

京都教育大学

平成 27 年度 修士論文（副論文）

Origami Bird を用いた進化教育の実践

教科教育専攻 理科教育専修

小巻 一步

（学籍番号 ）

指導教員 梶原裕二

指導教員 今井健介

生態学研究室

目次

I	はじめに	1
II	進化の教材としてのオリガミバード	4
II-1	Westerling のオリガミバード	4
II-2	日本におけるオリガミバードの改良	6
III	オリガミバードのシミュレーション法の開発	10
III-1	オリガミバードの形質と飛行距離の関係	10
III-1-1	目的	10
III-1-2	方法	10
III-1-3	結果	11
III-1-4	考察	15
III-2	オリガミバードのシミュレーション実験	16
III-2-1	目的	16
III-2-2	方法	16
III-2-3	結果	18
III-2-4	考察	19
III-3	まとめ	20
IV	新たなモデルの検討	21
IV-1	オリガミバードの有性生殖モデル	21
IV-1-1	目的	21
IV-1-2	方法	21
IV-1-3	結果	24
IV-1-4	考察	25
IV-2	オリガミバードをストローから進化させるモデル	28
IV-2-1	シミュレーションによる検証	28
IV-2-1-1	目的	28
IV-2-1-2	方法	28
IV-2-1-3	結果	30
IV-2-1-4	考察	31

IV-2-2	手投げ実験による検証	32
IV-2-2-1	目的	32
IV-2-2-2	方法	32
IV-2-2-3	結果	32
IV-2-2-4	考察	34
V	新モデルを用いた実践	35
V-1	自然選択による進化の原理を理解させる実践 ～私立 T 高等学校～	35
V-1-1	目的	35
V-1-2	方法	35
V-1-3	結果	39
V-1-4	考察	42
V-2	アクティブラーニングを意識した実践～京都府立 K 高等学校での実践～	43
V-2-1	第 3 学年での実践	43
V-2-1-1	目的	43
V-2-1-2	方法	43
V-2-1-3	結果	45
V-2-1-4	考察	55
V-2-2	第 1 学年での実践	
V-2-2-1	目的	57
V-2-2-2	方法	57
V-2-2-3	結果	59
V-2-2-4	考察	66
VI	総合考察	69
VII	謝辞	72
VIII	参考文献	73
IX	付録	75
	付録 1 私立 T 高等学校での実践における資料	75
	付録 1-1 私立 T 高等学校での実践における実験方法プリント	76
	付録 1-2 私立 T 高等学校での実践における実験結果記録用紙	77

付録 1-3 私立T高等学校での実践における実験結果まとめプリント・・・	79
付録 2 京都府立K高等学校第3学年での実践における資料・・・	81
付録 2-1 京都府立K高等学校第3学年での実践における資料での実践における 実験方法プリント・・・	82
付録 2-2 京都府立K高等学校第3学年での実践における資料での実践における 実験結果記録用紙・・・	83
付録 2-3 京都府立K高等学校第3学年での実践における資料での実践における 実験結果まとめプリント・・・	85
付録 3 京都府立K高等学校第1学年での実践における資料・・・	87
付録 3-1 京都府立K高等学校第3学年での実践における資料での実践における 実験方法プリント・・・	88
付録 3-2 京都府立K高等学校第3学年での実践における資料での実践における 実験結果記録用紙・・・	89
付録 3-3 京都府立K高等学校第3学年での実践における資料での実践における 実験結果まとめプリント・・・	91

I. はじめに

自然選択による進化を指導することの重要性

高等学校理科、特に生物は指導すべき内容が膨大であり、それらの膨大な知識すべてを指導することは極めて難しい（山野井, 2012）。生物は多様性に満ちていることから、それに伴い高等学校生物で指導すべき内容も多様で幅広くなる。よって、それぞれの知識を個別のものとして指導してしまう傾向があり、そのため各単元の知識を関連付けて理解することは非常に難しいと考えられる（山野井, 2013）。

多様な生物現象同士を個別のものとして扱うのではなく関連付けて理解するには、生物全体を見通すための共通した視点が必要であると考えられる。高等学校学習指導要領解説理科（文部科学省、2009）の生物分野においては、多様な生物現象同士を関連付けて理解するために「共通性と多様性」を全体で意識して指導するように述べられている。「共通性」は、生物が共通の祖先から進化してきたことによって、異なる生物同士でも共通の形質をもつことを示している。「多様性」は生物が環境に適応していくことによって、多様な形質を進化させていることを示している。生物の多様なあり方を、生物全体で共通しているものと、共通していないものに分類・整理することで体系化しているのが、現行の生物教育のあり方である。

「共通性」を意識して指導することによって、関係がないように見える現象を一つの大きなルールに基づいて理解させることが出来る。しかし、共通性の見えない現象については未だに暗記科目として扱われてしまう。この「多様性」を理解するための理論として「自然選択による進化」を利用することで、それらを関連付けて理解することが出来る。福井・鶴岡（2002）は日米の進化教育の比較調査を行い、それらの結果から、両国に共通していた進化の教授価値として「進化の教授価値は、それが歴史的観点から生物界全体（あるいは生物学という学問全体）を統一的に捉えさせることができる点にある」と述べている。生物は種によって多様な形質をもっているが、それらを与えたのは「自然選択による進化」という共通の原理である。自然選択による進化の原理を生物における多くの知識をつなぎ合わせるものとして指導することによって、生物の「多様性」についても多くの知識を関連付けて理解することができ、生物を総合的かつ統一的に理解することが出来るのである。

進化教育の現状と課題

自然選択による進化は、直観的に理解することが難しく、誤概念を持ちやすい現象である

ため、学習しにくい分野である。日本における進化教育の現状は充実しているとはいいがたい。山野井（2012）によると、生物系学部の大学1年生対象の調査において「生物Ⅱ」の進化の授業における実験・実習の実施状況はその他の単元に比べて低く10%程度であることが報告されている。実際、山野井（2010）などによって、進化についてすでに学んだ高校生や生物学分野を専門に学んでいる学生にも、進化に関する複数の誤概念が残っているということが示されている。また、高等学校で理科を指導している教員の中にも進化に関する誤概念や、進化を指導することに対する苦手意識があるということも報告されている。この現状を打開するためには、実験活動などを通して、進化をよりイメージしやすいものにする必要があると考えられる。

生物がもつ精緻な構造は、あたかもあらかじめの目的を持って作られたもののように思える。しかし、そのような構造が生まれる原因は、目的などによって左右されない遺伝子のランダムな変異である。ランダムな変異が自然選択の作用によってあらかじめ設計されたかのような構造やしくみを生み出すのである。この現象は、「進化は何らかの目的を持って起こるものである」という誤概念を生徒に与えてしまう原因となる。このような誤概念を生じないようにするためには、講義形式の授業だけでなく、実験教材などを使用することも必要であろう。なぜなら、ランダムな変異によって精緻な構造が作られることは講義だけではイメージしにくく、実験によって示す必要があると考えられるからである。

また、進化は非常に長い時間をかけて起こる現象であり、生物の進化の様子をリアルタイムで観察することは難しい。そのため、進化は生徒にとってイメージのしにくい現象であると考えられる。このことから分かるように、進化という現象は実験（世代の変化を観察でき、それらを短い時間で行うことが出来るもの）などの活動を通して、イメージを持たせながら指導する必要があると考えられる。より短い時間で進化を観察できるため、自然選択のイメージがしやすくなるのである。

本研究で扱う Origami Bird は、アメリカで Westerling（1992）によって開発された自然選択による進化を理解させるための教材である。人工生物である Origami Bird にランダムな変異と自然選択を与えていくことによって、進化を引き起こし、その様子を観察することが出来る。Origami Bird を用いることによって、ランダムで無目的な変異によって機能的な構造が作られることを実感することが出来る。また、比較的短い時間で進化を観察することが出来るので、進化のタイムスケールによる問題も解決できる。日本ではこれまで Yamanoi *et al.* (2012) などによって改良が行われ、自然選択についてだけでなく、中立進化

や塩基配列の変異と形質変化の関わり、種分化など、進化に関するさまざまな内容を学習できるようになった。また **Origami Bird** を用いた実践研究も行われており、日本の高校生に対する教育効果も検証されている。一方で、実験による進化の結果生まれる個体の形質の多様性を授業などにおいてどのように活用するかということやある遺伝子から形質をどのように発現させるかなどについては、改良の余地があると考えられる。本研究では、**Origami Bird** のさらなる改良と新たな授業展開について検討する。

第 2 章では、これまでのオリガミバードに関する研究について述べ、その改善点などについて考察する。第 3 章では、オリガミバードの教材化や新たなモデルの開発などにおいて重要となるシミュレーション方法について述べる。オリガミバードのシミュレーション法を開発することで、設定の変更や新たなモデルの開発を簡易に行うことが出来るようになると考えられる。第 4 章では第 3 章で研究したオリガミバードのシミュレーション法を用いて開発した、新たなオリガミバードのモデルと、それらの教材化について検討する。第 5 章では、オリガミバードを教材として用いた実践の結果について述べる。第 6 章では、本研究で扱った各章の内容について総合的に考察する。

Ⅱ．進化の教材としてのオリガミバード

Ⅱ－１．Westerling のオリガミバード

オリガミバード (Westerling, 1992) は、ランダムな変異が環境によって自然選択され、生物が進化していくことを短時間で実感を伴いながら学ぶことが出来る教材である。人工生物であるオリガミバードの飛行に関する遺伝的形質 (羽の大きさ、羽の付く位置など) に、目的のない無作為な変異を与えた上で「繁殖」させ、子孫たちのうち飛行距離の長い個体が生き残るような自然選択をかけることによって飛行能力の進化の様子を観察することが出来る。

Westerling (1992) のオリガミバードはストローと紙を材料とする。紙を帯のように切ったものを丸め、それを2つ作りそれぞれ前羽と後ろ羽とする (図 2-1)。それをストローにセロハンテープなどで接着する。このオリガミバードをストローの部分を持って投擲する。

オリガミバードでは、まずある個体を飛行させ飛行距離を調べた後、3羽の子を産ませる。3羽のうち、1羽は何の変異も与えず親のクローンとする。残りの2羽にはコインとサイコロを用いてランダムな変異を与える。まず、コインによって前羽か後羽のどちらに変異を与えるかを決定する。その後、サイコロによってその羽にどのような変異が起こすかを決定する (表 2-1)。その後、新たな3個体の飛行距離を測定する。

3個体のうち、飛行距離の長い個体だけが次世代の親になることが出来る。オリガミバードは実験の設定として、北アフリカの乾燥地帯に生息しているため、水を飲むためには、その地域に点在しているオアシス間を飛行する必要がある、飛行距離の長くなるような形質をもつものが有利となるのである。

以上のようなプロセスを繰り返すことによって、飛行距離を伸ばすような遺伝的変異が次世代に伝えられ、次第にオリガミバードはよく飛ぶ形態へと進化していく。ランダムな変異と環境の作用で選択され生物が進化することを生徒がリアルタイムで実感することが出来るのである。次項Ⅱ－2では、過去のオリガミバードを用いた実践と改良、またそれらが生徒の進化概念にどのような影響を与えたかについて述べる。

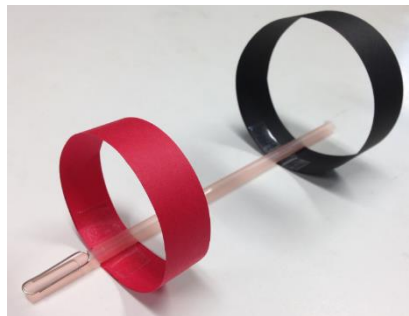


図 2-1. オリガミバードの形状。画用紙で前羽と後ろ羽を作り、セロハンテープでストローに接着する。

表 2-1. オリガミバードに変異を与えるコインとサイコロの形式

コイン		サイコロ	
表	前羽が変異	1	羽の位置をストローの両端方向に1cm動かす
裏	後羽が変異	2	羽の位置をストローの両端方向から離す方向に1cm動かす
		3	羽の円周を2cm大きくする
		4	羽の円周を2cm小さくする
		5	羽の幅を2cm大きくする
		6	羽の幅を2cm小さくする

コイントスによって前羽・後羽のどちらに変異が起こるのかを決定する。その後サイコロによってどのような変異が起こるか決定する。

II-2. 日本におけるオリガミバードの改良

日本においても **Westerling** のオリガミバードの改良に関する研究やそれらを用いた教育実践的研究がいくつか報告されている。本章では、先行研究によって明らかになった進化に対する誤概念とオリガミバードを実践したことによって誤概念にどのような影響が見られたか、さらにそれらを改善するためにオリガミバードがどのような改良が加えられたかについて述べる。

山野井（2010）は進化を学んでいない高校生、山野井ら（2011）は高校生や大学生また高等学校理科教員などにアンケート調査を行い、進化に関するどのような誤概念があるかについて調査した。進化の定義は「生物の集団中で異なる遺伝子を持つ個体の割合（遺伝子頻度）が世代を通じて変化すること」である。しかし、山野井（2010）において、オリガミバード（**Westerling** のモデルに飛行距離に影響しない中立な変異を加えたもの）の実験前および実験後でもこの定義についての問いの正答率が低いままであることが明らかとなった。山野井はこれらの結果をオリガミバードの実験において、①遺伝子の変異と形質との変異が関連付けにくいこと（突然変異を形質の変異としてのみ述べており、DNA や遺伝子について言及していないため）、そして②実験中に世代の変化を実感することが出来ていないこと（実験に用いたワークシートが平面的であり、世代間のつながりが分かりにくかったため）が原因であると考察した。

Yamanoi et al.（2012）において、①についてはオリガミバードの表現型を塩基配列で表し、塩基配列の変異をコインとサイコロではなく、新たにルーレット（図 2-2）を用いることで、塩基配列の変異と形質の変異の関連付けを行った。②については実験結果の記入用紙を、各世代を矢印で結び世代を超えて形質が変化していることを意識しやすいものに変更した。

また、進化は生物が持つ何らかの目的に応じて、その方向に進んでいくものであるという誤概念も多く見られた（山野井ら，2008）。ある個体に起こった変異が選択されるかどうかは、その個体が置かれた環境によって決まる。よってどの生物においても「同じような進化」が起こるわけではなく、目的に応じて決まった方向に進化が起こるという考え方は明らかに誤りである。**Westerling**（1992）のオリガミバードでは世代を通してよく飛ぶように形質が変化していくため、「よく飛ぶように」という決まった方向に進化が起こると考える生徒はいるだろう。この誤概念について、**Yamanoi et al.**（2012）では、よく飛ぶ個体が選択される環境（オアシスが少なく飛行によって長距離を移動する必要がある環境）とあまり飛ば

ない個体が選択される環境（オアシスが多く、飛行によって長距離を移動する必要のない環境）の 2 つを設定した。変異の与え方が同様でも、環境が異なれば選択される形質も異なる。よって、進化も環境によって異なる方向へと進むので、進化が個体の目的に応じて進むのではなく、環境の差による選択圧の違いによって起こることが分かる。

次に突然変異に関する誤概念について述べる。山野井（2008）の実践において、遺伝子の突然変異は必ず個体の不利に働くという誤概念について、オリガミバードの実践前と実践後で変化が見られなかった。遺伝子の突然変異は生物が生き残るのに不利な形質を与えることもあるが、時に生き残りに有利な形質を与えることもあるため、「突然変異は必ず個体の不利に働く」という考えは誤概念である。オリガミバードは遺伝子の突然変異によって飛ぶことに不利な形質を持つ個体も生まれるが、逆に有利な形質を持つ個体も生まれる。しかし、その実験を通してこの誤概念は保持されたままであった。このことを踏まえ、山野井（2010）では、遺伝子そのものは変異しているが、形質に影響を与えないものをオリガミバードに導入した。その結果、「遺伝子の突然変異は必ず個体の不利に働く」という問いに対する正答率が実験後に上昇した。山野井（2010）はこの結果を「中立的な変異を導入したことによって突然変異に対する理解を部分的に向上させた可能性がある。」と考察した。有利な変異や不利な変異だけでなく、中立な変異に目を向けさせることによって、遺伝子の突然変異と自然選択の関係を生徒がより明確になったのかもしれない。この設定は、Yamanoi *et al.* (2012) において、飛行形質に関係のない「羽の色」の形質として引き継がれている。こうすることで、形質に明らかな変化があるが、有利でも不利でもないため選択されない形質もあるということが理解でき、より突然変異と自然選択の関係に対する理解を深められると考えられる。

最後に種分化に関する誤概念について述べる。山野井（2008, 2010）において、オリガミバードの実験を行うことで、「進化や突然変異が起こること＝種分化が起こること」であると捉える生徒が増加するという結果が得られた。また、この結果を形質の進歩や改良が「新しい種への変化（＝種分化）」時にしか生じないという誤概念を持っていると解釈した。実際は、形質の進歩や改良は小さなレベルで起こっており、種分化はそれよりもさらに大きな段階である。種分化は初めは同じであった種が別々の進化をしていく過程で生殖隔離が起こったときにはじめて起こるものであるため、先述の考え方は明らかに誤概念である。これを受けて、Yamanoi & Iwasaki (2015) では、オリガミバードの羽サイズに注目した。図 2-3 のようにオリガミバードが互いの前羽と後羽をくぐることを交尾行動とし、羽のサイズ

差によってこの交尾行動が出来ない場合、2 個体のオリガミバード間に生殖隔離があり種分化が起こっていると定義したのである。この設定によって、実践校の生徒からは「突然変異と種分化のつながりが分かった」「突然変異＝種分化ではないことが分かった」といった意見が見られたため、この設定は種分化の理解によい影響を与える可能性があると考えられる。しかしながら、種分化と突然変異や生殖隔離との関連性は理解できると考えられるが、「種分化時にのみ進歩や改良が生じる」という誤概念を持つ生徒に対する解決としては不十分であるとも考えられる。遺伝子の突然変異によって起こる形質の改良と種分化の 2 つの現象を分けて指導する必要があると考えられる。

しかし、オリガミバードの種分化に関する指導は、実際の手投げ実験ではなく、手投げ実験後にオリガミバードのシミュレーションソフトによって行ったものである。この方法によって、先述のような種分化についての正しい理解を促された生徒がいた一方で、「種分化が短時間で起こる」と考える生徒も見られた。このことを理解したうえで、オリガミバードを用いて種分化の指導を行う際は、原理そのものと実際に自然界で種分化が起こるタイムスケールをある程度切り離して指導する必要があるかもしれない。

本項目では過去の実践とそれらの結果を踏まえたオリガミバードの改良について紹介した。これまでの改良と実践によって、オリガミバードの実践が生徒の正しい進化概念の獲得によい影響を及ぼすことが示されている。しかし、山野井（2008, 2010）で示されているように進化概念の理解度が向上しない場合もあり、指導の方法によっては生徒に新たな誤概念を生んでしまう可能性も考えられる。また、改良された部分やそれ以外の部分についても、実践の際の工夫によって改善の余地があるものも考えられる。本研究では、以上のような点に注意を払いながら教材開発・実践を進めていく。

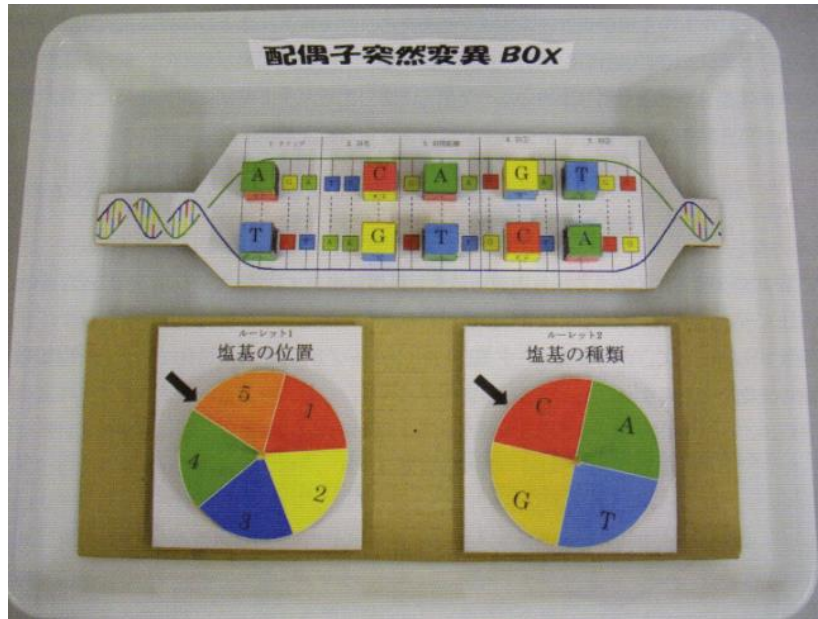


図 2-2 塩基に起こすために用いるルーレット（東京書籍，2014）。左側のルーレットでどの配列に変異が起こるのかを決定し、右側のルーレットでどの塩基に変異するかを決定する。変異の形式は1塩基置換のみである。

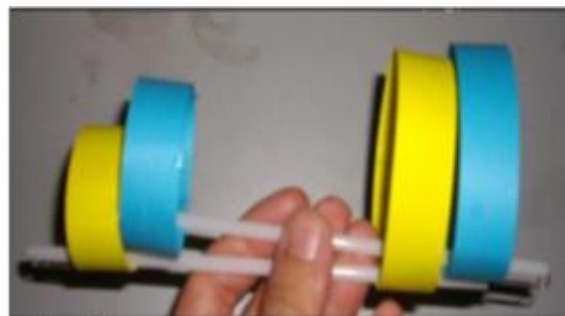


図 2-3 オリガミバードの交尾（山野井，2013 より引用）。メスの前羽をオスの後羽がくぐることによって交尾する。メスの前羽がオスの後羽より小さかった場合、羽の中をくぐる事が出来ないため交尾が出来ない。この状態を生殖隔離が起きていると定義する。

Ⅲ. オリガミバードのシミュレーション法の開発

Ⅲ-1. オリガミバードの形質と飛行距離の関係

Ⅲ-1-1. 目的

オリガミバードはランダムな変異による進化を観察するための実験教材である。設定を変更することによって、進化の現象をさまざまな視点から理解させる教材に出来る可能性がある。例えば、Yamanoi *et al.* (2012) の実践のように、よく飛ぶ形質を選択する環境だけでなく、飛ばない形質を選択する環境という新たな設定を追加したことによって、環境と選択の関連をより深く理解できる教材となった。しかし、設定の変更を行うためには、何度もオリガミバードの進化の実験を行い、その設定変更が有効であるかを試行しなければならない。

オリガミバードは親世代を変えたり、変異の与え方を変えたりなど、実験の設定そのものを変更するのは比較的容易である。一方で、実験ごとによって得られる細かな結果は異なるため設定を変えた場合、クラス全体の結果の傾向を実際の実験によって予測するのは大きな負担である。しかし、あらかじめオリガミバードのすべての形質の組み合わせに対して手投げ実験を行うことによって形質と飛行距離の関係について調べ、そのデータを用いてコンピュータ上でシミュレーションを行うことが出来れば、その負担はかなり軽減できると考えられる。

本実験では、シミュレーション法の開発や新たな設定の開発のためにオリガミバードのすべての形質の組み合わせに対して手投げ実験を行い、形質と飛行距離の関係について調べた。このデータを用いてオリガミバードの形質と飛行距離の関係を調べ、各形質の特徴を明らかにしていく。またその特徴からシミュレーション法の開発や授業でオリガミバードを用いる上での課題等についても検討する。

Ⅲ-1-2. 方法

使用したオリガミバードの材料はストロー（株式会社 友栄製 長さ 220mm、直径 8mm）、ゼムクリップ、色画用紙（協和紙工株式会社製 厚さ 0.19mm）、セロハンテープである。本実験で用いるオリガミバードは、東京理科大学武村研究室のホームページ（2015 年 2 月 5 日閲覧）に掲載されているモデルを用いた。このモデルのオリガミバードが持つ形質は、先端に取り付けるゼムクリップの数、羽の位置（ストロー先端からの羽の距離）、羽の色、前羽の大きさ、後羽の大きさ、の 5 つの形質である。それぞれの形質が持つバリエーション

は表 3-1 に示す。

5 つの形質の中で、「羽の色」は飛行距離に影響を及ぼす形質ではない。本実験では形質と飛行距離の関係を調べるのが目的であるため、羽の色は形質から除外した。よって本実験で調べる個体の形質の種類は、クリップの数（3 通り）、羽の位置（3 通り）、前羽の大きさ（4 通り）、後羽の大きさ（4 通り）の組み合わせ、計 144 種類である。

手投げ実験は筆者と測定協力者 1 名（京都教育大学大学院生）2015 年 5 月 28 日から 5 月 30 日にかけて京都教育大学 C 棟 1 階ロビーにて行った。C 棟 1 階ロビーにメジャーを 12m 程度伸ばし、セロハンテープで位置がずれないように固定した。メジャーの 0m の位置からオリガミバードを投げ、オリガミバードの先端部分の距離を飛行距離として測定した。明らかに投げることを失敗した場合や、大幅にオリガミバードがカーブしてしまった場合は測定をやり直した。オリガミバードを投げる際は、力の入れ方や投げ方による誤差が出来るだけ出ないように、毎回同じ投げ方をした。投げ方は、まず右手でオリガミバードを持ち額の前に構えた。この時右ひじは胸の前に構え、左手で右ひじを支えた。そして右ひじを伸ばすようにして前方に投げるようにした。手投げ実験は、1 つの組み合わせにつき 5 回ずつ行った。5 回分の飛行距離の平均値を、その個体の飛行距離として記録した。

表 3-1. オリガミバードの形質のパリエーション。

クリップの数	羽の位置(ストロー先端からの距離)	羽の色	前羽の大きさ (幅×円周)	後羽の大きさ (幅×円周)
なし	2cm	赤	1cm×18cm	1×18cm
1 個	3cm	青	2cm×20cm	2×20cm
2 個	4cm		3cm×26cm	3×26cm
			4cm×30cm	4×30cm

III-1-2 結果

また、形質と飛行距離の関係については表 3-2、3-3、3-4 に示した。144 通りの組み合わせの中で、最もよく飛ぶものでは 9m 以上、最も飛ばないものでは 2m 以下と、形質によって多様な飛行性能を示すことが分かった（図 3-1）。

6m 以上飛行することのできる形質の組み合わせをよく飛ぶ組み合わせとすると、ストローの先端にクリップを装着しない場合は、前羽が小さく、後ろ羽が大きいときによく飛ぶ傾

向にあることが分かった（図 3-2）。逆に前羽が大きく後ろ羽が小さい場合は、飛びにくいということも分かった（図 3-2）。この結果は山野井（2010）の結果と一致するものであった。

