博士論文

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　大学院学際情報学府　博士課程

文化・人間情報学コース

山野井　貴浩

本論文の一部は，下記の原著論文をもとに作成されたものである．これらの論文を元に大幅に加筆修正をおこない，第１章および第４章を書き加えた．なお，下記１）は本論文２－２の内容に相当し，２）は２－３，３）は２－４，４）は３－２，５）は３－３にそれぞれ相当する．

１）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－現行の学習指導要領に基づく進化教育の課題を探る－．**生物教育** 52(1,2):28-37.

２）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.

３）山野井貴浩・岩嵜航（準備中）自然選択と種分化を繋げて理解させることを意図したPC シミュレーション教材－オリガミバード・シミュレーター．

４）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－分子進化と系統分類を中心に．　**生物教育** 53(1,2) :57-64

５）Yamanoi, T., Takemura, M., Sakura, M., Kazama, T. (2012) Development and evaluation of an activity to teach molecular phylogeny, deep time and classification systems to Japanese high school students *Asian Journal of Biology Education*,6:13-25.

目次

1章：序論

1-1　科学教育において「進化のしくみ」を教える意義・・・・・・・・・・・・・・・・・・8

1-2　現代進化学における進化のしくみ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・15

1-2-1　小進化のしくみ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・15

1-2-2　大進化のしくみ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・20

1-2-3　進化のしくみに関する過去の諸説・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・22

1-3　日本の進化教育の現状と変遷・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・24

1-3-1　新学習指導要領における進化教育 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・24

1-3-2　日本の進化教育の変遷・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・26

1-3-2-1　ダーウィン進化論の日本への導入とその社会的影響・・・・・・・・・・26

1-3-2-2　日本の公教育における進化の扱い・・・・・・・・・・・・・・・・・・・28

1-3-3　実験・実習教材の開発状況と実験・実習の実施率・・・・・・・・・・・・・31

1-4　進化のしくみに関する適切な実験・実習教材とは・・・・・・・・・・・・・・・・34

1-4-1　理科の実験・実習教材に求められる条件・・・・・・・・・・・・・・・・・34

1-4-2　ミス・コンセプションを考慮した教材・・・・・・・・・・・・・・・・・・37

1-4-2-1　宗教（創造論）の影響・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・37

1-4-2-2　宗教（創造論）と関係しないミス・コンセプション・・・・・・・・・・39

1-4-3　進化のしくみに関する教授法および実験・実習教材の開発状況・・・・・・・41

1-4-3-1　自然選択に関する教授法の開発状況・・・・・・・・・・・・・・・・・・41

1-4-3-2　自然選択に関する実験・実習教材の開発状況・・・・・・・・・・・・・・48

1-4-3-3　中立説に関する実験・実習教材の開発状況・・・・・・・・・・・・・・・53

1-4-3-4　新たな実験・実習教材を提案する必要性・・・・・・・・・・・・・・・・57

1-5　本研究の目的・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・58

2章　実験・実習教材の提案①　自然選択教材：オリガミバード

2-1　目的・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・63
2-2　自然選択に関連するミス・コンセプション調査・・・・・・・・・・・・・・・・・・66
　2-2-1　はじめに・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・66
　2-2-2　方法・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・67
　2-2-3　結果・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・70
　2-2-4　考察・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・72
2-3　自然選択教材・オリガミバードの改変・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・74
　2-3-1　はじめに・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・74
　2-3-2　方法・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・75
　2-3-3　結果・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・84
　2-3-4　考察・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・87
2-4　オリガミバード・シミュレータの開発と評価・・・・・・・・・・・・・・・・・・・91
　2-4-1　はじめに・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・91
　2-4-2　オリガミバードプロトコルの更なる変更・・・・・・・・・・・・・・・・・92
　2-4-3　オリガミバード・シミュレータ（OBS）の開発・・・・・・・・・・・・・・・95
　2-4-4　生徒実践の概要と教育効果の検討・・・・・・・・・・・・・・・・・・・99
　2-4-5　まとめと今後に向けて・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・105
2-5　まとめ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・107

3章　実験・実習教材の提案②　中立説教材：クジラの親戚を探る分子系統樹実習

3-1　目的・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・109

3-2　中立説に関して高校生物Ⅱの授業では理解しにくい内容に関する調査・・・・・・112
3-2-1　はじめに・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・112
3-2-2　方法・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・113
3-2-3　結果・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・117
3-2-4　考察・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・120
3-3　中立説教材・クジラの親戚を探る分子系統樹実習・・・・・・・・・・・・・・・123
3-3-1　はじめに・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・123
3-3-2　方法・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・124
3-3-2-1　Kuzoff et al.（2009）に加えた変更点・・・・・・・・・・・・・・・・・124
3-3-2-2　生徒実習の流れ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・130
3-3-2-3　生徒実践と実習前後テストによる実習の評価・・・・・・・・・・・・・131
3-3-2-4　高校生物教員による実習の評価・・・・・・・・・・・・・・・・・・133
3-3-3　結果・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・136
3-3-4　考察・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・140
3-4　まとめ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・144

4章　総合考察

4-1　本研究の要約・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・146
4-2　本研究の新規性・意義・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・148
4-2-1　新学習指導要領における高等学校の生物教育で有用な実験・実習教材・・・・148
4-2-2　本教材の教育効果を発揮するための注意点・・・・・・・・・・・・・・・149
4-2-3　生物学の知識の接続を促す実験・実習教材・・・・・・・・・・・・・・・150
4-2-4　ミス・コンセプションを修正する実験・実習教材・・・・・・・・・・・・152
4-2-5　科学コミュニケーションへの寄与・・・・・・・・・・・・・・・・・・・153

4-3　本研究の限界・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・156
4-3-1　理解の転移について・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・156
4-3-2　教育効果の測定方法と長期の学習効果・・・・・・・・・・・・・・・・・・157
4-4　結論と今後の展望・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・159
4-4-1　染色体・進化発生学・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・159
4-4-2　自然選択に基づく系統樹思考・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・160
引用文献・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・164
謝辞・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・182

１章　序論

1-1　科学教育において「進化のしくみ」を教える意義

科学教育のもっとも重要な目的のひとつは「科学リテラシー」を身につけさせることである．例えば，OECD による国際的な学習到達度調査である PISA は，公教育の世界的な標準として言及されることが多いが，そこにおいて科学に関する測定基準とされているのが科学リテラシーである．科学リテラシーの定義は複数あるが（鈴木 2008，小川 2010），三宅（2006）による定義では「社会生活を営む上での基本的な能力の一部で，ただ単に科学的な読み書き能力だけでなく，科学的な事象に関して意見が言え，科学を理解し，身近な事象についての問題を科学的に解決し，意思決定できるなど幅広く，調和のとれた科学的能力や科学的態度を有すること」とある. つまり, 科学リテラシーとは「科学的知識 Scientific Knowledge」を身に付けた上で、意見を述べたり，問題解決をしたり，意思決定できる能力や態度と言える.

科学的知識は「科学の知識（Knowledge of Science）」と「科学についての知識（Knowledge about Science）」の２つから構成される（OECD 2009）.「科学の知識」は物理，化学，生物科学，地学・宇宙科学及び科学を基盤とするテクノロジーという主な領域をまたがる自然界の知識のこと,「科学についての知識」は科学の方法（科学的探究）と目標（科学的説明）に関する知識のことを言う．また，科学的知識の中には「科学の本質 Nature of Science」が含まれるという議論もある（Lederman 1992）．科学の本質とは，科学的理論や法則などの科学の知識以外のものであり，「科学と言う営為全体は，科学の歴史や哲学などからの思想的・歴史的背景の側面，文化人類学的な見地から見る科学を創り出す人間の営為としての側面，科学の社会的要請や抑制といった社会的側面，科学を一つの文化として捉え鑑賞するといった美や価値に関する文化的側面，などの複数の構成要素を含んだ人間活動の一部である」ということを指している（鈴木 2008）.

日本の理科教育[1]，特に中等教育において「科学についての知識」や「科学の本質」に関

する教育があまり行われていないという報告がなされてきた（小倉・松原 2006, 鈴木 2008, 加納 2010，加納ら 2012）．また，「科学の知識」に関する内容が多すぎるという批判も繰り返され（清長ら 1971，小銭・田中 2011），ゆとり教育の流れに乗って，理科の各科目において内容の精選や選択化が行われてきた（梅埜ら 1989，八巻 2011）．ところが，ゆとり教育の推進に伴い，科学に関する国際的な学力調査である PISA や TIMSS の結果が低下しているという指摘がなされるようになり，新学習指導要領（文部科学省 2008，2009）では一転して理科に関する学習内容が大幅に増加することになった（詳細については１－３－１参照）．「科学の知識」は科学の進展に伴い今後も増加していくため，どのような基準で内容を精選するかを決めることは非常に大切である．統一した基準がどのようなものであるべきかについて議論することなく，科学の知識に関する内容が減ったり増えたりを繰り返していくのでは，科学リテラシーの向上は望めないだろう．

では新学習指導要領では理科教育においてどのような科学の知識を優先的に扱うべきであるとしているだろうか．理科の学習指導要領解説（文部科学省 2008，2009）の第１章総説を概観すると，科学の知識に関係する記述として「科学的な見方や考え方を養うことに繋がる」，「論理的な思考力の基盤となる」，「実社会や実生活との関わりを考慮するもの」，「科学の基本的な概念や法則」などの視点は書かれているが，やや抽象度が高い表現であり，具体的にどのような知識が含まれるのかあるいは含まれないのかを選別するのは難しい．今回の学習指導要領の改訂に伴い，小学校から高校までの理科教育で扱う内容は構造化され，「エネルギー」「粒子」「生命」「地球」を大きな柱とし，さらにこの柱を構成する内容が３～４の項目にさらに分けられ，各項目で扱う内容が一覧化された（例えば「生命」分野は「生命の構造と機能」，「生物の多様性と共通性」，「生命の連続性」，「生物と環境の関わり」の４項目に分けられている．）そのため，日本の理科教育において扱う科学の知識はこれまでの学習指導要領に比べて整理されてきたと言える．この傾向をさらに促進するために，本研究では理科教育全体で扱う科学の知識に関して，より具体的な選択基準とし

て「自然現象のしくみ」（メカニズムと同義，以下，しくみで統一）を提案したい．なぜなら，増え続ける科学の知識を「しくみ」として連関させて扱うことができれば，第一に認知的な負荷の軽減に繋がる．また，しくみとして理解することで転移（ある文脈で学習したことを別の新しい文脈で活かすこと）も可能になり，意見を述べたり，問題解決をしたり，意思決定したりすることにも繋がり得ることから科学リテラシーの向上にも役立つと考えられるからである．

例えば，各細胞小器官のはたらきに関して，核はDNAが存在する場，リボソームはタンパク質合成の場，ゴルジ体は物質の分泌と一対一で覚えている場合，これらの知識は相互に連関していないため認知的負荷が大きいが，細胞内でのタンパク質の合成と運搬のしくみとしてそれらの細胞小器官のはたらきを相互に連関させれば認知的負荷は小さくなり，またDNAに変化が起こった場合に何が起こるのかを理解できるようになる．この理解はがんの理解につながり，タバコを吸うかや放射線治療を行うかといった意思決定に役立つことから，科学リテラシーの向上にも繋がると言える．

さらに，しくみを理解することは科学研究の基礎となっていることも忘れてはならない．そのため，しくみとして自然現象を教え，その重要性も伝えることは大切である．例えば，生物多様性の保全や病気の治療等においてはしくみを理解することで対処療法でなく根本的な治療が可能になることも少なくない．このように「しくみ」を扱うことは複数の重要性を有しているが，科学教育の文脈では科学の知識として「しくみ」を重視するという主張は明示的にはされてこなかった[2]．

なお，本研究で言う「しくみ」とは，そのしくみを理解することで同時に複数の「科学の知識」を理解することに繋がるものであり，そのしくみを理解することがその科学分野の他の単元の理解にも繋がるものほど優先度は高いと考える．例えば，生物分野では光合成が挙げられる．光合成は吸収した光エネルギーを利用してCO_2からグルコースが合成されるしくみであり，そのしくみを理解することで複数の科学の知識（複数の光合成色素，

酸化還元反応，ATP，複数の酵素，補酵素など）の理解に繋がり，また植物の分布，生活史，進化の理解にも繋がるからである．

生物学の知識は他の理科分野（物理，化学，地学）に比べて，近年，科学の知識が増大化する程度が甚だしく，特に科学の知識の精選が主張されてきた（例えば梅埜ら 1989，梅埜 1997）．つまり，しくみを教授の柱にするという先の提案は，理科教育の中でも生物教育（本稿では，理科教育における生物学の教育を生物教育と呼ぶ）において最も必要性が高いと言える．しかしながら，生物現象は極めて多様であり，生物現象のしくみといっても無数と呼べるほど多く，また扱うスケール（DNA，細胞，個体など）を変えればその数は変化し得るため，全てを教えようとするのは現実的に不可能である．そこで，多くの「科学の知識」を連関させるもの，その科学分野の他の単元の理解にも繋がるものという２点が生物教育において扱うべきしくみの選択の基準となる．

地球上のすべての生物は進化によって誕生したものであり，これからも進化し続ける．そのため「進化のしくみ」こそ最も教えるべき内容だと私は考える．そして進化のしくみは，生物学の知識の強力な接続装置であり，またその理解を転移させることで幅広い内容の理解へと繋がるという側面もある．なお，ここで言う進化のしくみとは，現代進化学の理論的支柱となっている自然選択と中立説であり（嶋田 2004，2007，Futuyma 2009），主に表現型レベルの進化は自然選択，分子レベルの進化は中立説によって説明可能である（詳細については後述．１－２参照）．これまでも生物教育では進化を教授内容の柱にすべきであるという議論が多数なされてきたが（Dobzhansky 1973，小林 2008，田幡・成田 2009），その議論の中では，進化のしくみよりも進化的な見方，つまりすべての生物は進化の産物であるという視点に重きが置かれていた．本稿では進化のしくみを教えることの重要性について主張したい．進化のしくみを教授することの利点は以下の２つである（図１－１）．１つに，進化は突然変異，自然選択，遺伝的浮動，種分化など非常に多くの段階からなるプロセスであるため，進化のしくみを理解することで，多くの生物学の基礎的な知識（DNA，

染色体，突然変異，中立，変異，適応度，自然選択，遺伝的浮動，小進化，地理的隔離，生殖隔離，生物学的種概念，種分化，大進化，分子時計，分類体系など）を連関させて理解するのに役立つ（Cummin et al. 1994, Schwendimann 2011）（図１－１①，詳細は後述．１－２参照）．２つに，ある生物における進化のしくみを理解し，それを転移させることができれば，生物の適応的変化や生物の多様化に関する理解が促進される（図１－１②）．福井・鶴岡（2002a）は日米での比較調査をもとに，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．そして，その捉え方には，垂直的側面（時間次元における適応的変化）と水平的側面（空間次元における多様化）の両面があり得る．」と述べている．つまり，自然選択と中立説の両方を理解し，その理解を転移させることができれば，分子レベルから種レベルといった複数の階層に見られる適応および多様性を統一的に捉えることが可能になるのである．

以上述べてきたように，進化のしくみを理解させることは大切であると考えられる．高等学校理科の新学習指導要領（文科省 2009）では進化が重視され，新科目「生物」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になった（１－３－１参照）．ところが，高等学校の生物の授業で利用できる進化のしくみに関する実験・実習がほとんど開発されておらず，実施もされていない（１－３－３参照）．多くの国々において進化のしくみに関しては複数のミス・コンセプションが存在することが明らかとなっており，ミス・コンセプションを科学的に正しい進化観へと変化させる実験・実習教材の開発が望まれている（１－４－２参照）．よって本研究では，その不備を改善すべく，教材を用いた授業実践とその教育効果の測定を通して，高等学校理科の新学習指導要領における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・実習教材を提案する．

註

[1] 本稿では，日本の初等中等教育における科学教育を理科教育とする．理科教育は物理教育，地学教育，化学教育，生物教育を含んでいる．

[2] その理由は定かではないが，教育で扱う内容に関して，単元（例えば細胞，遺伝）や用語（例えばバイオーム，適応度）単位でしか議論が行われてこなかったという印象はある．

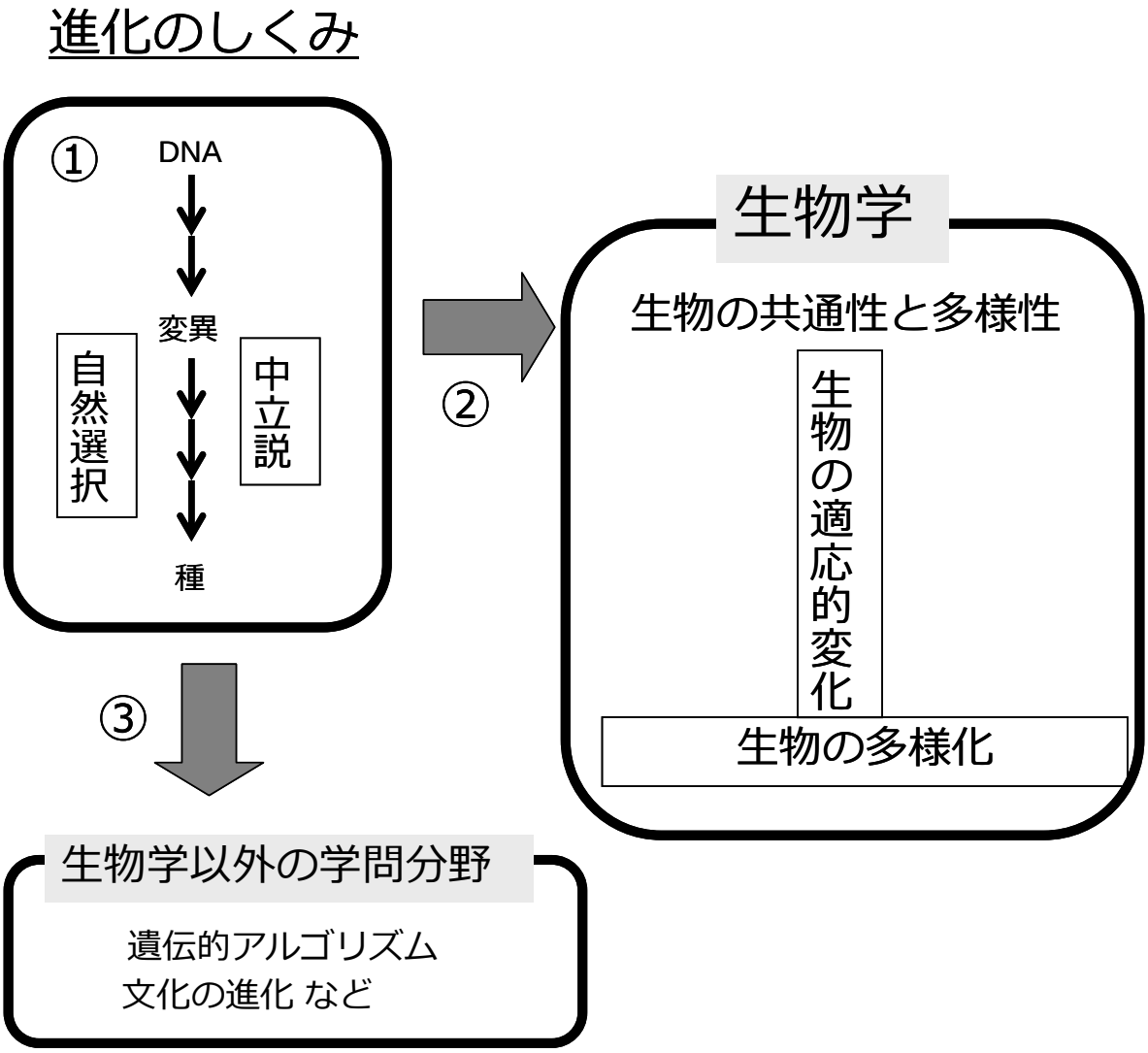


図1－1　進化のしくみを教える3つの意義（概念図）

①進化のしくみに関する多くの基礎的な知識を繋げて理解することができる，①を理解し転移させることができれば，②生物の適応的変化や生物の多様化への理解や③遺伝的アルゴリズムや文化の進化などへの理解に繋がる．③への転移に関しては４章参照．注）進化のしくみに関しては複雑なため省略したものを図示してある．

1-2　現代進化学における進化のしくみ

進化のしくみに関する実験・実習教材を提案するには現代進化学において進化のしくみがどのように説明されているかに関する情報が必要になる．そのため，ここでは進化学の教科書（Futuyma 2009）や大学一般教養レベルの生物の教科書（Campbell & Reece 2005）をもとに，現在支持されている進化のしくみ（図１－１①の詳細）について説明する．

進化は小進化と大進化の２つに分けて説明されることが多い．そのため以下では，まず小進化のしくみについて説明し，次いで大進化のしくみについて説明する．なお，小進化とは集団の対立遺伝子頻度の世代を経た変化，大進化とは種分化以上の進化を指す．

1-2-1　小進化のしくみ

小進化が起こる過程は，「変異の創出」と「選択」の２段階から成る（図１－２）．変異（variation）とは，同種の集団であっても、集団内に形質や分子の多様性があることを指す．例えば，集団内の個体どうしで体色が異なっていること（表現型レベルの変異），あるタンパク質を構成するアミノ酸の種類が異なっていること（分子レベルの変異）である．選択とは，この変異のうち特定のものが集団内で増えたり減ったりする過程である．

まず「変異の創出」であるが，これは個体で起こる突然変異（mutation）に起因している．突然変異は字義どおりに解釈すると突然の変化となるため，世間では体色の白いカエルが生まれるなど表現型レベルの大きな変化に限定して使われる傾向があるが，この理解は正確ではない（山野井・佐倉 2010）．突然変異とは，細胞分裂に先立って行われる DNA 複製（DNA のコピーを作る反応）の際の誤り（複製エラー）によって DNA の塩基配列が変化することである．

ここで，DNA 複製の際にどのように突然変異が生じるかについて，武村（2005）を参考に簡単に説明する．

まずDNA複製のしくみについて説明する．DNAは２本のヌクレオチド鎖の隣り合う塩基が逆向きに結合し，２重らせん構造をしている．DNA複製の際，この２本鎖はMCMヘリカーゼという酵素の働きによりほどかれ，DNAポリメラーゼαという酵素が複製開始点と呼ばれる複製反応の足場を作ったのち，それぞれの鎖は別々の酵素のはたらきによって複製される．２本の鎖のうちMCMヘリカーゼの進行方向と同じ方向（つまり５´→３´方向）に複製される鎖はリーディング鎖と呼ばれ，DNAポリメラーゼε（イプシロン）によって複製される．一方，MCMヘリカーゼの進行方向と逆方向（つまり３´→５´方向）に複製される鎖はラギング鎖と呼ばれ，DNAポリメラーゼδ（デルタ）によって複製される（リーディング鎖とラギング鎖とでは複製のしくみが大きく異なるが，本研究の内容を理解するうえでは必要ではないため，ここでは割愛する．詳しくは武村（2005）を参照されたい.）.

