう. 高校時代に学んでくる学生も増えるかもしれない. しかし, 高校生物の現場では, 進化の単元に限らず, 実験・実習系を導入できるほどの時間的な余裕があるのだろうか. 日進月歩のバイオ分野でもあり, 高校でも教えるべき内容が変化し情報量も増大している. 教諭として教育現場に立っている本学卒業生らから, 実験を取り入れることに苦勞しているという悩みが聞こえてきている. 指導要領の改訂が, オリガミバードの活用にすぐには結びつきにくいと思われる.

そうであるなら, 本学でオリガミバードをぜひ体験させ, 確実な理解へと導いてやりたい. そのためには, サイエンスキャンプ等のイベントの活用が考えられる. また, 大学においても, 教職課程ではない一般学生にもなんらかの形でオリガミバードとの出会いの場を設けてやりたい. まずは自主ゼミのような形でスタート

させることを考えている。

謝 辞 本稿は、改良型オリガミバードの考案者でもある山野井貴浩氏(白鷗大・教育・准教授)に直接指導をいただき、本校でも学生らを対象に実施した結果をまとめた。その解析にあたっては山野井氏にご助言をいただいた。本学の高山優子准教授には、基礎遺伝学において貴重な時間を利用させていただいた。また、進化の究極系の解析にあたっては、小職の研究室に2017年度卒研生として所属した後藤亮君を中心とする学生らが取組み、後藤君が卒業研究レポートとしてまとめた。ここに挙げた皆様に感謝の意を表す。

参考文献

- [1] Yamanoi, T., Suzuki, K., Takemura, M. & Sakura, O. (2012) Improved “origami bird” protocol enhances Japanese students’ understanding of evolution by natural selection – a novel approach linking DNA alteration to phenotype change –, *Evolution, Education and Outreach*, 5:388
- [2] 山野井貴浩, “進化学の教材開発～高校の生物教育の現場から～”, *遺伝*, 66 巻, 3 号, pp317-322, 2012
- [3] 高等学校「生物」教科書, 東京書籍, 2013 (2012年3月検定済)
- [4] Westerling, K. (1992) A mini-lesson evolutionstechnik or origami birds...The selection and variation in the Egyptian Origami bird (*Avis papyrus*), <http://www.indiana.edu/~ensiweb/lessons/origami.html>, 2019/03/01 アクセス
- [5] Yamanoi, T. & Iwasaki, W.M. (2015), Origami Bird Simulator: A Teaching Resource Linking Natural Selection and Speciation, *Evolution, Education and Outreach*, 8:14
- [6] 株式会社ヤガミ, “進化のしくみ実習セット”, 2015年発売, <http://ec.yagami-inc.co.jp/shop/o/o6165100-R01>, 2019/03/01 アクセス
- [7] オリガミバード(高校生向け), <https://sites.google.com/site/takahiroyamanoihp/ziran-xuan-ze-jiao-cai-origamibado>, 2019/03/01 アクセス
- [8] オリガミバード動画 2015, <https://www.youtube.com/watch?v=o0heM3tvCoA>, 2019/03/01 アクセス
- [9] ケインほか(著), 上村(監訳)“ケイン基礎生物学”, 東京化学同人, 2012
- [10] 小林昭夫, “紙ヒコーキで知る飛行の原理—身近に学ぶ航空力学”, 講談社, 1988
- [11] 後藤亮, “オリガミバードによるデータ収集とシミュレーターへのフィードバック”, 梶谷研究室卒業研究レポート, 2017(研究室のみ閲覧可能)
- [12] 西川哲夫, “オリガミバードを用いた進化教育方法の改良の試み”, *武蔵野大学数理工学センター紀要*, 2号, pp39-63, 2017