しかしクリップ 1 個を装着すると、前羽と後羽が同じサイズであってもよく飛行するようになった。しかし両羽が 26cm 以上の場合にはあまり飛ばなかった。

さらにクリップが 2 個の場合では、クリップ 0 個やクリップ 1 個の場合ではあまり飛ばなかった前羽が大きく後羽が小さい組み合わせでもよく飛ぶものが見られた。両羽が 26cm 以上であった場合飛びにくいというのはクリップ 1 個の場合と同様であった。

表 3-2. クリップ 0 個の場合のオリガミバードの形質の飛行距離（cm）の関係

		前羽のサイズ					
		18cm	20cm	26cm	30cm		
端 か ら の 距 離	2cm	377	354	316	200	18cm	後 羽 の サ イ ズ
		527	252	480	393	20cm	
		516	411	244	212	26cm	
		410	449	181	251	30cm	
	3cm	406	289	244	175	18cm	
		701	227	361	285	20cm	
		663	369	307	243	26cm	
		645	341	174	224	30cm	
	4cm	327	396	256	183	18cm	
		569	310	324	137	20cm	
		451	177	271	160	26cm	
		610	306	254	164	30cm	

見方は、まずストロー端からの距離を選び、次に前羽のサイズを選ぶ、最後に後羽のサイズを選び、3 つが交差する地点にある値が、その形質の飛行距離（cm）である。

表 3-3. クリップ 1 個の場合のオリガミバードの形質の飛行距離 (cm) の関係

		前羽のサイズ					
		18cm	20cm	26cm	30cm		
端 か ら の 距 離	2cm	867	395	242	261	18cm	後 羽 の サ イ ズ
		598	730	220	380	20cm	
		508	667	251	182	26cm	
		416	478	197	209	30cm	
	3	522	755	240	238	18cm	
		610	730	244	292	20cm	
		519	629	512	212	26cm	
		515	668	312	244	30cm	
	4	686	640	241	308	18cm	
		589	659	421	262	20cm	
		442	833	406	181	26cm	
		365	341	437	205	30cm	

表 3-4. クリップ 2 個の場合のオリガミバードの形質の飛行距離 (cm) の関係

		前羽のサイズ					
		18cm	20cmc	26cm	30cm		
端 か ら の 距 離	2cm	592	750	321	213	18cm	後 羽 の サ イ ズ
		552	618	511	213	20cm	
		397	802	454	199	26cm	
		347	375	363	230	30cm	
	3cm	523	913	361	177	18cm	
		506	562	439	274	20cm	
		462	617	616	277	26cm	
		439	567	542	268	30cm	
	4cm	667	916	308	299	18cm	
		515	819	820	253	20cm	
		429	705	694	275	26cm	
		334	358	391	348	30cm	

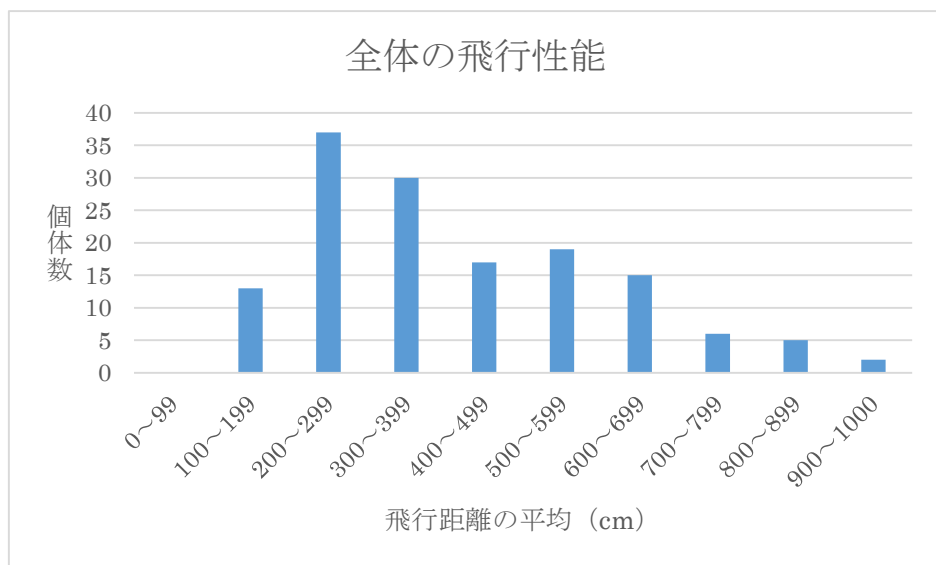


図 3-1. 手投げ実験によって得られた、各個体の飛行距離の分布。

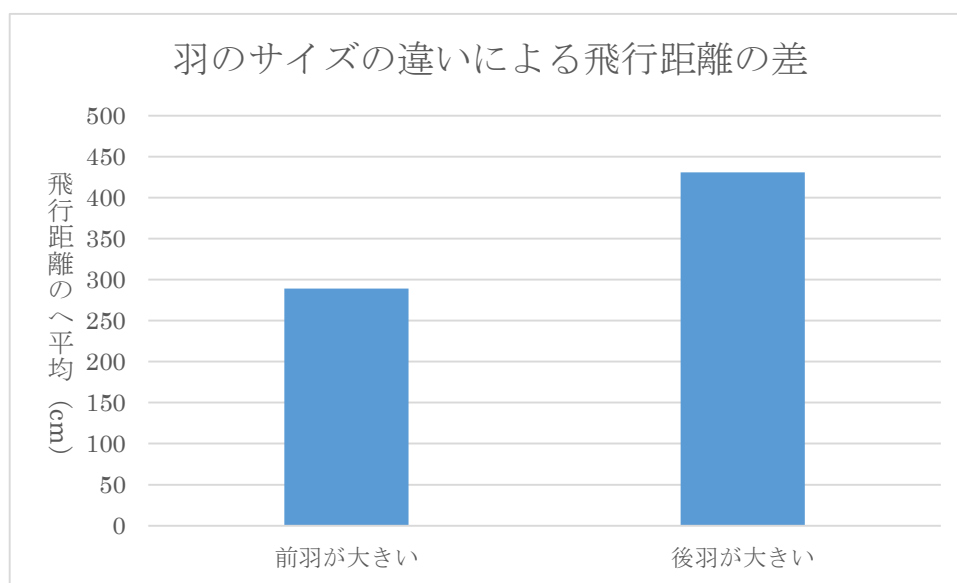


図 3-2. クリップを付けないオリガミバードで前羽と後羽のサイズの関係における飛行距離。前羽が大きい方が飛びにくく、後ろ羽が大きい方が飛びやすいことが分かる。

III-1-4 考察

手投げ実験によって、ほぼ飛ばない形質から非常によく飛ぶ形質まで存在することが明らかになった。クリップ 2 個の場合で、よく飛ぶ形質が多かった。このことから、普通では飛びにくい羽サイズの組み合わせもクリップが追加されることによって飛びやすくなることが分かる。クリップを使用しない場合では、よく飛ぶ羽の組み合わせは限定されてしまうが、クリップを付けることによってよく飛ぶ羽の組み合わせを多くすることが出来る。実際の実験においては、クリップを進化の対象とすることによって、よく飛ぶオリガミバードの羽の形質が多様になると考えられる。例えば、進化によって生まれる多様性を生徒に見せた場合は、Westerling (1992) のようなクリップを使用しないオリガミバードではなく、クリップを進化の対象とするオリガミバードを採用するのが望ましいと考えられる。しかし、クリップを無制限につけてしまうと、羽の形質などに関係なく、ほぼクリップの重量によって飛んでしまうと考えられる。そのため、オリガミバードを「飛行させる」という意味では、やはり実験の段階でつけることのできるクリップの数には制限を与える必要があると考えられる。授業における実験説明の際に、クリップの制限について「生物がある形質を実現するにはコストがかかる」といったように生物学的な観点から本ルールを説明することもできると考えられる。

Ⅲ-2. オリガミバードのシミュレーション実験

Ⅲ-2-1. 目的

Ⅲ-1における手投げ実験によって、オリガミバードの形質と飛行距離の関係を得ることが出来た。本データを用いて形質と飛行距離の関係をj用いて、今後の研究や教材利用に役立てようとする場合、本データを用いて行うシミュレーション結果の妥当性について検証する必要がある。実際にオリガミバードの実験を行った結果と同様の実験方法に基づいて行ったシミュレーションによって得られた結果が類似したものであれば、シミュレーション法の妥当性を示すことが出来ると考えられる。

本実験では、Ⅲ-1の手投げ実験によって得られたデータを用いて、オリガミバードの実験方法に基づき、オリガミバードがどのように進化していくかをシミュレーションする。シミュレーションでは、特定の親個体に子個体を生ませる際にコンピュータ上で生成した乱数によって変異を与えた。変異を与えたことによってできた親とは異なる形質をもつ子個体の飛行距離は、Ⅲ-1の実験で得られた形質と飛行距離の関係のデータを用いた。子個体の中で最もよく飛ぶ形質を持つものを新たな親として選択し、再び子どもを生ませるという過程を繰り返すことでオリガミバードのシミュレーションをコンピュータ上で行った。また手投げ実験で行った場合の結果と、どれほど近い結果が得られるかを調べることによって本シミュレーション手法の妥当性について検証していく。

Ⅲ-2-2. 方法

本シミュレーションで用いた実験の方法を以下に示す。

本実験でのオリガミバードが持つ形質に関わる遺伝子はクリップの数、ストロー端からの羽の距離、羽の色、前羽のサイズ、後羽のサイズの 5 種類であり、これらはそれぞれ表の範囲で変化するものとした。オリガミバードの親 (P 世代) の形質の組み合わせはクリップ 1 個、ストロー端からの羽の距離 3cm、前羽のサイズ 2cm×20cm、後羽のサイズ 2cm×20cm としてシミュレーションを行った。

シミュレーション実験の大まかな流れを述べる。まず、親 (P 世代) の形質に 1 つずつ何らかの変異を与えた子の形質をコンピュータ上に記録した。次にその 3 個体の飛行距離を手投げ実験によって得た形質と飛行距離の対応表 (表 3-2,3-3,3-4) を使って推測し、その 3 個体の飛行距離を算出した。そして、その 3 個体の中から最もよく飛ぶ形質を持つ個体を選び、新たな親とした。この過程を 4 回繰り返すことを 1 回のシミュレーションとし、こ

のシミュレーションをよく飛ぶ形質を選択する場合と、飛ばない形質を選択する場合で、それぞれ 10 回ずつ（1 クラス 10 班で実験を行うことを想定）行った。以下では、本シミュレーション実験のポイントである、個体の形質に変異を与える方法について詳しく述べる。

本実験では、オリガミバードの親から新たな子を 3 個体作る際に、1 個体につき 1 つの変異を与えて、形質を変えた。形質は表 3-1 に示した形質の範囲で変異させた。また形質は跳躍的に変異（例：クリップがない状態からクリップが 2 つ付いた状態に変わる）させるのではなく、形質を隣接する別の形質（例：クリップがない状態から変異できるのはクリップが 1 つ付いたもののみであり、2 つ付いた状態には変異できない）へと変異させた。

形質の変異を起こす際は、まず、表 3-5 に示した 5 つの変異パターン（クリップの数、羽の色、羽同士の距離、羽のサイズ①、羽のサイズ②）の中からランダムに 1 つを選択し、次にそれらがどのように変異するかについてもランダムに選択した。Microsoft Office Excel 2013 の RANDBETWEEN 関数によって乱数を発生させ、その値を変異に用いた。クリップの数、ストロー端からの羽の距離、羽の色、羽のサイズ①（前羽・後羽ともに大きく or 小さくなる変異が起こる）、羽のサイズ②（前羽が大きくなって後羽が小さくなる or 前羽が小さくなって後羽が大きくなる変異が起こる）である。

本シミュレーションで用いた方法は Yamanoi *et al.* (2012) で用いられた方法とほぼ同様であるが、異なる点が 2 点あるため、それを以下に示す。まず形質を変異させる範囲の違いについての違いについて述べる。本実験のシミュレーションでは、表 6 の変異パターンに基づき、表 2 に示した形質の範囲で変異を起こした。また例えばクリップが 2 つ付いた状態の個体に「クリップが 1 つ増える」変異が起こった場合は、表 3 の形質の範囲外となるので変異が起こらなかったものとした。Yamanoi *et al.* (2012) では、形質の変異範囲の制限を基本的には設けていない。しかし、例えば、羽の位置の変異の結果、羽が取れてしまうような変異や、羽のサイズがストローの直径よりも小さくなってしまうような変異が起こってしまった場合にはその個体を致死とした。

次に、羽のサイズの形質の違いについて述べる。本シミュレーションでは表 2 に示す決まった羽の大きさの範囲で形質を変異させた。一方、Yamanoi *et al.* (2012) では、羽を大きくする変異の場合は「幅を 1cm、長さを 2cm 大きく」し、羽を小さくする変異の場合は「幅を 1cm、長さを 2cm 小さく」した。

表 3-5. 各遺伝子の変異のさせ方。

クリップの数	羽の色	羽同士の距離	羽のサイズ①	羽のサイズ②
1つ増える	赤になる	1cm 近づく	両羽とも大きくなる	前羽…大きく後羽…小さく
1つ減る	黄になる	1cm 離れる	両羽とも小さくなる	前羽…小さく後羽…大きく
変化なし	変化なし	変化なし	変化なし	変化なし

Ⅲ-2-3. 結果

本シミュレーションの結果、よく飛ぶ形質を選択する場合は、飛行形質が維持され、飛ばない個体を選択する場合は、世代を重ねるごとに飛行距離が低下した（図 3-3）。

Yamanoi *et al.* (2012) の結果（図 3-4）と本シミュレーションの結果（図 3-2）を比較すると、飛行距離の変化は同様の傾向を示していることが分かる。

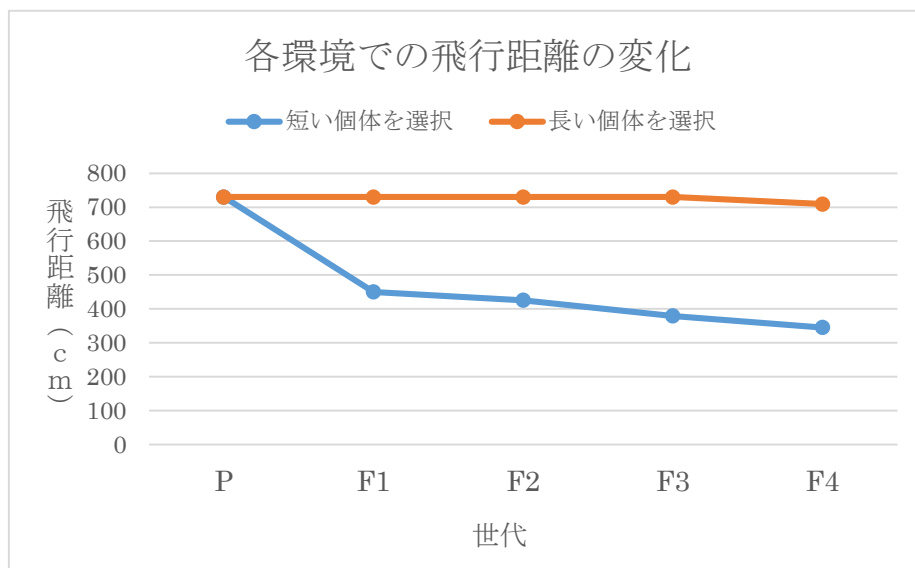


図 3-3. 本研究のシミュレーションによって得られた世代ごとにおける飛行距離の変化。

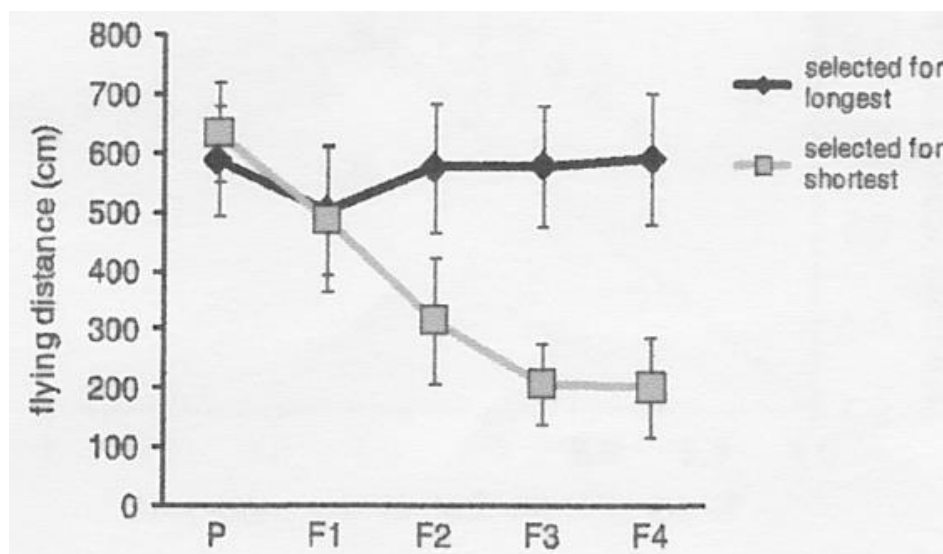


図 3-4. Yamanoi *et al.* (2012)における生徒実験によって得られたオリガミバードの進化のグラフ。

III-2-4. 考察

手投げ実験のデータを用いたシミュレーションにおいて、よく飛ぶ個体を選択した場合は、飛行形質が維持され、あまり飛ばない個体を選択した場合は、世代とともに飛行形質が低下することが観察できた。この結果は Yamanoi *et al.* (2012) で、オリガミバードの生徒実験によって得られた結果（図 3-4）と同様の傾向を持つものであった。

この結果から、本シミュレーションは、実際に生徒実験でオリガミバードを飛ばす場合の結果と同様の結果を予測できるものであり、オリガミバードの設定の変更や新たなモデルの開発にも本手法を用いることが出来ると考えられる。一方、手投げ実験に得たデータを使用するため、実験者の力加減によって変動する選択される個体の形質の差を予測することができないという点には注意が必要である。

実際にオリガミバードを作って飛ばす実験を行う場合は、1 実験につき 5 回世代を重ねるとすると 30 分程度の時間を要するが、本シミュレーション手法を用いれば、1 実験あたり 3～5 分程度で行うことが出来る。このことから、シミュレーションを用いることによって、実際に実験を行う場合の労力を軽減できたと考えられる。手投げ実験によって 144 通りの形質と飛行距離の関係を調べることは、相応の労力を要する。しかし、実験の時間だけでなく、実験のたびに新たなオリガミバードを作成する手間や金銭面での問題も考慮すると、本シミュレーション法を用いることはやはり有効であると考えられる。

Ⅲ－3. まとめ

第Ⅲ章の実験によって、オリガミバードの形質と飛行距離との関係が明らかとなった。また、そのデータを用いてオリガミバードの実験を実際に行う場合とほぼ同様の結果を予測することのできるシミュレーション法を開発した。

シミュレーションで用いたデータは筆者が手投げ実験によってある形質を 5 回飛行させた値の平均を用いた。シミュレーションでは実際に複数人で実験を行った場合の結果と同様の結果を得ることが出来たが、それでも、実験者の投げ方や腕力による誤差は大きいと考えられる。あるモデルをシミュレーションを行った上で、生徒実験を行う場合は、シミュレーションで得られた結果を出来る限り再現するために、投げ方の指導を徹底する必要があると考えられる。より確実であるのは、オリガミバードを手を使わずに飛行させる装置の開発および利用である。しかし、本研究ではその開発には至っていない。

IV. 新たなモデルの検討

IV-1. オリガミバードの有性生殖モデル

IV-1-1. 目的

オリガミバードは、自然選択の理解のために利用されてきたが、新たなモデルを組み込むことで、他の生物現象についても理解させられる可能性がある。

多くの生物は有性生殖を行い、繁殖をしている。この有性生殖という遺伝システムは、進化的に有利な遺伝システムであると考えられている。高等学校「生物」の教科書でも有性生殖の適応的意義（ある形質がどのように生き残りや繁殖率の増加に役立っているか）については述べられている場合もある。例えば、有性生殖によって個体間で遺伝子の交換を行い多様な遺伝子型を持つことによって、病原体に対抗することが出来ると考えられている。また、遺伝子の変異によって生まれた有利な変異が有性生殖による遺伝子の交換で急速に集団の中に広がっていくと考えられている。このことを実感できれば、有性生殖という生物現象を進化的視点からもとらえることが出来、より深い理解を促すことが出来ると考えられる。しかしそれを実感する教材は非常に少ない。

従来用いられてきたオリガミバードの教材では子を作る過程が存在する。しかし、この過程は無性生殖的過程である。オリガミバードの生殖過程を有性生殖的過程に変更し、無性生殖的に実験を行った場合の結果と比較することで、有性生殖の適応的意義について観察させることが出来るかもしれない。

本実験では、ある個体に遺伝子の変異によって生まれた有利な形質が、有性生殖による他個体との遺伝子の交換で集団の中に即座に広まっていくという説に着目した。まずオリガミバードを有性生殖的に行うことで実験できるか、また、有性生殖的に実験を行うことで、この説のような現象を観察できるかどうかについてシミュレーションによって検討する。

IV-1-2. 方法

本実験では、親（P世代）の形質は、クリップの数0個、ストロー端からの羽の距離4cm、前羽のサイズ2cm×20cm、後羽のサイズ2cm×20cm（手投げ実験による飛行距離:310cm）のものとした。また本実験では羽の色の形質については考慮しなかった。

本シミュレーションの大まかな流れについて述べる。シミュレーションはすべてMicrosoft Office Excel 2013 上で行った。個体の遺伝子型を数字2列に書いて表した（図4-4-1）。オリガミバードは $2n=8$ で各染色体に1つの遺伝子座を持つものとした。同時にセル

一つ一つは1本の染色体を表す。

最初に、親個体の遺伝型の設定について述べる。親個体の遺伝型は表 4-1 に示した形質とコンピュータ上の値の関係に基づき、図 4-1 のように数字を 2 列に書いて表した。親個体から子個体を作る方法について述べる（図 4-1）。すべての遺伝子は独立で、それぞれ別の染色体に位置しているものとした。オリガミバードは通常親個体は 1 個体であるが、本シミュレーションでは親を 2 個体用意する。まず、2 個体の親にそれぞれ 3 つずつ（計 6 個）の配偶子を作らせた。配偶子は、親が持つそれぞれの形質に関する 2 つの遺伝子からランダムに 1 つを受け取る。同時に配偶子に何らかの変異を 1 つずつ与えた。配偶子に与える変異は、まず乱数で「クリップの数」、「ストロー端からの羽の距離」、「前羽のサイズ」、「後羽のサイズ」、「変異なし」の内、どの遺伝子に変異が起こるかを決定した。次に変異する遺伝子がどのように変異するかについても乱数を用いて決定した。形質が変異する範囲は表 2 の範囲で変異させた。またその範囲の中では、一度の変異によって、どの形質にも変異できるものとした（例えば、一回の変異によって前羽の大きさが 1cm×18cm から 4cm×30cm にも変異することが出来る）。その後、配偶子同士を無作為に接合させ、新たな個体を作った。

次に、新たな個体の形質の決定方法について述べる通常のオリガミバードの場合は、1 倍体生物であるので、持っている遺伝子はそのまま発現し形質に現れる。しかし、本シミュレーションの設定では、2 倍体生物であるため、ある形質について持っている遺伝子のどちらか一方が発現することになる。本シミュレーションの設定では、ある遺伝子に関する複数の形質同士に優性・劣性関係は設けていない。発現する形質はある形質に関する 2 つの遺伝子の内、一方を乱数によってランダムに選択し発現させることとした（図 4-1）。

決定した形質から、第Ⅲ章で行った手投げ実験によって得た形質と飛行距離の関係のデータを用いてその形質の飛行距離を求めた。子の 3 個体の内、よく飛ぶ 2 個体を新たな親として選択し、生殖させ上記と同様の方法で子を作った。この過程を 5 世代×10 回繰り返して、飛行形質がどのように変化していくかについて解析した。

有性生殖モデルの比較対象として、同時に無性生殖モデルでのシミュレーションも行った。親世代の形質は有性生殖モデルと同じとした。無性生殖モデルの個体は 1 倍体生物とし、遺伝子型は図 4-2 のように数字を 1 列に書いて表した。子個体は親の形質を元に 3 個体作った。このとき、3 個体それぞれに 1 つずつ変異を与えた。変異を与える方法は有性生殖モデルで行う場合と同様である。変異させた 3 個体を新たな子とし、それらの形質をもとに、

第Ⅲ章で行った手投げ実験によって得た形質と飛行距離の関係のデータを用いてその形質の飛行距離を求めた。その後 3 個体の内、よく飛ぶ 1 個体を新たな親として選択した。この過程を 5 世代×10 回繰り返し、飛行形質がどのように変化していくかについて観察した。

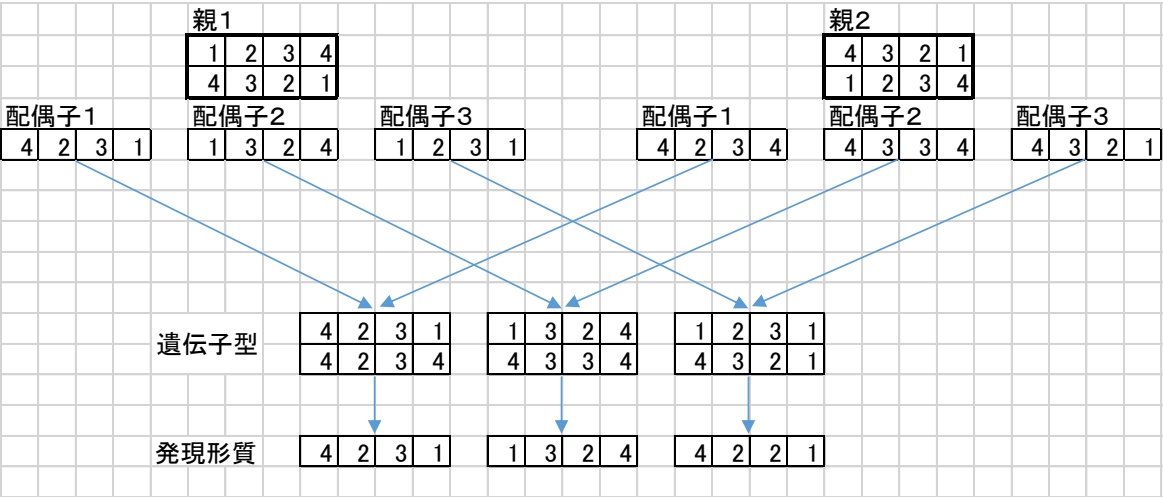


図 4-1 有性生殖モデルのシミュレーションで用いた遺伝子型の表し方。太枠で囲んだ縦列が 1 つの遺伝子に関わる 2 つの染色体である。縦列の 2 つの数字から 1 つずつランダムに選択し、配偶子を作る (3 つ)。親 1 と親 2 によって作られた 3 つの配偶子をそれぞれ接合し、新たな個体を 3 個体作る。その後、各個体の遺伝子形の縦列の 2 つの数字から 1 つずつランダムに選択に発現形質を決定する。