さて，これらの酵素の共同作業により DNAはかなり正確に複製されるものの，誤った塩基をペアリングしてしまうことが10万回に１回程度ある．リーディング鎖の複製反応を行うDNAポリメラーゼεとラギング鎖の複製反応を行うDNAポリメラーゼδには，そのような塩基のミス・ペアリングを修正するエキソヌクレアーゼ活性があるため多くのミスは修復され，それでも修復できない部分はMutSやMutLというタンパク質のはたらきによるミスマッチ修復機構により修復される．このように段階的に複数の修復機構がはたらくものの，ごく一部のミスは残ってしまい，DNAの塩基の変化，つまり突然変異となる．

また，DNAの塩基の変化は，紫外線や化学物質などの外的要因（例えば，タバコに含まれるベンツピレン）によっても生じる．これらのDNAの変化に関してもその多くは損傷乗り越え型DNAポリメラーゼ（DNAポリメラーゼη，κ，Rev1）のはたらきによって修復されるが，ごく一部のミスは残ってしまい，突然変異となる．

これまで述べてきたような種々の修復機構が働いた結果，突然変異が生じる割合はかなり小さいが，100億回に１回程度は生じてしまう．なお，突然変異には遺伝子レベルだけで

なく染色体レベルの突然変異もあり，染色体の本数が変化したり，構造が変化したりする．染色体レベルの突然変異では，DNA の配列が大きく変化することになる．

ここで，この突然変異の最大の特徴はランダム性にあることを強調しておきたい．つまり，突然変異は DNA 複製の際のミスであり，DNA のどの部分が変化するかはルーレットのようにランダムに決まるということである．この突然変異による DNA の変化は mRNA（DNA の配列の一部が転写，つまり写し取られることによって生じる分子）の変化，アミノ酸の変化（mRNA の配列はリボソームのはたらきにより翻訳されアミノ酸の情報へと変換される），タンパク質（アミノ酸がペプチド結合によって多数連なった分子）の構造の変化へとつながっていき，最終的には表現型の変化（例えば，色や形などの形質の変化）をもたらすこともある．一方で，DNA が変化してもアミノ酸が変化しない場合や，アミノ酸は変化するがタンパク質の構造は変化しない場合がある．このような DNA の変化を中立（neutral）と呼び，DNA の変化のほとんどは中立な変化であることが知られている（Kimura 1983）．上述してきたことをまとめると，個体で起こった突然変異による DNA の変化の結果，同種の集団内には表現型レベルと分子レベルの両方において変異（variation）が見られるということである．

続いて，集団内の変異の中から特定の変異を選抜する「選択」の過程であるが，自然選択（natural selection）と遺伝的浮動（genetic drift）の２つの過程がある（図１－２）．

まず自然選択について説明する．表現型レベルの変異のなかには，生存や繁殖に有利なものがあり，その変異（適応的な変異）を持った個体は持っていない個体に比べて多くの子を残す．これらの子は親から DNA を受け継いでいるので，その生存や繁殖に有利な表現型の情報が親の DNA に書き込まれていれば（その表現型に遺伝的基盤があるならば），子どもたちもその表現型を有することになり，その表現型を持っていない個体に比べて多くの子を残すことになる．この過程が繰り返されることにより，生存や繁殖に有利な遺伝形質が世代を経て集団内に増えていくことになる．この一連の過程を自然選択という．先述

したように変異創出の過程は突然変異に起因しているランダムな過程であるが，自然選択は生存や繁殖に有利な遺伝形質をもった個体を世代ごとに必ず増やしていく決定論的なプロセスである．

次に，遺伝的浮動について説明する．分子レベルの変異はその多くが中立なため，遺伝的浮動によって選抜される．遺伝的浮動とは自然選択とは異なり，特定の変異が偶然に増えたり減ったりする過程である．遺伝的浮動により，集団内のすべての個体が特定の中立な変異をもつようになったり（固定），特定の中立な変異をもつ個体が集団内からいなくなったりする．つまり，遺伝的浮動は運だめしのような過程であり，ラッキーな変異が集団内で増えていくことになる．なお，表現レベルの変異の中にも生存や繁殖に影響しないもの（例えば ABO 式血液型）は遺伝的浮動によって集団内で増えたり減ったり，場合によっては固定されたり消滅したりする．なお，分子レベルで見られる変異のほとんどは中立であり，集団中においてそのような中立な変異を持つ個体の割合は遺伝的浮動によって変化するという考え方は木村資生によって提唱され，分子進化の中立説と呼ばれている（Kimura 1983）．

このように自然選択や遺伝的浮動により小進化が起こる．小進化が起こるのにかかる時間は，その生物の世代時間に依存するが，細菌などの世代時間が短い生物であれば数日間でも起こりうる．脊椎動物でも早いものでは数年で小進化が起こった例（ガラパゴスフィンチのくちばし，グッピーの体色）が知られている．

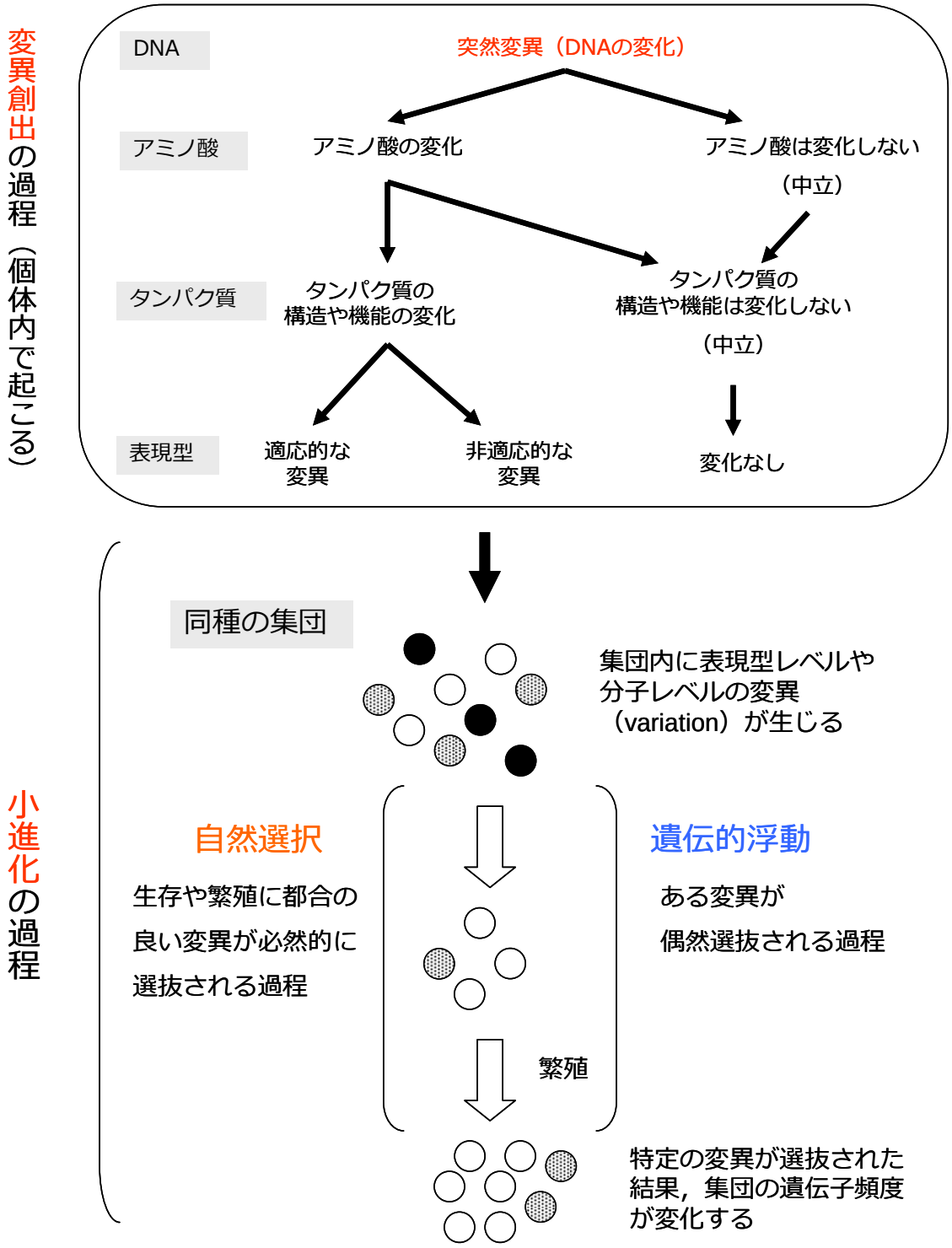


図1－2　小進化が起こる過程

1-2-2　大進化のしくみ

ここでは種分化のしくみについて説明する．種分化のしくみには地理的隔離を伴うもの（異所的種分化）と伴わないもの（同所的種分化）があるが，ここでは前者について説明する．地理的隔離とは同種のある集団が地理的な障壁（河川の形成など）によって遺伝的に交流できない，つまり移動し合うことができなくなることである（もちろん交配もできない)．オサムシなどの移動能力の乏しい生物では倒木などの少しの環境の変化が地理的障壁となることが知られている（例えば川那部・八尋 2008)．最近の進化学研究では，同所的か異所的かという地理的な基準よりも生態学的な要因や適応的な分化の関与の有無を基準として種分化の機構を考える傾向があるが（宮下ら 2012)，大学一般教養レベルの教科書や高校生物の教科書の多くでは地理的隔離を伴う種分化のしくみを中心に紹介されていることから，大学生や高校生にはまず地理的隔離による種分化のしくみを教えるのが良いと考えられていると言える．

地理的隔離により集団が分断されると，それぞれの集団が生息する環境は異なるので，異なる自然選択がはたらく（図１－３)．また，異なる遺伝的浮動がはたらく．つまり異なる小進化が集団間で起こることがある．その結果，フェロモンの化学的組成，求愛行動，交尾器の形など交配にかかわる形質が変化することがあり，たとえ地理的障壁が無くなったとしても交配しない（交配前隔離)，あるいは交尾しても子ができなくなる（交配後隔離)．種の定義は複数あるが現在最も広く使われている生物学的種概念では，交配して繁殖能力のある子孫を残せる個体どうしと定義されている．つまり，地理的障壁がなくなったとしても，交配しない，あるいは交配しても子ができなくなっていれば，それらの集団は別種へと種分化したことになる．

大進化が起こるのにかかる時間も小進化と同様に，その生物の世代時間に依存するが，細菌などの世代時間が短い生物であっても数十年（Blount et al. 2008)，脊椎動物では早くても数万年～数十万年（ビクトリア湖やタンガニイカ湖のシクリッド：岡田 2012)，一般には

数百万年はかかると考えられている．そのため，我々が生きているうちに種分化がおこるようすを目撃することはできないのである．

最後に，集団分化と中立変異の蓄積の関係について説明しておきたい．地理的隔離等を通して，集団が分かれ遺伝的交流が絶たれると，集団間には異なる中立変異が蓄積していることが分子進化の中立説から導かれる．つまり，集団が分かれてからの時間が経てば経つほど集団間の変異の差は大きくなる．例えば，ヘモグロビンというタンパク質を構成するα鎖のアミノ酸配列（アミノ酸数 141）を調べてみると，約 700～800 万年という比較的最近に起こった種分化により生じたヒトとチンパンジーは 141 のうち 1 つ程度しかアミノ酸が違わないが，チンパンジーとよりも系統的に離れているイヌとでは 141 のうち 23 程度のアミノ酸が異なっている．この分子にみられる中立変異を利用すれば，系統関係を復元することができ，分子情報をもとに描かれた系統樹は分子系統樹と呼ばれる．また，いくつかの分子（タンパク質・DNA）ではこの配列の時間的変化が一定の時間間隔で起こっているものがあり（例えばヘモグロビンのα鎖のアミノ酸配列は約 600 万年に 1 回の割合でアミノ酸の変化が起こる），その分子の性質を分子時計と呼ぶ．分子時計を利用すれば，化石記録に乏しい生物であっても，何年前にある種の祖先と分岐したのかを推定することができる．近年，DNA の増幅および配列解析の技術が向上したことにより生物の分子情報を得ることは容易になったため，多くの生物群において分子系統樹が描かれ，生物学にいつくもの革新をもたらしている（３－３参照）．そのため，分子進化の中立説の最大の功績は，分子系統樹の誕生を導いたことに有ると言っても過言ではないだろう．

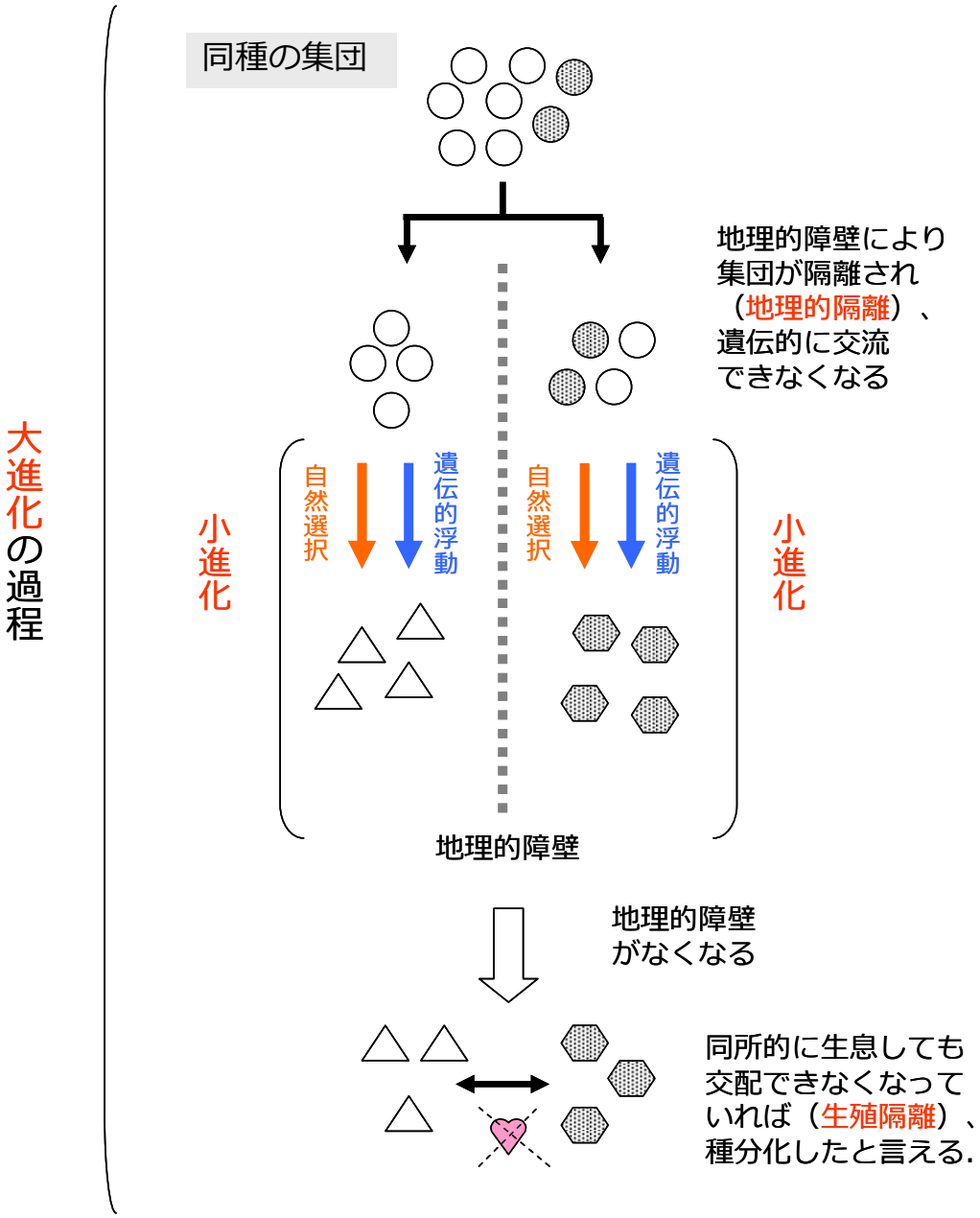


図1－3　大進化が起こる過程

1-2-3　進化のしくみに関する過去の諸説

自然選択による進化のしくみは，1859 年に出版されたダーウィン著「種の起源」において紹介され，その後多くの科学的知見によって補強され頑強性を増し，上述した内容へと

発展するに至った．ここでダーウィン以前の進化のしくみ関する諸説を３つ，簡単に紹介しておく．なぜなら，ダーウィン以前の進化のしくみ関する諸説は現在科学的には支持されていないが，進化に関する教授を行った後でさえも生徒や学生はこれらの説を用いて進化現象を説明する傾向があるからである．

まず１つめはラマルク説である．この説では，個体が生涯において良く使った器官は次世代において発達し，ほとんど使わなかった器官は痕跡的になるとする（用不用説）．つまり，個体の生涯における器官の使用の程度が遺伝するとしている（獲得形質の遺伝）．個体が生涯においてどれほど器官を使用しても，その程度は配偶子の遺伝子には影響しないことが分かっており（つまり獲得形質は遺伝しない），この説は棄却されている．

続いて自然神学（natural theology）を紹介する．この説はいわゆる創造論（１－４－２－１参照）であり，神が地球上の生物，自然界の繊細なバランスを創ったとする．この説では生物のもつ複雑な形・生理等は神の力があってこそ創られたとするが，それらは自然選択による適応によって説明可能であり，神の力がなくても進化によってその複雑さは生じ得る．

最後に，目的論的な進化（teleology）を紹介する．この説は生物自身の必要性（need）に合うように進化が起こるとする説である．つまり，生物の進化には目的があるとする．１－２－１で述べてきたように，進化の方向は，盲目的に起こる突然変異による変異の創出と，環境による選択（自然選択）と遺伝的浮動のバランスによって決まる機械論的なプロセスである．そのため，生物の進化に目的があるとするこの説は科学的に正しくない．

これらの説は直感的に理解しやすいため，多くの生徒や学生がそれらの説に類似した考えを有しており，実験・実習教材を提案するうえではそのような考えを科学的に正しいとされる考えに修正する必要がある（詳細については１－４－２，１－４－３参照）．

1-3　日本の進化教育の現状と変遷

1-3-1　新学習指導要領における進化教育

「文部科学省の理科離れ」（安斎ら 1996）と言われるように 1968 年告示の学習指導要領以降，小中学校の理科の授業時数は削減され続けてきた（八巻 2011）．しかしながら，2008 年の中教審答申では「教育内容の主な改善事項」の２番目に理数教育の充実が含まれ（１番目は各教科における言語活動の充実），その答申に基づき作られた新学習指導要領（小中学校 2008 年告示，高等学校 2009 年告示）では一転，理科の授業時数が増加することになった（小学校理科の授業時数は 350 時間から 405 時間（15.7％増），中学校理科の授業時数も 290 時間から 385 時間（32.8％増）に増えた）．これは，国際的な調査である PISA2006 や TIMSS2007 の結果，日本の理科教育における課題が浮き彫りとなったことが影響している．新学習指導要領の作成は，教育基本法の改正，続く学校教育法の改正を経たものであり，またその審議には３年間もの時間が費やされたことから（通常は２年間），理科教育重視の傾向は今後も続くと予想される．高等学校理科に関しては，科目選択の幅の狭さと偏りを改善する必要から自然科学の複数の領域を学び，基礎的な科学的素養を幅広く養う必要があるとし，物理・化学・生物・地学に基礎を付した科目が設けられた（鳩貝 2010）．

新学習指導要領では，生物教育においても画期的な見直しが行われた（見上 2010）．基礎を付した科目のうち「生物基礎」は，従来の「生物Ⅰ」と比べ科学リテラシーとしての役割を高める内容に大幅に見直され（八巻 2011），その中でも特筆すべき点は「進化」が重視されることである（成田・田幡 2009, 山野井・武村 2010）．中学校においても第２分野「（３）動物の生活と生物の変遷」の「エ　生物の変遷と進化」において，新たに進化に関する内容「現存の生物及び化石の比較などのを基に，現存の生物は過去の生物が変化して生じてきたものであることを体のつくりと関連させてとらえること.」を扱うことになったが（文科省 2008），進化の扱いはその単元のみであることから，その傾向は高等学校において顕著

といえる．高等学校理科の新科目「生物基礎（２単位)」では，まず「大項目（１）生物と遺伝子　内容の取扱い」において「生物は共通性を持ちながらも多様化してきたこと」を扱うとあり（文部科学省 2009)，教科書の冒頭で「地球上の多様な生物は単一の共通祖先から進化してきたものであるため，多様でありながらも共通性をもつ」と書かれている（東京書籍「生物基礎」より)．同様の内容が学習指導要領解説（文科省 2009）の新科目「生物（４単位)」の目標にも書かれていることから，高等学校の生物教育全体を通して，進化の視点を持って生物を見ていく姿勢が重視されているといえる．さらに，学習指導要領解説（文科省 2009）の「生物」の「大項目（５）生物の進化と系統」では「生物進化が突然変異，自然選択，遺伝的浮動などによって起こることを扱う．その際，適応と分子進化を扱うことが考えられる．また，分子時計の概念や，生命の維持に重要な遺伝情報ほど保存性が高いことを取り上げることも考えられる．種分化の過程については，空間的あるいは時間的隔離によって個体群間に遺伝的な変異が生じ種分化に至ることを扱う．また，適応放散，染色体の倍数化・異数化についても取り上げることが考えられる.」や「分類群としては，ドメインや界・門など高次の分類群を中心に扱う．その際，DNA の塩基配列などを比較することによって系統関係が調べられていることを取り上げることが考えられる.」とある．前回の学習指導要領解説（文部省 1999）では「大項目（２）生物の分類と進化」において「進化説については代表的なものを中心に扱うが，分子進化の仕組みについては平易に扱う.」,「細胞の構造，細胞の構成成分，形態，生殖，発生，遺伝子の構造など生物のもつ様々な特徴の比較から生物の系統関係が明らかになったことを具体的な例を示して探究的に扱うようにする.」とあることから，新学習指導要領では，進化のしくみは自然選択と中立説を中心に扱うことを明示していること，種分化の過程まで扱うこと，分子系統樹の扱いが重視されることなどが前回の学習指導要領（文部省 1999）と異なる大きな特徴といえる.「DNA」「分子進化」「分子時計」などの内容も含まれていることから，進化のしくみに関して，表現型や種などのマクロレベルの理解に留まることなく，DNA などのミクロな

レベルからも連関させて理解できることが求められている(嶋田 2010, 山野井・武村 2010)．前々回および前回の学習指導要領（文部省 1989，1999）に基づく高等学校の生物教育では，「生物Ⅰ（３単位)」では進化にほとんど触れず（矢島 1997，池田 2004)，「生物Ⅱ（３単位)」では，自然選択や中立説が，現在では科学的に誤っていることが自明な説（用不用説や突然変異説など）と並列に書かれているという状況にあることを考えると（嶋田 1997，山野井 2008)，今回の指導要領の改訂は日本の進化教育にとって大きな転換点であると言える．

1-3-2　日本の進化教育の変遷

日本の公教育における進化の扱いは歴史的に大きく変化してきた．しかしながら，これまで進化の扱いは細胞や発生などと比べて重視されたことはなく，そのことが進化の実験・実習教材が充実していないことの原因になっていると考えられる．そのため，本論の目的はその歴史を詳述することではないが，日本の進化教育の大まかな変遷を簡単に紹介したい.

1-3-2-1　ダーウィン進化論の日本への導入とその社会的影響

日本の進化教育の変遷の前に，日本にダーウィン進化論が導入た経緯と，その社会的な影響についてここでは述べる.

