

An attempt to improve an educational method for evolution using "Origami bird".

メタデータ	言語: jpn 出版者: 公開日: 2017-06-13 キーワード (Ja): キーワード (En): 作成者: 西川, 哲夫 メールアドレス: 所属:
URL	<a href="https://mu.repo.nii.ac.jp/records/542">https://mu.repo.nii.ac.jp/records/542</a>

オリガミバードを用いた進化教育方法の改良の試み

An attempt to improve an educational method for evolution

using "Origami bird".

西川 哲夫<sup>1</sup>  
Nishikawa Tetsuo

---

<sup>1</sup> 工学部数理工学科特任教授

## 1. 要旨

大学教養課程における進化教育において、架空生物オリガミバードを用いた進化実習教材の運用の効率化、及び進化概念の理解度の向上を目的として、実習を効率化する改良を施した上でアミノ酸配列とオリガミバードの飛距離の関係を分析するプロトコルを追加した。改良したプロトコルによる授業実践の結果、2コマ61人のクラス全ての班で実験とデータ整理、分析、レポート作成までを、従来より数分の1の少ない材料でスムーズに時間内に終わることができた。また飛距離を自然選択条件として、ほとんどの班で重りの数と羽のサイズに関わる遺伝子のアミノ酸に、飛距離と関連する有意な特徴を発見できた。結果として、オリガミバード実習の効率化が達成でき、「進化の機能的制約」の学習が可能となった。

## 2. はじめに

現在の高等学校「生物」の学習指導要領では、自然選択と中立説を中心に進化のしくみを扱うこととなっている [1]。進化の教授価値は、それが歴史的観点から生物界全体を統一的に捉えさせることができる点にあり、自然選択と中立説という進化の仕組みの両方を理解すれば、分子レベルから種レベルへの複数の階層に見られる多様性を統一的に捉えることが可能になると考えられる [2]。進化に関する実験・実習教材は、1) 進化的な見方を扱うものと、2) 自然選択などの進化のしくみを扱うものに大別されるが、進化のしくみに関する実験・実習の教材はほとんど開発されていない状況にあった。

その不備を改善すべく、山野井らは、生物教育において利用可能な進化のしくみ（自然選択と中立説）を理解させるのに効果的な実験・実習教材として、「オリガミバード」の改良を提案している。「オリガミバード」はWesterling [3] によって開発された進化実習教材であり、生徒は架空生物オリガミバードを工作し飛ばす過程を経て、ランダムな突然変異による変異の創出と自然選択の過程を通して理解できるようデザインされている。しかしこの教材では、突然変異が表現型に与える影響をコイントスとサイコロを用いて決定することによって、突然変異のランダムさを表現している。すなわち、DNAとアミノ酸の変異を陽に取り入れていないこともあり、代表的なミス・コンセプションである目的論的な進化観<sup>2</sup>の改善にはあまり繋がらなかった。そこで山野井らは、コイントスとサイコロではなく、2つのルーレットを用いてDNAとアミノ酸の変異を陽に取り入れた方法（ルーレットで突然変異する塩基とどの塩基に置換するかを決定する）を導入し、その結果、目的論的な進化観の改善を含む7つの項目で進化観の改善に繋がる成果を残している。このように、山野井による「オリガミバード」の改良版は、進化のしくみを理解させるための優れた教材である。

武蔵野大学では、1年生に対する教養教育の一環として教養7分野の授業を、講義とグループワークの組み合わせという形のアクティブラーニングの要素を取り入れて順に行っていく基礎セルフディベロップメントという講義が行われている。「オリガミバ

---

<sup>2</sup> 生物自身の必要性（目的）に合うように進化が起こるとする説である。進化の方向は、盲目的に起こる突然変異と自然選択によって決まる機械論的なプロセスであるため、生物の進化に目的があるとこの説は科学的に正しくないとされている。

ード」を用いた進化のしくみの授業は、確率が本質的な役割を果たす進化について、実験をしながら学んでいくというアクティブラーニングの要素が非常に大きいことから、基礎セルフディベロップメントの数理科学の授業として最適なものの一つと考えられた。そこで、武蔵野大学の基礎セルフディベロップメントの数理科学の授業として、この教材を用いて実践することを試みた。実践に当たって、基礎セルフの特徴である様々な分野（文系と理系を含む）の多くの学生が入り混じり、進化への理解度の幅や実験に対する対応力の幅もかなり大きい場合においても、進化についての本質を、効率よくかつわかりやすく学ぶことのできるプロトコルを構築することを第一の目標とした。

また、山野井による「オリガミバード」の改良版は、DNAの確率的な変異がアミノ酸の変異と個体の形態の変化を通して飛行距離という表現型の進化をもたらすことを、実験を通して理解させることに成功しているが、進化のしくみの重要な部分である「突然変異の結果現れるアミノ酸のパターンと表現型との関係」については、特に扱っていない。この概念は、蛋白質の機能にとって少数の重要な部位と多くの重要でない部位があること、それ故に重要でない部位は自然選択の影響を受けずに中立的に変異することが可能になるという中立説につながる重要な考え方である。そこで、本実践においては、山野井による「オリガミバード」の改良版に、「突然変異の結果現れるアミノ酸のパターンと飛行距離との関係」を分析するプロトコルを加えることとし、実践の結果得られた学生の分析結果を解析することによって、このプロトコルを用いることで学生が獲得し得る進化の概念についてその可能性を分析することを、第2の目標とした。

### 3. 方法

#### 3. 1 山野井による「オリガミバード」のプロトコル

Westerlingによる「オリガミバード」に山野井が改良を加えたプロトコルを示す。

##### 1) プロトコルの概要

プロトコルの概要は以下のとおりである。

- (1) DNA塩基配列の確率的な変化に同期させて、オリガミバード(図1)の形態(羽の大きさや位置など)を変化させる。
- (2) オリガミバードを飛ばし、飛行距離を測定して、飛行距離が最も大きく、あるいは最も小さくなったものが生き残るとする。
- (3) 生き残ったオリガミバードに同じ操作を繰り返す。
- (4) 世代を経る毎に、飛行距離が大きく(小さく)なっていく様子を観察する。

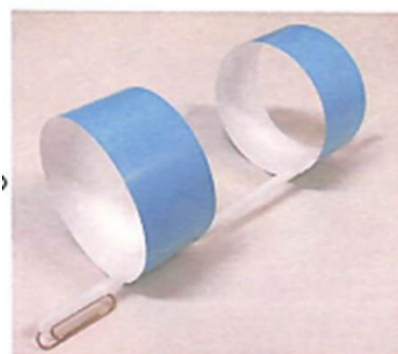


図1 オリガミバード

##### 2) 架空生物オリガミバードの設定

オリガミバードを以下のような架空生物として設定する。

- ・北アフリカの乾燥地域に生息するため、飛行によってオアシスにたどり着けるかどうかが生存・繁殖に大きく影響する。

- ・メス 1 個体はオスとの交尾を経て、生涯で 1 回産卵し 3 個の卵を産む。この実験で登場する個体は全てメスとする。

### 3) 生息環境 (実験条件) の設定

オリガミバードがどのような環境に生息しているかを、班毎に以下の 2 つから選択する。

条件 1 : オアシスの数が少ない環境で生活しており、オアシス間を飛翔できる「飛行距離の長い個体」が生き残る設定

条件 2 : オアシスの数が多い環境で生活しており、エネルギーの損失が少なく、捕食者にも見つかりにくい「飛行距離が短い個体」が生き残る設定

### 4) プロトコルの詳細

オリガミバード進化実験プロトコルの詳細を、付録 7. 1 に示す。

## 3. 2 改良版プロトコル

山野井による「オリガミバード」の改良版は、進化のしくみを理解させるための優れた教材である。DNA の変化から mRNA、アミノ酸の変化、表現型の変化までの自然界で実際に生じている一連の流れを、ルーレットをまわしオリガミバードを作り直し、飛ばすという分かりやすい操作を実施する中で体験することができる。その上でバラツキはありながらも飛距離が一定の方向へ変化していくという進化の様子を肌で実感することができ、進化の確率的な本質を簡単に短時間に学ぶことが可能である。

この「オリガミバード」を基礎セルフディベロップメントの授業の中で実施するために試行を行って見たところ、幾つかのポイントに気付き、これらの点に変更を加えたら、より容易でかつ効率的な実習が可能になり、「オリガミバード」の効果をより活かせるであろうと思われた。以下では、本研究において、山野井によるオリガミバードに改良を加えたプロトコルを示す。

### 1) 改良点

改良点は以下の 2 点である。1 点目は、様々な分野の多くの学生が入り混じり、理解度や対応力の幅が大きい場合でも、進化についての本質を、効率よくかつわかりやすく学ぶことのできるプロトコルとして、(1) 大人数で効率的に実施するためのプロトコル構築を目指した。2 点目は、突然変異の結果現れる (2) アミノ酸のパターンと飛行距離との関係を分析するプロトコルの追加である。

#### (1) 大人数で実施するためのプロトコル構築

大人数で効率的に実施するために実施したことは、一つは羽の取り付け方の改良であり、もう一つは結果シートの書式の改良である。前者については、羽の取り付けをセロハンテープを用いて行っていたところを、両面テープを用いることで羽をリサイクルで

きるようにした。また後者については、結果シートの書式で DNA と表現型及び突然変異表間の対応がわかりやすくなるように変更した。

① 羽の取り付け方の改良

羽のストローへの接着に両面テープを用いることとした。これにより、オリガミバードの作成方法は以下ようになる。

1. 羽の作成

図2に示すように、4種類8個の輪を予め作成しておく。

- 1) 4種類の色紙それぞれから2枚ずつ、全部で8枚の用紙を用意する。
- 2) 用紙の一端の白い側に両面テープ(1cm幅)を横向きにして張る。
- 3) 用紙を輪状にして両端を1cmだけ重ね合わせて、両面テープで固定する。4種類8個の輪を予め作成しておく。
- 4) ストローを取り付けるために、予め用紙の内側の重ね合わせた部分に、横向きに両面テープを張っておく。