表 4-1. 有性生殖モデルで変異させることのできる形質の範囲

パソコン上の値	クリップの数	ストロー端からの羽の距離	前羽のサイズ	後羽のサイズ
1	0個	2cm	1×18cm	1×18cm
2	1個	3cm	2×20cm	2×20cm
3	2個	4cm	3×26cm	3×26cm
4	2個	4cm	4×30cm	4×30cm

1	4	2	2
---	---	---	---

図 4-2 無性生殖モデルでシミュレーションを行う場合におけるコンピュータ上での個体の遺伝子型の表し方。

IV-1-3. 結果

5世代×10回のシミュレーションの結果、親と比べて5世代後には飛行能力の向上が見られた(図4-3)。有性生殖モデルによるシミュレーション結果と、従来の無性生殖モデルの方法でシミュレーションを行った場合の結果とを比較すると、無性生殖モデルの方が、飛行能力が向上しやすいという結果が得られた(図4-3)。

しかし、各回の結果を見てみると、かなり飛行距離が延びるものもあれば、親世代よりも飛行能力が下がってしまったものなど、非常にばらつきが大きかった(図4-4)。

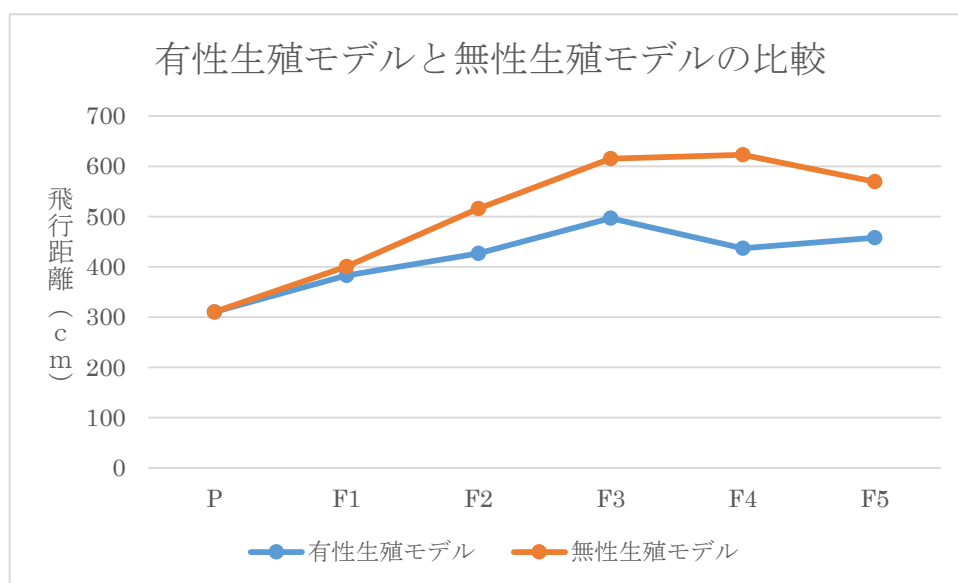


図 4-3. オリガミバードを有性生殖モデルで行った場合と無性生殖モデルで行った場合での結果の比較。
無性生殖モデルの方が、より素早く飛行能力が向上していることが分かる。

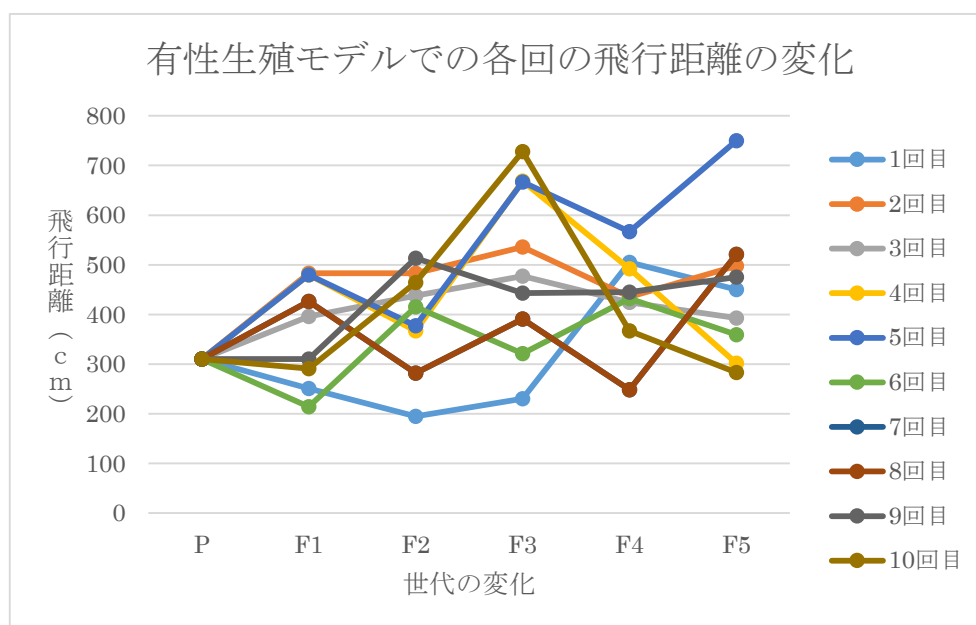


図 4-4. オリガミバードを有性生殖モデルで行った場合での、各回の飛行距離の変化。すべてで徐々に飛行距離の向上が見られるわけではなく、飛行能力が低下してしまうものもみられ、ばらつきが大きかった。

IV-1-4. 考察

結果から、オリガミバードを有性生殖モデルで行った場合でも、世代を通して飛行能力の向上を観察できることが分かった。一方で、従来の無性生殖モデルでの方法と比較した場合は、無性生殖モデルの方が飛行能力の向上を観察しやすいことも分かった。オリガミバードの有性生殖モデル開発の目的は、有性生殖の適応的意義を理解させることであった。しかし、図 4-3 で示したように有性生殖モデルよりも無性生殖モデルの方が進化がよく進んでいることが分かる。この結果からオリガミバードの有性生殖モデルは有性生殖の適応的意義を理解させる教材としては適していないと考えられる。

このことは有性生殖のモデルにおける形質発現のプロセスが原因として大きく関わっていると考えられる。従来の無性生殖モデルの場合では、変異した形質は即発現し、さらにそれが選択された場合、その遺伝子に次世代で変異が起きない限りは次世代でも発現する（図 14）。しかし有性生殖モデルの場合では、オリガミバードが 2 倍体生物であり、ある 1 組の遺伝子の中から発現する形質をランダムに選択する。そのため、配偶子を作る段階で変異した形質が発現しない場合もある（図 4-5）。また、よく飛んだ個体を選択する際、発現した形質の飛行距離によって個体を選択するが、実際に次世代に受け継がれる遺伝子は、その発現形質でない場合もある。よって、選択された形質と遺伝子が次世代に受け継がれる形質と遺

伝子とは異なってしまうということが起こる。この原因によって、各回の大きなばらつきや飛行距離が無性生殖モデルと比べてあまり伸びないなどといったことが起きたと考えられる。

	有性生殖モデル				無性生殖モデル			
遺伝子型	4	3	2	1	1	2	3	4
発現形質	4	2	2	4	1	2	3	4

図 4-5. 有性生殖モデルと無性生殖モデルの遺伝子発現の違い。赤文字の部分は変異した遺伝子を示している。有性生殖モデルでは遺伝子に変異が起きてもそれらが発現しない場合がある。

Yamanoi & Iwasaki (2015) は、自動的にオリガミバードのシミュレーションを行うことのできるソフトウェア (Origami Bird Simulator、以下 OBS) を開発した。本実験と OBS の大きな違いは、変異させる遺伝子の種類数、遺伝子型と形質の関係、親集団と産む子供の数の 3 点である。OBS では、子個体を作る際に有性生殖のシステムを導入している。OBS において、変異させる形質は前羽のサイズと後羽のサイズのみである。各個体は長さ 4 塩基 (前羽 2 塩基+ 後羽 2 塩基) の染色体を 2 本持っている ($2n=4$)。各羽サイズは 4 種類の塩基 (A,T,G,C) 配列の組み合わせを 10 進法に変換し、2 本の染色体でその値を平均したものを羽の大きさとして定義している。OBS では、前羽と後羽を比べたとき前羽の方が小さく、さらにその差がより大きい形質を持つ個体ほどよく飛ぶものとして設定されている。

羽のみを変異させる OBS ならば、個体の前羽が大きく後羽が小さいとよく飛ぶという一定の関係性に支配されているため、有性生殖でも世代ごとの飛行能力の進化を観察できると考えられる。特に形質を 2 本の染色体が持つ遺伝子の平均としている点も重要な点であろう。しかし、第Ⅲ章の手投げ実験の結果から分かるように、クリップを条件に加えるとクリップの数によって羽の大きさと飛行距離の関係が変化するため、有性生殖モデルでは飛行能力の変化が見えにくくなると考えられる。

OBS では、オリガミバードに有性生殖のモデルを導入しており、実際に飛行能力の進化を観察することが出来る。一方で、OBS の目的は OBS の有性生殖モデルと無性生殖でシミュレーションをしたモデルとを比べて有性生殖の有効性を示すことではないため、OBS の

モデルが有性生殖の有効性を示すものとなりうるかは明らかではない。しかし、OBS での有性生殖モデルのように変異させる形質を羽のサイズのみに限定することは有性生殖の有効性を見せる上で効果的かもしれない。

また、集団の個体数を多くすることは、オリガミバードの実験を班ごとではなくクラス全体で行うことによって実現が出来るかもしれない。OBS で扱われているような要素を本実験の有性生殖モデルに組み合わせることで、オリガミバードを有性生殖の適応的意義を示す教材として利用できる可能性がある。

IV-2. オリガミバードをストローから進化させるモデル

IV-2-1. シミュレーションによる検証

IV-2-1-1. 目的

オリガミバードを教材として実践する上で、世代ごとの進化がどれだけよく観察できるかによって実験を行う生徒の印象は大きく変わると考えられる。実験の設定で P 世代（最初の世代）ほとんど飛ばないものから始めることによって、そのような大きな変化が観察できるのではないかと考えられる。ストローという明らかに飛ぶことに適していない形質に変異を与えていくことで、飛行能力の大きな変化を観察できると考えられる。

本実験では、親（P 世代）を飛行機能をほとんど持たないストローとした場合に、実際に進化が観察できるかについてシミュレーションを行う。

IV-2-1-2. 方法

本シミュレーションでは、P 世代（最初の世代）は何もつけていないストローとした。また変異させる遺伝子はクリップの数、前羽のサイズ、後羽のサイズの 3 つのみとし、ストロー一端からの羽の距離はすべて一定の 3cm とした。

シミュレーションの流れは次の通りである。ストローを親（P 世代）として、子を 3 個体作った。その際に、1 個体が持つ遺伝子の 1 つに乱数を用いてランダムに変異を与えた。それぞれの遺伝子は表 4-2 の形質の範囲で変化させた。また変異の起こし方は、どの遺伝子に変異が起こるかを乱数によって決定し、その後乱数を用いてその形質の増減を決定した（表 4-3）。ある遺伝子について、発現している形質が、その形質の範囲の上限であったときに「増加」の変異、またはその形質の範囲の下限であったときに「減少」の変異が起こった場合には変異が起こらなかったこととした。

作った 3 個体の形質から、手投げ実験のデータに基づいて飛行距離をコンピュータ上に入力した。その中で、最もよく飛ぶ形質を持つ個体を選択し、新たな親とした。

この過程を 5 世代×10 回繰り返し、どのような進化が起こるかシミュレーションした。

3 章で行った手投げ実験では、両羽がついたオリガミバードの手投げ実験しか行っていないため、事前に表 4-4 の形質の組み合わせで手投げ実験によって、形質と飛行距離の関係を調べ、本シミュレーションのデータとして用いた。

表 4-2. ストローから変異させるモデルで変異させる形質の範囲。

クリップの数	前羽のサイズ	後羽のサイズ
0 個	0 (付けない)	0 (付けない)
1 個	1cm × 18cm	1cm × 18cm
2 個	2cm × 20cm	2cm × 20cm
	3cm × 26cm	3cm × 26cm
	4cm × 30cm	4cm × 30cm

表 4-3. ストローから変異させるモデルのシミュレーションにおける遺伝子の変異の方法。

クリップの数	前羽のサイズ	後羽のサイズ
1 つ増加	1 サイズ大きくなる	1 サイズ大きくなる
1 つ減少	1 サイズ小さくなる	1 サイズ小さくなる

表 4-4. Ⅲ章では扱わなかったオリガミバードの形質の組み合わせ。

クリップなし	羽なし
	前羽1cm × 18cm
	前羽2cm × 20cm
	前羽3cm × 26cm
	前羽4cm × 30cm
	後羽1cm × 18cm
	後羽2cm × 20cm
	後羽3cm × 26cm
	後羽4cm × 30cm
クリップ1個	羽なし
	前羽1cm × 18cm
	前羽2cm × 20cm
	前羽3cm × 26cm
	前羽4cm × 30cm
	後羽1cm × 18cm
	後羽2cm × 20cm
	後羽3cm × 26cm
	後羽4cm × 30cm
クリップ2個	羽なし
	前羽1cm × 18cm
	前羽2cm × 20cm
	前羽3cm × 26cm
	前羽4cm × 30cm
	後羽1cm × 18cm
	後羽2cm × 20cm
	後羽3cm × 26cm
	後羽4cm × 30cm

IV-2-1-3. 結果

Ⅲ章で扱わなかったオリガミバードの形質の手投げ実験の結果を表 4-5 に示す。この結果から、後羽をつけずに前羽をつけるのはバランスが悪く飛びにくい形質であることが分かった。逆に後羽のみをつける場合は比較的飛びやすい形質であることが分かった。また、クリップのみを付けたものは羽が付いているものに比べて空気抵抗の影響を受けにいため、実験者の飛ばし方に飛行距離が大きく左右されやすい。

この新たなデータを加えて、ストローから始まるオリガミバードの進化のシミュレーションを行った。シミュレーションの結果、ストローから進化をさせる場合でも、5 世代の内に飛行形質の進化を観察出来ることが分かった（図 4-6）。

表 4-5. Ⅲ章では扱わなかった形質の飛行距離を調べた結果。飛行距離の値は 5 回飛ばした値の平均値である。

		飛行距離 (cm)
クリップなし	羽なし	201
	前羽1 × 18cm	221
	前羽2 × 20cm	178
	前羽3 × 26cm	232
	前羽4 × 30cm	281
	後羽1 × 18cm	400
	後羽2 × 20cm	365
	後羽3 × 26cm	294
	後羽4 × 30cm	104
クリップ1個	羽なし	329
	前羽1 × 18cm	293
	前羽2 × 20cm	272
	前羽3 × 26cm	270
	前羽4 × 30cm	258
	後羽1 × 18cm	439.6
	後羽2 × 20cm	398.4
	後羽3 × 26cm	311
	後羽4 × 30cm	294.4
クリップ2個	羽なし	399.4
	前羽1 × 18cm	199.6
	前羽2 × 20cm	167.4
	前羽3 × 26cm	136
	前羽4 × 30cm	187.6
	後羽1 × 18cm	453.8
	後羽2 × 20cm	455.4
	後羽3 × 26cm	308.2
	後羽4 × 30cm	312.8

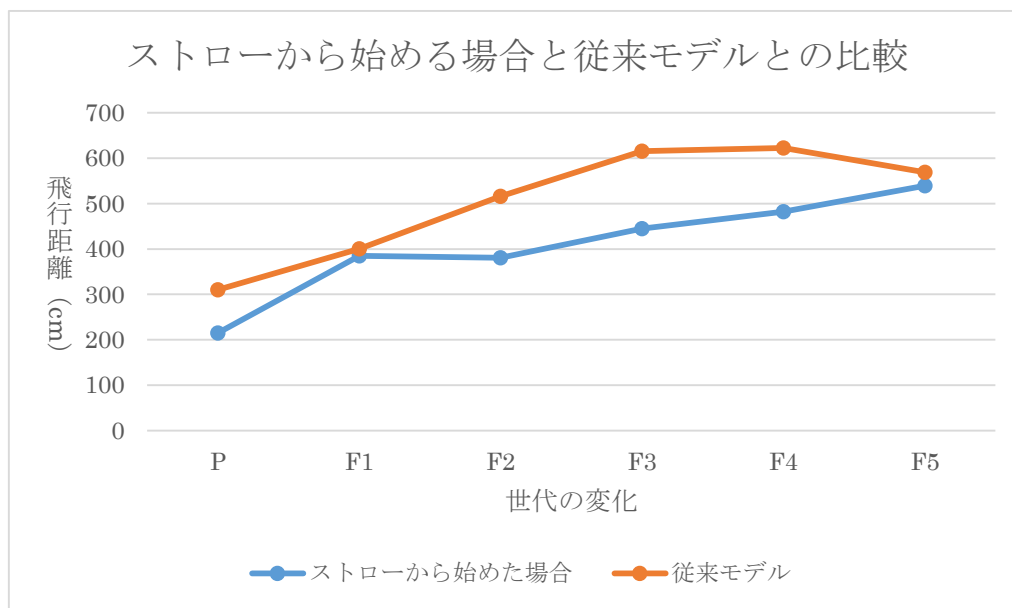


図 4-6. ストローを親 (P 世代) としたオリガミバードのシミュレーションによって得られた飛行距離の変化。

IV-2-1-4. 考察

手投げ実験によって、得られた結果から、ストローを親 (P 世代) とした場合でも、オリガミバードの飛行能力の向上を観察することが出来た。ストローから進化させるモデルと通常のモデルとを比較すると、飛行距離の伸び幅はストローから進化させるモデルの方が大きかった。

今回の手投げ実験では、羽をつけずにクリップのみがストローに取り付ける形質の飛行距離も計測した。結果からクリップのみをつけたものは羽が付いているものに比べて実験者の飛ばし方に飛行距離が左右されやすいため、本モデルを実践に用いる際は、オリガミバードの飛ばし方の指導を丁寧に行う必要があると考えられる。

また、前羽のみが付いた形質は飛びにくいことから、ストローから進化させる実験の初期では、その方向には進化が進みにくいと考えられるため、実験初期ではクリップが増加する方向、もしくは後羽が増加する方向に進化が進行しやすいと考えられる。

IV-2-2. 手投げ実験による検証

IV-2-2-1. 目的

IV-2-1 において、ストローを親（P 世代）として用いる場合でも、進化を観察できる可能性が高いことが分かった。本モデルを実際に授業実践に用いることを意識した場合、シミュレーションだけでなく、実際の実験方法に基づいた手投げ実験を行っておく必要があると考えられる。

本実験では、授業実践でも本モデルに利用に向けて、手投げ実験によってシミュレーションの結果が再現できるかどうかについて検証を行う。

IV-2-2-2. 方法

本実験では親（P 世代）や変異させる遺伝子、変異を与える方法について、すべてIV-2-1 の条件と同様にして行った。手投げ実験による飛行距離の測定は各個体につき 3 回ずつ行い、その 3 回の平均値をその個体の飛行距離として記録した。

実験では、オリガミバードの世代を重ねていく過程で、実験中に一度出現した形質が再び現れることがある。その場合は、それまでに測定した飛行距離をその個体の飛行距離として用いることとした。実験は 5 世代×10 回繰り返し、どのような進化が起こるかを観察した。

IV-2-2-3. 結果

実験の結果、各世代の平均飛行距離は世代を重ねていくにつれて向上していくことが分かった（図 4-7）。

実験によっては 5 世代後にはストローの飛行距離が 2m 強なのに対して、7m 以上飛行する形質に進化したものも存在した（図 4-8）。

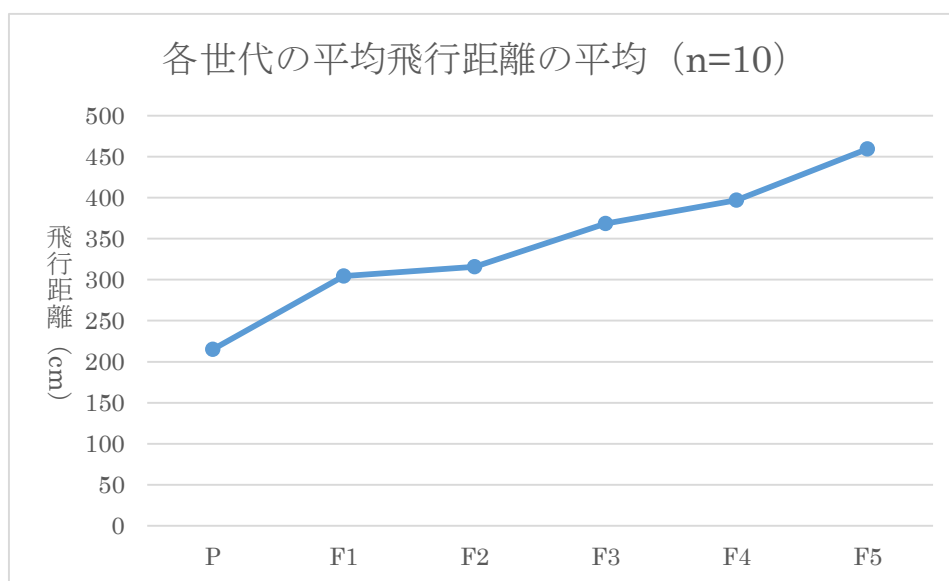


図 4-7. オリガミバードをストローから始めるモデルを手投げ実験によって行ったときの、各世代の平均飛行距離の変化。世代ごとに飛行距離が徐々に上昇していることが分かる。

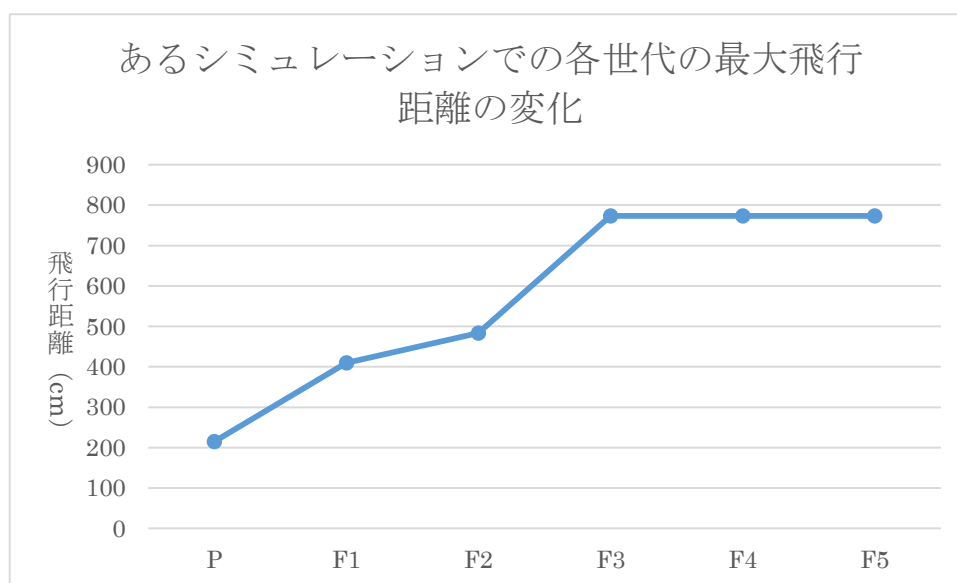


図 4-8. あるシミュレーションにおける世代ごとの最大飛行距離の変化。ストローの状態では 2m 程度であった飛行距離が 7m 以上に進化した。

IV-2-2-4. 考察

今回開発したオリガミバードの初期変異モデルは、シミュレーションだけでなく、実際に実験を行う場合でも、飛行能力の進化を観察できることが分かった。

ストローというほとんど飛ばない状態から、各部品を徐々に付け足して大きくしていくため飛行形質の進化は観察しやすいと考えられる。また変異させる形質を限定しているため、変異の中の飛びやすい形質も限定されるため、どの班でも一定の割合でよく飛ぶ形質を観察することが出来ると考えられる。

V. 新モデルを用いた実践

V-1. 自然選択による進化の原理を理解させる実践 ～私立 T 高等学校～

V-1-1. 目的

IV-2 において、ストローの状態から進化をさせるオリガミバードの新たなモデルを構築し、それがシミュレーションだけでなく、実際の手投げ実験によってでも利用できることを示した。しかし、このモデルを教材として利用した場合にどのような教育効果があるのかについては検証できていない。

本実践では、IV-2 で構築したストローからオリガミバードを進化させるモデルを用いて実践を行い、それによって自然選択による進化の原理を正しく理解させることが出来るかどうかについて検証を行う。

V-1-2. 方法

私立 T 高等学校における実践の日程と対象生徒の概要

11 月 16 日、17 日の 2 日間に私立 T 高等学校の第 3 学年 22 名に対して授業実践を行った。本実践を受講した生徒は「生物」を履修しているが、「生物の進化」については未履修であった。授業は全体を 5 班に分け、班ごとに行った。授業は 2 時限（50 分×2、1 時限目：実験、2 時限目：まとめ）行った。

実践におけるオリガミバードの実験方法の概要

まず本実践で行うオリガミバードの実験の方法について述べる。本実践では、IV-2 で開発したオリガミバードのモデルを用い、P 世代（最初の世代）は何もつけていないストローとし、また変異させる遺伝子はクリップの数、前羽のサイズ、後羽のサイズの 3 つのみとし、ストロー端からの羽の距離はすべて一定の 3cm とした。

まずストローを親（祖先個体）として、子を 3 個体作った。その際に、個体の遺伝子を 1 つ変異させた。遺伝子の変異には「遺伝子変異サイコロ」を用いた（図 5-1）。このサイコロは表 5-1 のような 6 つの目があり、一度振るだけでどのような変異が起きるか決定するようになっている。子を作る際に 1 個体につき遺伝子変異サイコロを 1 回振り、出た目に従って形質を変異させた（例：前羽が付いていない状態で「前羽のサイズ 1UP」が出た場合、その個体に 1cm×18cm の前羽を付ける）。それぞれの遺伝子は表 5-2 の形質の範囲で変化させた。ある遺伝子について、発現している形質が、その形質の範囲の上限であったと

きに「増加」の変異、またはその形質の範囲の下限であったときに「減少」の変異が起こった場合には変異が起こらなかったこととした。



図 5-1. 遺伝子変異サイコロ。

表 5-1. 遺伝子変異サイコロの目

クリップの数	前羽のサイズ	後羽のサイズ
1UP	1UP	1UP
1DOWN	1DOWN	1DOWN

クリップの数、前羽のサイズ、後羽のサイズそれぞれについて 1UP、1DOWN の目が存在する。

表 5-2. 私立 T 高等学校の実践におけるオリガミバードの形質が変異する範囲。

	クリップの数	前羽の大きさ	後羽の大きさ
形質の種類	なし	なし	なし
	1個	1cm × 18cm	1cm × 18cm
	2個	2cm × 20cm	2cm × 20cm
		3cm × 26cm	3cm × 26cm
		4cm × 30cm	4cm × 30cm