1859 年にダーウィンが「種の起源」を発表した後，進化論が日本で初めて紹介されたのは，1873 年～1876 年の期間に行われた東京医学校の外国人教師ヒルゲンドルフの博物学の講義においてであった（矢島 2001，2007)．しかしながら，その講義は進化論を一般へ普及させるほどではなかったようで（矢島 2001，2007，瀬戸口 2010)，1877 年に東京大学理学部初代動物学教授として招かれた E・S モースの講義や一般向けの講演会によって進化論は広く紹介された（村上 1965）[1]．モースは公開講演会をたびたび開いて進化論の啓蒙に力を注ぎ，その数年後には世間に浸透していった（村上 1965)．また，モースの弟子にあたる

石川千代松（東京大学理学部動物学助教授，のちに教授）がモースの 1878 年ごろの講義を筆記・和訳し『動物進化論』として 1883 年に出版したことも進化論の普及に影響している．

しかしながら，このモースや石川が紹介した進化論はダーウィンが提唱した進化論とは異なり，目的論的な進化（１－２－３参照）や社会進化論的要素を含んでいた（筑波 1965，村上 1965，瀬戸口 2010）．なお，社会進化論とは「個人・集団・国家の中で強者（最適者）が繁栄する一方，弱者（「不適の者」）は滅びてもやむをえないとする社会思想」を指す（亀田 2012）．このモースや石川による影響もあり，日本では進化論は生物学説というよりも社会思想の一種として普及した（村上 1965，瀬戸口 2010）．そして，この社会進化論の一般への普及には丘浅次郎や加藤弘之の著作も影響している．

丘浅次郎は昭和年代に至るまで読まれ続けた著書『進化論講話（1904）』において優生学的主張をし，特に最終章「進化論の思想界に及ぼす影響」では，人類の進化として日本の富国強兵策を支持するような生存競争，民族主義的な優勝劣敗の論陣を展開した（嶋田 2012）．例えば丘はその著書の中で『今日のところで必要なことは，競争を止めることではなく，むしろ自然淘汰の妨害になるような制度を改めて生存競争をなるべく公平ならしめることであろう．人種生存の点からいえば，脳力・健康ともに劣等なものを人為的に生存せしめて，人種全体の負担を重くするような仕組をなるべく減じ，脳力・健康ともに優等なものがいずれの方面にも必ず勝って働けるような制度をなるべく完全にして，個人間の競争の結果，人種全体が速やかに進歩する方法を取ることが最も必要である．かような世の中に生まれてきた人間は，ただ生存即競争と心得て，力のある限り競争に勝つことを心がけるよりほかに致し方はない.』や『若干の人種が，相対して生存する上は，各人種は，努めて自己の維持，繁栄を図らねばならぬが，他の人種に敗けぬだけの速度で進歩せねば，自己の維持，繁栄を望むことはできず，速やかに進歩するには個人の競争に依るの外はない．されば現在生存する人間は，敵である人種に滅ぼされるためには，味方同士の競争に依って常に進歩する覚悟が必要で，味方同士の競争を厭ふようなことでは，人種全体の進

歩が捗らぬために，敵である人種に敗けてしまふ』と述べている（丘 1904）．

1877 年に法，医，文，理の総合大学として発足した東京帝国大学の法学部初代総理となった加藤弘之は 1882 年に『人権新説』を出版し，その中で明治国家正当化のために社会進化論を利用した（村上 1965，佐倉 2012，矢島 2012）．加藤はその著書の中で『この社会が，進化論が自然界について語るのと同じように，優者が支配の地位につき，劣者はこれに従うという「優制劣従」の原理によって動いているのであり，すべての個人が平等な権利を有するという天賦人権論を，「妄想」として激しく攻撃した』（村上 1965）．加藤の著作の影響により，進化論は自然科学上の理論としてではなく，自然科学において自明と証明された真理として，あらゆる種類の主義主張を弁護する武器として使用され，世間が進化論やダーウィンに大きな関心を寄せることになった（村上 1965）．

現代でも一般市民は「適者生存」や「優勝劣敗」といった社会進化論がダーウィン進化論であるかのように誤解している傾向があるほどその影響は深刻なものであり，この社会進化論の万延は生物学としての進化学研究の発展の遅延（村上 1965, 瀬戸口 2010, 矢島 2012）や，中等生物教育における進化の取り扱いの軽視（嶋田 2012）につながっていると考えられる．

1-3-2-2　日本の公教育における進化の扱い

先述した E.・S モースによる紹介の後，進化論は初等中等教育（高等小学校：国語や理科[2]，中等学校：動物学や博物）において 1890 年代から教えられてきた（森 1971，板倉 1986，瀬戸口 2004）．だが，当時教えられていた進化論もやはり生存競争や適者生存といった社会進化論の色合いが強いものであった（森 1971，板倉 1986）．1911 年の「中学校令施行規則」の改訂に伴う教授要目の変更によって，動物学教科書で扱われていた進化論は「博物通論」の中に移され，さらに 1931 年からは「生物通論」で扱われるようになった（板倉 1986）．すると「博物通論」の多くの教科書において，ダーウィン進化論に関して懐疑的な語調が増えてくるようになる（森 1971，板倉 1986）．その後もその傾向は強まり[3]，戦中の 1943

年には文部省は高等学校の博物科では「進化学説には批判的検討を行うべし」という指示が出たり（瀬戸口 2004），1944 年発行の中等学校教科書の「生物」では進化の扱いに歯止めがかけられた（板倉 1986）

戦後，進化論の扱いは一変し，中等教育（高等学校を含む）ではダーウィン進化論を中心に進化が教えられるようになる（板倉 1986，瀬戸口 2004）．しかしながら，学習指導要領の改訂に伴う学習内容の精選により小学校では 1958 年から，中学校では 1968 年から進化を扱わないようになり，もっぱら高校で教えられることになった（板倉 1986）．

その後の高等学校理科の学習指導要領における進化の扱いは，選択化と内容の簡略化が加速していった（福井 2006）．1973～1984 年度は，進化は「生物Ⅱ」で扱われていた。選択科目ではあったが、実質的に全員が学習していた．1985～1993 年度は，進化は必修科目である「理科Ⅰ」で取り扱われていた．必修となった一方で、内容が簡略化された．1994～2002 年度，進化は「生物Ⅱ」で扱われていた．選択科目であったので，学習する生徒が大幅に減少した。また、内容は「理科Ⅰ」の時期に簡略化されたものが受け継がれていた。なお、高校「生物ⅠA」でも生物界の歴史的変遷については扱われたが、進化のしくみは扱われなかった。

2003 年度～2011 年度は，直前の学習指導要領と同様に、進化は選択科目である「生物Ⅱ」で扱われているが、進化を扱う「生物の分類と進化」は，生態学を扱う「生物の集団」と選択制である。我々の調査によると，生物Ⅱを履修した生徒のうち「生物の分類と進化 」を選択した生徒は 76.4％（進化のみ選択 4.6％＋両方を選択 71.9％）であり，鳩貝（2007）によると高校生物Ⅱの履修率は 18.3％ であることから，18.3%×76.4％＝約 14％の高校生しか進化を履修していないと考えられる．また，教科書の進化に関する記述をみると自然選択や中立説について書かれているものの，複数（４／６社）の教科書の自然選択に関する説明の中に「適者生存」や「生存競争」といった社会進化論の用語が依然として使われていた（山野井・佐倉 2010）．

以上のように，進化論は比較的早い段階で公教育に導入されてきたものの，進化教育が加速することはなく，衰退と回復が繰り返されるだけで重視されるには至らなかった．その理由として２つが挙げられる．１つは，先述したように，社会進化論の影響により進化論は科学ではなく思想として認識され，生物学そして生物教育において進化学の重要性が十分に認識されてこなかったことが挙げられる．例えば，福井・鶴岡（2002）は日本国内の生物教育に関する文献を調査したところ，進化の教授価値について真正面から論じた文献は少なかったことを報告している．２つめとして，アメリカでは創造論に対抗するために進化教育を充実させるという強力なモチベーションがあるが，日本では創造論を支持する割合が低いため，そういった力ははたらかないことも一因である（１―４－２参照）．そのため，生物教育における進化の重要性を認識し，日本の生物教育の改革を進めるオピニオン・リーダーの出現を待たなければならなかった．

1980 年代頃から，日本の生物教育において進化が重要視されない現状に対して，複数の教育者や研究者は危機感を表明してきた．比較的初期のものとして真船・鷹取（1981）がある．彼らはその著書『生物指導法事典』の中で，日本の生物教育において進化が重要視されないことに対する危機感を「現在の生物教育は，進化の概念をふまえて教材をあつかうようにはなっていない．したがって，「進化」を１つの単元で教えるにはどうするかという問題と，生物教材全体を進化の視点からどうあつかうかという問題を，早急に解決しなければならない.」と述べている．1990 年代後半からその動きは顕著になっていき，複数の教育者や研究者が集まり，『科学』『遺伝』『理科教室』等の理科教育を扱う雑誌において，進化教育の重要性を主張する特集号が組まれてきた（科学 1997 年１月号「進化をどう教えるか」，遺伝 1998 年３月号「生物教育と進化の学習」，理科教室 1999 年９月号「生物学習は進化で」，遺伝 2004 年７月号「進化をどのように教えるか」，理科教室 2006 年 11 月号「生物進化教育の課題と展望」）．また，日本進化学会等の学会において進化教育に関するシンポジウムも複数開催されてきた（2002 年日本動物行動学会東京大会「動物行動学と理科教

育：行動を教科書から消すな」，2003 年日本進化学会福岡大会「中学・高校でどのように進化をおしえるか」）．これらの特集号のやシンポジウム企画者となった研究者や教育者がオピニオン・リーダーとしてはたらき，その活動が功を奏した結果，一転して，新学習指導要領（文部科学省 2009）に基づく生物教育では進化が重視されることになったと考えられる（１－３－１参照）．

1-3-3　実験・実習教材の開発状況と実験・実習の実施率

本節では，学習指導要領においては進化が重視されてこなかったため（１－３－２），進化に関する実験・実習教材がほとんど開発されておらず，その実施率が低いという現状について述べる．

佐藤・大鹿（2005）は，過去 30～40 年に出版された国内外の生物教育系の学術雑誌（イギリス：*Journal of Biological Education*，アメリカ：*The American Biology Teacher*，日本：『生物教育』，『遺伝』）を対象に，進化に関する実験・実習教材の開発研究の状況を調査した．３カ国の結果を合計したところ，30～40 年間で 40 程度の研究が行われていたことを報告した[4]．

進化に関する実験・実習教材は，進化的な見方を扱うものと，自然選択などの進化のしくみを扱うものに大別される．佐藤・大鹿（2005）をもとに計算すると，後者の割合は，イギリス 3/5，アメリカ 13/18，日本 2/16 であり，国内で開発されてきた実験・実習教材は前者に比べて後者が少ないと言える．前者に関しては，植物の外部形態と生殖方法の進化（猪野 1968），動物の血球の観察方法と進化の考察（北浦 1984），X 線写真による動植物の相同器官の観察（小野 1985），仮説実験授業の指導書「足はなんぼん」（板倉 1970），カブラハバチの卵内の胚子の発生過程の観察（武藤・北野 1988），ヒトの進化を題材とした頭骨のペーパークラフト（北浦・濱脇 1990），歯列弓とヒトの進化（平田 1994），動物を題材とした足跡・手足の骨格の観察（三澤 1995），脊椎動物の呼吸器の形態と写真による学習（大

石・田幡 1998)，藻類やコケ植物などを材料にした薄層クロマトグラフィを用いた授業実践（畦 1998，2003）など多数の実験・実習教材が存在する．一方，後者に関しては，カナヘビとクロズキンバエの幼虫を用いて自然選択による体色の進化を確認する実験（小林 1998）や自然選択の指導法（中井 2004）などがあるだけであり，その数は極めて少ない．実際の生物を利用して進化の過程を理解させることは飼育設備の問題や，世代時間が短い生物を使ったとしてもとても長い時間がかかるなどの問題があるためとても難しい．しかしながら，　１－１で述べたように進化のしくみを教えることは重要であり，またその理解には多くの困難が伴うため（１－４－２参照)，理解を促進させる実験・実習教材の開発は急務であり，日本の生物教育の大きな課題となっていると言える．

実験・実習の実施率に関しても，生物系学部の大学１年生対象の調査（山野井 2012）によると，「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（表１-１）．また別の調査（生物教員対象）によると，比較的多くの教科書に掲載されている「ニワトリの手羽の観察（その骨格がヒトの手の骨格と似ていることから，ニワトリとヒトは共通祖先から進化してきたことを確認する実習）（塩川ら 2007 など)」でも「毎年実施する」と答えた割合は６％であり，「実施する年が多い」が６％，「実施しない年が多い」が 27%，「実施したことがない」が 61%であった（菊地ら 準備中)．このようにほとんど実験が行われていない理由として，進化は「生物Ⅱ」の後半で，つまり受験期が迫った時期に扱うため，実験の授業時間を確保できないことも挙げられるが，やはり実験・実習教材がほとんど開発されていないことも影響していると考えられる．ゆえに，本研究では，高校の現場で利用できる進化のしくみに関する実験・実習教材の提案に取り組んだ.

表1－1 高校生物Ⅱの各単元における実験実施頻度および平均実験回数

単元	実施頻度（%）	平均実験回数（回）	
		／実験実施者数	／全体
タンパク質と生物体の機能	34.3	2.3	0.7
遺伝情報とその発現	23.2	3.3	0.6
生物の分類と系統	11.6	3.0	0.3
生物の進化	12.7	2.6	0.3
個体群の構造と維持	11.6	2.6	0.3
生物群集と生態系	11.6	2.4	0.3

実施頻度は既習高校生（181名）のうち各単元で「実験を行った」と答えた生徒の割合である．平均実験回数は２つの値が示してあり，１つは，各単元で「実験を行った」と回答した生徒が平均して何回実験を行っていたか（／実験実施者数）であり，もう一方は既習高校生全体（181名）での平均値である（／全体）．つまり，「実験を行っていない」と回答した生徒数も含めて平均した値である．

補注

[1] この際，アメリカで見られたような宗教的反発はほとんど見られなかったとモースは述べている（板倉 1986，Sakura 1998）．

[2] 高等小学校の理科においても進化が扱われるようになったのは，国語に遅れて大正期に入ってからである（板倉 1986）．

[3] 板倉（1986）や瀬戸口（2004）はこの理由として，皇国史観（天孫降臨の神話を忠実に解釈し，天皇は天照大神の子孫であり，日本人も神の末裔と考える歴史観）が先鋭化してきたことを挙げている．

[4] 2008 年に刊行された *Evolution: Education & Outreach* 誌（アメリカ）には，多くの進化教材の開発が報告されており，教材は増加傾向にある．

1-4　進化のしくみに関する適切な実験・実習教材とは

進化のしくみに関する実験・実習教材が兼ね備えているべき要素として，まず，理科教材全般に求められる必要条件を満たしていること，現在の理科の実験・実習教材にみられる問題点を改善していることが挙げられる．また，理科の実験・実習には，探究的な要素やハンズ・オンの要素を含んでいることが望ましい．さらに，進化のしくみ（自然選択）に関してはアメリカを中心に多くのミス・コンセプション[1]が存在することが報告されているため（１－４－２参照)，進化のしくみに関する生徒の誤った既有知識を科学的な正しい知識へと変化させることができる実験・実習教材であることも期待される．以下では，それぞれの要素の詳細について述べていく．

1-4-1　理科の実験・実習教材に求められる条件

理科の教材に求められる必要条件として，教科書で学習した内容と強く関連している，原理が良く分かる，丈夫である，実験材料が安価である，実験準備が簡単である，季節に関係なく実施できるなどが挙げられる（井出 1988，梅埜 1992，西岡 1992）．これらのうち，後者の４つは教員側の都合によるものである．

次に，現在の理科の実験・実習教材の問題点として，生徒実験の結果は定性的（例えば，色の変化がある／ない，長い／短い，反応した／しない）なものが多く，定量的な結果をもとに考察するものは少ない（永田・田幡 1992，渡邊 2011）．永田・田幡（1992）は，1991 年度版の高等学校生物の教科書に掲載されている代表的な実験・実習を 10 種類抽出し，その測定項目について分析した結果，実験操作の中には定量的な要素を含んでいるが結果は定性的なものが多いことを報告している．このような分析を行った研究は以後見られないものの，高校生物の学習内容が多いことから短時間で実施可能な定性的な実験が好まれる傾向があるため，定量的な実験が少ない状況は 20 年後の現在でも変わらないと思われる（山

野井，私信）．そのため，現在の実験・実習教材では，科学的な判断をする際に不可欠な量的な感覚が身に付きにくいと考えられる．

その他の問題点として，分野横断的な教材が少なく各分野のつながりが理解しにくいことが挙げられる（森川 1964）．例えば，進化のしくみを理解するには，DNA といったミクロなレベルから種レベルまでのマクロな理解が必要となるため（１－２参照），分野間の関連が理解できるような実験・実習教材が望ましい．多くの高校生物や大学一般教養レベルの教科書では遺伝学の章と進化学の章が離れており，関連させるような記述となっていないことが日米の両方で報告されており（布山 2004，Nehm et al.2009），教科書の構成を見直すとともに，分野間の関連を理解させるような実験・実習教材の開発が求められている．

さらに，科学教材は探究的な要素を含んでいる方が教育効果は高いと考えられる（Derting & Ebert-May 2010）．その理由として，探究的な要素を含んでいない実験・実習，つまり教科書で習ったことを確認するだけの実験・実習はすでに結果が分かっておりモチベーションがあがりにくいことが挙げられる（西岡 1992）．日本でも探究の要素を含んだ理科教材は数多く開発されてきたが（村上 2005，2011 三好ら 2011，小池ら 2011），探究の要素を含んだ進化教材はほとんど開発されてこなかった（一方，アメリカを中心とする諸外国では探究の要素を含んだ進化のしくみに関する実験・実習教材が開発されており，その点については１－４－３で述べる）．佐藤・大鹿（2005）は，日本の進化教材（例えば，武藤・北野 1998 や畦 2003）の多くは研究者の専門領域の研究内容が前提にあり，それらを発展的に進化の単元の研究として繋げたものであり，進化を学習させることを前提に取り組んだものとは考えにくいと述べている．実際，高校生物Ⅱの教科書に掲載されている実験・実習は，「ニワトリの手羽先の解剖」のように，結果（ニワトリの前肢の骨格はヒトの手の骨格と似ている）を予め知ったうえでただそれを確認するために行うものであり，探究的な要素をほとんど含んでいない．このような現状を改善するために，探究の要素を含んだ進化のしくみを理解させる実験・実習教材を提案する必要がある．

実験・実習教材にはハンズ・オンの要素も含まれている方が望ましい．ハンズ・オンの定義は多様であるが，オヤオ・藤田（2008）は多くの定義の共通点として「生徒が科学概念を学ぶとき，教材や実物に直接触れることができる学習活動は，すべてハンズ・オン学習と呼ぶことができる」と述べており，本稿もこの定義に従った．ハンズ・オン学習の特徴としてコールトン（1998）は教材とのインタラクティビティを挙げており，ハンズ・オン教材を用いることで，学習者は手を動かすことにより自身で試して考え，発見するという能動的な心の動きを誘発すると述べている．つまり，ハンズ・オン教材は探究を促進するはたらきをもつと言える．そのため，ハンズ・オンの要素をただ取り入れれば良いというのではなく，探究を促進するための要素として取り入れなければ意味がない．Stohr-Hunt（1996）は，ハンズ・オン学習の頻度が高いほど科学的知識や科学的な考え方に関するテストの得点が高いことを報告しており，これはハンズ・オンの要素が探究を促進した結果と考えられる．

オヤオ・藤田（2008）は理科の実験・実習において，ハンズ・オン学習に探究の要素をどの程度加えるかについて Herron（1971）を紹介している．Herron（1971）は生徒が問題の作成，手順，解答にどの程度関わっているかによって，探究を４つのレベルに分けている．探究のレベルが低い順から，確認／検証，構造化された探究，導かれた探究，自由な探究となる．これらのうち，「確認／検証」は「生徒は記述された活動を通して原理を確認する．結果は前もって知らされている」ものであり，生徒の実習へのモチベーションは高まりにくいと考えられる．一方，「自由な探究」は「生徒はトピックに関連する，自分自身が定式化した問いを自分自身が設計し，選択した手順に従って探究するもの」であり，科学的な手続きを体験させるには理想的であるが，通常の授業内で行うには時間的に難しい．そのため，問いや手順は予め教師によって示されるが，結果に関しては前もって知らされていない「構造化された探究」の要素を取り入れたハンズ・オン学習が日本の高校の理科教育に適していると考えた．

以上より，本研究では（１）理科の教材に求められる必要条件（教科書で学習した内容と強く関連している，原理が良く分かる，丈夫である，実験材料が安価である，実験準備が簡単である，季節に関係なく実施できる教材）を満たし，（２）現在の日本の理科教材の問題点を克服し（生徒実験の結果が失敗／成功の二元論ではなく，DNA レベルから種レベルまでを接続する分野横断的な教材），（３）「構造化された探究」と「ハンズ・オン」の要素を取り入れた，進化のしくみを理解させる実験・実習教材を提案することを目指した．

1-4-2　ミス・コンセプションを考慮した教材

教授内容に関するミス・コンセプションを認識しておくことは，科学的に正しい理解へと導く教材開発を行うで不可欠である．これまでの科学教育研究は自然科学の幅広い分野において数多くのミス・コンセプションが存在することを明らかにしてきた（Reviewed in Vosniadou 2008）．そして，現在でも概念変化研究は科学教育研究の中心であり（湯澤・稲垣 2011），ミス・コンセプションの多様性とその成因，概念変化の方法等について研究が行われている．生物学の分野の中では生物と無生物の区別に関するミス・コンセプション（例えば，稲垣 2011）と進化に関するミス・コンセプションが数多く報告されてきた（例えば，Evans 2008）．

1-4-2-1　宗教（創造論）の影響

進化に関するミス・コンセプションは宗教への信仰の影響を受けているものとそうでないものに分類できる（Alters & Alters 2002, Alters 2005）．アメリカ，トルコ，韓国，フィリピンなどのいくつかの国では宗教（創造論）への信仰が進化のしくみの理解に影響を及ぼしており（Miller et al. 2006, Clores 2006, Park 2012），その影響はとても大きい．

特にアメリカでは創造論の影響が強いことが知られている．Miller et al.（2006）は「ヒトは過去に存在した動物から発達（進化）したというのは本当か[2]」という問いに対して，本当である（true）と回答したアメリカ人は 40%に過ぎず，残りの 60%は誤っている（false）

もしくは確かではない（not sure）と回答したを報告している． 彼らの調査は 34 カ国を対象とした大規模な調査であるが，アメリカ人の肯定率は 33 番目の低さである（34 番目はトルコ）．Mazur （2005）はキリスト教への信仰心の強さがアメリカ人の進化論への懐疑の強さを最も説明しており，教育の不足との相関は弱いものであったことを報告している．アメリカにおいて，創造論を公教育へ導入しようとする動きは 1920 年代から 1960 年代後半まで存在した公教育においてヒトの進化を扱うことを禁じた反進化論州法（バトラー法），1960 年代後半から 1980 年代に起こった創造科学（Creation Science）の公教育導入を図る授業時間均等化運動（1981 年アーカンソー州とルイジアナ州で進化論と創造論を等しい時間教えることを定めた州法が成立），1990 年代以降に誕生したインテリジェント・デザイン論（ID 論）を教える時間や進化論に反する科学的証拠を示す時間を作ることを公教育に求める運動など，絶滅することなく代わる代わる誕生しており，その影響は現在も続いている（佐倉・山野井 2010）．そのため，全米科学アカデミー（National Academy of Science）や全米科学教師協議会（National Science Teachers Association）などが進化の教授価値をまとめた出版物や声明を出したり[3]，ミス・コンセプションの研究やその改善を目指した教授法や実験・実習教材の開発も他国に比べて非常に活発に行われてきた（１－４－３参照）．アメリカの高校と日本の高校とは，教科書の使用義務がない，大学入試制度の違い等があるため，その教育法をそのまま日本に導入することは注意が必要であるが，日本の進化教育の改善に際して非常に参考になると思われる．

日本はアメリカ等の創造論の影響が強い国と比較して，生物が進化していることを否定的に捉える人々は少なく（Sakura 1998, Miller et al. 2006），宗教的な影響はほとんどないと考えられる．例えば，先に挙げた Miller et al.（2006）の調査において，日本人のヒトの進化の肯定率は約 80%であり，34 カ国中５番目に高い．宗教の影響をほとんど考慮しなくても良いため，日本は教材の教育効果を検出しやすいという利点があるかもしれない．しかしながら，前述したように社会進化論の影響（１－３－２）が根深く残っていることには注意

が必要である.

1-4-2-2　宗教（創造論）と関係しないミス・コンセプション

一方で，宗教の影響を除いても，進化のしくみ（自然選択）に関するミス・コンセプションは多数存在しており，Alters & Alters（2002），Alters（2005），Bardapurkar（2008），Evans（2008），Sinatra et al.（2008），Gregory（2009），Schwendimann（2011）等の多くの研究者によってレビューされている．研究者によってその分類法は若干異なるが概ね共通しており，代表的なものとして以下の９つが挙げられる[2]. ①生物の進化には目的がある（Teleology），②意図による進化（Anthropomorphism and Intentionality），③用不用説による進化，④獲得形質の遺伝（Soft Inheritance），⑤進化は個体におこるあるいは種を構成するすべての個体に起こる（Essentialism），⑥進化や科学の専門用語（適応度，適応，理論）の使い方が日常における使い方と異なることによる混乱，⑦自然が能動的に特定の変異を選択する，⑧すべての突然変異は有害である，⑨すべての突然変異は生存に有利な形質をもたらす．このうち，①と②は生物自身が必要性に応じた変化が起こることを「意図」しているかどうかに関して違いがあるが「目的論的な進化観」としてまとめることができ，先に挙げたレビューのすべてで指摘されている進化のしくみに関する代表的なミス・コンセプションである．もちろん自然選択による進化は，変異・変異に応じた適応度差・変異の遺伝という３つの条件が揃えば自律的に起こる機械論的なプロセスであり（嶋田 2007，１－２参照），生物自身の目的などは含まれていない.