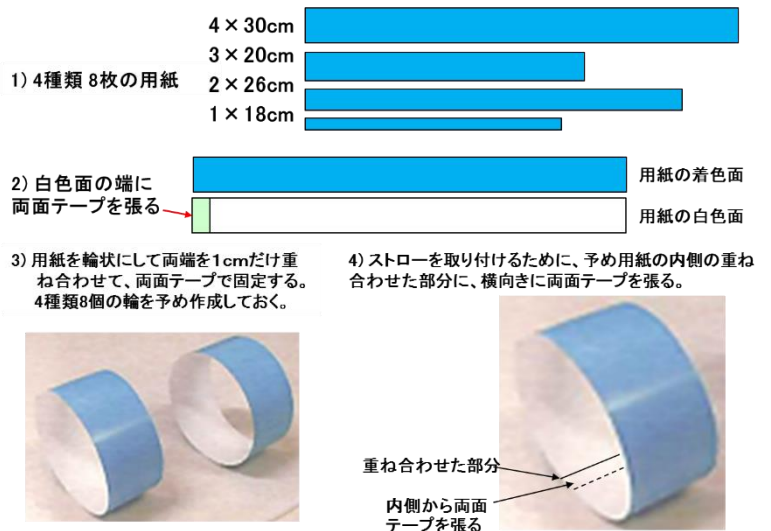


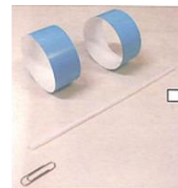
図2 改良法によるオリガミバードの作成方法(羽の作成)

2. オリガミバードの作成(親鳥の作成)

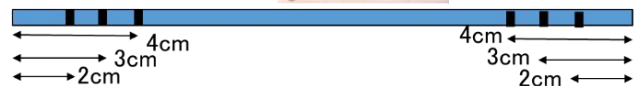
図3に示す手順で親鳥を作成する。

- 1) ストローを1本、3cm×20cmサイズの青羽を2枚、クリップを1個用意する。
- 2) ストローの両端から2, 3, 4cmのところにマジックで印をつける。
- 3) ストローの両端から3cmの印の箇所に輪の端を一致させて、輪の内側の両面テープの箇所にストローを軽く押し付けて固定する(2個の羽を取り付ける)。ストローの軸方向から見て、二つの輪の中心が重なる様に、ストローと輪の角度を調整する。
- 4) ストローの先端にクリップを押し込んで取り付ける。

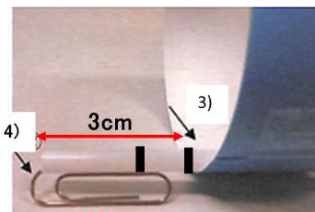
1) 用意するもの



2) ストローに印をつける



3) ストローへの輪の取り付け



3)

親鳥の完成



4) ストローへのクリップの取り付け

図3 改良法によるオリガミバードの作成方法(親鳥の作成)

子孫を作成する場合は、配偶子突然変異ボックスで得られた表現型に合わせて羽のサイズや位置、色、クリップの数を変更する。

② 結果シートと突然変異表の改良

図4に結果シートの1個体分のフォーマットと改良箇所を示す。

1. 各遺伝子の箇所に、その遺伝子が表す表現型の種類を記載するようにした。
2. DNA配列と表現型の表について、塩基位置と表現型を縦方向に対応付けて表示するようにした（塩基位置の下に、mRNA、アミノ酸と共に対応する表現型情報を記載する枠を設けた）。
3. 図5に示すように、突然変異表の縦横の向きを、結果シート中のDNA配列と表現型の表と同じ向きに揃えた。

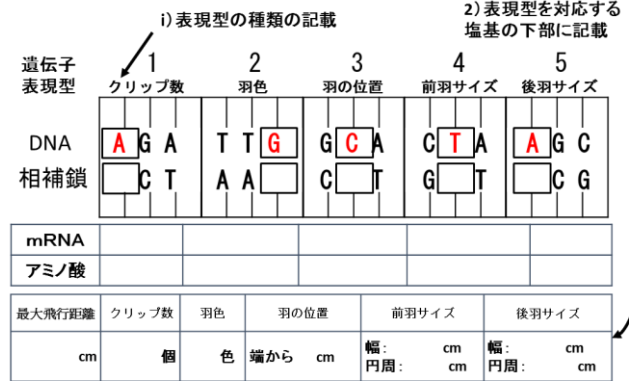


図4 結果シートのフォーマットと改良箇所

③ 改良の効果

1. 羽の取り付け方

両面テープを用いることによって以下のメリットが考えられた。

1) 羽のリサイクルができる。

羽のリサイクルができることによって、一つの進化実験に2枚×4種類=8枚の羽根を用意すれば十分となる。10のグループであれば、20枚×4種類=80枚で完全に足りることとなる。

遺伝子1 クリップの数					遺伝子2 羽の色				
DNA	AGA	TGA	GGA	CGA	DNA	TTA	TTT	TTG	TTC
mRNA	UCU	ACU	CCU	GCU	mRNA	AAU	AAA	AAC	AAG
アミノ酸	セリン	トレオニン	プロリン	アラニン	アミノ酸	アスパラギン	リシン	アスパラギン	リシン
表現型	1	1	2	0	表現型	青	赤	青	赤

遺伝子3 羽の位置				
DNA	GAA	GTA	GGA	GCA
mRNA	CUU	CAU	CCU	CGU
アミノ酸	ロイシン	ヒスチジン	プロリン	アルギニン
表現型	端から4cm	端から2cm	端から4cm	端から3cm

遺伝子4 前羽サイズ					遺伝子5 後羽サイズ				
DNA	CAA	CTA	CGA	CCA	DNA	AGC	TGC	GGC	CGC
mRNA	GUU	GAU	GCU	GGU	mRNA	UCG	ACG	CCG	GCG
アミノ酸	バリン	アスパラギン酸	アラニン	グリシン	アミノ酸	セリン	トレオニン	プロリン	アラニン
表現型	幅 4cm 長さ 30cm	幅 3cm 長さ 20cm	幅 2cm 長さ 26cm	幅 1cm 長さ 18cm	表現型	幅 3cm 長さ 20cm	幅 1cm 長さ 18cm	幅 4cm 長さ 30cm	幅 2cm 長さ 26cm

図5 改良した突然変異表

セロテープで留めた場合、セロテープをきれいにとりはずすことは難しいので、毎回の飛行実験毎に羽を取り付けるとすれば、親鳥と4世代の子孫で10個体のオリガミバードに新しい羽を接着する必要がある。1個体当たり2つの羽が必要なので、全ての羽が同一種類になった場合を想定すると、羽は全部で4種類あるので最大で80枚の羽の材料を用意しておく必要が生じる。これを例えば10グループ分用意すると、最大で800枚の羽の材料を予め用意する必要が生じる。

実際はグループ間で羽を融通し合えば、ここまで用意する必要はないが、数百枚の羽の材料を用意した方が安全であることを考慮すると、両面テープを用いることによる羽のリサイクルの効果は、リサイクル無しの場合と比べて数分の一の材料で済むと考えられる。

2) 羽のストローに対する角度の調整が容易になる。

両面テープを用いた場合は、完全に固定しないので、セロテープを用いる場合よりも、羽のストローに対する角度の調整が容易になる。その結果角度の調整に要する時間や実験のばらつきを減少させることができると考えられる。

3) 羽の接着取り外し作業が容易になり、作業時間の短縮効果があると考えられる。

## 2. 結果シートの書式

各遺伝子の箇所に、その遺伝子が表す表現型を記載し、DNA 配列の下に表現型を対応付けて表示することによって、どの表現型の遺伝子の変異によってどの表現型がどう変わったかを一目で認識できるようになった。また、結果シートと突然変異表のどちらの表でも DNA の下に mRNA、アミノ酸、表現型を置いたため、突然変異表の参照に基づく結果シートへの記載が直観的になり素早くできるようになった。全体として、結果シートに記入していく作業の時間短縮と誤りの低減が期待された。

### (2) 「アミノ酸のパターンと飛行距離との関係」を分析するプロトコルの追加

図 6 に、F 4 世代の各遺伝子毎のアミノ酸配列を記載する表を示す。条件 1) と条件 2) を分けて、実験班ごとに記載できるようにしてある。図 6 には 3 班と 9 班の結果を載せている。各表の最下の行には、各遺伝子毎に最多アミノ酸を記載する。最多アミノ酸とは、各遺伝子毎に各班のアミノ酸を見た場合に、最も頻度の高かったアミノ酸と定義する。最多アミノ酸が複数あった場合はそれらすべてを記載する。この表から、条件 1) と条件 2) の自然選択によって、どのようなアミノ酸配列に進化したのかを知ることができる。

条件(1)

	遺伝子1	遺伝子2	遺伝子3	遺伝子4	遺伝子5
1班					
2班					
3班	セリン	リジン	プロリン	アラニン	トレオニン
4班					
5班					
最頻アミノ酸					

条件(2)

	遺伝子1	遺伝子2	遺伝子3	遺伝子4	遺伝子5
6班					
7班					
8班					
9班	プロリン	アスパラギン	ロイシン	バリン	アラニン
10班					
最頻アミノ酸					

図6 F4世代のアミノ酸配列記入フォーマット

## 2) 改良版プロトコルによる進化実験

図 7 に、改良版プロトコルによる進化実験の手順を示す。まず、(1) 羽の作成を行う。次に、(2) 親鳥 (P) の実験を行う。親鳥の実験では、まず親鳥の遺伝情報の記録を行い、次にオリガミバードの作成 (親鳥の作成) を行い、最後に親鳥の飛行距離の測定と記録を行う。次に、(3) 子孫 (F1 世代①, ②, ③) の実験を行う。F1 世代の子孫の実験では、最初に 3 個体分 (①, ②, ③) の突然変異の生成を行い、次に 3 個体分 (①, ②, ③) の子孫の作成と飛行距離の測定を行う。その後、子孫の飛行距離及び飛行距離の平均の記録を行い、F1 世代の生存・繁殖の条件に照らして F2 世代の親鳥を決定する。



次に順次、(4) 子孫 (F2, F3, F4 世代) の実験を行う。実験が終了したら、(5) 実験結果の整理を行う。

① 飛行距離の時系列データの整理と② アミノ酸配列データの整理を行い、最後に、(6) レポートの作成を行う。レポートでは、アンケート(実習は楽しかったか、進化の理解に役立ったか)とコメント(グラフ・表からわかること、実習を通して気が付いたことや理解が深まったこと、及び全般的な感想)を記入する。図8に結果シート、図9にデータシート、図10にレポートの書式を示す。

- (1) 羽の作成
- (2) 親鳥 (P) の実験
- ① 親鳥の遺伝情報の記録
- ② オリガミバードの作成 (親鳥の作成)
- ③ 親鳥の飛行距離の測定と記録
- (3) 子孫 (F1世代①, ②, ③) の実験
- ① 突然変異の生成
- ② 子孫の作成と飛行距離の測定
- ③ 子孫の飛行距離及び飛行距離の平均の記録
- ④ F1世代の生存・繁殖の条件に照らして、F2世代の親を決定
- (4) 子孫 (F2, F3, F4世代) の実験
- (5) 実験結果の整理
- ① 飛行距離の時系列データの整理
- ② アミノ酸配列データの整理
- (6) レポートの作成 (アンケートとコメント)