新たに出来た 3 つの子個体を 2 回ずつ手投げで飛行させ、2 回のうち、よく飛んだ方の値を記録させた。また 3 個体の飛行距離の平均値をその世代の飛行距離として記録させた。実験の中で、すでに飛行距離の測定を行った形質が再び現れた場合は、手投げ実験の過程を省略し過去のデータを飛行距離のデータとして用いさせた。その後 3 個体の内、最もよく飛んだ個体を新たな親として選択させた。

この過程を班ごとに授業時間内に可能な限り繰り返し、どのような進化が起こるかを観

察させた。

授業前に班ごとに実験に使用する道具を入れたトレイを配布した。トレイの内容は、ストロー6本、ゼムクリップ6個、Sサイズ(1cm×18cm)画用紙、Mサイズ(2cm×20cm)画用紙、Lサイズ(3cm×26cm)画用紙、LLサイズ(4cm×30cm)画用紙各6枚ずつ、セロハンテープ、オリガミバードの見本である。また生徒個人にはオリガミバードの実験方法を示したプリント1枚(付録1-1: 私立T高等学校における実践の実験方法プリント)、実験結果記録用紙1枚(付録1-2: 私立T高等学校における実践の実験結果記録用紙)、実験結果まとめワークシート1枚(付録1-2: 私立T高等学校における実践の実験結果まとめプリント)の計3枚(付録1: 私立T高等学校における実践資料)を配布した。

本実践の指導案の内容

次に指導案の内容について述べる。1時限目はオリガミバードの実験方法の説明と実験データの採取に使用した。生徒は生物の進化について履修していない生徒であるため、授業の最初に「工業暗化」をテーマとした生物の進化に関する導入を行った。このとき、過去に「工業暗化」という現象が起こった事実のみを伝え、それがどのようなメカニズムで起こったか(黒い変異体がもともと存在したことや、白い個体は食べられやすくなることなど)について一人一人にワークシートに記録させ、生物の進化はどのようにして起こるかについて考えさせた。その後、実験では、生物の進化の過程の答えを見せるということを説明し、実験の説明に入った。

実験の説明では、オリガミバードの生物としての設定の説明と並行しながら実験の説明を行った(例: オリガミバードは効率よく移動できる個体ほど生き残りやすい→実験ではよく飛んだオリガミバードを新しい親にする。オリガミバードは3個体の子どもを産む→実験では親の形をもとに3つのオリガミバードを作る)。生徒が生物としてオリガミバードをとらえられるようにした。

2時限目は実験の続きと実験結果のまとめを行った。1時限目の実験で、実験方法をきちんと理解できていない生徒がいたため、授業開始時に実験方法の復習を行った後、まとめの時間との兼ね合いも考え、10分程度実験の続きを行った。実験終了後、班ごとの実験結果をグラフにまとめてプロジェクターに映し結果の共有を行った。そして実験で起こったことを言葉で説明を交えながらワークシートにまとめさせた。その後、それら結果を踏まえて自然選択による進化の原理について説明を行った。自然選択による進化の原理については、

PowerPoint のスライドを用いて、フローチャート形式の説明を行った (図 5-2)。その際、授業の 1 時限目に導入で扱った「工業暗化」の内容について自然選択による進化の観点から再度説明を行った (白い個体に起こる「黒くなる突然変異」が木の色が黒くなるという「環境」の変化によって「生き残るのに有利」となり「進化」が起こった)。

授業後のアンケート調査

授業終了直後、生徒全員に対してアンケート調査を行った。アンケート項目は 6 項目である。内容は (1) 授業の難易度について (2) オリガミバードの実験の難易度について (3) 自然選択によって進化が起こることを実感できたかについて (4) 自然選択によって生物が進化する仕組みを簡単に説明させる (5) 授業の感想 (6) 授業内容の改善点についてである。

(1) ～ (3) については 5 件法で問いを行った。(4) ～ (6) については自由記述で回答をさせた。

事前アンケートについては、アンケートの問いの内容によって生徒の授業内容の理解に影響が出ると考えたため行わなかった。

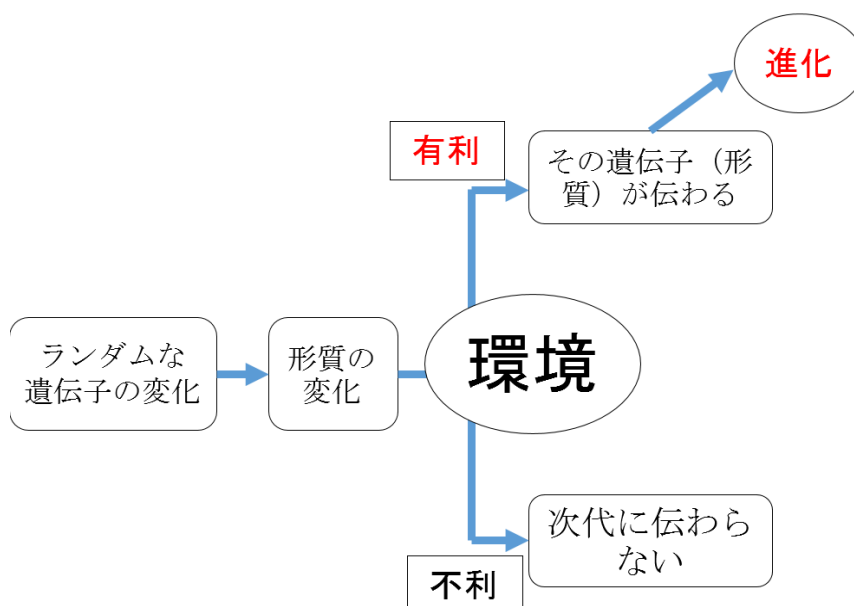


図 5-2. 私立 T 高等学校の実践において「自然選択による進化の原理」の説明の際に用いたフローチャート。

V-1-3. 結果

オリガミバードの実験では、世代を通して飛行能力の向上が見られたが、班によっては飛行能力が低下してしまう場合も見られた。クラス全体の平均では、世代を通して飛行能力が向上していることが分かる。

授業全体の難易度についてはアンケートの(1)の結果(図5-3)によると、「普通」や「やや難しかった」の解答が多かった。オリガミバードの実験の難易度についてはアンケートの(2)の結果(図5-4)によると、「普通」や「やや難しかった」との回答がほとんどであった。自然選択によって進化が起ることを実感できたかについては、(3)の結果(図5-5)によると「よく実感できた」、「やや実感できた」、「普通」の解答が多く「あまり実感できなかった」、「全く実感できなかった」という回答が見られなかった。

次に自由記述部分に関する結果について説明する。自由記述の(4)の部分に関しては、17の回答中7回答に「分かりやすい」「分かった」という回答が見られた。また5つの回答に「楽しかった」という記述が見られた。一方で、5つの回答に「分かりにくかった」や「難しかった」という記述が見られた。

最後に(5)の自然選択の過程について述べさせる問いの結果について説明する。この問いについては17枚のアンケート中、10人の回答があった。回答をした10人の内、アンケートの(3)の問いについて「1.とても実感できた」、「2.やや実感できた」と答えたのは9人、「3.普通」と答えたのは1人であった。「4.あまり実感できなかった」、「5.全く実感できなかった」と答えた生徒はいなかった。アンケートの回答が自然選択の進化の原理を正しく説明しているかの評価を行った。自然選択による進化の原理は「遺伝子のランダムな変異」、「その変異と環境によって生まれる形質の有利不利」、「その変異の遺伝」という要素が含まれているかどうかについて評価した。

「遺伝子のランダムな変異」、「その変異と環境によって生まれる形質の有利不利」、「その変異の遺伝」の要素について、すべて述べられている生徒はいなかった(表5-3)。また生物の進化は無目的でランダムな突然変異がその個体の生きている環境に有利であり、その個体がより多くの子孫を残すことによって起るものである。よって生物が持つ「意図」や「目的」のような内在的要因によって進化が起るというのは誤概念である。アンケートでは「生き残るため」や「生きていく上での～」という表現について「目的のため」に進化が起るという誤概念と見なし、そのような回答が10回答中3つに見られた。

さらに、「ある環境において有利な形質を持っている種が生き残る」という記述は多く見

られたが、「遺伝子のランダムな変異」や「変異の遺伝」について述べている回答は少なかった。

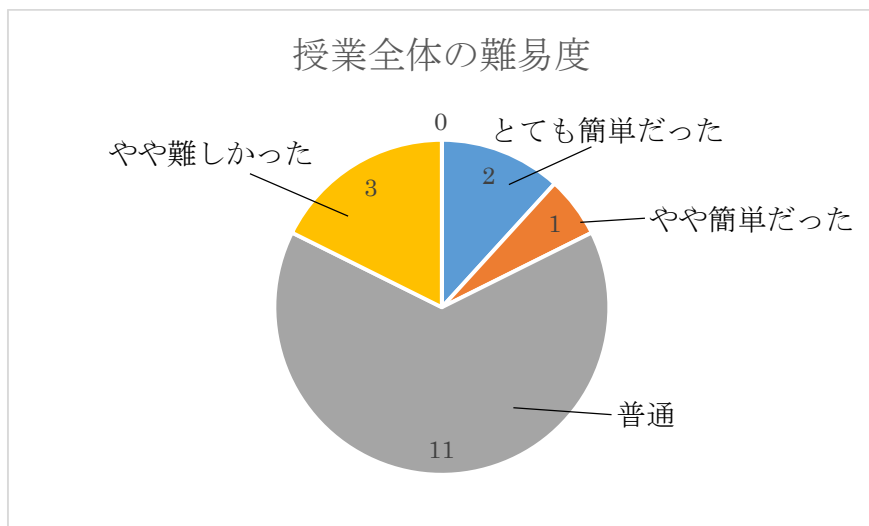


図 5-3. 私立T高等学校での実践における授業の全体の難易度に関する問いの結果。

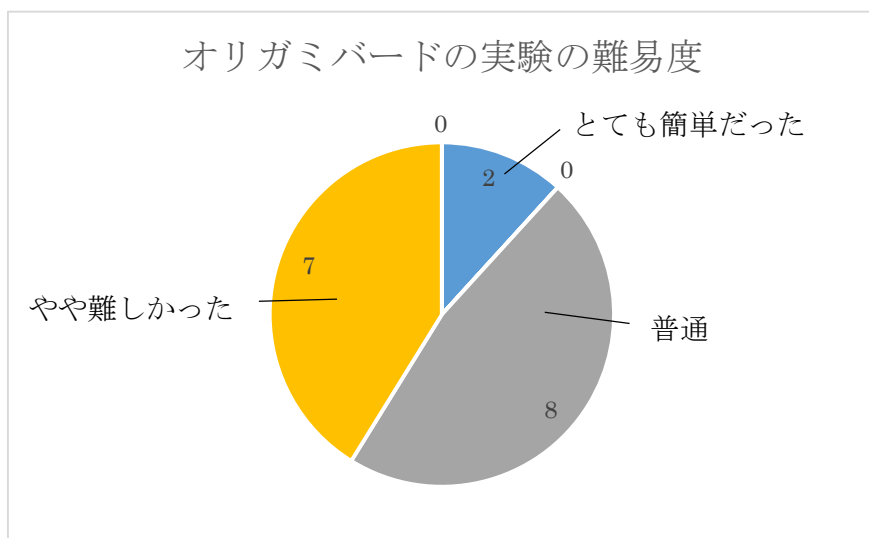


図 5-4. 私立T高等学校での実践におけるオリガミバードの実験の難易度に関する問いの結果。

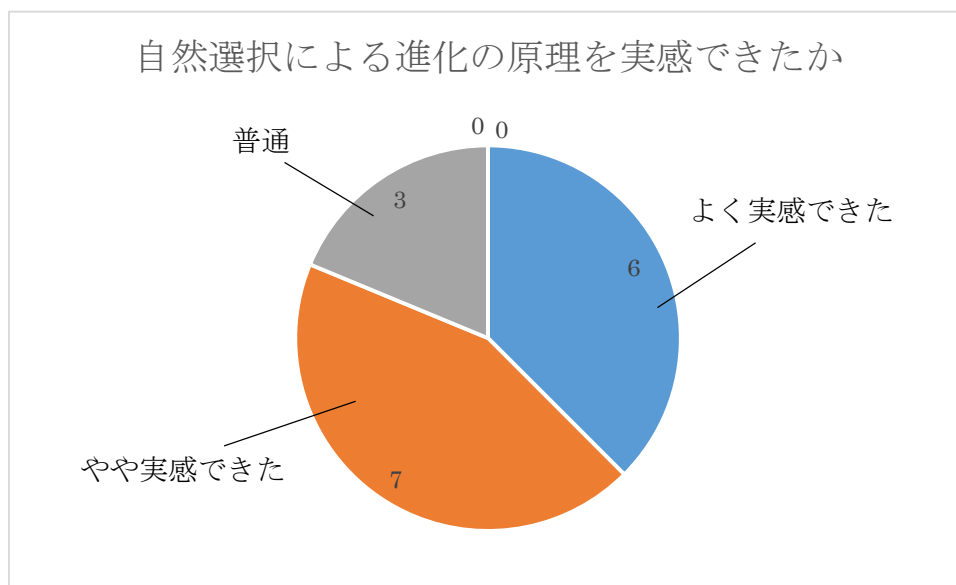


図 5-5. 私立 T 高等学校での実践における自然選択による進化の原理を実感できたかどうかに関する問いの結果。

表 5-3. 11 月 17 日の実践におけるアンケートの項目 (3) の結果を (5) の結果との関係。

アンケートの結果	
2	生き残りやすいので子孫が増えた
1	生き残るためやその場の環境で変化する
2	突然変異で生まれたやつがたまたま環境に適応していきのこって反映していく
1	自分たちが生き残りやすい状態の子どもが次の世代に残っていく。生きていく上での突然変異
2	環境が変わるとそれに有利な種が生き残る。
3	その環境に適するために徐々に変えていく
2	環境の変化によって有利な体の形が生き残る
1	世代を重ねて進化する
1	常に進化していて環境により選択される。
2	生き残りやすさ

アンケートの結果の部分の数字は、項目 (3) の回答である (自然選択による進化の原理について 1. とても実感できた 2. やや実感できた 3. 普通 4. あまり実感できなかった 5. 全く実感できなかった)。

V-1-4. 考察

実験の結果では、平均では飛行能力の向上が見られたが、実験方法を誤ってしまっていた班もあった。またアンケートの結果でも実験方法が難しかった・分かりにくかったという回答が多く見られたことから、実験方法の説明が正しく伝わっていなかったと考えられる。オリガミバードの実験は手順が非常に複雑であるため間違いが起こりやすいことが分かる。説明を行う際は、実際に実験の過程を行いながら説明をするなどの工夫が必要であったと考えられる。

アンケートの(5)の自然選択による進化の原理の説明に関して、完全に説明できている生徒はいなかった。またアンケートの(3)の回答について、自然選択を実験によって実感することが出来たと回答している生徒が多いことから、実験によって自然選択の原理について分かったつもりにはなっているが、正しい理解にはつながらなかったと考えられる。授業では実験結果をまとめた後、それらを踏まえて自然選択による進化の原理についてまとめ、「工業暗化」を自然選択の原理に基づき説明を行った。授業の中で実験の結果をもとにして生徒に進化の原理について主体的に考えさせる時間を多くとる必要があったと考えられる。また、実験の結果およびまとめと自然選択による進化の原理の説明の結び付けが不足していたと考えられるため、説明自体をより丁寧に行うことや、ワークシートを結果と現象を結び付けやすいような書き方に変更するなどの工夫が必要であろう。

また「ある環境に有利な種が生き残る」ということについては多く述べられているが、「遺伝子のランダムな変異」や「変異の遺伝」という点については述べている生徒が少なかった。先行研究では遺伝子の塩基配列の変化と形質の変化を関連付けるように図2のようなルーレットを用いていたが、今回は遺伝子変異サイコロを用いたため、本実践では遺伝子の変異と進化との関係が希薄になってしまったと考えられる。また親が子を作る際にそれらの形質が遺伝するという部分を実験の中でより強調しておく必要があったと考えられる。

V-2. アクティブラーニングを意識した実践～京都府立 K 高等学校での実践～

V-2-1. 第 3 学年での実践

V-2-1-1. 目的

私立 T 高等学校での実践は、オリガミバードを用いて実験を行い、実験結果をもとにして自然選択の理論についてまとめるという流れで行った。1 時限目の授業では手を動かして実験を行ったため、実験を行った生徒は能動的に活動を進めることが出来たと考えられる。しかし、2 時限目のまとめの時間は比較的講義形式の強い授業となった。しかし、実験の結果から自然選択の進化の原理を生徒自身に考えさせることできる余地もあったと考えられる。本実践では、まとめの時間でも能動的な活動を取り入れ、授業全体のアクティブラーニング化を目指し、生徒に考えさせる機会を増やして理解を深める。

V-2-1-2 方法

京都府立 K 高等学校における実践の日程と対象生徒の概要

京都府立 K 高等学校において、平成 27 年 12 月 9 日、11 日の 2 日間、授業実践を行った。12 月 9 日は第 3 学年 18 名に対して 2 時限（50 分×2、1 時限目：実験、2 時限目：まとめ）、12 月 11 日は第 3 学年 20 名に対して 2 時限（50 分×2、1 時限目：実験、2 時限目：まとめ）授業を行った。生徒は「生物」における「生物の進化と系統」の前の単元である「生態と環境」までを履修していた。

実践におけるオリガミバードの実験方法の概要

まず本実践で行うオリガミバードの実験の方法について述べる。本実践では、私立 T 高等学校で行った実践と同じモデルのオリガミバードを用いた。実験の方法も私立 T 高等学校で実践を行った時と同様である。

授業前に班ごとに実験に使用する道具を入れたトレイを配布した。トレイの内容は、ストロー 6 本、ゼムクリップ 6 個、S サイズ（1cm×18cm）画用紙、M サイズ（2cm×20cm）画用紙、L サイズ（3cm×26cm）画用紙、LL サイズ（4cm×30cm）画用紙各 6 枚ずつ、セロハンテープ、オリガミバードの見本、オリガミバードの実験結果記録用紙（付録 2-2：京都府立 K 高等学校第 3 学年における実践の実験結果記録用紙）である。また生徒個人にはオリガミバードの実験方法を示したプリント 1 枚（付録 2-1：京都府立 K 高等学校第 3 学年における実践の実験方法プリント）、実験結果まとめプリント 1 枚（付録 2-3：京都府

立K高等学校第3学年における実践の実験結果まとめプリント)の計2枚を配布した(付録2:京都府立K高等学校第3学年における実践のワークシート参照)。

実践における指導案の内容

次に授業の内容について述べる。授業の1時限目は実験の説明と実験を行った。今回の授業は「生物の進化」の授業であるということは明かさず、「よく飛ぶ飛行機を作る実験」というテーマであると説明をした。まずオリガミバードの作り方を実際に行わせながら説明した後、班ごとによく飛ぶオリガミバードを考えて作らせ、そのオリガミバードの形と飛行距離を記録させた。

次にこの飛行機を頭を使わずに「自然と飛びやすい形に」する活動を行うことを伝えた。生物の進化には、何の意図も目的も存在せずランダムな変異によって起こっているということをあとで意識させるために、このような説明を行った。そこで「頭を使わなくても最初に作った飛行機の飛行距離を超えることが出来るだろうか?」という働きかけを行った。ここでもこれらが進化の教材であることは明かさず、方法のみを説明した。しかし説明の中で、「元の機体のコピーを作る」「新たな機体はもとの機体と少し違う」など遺伝や変異に関わりのある部分を強調するようにした。説明の後、すぐに実験に入り、30分程度実験方法に従って実験をさせた。実験中は机間巡視を行い、実験方法を誤っている班がないか確認を行った。実験終了五分前には、実験結果をグラフにまとめるよう指示を行った。

2時限目の実験のまとめでは、まず班ごとの結果をグラフにまとめ、共有を行った。さらに、実験の流れと結果をスライドを用いてまとめた。その後、今回の実験が実は「ある生物現象を模したもの」であることを明かした。そして班ごとに「今回の実験の過程と結果を生物のストーリーにしてみましょう」という指示を出し活動を行ってもらった。班ごとに話し合った結果をA3サイズのコピー用紙に記入させた。班ごとの話し合いの結果を黒板に貼りだし、各班のメンバーの意見を聞きながら、その中から自然選択による進化に関連するキーワードを抜き出し整理した。最後に自然選択による進化の原理について授業者が作成したPowerPointのスライドを用いてフローチャート形式でまとめ、終了とした。生徒に配布したワークシートには、PowerPointのスライドにまとめたものと同様のフローチャートを印刷しており、生徒にはスライドを見ながらワークシートに穴埋めをさせた。

授業後のアンケート調査

授業終了直後、生徒全員に対してアンケート調査を行った。アンケート項目は 5 項目である。内容は (1) 授業の楽しさについて (2) 授業の難易度について (3) 自然選択によって進化が起ることを実感できたかについて (4) 授業の感想について (5) 「捕食者の少ない川に住む派手な魚を捕食者の多い川に移すと、数年後その魚は地味なものばかりになっていた。このような進化はどのようにして起きたか」について過程を説明させる問いの 5 つである。

(1) ～ (3) については 5 件法で問いを行った。(4) ～ (5) については自由記述で回答してもらった。アンケートの回答の (5) については自然選択の進化の原理を正しく説明しているかの評価を行った。自然選択による進化の原理は「遺伝子のランダムな変異」、「形質の有利不利の差による残せる子孫の差」、「その変異の遺伝」という要素が含まれているかどうかについて評価した。しかし今回のアンケートの中では「派手な魚の中で比較的地味なものが生き残り、子どもを作る。それを繰り返していくうちに・・・」といったように「遺伝子の変異」という明確な表現がなくとも、自然選択の進化の過程を説明できているものは正解とした。

V-2-1-3. 結果

12 月 9 日の実践においては、実験方法を誤ってしまった班が 1 班見られたが、そのほかの実験では、正しく実験を行うことが出来ていた。誤ってしまった班も途中で誤りに気づき修正することが出来ていた。12 月 11 日の実践においてはすべての班が誤りなく実験を行うことが出来ていた。

今回の実験では、12 月 9 日、12 月 11 日の実践におけるすべての班で実験によって作られた飛行機の飛行距離が授業の最初に班ごとが考えて作った飛行機の飛行距離を超えていた。さらに多くの班で実験によって世代を通した飛行距離の向上が見られた(図 5-6、5-7)。

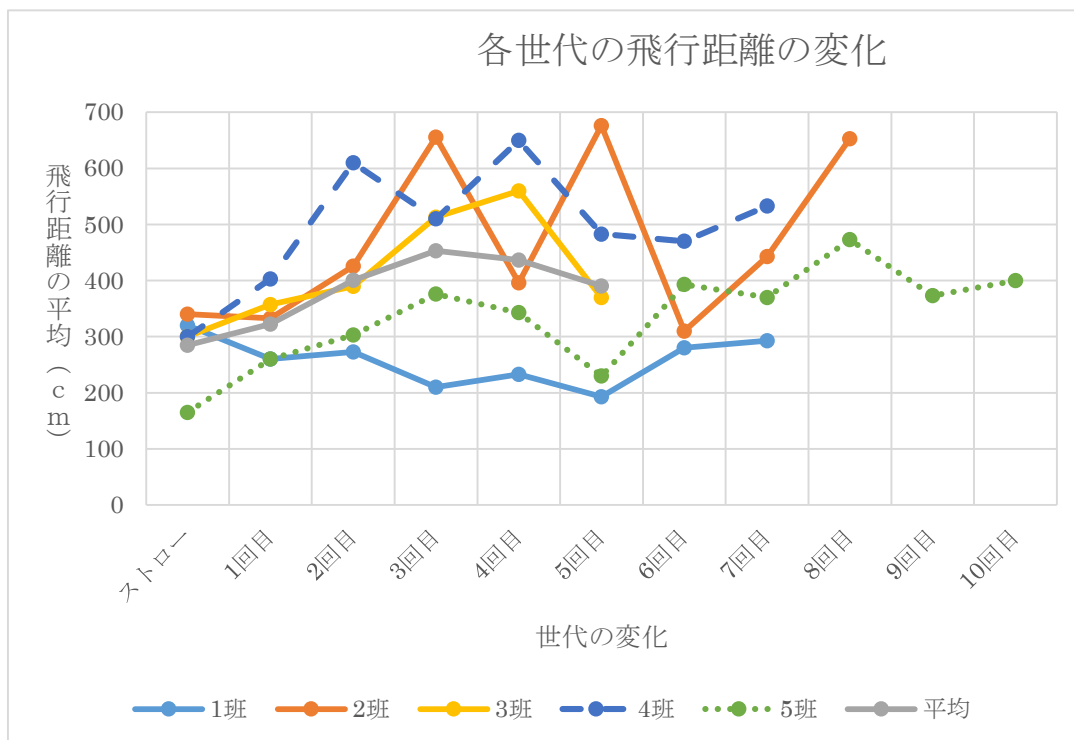


図 5-6. 12 月 9 日の実践における班ごとの飛行距離の変化。

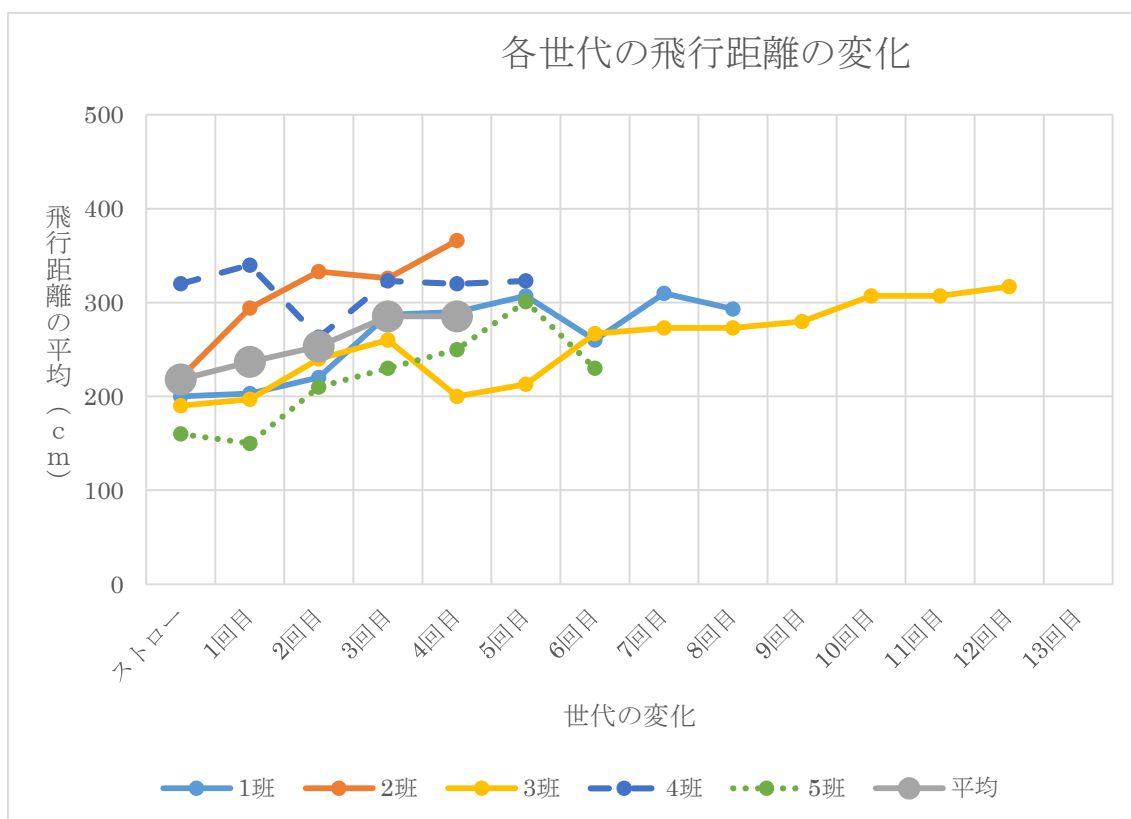


図 5-7. 12 月 11 日の実践における班ごとの飛行距離の変化。

次に9日の授業の2時限目における班活動の結果について説明する(図5-8)。1班は「親が子を産む際に親には似ているが、少し違うものが生まれる」というストーリーを描いた。2班は「モモンガの中に太い個体、普通の個体、やせた個体が現れ、この3個体は飛ぶ性能が異なる」というストーリーを描いた。3班は「サルの中にたまたま他よりも知能の高いものが出てくることでさまざまな変化が起こる」というストーリーを描いた。これら3つの班のストーリーは個体の変異に関するものである。4班は「神様によって命が生まれ、命同士が恋をすることで新しい命が生まれる。またその中で自然に勝てるものが生き残っていく」というストーリーを描いた。このストーリーは環境による選択に関する記述である。5班は「ある生物が成長していく過程で、生きるのに便利な形質が身についていく」というストーリーを描いた。