なぜ自然選択に関連してこのように多くのミス・コンセプションが存在するのだろうか. Gregory（2009）は自然選択に関して多くのミス・コンセプションが存在する理由として宗教的な理由以外に以下のものを挙げている．進化以外のミス・コンセプション（例えば物理の力学分野の，物体にはたらいている力に関するミス・コンセプション）と同様に日常の経験からの直感的解釈と対立しているから，生物学の教育が足りておらず TV や映画，親等から誤った内容を受け取っているから，進化の歴史の受容を要求するから．また，

Gregory（2009）はこのようなミス・コンセプションを科学的に正しい進化観へと変化させる教授戦略として，自然選択の要素をひとつずつ概説するだけでは深い理解へと至らない事は確実であるものの，確実な解決策（深い理解をもたらす特別な教材）は見つかりにくいと述べている．特に目的論的な進化観は，こどもでその傾向が強いもの[4]（Kelemen 1999），高校を卒業した後でも有していることから（Kelemen & Rosset 2009），科学教育を通して科学的に正しい進化観へと置き換わることはなくせいぜい抑えられる程度であると言われてきた（Gregory 2009）．そのため，目的論的な進化観を科学的に正しい進化観へと変化させることができる教材の開発が必要と言える．

先述してきたように，自然選択に関するミス・コンセプションは多数報告されてきた一方で，分子進化やそのしくみである中立説に関するミス・コンセプションはほとんど報告されていない．分子進化に関する内容は，表現型レベルの現象に比べて，分子に起こる変異などミクロな内容であるためイメージすることが難しく，さらに中立な突然変異が遺伝的浮動により集団中に固定される過程などは確率論的な内容を含んでいるため，理解に困難を伴う可能性がある．さらに，もし目的論的な進化観やラマルク的な進化観などのミス・コンセプションを分子レベルの進化にも適用してしまう傾向があれば，中立な突然変異と遺伝的浮動を基盤とする中立説（１－２参照）を理解することは難しく，中立説と関連する分子系統樹の原理も理解することもできないだろう．いずれにせよ，まず手始めに分子進化やそのしくみである中立説に関して通常の授業では理解しにくい内容が存在するかどうかを確かめる必要がある．もし，誤理解（misunderstanding）の存在が明らかとなった場合は，それが特定のミス・コンセプションに基づくものなのかを解明するとともに，その誤理解を科学的に正しい進化観へと変化させることのできる実験・実習教材を検討する必要がある．

1-4-3　進化のしくみに関する教授法および実験・実習教材の開発状況

アメリカを中心に，自然選択に関する多くの教授法や実験・実習教材が開発されてきた．中立説に関しては，中立説そのものを扱ったものはほとんど開発されておらず，分子系統樹に関する実験・実習教材が複数開発されてきた．なお，ここでいう教授法とは，数コマ以内の短期間で利用することを意図した実験・実習教材とは異なり，１週間から１年間という長い期間に渡る教授計画の全体を指している．教授法は主に教育学者によって，実験・実習教材は主に高校生物教員や大学生物教員（進化学者を含む）によって開発されてきた．そのため，教授法の開発研究と実験実習教材の開発研究は独立に進んでいる傾向が強い．以下では，自然選択に関する教授法の開発状況，自然選択に関する実験・実習教材の開発状況，中立説（分子系統樹）に関する実験・実習教材の開発状況の順に説明していく．

1-4-3-1　自然選択に関する教授法の開発状況

自然選択に関する教授法は教育学者を中心に開発されてきたため，構成主義などの教育学の知見に基づいて研究が進んできた．例えば Posner らの概念変化理論（Posner et al. 1982）を利用しミス・コンセプションの修正を図っている．つまり，１．生徒や学生の既有概念（目的論的な進化観・ラマルク説等）をもとに考えさせる質問や課題を提示し，２．その既有概念ではその質問や課題に答えるには十分ではない，あるいは矛盾してしまうことを認識させる活動を行い，３．科学的に正しいとされる説（自然選択）を提示し，４．新たに提示された説の方が多くの課題を説明できることを実感させる活動を通して，概念変化へと導く（Alters 2005）．このような生徒や学生の既有概念に直接はたらきかける教授戦略を用いた結果，いつくかの教授法は生徒や学生のミス・コンセプションの修正に部分的に成功している．

ここで代表的な教授法の研究をいつくか紹介する．

Settlage（1994）は BSCS（the Biological Science Curriculum Study）によって開発されたカリキュラム *Evolution and Life on Earth* を用いた進化の授業が，生物を専攻する高校１～３年

生（50 名）の進化のしくみの理解に与える影響を調査した（このカリキュラムの詳細は記述されていない）．授業は生命科学を専門とするベテランの教師が担当した．教育効果は，授業前後にほぼ同一のテストを行い，その結果を比較することで行った．テストの内容は，実際の生物（チーターや洞窟にすむサンショウウオ）において起こった進化のしくみを自由記述形式で回答するものであり，記述内容は５つのカテゴリー（必要，用不用，適応，突然変異，変異，その他）に分類した．この６つのカテゴリーのうち「必要」と「用不用」はミス・コンセプションであり，それぞれ「必要」は目的論的な進化の要素（例えば，その形質はその動物自身の生存に必要であるために生じた）を含む記述に適用し，「用不用」はラマルクの用不用説の要素（例えば，その形質はその動物の運動の結果．子孫でも発達した）を含む記述に適用した（１－２－３参照）．なお，生徒の記述は複数のカテゴリーに分類される場合もあった．その結果，授業前は「必要」や「用不用」に分類される記述が全体の 50%以上を占めていたものの，授業後には「変異」「適応」が上位を占めていた．主要な変化は「必要」から「変異」（13 名／50 名），「用不用」→「変異」（11 名／50 名）であった．つまり，BSCS のカリキュラムを用いた授業によって目的論的な進化や用不用による進化といったミス・コンセプションが，変異や適応などの科学的に正しい進化観へと変化したと言える．しかしながら一方で，授業前も授業後も「必要」に留まった生徒が多く（８名／50 名），また授業によって「突然変異」カテゴリーへと変化する生徒は他のダーウィン進化的カテゴリー（変異，適応）に比べて少なかった（２名から９名へと変化）．以上から，目的論的な進化は修正できるもののその効果は限定的であること，自然選択の過程におけるランダムな突然変異の役割を理解させるのはとても難しいことを課題して挙げている．また，どのような教授が自然選択における突然変異の役割の理解に効果的かは分からないとしている．

Jensen & Finley（1996,1997）は大学１・２年生対象の生物学の講義（４クラス）において６日間，進化に関する講義コマ（50 分×６）を行った．４つのクラスでは講義方法が異な

り，講義内容に関しては伝統的なカリキュラムを利用クラスと科学史を用いたカリキュラム（historically rich curriculum）を利用するクラスがあり，教授方法に関しては講義形式を用いるクラスとペア問題解決学習（paird problem-solving）を用いるクラスがある．つまり，伝統的なカリキュラムを講義形式で扱うクラス，伝統的なカリキュラムをペア問題解決学習で行うクラス，科学史を用いたカリキュラムを講義形式で扱うクラス，科学史を用いたカリキュラムをペア問題解決学習で行うクラスの計４クラスである．伝統的なカリキュラムは進化の教科書的な内容であり，１日目と２日目は進化の証拠（発生学的および解剖学証拠，化石記録），ダーウィン理論（つまり自然選択）と遺伝的変異の重要性を扱い，３日目と４日目は自然選択の実例（オオシモフリエダシャクの工業暗化）を突然変異による変異の創出と選択の過程を強調しながら扱い，５日目と６日目は擬態の例をもとに適応を，そして性選択（オスとメスでは異なる自然選択がはたらく結果，異なる進化が見られること）を扱った．一方，科学史を用いたカリキュラムでは，１日目と２日目に進化の定義を確認してからダーウィン以前の３つの説（ラマルク説，自然神学，目的論的進化）を扱った．この内容は３つの段階からなる．１つめの段階は３つの説の概要の説明と，それらの説を用いた場合，動物園の動物の適応はどのように説明されるかを扱い，２つめの段階はこれらの３つの説に反する実験的証拠を扱い，３つめの段階はラマルク説や目的論的な進化の鍵となる表現（例　ラマルク説：ある世代に起こった改良が次世代に伝わる，目的論的進化：～するために進化）を扱う．３日目と４日目は，ダーウィン理論（つまり自然選択）を扱った．この際は，ダーウィンが自然選択の考えを着想するに至った経緯（マルサス，ライエル，スミス，ウォレスとの関係，医学学校での経験，ビーグル号での航海）を扱い，ダーウィンが１人の人間であることを強調した．また，１日目と２日目に利用した動物園の動物の適応の例をダーウィンの自然選択ではどのように説明されるかを扱った．さらにダーウィンの自然選択のカギとなる表現 （例　集団内に見られる変異，ランダムな突然変異に起因する変異，変異に応じた適応度差）を扱う．５日目と６日目は適応，適応度，突

然変異，性選択を扱った．また，再度，動物園の動物の適応がラマルク説，目的論的進化，ダーウィンの自然選択でどのように説明されるかを扱った．伝統的なカリキュラムと科学史を用いたカリキュラムの大きな違いは，ダーウィンの自然選択を扱うタイミングであり，伝統的なカリキュラムでは最初に扱うのに対して，科学史を用いたカリキュラムではダーウィン以前の説を扱った後にダーウィンの自然選択を扱っている．これは生徒や学生の既有概念はダーウィンの自然選択よりもダーウィン以前の説に似ていることを利用し（１－４－２参照），まず生徒の既有概念にはたらきかけてから科学的に正しいダーウィンの自然選択へと概念変化が起こるよう誘導していくという意図がある．続いて教授方法の違いに移る．講義形式とは OHP を使って説明を行い，学生は OHP の内容や口頭で説明した内容をノートに写すという形式である．一方，ペア問題解決学習とは，まず個人で問題を解き，その回答の類似性や相違点に関してパートナーと議論し，共通の回答を導き出すという形式である．この過程にかける時間は１回あたり２～５分程度であり，１コマの講義において２～３回含まれている．４つの講義の教育効果の評価は，講義前後に行った同一のテストの成績を比較することで行った．テストの内容は，３つの進化イベントを例に挙げ，そのしくみを自由記述形式で説明するものである．記述内容はダーウィン進化的要素，ダーウィン以前の説（ラマルク説・自然神学・目的論的進化）の要素のそれぞれについて得点化した．その結果，４クラスのうち講義後にダーウィン進化論的要素が最も増加し，ダーウィン以前の説の要素が最も減少したのは，科学史を用いたカリキュラムをペア問題解決学習で行ったクラスであった．しかしながら，目的論的な進化やラマルク説的な要素は減少したものの，ダーウィン進化論的要素のうち遺伝の要素，つまり DNA が次世代へと受け継がれていくことに関する理解はほとんど上昇しなかったことを報告した．

Nehm & Reilly（2007）は生物系の大学２年生 82 名を対象に，進化を軸とした 12 週間に亘る生物学の講義が学生の理解に与える影響を調査した．この講義は指導方法にも特徴があり，進化のしくみに関するミス・コンセプションの修正を目的とし，これまでの教授法

研究の知見の多くを統合させたものを利用した．具体的には，探究的な教授（Demastes et al. 1995），ペア問題解決学習（Jensen & Finley 1997），小グループでの議論（Scharmann 1993），科学史を用いたアプローチ（Jensen & Finley 1997），進化に関する諸説が提唱されるに至った経緯を扱うアプローチ（Passmore & Stewrt 2003）などを含んでいる．教育効果の評価は，伝統的な講義を受けた学生（100 名）とテストの成績を比較することで行った．伝統的な講義とは，全 12 週の講義において，進化を独立した単元として扱ったものである．テストの内容は６つから成り，１．自然選択の定義，２．自然選択の起こる条件，３～５．実際の生物（細菌，チーター，サンショウウオ）に起こった進化のしくみ，６．進化の速度を早めたい場合生物学者はどうしたらよいのかについて自由記述形式で回答するものである．回答はどれほど進化のしくみに関する主要な概念（突然変異，変異の遺伝，変異に応じた適応度差など）を含むか，ミス・コンセプション（目的論的進化，用不用説など）を含むかで得点化した（Natural selection performance quotient score : NSPQ を開発．この値は進化に関する主要な概念を含む程加点され，ミス・コンセプションを含む減点される）．その結果，この講義を受けた学生は伝統的な講義を受けた学生に比べて，その回答の中に進化に関する主要概念の多く使うようになり，またミス・コンセプションを含まないようになった（つまり NSPQ が上昇した）．しかしながら，この講義を受けた生物系の大学生であっても，その 70%が１つ以上のミス・コンセプションをその回答に含んでいることから，その効果は限定的であり，今後もこのような教授を継続していくことが必要であると結論付けている．彼らの教授法はこれまでの教授法研究の知見を総動員したものであるため，ミス・コンセプションの修正し，科学的に正しい進化観を効果的に理解させるには，実験・実習教材の導入など新たな戦略が必要となることを物語っている．

上述してきた教授法研究の結果から（表１－２参照），進化を教える際には生徒どうしあるいは生徒と教員が相互作用する方法を利用する，科学的な説明の方法を理解させる，ミス・コンセプションを積極的に利用することが効果的であると言われており（Nelson 2008），

これらの要素を含む教授法のいくつかは目的論的な進化観やラマルク的な進化観（用不用説・獲得形質の遺伝）を科学的に正しい進化観へと部分的に変容させることができたことを報告している（Settlage 1994，Jensen & Finely 1996，Nehm & Reilly 2007，Baumgarter & Duncan 2009，Buckberry & Silva 2012）．しかしながら一方で，複数の教授法研究において，DNA が次世代へと受け継がれていくことや（Jensen & Finley 1996, 1997，Baumgarter & Duncan 2009），突然変異のランダム性および突然変異による変異の創出と選択の過程の繋がりを理解させることは難しいという課題が挙げられている（Bishop & Anderson 1990, Settlage 1994，Alters & Nelson 2002，Baumgarter & Duncan 2009，Schwendimann 2011）．突然変異のランダム性は上述したような教授法でなく，サイコロやルーレットなどを利用したハンズ・オンの要素を含む実験・実習教材を用いた方が理解させやすい可能性がある．当然のことであるが，この突然変異による変異の創出と自然選択の繋がりを理解できなければ，DNA から生物多様性までの広範囲に及ぶ生物学の知識を連関させることのできる，進化のしくみの全体像（１－２参照）を理解することはできない．また，突然変異がランダムに起こることを理解させることは，創出される変異に目的はないことの理解に繋がる，つまり目的論的な進化観の改善にも有効にはたらくと考えられるため，とても重要である．ランダムな突然変異による変異の創出過程と選択の過程のつながりを効果的に理解させることができる実験・実習教材が教授法に加われば，Nehm & Reilly（2007）が示した現在の教授法の壁を乗り越えることができるかもしれない。

表1－2 自然選択の教授法に関する研究の概要

著者	国	対象	教授期間	教授法の特徴	扱っている内容				教育効果の検証	ミス・コンセプションの修正と課題
					突然変異による変異創出	自然選択	種分化	生物分類		
Bishop & Anderson (1990)	アメリカ	非生物系の大学生	1週間（10コマ）	ミス・コンセプションの修正や適切な科学概念の発達を意図した教材（実験実習，課題設定，スライド投影，プリント）を利用．	△	○	－	－	○	進化のしくみに関する理解が深まり、ミス・コンは改善したが，突然変異による変異創出と選択の過程のつながりを理解させるのは難しい．
Settlage (1994)	アメリカ	高校1～3年生	2ヶ月間	BSCSによって開発されたカリキュラムEvolution and Life on Earthを利用．	△	○	－	－	○	目的論的な進化や用不用による進化といったミス・コンセプションを修正．課題として，目的論的な進化は修正できるもののその効果は限定的，自然選択の過程におけるランダムな突然変異の役割を理解させるのはとても難しい．
Jensen & Finley (1996) Jensen & Finley (1997)	アメリカ	大学1・2年生	6日間（50分×6）	ダーウィン以前の説（ラマルク説，自然神学，目的論的進化）を扱ってからダーウィン進化論を教える．それぞれの説を使って実際の生物において起こった進化のしくみを説明する．ペア学習を取り入れる．	△	○	－	－	○	目的論的な進化やラマルク説的な要素は減少したが，DNAが次世代へと受け継がれていくことに関する理解はほとんど上昇しなかった．
Passmore & Stewart (2002)	アメリカ	高校生	9週間	ダーウィン以前の説（ラマルク説，自然神学，目的論的進化）の提唱された経緯を知った上で，その説を使って進化現象を説明する．その後でダーウィン進化論を扱い，自然選択で進化現象を説明する．	－	○	－	－	△	－
Nehm & Reilly (2007)	アメリカ	生物系大学2年生	12週間	進化を軸とした生物学の講義．探究的な教授，ペア問題解決学習，小グループでの議論，科学史を用いたアプローチ，進化に関する諸説が提唱されるに至った経緯を扱うアプローチなどを含む教授法を利用．	○	○	○	○	○	進化に関する主要概念の理解が深まり，またミス・コンセプションも修正（具体的にどのようなミス・コンセプションが修正されたか書かれていない）．しかしながら，その効果は限定的．
Baumgarter & Duncan (2009)	アメリカ	高校生	（5コマ以上）	その時限に扱う内容を前回および次回の内容と関連させることを意識．	○	○	○	○	○	ラマルク的なミス・コンセプションは修正されたが，遺伝に関する理解は改善されなかった．
Buckberry & Silva (2012)	オーストラリア	大学1年生	13週間	生物多様性を進化を使って教えるのではなく、生物多様性を使って進化を教える．先行研究を参考に多様な教授法を利用．	△	○	△	△	○	目的論的な進化観など全体的な理解が改善．しかし全体的な理解の改善は10％程度．

「教育効果の検証」に関して，○は行っている，△は行ったと書かれているが結果が掲載されていないを意味している．「扱っている内容」に関して，○は扱っている，△はおそらく扱っていると思われるが記載なし，－は記載なしを意味している．

1-4-3-2　自然選択に関する実験・実習教材の開発状況

自然選択に関する実験・実習教材の開発研究は教育学者ではなく高校の生物教員や生物学の講義を担当する大学教員によってなされてきたため，教授法の開発研究とは大きく異なり，生徒や学生の興味を惹くよう探究性を重視したもの，身近なものを使って簡便に利用できることを重視したものが多く，ミス・コンセプションの修正を意図したものは少ない．また，他の実験・実習教材の問題点を克服するために教材開発を行うというより実践報告の要素が強く，非常に多くの実験・実習教材が開発されてはいるものの，実験・実習教材の質が向上していく傾向はほとんど見られない．つまり，研究の上に研究が積み重なっていくというより，多くの研究が羅列的に進んでいる状況である．

進化が起こるには時間がかかり（１－２参照），通常の時間内でそのようすを観察することはとても難しいため，実際の生物を利用した実験・実習教材は少なく，トランプ，台所用品，お菓子など身近なものを生物個体，形質，遺伝子に見立て利用したものが多いのも特徴である．例えば，Welch（1993）は生徒が捕食者となり，芝生に撒かれた色とりどりの豆を捕食し，世代を経た豆色の割合の変化を記録することで自然選択による進化を実感する実習を開発した．Guerrierie（1999）はスプーンやトングなど台所用品を鳥のくちばしに見立て，マッシュルームやチョコレートなど様々な食品をついばむことで適応を学ぶ実習を開発した．Heim（2002）はトランプ 1 組 13 枚を生物に見立て，自然選択によって形質の値が累積的（cumulative）に変化する様子を理解させる教材を開発した．Lauer（2000）は Jelly Beans というお菓子を生物に見立て，生徒自らが捕食者となり，方向性選択，安定化選択，分断選択が起こるしくみを理解させる教材を開発した．Christensen-Dalsgaard & Kanneworff（2008）は Lego®を用いて架空生物を作り，その生物の移動距離を適応度の指標とすることで，生物の形態に自然選択による適応進化が起こるしくみを理解させる探究型の教材を開発した． Frey at al.（2011）はトランプのカードを対立遺伝子に見立て，遺伝率の違いによって形質値の世代を経た変化のようすが異なることを理解させる探究型の教材を開発した．

このように，身近なものを使って授業で利用しやすいよう工夫されていること，探究性を高めるためにハンズ・オンの要素を含んでいること，生徒が能動的に取り組めるような配慮がなされていることが特徴である．

先述したように進化が起こるには長い時間がかかるため，実際の生物を使った実験・実習教材はほとんど開発されていない．だが実際の生物を使った実験・実習教材には大きな魅力があるのも事実である．トランプ，台所用品，お菓子を生物に見立てた実験・実習教材ではそれらの教材で理解したしくみを，実際の生物における進化を考える際に転移させなければならないが，もちろん実際の生物を使った実験・実習教材ではその必要はなく，そのしくみで実際の生物に進化が起こっていることを，実感を伴って理解できるからである．ここで数少ない実際の生物を使った実験・実習教材を紹介する．Welden & Hossler（2003）は大腸菌 *E.coli* を抗生物質とともに培養すると，約 1 週間後にはその培地の中で生き残る大腸菌が出現すること，つまり抗生物質耐性が進化することを実感させる実験・実習を開発した．Green et al.（2011）は蛍光菌 *Pseudomonas fluorescens* SBW25 株から突然変異体 WS 株（Wrinkly Spreaders）が生じること，そして WS 株は SBW25 株とは異なる環境（air-liquid interface）で増加することから，適応進化や適応放散を理解させる実験教材を開発した．Heil et al.（2013）はショウジョウバエを用いて，白眼の集団に赤眼の個体を 1 個体導入すると，目の見える赤眼の個体の方が繁殖相手を見つけることができるため，２週間後には集団中の赤眼の個体が増えていくことを確認させる実験・実習教材を紹介している．このように，なるべく短期間で実施できるよう世代時間の短い細菌やショウジョウバエを利用するという工夫をしているが，それでも数日間はかかってしまう，さらに細菌やショウジョウバエの系代培養の設備が整っている必要があるなどの条件があるため，高校の教育現場で利用するにはいささかハードルが高いと言える．もし，身近な材料を使いつつも実際の生物に極めて類似した特徴を持った架空生物を利用することができれば理想的である．

このように実際の生物を利用したものや，身近なものを実際の生物に見立てて利用した

実験・実習教材が開発されてきたが，その多くは教育効果が調査されていないという問題点がある．教育効果を調査した数少ない研究として，先に紹介した Christensen-Dalsgaard & Kanneworff （2008）や Frey at al.（2011）があり，教材を用いた実習前後に同一のテストを行うことでその教育効果を調査している．しかしながら，Christensen-Dalsgaard & Kanneworff（2008）は７項目から成る選択式のテストにおいて，全体の得点が実習後に上昇したと報告しているものの，どの質問項目の正答率が実習後に上昇したかについて記述しておらず，またミス・コンセプションに関する質問項目は含まれていないため，実習がミス・コンセプションの修正に役立ったかどうかは定かではない．Frey at al.（2011）についても実習後にテストの得点が上昇したと報告しているものの，テストの内容に関する記載がないため，その実習が進化のしくみのどのような内容に関する理解に繋がったのかや，ミス・コンセプションの修正に役立ったかどうかに関しては分からない．

ここで *American Biology Teacher* 誌[6]を中心にこれまで開発されてきた実験･実習教材の問題点を整理したい（表１－３）．上述してきたように，教育効果が測定されていないものが多く，教授内容に関する理解やミス・コンセプションの修正にどれほど有効なのか不明であることが挙げられる．教育効果が測定されていないため定かではないが，生徒が能動的に活動できるよう探究性を高めることに力を注いだ結果，進化のしくみの理解というよりも単なるレクリエーション活動に陥ってしまっている危険性もある．また，実験・実習教材としての利便性を高めるために身近なものを利用しているが，トランプ，台所用品，お菓子でシミュレーションした内容が，実際の生物の進化を考える際に利用できるかどうか不明である．

さらに，前節において教授法の研究では目的論的な進化観を修正するには突然変異のランダム性や，ランダムな突然変異による変異の創出と選択の過程の繋がりを理解できるよう教授を行う必要があると考えられていると述べたが，開発されてきた実験・実習教材の多くが自然選択のみに焦点を当てており，その繋がりを理解できるような設計になってい