図7 改良版プロトコルによる進化実験の手順

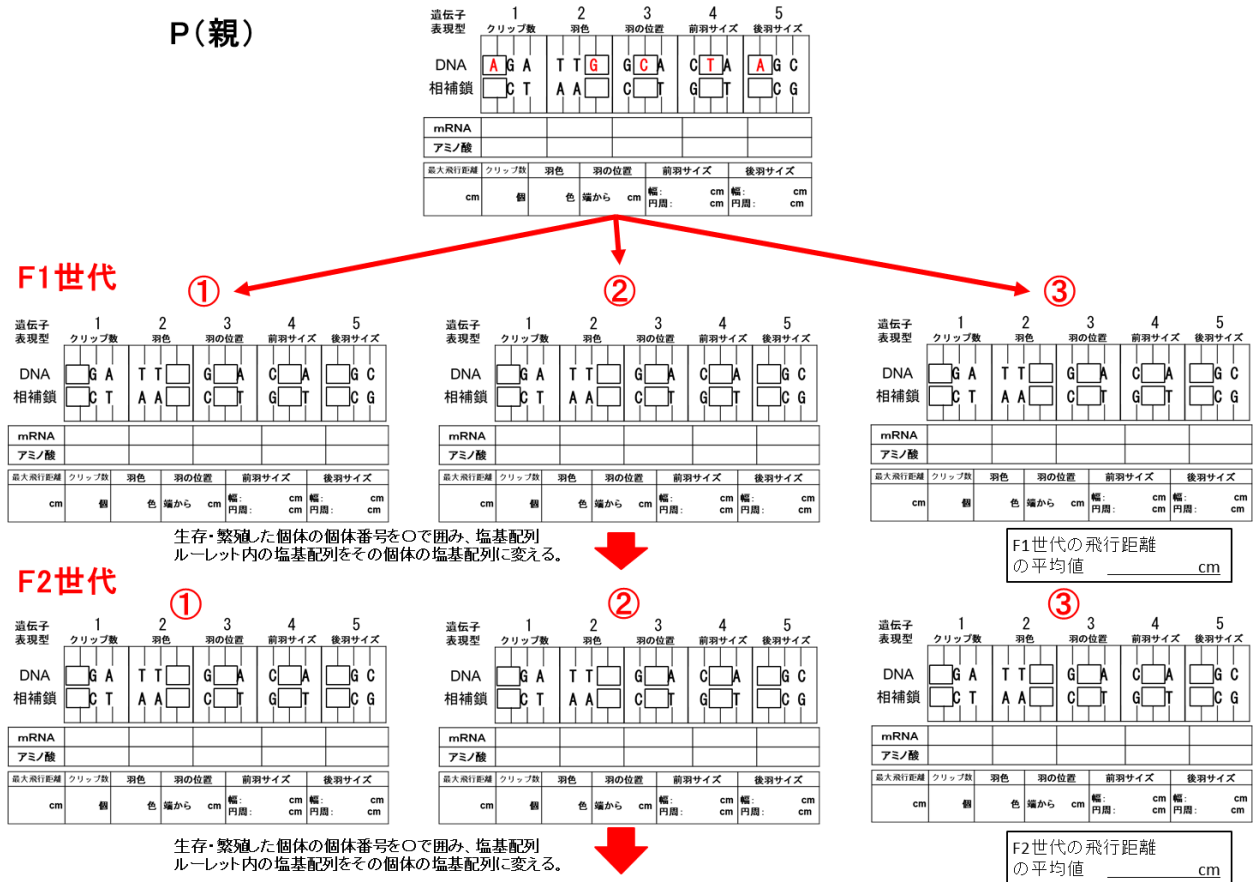
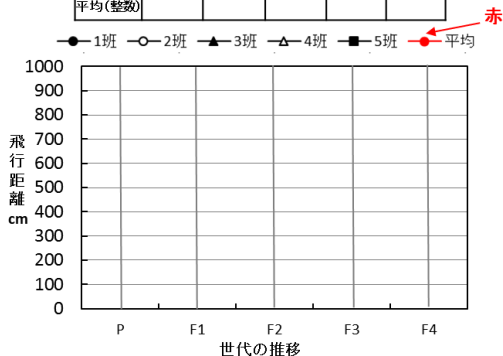


図8 結果シート

世代を経た飛行距離(cm)の変化

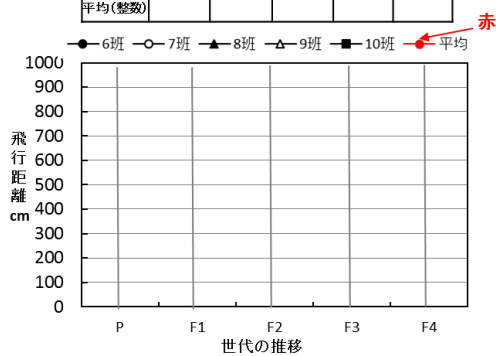
条件(1) **オアシスが少ない環境に生息**

	P	F1	F2	F3	F4
1班					
2班					
3班					
4班					
5班					
平均(整数)					



条件(2) **オアシスが多い環境に生息**

	P	F1	F2	F3	F4
6班					
7班					
8班					
9班					
10班					
平均(整数)					



F4世代の生存・繁殖した個体のアミノ酸配列のばらつき

条件(1) **オアシスが少ない環境に生息**

	遺伝子1	遺伝子2	遺伝子3	遺伝子4	遺伝子5
1班					
2班					
3班					
4班					
5班					
最多アミノ酸					

条件(2) **オアシスが多い環境に生息**

	遺伝子1	遺伝子2	遺伝子3	遺伝子4	遺伝子5
6班					
7班					
8班					
9班					
10班					
最多アミノ酸					

図9 データシート

本日の実習から得られたこと(③),(4)はできるだけ多く記入してください。

- 1) 実習は楽しかったですか？(○でかこんでください)
  - ①非常に楽しかった
  - ②楽しかった
  - ③少し楽しかった
  - ④あまり楽しくなかった
  - ⑤全然楽しくなかった
- 2) 実習は進化の理解に役立ちましたか？
  - ①非常に役立った
  - ②役立った
  - ③少し役立った
  - ④あまり役立たなかった
  - ⑤全然役立たなかった
- (3) 飛行距離の変化とF4世代のアミノ酸配列のグラフ・表からわかること。 (4) 全般的な感想  
及び、実習を通して気が付いたこと、理解が深まったこと

図10 レポート書式

## 4. 結果

### 4. 1 実験実習の実施

改良版プロトコルによる進化実験手順に従って、授業実践を行った結果と分析結果について述べる。武蔵野大学基礎セルフディベロップメント授業(数理学分野)61名のクラスで、90分×2コマ=180分の授業で実験実習を行った。3つのクラスで3回の授業を行ったが、そのうちの一つ(2016年7月21日実施)の授業を分析対象とした。準備+イントロ(30分)の後、各項目の説明をしながら実験を進行(約90分)し、その後データ整理とディスカッション、及びレポートの作成(60分)という時間配分で順調に終わることができた。

クラスを全10班(1班メンバー平均6人)に分けて、各班に1~10までの番号を付けた。1~5班は、条件1)(オアシスが少ない環境、飛距離が長い方が生き残る)、6~10班は、条件2)(オアシスが多い環境、飛距離が短い方が生き残る)として実習を行った。比較的複雑な手順にも関わらず、全ての班で実験とデータ整理、レポート作成をスムーズに時間内に終わることができたのは、説明資料を充実させたことと改良事項(羽の接着方法や結果シートなどのインターフェースの改良による手間の軽減と効率化)の効果があつたものと考えられる。

以下では、世代を経た飛行距離の変化、F4世代の生存・繁殖した個体のアミノ酸配列、及び本実習の「進化教育」への効果について、データ及びコメントを分析した結果について議論する。

### 4. 2 世代を経た飛行距離の変化

ここでは、まず1)各班で得られた飛行距離データの分析を行ない、得られた結果の特徴を調べる。次に、各班毎にデータ整理を行いながら学生たちがディスカッションをしてまとめた結果のレポートから、飛行距離に関するコメントの分析を行なう。

#### 1) 飛行距離データの分析

図11に、条件1)と条件2)における各班の飛行距離の、世代を経た変化を示す。これらのグラフより、条件1)では、PからF1、F2、F3、F4と世代を経るにつれて、各世代における飛行距離の平均値は、約2.5mから約5mに単調に増加していることがわかる。各世代における飛行距離のバラツキは、標準偏差が0.4mから1mの間であり、外れ値を除くとほぼ0.5m程度になっている。条件2)では、各世代における飛行距離の平均値は、約2.5mのまわりで、約2mから約3mの間で揺らいでおり、増加や減少の一定の傾向はないことがわかる。各世代における飛行距離のバラツキは、標準偏差が各世代で約1mであり、条件1)の場合と比べるとバラツキは2倍程度大きくなっている。条件2)のバラツキが条件1)のそれと比べて大きいのは、理由はよくわからないが、本実験では飛行実験を行う人を毎回変えているので、投げ人によるバラツキが相当影響している可能性がある。従って、バラツキの大きさに関しては、確かなことは言えないが、平均値の変化に関しては、条件1)と条件2)では明らかに異なる傾向を示すと言うことが出来る。

条件1) オアシスが少ない環境(飛行距離が長い方が生き残る)での飛距離の変化(cm)

世代	P	F1	F2	F3	F4
1班	300	300	363	510	533
2班	440	310	387	470	737
3班	210	350	383	473	473
4班	230	403	386	363	476
5班	250	300	260	346	490
平均	286	333	356	432	542

条件2) オアシスが多い環境(飛行距離が短い方が生き残る)での飛距離の変化(cm)

	P	F1	F2	F3	F4
6班	400	433	380	233	296
7班	120	120	270	190	206
8班	150	386	310	190	253
9班	255	406	253	140	110
10班	210	243	130	276	400
平均	227	318	269	206	253