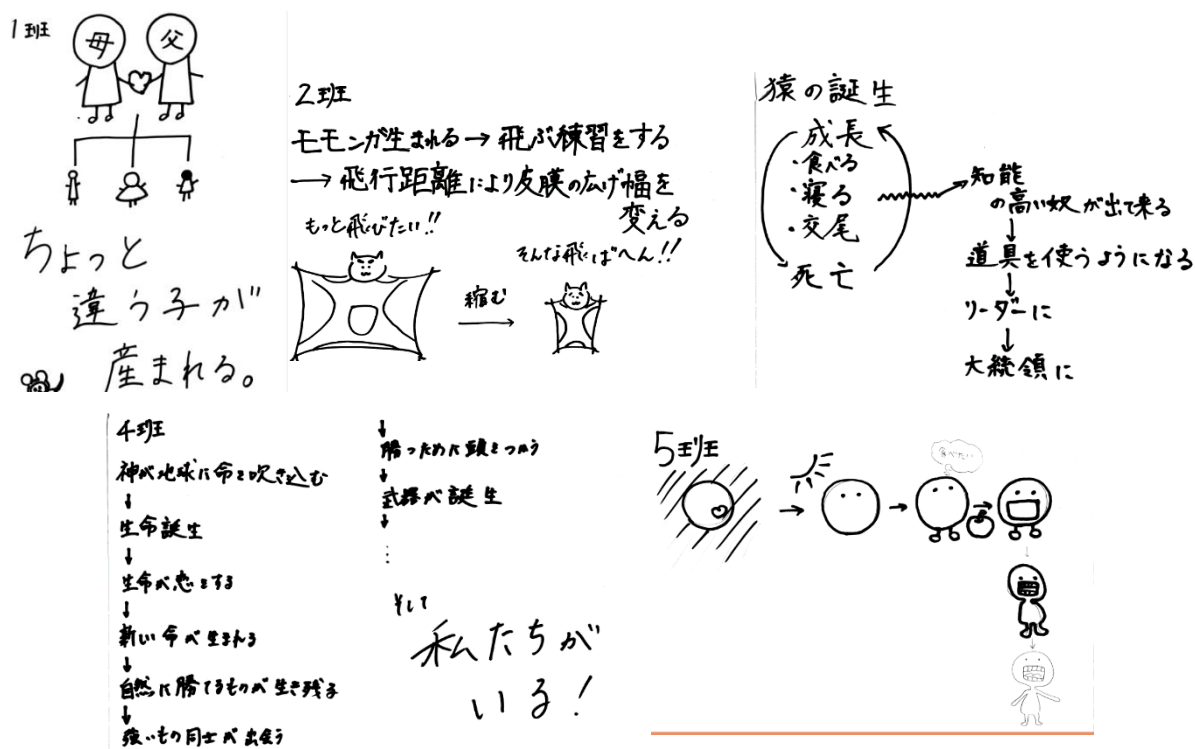


図5-8. 12月9日の実践における班ごとのオリガミバードのストーリー。

次に12月11日の班活動の結果(図5-9)について説明する。1班は「なんらかの生物のようなものが分裂していく過程で、良いものは残っていき不要なものを捨てていく」というストーリーを描いた。この記述は形質の有利不利に関するものである。3班は「ストローが生まれたが飛べなかったのでクリップが1個付いた。少し飛べたのでもう1つクリップ

が付いた。その後、後羽がつき後ろ羽が大きくなり前羽が付いた」というストーリーを描いた。4班は「魚が子どもを複数生んだ中に色の違う個体が生まれる。色の違う個体は有利だったので子どもを残した。その子どもの中に大きな個体が生まれた。大きな個体は有利だったので子どもを残した。その子どもの中にくちばしのような形状を持ったものが生まれた。その形は有利だった」というストーリーを描いた。これは自然選択を正しく理解した記述である。5班は「ある生物の捕食者が増えたことで、集団が絶滅の危機に瀕したため、食べられにくいように擬態をした。このようにより生き残れるように生物はさまざまな性質を身に付けていく」というストーリーを描いた。この記述は進化と環境による選択を関連付けたものである。一方で、2班は「ある生物個体が成長の過程で何かを摂取することなどによって羽が生えたり大きくなったりする」というストーリーを描いた。

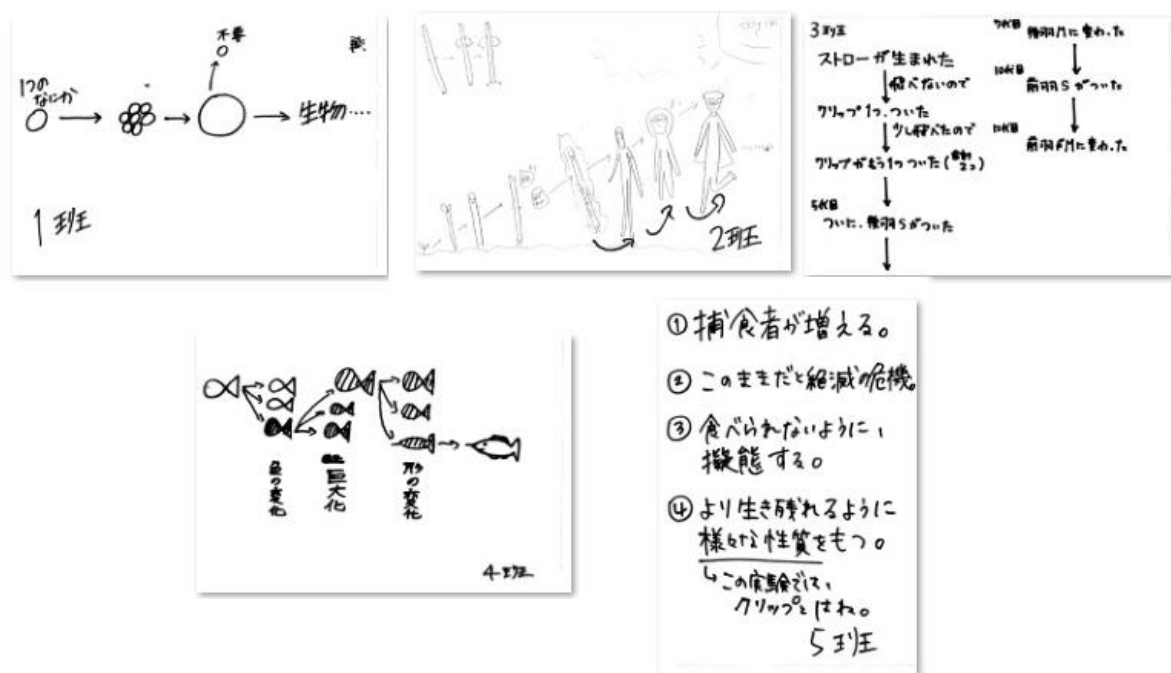


図 5-9. 12 月 11 日の実践における班ごとのオリガミバードのストーリー。

次にアンケートの結果について説明する。12 月 9 日の実践と 12 月 11 日の実践でともに 16 回答を得ることが出来た。項目（1）では 9 日、11 日どちらの実践においてもほとんどの生徒が授業について「楽しかった」と回答した（図 5-10、5-13）。項目（2）については、半数程度が授業の難易度を「簡単だった」と評価したが、「やや難しかった」「とても難しかった」と回答した生徒も見られた（図 5-11、5-14）。また項目（3）については、9 日の実

践では7割以上の生徒が、11日の実践では90%以上の生徒が「実験によって自然選択による進化を実感できた」と回答した（図5-12,5-15）。

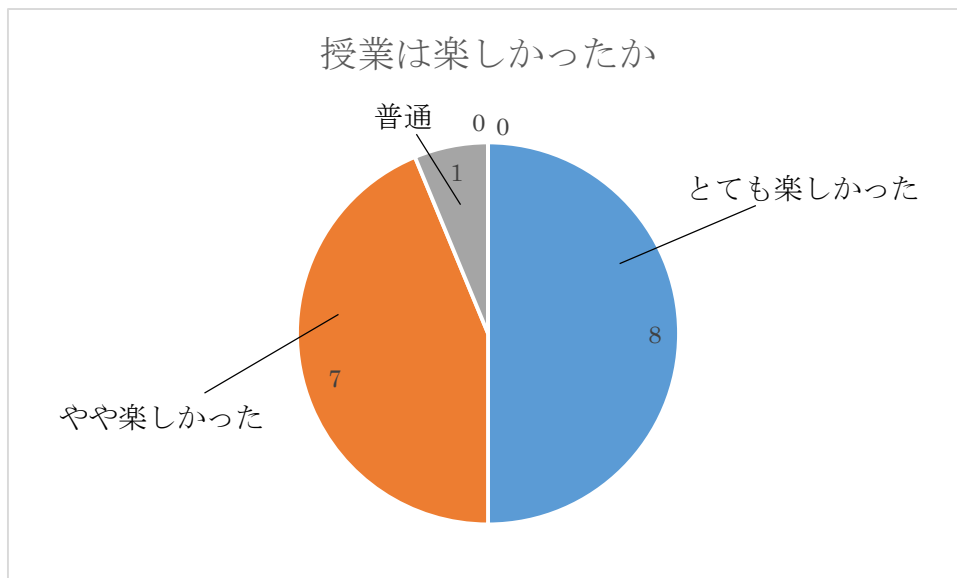


図5-10. 12月9日の第3学年の実践におけるアンケート項目（1）の結果。

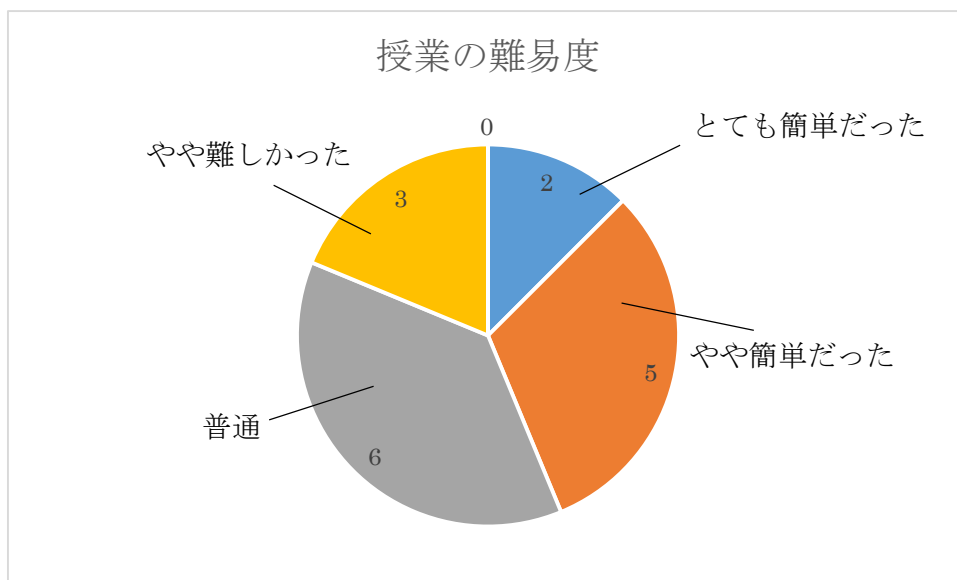


図5-11. 12月9日の第3学年の実践におけるアンケート項目（2）の結果。

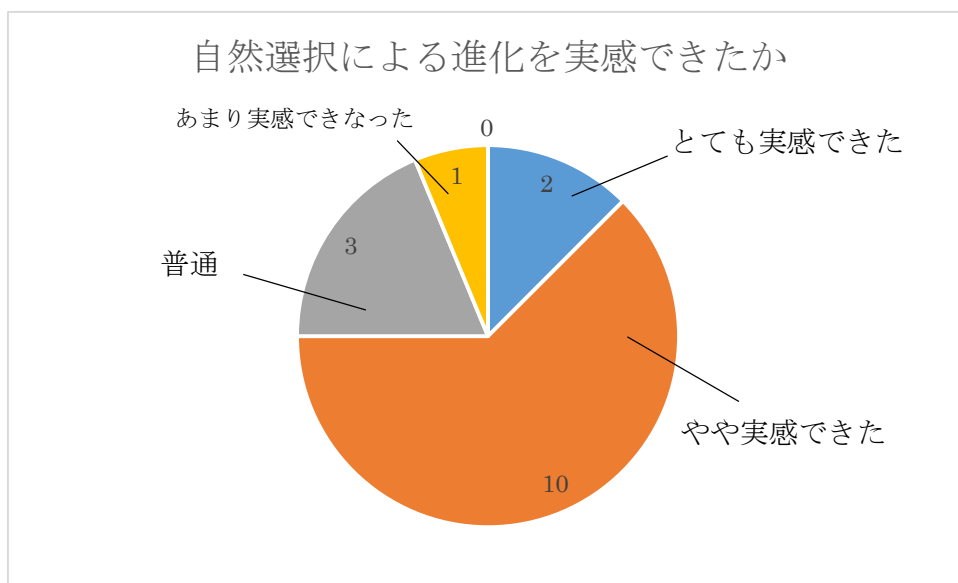


図 5-12 12 月 9 日の第 3 学年の実践におけるアンケート項目 (3) の結果。

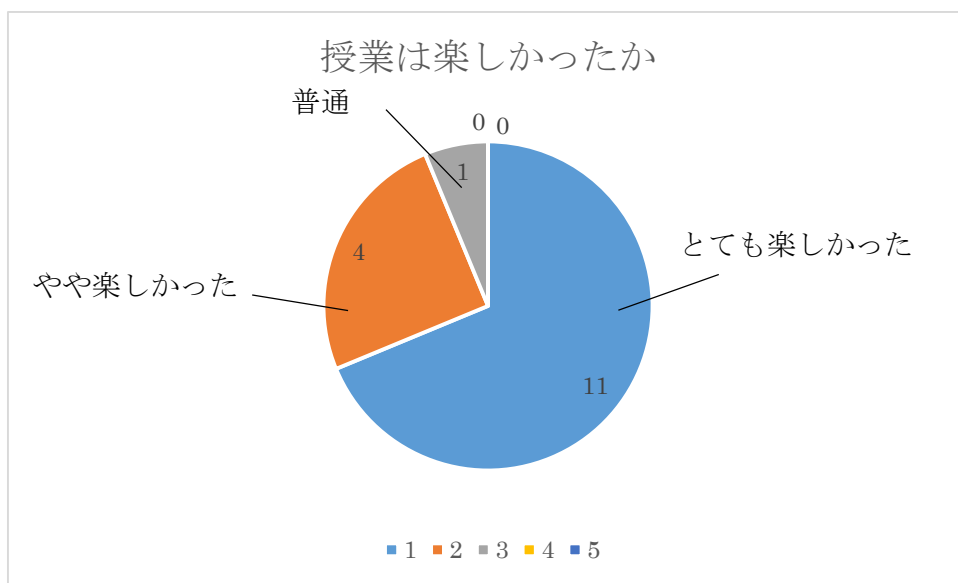


図 5-13. 12 月 11 日の第 3 学年の実践におけるアンケート項目 (1) の結果。

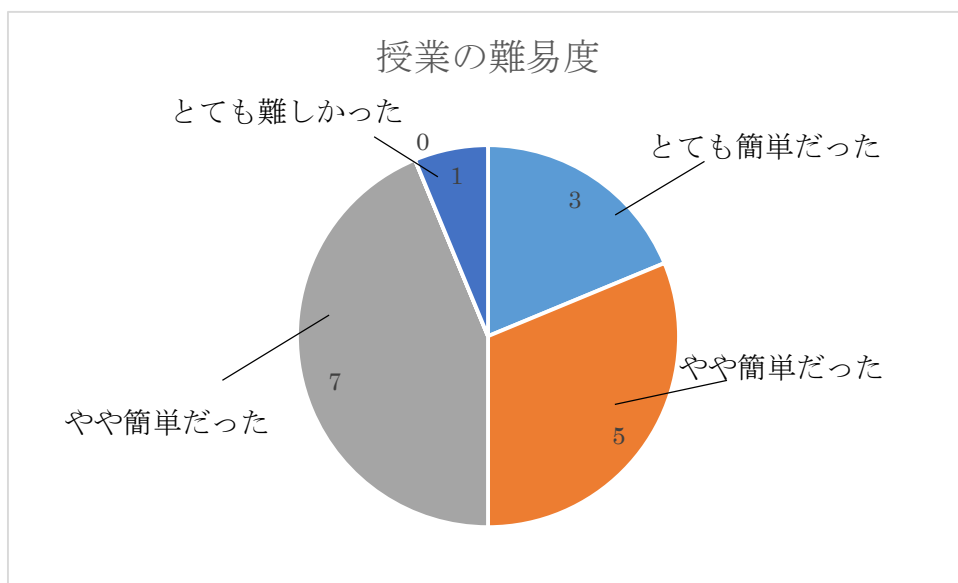


図 5-14. 12 月 11 日の第 3 学年の実践におけるアンケート項目 (2) の結果。

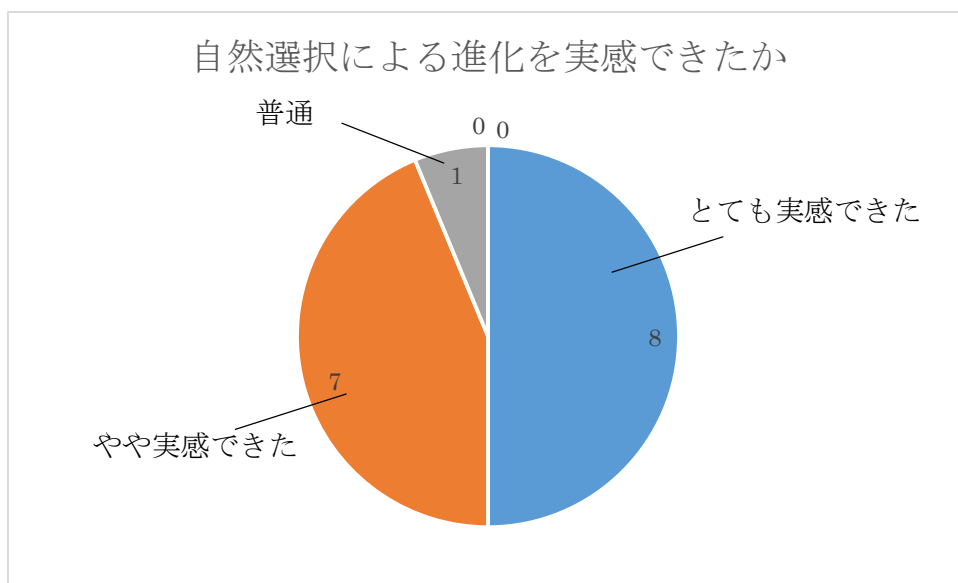


図 5-15. 12 月 11 日の第 3 学年の実践におけるアンケート項目 (3) の結果。

次にアンケートの項目 (4) の結果について説明する。12 月 9 日の実践では、16 の回答中 12 回答に「楽しかった」という記述が見られた。また「自分たちで作ったり考えたりするのがよかった」「頭に残る実験だった」が各 1 つずつ、「分かりやすかった」という意見が 2 つ見られた。一方で、「授業で何を伝えたいのかが弱かった」「いまいちつかめていない部分があった」という意見も各 1 つずつ見られた。12 月 11 日の実践では、16 の回答中 8 回答に「楽しかった・面白かった」という記述が見られた。また「5 つの班それぞれ違う意見

が出てきて面白いと感じた」「生物の話につながったのが素直にすごいと思う」「興味深く生物のメカニズムを知ることが出来た」「班ごとに作業というのがよかった」「進化の過程がどういうものなのか理解できた」といった記述も見られた。一方で、「投げる人によって同じ機体でも飛ぶ距離が変わるので、正しい結果が出るのか疑問に思った」という意見も見られた。この記述は実験データの解釈について重要な点を記述したものである。しかし「実験が難しかった」「分かりにくかった」といった意見は見られなかった。

最後にアンケートの項目（5）の結果（表 5・4、5・5）について説明する。12月9日の実践では自然選択による進化の原理（（「遺伝子のランダムな変異」、「形質の有利不利の差による残せる子孫の差」、「その変異の遺伝」がすべて含まれているか）を踏まえて問いのような現象を正しく説明できたのは1名であった。回答を部分的に見てみると、16の回答中10の回答で「派手だと食べられやすい」「捕食者がたくさんいるので食べられる」「目立ちにくいように地味になった」といった環境による選択圧に関する記述が見られた。しかし、「目立ちにくいように地味な色になった」という記述の10回答の中で、7回答は地味な色への変化に「生物の意志の作用」があるように読み取れた。これらの回答は「生物が環境に意図的に合わせて変化する」というような誤概念とも読み取れる。また「遺伝子のランダムな変異」に関する記述は見られなかった。

12月11日の実践では、自然選択による進化の原理（「遺伝子のランダムな変異」、「形質の有利不利の差による残せる子孫の差」、「その変異の遺伝」がすべて含まれているか）を踏まえて問いのような現象を正しく説明できたのは2名であった。回答を分析すると、15の回答中12の回答に「派手だと食べられやすい」「捕食者がたくさんいるので食べられる」「目立ちにくいよう地味になった」といった環境による選択圧に関する記述が見られた。しかし「地味な色に変化する」と書かれた9回答のうち、8回答は地味な色への変化に「生物の意志の作用」があるように読み取れた。これらの回答は「生物が環境に意図的に合わせて変化する」というような誤概念とも読み取れる。また12月9日のグループと同様に「遺伝子のランダムな変異」に関する記述は見られなかった。また「地味な色の形質が遺伝する」といった形質の遺伝に関する記述も少なかった。さらに「生物が環境に意図的に合わせて変化する」というような誤概念が15の回答中10の回答で見られた。

表 5-4. 12 月 9 日の実践におけるアンケートの項目（３）「自然選択によって進化が起こることを実感できたか」の結果と（５）の結果との関係

アンケートの結果	
2	派手な魚は捕食者に見つかりやすいので食べられる。派手な魚の中でも比較的地味な魚が残って、その魚たちが子どもを作り、それを繰り返していくうちに地味な魚が繁栄した。
2	派手な魚だと捕食者に食べられてしまうため、あまり目立たない地味な色の魚に変化していた。目立たないように地味な色になった
1	目立たないように地味な色になった
3	派手な魚は目立って取られやすいから自分を守るために地味になった。
2	食料がなくなってしまったから捕食としていたエサが絶滅してしまった。
2	ヒトに見つかりやすい葉では魚は人に見つかりにくい地味な色に進化した。
2	捕食者がたくさんいるから目立たないように魚たちは地味な色へと進化していった。
2	派手だと目立ってしまうので、捕食者のたくさんいるかわだと狙われてしまう。そこで魚は捕食者されないように派手な色を地味な色に変化させて捕食者に見つからないようにした。
2	派手な色をしているので、捕食者の身に入りやすくなってしまった。前の川では捕食者が少なかったのでも多少派手でも良かった。けど捕食者の多い川では格好のエサなのでもともの色から地味な色に変化した
2	派手ではめだって捕食されてしまうので地味な色へと進化した。
4	人に見つかりやすくなり数が減ったので、人に見つかりにくいような色に変わった。生き残るために。
1	その地味な魚の遺伝子が伝わっているから。
3	魚を捕る人が多くなるにつれて魚の種類や数が減り、進化のもとになる魚が少なくなり、地味な色ばかりになった。
2	天敵がいないので地味な色のものばかり生まれた。
3	世代を渡っていくにつれてだんだん地味な色の魚がたまたま増えてきた。ともに周りの環境に合うような生物へと変化とか。
2	捕食されないような周りの環境に溶け込めるように地味な色になって目立たなくした。

アンケートの結果の部分の数字は、項目（３）の回答である（自然選択による進化の原理について 1. とても実感できた 2. やや実感できた 3. 普通 4. あまり実感できなかった 5. 全く実感できなかった）。