ないという点も挙げられる（表１－３）．色とりどりの豆（Welch 1993），スプーンやトングで見立てた鳥のくちばし（Guerrierie 1999），様々な色の Jelly Beans （Lauer 2000）のように開発されてきた実験・実習教材はすでに変異が創出されており，新たな変異が生じる過程を扱っていないのである．Young & Young（2003）によって開発された実習は，教師が描いた魚のイラストを学生が移す際に変異が生じ，教師によってその変異の中から特定の変異（体サイズが大きい等）が選択されるため，変異創出過程と自然選択を繋げて理解できるようになっている数少ない教材であるが（表１－３），DNA が変化して表現型が変化する過程は含まれておらず，その変異が DNA に起こった突然変異に起因していることを理解することは難しいと思われる．このように多くの実験・実習教材において，ランダムな突然変異による変異の創出と選択の過程の繋がりを理解できるような設計がなされていない理由は定かではないが，上述したように，教授法の開発は教育学者が中心，実験・実習教材の開発は高校生物教員や生物学者が中心というようにそれぞれ独立に行われてきた傾向があったため，教授法の開発研究の成果が実験・実習教材の開発研究に十分に反映されなかったのかもしれない．理由はどうであれ，目的論的な進化論の修正や，DNA から種分化までを連関させて進化のしくみ（１－２参照）を理解するには，突然変異による変異の創出と選択の過程を繋げて理解する必要があるため，その繋がりを意図した実験・実習教材を開発する必要がある．

もう一つ，自然選択と種分化の繋がりが理解できるように意図された教材もほとんどないことも挙げられる（表１－３）．進化のしくみに関する知識の連関，進化のしくみに関する理解の転移には，進化のしくみの全体像（１－２参照）を理解する必要がある．そのため，変異創出の過程と選択の過程と同様に，自然選択と種分化の過程の繋がりを理解できるよう意図された実験・実習教材が必要である．つまり，地理的隔離によって分断された集団間には異なる小進化が起こり種分化へと至る場合があるといった大進化のしくみを理解できるよう意図された教材開発が必要である．

表1－3 自然選択の実験・実習教材に関する研究の概要

著者	国	対象	所要時間	利用する生物あるいは生物に見立て利用するもの	扱っている内容			教育効果の検証
					突然変異による変異創出	自然選択（適応）	種分化	
Welch (1993)	アメリカ	高校生～大学生1・2年生	2時間	色とりどりの豆, フォーク, スプーン等	－	○	－	×
Dickinson (1998)	アメリカ	－	－	Yahtzee®	－	○	－	×
Guerrierie (1999)	アメリカ	中学生	－	沢山の台所用品	－	○	－	×
Lauer (2000)	アメリカ	-	10～15分	お菓子（Jelly Belly® jelly beans）	－	○	－	×
Heim (2002)	アメリカ	－	10分	トランプ	－	○	－	×
Staub (2002)	アメリカ	－	－	お菓子（M&M's®）	－	○	－	×
Welden & Hossler (2003)	アメリカ	－	6日間	大腸菌	△	○	－	×
Young & Young (2003)	アメリカ	大学生	1コマ	魚のイラスト	○	○	－	×
Vogt (2003)	アメリカ	－	－	トランプ	－	○	－	×
Christensen-Dalsgaard & Kanneworff (2008)	デンマーク	高校生～大学生	2時間	Lego®	－	○	－	○
Burton & Dobson (2009)	アメリカ	大学生	－	スプーン, フォーク, マシュマロ	－	○	－	×
Frey et al. (2010)	アメリカ	高校生～大学生	－	トランプ	－	○	－	×
Heitz et al. (2010)	アメリカ	大学生	1コマ	（WEB教材）	－	○	○	○
Jones & Laughlin (2010)	アメリカ	大学生	－	（PCシミュレーション）	－	○	－	×
Green et al. (2011)	イギリス	高校生～大学生	－	蛍光菌	△	○	－	×
Barber (2012)	アメリカ	高校生～大学生	3日間以上	粘土で作ったイモムシ	－	○	－	×
Russo & Voloch (2012)	ブラジル	高校生～大学生	－	ビーズ	－	○	－	×
Heil et al. (2013)	アメリカ	高校生	2週間以上	ショウジョウバエ	－	○	－	×

「扱っている内容」に関して，○は扱っている，△はおそらく扱っていると思われるが記載なし，
－は記載なしを意味している．

1-4-3-3　中立説に関する実験・実習教材の開発状況

中立説に関して教授法はほとんど開発されていない．実験・実習教材に関しては，中立説そのものを扱ったものはほとんど開発されてこなかったものの，分子系統樹に関する実験・実習教材は，高校の生物教員や生物学の講義を担当する大学教員によって複数開発されてきた．分子系統樹は今や生物学研究の必須ツールであり，生物学に多くの革新をもたらしてきたことから（１－２，３－３参照)，多くの国々の高校の生物の授業や大学の講義においても扱われており，実験・実習教材も必要とされているからである．しかしながら，これらの実験・実習教材は分子に見られる中立な変異を利用すれば系統関係を復元できることを理解させることを重視しており，その分子に見られる中立な変異がどのような過程を経て生じたのかに関しては扱っていない傾向がある．また，開発されてきた分子系統樹に関する実験・実習教材は，自然選択に関する実験・実習教材と同様に，他の実験・実習教材の問題点を克服するために教材開発を行うというより実践報告の要素が強く，多くの実験・実習教材が開発されてはいるものの，実験・実習教材の質が向上していく傾向はほとんど見られない．つまり，研究の上に研究が積み重なっていくというより，多くの研究が羅列的に進んでいる状況である．

これまで開発されてきた分子系統樹実習をいつくかを紹介する．生徒や学生の興味を惹く題材を用いた実習が多い傾向がある．Maier（2001）は，パンダと５種のクマの系統関係を写真を見て考え，NCBI のホームページからダウンロードしたリボソーム RNA の塩基配列を利用した分子系統樹を描くことで，その仮説を検証する高校生対象の探究型の実習を開発した．Cooper et al.（2006）は哺乳類７種の写真を見せて系統関係を学生に考えさせ，そのうちいくつかの系統樹をプロジェクターに移し問題点を指摘する，次に骨格，その次に DNA 塩基配列を使って同様の教授を行い，より多くのデータに支持される系統樹をクラス全体で考えていくという実習を開発した．Campo & Gracia-Vazquez（2008）は自分で選んだ分類群を対象に，近隣結合法，最尤法，最大節約法など複数の方法で分子系統樹を描き，

それらの樹形を形態形質をもとに描かれた系統樹や科学論文に掲載されている分子系統樹の樹形と比較し，その違いをどのように解釈するのかを考えさせるという大学院生対象の探究的な実習教材を開発した. Lents et al.（2010）は偽遺伝子の塩基配列, タンパク質（SCML1）のアミノ酸配列，染色体（４本）のバンドという３つの情報を利用して，ヒトを含む霊長類の系統関係を考えていく探究型のペア学習実習を開発した．Maroja & Wilder（2012）は自分のミトコンドリア DNA を抽出，PCR により増幅，配列解析し，その DNA 配列と NCBI のデータベースに登録されている世界各地のヒトのミトコンドリア DNA 配列を利用し，フリーソフト MEGA を用いて分子系統樹を描くことで人類の起源を推定する，また分子時計を利用してチンパンジーとヒト等の分岐年代を推定する生物系大学生用の実習を開発した. このように開発されてきた多くの実験・実習教材では，分子データだけでなく染色体，形態形質等の他のデータも利用して系統関係を類推し，複数のデータから支持される系統関係を導く活動を通して，歴史を扱う学問である進化学において，どのように科学的な判断をしていくのかを教えることを重要視していると言える.

探究性や科学的思考力の育成を重視した実験・実習教材が開発されてきたが，その多くは教育効果が調査されていないという問題点がある．上で紹介した Cooper et al.（2006）や Lents et al. （2010）は教育効果を測定した数少ない研究である．Cooper et al.（2006）は実習中に学生が描いた系統樹の樹形を評価するとともに，実習前後に系統に関する同一のテストを行い，開発した実験・実習の評価を行ったところ，系統に関する理解（すべての生物は単一の共通祖先に由来する，DNA 配列が似ているものほど近縁である等）が上昇したことを報告した．Lents et al.（2010）は開発した実習を行った学生とこれまで行われてきた伝統的な実習を行った生徒に，系統に関する理解や，進化とその理論（自然選択）の受容度に関するテストを行った結果，開発した実習を行った学生の方が系統に関する理解がやや深まり，進化やその理論を受容する度合いが上昇したことを報告した. しかしながら，これらの研究では教育効果は測定されているものの，そのテストの内容は系統に関したも

のであり，分子系統樹に関する実習が中立説や分子時計等の理解に影響するかどうかは明らかとなっていない．

ここでこれまで開発されてきた実験・実習教材の問題点を整理したい（表１－４）．上述したように複数の分子系統樹実習が開発されてきたが，その多くが形態形質から得られる情報と同様に，分子情報を利用しても系統関係を復元できることを理解させることを主な目的としており，ヒトや哺乳類等を扱い生徒の興味を惹くような工夫を凝らした探究性を有した実習教材ではあるものの，分子に見られる中立な変異がどのようなしくみで生じるのかを理解させた上で分子系統樹を扱うという教授は行っていないという問題点がある．つまり，なぜ分子に見られる中立な変異を系統関係の復元に利用できるのかについて，中立説と関連させた分子系統樹の実験・実習教材はほとんど開発されていない．進化のしくみの全体像（１－２参照）を理解させるには，中立説と分子系統樹を独立に教えるのではなく連関させて扱うことで，DNA レベルのミクロな理解と生物多様性といったマクロな理解を繋げる必要がある．

また，自然選択の実験・実習教材と同様に，その開発は教育学者ではなく高校の生物教員や生物学の講義を担当する大学教員によってなされてきたため，教授内容の理解よりも探究性や授業での扱いやすさが重視され，教育効果の検証を伴っていないものが多い．そのため，これらの実験・実習が生徒や学生の分子系統樹や関連する内容の理解にどれほど効果的かは分からないという問題点がある．さらに，いくつかの実験・実習教材では分子時計を利用した分岐年代の推定を含んでいるものの（表１－４），多くの実験・実習教材は分子系統樹を扱う際に分子時計，あるいは分類体系と連関させていないという問題点もある．中立説に関して通常の授業では理解しにくい内容が分かっていないため，そのような内容を理解させるよう意図された実習教材も開発されていない．そのため，中立説に関して通常の授業では理解しにくい内容を明らかにした上で，中立説，分子時計，分類体系と関連させた分子系統樹実習がその内容の理解を改善できるかどうかを調査する必要がある．

表1－4　分子系統樹の実験・実習教材に関する研究の概要

著者	国	対象	所要時間	系統樹関係の類推に用いるデータ	扱っている内容				教育効果の検証
					中立説	分子系統樹	分類体系	分子時計	
Maier (2001)	アメリカ	高校生	－	塩基配列	－	○	－	－	×
Singer et al. (2001)	アメリカ	大学生	－	形態, 生理, 行動, 生態, アミノ酸配列	－	○	－	－	×
Maier (2004)	アメリカ	高校生～大学生	90分	塩基配列	－	○	－	○	×
Parker et al. (2004)	アメリカ	高校生～大学生	2.5時間	生態, 繁殖形質, 塩基配列	－	○	－	－	×
Kalinowski et al. (2006)	アメリカ	大学生	6時間	頭蓋骨, 塩基配列	－	○	－	－	× (感想のみ)
Cooper et al. (2006)	アメリカ	大学生	－	全体的な形態, 骨格, 塩基配列	－	○	－	－	○
Campo & Gracia-Vazquez (2008)	スペイン	大学院生	30コマ	形態形質, 分子データ	－	○	－	－	×
Franklin (2010)	アメリカ	高校生～大学生	6時間以上	骨形態, アミノ酸配列, 頭蓋骨	－	○	－	－	×
Lents et al. (2010)	アメリカ	高校生～大学生	2.5時間	塩基配列, アミノ酸配列, 染色体の模様	－	○	－	－	○
Ondrej & Dvorak (2012)	チェコ	高校生～大学生	－	塩基配列	－	○	－	－	×
Zhang (2012)	アメリカ	大学生	6時間	アミノ酸配列, 形態	－	○	－	－	×
Maroja & Wilder (2012)	アメリカ	生物系大学生	4週間	自分のミトコンドリアDNAの塩基配列	－	○	－	○	× (感想のみ)

「扱っている内容」に関して，○は扱っている，△はおそらく扱っていると思われるが記載なし，
－は記載なしを意味している．

1-4-3-4　新たな実験・実習教材を提案する必要性

このように，自然選択および中立説に関する実験・実習教材には複数の問題点があるため，本研究ではこれらの問題点の多くを解決したものを新学習指導要領における生物教育で利用できる進化のしくみに関する実験・実習教材として提案したい.

まず，自然選択および中立説に関する実験・実習教材を提案する際に共通して言えることは，教材の教育効果を測定する必要があることと，ミス・コンセプションの修正や、通常授業では理解しにくい内容の理解を促進するよう設計をすることである.

新たに自然選択の実験・実習教材を提案する際には，教授法の開発研究における課題であったものの，実験・実習教材の開発には反映されてこなかった「突然変異による変異の創出」と「自然選択の繋がり」を理解できるよう意図したものである必要があり，その過程と種分化の過程を繋げて理解できるよう意図されたものである必要である．また，身近な材料を使いつつも実際の生物に類似した特徴の架空生物を利用することも大切である.

一方，新たに中立説の実験・実習教材を提案する際には，中立説との関連を意識した分子系統樹実習であること，分子時計や分類体系と連関させた分子系統樹実習であることが必要である.

1-5　本研究の目的

第１章においてこれまで述べてきたように，科学教育において進化のしくみを教えることは重要と考えられるものの（１－１），日本では社会進化論の影響等により進化教育が立ち遅れてしまっているため（１－３－２），進化のしくみに関する実験・実習教材開発がほとんど行われておらず，高校生物の授業においても実験・実習はほとんど行われていない（１－３－３）．この現状では「進化」重視へと大きく舵を切った新学習指導要領における生物教育（１－３－１）が立ち行かない状況に陥ってしまうのは自明である．新学習指導要領の理念が理念のまま終わってしまうことなく機能させるためには，その理念に則した実験・実習教材の提案が不可欠である．よって，本研究では，アメリカを中心に蓄積されてきた進化のしくみに関するミス・コンセプションの研究や実験・実習教材の開発研究を参考にしつつ（１－４），高等学校理科の新学習指導要領に基づく生物教育の理念に則した，進化のしくみ（自然選択・中立説）に関する実験・実習教材を，教材を用いた授業実践とその教育効果の測定を通して，提案することを目的とした．

１－４で述べてきたように，本研究において提案する，進化のしくみを理解させる実験・実習教材は下記の４つの条件を満たすものである．（１）理科の教材に求められる以下の必要条件，教科書で学習した内容と強く関連している，原理が良く分かる，丈夫である，実験材料が安価である，実験準備が簡単である，季節に関係なく実施できる，を満たしている教材．（２）現在の日本の理科教材の問題点を克服する教材，つまり生徒実験の結果が失敗／成功の二元論ではなく，また分子遺伝学，進化学，系統学を接続する分野横断的な教材．（３）ハンズ・オンの要素と「構造化された探究」の要素を取り入れた教材．（４）自然選択教材に関しては，ランダムな遺伝的なプロセスとランダムでない選択のプロセスを繋げることで，進化のしくみに関する代表的なミス・コンセプションである目的論的な進化観を科学的に正しい進化観へと変化させ得る教材，変異の創出過程から自然選択，種分

化の過程を繋げて理解できる教材．中立説に関しては，中立説との関連を意識した分子系統樹実習であること，分子時計や分類体系と連関させた分子系統樹実習であること．これらの自然選択や中立説に関する理解に加えて，ミス・コンセプションの修正や、通常授業では理解しにくい内容の理解を促進することを教材の教育効果の測定により確認した教材であること．

本研究では，先に挙げた（１）～（４）の条件を満たし得るものとして自然選択教材・オリガミバード（Westerling1992）と中立説教材・フリーソフト MEGA を利用した分子系統樹実習教材（Kuzoff et al. 2009）に注目した．これらの教材は（１）～（４）の条件を満たすことのできる貴重なものであり，他の実験・実習教材（表１－３，１－４）には見られない特徴を有している（詳細は２－１，３－１参照）．特に優れた点として，オリガミバードは突然変異による変異創出過程と選択の過程のつながりが理解できるよう設計されている点，Kuzoff et al.（2009）は PC を利用した分子系統樹作成の手順が詳説されている点が挙げられる．新学習指導要領に基づく生物教育の実施はすでに始まっており，その理念に則した進化のしくみに関する実験・実習教材を提案することは急務であるため，教材を一から開発するのではなくこれらの教材を一部変更することで，本研究の目的に合致した実験・実習教材を提案することにした．２章および３章では，まずこれらの教材の優れた特徴について説明する．続いて，通常の授業では理解しにくい内容に関する調査，さらにその内容を科学的に正しい進化観へと変化させるために行った教材の改良について述べていく．

補注

[1]　本研究ではこの言葉を誤概念，つまり学習者は科学理論や概念からすると誤った考え方を身につけているという意味合いで用いた．

[2] 創造論（創世記）においてヒトは神の姿に似せて造られた特別な存在とされているため，創造論者は特にヒトの進化は認めない傾向がある．

[3] 例えば，全米科学アカデミー（National Academy of Science）は『進化と科学の本質についての教育』という出版物（1998 年）において「生物進化は，我々を取り巻く世界についての最も根本的な特色の３つに対する原因を説明する．すなわち，生物間の類似，生物の多様性，我々が住んでいる物理的世界の多くの特色である．進化の点からのこれらの事象についての説明は，物理学，化学，地質学，生物学の多くの領域，および他の諸科学の成果を参考にする．このような進化は，生物学者が世界を説明するのに用いる中心的な組織化原理である．進化を説明することなしに生物学を教えることは，生物についての我々の理解に偉大な秩序と首尾一貫性をもたらす強力な概念を生徒から奪う」や「公立学校における進化の教授に反対する人たちは時に，教師たちが進化に反する証拠を提示することを求める．しかしながら，進化が起きたかどうかについての科学者共同体の中での論争は存在しないし，進化が起きなかったという証拠は存在しない．進化がどのように起きたかについての詳細の幾つかは，依然として研究されている．しかし，科学者たちは，進化に帰着する詳細なメカニズムを論争し続けているのに過ぎないのであって，生物の歴史についての説明としての進化の，全般的な正確さを論争しているのではない」と述べている（福井・鶴岡 2002 による訳を転載）．

[4]　この他に，ヒトの進化に関するミス・コンセプション（注：彼は Misconception ではなく Alternative idea を使用している）として，ヒトは特別なケースであり例外である（つまりヒトの進化は終わっている，ヒトは進化しないことになっている），ヒトはサルや類人猿の子孫である（著者注：ヒトはサルや類人猿と祖先を共有しているであり子孫ではない），ヒトは進化の最終結果であるを挙げている．また，科学の本質（Nature of Science）に関連するミス・コンセプションとして，進化は一つの理論にすぎない，進化は生命の起源を説明する，進化論は１つの信念の問いである，を挙げている．

[5]　特にこどもにおいて目的論的な進化観をもつ傾向が強い理由として以下が挙げられている（Evans 2008）．目的論的な考え方は，生物と無生物を区別するのに役立ち，ヒトの生

存率を上げる適応的な機能をもっていたので，その考えを進化のしくみに適用する傾向がこどもに強くみられるというものである．例えば，山腹から岩が落ちてきたときはそれを押したものを探すのに対し，ネコが同様に降りてきた時はその目的（ウサギを追っているのかあるいは捕食者に追われているのか）を考えるが，このような思考をすることでヒトが餌動物を捕獲することや捕食者から逃げるのに役立っていた可能性があると指摘されている．つまり，こどもは目的論的な考え方を生物の進化にも転移させているということである．

[6] *American Biology Teacher* 誌の自然選択に関する実験・実習教材の多くは How to do it というカテゴリに掲載されている．このカテゴリは教材を授業でどのように使うかに焦点を当てており，教育効果の評価を伴うことを求めていない．本文でも述べたように，自然選択に関する実験・実習教材の多くは *American Biology Teacher* 誌で発表されてきたものであるので，全体的にも教育効果を測定していないものが多数を占めている状況である．

2章　実験・実習教材の提案①

自然選択教材：オリガミバード

2-1　本章の目的

本章の目的は自然選択に関する実験・実習教材であるオリガミバードにいくつかの変更を加えることで，新学習指導要領における生物教育で利用可能な自然選択に関する実験・実習教材として提案することである．オリガミバードはアメリカの高校生物教員 Westerling（1992）によって開発された自然選択による進化のしくみに関する実験・実習教材である．生徒はこの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ランダムでない選択の過程を繋げて理解できるようデザインされている希有な教材である（詳細は２－３参照）．

ここで，オリガミバードは１－４－１で挙げた（１）～（４）の条件の多くを満たしていることを確認しておく（表２－１）．まず，（１）理科の教材の求められる必要条件に関して，オリガミバードは自然選択による進化のしくみを扱っているため「教科書の学習内容と関連」している．また，変異の創出と選択の過程が理解しやすいようにデザインされているため「原理が良く分かる」（２－３参照）．鳥個体は紙とストローでできているため「丈夫」さには欠けるかもしれないが，生徒が扱いにくいほどではなく実習の実施に支障はない．実験材料はすべて 100 円ショップで購入可能であり，１班当たり 500 円以下で準備可能であり，またストローや紙以外の多くの実験材料は複数回使用可能であるため「安価」である．工作に必要な材料を班ごとに揃えるだけなので「実験材料の準備は簡単」である．もちろん，架空生物を工作し室内で行う実習なので「季節に関係なく実施できる」．次に（２）日本の理科教育の問題点を克服に関して，この実習教材は各世代３個体の飛行距離のデータを集計し飛行距離の世代を経た変化を定量的に測定し進化の軌跡について考察するので「結果は成功／失敗の二元論ではない」．変異の創出はコイントスとサイコロを用いて行うが，この部分を DNA 配列が変化するよう改良すれば（２－３参照），DNA レベルと表現型レベルを連結させることができる，さらに選択の方向を複数設けることで種分

化へ繋げることができる．つまり「分野横断」的な教材と成り得る．（３）構造化された探究に関しては，工作や飛行実験を中心とする教材なので「ハンズ・オン」の要素は十分であり，世代を経た飛行距離の変化がどうなるかに関しては結果を事前に伝えていないので「探究」の要素も含んでいる．最後に（４）ミス・コンセプションの修正に関して，日本の高校生においても目的論的な進化観が保持されていることが明らかとなれば，変異の創出というランダムな過程と選択という非ランダムな過程を接続する教材なので，その修正にも効力を発揮する可能性はある．以上から，オリガミバードは日本の高校の授業において実施するのに適した実験・実習教材であると判断し，いくつかの変更を加えたうえで授業実践を行った（２－３参照）．

このようにオリガミバードは自然選択を理解するうえで有効な教材と考えられるが，山野井（2008，2010）を除いて，その教育効果の調査はなされてこなかった．山野井（2008，2010）による高校生対象の授業実践の詳細については２－３において述べるが，Westerling（1992）のオリジナルの実験書通りに，サイコロとコイントスを用いて突然変異による変異創出を扱った場合，突然変異と種分化を同義であると捉えてしまう傾向が強まり，さらに目的論的な進化観の改善にはほとんど影響しなかったことが報告されている．つまり，サイコロとコイントス以外の方法を用いて突然変異による変異創出過程を扱った方が良いと考えられる．そこで，本研究では突然変異による変異創出過程の扱い方に関して，変更を加えたうえで授業実践を行った（２－３参照）．

この章ではまず，自然選択に関して高校の授業にて進化の学習を終えた生徒であっても理解しにくい点を，高校卒業直後の大学１年生を対象とした質問紙調査により明らかにすることを目的とした（２－２）．続いてその内容の理解を改善できるよう，自然選択教材オリガミバードにいつくかの変更を加え，改変版プロトコルの教育効果を実習前後テストにより明らかにした（２－３）．さらに，種分化が起こるしくみまでを理解できるようコンピュータソフト「オリガミバード・シミュレータ」を新たに開発し，改変版プロトコルと

の併用効果を実習前後テストにより明らかにした（２－４）.