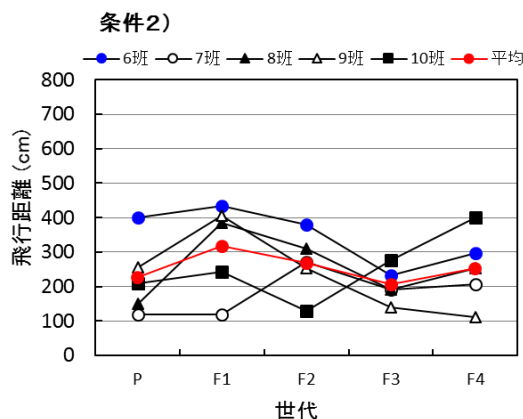
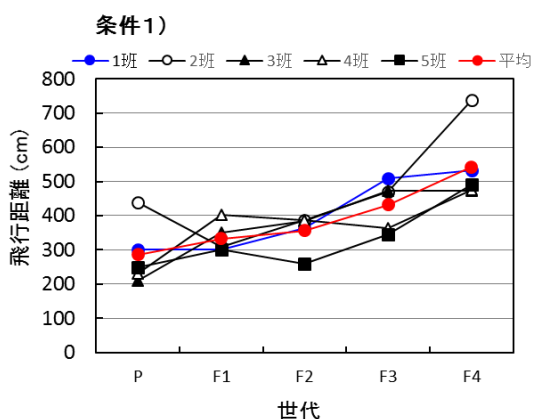


図11 世代を経た飛行距離の変化

## 2) 飛行距離に関するコメントの分析

飛行距離に関するコメントを、飛行距離の平均的な変化とバラツキの観点から整理した。付録表1に世代を経た飛行距離の変化についての学生のコメントを示した。飛行距離の平均的な変化では、条件1)と条件2)の平均的な変化の特徴をよく観察しており、条件1)では上昇、条件2)では横ばいか下降気味であることを指摘しているコメントが多かった。また、平均でみると、条件が同じならば同じように変化していることを指摘しているコメントや、前節では指摘していなかった「進化が進むにつれて飽和に近づく傾向」を指摘しているコメントがあり、良く実験結果を観察できていると思われる。

さらに、グラフが一定の傾向を示したと単に受け取るだけでなく、「確率的に挙動が決まるにも関わらず、与えられたシンプルな条件（環境条件）によって、同じ方向に同じように変化（進化）していく」ことを、非常に意外な面白いこととして受け取っているコメントがあった。実験の結果から、単に条件によって結果が異なると受け取るだけでなく、「進化における環境の影響の大きさ」を実感しているコメントがあった。

飛行距離のバラツキに関しては、条件1)と条件2)におけるバラツキの大きさの特徴を指摘しているコメントや、バラツキを増減を繰り返す時系列の変化として捉えているコメントがあった。バラツキの原因にも言及しており、ルーレットによる確率的な要因以外にヒトの手による不確定さを指摘しているコメントがあった。

### 4. 3 F4世代の生存・繁殖した個体のアミノ酸配列

#### 1) F4世代のアミノ酸配列の特徴の分析

各班で得られたF4世代のアミノ酸配列のデータを図12の上方の2つの表に示した。最多アミノ酸の項目には、アミノ酸名の後にアミノ酸数を示した。

- 条件1) では、遺伝子①、②、③、④、⑤として、セリン (3)、リシン (3)、アルギニン (2)、(アラニン (2) または アスパラギン酸 (2))、トレオニン (3) というアミノ酸配列が、いわゆるモチーフ配列 [4] として得られた。
- 条件2) では、遺伝子①、②、③、④、⑤が、(アラニン (2) またはセリン (2))、リシン (4)、アルギニン (2)、バリン (3)、セリン (4) というアミノ酸配列がモチーフ配列として得られた。
- 条件1) と条件2) では、明らかに異なる配列の傾向が得られている。遺伝子①においては、条件1) ではセリン (3) だが、条件2) ではアラニン (2) またはセリン (2) となっており、遺伝子⑤においては、条件1) ではトレオニン (3) だが、条件2) ではセリン (4) と明らかに条件1) と条件2) で異なる傾向にある。

条件1) オアシスが少ない環境(飛行距離が長い方が生き残る)  
 条件2) オアシスが多い環境(飛行距離が短い方が生き残る)

条件1)でのF4世代のアミノ酸配列

条件1の班	遺伝子①	遺伝子②	遺伝子③	遺伝子④	遺伝子⑤
1班	セリン	リシン	ロイシン	アラニン	トレオニン
2班	トレオニン	アスパラギン	ヒスチジン	グリシン	トレオニン
3班	セリン	リシン	プロリン	アラニン	セリン
4班	セリン	リシン	アルギニン	アスパラギン酸	トレオニン
5班	プロリン	アスパラギン	アルギニン	アスパラギン酸	セリン
最多アミノ酸	セリン(3)	リシン(3)	アルギニン(2)	アラニン(2)	トレオニン(3)
				アスパラギン酸(2)	

条件2)でのF4世代のアミノ酸配列

条件2の班	遺伝子①	遺伝子②	遺伝子③	遺伝子④	遺伝子⑤
6班	アラニン	リシン	アルギニン	アスパラギン酸	セリン
7班	セリン	リシン	アルギニン	バリン	セリン
8班	セリン	リシン	ヒスチジン	バリン	セリン
9班	アラニン	アスパラギン	ロイシン	アスパラギン酸	トレオニン
10班	トレオニン	リシン	プロリン	バリン	セリン
最多アミノ酸	アラニン(2)	リシン(4)	アルギニン(2)	バリン(3)	セリン(4)
	セリン(2)				

条件1)でのF4世代の各遺伝子の表現型

条件1の班	遺伝子① クリップ数	遺伝子② 羽色	遺伝子③ 羽の端からの位置(cm)	遺伝子④ 前羽サイズ' 幅(cm)×長さ(cm)	遺伝子⑤ 後羽サイズ' 幅(cm)×長さ(cm)
1班	1	赤	4	2×26	1×18
2班	1	青	2	1×18	1×18
3班	1	赤	4	2×26	3×20
4班	1	赤	3	3×20	1×18
5班	2	青	3	3×20	3×20
最多表現型	1	赤	3	2×26	1×18
				3×20	

条件2)でのF4世代の各遺伝子の表現型

条件2の班	遺伝子① クリップ数	遺伝子② 羽色	遺伝子③ 羽の端からの位置(cm)	遺伝子④ 前羽サイズ' 幅(cm)×長さ(cm)	遺伝子⑤ 後羽サイズ' 幅(cm)×長さ(cm)
6班	0	赤	3	3×20	3×20
7班	1	赤	3	4×30	3×20
8班	1	赤	2	4×30	3×20
9班	0	青	4	3×20	1×18
10班	1	赤	4	4×30	3×20
最多表現型	1	赤	3	4×30	3×20

表現型の 特徴	0が0	赤が3	2cmが1	1×18が1	1×18が3
	1が4	青が2	3cmが2	2×26が2	2×26が0
	2が1		4cmが2	3×20が2	3×20が2

表現型の 特徴	0が2	赤が4	2cmが1	1×18が0	1×18が1
	1が3	青が1	3cmが2	2×26が0	2×26が0
	2が0		4cmが2	3×20が2	3×20が4
				4×30が3	

図12 F4世代のアミノ酸配列と各遺伝子の表現型

次に、アミノ酸を表現型に変換して図12の下方の表に示した。各遺伝子の表す表現型の種類が、各班でどうなっているか、また最多表現型でどのようになっているかを見ることができる。また、最下方に、表現型の特徴(頻度分布)を示した。

- 遺伝子①(クリップ数)では、条件1) 条件2) 共に最多表現型は1で共通であるが、条件1) では0がなく2が1あるが、条件2) では2がなく0が2あるという大きな違いがある。条件1) では大きな飛距離が得られているが、これにはクリップ数が多いということが関係していると考えられる。

- 遺伝子② (羽色) は、飛行距離に関係ないはずであるが、条件 2) では赤、青が 4、1 と羽色の表現型に結果として偏りが見られ、ノイズが現れたものと考えられる。
- 遺伝子③ (羽の端からの位置(cm)) では、条件 1) 条件 2) 共に、2cm、3cm、4cm がほぼ均等に得られており、条件による表現型の違いは見られない。
- 遺伝子④ (前羽サイズ 幅(cm)×長さ(cm)) では、条件 1) では 1×18、2×26、3×20 が用いられているが、条件 2) では 3×20 と 4×30 しか用いられていないという違いがある。
  - ・条件 1) 大きな飛距離が得られやすい条件では、より小さな羽が用いられ、
  - ・条件 2) 大きな飛距離が得られにくい条件では、より大きな羽が用いられている傾向にあると言えるだろう。
- 遺伝子⑤ (後羽サイズ 幅(cm)×長さ(cm)) では、条件 1) 条件 2) 共に 1×18 と 3×20 が用いられているが、条件 1) では 1×18 が多く (3)、条件 2) では 3×20 が多い (4) という違いがある。

表 1 F4世代のアミノ酸配列の特徴

	条件1) 表現型の頻度	条件2) 表現型の頻度	条件1) 特徴
遺伝子① クリップ数	0が0 1が4 2が1	0が2 1が3 2が0	条件1)、すなわち大きな飛距離が得られやすい条件では、クリップ数が多く用いられている。
遺伝子② 羽色	赤が3 青が2	赤が4 青が1	条件2)では、羽色の表現型に結果として偏りが見られ、ノイズが現れたものと考えられる。
遺伝子③ 羽の端からの 位置(cm)	2cmが1 3cmが2 4cmが2	2cmが1 3cmが2 4cmが2	条件1)、条件2)共に、同じ表現型が均等に用いられており、条件による表現型の違いは見られない。
遺伝子④ 前羽サイズ 幅(cm)×長さ(cm)	1×18が1 2×26が2 3×20が2	1×18が0 2×26が0 3×20が2 4×30が3	条件1)、すなわち大きな飛距離が得られやすい条件では、より小さな羽が用いられ、 条件2)、すなわち大きな飛距離が得られにくい条件では、より大きな羽が用いられている傾向にある。
遺伝子⑤ 後羽サイズ 幅(cm)×長さ(cm)	1×18が3 2×26が0 3×20が2	1×18が1 2×26が0 3×20が4	条件1)、すなわち大きな飛距離が得られやすい条件では、より小さな羽が用いられ、 条件2)、すなわち大きな飛距離が得られにくい条件では、より大きな羽が用いられている傾向にある。

- ・条件 1) 大きな飛距離が得られやすい条件では、より小さな羽が用いられ、
  - ・条件 2) すなわち大きな飛距離が得られにくい条件では、より大きな羽が用いられている傾向にあると言えるだろう。
- 遺伝子④と遺伝子⑤のバランスに関しては、F4世代のデータのみでは、傾向を把握することは難しいと考えられる。以上得られたことを表 1 にまとめた。