表 5-5. 12 月 11 日の実践におけるアンケートの項目（3）「自然選択によって進化が起こることを実感できたか」の結果と（5）の結果との関係

アンケートの結果	
2	捕食者の少ない川では、派手な魚でも生きていけたけど、捕食者が多いと目立ってその魚ばかり食べられてしまうから。
3	捕食者が少ない環境では、多少目立とうが敵が少ないので生き残れた。見つかって喰われたりしても敵が少なければ減少する量も少ないので、種全体としてはそれほど脅威ではなかったと考える。)しかし捕食者がたくさんいればそれだけ食われる。どんな生き物でも食べられて生きていくわけではないと思うのでその環境に抵抗していくのだと考える。(ここでは魚の体色の変化)地味な色になってしまえば、少なくとも派手だった時よりは目立たなくなるので、捕食者がうようよしていたとしても見つからずに生き残ることが出来た。地味な色の方は生存確率も高く、繁殖もしやすくなる。そうして生まれた次世代は地味な色が多くなると考えられる。そして地味な色が増える帆と派手な色はより目立ち捕食者によって除かれる。こうして地味な色は増え、派手な色が減るような状況がd系上がり、数年後には地味な色ばかりになったと考える。
2	派手だから目立ってしまい、捕食者に食べられてしまう。それを防ぐためその川の底砂に紛れることが出来る地味な色になった魚だけが生き残り、その形質が遺伝子定期、数年後地味な色のものばかりになった。でも勝手に魚を違う場所に移すと生態系が壊れるので閉鎖された人口の釣り堀などで行った
1	派手な色をしているので敵に見つかって食べられてしまうので、このままではやばいと思って体がいろいろ変化して地味な色の魚になったと思う。
1	周りの色と同化することで今まで 派手さのために狙われていた状況から目立たない状況になりそのため捕食者に狙われにくくなった。
1	捕食者に食べられるようになって、派手な魚の個体数が減ってしまった。危機を感じた派手な魚は捕食者に食べられないようにしようとする。結果として捕食者から隠れるために地味な色になった。
3	派手な魚は捕食者に食べられる。このままでは子孫が残せない→「派手だから」と魚は考え→「地味な色にしてみる」
1	派手だと捕食者たちに狙われやすく食べられるので、自分たちの身を守るため地味な色に変化していった。
2	派手だと捕食者に見つかって食べられてしまうから、自分の子孫が食べられないようにだんだん地味な色の子どもを産むようになって最終的に地味な色の魚ばかりになった。
2	敵が増えた→自分が派手だと食べられやすいと知る→次の世代からどんどん地味になった。
2	派手な魚は目立って捕食者に狙われてしまう → このままでは絶滅しちゃう→そうだと地味になって目立たなくしよう
1	敵から自分の身を守るため（隠れたりする）
2	目立つので、捕食者に食べられる → 目立たない地味な色に変化する
1	派手な魚石の色に擬態して敵の目をあざむくために進化したと思う。
1	敵から身を守るために頑張った。

アンケートの結果の部分の数字は、項目（3）の回答である（自然選択による進化の原理について 1. とても実感できた 2. やや実感できた 3. 普通 4. あまり実感できなかった 5. 全く実感できなかった）。

V-2-1-4. 考察

ほとんどの班が正しい実験方法に基づいて実験を進めることが出来ていた。班ごとの実験の結果はどの班も実験によってできたオリガミバードが実験開始前に考えて作ったオリガミバードの飛行距離を超えていた。

本研究の目的の一つは、能動的な活動を多く取り入れ、実験の時間だけでなく、まとめの時間も含む授業全体をアクティブラーニング化することであった。アンケートでは、「楽しかった」や「面白かった」といった意見だけでなく、まとめの班活動に対しても楽しさや考えることの面白さについて述べていた。このことから、本実践では実験の部分だけでなくまとめの時間も含む授業全体をアクティブラーニング化することに成功したと考えられる。単純に授業が楽しいということだけでなく、生徒の思考を刺激することが出来たという点は大きな成果であると考えられる。しかし「授業で何を伝えたいのかが弱かった」「いまいちつかめていない部分があった」という意見も見られたことから、本実践のように進化の授業であるということを授業の最初で明かさなかったことで、実験と進化のつながりが分かりにくくなってしまった可能性も考えられる。アクティブにするために必要な要素と現象を正しく理解させるための要素の割合についてはしっかりと考慮する必要があるだろう。

次に授業そのものの難易度について考察する。私立T高等学校における実践の結果から、生徒が実験を行う際に方法を間違ってしまうことを減らすために、より丁寧に分かりやすく説明することが大きな課題であった。本実践では、授業に対して「簡単であった」と答えた生徒が私立T高等学校での実践と比べて増加したことから、説明方法の改善には成功したものと考えられる。しかし「難しかった」と答えた生徒も存在したことから、未だに改善の余地があると考えられる。

次に授業における班活動の結果について考察する。本実践では、実験の最初にオリガミバードの実験が「生物の進化」を模した実験であることを明かさず、実験後に実験の内容を生物のストーリーとして考えさせることで「自然選択による進化の原理」に気付かせるという授業を行った。これは生徒自身が実験の結果から進化の原理について気付くことで、より正しく進化の原理を理解することが出来ると考えたからである。班活動の結果から進化と環境の関連性について生徒は意識していると考えられる。「環境」によって生物の生死が左右されるということは生徒にとってイメージしやすい現象であると考えられる。一方で「変異」が「ある目的のため」や「生物の意志の作用」によって起こるという誤概念が見られた。実験において変異はサイコロによってランダムで無目的に起こしているが、よく飛ぶように

進化したという結果から「ある目的のため」に変異が起こるように考えてしまう生徒がいたと考えられる。このような結果から、まとめの際には特に生徒があまり理解できていない「ランダムな変異」によって進化が起こることを強調しながら、よく理解できている「環境」の要素を関連付けたまとめが有効であると考えられる。

形質そのものに起こる変化が「ある目的のため」や「生物の意志の作用」でないことは実験の過程を強調することで示すことが出来る。形質の変異が「ある目的のため」や「生物の意志の作用」によって起こるならば、実験のように飛びにくくなる変異は起きないはずである。このことを強調することによって形質の変異があくまでランダムであることを理解させることが出来ると考えられる。

また「環境」が生物に影響を与えることはよく理解していることを踏まえた上で、「環境」がある形質の有利・不利を決定するものであり、「変異」によって新たな形質が現れたときにはその「変異」の有利・不利を決定していることを説明する必要がある。生物に起こる形質の変異はランダムであり、その変異の有利・不利を決定しているのが「環境」であることを強調すれば、そこに「目的」や「意志」が介在していないことが分かると考えられる。

最後に実践による生徒の「自然選択による進化の原理」の理解について考察する。本実践の最大の目標は「自然選択による進化の原理」を正しく理解させることであった。どちらの実践でも選択圧や形質の有利・不利に関する記述が見られたことから進化と環境との関連については授業を通して意識することが出来るようになったと考えられる。しかし、選択圧に対して生物が「意志の作用」によって対処するという誤概念が多く見られたことから分かるように、「自然選択による進化の原理」の正しい理解には至っていない。アンケート(5)の結果において「遺伝子のランダムな変異」に関する記述が見られていないことも、生徒が進化を「ある目的のため～」や「生物の意志の作用」によって起こるものと考えていることを示していると考えられる。実験において遺伝子の変異を飛行機の形が変わることとして考えたため、遺伝子の変異と進化の関連を意識しにくかったのではと考えられる。また「形質の遺伝」に関する記述も少なかったことから、元の機体をモデルにして新たな機体を作るという実験の中での設定が、生物現象と正しく置き換えることが出来ていないと考えられる。さらに「生物が環境に意図的に合わせて変化する」という誤概念が見られた。本実践ではこの誤概念について正しく指導することが出来なかったと考えられる。遺伝子のランダムな変異が形質を変化させることと関連付ける必要があると考えられる。

V-2-2 第1学年での実践

V-2-2-1 目的

本研究で扱うオリガミバードは自然選択による進化に関する授業の導入として利用できる教材である。そのため進化について理解していない生徒などのような生徒にも利用できる可能性がある。京都府立K高等学校第3学年における実践は、「生物基礎」を履修し「生物」についても「進化」の前の単元までを履修した生徒を対象に行った。これらの生徒は多くの生物現象に関する理解はかなり深まっている生徒であると考えられる。

しかし、生物現象に関する理解があまり深まっていない生徒に進化を指導することによって、今後生物を学習する際に、進化を軸として生物現象を総合的にとらえることに役立つと考えられる。本実践では生物現象を深く理解していない第1学年を対象として実践を行うことで、さらなるオリガミバードの教材としての可能性を探っていく。

V-2-2-2 方法

京都府立K高等学校における実践の日程と対象生徒の概要

京都府立K高等学校において、平成27年12月14日に第1学年40名に対して2時限(50分×2、1時限目：実験、2時限目：まとめ)の授業を行った。

まず本実践で行うオリガミバードの実験の方法について述べる。本実践では、私立T高等学校で行った実践、京都府立K高等学校第3学年に対する実践と同じモデルのオリガミバードを用いた。実験の方法も同様である。

実践におけるオリガミバードの実験の方法

授業前に班ごとに実験に使用する道具を入れたトレイを配布した。トレイの内容は、ストロー6本、ゼムクリップ6個、Sサイズ(1cm×18cm)画用紙、Mサイズ(2cm×20cm)画用紙、Lサイズ(3cm×26cm)画用紙、LLサイズ(4cm×30cm)画用紙各6枚ずつ、セロハンテープ、オリガミバードの見本、オリガミバードの実験結果記録用紙(付録3-2：京都府立K高等学校第1学年での実践における実験結果記録用紙)である。また生徒個人にはオリガミバードの実験方法を示したプリント1枚(付録3-1：京都府立K高等学校第1学年での実践における実験方法プリント)、実験結果まとめプリント1枚(付録3-3：京都府立K高等学校第1学年での実践における実験結果まとめプリント)の計2枚を配布した。

実践における指導案の内容

次に指導案の内容について述べる。授業の内容は京都府立K高等学校第3学年を対象とした実践と同様に授業の1時限目は実験の説明と実験を行った。また今回の授業を「生物の進化」の授業であるということは明かさず、「よく飛ぶ飛行機を作る実験」というテーマであると説明をし、進めた点も同様である。2時限目が実験のまとめであることも第3学年に対する実験と同様であり、内容もほぼ同様である。

第3学年に対する実践と異なる点は、次の2点である。1点目は実験方法の説明や実験結果のまとめの部分において、オリガミバードの形質遺伝の部分で「設計図」という言葉や「設計図をでたらめに少し変える」といった言葉など、遺伝子やそのランダムな変異に関連付けやすいような言葉を使用した。2点目は、オリガミバードの過程と結果を生物のストーリーとして置き換えさせる活動を変更した。第3学年での実践では、生物のストーリーにするならどのような生物でも自由としていたが、今回は飛行機を「オリガミバード」という「生物」と見立て、実験の各過程をオリガミバードのストーリーとして置き換えるように指示した（付録3-3：京都府立K高等学校第1学年における実践の実験結果まとめプリント参照）。

授業後のアンケート調査

授業終了直後、生徒全員に対してアンケート調査を行った。アンケート項目は5項目である。内容は（1）授業の楽しさについて（2）授業の難易度について（3）自然選択によって進化が起ることを実感できたかについて（4）授業の感想について（5）「捕食者の少ない川に住む派手な魚を捕食者の多い川に移すと、数年後その魚は地味なものばかりになっていた。このような進化はどのようにして起きたか」について過程を説明させる問いの5つである。

（1）～（3）については5件法で問いを行った。（4）～（5）については自由記述で回答をもらった。アンケートの回答の（5）については自然選択の進化の原理を正しく説明しているかの評価を行った。自然選択による進化の原理は「遺伝子のランダムな変異」、「形質の有利不利の差による残せる子孫の差」、「その変異の遺伝」という要素が含まれているかどうかについて評価した。今回のアンケートの中では「派手な魚の中で比較的地味なものが生き残り、子どもを作る。それを繰り返していくうちに・・・」といったように「遺伝子の変異」という明確な表現がなくとも、自然選択の進化の過程を説明できているものは正解とし

た。

V-2-2-3 結果

本実践においては、実験方法を間違えた班が1班見られたが、そのほかの実験では、正しく実験を行うことが出来ていた。間違えた班も途中で間違いであることを指摘したため修正することが出来ていた。

今回の実験では、10班のうち9班が実験によって作られた飛行機の飛行距離が授業の最初に班ごとが考えて作った飛行機の飛行距離を超えていた。さらに多くの班で実験によって世代を通した飛行距離の向上が見られた（図5-16）。

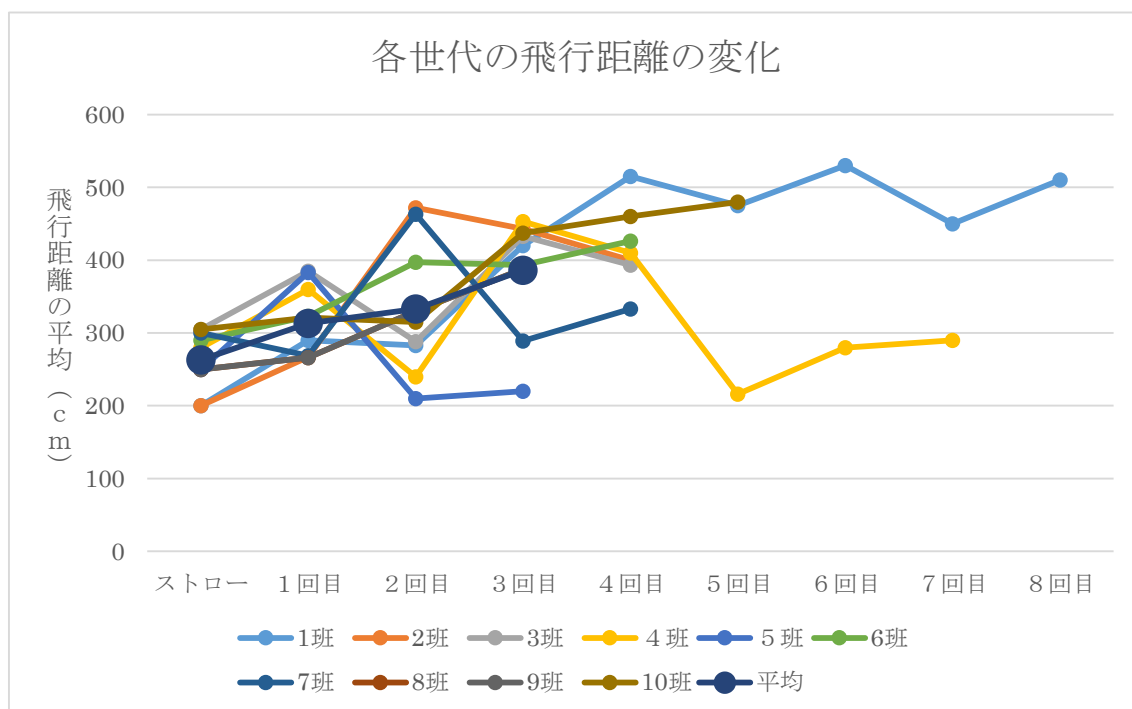
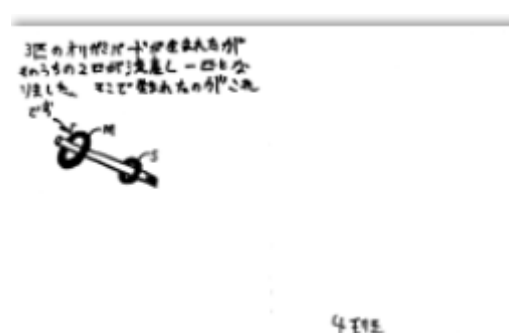
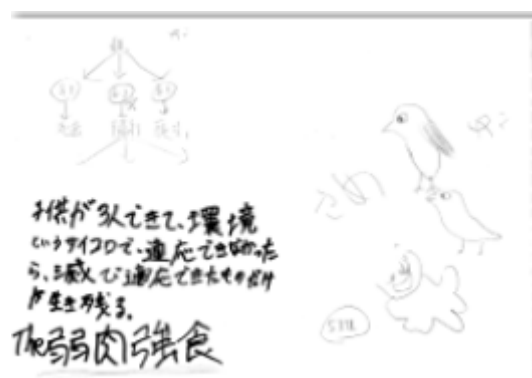
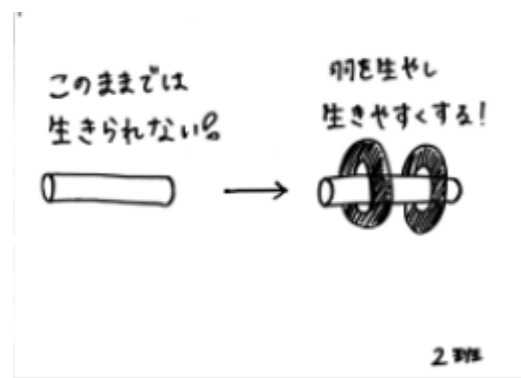
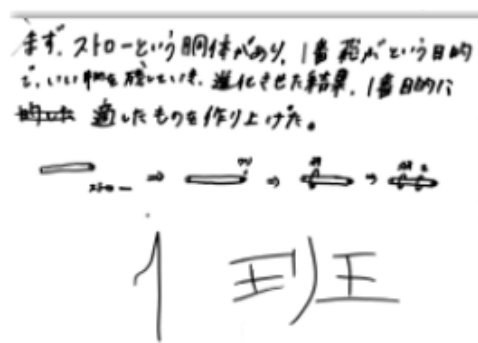


図5-16. 12月14日の実践における班ごとの飛行距離の変化を示す。

次に授業の2時限目における班活動の結果について説明する（図5-17）。1班は「ストローという胴体があり、1番飛ぶという目的で、いいものを残していき進化させた結果1番目的に適したものを作り上げた」というストーリーを描いた。2班は「ストローのままでは生きられないので羽をはやすことで生きやすくした」というストーリーを描いた。3班は時間が間に合わず白紙で提出したが口頭で「親が生んだ3匹のうち、よく飛べる優秀な個体が

現れる」というストーリーを描いた。4 班は「3 匹のオリガミバードが生まれたが、そのうち 2 匹が流産し、1 匹になった。そこで生まれたのが作った個体（実験で）」というストーリーを描いた。5 班は「子供が 3 人できて、環境というサイコロで適応できなかつたら滅び適応できた者だけが生き残る。弱肉強食」というストーリーを描いた。6 班は「生き残りやすい形を持った者同士が子どもを残し、またその中でさらに生き残りやすい形を持ったものが子どもを残す。いわゆる最強をつくり上げるための人間の進化、適応能力（敵をたおしたいといった生物の意志を含む記述も見られた）」というストーリーを描いた。7 班は「オリガミバードの遺伝子が細胞分裂によって分裂していく中で変異が起こり成長する」というストーリーを描いた。8 班は「オリガミバードが 3 匹生み、優秀な遺伝子が優先的に受け継がれていくことでオリガミバードが進化する」というストーリーを描いた。9 班は「子供が誕生し、大人に成長することでレベルアップする。そこからまた子供が誕生し、大人に成長することでレベルアップしスキルが追加される。」というストーリーを描いた。10 班は「オリガミバードの親が生んだ 3 個体の中で、最も飛ぶことのできるオリガミバードが新たな子供を 3 個体残し、その中で最も飛ぶことのできるオリガミバードがまた子供を残す」というストーリーを描いた。



(次ページに続く)

(次ページから続く)

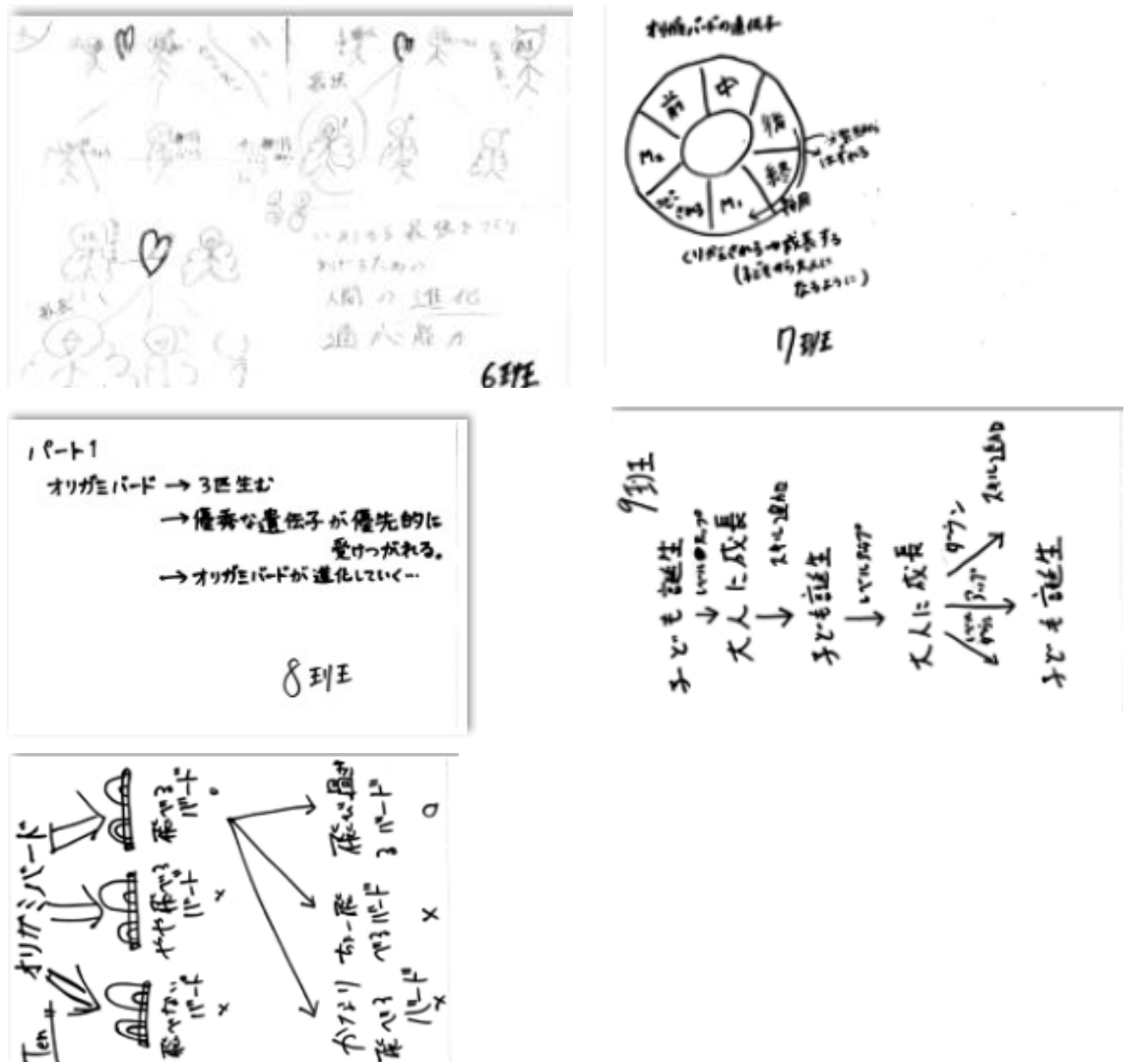


図 5-17. 第 1 学年の実践における班活動の結果。

このように形質が変異しそれらが次世代に受け継がれるという過程を正しく記述している班が見られた。また遺伝子の変異について述べている班も見られた。しかし「生きにくいので生きやすくする」「飛ぶという目的で・・・」といったように生物が「何らかの意図をもって」変化すると考えた班もあった。また実験におけるサイコロを「遺伝子のランダムな変異」ではなく「環境」を置き換えた班もあった。

次にアンケートの結果について説明する。アンケートでは 39 回答を得ることが出来た。項目 (1) では 90%以上の生徒が授業について「楽しかった」と回答した (図 5-18)。項目 (2) については、授業の難易度について「簡単だった」と評価したのは 30%以下で、そ

のほかの生徒はほとんどが「普通」、2名が「やや難しかった」と回答した（図 5 - 19）。項目（3）については、60%以上の生徒が「実験によって自然選択による進化を実感できた」と回答したが1割の生徒は「あまり実感できなかった」と回答した（図 5 - 20）。

次にアンケートの項目（4）の結果について説明する。この項目については 36 の回答を得ることが出来た。36 回答中 24 の回答で「楽しかった・面白かった」という記述が見られた。また 4 つの回答に「分かりやすかった」という記述が見られた。さらに「生物のことにつながっていてすごいと思った」「なぜ生物が進化するのかが分かった」「楽しみながら学ぶことが出来てよかった」「内容がとてもよかった」といったような肯定的な意見が見られた。一方で、「まとめのところが急ぎ気味で少しわかりにくかった」「飛行機を飛ばしすぎてあきた」「長かった」といった否定的な意見も見られた。