表2-1　自然選択教材オリガミバードの特徴

（1）理科の教材に求められる必要条件					
教科書の学習内容と関連	原理が良く分かる	丈夫	実験材料が安価	実験準備が簡単	季節に関係なく実施可能
○	○	△	○	△	○

（2）日本の理科教育の問題点を克服	
結果が失敗・成功の二元論でない	分野横断
○	△

（3）構造化された探究	
ハンズ・オン	探究
○	○

（4）ミス・コンセプションの修正
△

2-2　自然選択に関連するミス・コンセプション調査

2-2-1　はじめに

適応進化の主要なメカニズムである自然選択に関連するミス・コンセプションはアメリカを中心に数多く報告されており，中でも目的論的な進化観は概念変化させることが難しい（１－４－２参照）．高校の授業や大学の講義を通して進化を学習した後であってもこれらのミス・コンセプションが保持されていることから，通常の授業では概念変容させることが難しいと考えられており（Gregory 2009），その変容を目指した新しい教授法や教材の開発がアメリカを中心に行われてきた（１－４－３参照）．

しかしながら，日本では進化のしくみに関するミス・コンセプションを調査した研究は少なく，福井・鶴岡らによる研究を除くとほんど見当たらない．福井（2000）は進化学習後の高校生を対象に，進化のしくみの理解を問う質問紙調査を行った．その結果，進化学習後であってもラマルク的な考えを保持していることを明らかにした．なお，福井はラマルク的進化概念の諸側面を６つ（前進的進化観，環境に対する生物個体の反応としての進化，生物の必要に応じた変化としての進化，生物の能動的な変化としての進化，用不用説，獲得形質の遺伝）に分類している．また福井・鶴岡（2001）は，中学生（進化は学習していない）・高校生（進化を学習してない高校３年生）・大学生（このうち高校で進化を学習したのは 87 名中 22 名の 25.3%）に進化のしくみに関する４つの説（自然選択，用不用説，定向進化説，大突然変異説）を提示し，どの説がもっとも正しいと思うかを質問紙法によって調査した．その結果，大学生であっても自然選択を一貫して選んだのは 24%であり，中学生・高校生・大学生とも用不用説を一貫して支持した割合が 10%以上であったことを報告した．福井・鶴岡による一連の研究によって，児童から大学生に至るまで進化のしくみに関するミス・コンセプション（特にラマルク的な進化観）が存在することが明らかとなった．しかしながら一方で，目的論的な進化観を有しているかに関する質問項目はなか

ったため，その状況については分からない．また，進化学習前と進化学習後の比較調査は行われていないため，そのミス・コンセプションが進化の学習による影響を受けているのかどうかは明らかではない．

以上の理由から，本研究は，現行の高校生物Ⅱの授業によって進化を学習した高校生（以下，既習高校生）は，学習していない高校生（以下，未習高校生）と比べて，進化のしくみに関する理解（目的論的な進化観を含む）にどのような違いがあるのかを質問紙調査により明らかにすることを目的とした．この結果をもとに，どのような教材が必要なのかについて議論する．

2-2-2 方法

１　質問紙調査

（１）調査対象

既習高校生および未習高校生の進化に関する理解度を明らかにするために，生物系学部（一部，教育学部を含む）の大学１年生のうち，生物学関連の講義を受講する学生に対して行った．これは特定の高校で質問紙調査を行うより，様々な高校から集まった大学１年生の方が，高校生の正確な理解状況を明らかにできると考えたためである． 調査対象は以下の大学の１年生（計 219 名）である．

・国立 A 大学農学部，水産学部，医学部（保健学科），獣医学部　計 26 名（男８名・女 18 名）

・国立 B 大学農学部（生物生産科学科・資源生物科学科・地域環境科学科），工学部（生体機能分子科学科）計 102 名（男 46 名・女 53 名・不明３名）

・国立 C 大学教育学部（理科）計 7 名（男３名・女４名）

・公立 D 大学海洋生物資源学部（海洋生物資源学科）計 45 名（男 28 名・女 17 名）

・公立 E 大学理学部（生物科学科）計 39 名（男 26 名・女 12 名・不明１名）

（２）調査時期

質問紙調査は 2010 年 4 月～5 月上旬にかけて行った．

（３）質問紙

質問紙は山野井（2010）を利用した（資料２－１）．この質問紙は，進化に関するミス・コンセプションについて言及した複数の先行研究（Brumby 1984，Bishop & Anderson 1990，福井 2000，福井・ 鶴岡 2002，布山 2004，長谷川 2004）をもとに作成したものであり，自然選択や突然変異などの進化のしくみに関する基本的な概念を理解しているかと，目的論的な進化観（進化とは生物自身の目的に向かっていくことであるという考え[E5]），ラマルク的な進化観（進化とは単純から複雑への変化あるいは下等から高等への変化[E1, E2]， 用不用説による進化および獲得形質の遺伝[E10]），定向進化（進化とは種によって予め決まった方向に変化すること[E7]）などの進化に関する代表的なミス・コンセプションを有しているかを確認するものである．質問紙は，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○×式である．資料２－１に示した質問項目とは別に，①高校で生物Ⅱを履修したか，②履修した場合，「生物の分類と進化」と「生物の集団」のどちら，あるいは両方とも履修（選択）したかを調査した．②に関して，高等学校理科の学習指導要領（文部省 1999）では，生物Ⅱの「生物の分類と進化」と「生物の集団」は選択になっており．進化のしくみは「生物の分類と進化」で扱う．

資料2－1 調査に利用したアンケート

（ ）内に正解を示す.

＜進化の定義＞

E1 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 下等なものが高等なものへと，生物の集団が変化することである．（×）

E3 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．（○）

E4 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．（×）

E5 生物の集団の形質が目的に応じて変化することである．（×）

E6 生物の集団中で，異なる形質を持つ個体の割合が世代を通じて変化することである．（○）

E7 環境に関わりなく，種によってあらかじめ決まった方向に，生物の集団が変化していくことである．（×）

E8 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．（○）

E9 進化が起こるには，その生物の世代時間に関わらず，何万年もの期間が必要である．（×）

E10 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．（×）

E11 新しい種が生じて初めて進化が起きたと言える．（×）

E12 ヒトの盲腸や尾骨などの器官は現在はたらきを失っているが，この変化も進化の一例である．（○）

＜自然選択＞

N1 自然選択の過程には，同種の個体どうしの闘争（体を使って攻撃し合うこと）が必ず伴う．（×）

N2 自然選択の過程には，異なる種の間の弱肉強食の闘争（体を使って攻撃し合うこと）が必ず伴う．（×）

N3 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．（○）

N4 自然選択とは，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．（×）

N5 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．（×）

N6 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．（○）

N7 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．（×）

N8 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．（○）

N9 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．（○）

NA 以下の文①～④のうち，自然選択が起こるために必要な条件を過不足なく述べているものはどれか.

（ ）①・集団中において個体がもつ形質に差異がある.

（ ）②・集団中において個体がもつ形質に差異がある. ・さらにその差異が遺伝する.

（○）③・集団中において個体がもつ形質に差異がある. ・さらにその差異が遺伝する.
・形質の差異に応じて，個体が次世代に残す子どもの数が異なる.

（ ）④・集団中において個体がもつ形質に差異がある. ・さらにその差異が遺伝する.
・形質の差異に応じて，個体が次世代に残す子どもの数が異なる.
・頭の良い優秀な個体のみが生き残り，頭の良くない個体はすべて死ぬ.

＜突然変異＞

M1 配偶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 配偶子に生じる突然変異は，必ず子どもの生存に有利にはたらく．（×）

M3 突然変異は自然状態ではほとんど起こっていない．（×）

M4 突然変異によってどの遺伝子が変化するかは，あらかじめ決まっている．（×）

M5 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．（×）

M6 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．（○）

（４）調査手順

調査は生物学の講義を担当する大学教員に依頼し，講義時間内に実施した．調査の対象が特定の大学の学生に偏ることがないよう出来る限り多くの大学教員に協力を募った．なお, 調査を実施する前に以下の５点を学生に伝えた.「講義の成績には関係しないこと」,「中等教育段階でどのような進化教育が必要かを明らかにするという研究の一環で，調査を行うこと」,「大学名は公表しないこと」「所属および学年，履修状況等の記入漏れを注意すること」,「なるべく空欄を作らないよう回答欄内に○か×を書くこと．どうしても○か×を判断できない場合は空欄でも構わないこと」.

（５）分析方法

回答欄に○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／28 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．質問項目全体の正答率（28 問中何問正解したか）の比較は t 検定を利用し行った．質問項目（E1～E12, N1～NA，M1～6）ごとの正答率の比較はχ^2検定を利用して行った．統計解析はすべて統計ソフト（systat 8.0）を用いて行った.

2-2-3　結果

１　データの集計

調査結果をもとに，　高校生物Ⅱを履修し「生物の分類と進化」も履修（選択）した高校生を「既習高校生」，高校生物Ⅱは履修（選択）しなかった高校生，および高校生物Ⅱは履修したが「生物の分類と進化」を履修（選択）せず「生物の集団」を履修（選択）した高校生を「未習高校生」とした．つまり既習高校生と未習高校生の主な違いは「生物の分類と進化」を履修（選択）したかしなかったかの違いである．高校生物Ⅱの履修状況を記入していないもの，および回答欄に空欄が３つ以上あるものを除外した結果，既習高校生が 112 名（51%），未習高校生が 96 名（44%）となった．既習高校生のうち，「生物の分

類と進化」のみを選択した学生は 4.5%，「生物の集団」のみを選択した学生は 16.4%，両方とも選択した学生は 79.1%であった.

２　正答率の比較

質問項目全体および各項目の正答率を表２－２に示した.

表2－2 各質問項目の正答率の変化

		未習高校生		既習高校生
	人数	96		112
進化の定義	E1	0.35	**	0.54
	E2	0.49		0.55
	E3	0.60		0.55
	E4	0.71		0.76
	E5	0.16		0.22
	E6	0.56		0.48
	E7	0.89		0.88
	E8	0.36		0.40
	E9	0.45		0.55
	E10	0.29	***	0.57
	E11	0.82		0.84
	E12	0.70	*	0.83
自然選択	N1	0.51	***	0.74
	N2	0.31	***	0.57
	N3	0.77		0.81
	N4	0.66	***	0.84
	N5	0.65		0.54
	N6	0.95		0.97
	N7	0.79		0.72
	N8	0.65		0.57
	N9	0.80		0.82
	NA	0.51		0.48
突然変異	M1	0.89		0.92
	M2	0.84		0.89
	M3	0.75		0.74
	M4	0.94		0.96
	M5	0.47		0.60
	M6	0.88		0.91
全体		0.63		0.69

注）表中の数字は正答率（0~1）を示す.

＊は隣接するグループ間の正答率に有意な差が見られたことを示す

（＊p<0.05，＊＊p<0.01，＊＊＊p<0.001）.

質問項目全体の正答率に関して，未習高校生と既習高校生の正答率に統計的な差は見られたものの（t-test, p =0.001），その差は６％に過ぎなかった．質問項目ごとの正答率に関して，未習高校生と既習高校生の比較では６つの項目に有意な差が見られ（χ^2-test, p<0.05），すべて既習高校生の方が正答率は高かった（E1, E10, E12, N1, N2, N4）．この６つの項目のうち，E1（単純から複雑への一方向的な変化）と E10（用不用説による進化）はラマルク的な進化観を有しているかを確認する質問項目, E12 は退化を進化とみなしているかを確認する質問項目，N1, 2, 4 は自然選択の過程に必ずしも物理的な闘争は必要ないことを理解しているかを確認する質問項目である．また，既習高校生において正答率が 50%未満の質問項目が３つ見られた（E5，E6，E8，NA）．特に，進化を目的論的な過程と誤って認識している割合は高く，質問項目（E5）の正答率は 22%と低かった．

2-2-4　考察

本研究の結果から，日本の高等学校における生物Ⅱの進化の授業が，生徒の進化の理解に与える影響は小さいことが明らかとなった．なぜなら，質問項目全体の正答率は，未習高校生と既習高校生の質問項目全体の正答率の差はわずか６％であり（正答率；未習高校生 63%，既習高校生 69%），また多くの質問項目（22／28 項目）の正答率にも有意な差は見られなかったからである（表２－２）．

未習高校生に比べて既習高校生の方が，正答率が高かった質問項目から判断すると，学習指導要領（文部省 1999）に基づく進化教育は，１）ラマルク的な進化観（単純から複雑への進化，用不用説による進化）は誤りであること，２）退化も進化であること，３）自然選択の過程に必ずしも物理的な闘争は必要ないこと，を理解させることには成功していると言える．逆に，既習高校生と未習高校生で正答率に差が見られなかった質問項目（22 項目／28 項目）に関する内容はすべて，学習指導要領（文部省 1999）に基づく進化教育の課題と考えられる．その中でも特に，既習高校生であっても正答率が 50%未満の質問項目

（E5, E6, E8, NA）は，優先すべき大きな課題と言える．正答率が 50%未満の質問項目は，１）目的論的な進化観を有しているかを確認する項目，２）進化の定義に関する項目，３）小進化のタイムスケールに関する項目，４）自然選択による進化が起こる条件に関する質問項目である．実験・実習教材の提案を行う際には，これらの課題を克服するような対応が必要になり，特に正答率の低かった「目的論的な進化観」を改善するような教材の提案が急務である．

以上から高校生物Ⅱの授業を通して，進化は用不用によって起こるものではなく，また単純から複雑への変化とも限らないことは理解できているが，生物自身の目的に向かって変化していると考えていると言える．１－４－２でも述べたように，授業後であっても目的論的な進化観を有していることはアメリカの高校生や大学生でも報告されており，その改善を図る教材の開発は国際的にも求められている．次節では，目的論的な進化観の修正を目指し，自然選択教材オリガミバードに加えたいくつかの変更について述べていく．

2-3　自然選択教材・オリガミバードの改変

2-3-1　はじめに

自然選択は進化の過程において重要であるため，これまで進化教育に関する研究は多くの自然選択教材を開発してきた（１－４－３参照）．これらの教材に共通する特徴は，比較的短時間で，生徒自らが探究的に理解できるよう工夫がなされている点にあるだろう．しかしながら，多くの教材はその教育効果が測定されていないため（表１－３），目的論的な進化観などのミス・コンセプションの変容に有効かどうかは定かでない．前節において，日本の進化学習後の高校生であっても目的論的な進化観を有していることは明らかとなったが（２－２参照），日本の進化の教材開発に関する現状は米英より深刻であり，自然選択の実験・実習教材はほとんど開発されていない（１－３－３参照）．目的論的な進化観を科学的に正しいものへと変化させるためには，変異が創出されるランダムなプロセスと特定の変異が選択されるランダムでないプロセスを接続させた教材が有効であると考えられる（１－４－３参照）．Garvin-Doxas & Klymkowsky（2008）は，突然変異などのランダムなプロセスを多くの学生が理解しておらず，ミス・コンセプションへと繋がっている可能性について言及している．近年，進化生物学は分子生物学的な視点も取り込まれているため，進化教育の現代化（Hillis 2007）を図るためにも，また進化のしくみに関する知識を連関させるためにも，ランダムな DNA の塩基配列の変化と選択の過程を接続させた教材が求められるが，そのような教材は開発されていない．

よって本節では，自然選択教材オリガミバード（Westerling1992）において，ランダムな DNA の塩基配列の変化と選択の過程を繋げるなどのいくつかの変更を加えることで，目的論的な進化観を修正することと，分子レベルから自然選択を理解できるようになることを目的とした．変更を加えたプロトコルの日本の高校生に対する教育効果は，実習前テストと実習後テストの得点比較によって検証した．武村・山野井（2012）は生物教育における

架空生物の利用の展望において，どの分野で，どの架空生物を，どのように用いるかを検討することが重要であると述べている．進化分野において，実際の生物を利用した自然選択教材は系代飼育の困難さなどの問題があり，トランプ，台所用品，お菓子，おはじきなどを生物に見立てたモデル教材はその姿が生物とかけ離れているため生物現象との関連を想像しにくいという問題がある．その点，オリガミバードはおはじきやコインなどよりも生物に近い形をしており，なおかつ飛翔するという生物らしさを有しており，ランダムなDNA の塩基配列の変化と選択の過程を繋げるよう変更を加えることで，自然選択の理解に有効な架空生物教材となると考えた.

2-3-2　方法

1　Westerling（1992）によるオリガミバードのプロトコル

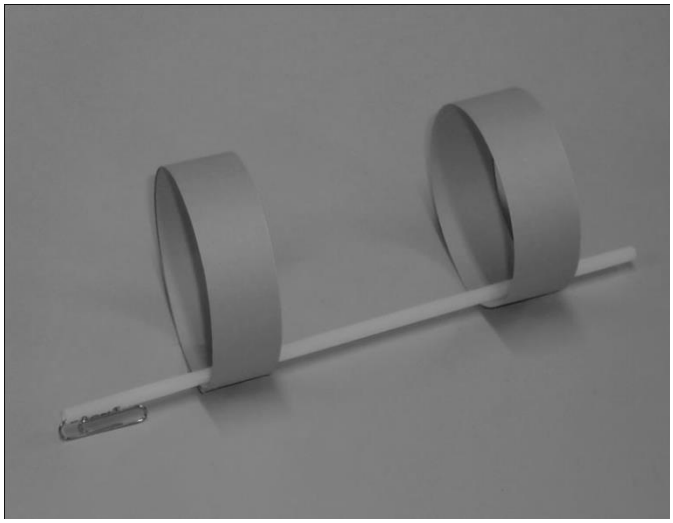


図2－1 架空生物オリガミバード

この鳥は，紙で作られた2つの輪状の羽（直径約7cm）とストローの本体（約18cm）から成る．Westerling (1992) はこの架空生物を「オリガミバード」と名付けたが，この架空生物を工作するには紙を丸めるだけであり，日本人が言うところの折り紙は必要ない．そのため，工作は簡単である.

オリガミバードは下記のような生態をもつとされている．この架空生物（図２－１）は北アフリカの乾燥地域に生息する．オアシス間の長い距離を飛ぶことのできる個体だけが繁殖するのに十分な期間生存できる．それぞれの個体は１回の産卵で３個の卵を産む．１つめの卵は突然変異による表現型の変化がなく（つまり親のクローン），残りの２つの卵にはヒナの形態に影響する突然変異が生じる．その形態の変化はしばしば飛翔距離の変化をもたらす．山野井（2010）は，前羽が小さく後羽が大きいというデザインは飛行距離が長いこと，前羽が大きく後羽が小さいものや両羽とも大きいものは飛行距離が短いことを報告した．

突然変異が表現型に与える影響はコイントスとサイコロによって決定される．具体的には，コイントスによりどの羽（前羽 or 後羽）が突然変異の影響を受けるかを決定し，サイコロによって突然変異が羽にどのような影響を与えるかを決定する（下記参照）．３個体のヒナのうち最も飛行距離が長かった個体のみが生存・繁殖する．なお，羽が落ちてしまう突然変異や，羽の円周の長さがストローの円周より小さくなる突然変異が生じた場合は致死するものとし，飛翔実験は行わないことになっている．

（1） 羽の位置がストローの端に1cm 移動する
（2） 羽の位置がストローの中央に1cm 移動する
（3） 羽の円周の長さが2cm 増加する
（4） 羽の円周の長さが2cm 減少する
（5） 羽の幅が1cm 増加する
（6）羽の幅が1cm 減少する

以上から，オリガミバードの適応進化は，実在する生物と同様に，突然変異による個体間の遺伝的な変異と環境による選択を要求していると分かる．なお，オリジナルのプロトコルの詳細は Westerling（1992）や Towle（1999）を参照されたい．

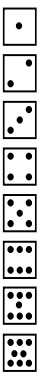
このように実在の生物と同様に自然選択による進化が起こること以外にも，オリガミバードは自然選択による進化を教えるのに有利な点を持っていると考えられる．具体的には，生徒にとって楽しい，実験的である，実習の必要な材料が入手しやすい，能動的な学習が可能である，実在の生物に類似した生態をもつ，突然変異のしくみの理解の導入に適しているなどである．しかしながら，そのような複数の利点が挙げられるものの，教科書への掲載（Towle 1999）や大学の講義での実践報告（Kalinowski et al. 2006）はあるものの，山野井（2008，2010）を除いて，オリガミバードの教育効果を検討した実証的な研究はされてこなかった．

２　変更版プロトコル

山野井（2008,2010）は高校生物Ⅱにおいて進化学習後の高校生を対象に，オリガミバードの授業実践を行った．授業実践前後に同一のテストを行うことで，その教育効果を検討した．その結果，オリガミバード実習は日本の進化学習後の高校生の「小進化のタイムスケール」や「自然選択の過程において物理的な闘争は必ずしも必要ないこと」に関する理解を上昇することを報告した．その一方で，実習後には「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（正答：×）」という質問項目の正答率が減少することも報告した．この実習を行うことで理解が改善する内容がある一方で，誤理解を誘発してしまう面もあることは大変大きな問題である．突然変異と種分化を同義と捉えていることに関しては，日本人は突然変異を突然の変化と字義通りに解釈し，種分化などの大きな変化とみなしてしまうことが原因として挙げられるが（山野井・佐倉 2010），突然変異を扱う教材である以上，その内容の理解を促進できることが求められる．また，突然変異はランダムな DNA の変化であるため（１－２－１），そのランダム性を理解できれば目的論的な進化観の改善につながると考えられるが，その改善にはほとんど影響しなかった（山野井 2010）． つまり，Westterling（1992）によるオリジナルの実験書を用いた授

業実践では突然変異の正しい理解が得られないといえる.

ではなぜ Westterling（1992）の実験書を用いた授業実践では突然変異の正しい理解が得られなかったのであろうか. 山野井（2010）の実践から１つの示唆が得られる. 山野井（2010）ではオリジナルの実験書に若干の変更を加え，６面体ではなく８面体のサイコロを利用し，サイコロの目が７と８が出た場合は「遺伝子は変化しているが，羽は変化しない」とした（下記参照）.