## 2) F4世代のアミノ酸配列の特徴の分析(学生によるコメント)

次に、F4世代のアミノ酸配列の特徴について、学生がコメントした内容を分析する。重りの数については、「クリップの数が多くなると、より遠くまで飛ぶ。」という前節での分析と同じコメントが多かった (6件)。「前方に少し重み (クリップ 2個) があつた方が飛び方に安定感があつた。」という遠くまで飛ぶ要因にまで言及するコメントもあつた。羽の位置に関しては、「羽の位置も関係していて、近すぎず遠すぎない 3cm が一番安定していた。」というコメントが 2件あつた。前節で、F4世代のアミノ酸だけではこのことは見いだせなかったが、恐らく全世代の実験結果から見出したのだと思われる。羽のサイズについては、前節と同じ「全体的に羽が大きめの方があまり飛べない。」もあつたが、どちらかの羽に限定して、「前羽が大きいと飛ばない (3件)。」や「後ろ羽が大きいと飛ぶ。」、「後ろ羽が大きいと飛ばない。」があつた。前羽と後ろ羽のバランスが重要だと言及しているコメントが多く、前羽が大きく後ろ羽が

小さい方が良く飛ぶというコメントが2件あった。前羽と後ろ羽のバランスに関しては、互いに矛盾する見解が出されており、投げ方や羽の出来栄えになどによるバラツキが原因かもしれない。

その他として、各条件におけるアミノ酸配列と飛行距離に関して様々な観点からの「発見」がコメントされていた。例えば、「アミノ酸配列は条件1と2では全く異なる」こと、「1文字変わるだけで色や翼の大きさが変わったりする」こと、「配列の表では、列毎に同じものが多い」こと、「しかし、全く同じになっている配列はない」こと、「飛距離に関係がある変化と関係のない変化がある」こと、「理由は不明だが、最終的に羽が赤のリシンが多かった」こと、「飛ばす人によっても結果が異なるが、あまり大差は生まれない」ことなどがコメントされていた。

また、「必ず良い遺伝子から良い遺伝子になるとは限らないと思います。実験からわかるように良い記録から悪い記録になってしまうものもありました。」及び「進化は良いものがさらによいものを生むという連鎖だということが分かった気がするし、でもそれは多く生まれたうちのほんの少しなんだと思いました。」というコメントがあった。このことは、「進化では、遺伝子の質の連鎖がある」という概念を前提として持っていることを示唆しているように考えられる。「良いものを生むのはあくまで自然選択によって」であって、「遺伝子の状態が次の遺伝子の状態を決めるのではない」ということを、実習の中で分かりやすく伝える必要があるように思われる。

今回、全ての実習者が全ての作業を体験することを実現するために、投げる人を変えることにしたが、そのために、飛距離のバラツキが大きく表れた。しかしそれでも飛距離の平均的な変化の傾向を見出すことができた。しかし、このことは、学生によっては気になるポイントの一つであり、「今回は投げ方により結果に差が出てしまったため、正確にわかる実験もやってみたい」というコメントが複数あった。また、「遺伝子操作をして自分の好きなように替えてみたら、もっと距離が伸びるのではないかと思った。」というコメントもあった。

以上示したように、アミノ酸配列と飛行距離に関して非常に多彩な観点からのコメントがあったが、それらの中には、最初に自分たちで予測をたて、実験結果が予測と異なった場合に非常に驚いた反応を示したコメントが多くあった。こちらから予測をたてるように指示もしていないので、この実習は学生に積極性を与えるポテンシャルがあるものと考えられた。

全体として、「進化の結果としてのアミノ酸配列と表現形とが、飛距離とどう関係するか」を考察させる今回の試みは、進化の本質的な点（確率的な突然変異と自然選択）を直感的に学ぶことに貢献すると共に、遺伝子には表現型にとって重要な場所とそうでない場所があり、重要な場所は一定のアミノ酸の方向に進化していき、重要でない場所はランダムに変わっていくという「分子進化の機能的制約」という非常に重要な概念を把握することに繋げることができたと考えられる。

これらのコメントから、次に示すように、実習の改善すべき多くのポイントが示唆された。

- (1) 今回 F4 世代のアミノ酸配列のみを記録させ分析させたが、アミノ酸配列と飛距離の関係をよりエビデンスに基づいて議論できるようにするために、全世代のアミノ酸配列を分析させる。
- (2) アミノ酸配列だけでなく、アミノ酸配列に対応する表現型の表を作成させる。
- (3) 表現型と飛距離の関係を 1) と 2) のエビデンスに基づいて議論させ、得られた「発見」をまとめさせる。
- (4) 得られた「発見」を検証するための実験を検討させ、実験を実施させる。

付録表 2 に、F4 世代のアミノ酸配列と表現型の特徴についての学生によるコメントをまとめた。

#### 4. 4 実習全体への感想

本実習では、進化について正しい理解を得るために、実際に進化の過程を体験しながら学ぶことができる。また、本実習は、基礎セルフディベロップメント授業が意図しているアクティブラーニングの実践に非常に適している教材だと考えられる。そのような観点を含めて、学生に自由に書いてもらったコメントの内容を分類したものが表 2 である。

表 2 より、進化の理解が深まったことについてのコメントが一番多く 29 件あった。その中を分類すると、「自然選択の理解について」が 11 件と最も多く、本実習の目的がある程度達成されていることが示唆された。また、「進化を体験できた」や、

表 2 自由コメントの内容

	コメント内容	件数
1	進化の理解が深まった。興味を持った。ばらつき方がリアル。進化の素晴らしさを感じた	29
	1.1 自然選択の理解について	11
	1.2 進化を体験できた	7
	1.3 進化について興味をもった。学ぶことができた	4
	1.4 アミノ酸配列の進化、機能的制約について学んだ	3
	1.5 リアルな変化を感じた	3
	1.6 進化では、良い形質が引き継がれていく	2
2	実験が楽しかった。面白かった。新鮮だった。わかりやすかった。座学よりも楽しく分かりやすい。	19
3	実験は理解に役立った。初めは理解できなかったが、実験をやっているうちに理解できた。	12
4	意外な結果でおもしろかった。興味深かった。飛び方に特徴があって面白かった。	9
5	数学の意外な面白さ。理系の気分が味わえた。分析が面白かった。分母の大きさの重要性がわかった。	5
6	投げる人が変わるとばらつく。	5
7	班員との協力によって仲が深まった。	14
8	否定的なコメント	5

「興味を持った」、「リアルな変化を感じた」など、実習ならではの体験ができていることを示すコメントもあった。さらに、「アミノ酸配列の進化、機能的制約について学んだ」というコメントがあり、F 4 世代のアミノ酸配列の特徴の分析を行なったことが反映していると考えられる。

次に、実験が学生の興味の喚起や動機付けに対して非常に有効であったことが、次のようなコメント「実験が楽しかった。面白かった。新鮮だった。わかりやすかった。座学よりも楽しく分かりやすい。」や、「実験は理解に役立った。実験をやっているうちに理解できた。」、「意外な結果でおもしろかった。興味深かった。」に現れてい



る。また、「データに対する数学的な処理や統計的な処理の面白さ」を感じたコメントや、「投げる人が変わるとばらつく」ことを指摘するコメントも複数あった。

また、「班員との仲が深まった」というコメントが 14 件と多く見られた。具体的なコメントとして、「班の中でみんなで協力して調べることができました。自然に記録を取る人や計算をする人など役割が決まって、全員が班に貢献できていたと思います。」「分担してやることでとても協力的かつ効率的に楽しくできて、得るものが勉強面ではなくあったのが良かったです。」「班でやることによって、みんなと話し協力する機会が増えたのでとても楽しかったです。」などが挙げられており、グループワークとして有効に機能したことがわかる。

図 13 に実習後の学生へのアンケート結果を示す。a) 実習は楽しかったか、及び b) 実習は進化の理解に役立ったかという質問に 5 段階で解答してもらった。解答のあった 55 名の内訳人数と割合 (%) を図中に示した。ほとんどの学生がこの実習は楽しく、かつ進化の理解に役立つと答えたことが分かる。否定的な解答は、a) では 1 件、b) では 2 件のみであった。

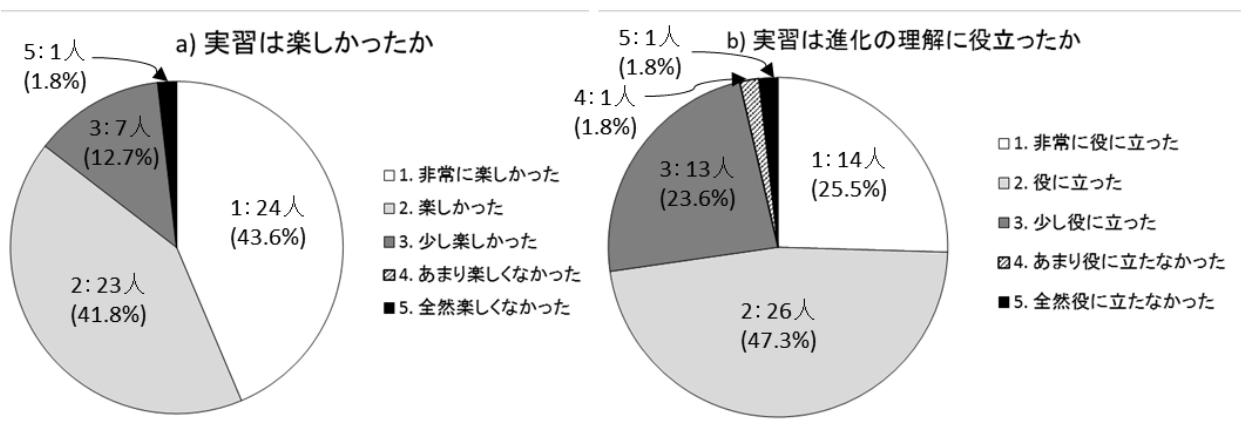


図13 実習後の学生の感想

#### 4. 5 本実習の「進化教育」への効果について

前節の学生のコメントで示されたように、本実習は進化について多くの気づきを学生に与えることができた。ここでは、山野井の方法 [2] に基づいて実習の効果を定量的に測定することを試みる。山野井は、進化実習の前後で進化に関する数十問の同じ問題を生徒に解かせて、二つの成績の差分を分析することで、実習の進化教育効果を定量的に測定している。ここでも同様の方法を用いて測定を行う。