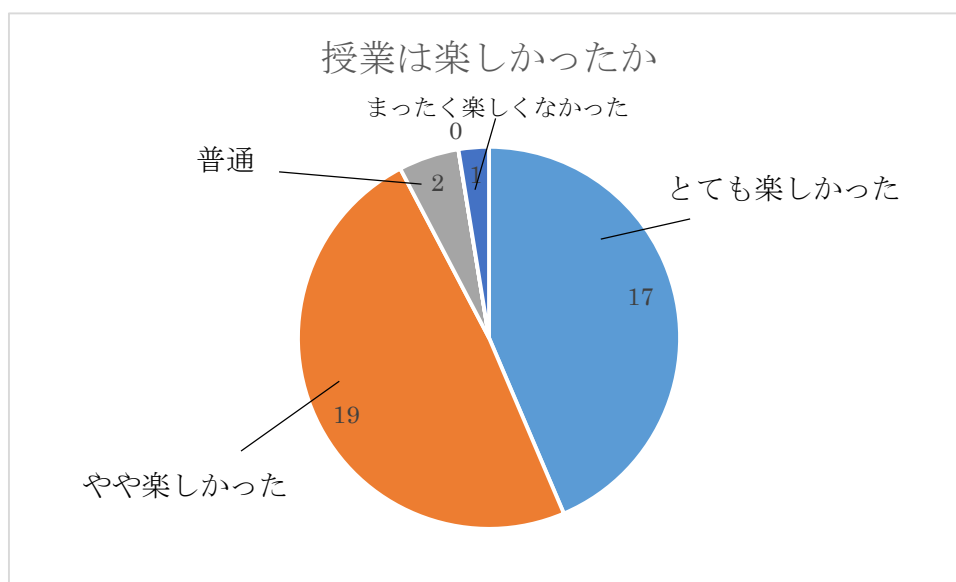


図 5-18. 第 1 学年の実践におけるアンケート項目（1）の結果。

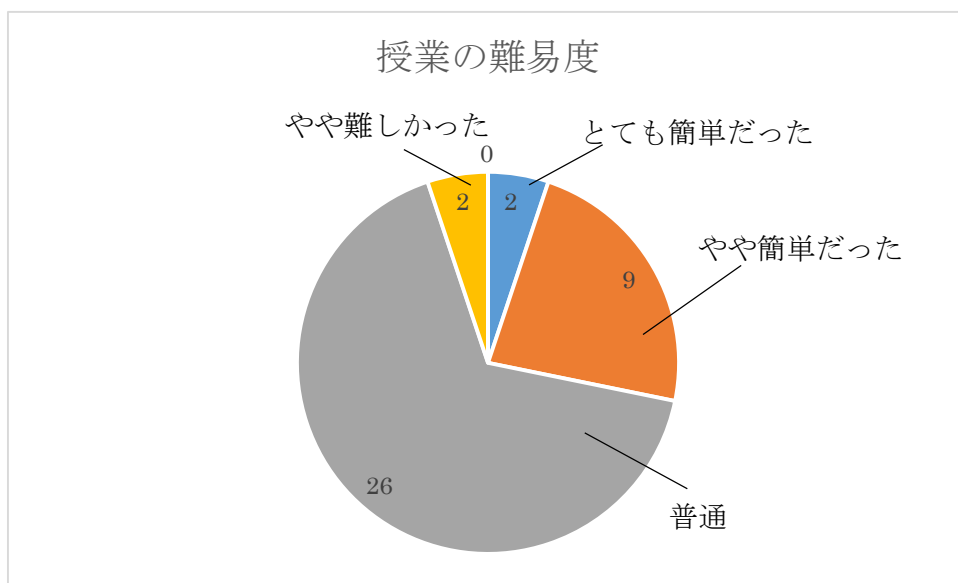


図 5-19. 第 1 学年の実践におけるアンケート項目 (2) の結果を示す。

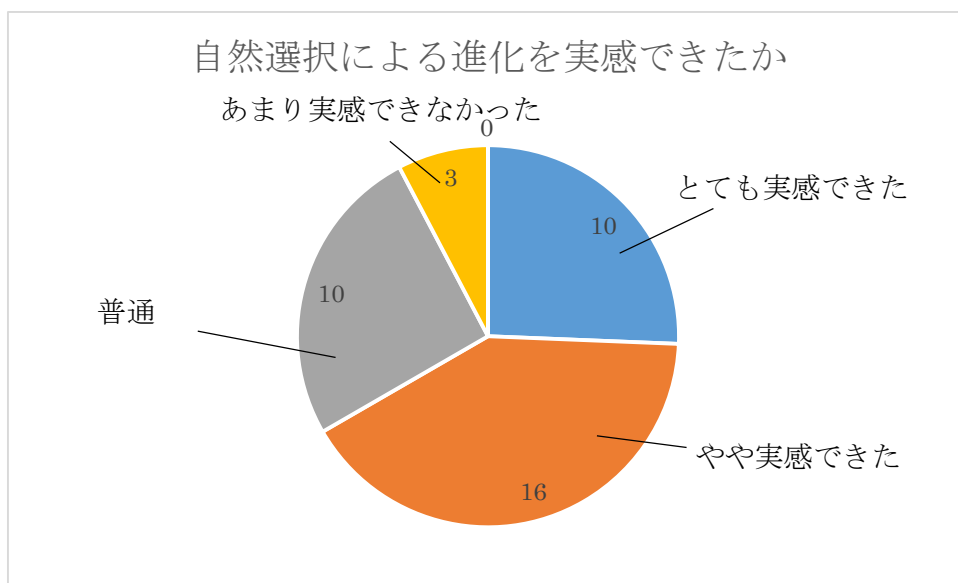


図 5-20. 第 1 学年の実践におけるアンケート項目 (3) の結果。

最後にアンケートの項目 (5) の結果 (表 5 - 6) について説明する。本項目では 37 の回答を得ることが出来た。実践では自然選択による進化の原理を踏まえて問いのような現象を正しく説明できた生徒は見られなかった。回答を部分的に見てみると、37 の回答中 21 の回答で「派手だと食べられやすい」「地味の方が生き残れるので」といったような環境による選択に関する記述が見られた。また「遺伝子が変わったから」という遺伝子の変異に関する記述が 1 つ見られた。しかし第 3 学年での実践と同様に「生物が環境に意図的に合わせ

て変化する」というような誤概念が 7 つ見られた。また少数の意見では「派手な色の遺伝子が地味な色の遺伝子より弱かったから」といった意見も見られた。

表 5-6. 12 月 14 日の実践におけるアンケートの項目 (3)「自然選択によって進化が起こることを実感できたか」の結果と (5) の結果との関係

アンケートの結果	
2	目立つと食べられてしまうから。目立たないように川の色と似ているような色になっていった。
1	人間も進化していつている。魚も食べられないように進化していく。食べられる→食べられないように進化する→色が地味になるように自分の遺伝子が変わっていく 遺伝子が変わる→遺伝子分裂流れの中で役立つ変化が出る →有害な変化→そのまま派手→死んでいく ↓ 次世代に子孫を残せる。
2	派手だと捕食者に食べられてしまうので敵に見つからないためにも地味にしなければならなかった
1	派手だと捕食者につかまるから地味な色になった。
3	くわれないようにするため
3	派手な色だと捕食者に食べられるので、地味な色になって捕食者に見つからないようになっていった。
4	汚い川だったから。
2	派手な魚は目立ちやすいから食べられてしまうから捕食者が多いという「環境」に合わせて色が地味な目立ちにくい魚へと進化した
2	捕食者が多いと派手な色は目立ってしまうので、環境に合わせて進化していった。
2	派手やと大きい魚すぐみつかって食べられてしまうから
3	わかりません
1	派手な色で目立っていたらすぐに捕食者にみつき食べられてしまう。またその魚が食べられてしまうことによって数が減り、絶滅してしまうので、体を地味な色にすることで捕食者に気付かれないようにする
3	地味にして食べられないようにするために地味にした 劣性の形質が出てくる。
4	環境に合わせていったらそうなった

4	その川に適応しようと進化を繰り返して地味な色になってしまった。
2	派手な色だと目立って捕食者につかまりやすくなってしまうので目立ちにくい地味な色に進化したのだと考えられる。
2	体が派手だったら見つかりやすくなってしまうから見つからないようにするために進化した。
1	住んでいた環境が違ったから。
1	捕食者の少ない川に住む魚が、捕食者のたくさんいる川に映ることで捕食されないように身を隠す必要が出てくるので、繁殖して進化していくとともに地味な色になっていった。
3	派手な色の者同士で繁殖したから色が混じって暗い色になった。
1	捕食者のたくさんいる川で派手な色だとすぐにつかまって繁殖できなくなるから。
3	遺伝子が変わってしまったから ←環境が変わったことにより
2	繁殖させるために生き残るには色が地味な方が生き残れるので進化していった。
1	派手だと捕食者に食べられやすいのでその環境に適応するために進化した。
2	派手なままだと捕食者に食べられてしまうため、地味な色に進化して食べられにくくした。
2	出来るだけ目立たないようにして隠れながら生きていこうと思ったから。
2	捕食者のたくさんいる川へ移す→たくさん捕食者に派手な魚は食べられる→数が減る捕食者に見つかりにくいように進化→地味な色
2	派手なままだと捕食者に見つかって食べられてしまうから見つかり肉いうように地味な色の魚になった。生き残るための進化。
1	派手な魚の遺伝子の方が、地味な魚の遺伝子より弱かったから。
2	食べられないためにおいしく見えない地味な色をした、また地味な色ほどみつかりにくいから食べられないようにするため。
3	天敵に見つかりにくいようにするため
2	捕食者に食べられないようにするため、地味な色のものに進化した。
4	捕食者に派手だと見つかりやすくて食べられてしまうから少しでも地味にして見つかりにくくしたから
2	めだつて捕まえられるから
3	捕食者の多い川には地味な色が多かったから、その魚と繁殖するから すぐに捕食されるので派手にはならない→捕食されるということは人や動物が水の中を出入りするので水が汚染される。
2	派手だと見つかりやすいから捕食者から身を隠すために地味な色に進化していった。
3	分かりません

アンケートの結果の部分の数字は、項目（３）の回答である（自然選択による進化の原理について 1. とても実感できた 2. やや実感できた 3. 普通 4. あまり実感できなかった 5. 全く実感できなかった）。

V-2-2-4 考察

本実践においては、実験方法を誤ってしまった班が 1 班見られたが、そのほかの実験では、正しく実験を行うことが出来ていた。しかしある 1 班については途中まで実験方法を誤っていた。またアンケート項目 (2) において授業の難易度が「簡単」と答えた生徒が少なかったことから、実験方法の説明が上手く伝わっていなかった可能性が考えられる。方法の難しさも原因として考えられるが、授業者が説明中に生徒の注意を引き付けられていなかったことも大きな原因として考えられる。

次に授業の 2 時限目における班活動の結果について考察する。1 班のストーリーはよいものが残るというのは選択の概念であるが、「目的のために変化する」という誤概念も含んでいた。2 班のストーリーは生きやすいように変化していくというように「生物の意志の作用」によって変化するという誤概念を示していると考えられる。3 班のストーリーは、形質の有利不利の差によって子どもを残しやすくなるという進化の要素をとらえていると考えられる。4 班のストーリーは、形質による選択に関わらず、個体が死亡し生き残った個体が偶然優秀な個体であったというストーリーであり、進化の過程を正しくとらえることは出来ていないと考えられる。5 班のストーリーは、環境への適応という観点では進化の要素をとらえているが、サイコロを遺伝子の変異ではなく環境ととらえている点では誤概念を残していると考えられる。6 班のストーリーは、適応的な形質を持ったものがより子どもを残すことが出来るという進化の要素をとらえていると考えられるが、「～のために」といった「目的のための変化」という誤概念も残していると考えられる。7 班のストーリーは、遺伝子の変異の作用についてとらえることは出来ているが、選択や子を残しやすさという点についてはとらえられていないと考えられる。8 班のストーリーは、個体間でよりよい形質を持ったものが子どもを残すことが出来、その結果進化が起こるという進化の要素についてとらえることが出来ていると考えられる。9 班のストーリーは、成長によって新たな形質を身に付けそれが子どもに伝わるといった「獲得形質遺伝」の誤概念を示していると考えられる。10 班のストーリーは、形質の有利・不利の差とそれによる子どもの残しやすさの違いという進化の要素についてとらえられていると考えられる。

このような結果を受けて、どのようなまとめを行えばよいかについて考察する。班活動の中で「変異」というキーワードが少なかったこと、「～のために」進化が起こるといった「目的のための変化」という誤概念を持っている生徒が多いことから、まずこの点を特に意識したまとめを行う必要があると考えられる。進化のきっかけとなる形質の変異は実験におい

ではサイコロを用いたランダムで無目的なものである。しかし環境への「適応」という考えが入ることによって、どうしても「～のために」変化するという考えに至りやすくなってしまふと考えられる。自然選択による進化の原理において「環境」は重要な要素であるという点を踏まえた上で、あくまで進化のきっかけである「変異」はランダムで無目的なものであることを強調して指導する必要があると考えられる。例えば、自然界において絶滅してしまう生物がいることをテーマとして扱うことが考えられ、生物が環境に適応するにはランダムな「変異」に頼るしかなく、そのような変異が起こらない場合があるからこそ「絶滅」してしまう生物がいることを示すことによって、「目的のための変化」は起こらないことを理解させられると考えられる。

次にアンケートの結果について考察する。項目（1）では 90%以上の生徒が授業について「楽しかった」と回答し、項目（4）でも「楽しかった・面白かった」という回答が見られたことから生徒は主体的に実験に取り組むことが出来たと考えられる。また「生物のことにつながっていてすごいと思った」「なぜ生物が進化するのかが分かった」「楽しみながら学ぶことが出来てよかった」という記述からオリガミバードの実験によって生徒の興味を引き出すことが出来たと考えられる。一方で、「まとめのところが急ぎ気味で少しわかりにくかった」「飛行機を飛ばしすぎてあきた」「長かった」といった否定的な意見も見られた。このことから授業時間に関して短縮すべき部分が長くなってしまっていたと考えられる。特に実験部分については、世代をある程度制限する必要もあったかもしれない。

次に項目（5）の結果（表 17）について考察する。本項目では 37 の回答を得ることが出来た。実践では自然選択による進化の原理を踏まえて問いのような現象を正しく説明できた生徒は見られなかった。しかし項目（3）において、6 割以上の生徒が「実験によって自然選択による進化を実感できた」回答しているため、多くの生徒は「自然選択による進化の原理」について理解したつもりになってしまっていると考えられる。一方で部分的には「派手だと食べられやすい」「食べられないように」「地味の方が生き残れるので」といったような環境による選択に関する記述が見られた。また「遺伝子が変わったから」という遺伝子の変異に関する記述が 1 つ見られた。このことから授業によって部分的には自然選択による進化の原理をとらえることが出来ていると考えられる。しかし第 3 学年における誤概念と同様の誤概念も見られたことから、「遺伝子のランダムな変異」については理解させることが出来ていないと考えられる。少数の意見にあった「派手な色の遺伝子が地味な色の遺伝子より弱かったから」との意見については、遺伝子の優劣と環境との関連が理解できていない

からであると考えられる。ある遺伝子の生み出す形質は「環境」によって有利不利が決定させることについて指導をする必要があると考えられる。

VI 総合考察

本研究では、オリガミバードを進化教育の教材として利用するうえで、どのような教材としての可能性があるかについて検討してきた。

まずオリガミバードのシミュレーション法の開発を行った。オリガミバードは 1 人で実験を行うには非常に負担の多い実験である。また、ランダムな変化による実験であるため、実験結果を一度の実験から予測することは難しい。そのため、オリガミバードのシミュレーション法を開発することは、大変有意義なことであったと考えられる。本研究では、このシミュレーション法を用いて、様々なオリガミバードのモデルの検討を行った。さらにその新モデルを用いて、授業実践を行い進化教材として実際に用いることが出来ることを示した。その結果からも本研究は今後のオリガミバードの発展に有効な方法であると考えられる。

次に、オリガミバードの新モデルの開発について述べる。この章ではオリガミバードを進化の教材として利用していく上で、より教育効果の高い教材にすることが出来ないかと考え研究を行った。本研究ではオリガミバードの有性生殖モデルやオリガミバードをストローの状態から徐々に進化させていくモデルなどの開発を行った。

有性生殖モデルでは、オリガミバードの実験の中でオリガミバードの適応的意義も学習させることが出来ると考え、検討を行った。しかし、本研究で検討した有性生殖モデルは、本来のモデルと比べて飛行能力の進化が起りにくいという結果となった。これは有性生殖にしたことによって、飛行能力を高める遺伝子を他の遺伝子が妨害してしまうといったことが頻繁に起こったためであると考えられる。本研究で検討したモデルでは、有性生殖が生物にとって有利であるということを示すことは出来なかったが、生殖の方法が不完全であったためと考えられる。よって工夫次第では、オリガミバードに有性生殖のモデルを組み込むことも可能であると考えられる。また、本研究で用いた有性生殖のモデルのみを用いて有性生殖の有効性を示すこともできると考えられる。

ストローの状態から徐々に進化させるモデルは、本研究によって実際に授業の中で利用可能であることが明らかとなった。ストローのような明らかに飛びにくいものが、実験によって飛びやすい形へと変化していくことは実際の進化の現象に類似しており、進化が実際に起こることを実感できると考えられる。また従来の変異させる形質を制限しているため、変異サイコロを用いて子個体に起こる変異を一度で決定することが出来るため、実験方法を簡略化することもできたと考えられる。

最後にオリガミバードの授業実践について述べる。本研究の授業実践では、オリガミバー

ドによって進化という現象を理解させることを目指すだけでなく、オリガミバードを用いて進化の授業のアクティブラーニング化を目指した。

全体を通して、実験方法を正しく伝えられるかが大きな課題となった。オリガミバードの実験方法は非常に煩雑であり、生徒が方法を誤ってしまうことも多い。そのため、説明の工夫が必要であった。京都府立K高等学校の実践では、実演を交え生徒にも実際に操作を行わせながら説明を行ったため、実験方法の間違いを減らすことに成功した。しかし第1学年での実践では、人数が多かったため実験方法を誤ってしまう生徒も見られた。実験方法の説明を丁寧に行うだけでなく、準備するプリントをより分かりやすくする必要があると考えられる。

また京都府立K高等学校の実践では、授業のアクティブラーニング化を目指すため、オリガミバードの授業を「進化」の授業であるということを明かさずに実験させ、それらの過程を生物のストーリーに置き換えるという活動を行った。その結果、生徒は授業中、主体的に考えながら授業に参加することが出来たと考えられる。

自然選択による進化の概念について正しく理解させるには至らなかった。特に実験によって自然選択による進化の原理について「実感できた」つもりになる生徒は多いが実際には正しい理解には至っていないということは問題であろう。「遺伝子のランダムな変異」について理解できていないことについてはまとめの部分で遺伝子の変異がサイコロによって起こっていたことを強調して指導すべきであると考えられる。また生物が「何らかの意図」をもって進化するという誤概念については、遺伝子の変異がランダムであることと関連付けることによって理解させられると考えられる。

自然選択による進化の原理について正しく理解させるために、オリガミバードを扱う授業そのものを改良することももちろん必要である。一方でオリガミバードの実験を生徒に進化について考えさせるための導入として扱い、その上で詳しく進化の授業を行っていくといったような、もう少し長いスパンで授業設計を行うことも必要であると考えられる。

自然選択における進化の原理は、「遺伝子のランダムな変異」、「形質の有利不利の差による残せる子孫の差」、「その変異の遺伝」という要素によって構成されており、複雑な現象であると言える。そのため、生徒に自然選択の進化の原理を1回の実験と授業によって完全に理解させることは容易ではなく、場合によっては誤概念を持ってしまう生徒もいる可能性がある。しかしオリガミバードの実験は自然選択による進化の原理の具体的なイメージを持たせるものとしては非常に有効であると考えられる。オリガミバードの実験を一度の

実験として終わらせてしまうのではなく、その後の講義においても実験によって身についた具体的なイメージを利用することが出来ると考えられる。実験によって進化の具体的なイメージを持たせた上で進化の授業に入り、授業の中で誤概念を持ちやすい内容を説明する場合に、その都度実験の内容について振り返りながら授業を進めていくことで、生徒は実感を伴った理解が出来ると考えられる。

VII. 謝辞

本研究を進めるにあたり、たくさんの方のご協力を賜りました。まず、両親です。両親の支えがなければ、ここまで研究を続けることは出来なかったと思います。心より感謝申し上げます。

また私立T高等学校の田中先生、向井先生、京都府立K高等学校の木戸先生、廣田先生、先生方は急な提案にもかかわらず、私の授業実践に快く協力してくださいました。実践をさせていただけなければ、このような論文を書くことは出来ませんでした。心より感謝申し上げます。

さらに、実践のための模擬授業に協力して下さった京都教育大学大学院教育学研究科の秋元伸さん、高辻舞華さん、田上智之さん、富永岳さん、林孝亮さん、藤本翔太さん、堀出麻由香さん、石田有香さん、飴田恵理さん、直川和樹さんにも心より感謝申し上げます。

VIII. 参考文献

浅島誠 他 19 名 (2013). 生物, 東京書籍, pp452-457

福井智紀・鶴岡義彦 (2002). 生物進化の教授価値の検討：我が国と米国における諸議論を手掛かりに. 千葉大学教育学部研究紀要 50: 69-82

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

武村政春・山野井貴浩 (2012). 架空生物を利用した高校・大学における生物教育の可能性と展望について ～いくつかの事例における教育効果の分析から～. 科学教育研究 36(3): 292-307.

武村政春(発行年不明). Origami Bird を用いた生徒実験, <<http://www.takemura-lab.com/teaching-materials>>, 2015 年 2 月 5 日アクセス

Westerling, K. E. (1992). <http://www.indiana.edu/~ensiweb/lessons/origami.html>

山野井貴浩 (2008). 進化のしくみの更なる理解のためにー教科書比較による現状分析と Origami bird (Avis papyrus) を使った生徒実験の紹介ー. 生物教育 48(4): 197-210

山野井貴浩 (2010). 自然選択による進化を学ぶ教材 Origami bird (Avis papyrus) の紹介：実践から見えてきた更なる改良への方向性.. 遺伝, 64(2): 96-103

山野井貴浩, 武村政春 (2010). 新学習指導要領に基づく生物教育教材の開発と農芸化学教育への展望. 化学と生物 48(7): 509-512.

山野井貴浩・佐倉統・鈴木一臣・武村政春 (2011). 高校生物Ⅱの授業が進化の理解に及ぼす影響ー現行の学習指導要領に基づく進化教育の課題を探るー. 生物教育 52(1): 28-37.

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 & Outreach*, 5: 292-300.

山野井貴浩・遠藤菜緒子・武村政春・佐倉統（2012）．高校生物Ⅱの進化の授業が生徒の理解に及ぼす影響その 2—分子進化と系統分類に関する内容に注目して—．*生物教育* 53(1・2) , 57-64

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 大学院 博士論文

Yamanoi, T. & Iwasaki, M. W（2015） . Origami Bird Simulator: a teaching resource linking natural selection and speciation..*Evolution: Education and Outreach* ,8: 14-25

IX. 付録

付録 1

私立 T 高等学校での実践における資料

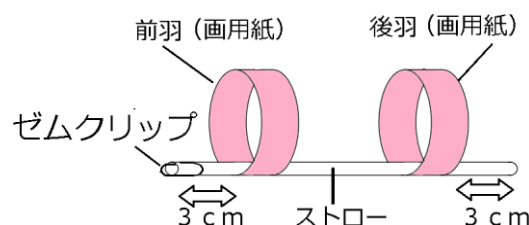
オリガミバードの進化の実験

<目的>

人工生物オリガミバードを用いて、生物に進化が起こるしくみを実感しながら理解しよう。

<材料>

ストロー、ゼムクリップ、色画用紙、セロハンテープ



<手順>

①祖先個体の飛行距離の測定

何も取り付けていないストロー（祖先）を手で投げて飛ばし、飛行距離を測定する。2回飛ばし、その最大値をその個体の飛行距離とする。

②F₁世代の作成

親個体が卵を作るとき、遺伝子に突然変異が起こることがある。次の方法に従って3個体の子に、どのような突然変異が起こり、どのように形質が変化するかを決定し、子を作成する。

表1 遺伝子の変異の方法

クリップの数	1サイズUP 1サイズDOWN
前羽のサイズ	1サイズUP 1サイズDOWN
後羽のサイズ	1サイズUP 1サイズDOWN

Step1 遺伝子変異サイコロを振り、どの遺伝子にどのような

変異が起こるかを決定する（表1）。目の出方は表1のような6通りである。遺伝子変異する範囲は表2の範囲内である。

Step2 決定に従い、子個体を作成する。このとき、ど

のような変異したかを結果シートに記録する。

Step1~2の過程を3個体分行う。

Step3 作成した3個体の子の飛行距離を測定する。祖先個体の飛行距

離を調べたときと同様に、手投げ実験は各個体2回ずつ行い、

その最大値をその個体の飛行距離として結果シートに記録す

る。また3個体の最大飛行距離の平均値をF₁世代の飛行距離と

して、結果シートに記録する。

Step4 F₁世代のうち、最もよく飛んだ個体を次の親個体とする。

表2 遺伝子の変異の範囲

クリップの数	前羽のサイズ (幅/長さ)	後羽のサイズ (幅/長さ)
0個	1cm/18cm	1cm/18cm
1個	2cm/20cm	2cm/20cm
2個	3cm/26cm	3cm/26cm
	4cm/30cm	4cm/30cm