(1)　羽の位置がストローの端に 1cm 移動する
(2)　羽の位置がストローの中央に 1cm 移動する
(3)　羽の円周の長さが 2cm 増加する
(4)　羽の円周の長さが 2cm 減少する
(5)　羽の幅が 1cm 増加する
(6)　羽の幅が 1cm 減少する
(7)　遺伝子は変化しているが，羽は変化しない
(8)　遺伝子は変化しているが，羽は変化しない

サイコロの目１～６の内容に関してはオリジナルと同一であるが，サイコロの目７～８には「遺伝子」という言葉が加えられていることから，このサイコロを振るという過程が遺伝子を（ランダムに）変化させる過程であることを強調した表現になっているといえる. だがそれにも関わらず山野井（2010）の実践においても，実践後に突然変異と種分化を同義と捉えてしまう傾向が強まったこと，目的論的な進化観の改善には繋がらなかったことから，生徒にとって，この（コイントスと）サイコロを振るというランダムな過程が突然変異による DNA の変化の過程を意味していることが伝わりにくいと考えられる. つまり，コイントスやサイコロを用いて突然変異のランダム性を表すのではなく，より直接的に DNA を変化させていることを実感できるような設計が必要になるといえる. 生徒自らが DNA をランダムに変化させ，そのランダムな突然変異により変異が創出されることを理解することができれば突然変異と種分化を同義に捉えてしまうことはなく，また進化に目的

がないことも理解できるようになると期待される．そこで，本研究はコイントスとサイコロではなく配偶子突然変異 BOX を新たに開発・導入することにした．以下では，配偶子突然変異 BOX の開発・導入を中心とする改変内容について述べる．

配偶子突然変異ボックス：ランダムな DNA の変化が表現型の変化につながることを理解させるために，配偶子突然変異ボックス（Gametic mutation box，以下 GMB）を開発した．GMB（図２－２）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．

図2－2 配偶子突然変異ボックス（GMB）

写真のような結果である場合，DNAの上側の鎖の，変化し得る塩基のうち５番目の塩基（図中の矢印参照）がAからCに変化することになる．突然変異表（図２－３）を参照すると，このDNAの変化により羽の変化が起こり，前羽が小さく後羽が大きくなることが確認できる．

その後，生徒は突然変異表（図２－３）を用いて，この突然変異（ここでは１塩基置換のみを意味する）がどのような表現型の変化を起こすのかを確認する．

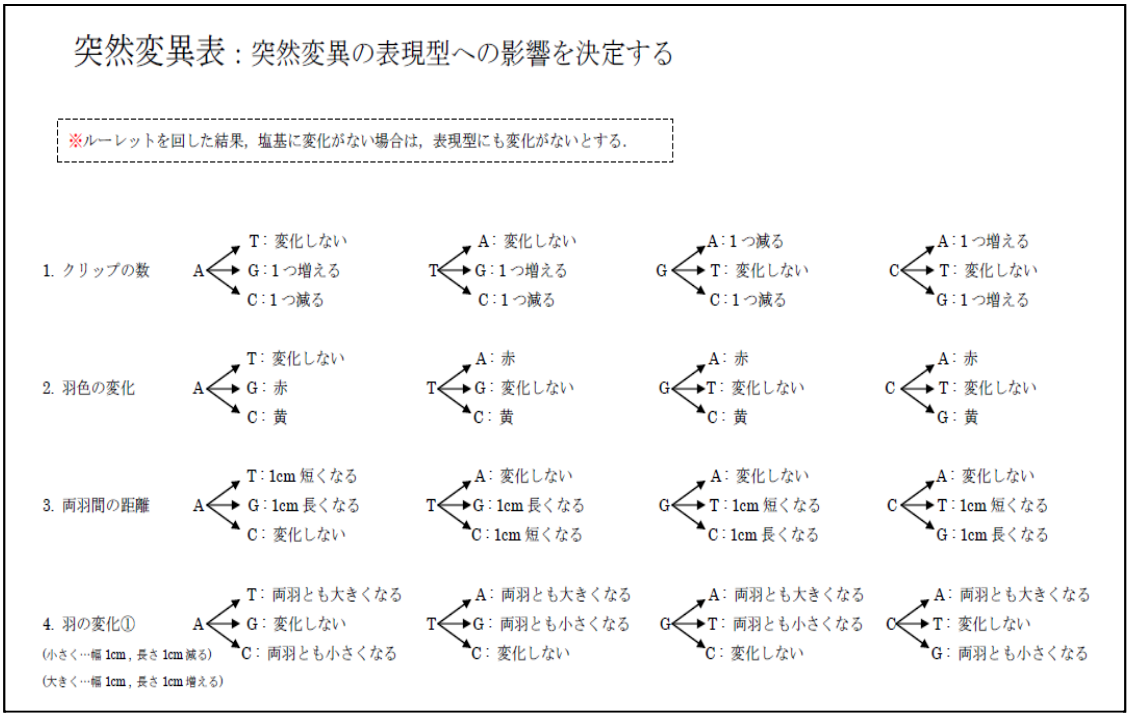


図2－3　突然変異表

GMBのルーレットにより塩基配列の変化を確認した後，
この表を見て，その１塩基置換が鳥の表現型に与える影響を決める．

突然変異表における表現型の変化の程度は山野井（2010）による飛行シミュレーション実験を参考にした．この実験では，６人が羽サイズ（前羽が小さく後羽が大きい個体，前羽が大きく後羽が小さい個体，両羽とも大きい個体，両羽とも小さい個体）や羽の位置（ストローの端から１～４cm）の異なる 16 種類の鳥を作り，飛行させ，飛行距離を測定した．それぞれの個体は３回ずつ飛行させ，それぞれの形態での平均飛行距離を計算した．この突然変異表では，オリジナルのプロトコル（Westerling 1992）よりも大きな表現型の変化が１回の突然変異によって起こるようにした．分子レベルでの突然変異の多くは中立，あるいは適応度にわずかな変化しか与えないことが知られているため（Futuyma 2009），突然変異表における１塩基置換による鳥形態および飛行距離の変化は，実際の生物での変化よりも大きいものとなっていると言える．これは，分子レベルの変化が表現型の変化に与える

影響を教える上では，表現型が大きく変化する方が効果的であると考えたためである．

なお，１－２－１で述べたように，突然変異が生じるしくみは複雑であるが，GMB では「突然変異はすべての塩基に対してランダムにおこり，それによって変異が生じることがある」ことを理解させることに焦点化したため，DNA 複製機構や修復機構をふまえて突然変異が生じる過程を扱うことはしなかった．

結果シート：突然変異による DNA の変化と表現型の変化の関係および，進化が世代を経ておこるようすを理解させるために，結果シート（山野井 2008）に変更を加えた（図２－４）．山野井（2008）の結果シート（図２－４a）は Westerling（1992）を翻訳したものである．変更を加えた結果シート（図２－４b）は，DNA が変化しながらも自然選択を通して次世代へと受け継がれていくことを理解しやすいように設計した. 生徒はこのシートに, GMB による「DNA の塩基配列の変化」，突然変異表を参照した「表現型の変化」，「飛行距離」の３点を記録した．

a)

世代	硬貨	突然変異による形質の変化			平均飛翔距離	硬貨	突然変異による形質の変化			平均飛翔距離	硬貨	突然変異による形質の変化			平均飛翔距離
親	表 ・ 裏（前）（後）	前羽	幅	cm	cm										
			円周	cm											
		後ろ羽	幅	cm											
			円周	cm											
		前羽の位置	前から	cm											
		後ろ羽の位置	後ろから	cm											
F_1	親と同じ					表（前）・裏（後）	前羽	幅	cm	cm	表（前）・裏（後）	前羽	幅	cm	cm
								円周	cm				円周	cm	
							後ろ羽	幅	cm			後ろ羽	幅	cm	
								円周	cm				円周	cm	
							前羽の位置	前から	cm			前羽の位置	前から	cm	
							後ろ羽の位置	後ろから	cm			後ろ羽の位置	後ろから	cm	
F_2	F_1（ 左 ・ 中央 ・ 右 ）と同じ					表（前）・裏（後）	前羽	幅	cm	cm	表（前）・裏（後）	前羽	幅	cm	cm
								円周	cm				円周	cm	
							後ろ羽	幅	cm			後ろ羽	幅	cm	
								円周	cm				円周	cm	
							前羽の位置	前から	cm			前羽の位置	前から	cm	
							後ろ羽の位置	後ろから	cm			後ろ羽の位置	後ろから	cm	

b)

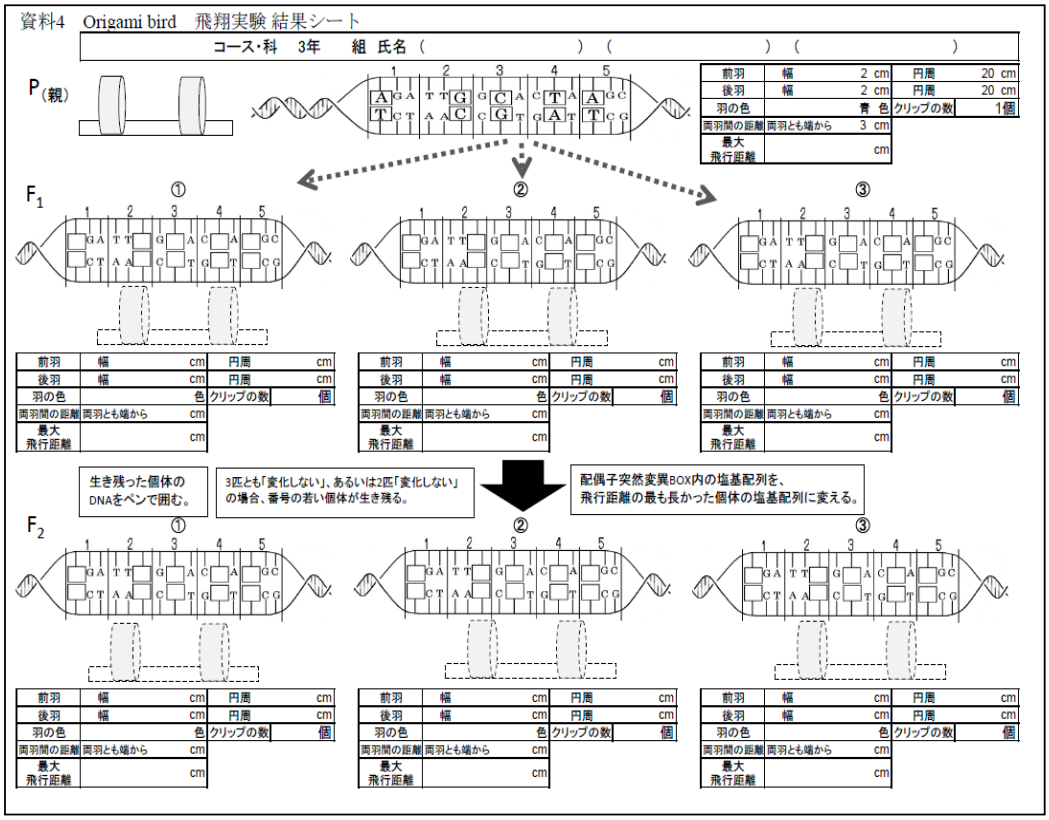


図2－4 結果シート

a) 山野井（2008）の結果シート．Westerling (1992) を翻訳したもの．
b) 変更を加えた結果シート．生徒は次の３つのデータ，GMBによる「DNA変化」，突然変異表に基づく「表現型の変化」，その鳥の「飛行距離」をこのシートに記録した．また，各世代において，３個体の子のうち最も飛行距離の長かった個体のDNA配列を丸で囲んだ．その次の世代は，その丸で囲んだDNA配列に突然変異が起こることになる．なお，生徒に配付したものは第４世代（F_4）まで記入できるようになっている．

中立変異の追加と親のクローンの子の廃止：Westerling (1992)によるオリジナルのプロトコルでは突然変異は必ず表現型の変化を起こすが，新しいプロトコルでは必ずしも DNA が変化すれば表現型も変化するわけではない（図２－３の「変化なし」参照）．また，新しいプロトコルでは，オリジナルのプロトコルのように子３個体のうち２個体ではなく，子３個体すべてに突然変異による DNA の変化が起こる．これは実際の生物では，配偶子形成の際に突然変異による DNA の変化は必ず起こることを反映させている（Futuyma 2009）．

自然選択による進化が起こる３つの条件に関するイラストを追加：自然選択による進化は，変異・遺伝・変異に応じた適応度差の３つの条件が揃えば自律的に起こる（嶋田 2007, Futuyma 2009）．山野井（2008）は，オリジナルのプロトコルを用いたオリガミバード実習後であっても，日本の進化学習後の高校生はこれらの条件を理解していなかったことを報告した．そのため，生徒用の実験書にオリガミバード実習はこの３つの条件を満たしていることを確認できるイラストを加えた（図２－５）．

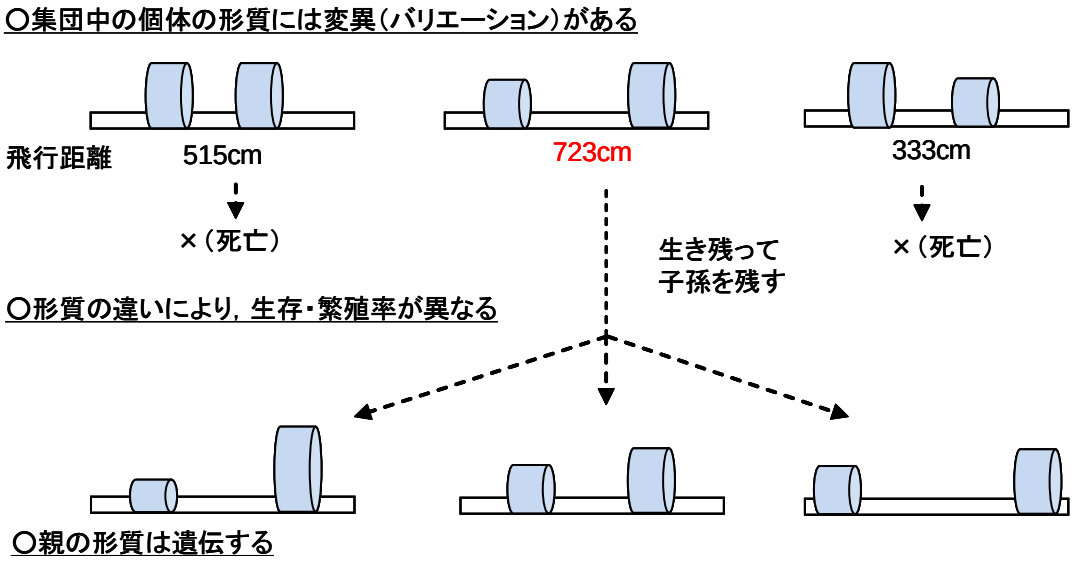


図2－5　自然選択による進化が起こる3つの条件を説明するイラスト

鳥の先端にクリップをつける：鳥の飛行を安定させるために，ストローの先端にクリップを１つ付けた（図２－１）．クリップの数は突然変異によって変化し得る（図４－３参照）．

オアシスの設置：オアシスを模したたらい（直径約 90cm，深さ 15cm）を飛行場の 10m 地点に設置した．この擬似オアシスを置くことにより，飛行実験を繰り返してもモチベーションを維持できると考えた．なお，オリガミバードの適応度は飛行距離によってのみ決まるので，オアシスに着陸するかしないかは適応度に影響しない．

３　生徒実習および事前事後テスト

2009 年，日本の私立 H 高校において生徒実験を行った．生徒は高校３年生の理系生物選択者（男子 19 名，女子 48 名，計 67 名）で，高校生物Ⅱの教科書を使用した進化の学習（自然選択，突然変異，小進化，大進化，生物学的種概念）を終えている．実習は２コマ（各 50 分）の授業（１日）で行った．実習前と実習後に進化の理解を確認する同一のテスト行った．なお，このテストは資料２－１と同一のものである．事前・事後テストの得点の比較は統計ソフト（systat 8.0）を用いて行った．

2-3-3　結果

１　事前事後テストの比較

テストの総得点（28 問中の正解数）は実習前より実習後の方が高く（Wilcoxon signed-rank test, pre-test average score = 0.67, post-test average score = 0.74; $df = 66$, $t = -5.421$, $p = 0.0001$），そのうち５人の生徒は実習後の得点の方が 30%以上高かった（図２－６）．一方で，少数（11 名／67 名中）であったものの，実習後に得点が低下する生徒も見られた．

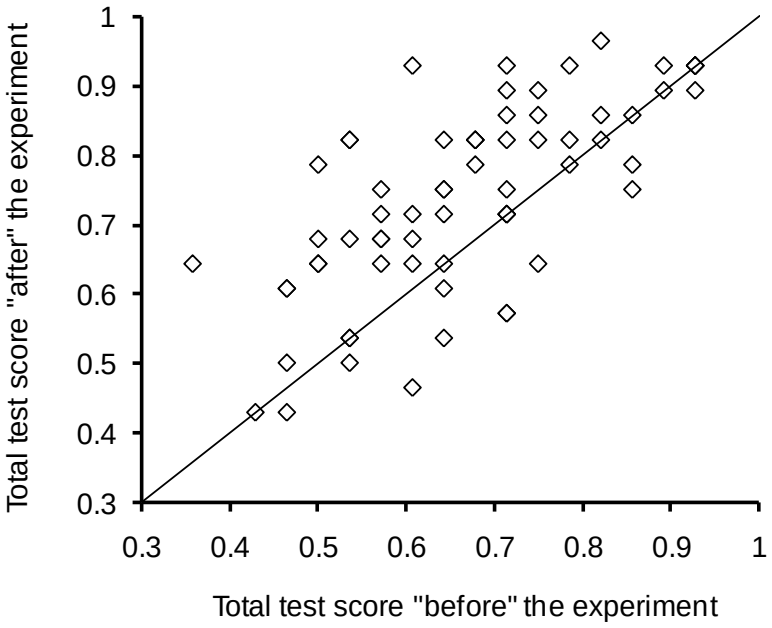
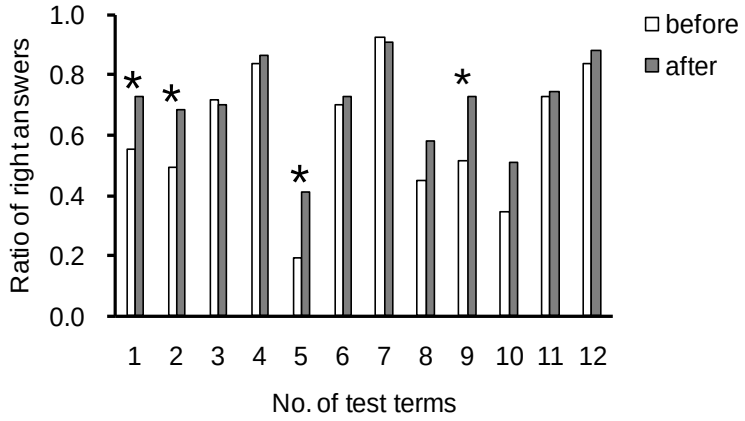


図2－6　実習前後テストの正答率の比較

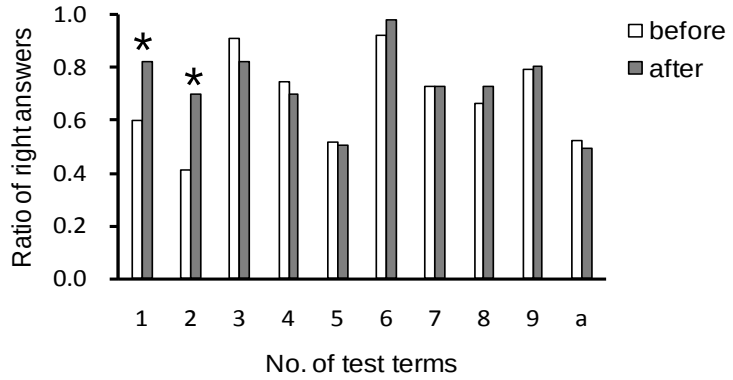
数値は正答率（28問中）を示す．直線はy=xを示しており，この直線よりも上部にある点は実習後の方が総得点が高かった生徒を表す．

さらに，実習前のテスト総得点の影響を知るために，生徒を事前テストの平均点に基づき上位群（>0.67）と下位群（<0.67）に分けて解析を行った．両群において実習後テストの方が総得点は高かった（Wilcoxon signed-rank test, higher: n = 34, z = 2.382, p = 0.017; lower: n = 33, z = 3.842, p = 0.0001）．質問項目ごとの正答率の変化をχ^2検定により比較したところ，７つの質問項目において実習後の正答率の方が高く（図２－７），それらの中には，目的論的な進化観の改善に関する質問項目（「進化の定義」⑤），進化は下等から高等への変化あるい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，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（「突然変異」⑤）が含まれていた．一方で，実習後の方が正答率が低い質問項目は見られなかった（図２－７）．

a) 進化の定義



b) 自然選択



c) 突然変異

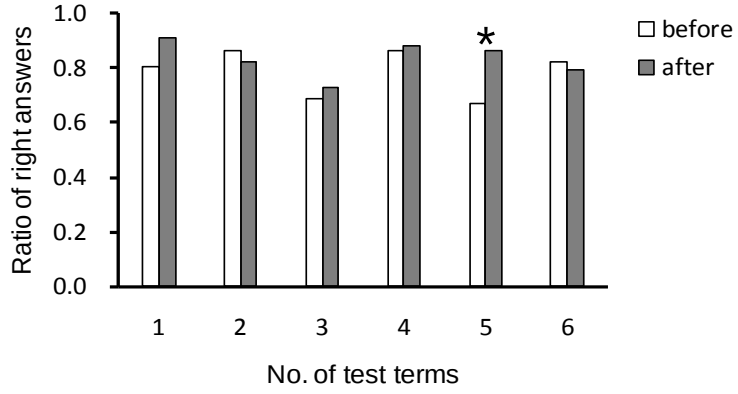


図2－7 実習前後における各質問項目の正答率の変化

＊は有意差（$p<0.05$）が検出されたことを示す.

図２－８は実習後の生徒の感想であり，多くの生徒がこの実習は楽しく，進化の理解に役立つと答えたことが分かる．自由記述による感想をみると，肯定的な感想（n=3 以上）には以下のようなものがあった：自然選択による進化について理解が深まった（n=14），楽しかった（n=14），オアシスに辿りつく個体を作りたかった（n=10），進化への興味が深まった（n=8），突然変異と進化に目的がないことが分かった（n=5），形が変わると飛行距離が大きく変化することに驚いた（n=5），またこの実習をやりたい（n=5），突然変異によって表現型が変化すると飛行距離が長くなったり，短くなったりすること，あるいは（羽の色など）表現型が変化しても飛行距離は変化しないことがあることがわかった（n=4）．一方で，否定的な感想（n>3）は１つだけだった：実習を行う時間がもっと欲しかった（n=4）．

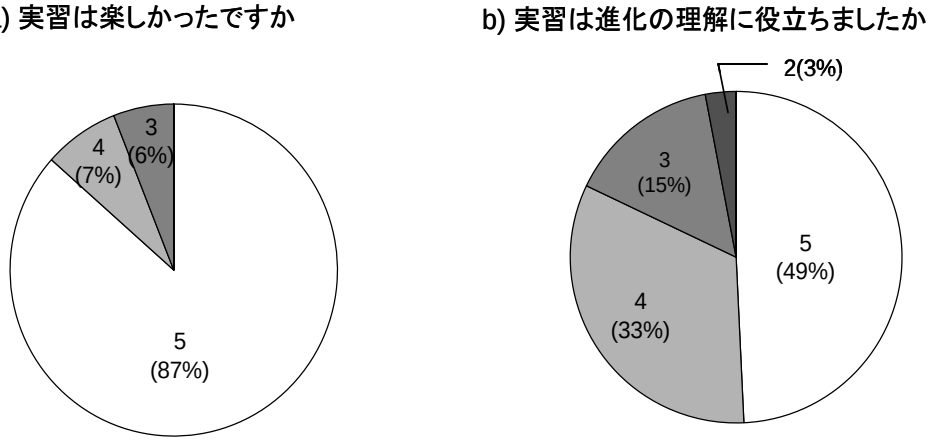


図2－8 実習後の生徒の感想（5段階）

5が最も肯定的な感想であり，数が減るほど否定的な感想を示す．

2-3-4　考察

実習前後テストの得点変化および生徒の感想から判断すると，改良版プロトコルを用いたオリガミバード実習は，日本の進化学習後の高校生の進化に関する理解を高めたと言える．さらに，生徒の感想から判断すると，このプロトコルを用いた実習は生徒の実習に対

するモチベーションを下げることはなかったと考えられる．

Westerling （1992）によるオリジナルのプロトコルを用いた過去の実践（山野井 2008, 2010）と同様に，「小進化のタイムスケール」（進化の定義⑨）や「自然選択の過程に闘争は必ずしも必要ないこと」（自然選択①②）に関する生徒の理解が改善された．今回加えた変更により，新たに４つの質問項目，目的論的な進化観の改善に関する質問項目（「進化の定義」⑤），進化は下等から高等への変化あるい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（「進化の定義」①②），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（「突然変異」⑤）の正答率が上昇した．これらに加えて，自由記述による生徒の感想に「突然変異と進化に目的がないことが分かった（n=5）」があったことを考えると，この実習を通して生徒は，突然変異を種分化と同義ではなくランダムな DNA の変化であると正しくとらえるようになり，進化における DNA の変化と表現型の変化の繋がりを理解したことにより，目的論的な進化観を科学的に正しい進化観へと変化させることできたと考えられる．目的論的な進化観は諸外国の高校生や大学生にも広く見られるため（１－４－２参照），この改変版プロトコルは日本以外の国々の生徒や学生にも有効である可能性がある．目的論的な進化観の打破に効果的な実験・実習教材は世界的に見てもほとんどないため，本研究はその溝を埋める重要な一歩であるだろう．

改変版プロトコルを用いた実習は生徒の進化に関する理解を有意に上昇させたが，テストの総得点の上昇率はわずかであった（0.67→0.74）．そのため，質問項目全体の正答率が実習後により上昇するよう教材の改良が必要である．また，少数（11 名／67 名中）であるものの，実習後に得点が低下する生徒も見られ，それらの生徒は，全体では正答率が有意に上昇した３つの質問項目（進化の定義②と⑧，自然選択②）において正答率が 30%以上低下していた．つまり，多くの生徒は本実習を通して「進化とは下等から高等へ変化とは限らないこと」「小進化のタイムスケール」「自然選択には異なる種間の闘争が必ず伴うことは限らないこと」に関する理解が上昇する一方で，一部の生徒にとっては誤った理解を

誘発してしまうということである．この理由は定かではないが，一部の生徒にとっては質問項目の用語（下等，高等，小進化，タイムスケール，自然選択，闘争）の理解が難しいのかもしれない．また，これらの生徒は感想（自由記述）もほぼ白紙であったことから実習に意欲を持って取り組めなかった可能性もある．

手始めに，以下のような変更を提案する．まず，自然選択の方向に関連して，生徒を２つのグループに分ける．一方のグループは，オリジナルのプロトコルと同様に，飛行距離が最も長い個体が選択され，もう一方のグループでは，オリジナルのプロトコルとは異なり，飛行距離が最も短い個体が選択される．この変更を採用した予備的な実習を実施したところ，２つのオリガミバード集団は４世代という期間で異なる進化の軌跡を描いた（図２－９）．生息環境によって自然選択の方向が変化することを理解することにより，進化は必ずしも一方向的に起こるわけではないことを認識できるため，目的論的な進化観をより一層打破できると思われる．次節ではこの変更を加えた上で，さらに種分化までを繋げて理解できることを目的とし開発した「オリガミバード・シミュレータ」を導入した実践について報告する．