山野井が用いた進化のテストでは、進化の定義に関する質問 (12 問)、自然選択に関する質問 (10 問)、突然変異に関する質問 (6 問) の計 28 問で構成されており、すべて〇×式である。実習時間の関係より、この調査テストから問題数を減らしたテストを作成し、ここでの測定に用いた。進化の定義に関する質問 (9 問)、自然選択に関する質問 (7 問)、突然変異に関する質問 (5 問) の計 21 問である (図 14 に示す)。回答欄に〇も×も書いていない場合は不正解として扱った。アンケート項目全体

の正答率は「正解数／21 問」の平均値、質問項目ごとの正答率は「正解者数／解答者数」により算出した。

学部	学科	班 学籍番号	氏名
----	----	--------	----

以下の文章を読み、正しいと思う場合は（ ）に○を、間違っていると思う場合は×を記入しなさい。

<進化について>

- (×) E1 進化とは、単純なものが複雑なものへと、生物の集団が変化することである。
- (○) E2 進化とは、生物の集団中で、異なる遺伝子を持つ個体の割合が世代を通じて変化することである。
- (×) E3 進化とは、環境の変化に対して、生物「個体」の形質が一生の間に変化することである。
- (×) E4 進化とは、生物の集団の形質が目的に応じて変化することである。
- (×) E5 進化とは、環境に関わりなく、種によって予め決まった方向に、生物の集団が変化していくことである。
- (○) E6 進化は、世代時間の短い生物であれば、数日の期間でも観察することができる。
- (×) E7 ある器官を、一生の間に、他の器官に比べて頻繁に使用すると、遺伝子のその器官に影響を及ぼす部位が変化し、次世代の子ではその器官が発達するような進化が起こる。
- (×) E8 新しい種が生じて初めて進化が起きたと言える。
- (○) E9 ヒトの盲腸などの器官は現在ではたらしきを失っているが、この変化も進化の一例である。

<自然選択について>

- (○) N1 自然選択が起きるには、その環境において、集団内の形質の違いによって、生存率や繁殖率に違いがあることが必要である。
- (×) N2 自然選択とは、弱肉強食の闘争（体を使って攻撃し合うこと）に強い個体だけが生き残ることである。
- (×) N3 自然選択とは、偶然に、ある個体が生き残って子孫を残したり、死んだりすることである。
- (○) N4 どのような形質の個体が自然選択されるかは、環境が変化すれば変わりうる。
- (×) N5 自然選択により一度首が長くなる方向に進化が起きれば、世代ごとに必ず首が長くなる進化が続く。
- (○) N6 自然選択と同様、人間の手によっても進化を起こすことができる。
- (○) N7 オスとメスでは異なる自然選択がはたらき、その結果オスメスで異なる形質の進化が生じることがある。

<突然変異について>

- (×) M1 配偶子（精子、卵子）に生じる突然変異は、必ず子どもの生存に不利にはたらく。
- (×) M2 突然変異は自然状態ではほとんど起こっていない。
- (×) M3 突然変異によってどの遺伝子が増えるかは、あらかじめ決まっている。
- (×) M4 突然変異とはすなわち、生物個体に変化が起こって新しい種が生まれることである。
- (○) M5 遺伝子に突然変異が起こっても、表現型に変化が起きないこともある。

## 図14 進化テストの質問項目

### 1) 実習前と実習後テストの得点の比較結果

テストの総得点は、実習前の 63.2%より、実習後の 65.6%の方がわずかに高かった。図 1 5 に実習前後テストの各学生の得点 (%) の比較（散布図）を示す。得点の増加が 20%以上の学生が 5 名、30%以上の学生は 2 名いた。得点が 15%以上減少している学生が 7 名いた（図 1 5 中の点線の領域で囲んだ点）。彼らの実習後の得点が低いことが、実習後の得点平均を押さえている要因の一つと考えられたので、7 名の項目毎の得点の変化を見てみた。

その結果、N1「自然選択が起きるには、その環境において、集団内の形質の違いによって、生存率や繁殖率に違いがあることが必要である。」、すなわち、自然選択の最も基本的な考え方が、7名中6名の正解から7名中6名の不正解へと実習後に変化していることがわかった。N1については、後で示すようにクラス全体での平均で73.7%→69.6%という微小な変化に留まっていることから、N1の減少はクラス全体の傾向ではないといえるが、人によっては、N1という自然選択の基本的な考え方を間違える方向に本実習が誘導してしまう可能性があることがわかった。その原因は不明であるが、今後検討課題としたい。

次に、進化テスト各項目での実習前後の得点変化を図16に示す。実習後に10%以上得点が増加している項目は、棒の上に◎印を用いて示したように、E2、E3、N7、M4である。一方、実習前後のどちらも得点が50%以下の項目は、棒の上に●印を用いて示したように、E4、E7、N3、M4である。図16のグラフを、実習前後の得点をx軸、y軸とした散布図に書き換えたグラフを図17に示す。散布図上で、実習後に10%以上得点が増加している項目を破線で囲み、実習前後のどちらも得点が50%以下の項目を実線で囲んだ。

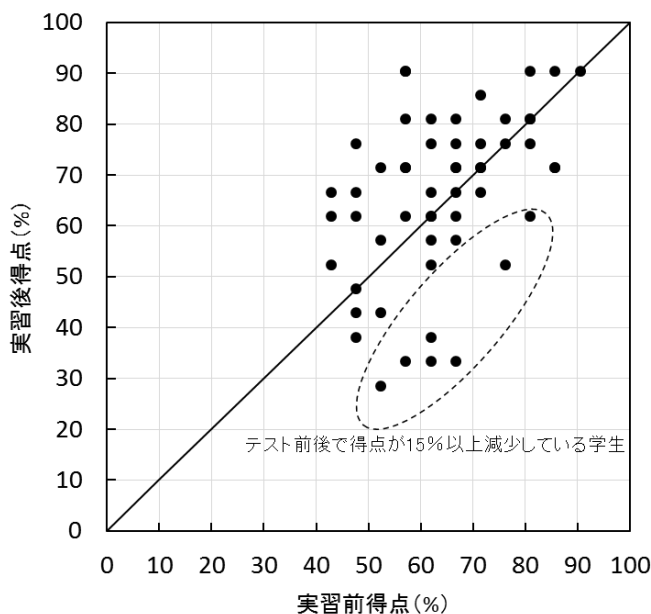


図15 各学生の実習前後の進化テスト得点の比較(散布図)

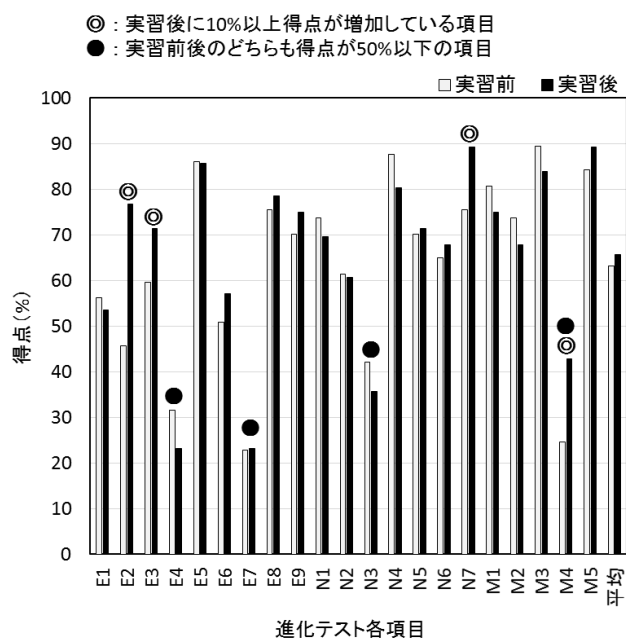


図16 進化テスト各項目での実習前後の得点変化

## 2) 実習前と実習後テスト結果に対する考察

実習後に10%以上得点が増加している項目のそれぞれについて、質問事項と実習前の得点(%)、及び変化量(%)を表3に示した。E2は進化の定義そのものであり、実習前が45.6%と低い点数であったが、実習後には76.8%まで31.2%増加しており、最も増加している項目である。進化の定義についての講義での説明が有効に機能したものと考えられる。E3については、進化のもとである突然変異が子孫誕生の際に発生するというオリガミバードの設定を経験したことが有効に機能したものと考えられる。N7については、講義で行ったX染色体とY染色体の違いの説明が有効に機能したと考えられる。M4については、実習前が24.6%と非常に低い点数であったが、オリガミバードの実験によって、突然変異は飛ぶ能力を変化させはするが、常に新しい種を生み出すことではないということを理解できたと思われる。しかし、実習後大きな改善はあっても50%以下に留まっているので、実習の中で、新しい種が生まれるイベントを導入するなどの検討が必要かもしれない。

山野井による論文[2]では、E4：目的論的な進化観の改善に関する質問項目、E1：進化は単純から複雑への変化とは限らないことを確認する質問項目、M4：突然変異と種分化を同義ととらえている誤理解の改善に関する質問項目が改善されたと報告されている。我々の実践においてもM4については共通に改善されたが、E1、E4に関しては寧ろ減少している。E1については、複雑から単純へと進化するような事例を実習の中で導入する必要があるかもしれない。E4については、実習前が31.6%と非常に低い点数であったが実習後はさらに-8.4%も減少している。

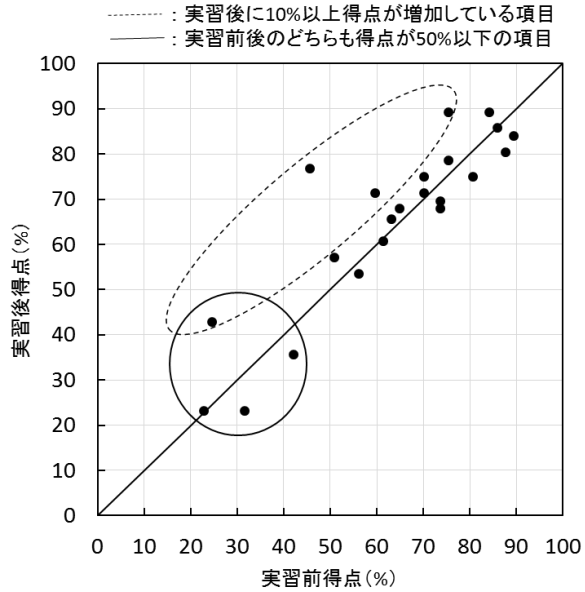


図17 進化テスト各項目での実習前後の得点変化(散布図)