Step1~4の過程を繰り返し、世代ごとの飛行距離がどのように変化していくかを観察する。

※一度使った羽は再利用してもよい。

すでに飛行実験を行った形質が再び現れた場合は飛行実験を行わなくてもよい。すでにとった飛行距離のデータを用いる。

オリガミバードの進化の実験 結果シート

祖先 P

クリップの数	なし		
前羽	幅	なし	長さ なし
後羽	幅	なし	長さ なし
最大飛行距離			cm

P 世代の平均飛行
距離 cm



F₁

クリップの数	個		
前羽	幅	cm	長さ cm
後羽	幅	cm	長さ cm
最大飛行距離			cm

クリップの数	個		
前羽	幅	cm	長さ cm
後羽	幅	cm	長さ cm
最大飛行距離			cm

クリップの数	個		
前羽	幅	cm	長さ cm
後羽	幅	cm	長さ cm
最大飛行距離			cm

F₁ 世代の平均飛
行距離 cm



F₂

クリップの数	個		
前羽	幅	cm	長さ cm
後羽	幅	cm	長さ cm
最大飛行距離			cm

クリップの数	個		
前羽	幅	cm	長さ cm
後羽	幅	cm	長さ cm
最大飛行距離			cm

クリップの数	個		
前羽	幅	cm	長さ cm
後羽	幅	cm	長さ cm
最大飛行距離			cm

F₂ 世代の平均飛
行距離 cm



F₃

クリップの数	個		
前羽	幅	cm	長さ cm
後羽	幅	cm	長さ cm
最大飛行距離			cm

クリップの数	個		
前羽	幅	cm	長さ cm
後羽	幅	cm	長さ cm
最大飛行距離			cm

クリップの数	個		
前羽	幅	cm	長さ cm
後羽	幅	cm	長さ cm
最大飛行距離			cm

F₃ 世代の平均飛
行距離 cm



F₄

クリップの数	個		
前羽	幅	cm	長さ cm
後羽	幅	cm	長さ cm
最大飛行距離			cm

クリップの数	個		
前羽	幅	cm	長さ cm
後羽	幅	cm	長さ cm
最大飛行距離			cm

クリップの数	個		
前羽	幅	cm	長さ cm
後羽	幅	cm	長さ cm
最大飛行距離			cm

F₄ 世代の平均飛
行距離 cm



F__

クリップの数		個	
前羽	幅	cm	長さ cm
後羽	幅	cm	長さ cm
最大飛行距離		cm	

クリップの数		個	
前羽	幅	cm	長さ cm
後羽	幅	cm	長さ cm
最大飛行距離		cm	

クリップの数		個	
前羽	幅	cm	長さ cm
後羽	幅	cm	長さ cm
最大飛行距離		cm	

F__世代の平均飛行距離 cm



F__

クリップの数		個	
前羽	幅	cm	長さ cm
後羽	幅	cm	長さ cm
最大飛行距離		cm	

クリップの数		個	
前羽	幅	cm	長さ cm
後羽	幅	cm	長さ cm
最大飛行距離		cm	

クリップの数		個	
前羽	幅	cm	長さ cm
後羽	幅	cm	長さ cm
最大飛行距離		cm	

F__世代の平均飛行距離 cm



F__

クリップの数		個	
前羽	幅	cm	長さ cm
後羽	幅	cm	長さ cm
最大飛行距離		cm	

クリップの数		個	
前羽	幅	cm	長さ cm
後羽	幅	cm	長さ cm
最大飛行距離		cm	

クリップの数		個	
前羽	幅	cm	長さ cm
後羽	幅	cm	長さ cm
最大飛行距離		cm	

F__世代の平均飛行距離 cm



F__

クリップの数		個	
前羽	幅	cm	長さ cm
後羽	幅	cm	長さ cm
最大飛行距離		cm	

クリップの数		個	
前羽	幅	cm	長さ cm
後羽	幅	cm	長さ cm
最大飛行距離		cm	

クリップの数		個	
前羽	幅	cm	長さ cm
後羽	幅	cm	長さ cm
最大飛行距離		cm	

F__世代の平均飛行距離 cm



F__

クリップの数		個	
前羽	幅	cm	長さ cm
後羽	幅	cm	長さ cm
最大飛行距離		cm	

クリップの数		個	
前羽	幅	cm	長さ cm
後羽	幅	cm	長さ cm
最大飛行距離		cm	

クリップの数		個	
前羽	幅	cm	長さ cm
後羽	幅	cm	長さ cm
最大飛行距離		cm	

F__世代の平均飛行距離 cm

付録 1-3 私立T高等学校での実践における実験結果まとめプリント

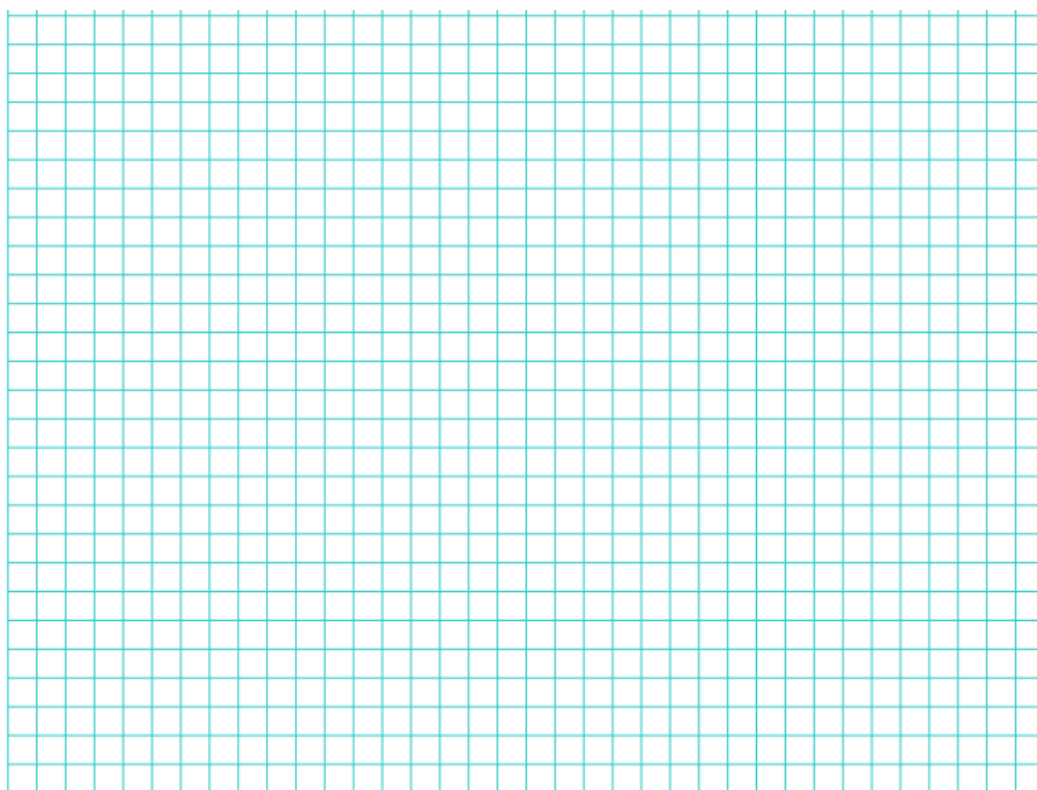
オリガミバードの進化の実験 まとめプリント

3年（ ）組（ ）番 氏名_____

○進化の起こり方を考えよう！（予想）

○オリガミバードの実験結果（グラフに飛行距離の変化を記録しよう）

飛行距離の平均（cm）



世代

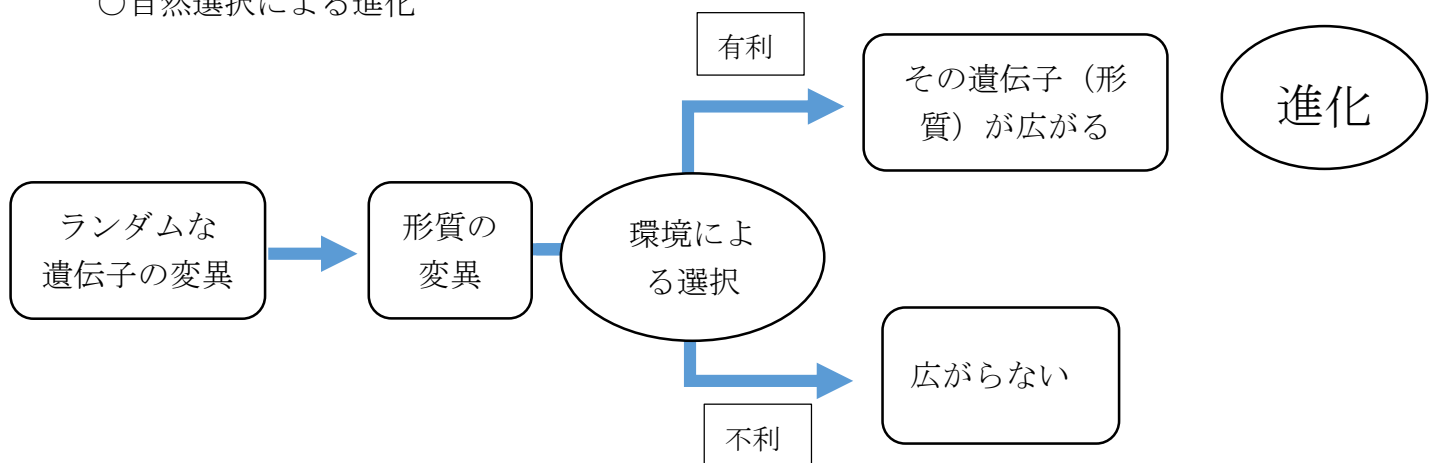
○実験結果のまとめ

- ①オリガミバードには、卵を作る際に遺伝子にランダムな変異が起こった。その結果、形質にもランダムな変化が現れた。
- ②変異した形質の中で、より生き残りやすい形質をもつものが選択され、多くの子孫を残すことが出来た。

→ランダムな変異によって進化するので、同じ世代を繰り返しても班ごとに形質は異なった。

③オリガミバードは、世代を重ねるにつれてよく飛ぶような形へ進化した。

○自然選択による進化



○進化の起き方を予想してみよう！

テーマ グッピーの体色の進化を考えてみよう！

Q. どのように進化するだろうか？？？今回の実験結果とまとめの内容を踏まえながら考えてみよう！！

<結果の予想（どのような変化が起こると考えられるか？）>

<それが起こる過程>

付録 2

京都府立 K 高等学校第 3 学年での実践における資料

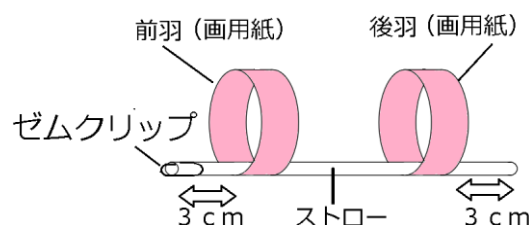
よく飛ぶ飛行機を作る実験

<目的>

頭で考えることなく、よく飛ぶ飛行機を作ることが出来るか試してみよう。

<材料>

ストロー、ゼムクリップ、色画用紙、セロハンテープ



<手順>

①ストローの飛行距離の測定

何も取り付けていないストローを手で投げて飛ばし、飛行距離を測定する。2 回飛ばし、その最大値をその機体の飛行距離とする。

②新たな機体の作成

もともとなる機体（1 回目はストロー）、の形をもとにして新たな機体（3 機）を作る。このとき、新たな 3 機はもとの機体と少し形を変える。その方法を以下に示す。

表 1 変化サイコロの目

Step1 変化サイコロを振り、どのような変化が起こるか決定する（表 1）。

目の出方は表 1 のような 6 通りである。形が変化する範囲は表 2 の範囲内である。

クリップの数	1サイズUP
	1サイズDOWN
前翼のサイズ	1サイズUP
	1サイズDOWN
後翼のサイズ	1サイズUP
	1サイズDOWN

Step2 決定に従い、新たな機体を作成する。このとき、どのような変化をしたかを結果シートに記録する。

Step1~2 の過程を 3 機体分行う。

表 2 形の変化の範囲

Step3 作成した 3 機体の飛行距離を測定する。もとの機体の飛行距離を調べたときと同様に、手投げ実験は各機体 2 回ずつ行い、その最大値をその機体の飛行距離として結果シートに記録する。また 3 機体の最大飛行距離の平均値を 1 回目の飛行距離として、結果シートに記録する。

クリップの数	前羽の大きさ (幅/長さ)	後羽の大きさ (幅/長さ)
なし	なし	なし
1個	S	S
2個	M	M
	L	L
	LL	LL

Step4 新たな機体のうち、最もよく飛んだ機体を新しいモデルとする。

Step1~4 の過程を繰り返し、回数を重ねると飛行距離がどのように変化していくかを観察する。

※一度使った翼は再利用してもよい。

すでに飛行実験を行った形が再び現れた場合は飛行実験を行わなくてもよい。すでにとった飛行距離のデータを用いる。

よく飛ぶ飛行機を作る実験 結果シート

自分たちで作った飛行機の形と飛行距離

クリップの数	個
前翼のサイズ	
後翼のサイズ	
最大飛行距離	cm

ストロー

クリップの数	個
前翼のサイズ	
後翼のサイズ	
最大飛行距離	cm

ストローの平均飛行距離

1回目

クリップの数	個
前翼のサイズ	
後翼のサイズ	
最大飛行距離	cm

クリップの数	個
前翼のサイズ	
後翼のサイズ	
最大飛行距離	cm

クリップの数	個
前翼のサイズ	
後翼のサイズ	
最大飛行距離	cm

1回目の平均飛行距離 cm

2回目

クリップの数	個
前翼のサイズ	
後翼のサイズ	
最大飛行距離	cm

クリップの数	個
前翼のサイズ	
後翼のサイズ	
最大飛行距離	cm

クリップの数	個
前翼のサイズ	
後翼のサイズ	
最大飛行距離	cm

2回目の平均飛行距離 cm

3回目

クリップの数	個
前翼のサイズ	
後翼のサイズ	
最大飛行距離	cm

クリップの数	個
前翼のサイズ	
後翼のサイズ	
最大飛行距離	cm

クリップの数	個
前翼のサイズ	
後翼のサイズ	
最大飛行距離	cm

3回目の平均飛行距離 cm

___回目

クリップの数	個
前翼のサイズ	
後翼のサイズ	
最大飛行距離	cm

クリップの数	個
前翼のサイズ	
後翼のサイズ	
最大飛行距離	cm

クリップの数	個
前翼のサイズ	
後翼のサイズ	
最大飛行距離	cm

回目の平均飛行
距離 cm



___回目

クリップの数	個
前羽のサイズ	
後羽のサイズ	
最大飛行距離	cm

クリップの数	個
前羽のサイズ	
後羽のサイズ	
最大飛行距離	cm

クリップの数	個
前羽のサイズ	
後羽のサイズ	
最大飛行距離	cm

___回目の平均飛行
距離 cm



___回目

クリップの数	個
前羽のサイズ	
後羽のサイズ	
最大飛行距離	cm

クリップの数	個
前羽のサイズ	
後羽のサイズ	
最大飛行距離	cm

クリップの数	個
前羽のサイズ	
後羽のサイズ	
最大飛行距離	cm

___回目の平均飛行
距離 cm

___回目

クリップの数	個
前翼のサイズ	
後翼のサイズ	
最大飛行距離	cm

クリップの数	個
前翼のサイズ	
後翼のサイズ	
最大飛行距離	cm

クリップの数	個
前翼のサイズ	
後翼のサイズ	
最大飛行距離	cm

回目の平均飛行
距離 cm



___回目

クリップの数	個
前翼のサイズ	
後翼のサイズ	
最大飛行距離	cm

クリップの数	個
前翼のサイズ	
後翼のサイズ	
最大飛行距離	cm

クリップの数	個
前翼のサイズ	
後翼のサイズ	
最大飛行距離	cm

回目の平均飛行
距離 cm

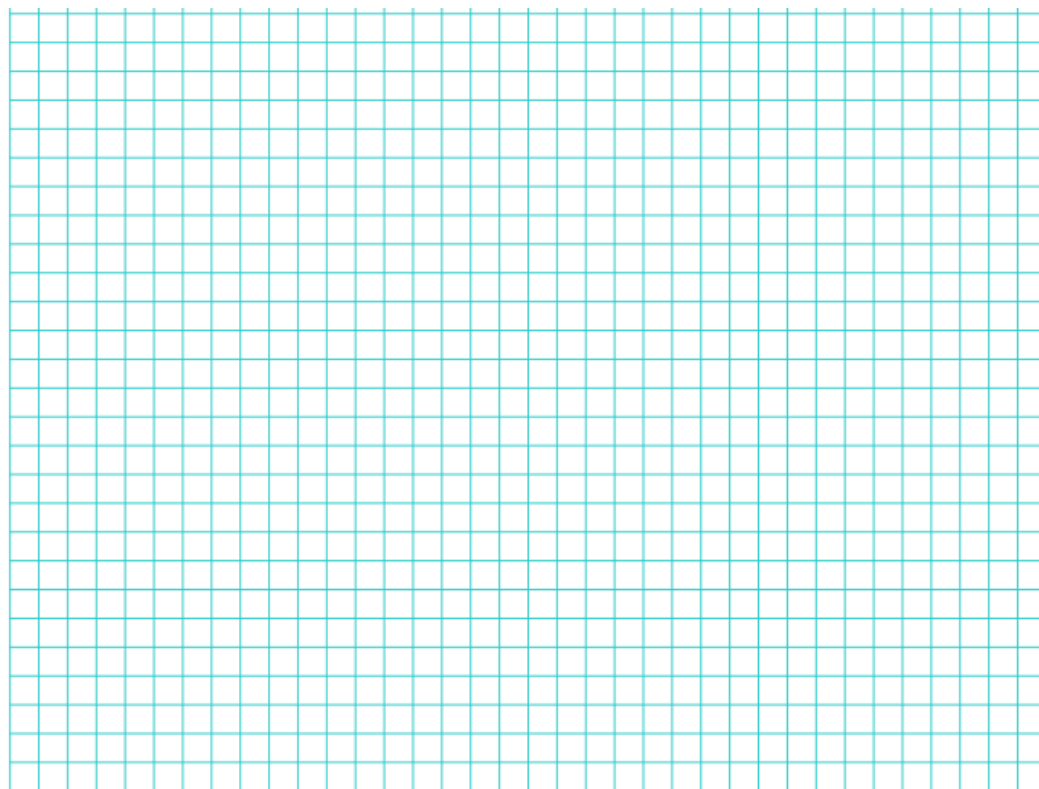
付録 2-3 京都府立K高等学校第3学年の実験における実験結果まとめプリント

よく飛ぶ飛行機を作る実験 まとめプリント

3年（ ）組（ ）番 氏名_____

○よく飛ぶ飛行機を作る実験の結果（グラフに飛行距離の変化を記録しよう）

飛行距離の平均
(cm)



回数(何回目)

○実験結果のまとめ

①飛行機を作るときは、（ ）機体を（ ）にして、新しい機体を作った（3機）。

②新しい機体を作るとき、それらはもとの機体から（ ）ものにした。

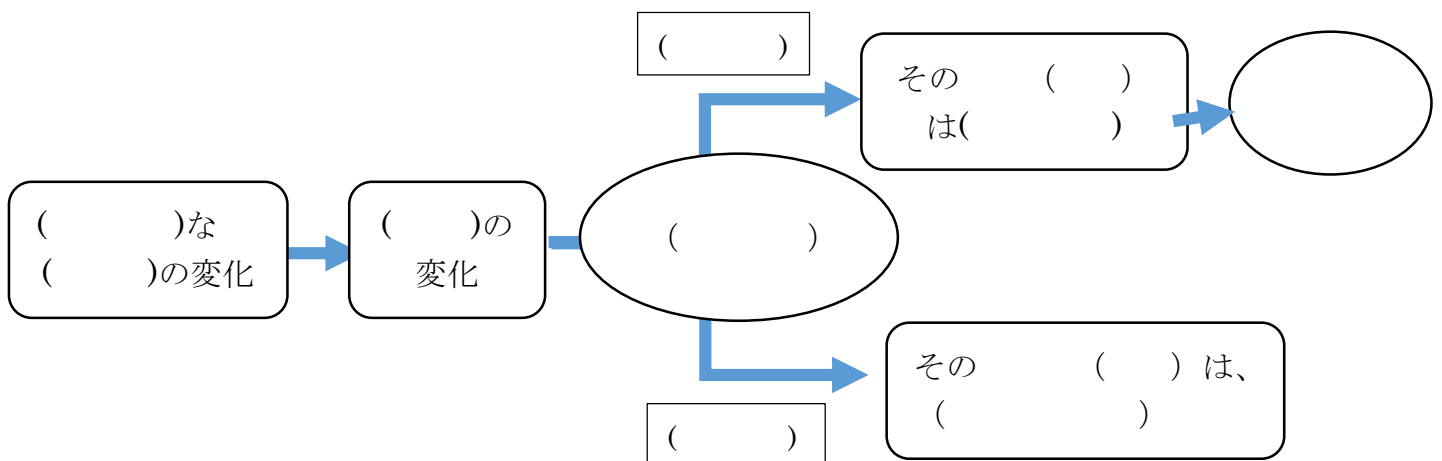
③新しい機体の中から（ ）機体を選んで、新たな（ ）にした。

④飛行機は、（ ）につれてよく飛ぶような形へ（ ）した。

実験結果からストーリー作り

○今回の実験は実は生物で実際に起こっている現象を真似たものでした。今回の実験を実際に生物で起こっている現象と考えると、実験のそれぞれの過程はどのようなストーリーになるでしょうか???

○ _____による_____の原理



付録 3

京都府立 K 高等学校第 1 学年での実践における資料

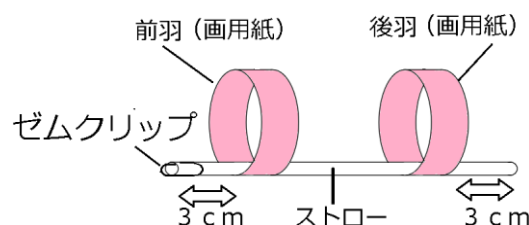
よく飛ぶ飛行機を作る実験

<目的>

頭で考えることなく、よく飛ぶ飛行機を作ることが出来るか試してみよう。

<材料>

ストロー、ゼムクリップ、色画用紙、セロハンテープ



<手順>

①ストローの飛行距離の測定

何も取り付けていないストローを手で投げて飛ばし、飛行距離を測定する。2 回飛ばし、その最大値をその機体の飛行距離とする。

②新たな機体の作成

もともとなる機体（1 回目はストロー）、の形をもとにして新たな機体（3 機）を作る。このとき、新たな 3 機はもとの機体と少し形を変える。その方法を以下に示す。

表 1 変化サイコロの目

Step1 変化サイコロを振り、どのような変化が起こるか決定する（表 1）。

目の出方は表 1 のような 6 通りである。形が変化する範囲は表 2 の範囲内である。

クリップの数	1サイズUP
	1サイズDOWN
前翼のサイズ	1サイズUP
	1サイズDOWN
後翼のサイズ	1サイズUP
	1サイズDOWN

Step2 決定に従い、新たな機体を作成する。このとき、

どのような変化をしたかを結果シートに記録する。

Step1~2 の過程を 3 機体分行う。

表 2 形の変化の範囲

Step3 作成した 3 機体の飛行距離を測定する。もとの機体の飛行距離を調べたときと同様に、手投げ実験は各機体 2 回ずつ行い、

その最大値をその機体の飛行距離として結果シートに記録する。

また 3 機体の最大飛行距離の平均値を 1 回目の飛行距離として、結果シートに記録する。

クリップの数	前羽の大きさ (幅/長さ)	後羽の大きさ (幅/長さ)
なし	なし	なし
1個	S	S
2個	M	M
	L	L
	LL	LL

Step4 新たな機体のうち、最もよく飛んだ機体を新しいモデルとする。

Step1~4 の過程を繰り返し、回数を重ねると飛行距離がどのように変化していくかを観察する。

※一度使った翼は再利用してもよい。

すでに飛行実験を行った形が再び現れた場合は飛行実験を行わなくてもよい。すでにとった飛行距離のデータを用いる。

よく飛ぶ飛行機を作る実験 結果シート

自分たちで作った飛行機の形と飛行距離

クリップの数	個
前翼のサイズ	
後翼のサイズ	
最大飛行距離	cm

ストロー

クリップの数	個
前翼のサイズ	
後翼のサイズ	
最大飛行距離	cm

ストローの平均飛行距離

1 回目

クリップの数	個
前翼のサイズ	
後翼のサイズ	
最大飛行距離	cm

クリップの数	個
前翼のサイズ	
後翼のサイズ	
最大飛行距離	cm

クリップの数	個
前翼のサイズ	
後翼のサイズ	
最大飛行距離	cm

1 回目の平均飛行距離 cm

2 回目

クリップの数	個
前翼のサイズ	
後翼のサイズ	
最大飛行距離	cm

クリップの数	個
前翼のサイズ	
後翼のサイズ	
最大飛行距離	cm

クリップの数	個
前翼のサイズ	
後翼のサイズ	
最大飛行距離	cm

2 回目の平均飛行距離 cm

3 回目

クリップの数	個
前翼のサイズ	
後翼のサイズ	
最大飛行距離	cm

クリップの数	個
前翼のサイズ	
後翼のサイズ	
最大飛行距離	cm

クリップの数	個
前翼のサイズ	
後翼のサイズ	
最大飛行距離	cm

3 回目の平均飛行距離 cm

___回目

クリップの数	個
前翼のサイズ	
後翼のサイズ	
最大飛行距離	cm

クリップの数	個
前翼のサイズ	
後翼のサイズ	
最大飛行距離	cm

クリップの数	個
前翼のサイズ	
後翼のサイズ	
最大飛行距離	cm

回目の平均飛行
距離 cm



___回目

クリップの数	個
前羽のサイズ	
後羽のサイズ	
最大飛行距離	cm

クリップの数	個
前羽のサイズ	
後羽のサイズ	
最大飛行距離	cm

クリップの数	個
前羽のサイズ	
後羽のサイズ	
最大飛行距離	cm

___回目の平均飛行
距離 cm



___回目

クリップの数	個
前羽のサイズ	
後羽のサイズ	
最大飛行距離	cm

クリップの数	個
前羽のサイズ	
後羽のサイズ	
最大飛行距離	cm

クリップの数	個
前羽のサイズ	
後羽のサイズ	
最大飛行距離	cm

___回目の平均飛行
距離 cm

___回目

クリップの数	個
前翼のサイズ	
後翼のサイズ	
最大飛行距離	cm

クリップの数	個
前翼のサイズ	
後翼のサイズ	
最大飛行距離	cm

クリップの数	個
前翼のサイズ	
後翼のサイズ	
最大飛行距離	cm

回目の平均飛行
距離 cm



___回目

クリップの数	個
前翼のサイズ	
後翼のサイズ	
最大飛行距離	cm

クリップの数	個
前翼のサイズ	
後翼のサイズ	
最大飛行距離	cm

クリップの数	個
前翼のサイズ	
後翼のサイズ	
最大飛行距離	cm

回目の平均飛行
距離 cm

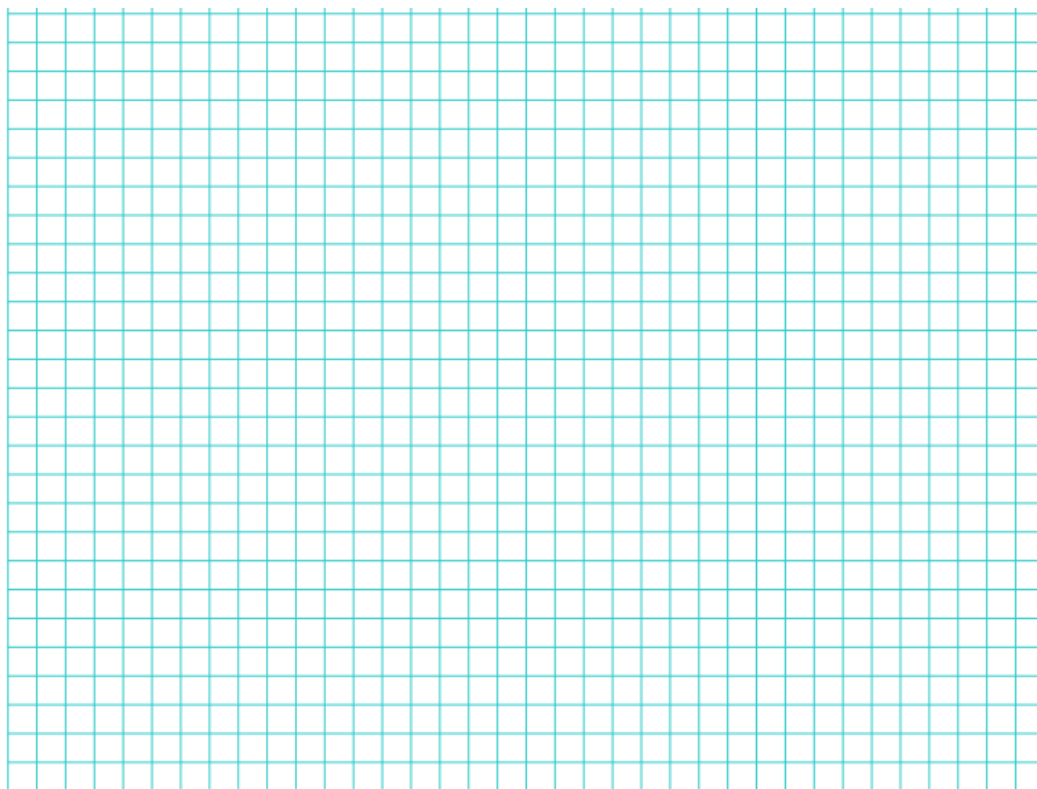
付録 3-3 京都府立K高等学校第 1 学年の実験における実験結果まとめプリント

よく飛ぶ飛行機を作る実験 まとめプリント

1 年 () 組 () 番 氏名 _____

○よく飛ぶ飛行機を作る実験の結果（グラフに飛行距離の変化を記録しよう）

飛行距離の平均
(cm)



回数(何回目)

○実験結果のまとめ

①新しく機体を作るときはもとの () の () を作るようにした

②しかし、その () はもとの設計図を () ものにした。

③新しくできた機体の中で () 機体を新しい設計図に () し、その他は () にした。

④この過程を () ことで飛行機は () ように () していった。

実験結果からストーリー作り

○今回の実験は実は生物で実際に起こっている現象を真似たものでした。今回の実験を実際に生物で起こっている現象と考えると、実験のそれぞれの過程はどのようなストーリーになるでしょうか???

○ _____による_____の原理