表3 実習前後の得点変化が+10%以上の項目の質問事項と実習前の得点(%)、及び変化量(%)

項目	質問事項	解答	実習前の得点(%)	変化量(%)
E2	進化とは、生物の集団中で、異なる遺伝子を持つ個体の割合が世代を通じて変化するものである	○	45.6	31.2
E3	進化とは、環境の変化に対して、生物「個体」の形質が一生涯の間に変化することである	×	59.6	11.8
N7	オスとメスでは異なる自然選択がはたらき、その結果オスとメスで異なる形質の進化が生じることがある	○	75.4	13.8
M4	突然変異とはすなわち、生物個体に変化が起こって新しい種が生まれることである	×	24.6	18.3

実習前後の得点が50%以下の項目の質問事項と実習前の得点(%)、及び変化量について、表4に示した。E4は、実習前後で非常に低く、元々正しく理解できていない上に、実習の効果が見られない。別に行った実習授業でのコメントで、「飛距離を伸ばすことや縮めることを目的に進化を始めても、単調に目的に向かって変化していくのではなく、伸ばしたくても進化で飛距離が縮んだり、またその逆という結果がみられた。」というコメントがみられた。

表4 実習前後の得点が50%以下の項目の質問事項と実習前の得点(%)、及び変化量(%)

項目	質問事項	解答	実習前の得点(%)	変化量(%)
E4	進化とは、生物の集団の形質が目的に応じて変化することである	×	31.6	-8.4
E7	ある器官を、一生の間に、他の器官に比べて頻繁に使用すると、遺伝子のその器官に影響を及ぼす部位が変化し、次世代の子ではその器官が発達するような進化が起こる	×	22.8	0.4
N3	自然選択とは、偶然に、ある個体が生き残って子孫を残したり、死んだりすることである	×	42.1	-6.4
M4	どのような形質の個体が自然選択されるかは、環境が変化すれば変わらう	○	24.6	18.3

この生徒は、進化のE4の問題でも不正解であった。これは、「目的」という言葉の定義が質問文の中に陽に書かれていないため、「目的」という言葉を「生物自身の目的」ではなく、「自然選択圧」と同義に捉えている可能性も考えられる。従って、E4については、実習内容の検討と共に、質問文の表現についても検討した方がよいと考えられる。

E7については、獲得形質の進化が成り立たない[5]ことへの理解度は、実習の有無に関わらず非常に低い。実習の中で、ある器官を頻繁に使用するが、それは進化には関係しないことを表すような手順を加えることが必要かもしれない。N3については、実習によって、自然選択以上に偶然の因子の影響が大きいことを強く感じたことが効いている可能性がある。実習の中で、自然選択が効いている場面を強調する指導が必要かもしれない。また、問題文が正しく読み取れていない可能性もある。M4については、50%以下の項目の中で唯一実習の効果が非常に大きかった項目である。実習の条件1)と2)の違いによって飛距離が変わる実験が有効に機能したと考えられる。

## 5. まとめと今後に向けて

### 5.1 まとめ

大学教養課程における進化教育において、架空生物オリガミバードを用いた進化実習教材の運用の効率化、及び進化概念の理解度の向上を目的として、実習作業を効率化する改良を施した上でアミノ酸配列と飛距離の関係を分析するプロトコルを追加した。実習作業を効率化する改良としては、オリガミバードの羽のストローへの接着を両面テープを用いてリサイクルできるようにし、結果シートの書式の改良を行った。

- 1) 改良したプロトコルによる授業実践の結果、2コマ約61人のクラス全ての班で実験とデータ整理、分析、レポート作成までを、従来よりも数分の1の少ない材料でスムーズに時間内に終わることができた。
- 2) 飛距離を自然選択条件として、飛距離の変化の分析を実践させたところ、平均的な変化の特徴とばらつきの特徴をよく観察できていた。また、世代を経た後のア

ミノ酸配列と飛距離の関係の分析を実践させたところ、多くの班で、重りの数と羽のサイズに関わる遺伝子のアミノ酸に、飛距離と関係のある有意な特徴を発見することができた。また、飛距離に関係がある変化と関係のない変化があることも発見できた。結果として、「進化の機能的制約」の概念の学習が可能になったと考えられる。

- 3) 本実習によって、進化についての理解が促進されること、実験が分かりやすさや動機付けに有効であること、班内での協力などグループワークとして有効に機能したことがわかった。
- 4) 実習前後で進化に関するテストを実施したところ、進化に関する定義、自然選択に関する項目で得点が上昇し、本実習が進化及び自然選択の概念習得に有効に機能したことがわかった。
- 5) 一方、目的論的な進化観の改善に関する質問項目では、改善は見られなかった。これについては、「目的」という言葉の定義の誤理解の可能性も含めて、今後検討したい。

## 5. 2 今後に向けて

本実習の実践によって明らかになった課題を解決するために、実習の方法に関して新しく以下のような検討を行うことを考えている。

- 1) 今回 F4 世代のアミノ酸配列のみを記録させ分析させたが、アミノ酸配列と飛距離の関係をよりエビデンスに基づいて議論できるようにするために、全世代のアミノ酸配列と対応する表現型と飛距離の関係を議論させる。
- 2) 実習の中で、新たな進化的イベントを導入する。例えば、新しい種の誕生に対応したイベントや獲得形質の進化が成り立たない事がわかるようなイベントなど。
- 3) 目的論的な進化観の改善を促すような検討を行う。

## 6. 文献

- [1] 文部科学省（2009）高等学校学習指導要領解説 理科編 理数編. 実教出版.
- [2] 山野井貴浩（2013）「後期中等教育において進化のしくみを理解させる実験・実習教材に関する研究」, 東京大学博士論文, 学位番号：甲第 29757 号, 2013 年 7 月 19 日
- [3] Westerling, K. E. (1992) <http://www.indiana.edu/~ensiweb/lessons/origami.html>
- [4] 宮田隆（1994）分子進化学への招待. 講談社ブルーバックス
- [5] 用不用説 <https://ja.wikipedia.org/wiki/%E7%94%A8%E4%B8%8D%E7%94%A8%E8%AA%AC>

## 7. 付録

### 7. 1 山野井によるオリガミバード進化実験プロトコルの詳細

オリガミバードによる進化実験を、以下のように行う。図表は文献 [2] より引用した。

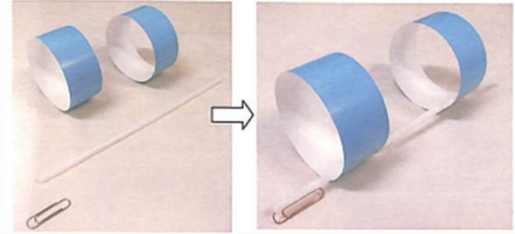
#### ①オリガミバードの作成

オリガミバードの作成は付録図1のように行う。

1. ストロー1本を身体、帯状の用紙2枚を羽、クリップをおもりとして用意する。
2. 用紙を輪上にして、約1cmだけ重ね合わせてセロハンテープでストローに固定する。
3. ストローの先端にクリップを押し込んで取り付ける。

**材料**  
 1. 以下を用意する。  
 身体 : ストロー1本  
 羽 : 帯状の用紙2枚  
 おもり : クリップ

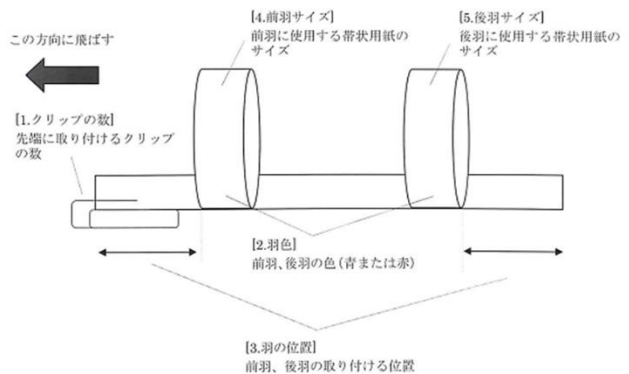
**作成**  
 2. 用紙を輪上にして、約1cmだけ重ね合わせて、セロハンテープでストローに固定。  
 3. ストローの先端にクリップを取り付ける。



付録図1 従来法によるオリガミバードの作成法

#### ②遺伝子の突然変異の生成法

オリガミバードには5種類の表現型があり、その表現形を決める5つの遺伝子がある。付録図2に示すように、表現型としては、1. クリップ数、2. 羽色、3. 羽の位置、4. 前羽サイズ、5. 後羽サイズがあり、それぞれの表現形を決定する5つの遺伝子があるとする。それぞれの遺伝子は一つのコドン(3つのDNA)でできているとし、それぞれ突然変異する塩基位置が決っており、塩基の4つの変異に従い4つの表現型が現れるとする。



付録図2 オリガミバードの作成法

遺伝子の突然変異は、配偶子突然変異ボックス(付録図3)によって生成する。配偶子突然変異ボックスには2つのルーレットがあり、左のものは突然変異する塩基を決定し、右のものはどの塩基に置換するかを決定する。ルーレットによって決定された遺伝子の塩基に従って、ボックス内のDNAの塩基を変更する。突然変異とそれに伴い変化するmRNA配列、アミノ酸、表現型は、突然変異表(付録図4)に示す。



付録図3 配偶子突然変異ボックス

③実験方法

- 最初に (3×20cm) サイズの用紙を用いて親鳥を作成し、親鳥の情報を結果シート (付録図5) に記入する。
- 親鳥を投げて飛行距離を調べる。これを2回行い大きい方を結果シートに記録する。
- 次に子孫の突然変異を配偶子突然変異ボックスを用いて3回生成し、飛行距離を調べる。子孫の情報と飛行距離を結果シートに記録し、3つの子孫の平均飛行距離を求め、自然選択の条件に応じて最大か最小の平均飛行距離の個体を選択する。選択した個体を親鳥として同様の作業に繰り返し4代目の子孫まで測定を行い記録する。
- 最後に、世代の飛行距離の平均値を付録図6の表に記録し、グラフを書く。

遺伝子3 羽の位置

DNA	mRNA	アミノ酸	表現型
GAA	CUU	ロイシン	端から4cm
GTA	CAU	ヒスチジン	端から2cm
GGA	CCU	プロリン	端から4cm
GCA	CGU	アルギニン	端から3cm

遺伝子1 クリップの数

DNA	mRNA	アミノ酸	表現型
AGA	UCU	セリン	1
TGA	ACU	トレオニン	1
GGA	CCU	プロリン	2
CGA	GCU	アラニン	0

遺伝子2 羽色

DNA	mRNA	アミノ酸	表現型
TTA	AAU	アスパラギン	青
TTT	AAA	リシン	赤
TTG	AAC	アスパラギン	青
TTC	AAG	リシン	赤

遺伝子4 前羽サイズ

DNA	mRNA	アミノ酸	表現型
CAA	GUU	バリン	前羽 幅 4cm 長さ 30cm
CTA	GAU	アスパラギン酸	前羽 幅 3cm 長さ 20cm
CGA	GCU	アラニン	前羽 幅 2cm 長さ 26cm
CCA	GGU	グリシン	前羽 幅 1cm 長さ 18cm

遺伝子5 後羽サイズ

DNA	mRNA	アミノ酸	表現型
AGC	UCG	セリン	後羽 幅 3cm 長さ 20cm
TGC	ACG	トレオニン	後羽 幅 1cm 長さ 18cm
GGC	CCG	プロリン	後羽 幅 4cm 長さ 30cm
CGC	GCG	アラニン	後羽 幅 2cm 長さ 26cm

付録図4 突然変異表

オリガミバード 結果シート ※生息環境の設定:条件 ( ①・② ), 飛行距離の ( 長い・短い ) 個体が生存・繁殖する

3年( )組( )番氏名( )

※上のDNA鎖が転写される。  
※旧実験方法を行う際は、  
mRNAとアミノ酸を書く欄は  
使用しません。

※転写・翻訳した個体のDNAをべんて読み、DNAの塩基配列  
ルール内の塩基配列をその個体の塩基配列に変える。

前羽 幅 3cm 内層 20cm  
後羽 幅 3cm 内層 20cm  
羽の色 青色 クリップの数 1個  
羽の位置 端から 3cm  
最大飛行距離 cm

前羽 幅 cm 内層 cm  
後羽 幅 cm 内層 cm  
羽の色 色 クリップの数 個  
羽の位置 端から cm  
最大飛行距離 cm

前羽 幅 cm 内層 cm  
後羽 幅 cm 内層 cm  
羽の色 色 クリップの数 個  
羽の位置 端から cm  
最大飛行距離 cm

F<sub>1</sub>世代の飛行距離の平均値 cm

付録図5 結果シート

b) 裏面(一部)

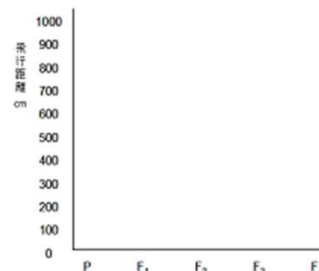
<各環境ごとの世代を経た飛行距離の変化>

	環境 飛行距離の「長い」個体が生存・繁殖する					平均
	1代	2代	3代	4代	5代	
P						cm
F <sub>1</sub>						cm
F <sub>2</sub>						cm
F <sub>3</sub>						cm
F <sub>4</sub>						cm
F <sub>5</sub>						cm

	環境 飛行距離の「短い」個体が生存・繁殖する					平均
	1代	2代	3代	4代	5代	
P						cm
F <sub>1</sub>						cm
F <sub>2</sub>						cm
F <sub>3</sub>						cm
F <sub>4</sub>						cm
F <sub>5</sub>						cm

環境ごとに、各世代(P~F<sub>4</sub>)の飛行距離の平均値をグラフにプロットし、線で結ぶ。  
※ただし、飛行距離が「長い」個体が生存・繁殖する環境のプロットは「赤」線で、「短い」個体が生存・繁殖する環境は「青」線で結ぶこと。



付録図6 結果シート(飛行距離の記録とグラフ)



## 7. 2 飛行距離に関するコメントの分析 (学生によるコメント)

世代を経た飛行距離の変化についての学生のコメントを付録表1に示す。

付録表1 世代を経た飛行距離の変化の分析(学生のコメント)

	代表的コメント	備考
飛行距離の平均的な変化	<ul style="list-style-type: none"> <li>●1~5班は右肩上がりで、6~10班は平行の平均値となっている。</li> <li>●条件1のグラフの方が右肩上がりで2のほうは基本的に右肩下がり</li> <li>●平均でみてみると進化するにつれて変化している。</li> <li>●条件1 世代が進むごとにグラフは全体的に上に伸びている？</li> <li>●条件2 世代が進んでもグラフは上には伸びず、横ばいか下降気味である。</li> <li>●平均でみてみると進化するにつれて変化している。</li> <li>●一つ一つの班の結果はでこぼこしてたりするけれど、平均をとると増加傾向や減少傾向がわかる。</li> <li>●進化の過程にばらつきがあっても最終的に全体を見るとどの班も似たような形の進化になる。</li> <li>●進化を重ねるたびに進化の度合いが小さくなるのだと思いました。</li> <li>●本当にこんな実験で理想的な結果が出るのかと、始まる前には半信半疑だった。実際、F2では平均値が下がりどうなることかと思ったが、その後順調に記録を伸ばし、進化っぽい変化をしていって感動した。生物はこのような進化を気の遠くなるような膨大な時をかけて行っているのかと果てしない気分になった。</li> <li>●ルーレットで変異する遺伝子、変異の仕方を決めているにも関わらず、たった1つ条件づけをするだけで、ちゃんと同様の方向に進化を遂げていくのはすごく面白かった。</li> <li>●進化における環境の因子の影響力の大きさを感じた。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>●条件1と条件2の平均的な変化の特徴をよく観察しており、条件1)では上昇、条件2)では横ばいか下降気味であることを指摘。</li> <li>●平均でみると、条件が同じならば同じように変化していることを指摘。</li> <li>●進化が進むにつれて飽和に近づく傾向を指摘。</li> <li>●グラフが一定の傾向を示したと単に受け取るだけでなく、確率的に挙動が決まるにも関わらず、与えられたシンプルな条件(環境条件)によって、同じ方向に同じように変化(進化)していくことを、非常に意外な面白いこととして受け取っている。</li> <li>●進化における環境の影響の大きさを実感している。</li> </ul>
飛行距離のばらつき	<ul style="list-style-type: none"> <li>●オアシスが少ない環境の方がバラツキが小さい。</li> <li>●オアシスが多い環境にはバラツキが見られる。</li> <li>●飛行距離はすぐに増加したり、減少するのではなく、増加と減少を繰り返しながらだんだんと増加減少していくことが、グラフからわかる。</li> <li>●進化は、増減を繰り返しながら、一定の方向にゆっくりと進んでいく。</li> <li>●世代によっては変化をしない世代もあるのがとても興味深く、面白い。</li> <li>●バラツキの原因は、ルーレットを回しているのとヒトの手で飛ばしていることが関係していると思われる。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>●条件1と条件2における「ばらつき」の大きさの特徴を指摘している。</li> <li>●バラツキを増減を繰り返すという時系列の変化として捉えている。</li> <li>●バラツキの原因に言及しており、ルーレットによる確率的な要因以外にヒトの手による不確定さを指摘している。</li> </ul>

### 7. 3 F4世代のアミノ酸配列の特徴の分析(学生によるコメント)

F4世代のアミノ酸配列と表現型の特徴(学生によるコメント)を付録表2に示す。

付録表2 F4世代のアミノ酸配列と表現型の特徴(学生によるコメント)

	コメント
重りの数	<ul style="list-style-type: none"> <li>●クリップの数が多くなると、すごく遠くまで飛ぶ。</li> <li>●最初は、クリップを2つつけると前の方が重くなり、すぐ落ちてしまうと思っていましたが、実際に飛ばしてみると、今まであまり飛ばなかったものが飛ぶようになりました。</li> <li>●前方に少し重み(クリップ2個)があった方が飛び方に安定感があった。</li> </ul>
羽の位置	<ul style="list-style-type: none"> <li>●羽の位置も関係していて、近すぎず遠すぎない3cmが一番安定していた。</li> <li>●羽は端過ぎてても内側過ぎててもだめ。</li> <li>●遺伝子1、2、3はどちらの条件でも最多アミノ酸が同じで飛距離にはそれほど影響しないのかなと感じた。</li> </ul>
羽のサイズ	<p>【全般】 ●全体的に羽が大きめの方があまり飛べない。</p> <p>【前羽について】 ●前羽が大きいと飛ばない。</p> <p>【後羽について】 ●後羽が大きいと飛ぶ。</p> <p>【前羽と後羽のバランス】</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>●前と後ろでバランスがとれていると飛ぶ</li> <li>●前羽が後羽より大きい場合、重心が前になるため飛びやすかった。反対に前羽が後羽より小さい場合には、重心が後ろになるためあまり遠くには飛ばなかった。</li> <li>●前羽の方が長い(大きい)方がよく飛ぶ。●後羽が小さい方が飛びやすく、大きいと飛び難い。</li> </ul>
その他	<ul style="list-style-type: none"> <li>●アミノ酸配列では、条件1と2では全く異なった変化が見られた。</li> <li>●アミノ酸配列の中の1文字変わるだけで色や翼の大きさが変わったり、たった1文字なのに、染色体のように1本違うだけで障害を持つみたいに、その1文字で全く違うアミノ酸になって変化するというのが良く分かり、とても楽しかったです。</li> <li>●アミノ酸配列と飛行距離というの関係していることがわかった。また、それらは環境下で変化していくこともわかった。</li> <li>●配列の表では、列毎に同じものが多いと感じました。でも全く同じになっている配列はありませんでした。</li> <li>●飛距離に関係がある変化と関係のない変化があることがわかった。</li> <li>●なぜだかはわからないが、全体的に最終的に羽が赤のリシンが多かったこと。</li> </ul> <p>●初め予想したのは、クリップ2つ、位置は端から4cm、羽のサイズは前も後ろも大きいものが最も飛ぶと考えていましたが、実際は全逆で、新しい発見が出来、とても面白かったです。</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>●必ず良い遺伝子から良い遺伝子になるとは限らないと思います。実験からわかるように良い記録から悪い記録になってしまうものもありました。</li> <li>●進化は良いものがさらによいものを生むという連鎖だということが分かった気がするし、でもそれは多く生まれたうちのほんの少しなんだと思いました。</li> </ul> <ul style="list-style-type: none"> <li>●飛ばす人によっても結果が異なるが、あまり大差は生まれない事。</li> <li>●今回は投げ方により結果に差が出てしまったため、正確にわかる実験もやってみたくて思いました。</li> <li>●遺伝子操作をして自分の好きなように替えてみたら、もっと距離が伸びるのではないかと思った。</li> </ul>

(原稿提出: 2017年1月18日; 修正稿提出: 2017年1月31日)