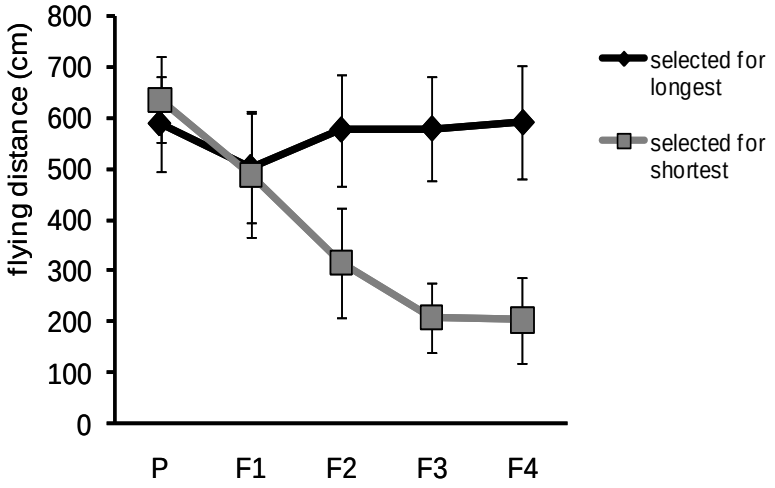


図2－9　自然選択の方向が異なる2つの集団が描く進化の軌跡

24のグループ（１グループ当たり２～３人）を２つに分け，一方のグループは飛行距離が最も長い個体が選択される条件で，もう一方のグループでは飛行距離が最も短い個体が選択されるという条件で予備的な生徒実習を行った．図中の各点は各世代における飛行距離の平均値（12グループ）を，エラーバーは標準偏差を示す．

2-4　オリガミバード・シミュレータの開発と評価

2-4-1　はじめに

これまで進化のしくみに関する教材開発は自然選択による小進化に焦点をあてたものがほとんどであり（Catley 2006，表１－３），大進化に関する教材はあまり開発されてこなかった．しかしながら，生物進化の全体像（１－２参照）を理解するために大進化の理解は欠かせない．新学習指導要領における生物教育においても，自然選択や中立説だけでなく種分化のしくみまでを理解させることを目指している（１－３－１）．Catley（2006）は生命倫理，人類の起源，クローンの問題の理解に関しても大進化の理解が必要とされており，自然選択による小進化だけでなく大進化に関する教育をより充実させるべきであると警鐘を鳴らしている．また創造論者は，小進化は認めても大進化は認めない傾向があるため（Alters 2005），大進化のしくみを理解させることは進化教育の大きな挑戦でもある．

少ないながらも大進化に関連する実験・実習教材として，生物界の変遷（O’Brian 2000）や大進化のタイムスケール（Metzger 2011），系統樹思考（Gendron 2000，Perry et al. 2008，Maroja & Wilder 2012）などがあるが，種分化のしくみに関するものはほとんどない．種分化のしくみを扱った数少ない教材として，近縁種間の核型の染色体写真（ヒトとチンパンジー，ヒグマとジャンアントパンダ）を比較することで染色体構造の変化と種分化を関連づける実習（Offner 1994）や，トゲウオの２つの集団を実際の野外データを利用し比較することで，大進化のしくみを理解させる共同学習（Sharp 2002）は開発されているが，自然選択による小進化と種分化のつながりを連関させて理解できるよう意図された実験・実習教材は開発されていない．進化の全体像を把握させるには，自然選択による小進化と種分化のつながりを連関させて理解させることが重要である（Catrey 2006，１－２参照）．

そこで本研究では，自然選択と種分化の過程を繋げて理解できるよう，改変版オリガミバードのプロトコル（２－３）に更なる変更を加えるとともに，オリガミバード・シミュ

レータというPCソフトを開発した．試行的に，進化学習後の高校生を対象にこの教材を用いた実践を行い，自然選択による小進化と種分化のつながりを理解できるようになったかを事前・事後テストにより確認した．

2-4-2　オリガミバードプロトコルの更なる変更

まず，より実際の生物システムに近づくよう突然変異表の改訂を行った．２－３のプロトコルではGMBによってDNA配列が変化する際，履歴の効果が含まれていた．例えば，クリップの数を決める遺伝子の配列がGに変化する場合，AからGに変化する場合はクリップの数が１つ減少するのに対して，CからGに変化する場合はクリップの数が２つ増加することになっている．このような履歴の効果は実際の生物では見られないものであるため，コドンの配列だけでその遺伝子の表現型への影響が決まるように突然変異表を改訂した（図２－10）．この改訂に伴い，遺伝子ごとにmRNAの配列とアミノ酸の種類を記入できるよう結果シートを一部改訂した（図２－11a）．

突然変異表

配偶子突然変異BOXのルーレットを回したあと、DNAの変化が表現型に与える影響を確認しよう.

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4　羽サイズの変化①：前羽

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2cm	長さ20cm
CGA	GCU	アラニン	前羽	幅3cm	長さ26cm
CCA	GGU	グリシン	前羽	幅1cm	長さ18cm

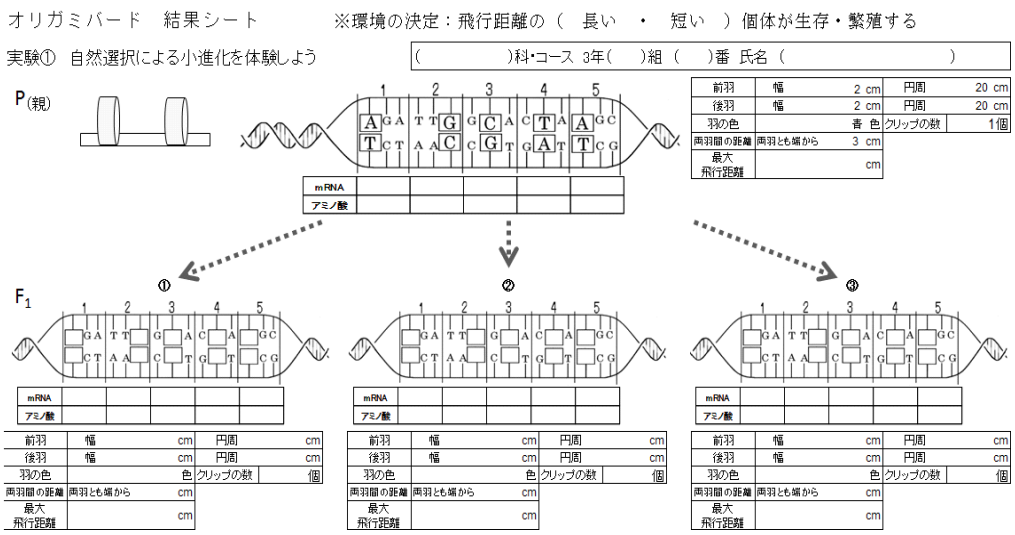
遺伝子5　羽サイズの変化②：後羽

DNA	mRNA	アミノ酸		表現型	
AGC	UCG	セリン	後羽	幅2cm	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3cm	長さ26cm

図2－10　突然変異表（改）

赤字で示してある塩基は各遺伝子においてGMBより変化し得る部分である.
灰色の網掛けは各遺伝子のP世代の配列を示す.

a) 表面（一部）



b) 裏面（一部）

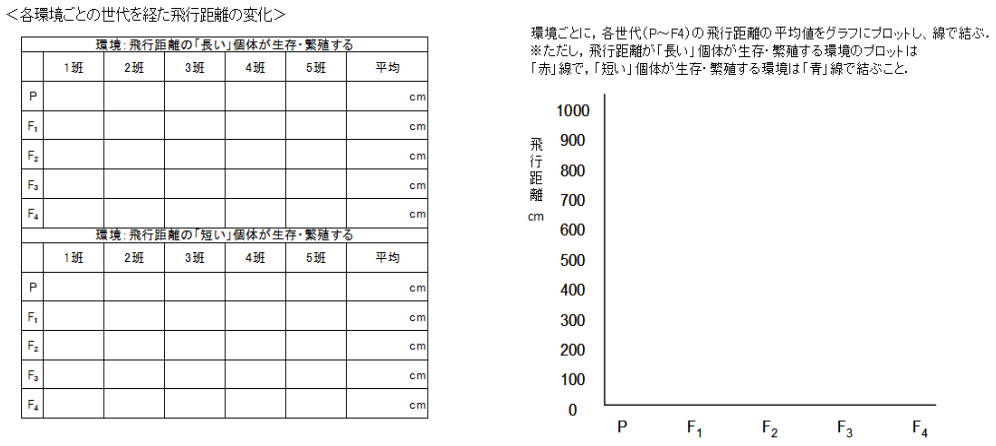


図2－11　結果シート（改）

a)　班ごとに環境を決定する（上右）．突然変異表（図１）を見て，DNAの変化による表現型の変化だけでなく，mRNAおよびアミノ酸の種類の変化も記録する．

b)　班ごとのF4までの飛行距離の変化を表（左）に記録し，各世代の飛行距離の平均値を右のグラフに記入する．

次いで，自然選択による小進化と地理的隔離による種分化のしくみを繋げて理解できるよう，２－３－４で提案したように，生徒の班を２つに分けて実習を行うよう実験書を改

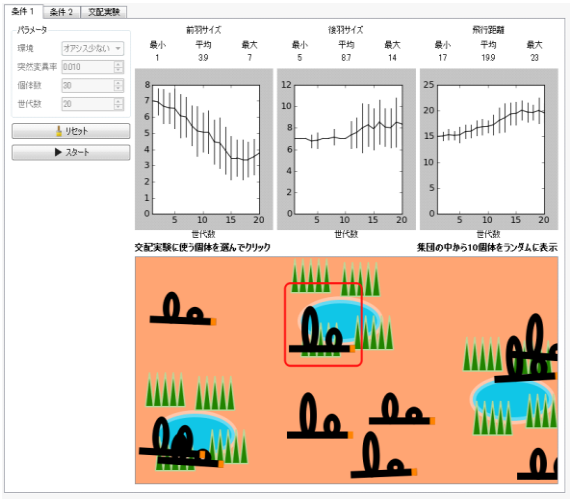
訂した（一方の環境では飛行距離が最も長い個体が選択され，もう一方の環境では飛行距離が最も短い個体が選択される）．生徒実習の最初に，どちらの環境に自分たちのオリガミバード集団が生息するかを班ごとに決めるよう指示した．その際，環境ごとの班の数がほぼ等しくなるよう隣りの班と相談するよう伝えた．F_4まで飛行実験が終わった班から，世代を経た飛行距離の変化を黒板の表に書くように指示した．その変化を記録できるよう結果シートを改訂した（図２－11b）．

2-4-3　オリガミバード・シミュレータ（OBS）の開発

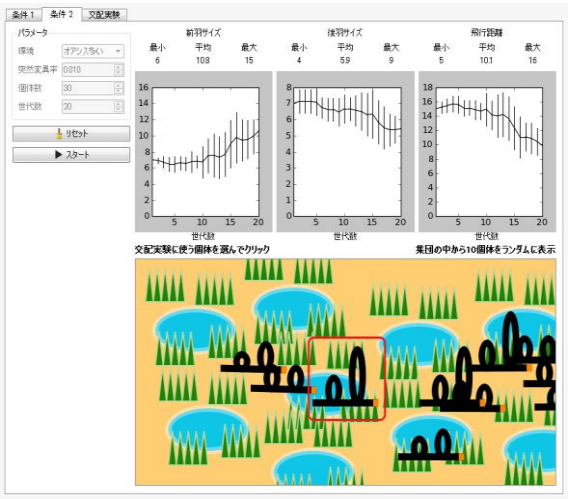
まずオリガミバード・シミュレータ（以下，OBS）の使用方法について説明し，続いて各設定の背景について説明する．

OBS の使用方法　条件１において，オリガミバード集団の生息する環境を「オアシス少ない」「中程度」「オアシス多い」の中から選択し，続いて突然変異率（0.001-0.1），集団サイズ（10-100），観察する期間（10-100）の３つのパラメータの値を設定する（括弧内の数値は変化可能な値の範囲を示す.）（図２－12a）.「値を固定」のタブをクリックし「スタート」のタブをクリックするとシミュレーションが開始する．モニタには集団の中からランダムに選択された 10 個体が表示される．シミュレーションが終了後，モニタの表示されている個体をクリックすると交配に使う個体を指定できる．条件２においても同様に行い（図２－12b），「交配実験」のタブをクリックすると条件１と条件２において選択した個体が表示されており，「交配」をクリックするとモニタに交尾のようすが表示される（図２－12b）．交尾可能な場合は子が生まれるが（図２－12c），交尾不可能な場合は交尾を試みるが失敗するようすのアニメーションが表示される（図２－12b）．

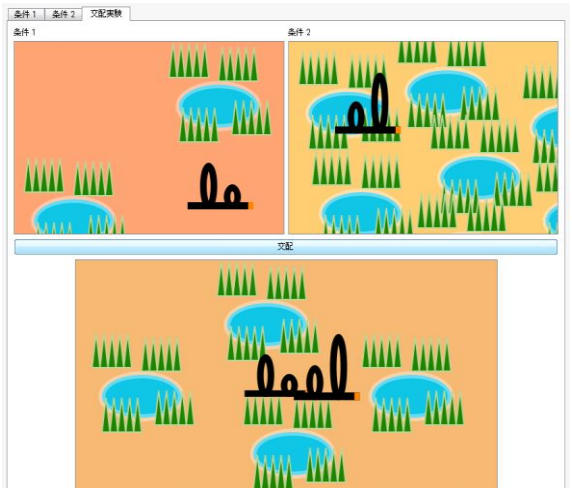
a)　オアシスが少ない環境



b)　オアシスが多い環境



c)　交配ウィンドウ：交尾不可



d)　交配ウィンドウ：交尾可能

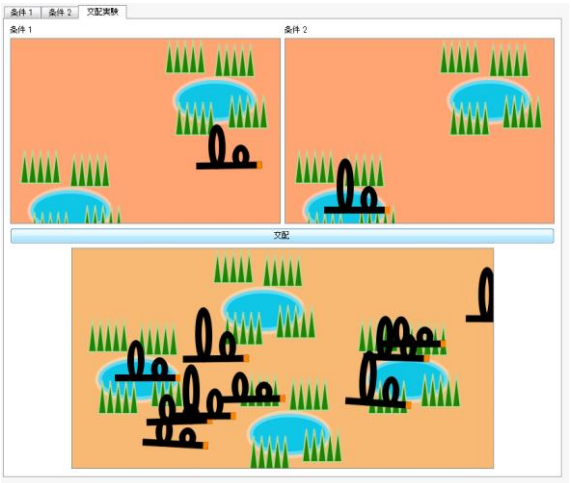


図2－12　OBSの使用方法の説明

各設定の背景　前羽および後羽サイズの決定と遺伝のしくみ：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本もつ（2n）．各羽サイズは４進法（A,T,G,C）を 10 進法に変換し（AA：０，AT：１，AG：２，AC：３，TA：４，…，CG：14，CC：15），２本の染色体で平均したものが羽の大きさになる．例えば[AATT, GGCC]の個体では，前羽

が AA と GG のヘテロ接合で (0 + 10) /2 = 5 となり，後羽が TT と CC のヘテロ接合で (5+ 15) / 2 = 10 となる．この遺伝子型を両親とすると[AATT]と[GGCC]の配偶子から[AATT, AATT]，[AATT, GGCC]，[GGCC, GGCC]の遺伝子型を持つ子たちがおよそ１：２：１の期待頻度で生まれてくることになる．また，突然変異率（後述）と同じ確率で組換えも起こるようにしているため, 例えば[AATT, GGCC]の親個体が[AATC]や[AGCC]といった接合子を生むことがあり，子たちの取りうる形質値はさらに多くなる．飛行距離の決定ルール：飛行距離は（後羽サイズ－前羽サイズ）＋15 で算出される．つまり，後羽サイズが前羽サイズに対して大きいほどよく飛び，前羽サイズと後羽サイズが等しい場合は中間の値になる．前羽 15・後羽０のとき飛行距離は最小値（０）となり，前羽０・後羽 15 のとき飛行距離は最大値（30）となる．なお，前羽より後羽が小さい場合に飛行距離が長く，逆に大きい場合は飛行距離が短いという設定は，２－３で言及した山野井（2010）による飛行シミュレーション実験に基づいている．

飛行距離と適応度の関係：オアシスの少ない環境ほど長い飛行距離が有利になるという仮定の下，複数の先行研究（Lande 1975, Wagner 1989, Johnson & Barton 2005）を参考に，最適な飛行距離の異なる一山型の適応度関数を３つ用意し（図２－13），個体 i の相対適応度 W_i は生息環境に対応する適応度関数に x_i=飛行距離/30 を代入することで算出した．具体的には，オアシスの少ない環境では α=2.4，β=1.1 の，オアシスの多い環境では，α=1.1，β=2.4 のベータ分布の確率密度関数を用いた（下式）．

$$W_i = P_{beta}(\alpha, \beta, x_i) = \frac{{x_i}^{\alpha-1}(1-x_i)^{\beta-1}}{B(\alpha, \beta)}$$

オアシスの数が中程度の環境では，平均値 μ=0.5，標準偏差 σ^2=0.2 の正規分布を用いた（下式）．

$$W_i = P_{norm}(\mu, \sigma, x_i) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} exp\left(-\frac{(x_i-\mu)^2}{2\sigma^2}\right)$$

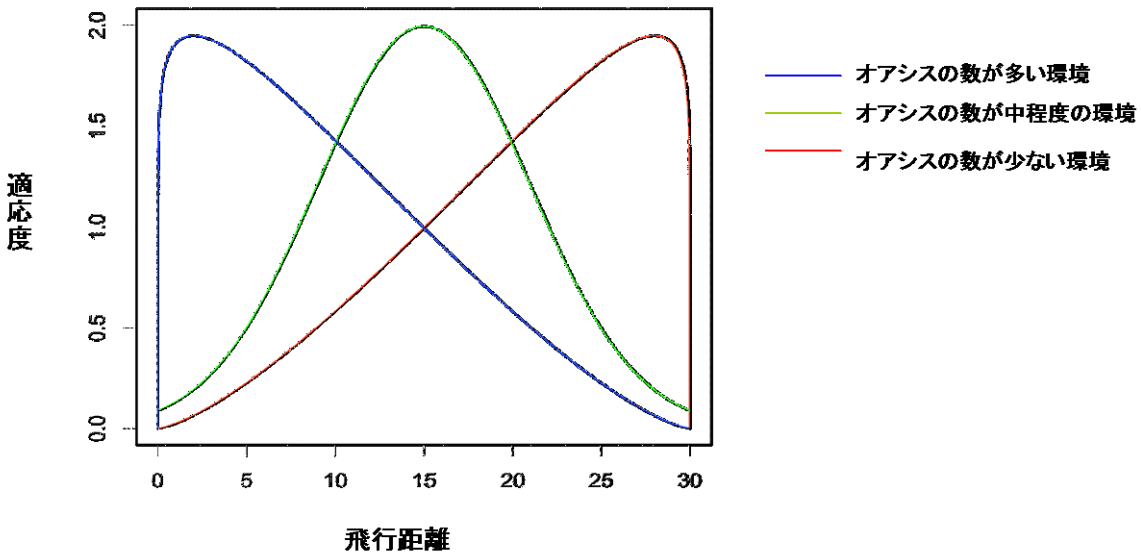


図2－13 OBSにおける飛行距離と適応度の関係

突然変異率の設定：OBS において突然変異率は 0.001～0.1（10^{-3}～10^{-1}）の間で変更できるが，この範囲設定は下記の理由による．1 年当り 1 塩基当りの突然変異率は 10^{-9} 程度である（Futuyma 2009）．1 遺伝子を約 1000 塩基とすると，1 世代 1 遺伝子あたりの突然変異率は 10^{-6} となる．羽サイズに関わる遺伝子が 10 個とすると，1 世代 1 表現型あたりの突然変異率は 10^{-5} となる．シミュレーションにかかる時間を短くするために，さらに 10^{2}～10^{4} 倍し 10^{-3}～10^{-1} とした．つまり，OBS の突然変異率は実際の生物よりも高く設定してあるが，突然変異によって表現型に変化が起こり，そして自然選択がはたらく過程を理解させるには問題はないと考えた．

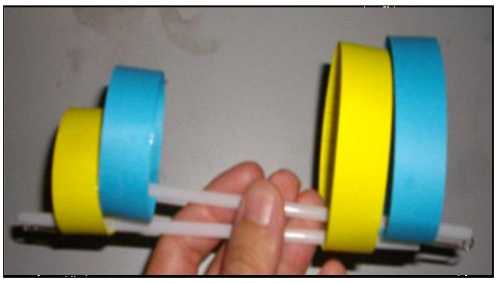
交配ペアの選択方法：N 個体の親集団から N/2 組のペアを作り，親 1 組につき 20 個体の子を生むこととした．20N の子どもたちの中から次世代の繁殖に参加できる個体を適応度に応じて N 個体選び，それ以外の子どもと親は死ぬこととした．繁殖個体の選び方は一般的なルーレット選択であり，1 回の選択で個体 i が選ばれる確率 P_i は，まだ選ばれていないすべ

ての子どもの適応度との相対関係で以下のように表される．

$$P_i = \frac{W_i}{\sum_k W_k}$$

交尾の方法と交尾成功の条件：多くの生物においてオスとメスの形や大きさが似ている場合に交尾が起こることが知られている．オリガミバードにおいてもこのような同類交配（assortative mating）が起こるとし，交尾成功の条件は下記の２段階とした．１つ目の条件は，２個体の前羽サイズの差と後翼サイズの差がそれぞれ５未満であること．２つ目の条件は，オスの形態が前羽＜後羽の場合，メスの後羽をオスの前羽がくぐることで交尾するとし（図２－14a），オス（図２－12c　OBS 画面右）の前羽がメス（図２－12c　OBS 画面左）の後羽以下であること，一方オスの形態が前羽＞後羽の場合，メスの前羽をオスの後羽がくぐることで交尾するとし（図２－14b），メス（OBS 画面左）の前羽がオス（OBS 画面右）の後羽以上であること．

a)



b)

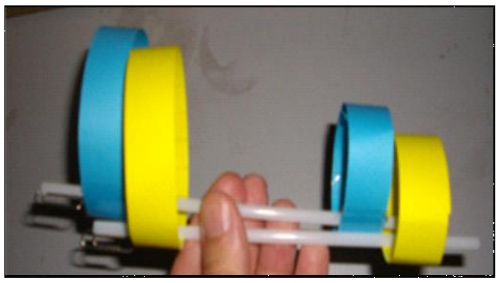


図2－14　交尾の方法

黄色個体がメス，青色個体がオスを表す．

2-4-4　生徒実践の概要と教育効果の検討

生徒実践は平成 23 年９～12 月の期間，現行の「生物Ⅱ」の教科書を使った進化の授業を終えた高校３年生（理系生物選択者）を対象に行った．この期間中の２コマ（各 50 分）の授業（１日）で行った．実施校は東京都私立 A 高校（男子６名・女子５名），栃木県私立 H

高校（男子 10 名・女子８名），京都府公立 R 高校（男子 15 名・女子 30 名）の計３校（74 名）である． A 高校と H 高校は山野井が，R 高校は R 高校の生物教員（山野井から事前に授業方法について説明を行い，授業方法は統一した）が担当した．前半（約 80 分間）は変更を加えたプロトコルを用いて手投げオリガミバード実習を行い，４世代まで終わった後，各班の結果を黒板に書いて集計し，自然選択のようすが環境ごとに異なることを全体で確認した．後半（約 20 分間）は，まず教師から「4 世代では生息環境の異なる２つの集団に種分化と呼べるような変化は見られないが，30 世代経つと２つの集団に種分化が起こるだろうか」と生徒に問いかけた後，OBS の画面をプロジェクターで投影し演示形式でシミュレーションを行った. 教師から OBS の設定に関しての説明の後（羽の形が遺伝するしくみ，飛行距離の決め方，各環境においてどのような個体が生存・繁殖する確率が高いのか，交尾の方法，OBS の画面の見方），シミュレーションを行った．ただし，生徒には OBS の設定は手投げ実習とほぼ同じ設定であることを強調し，短時間で理解することが難しい羽の形が遺伝や交尾の方法の細かい設定については細かく説明しなかった．具体的には，羽の遺伝のしくみに関しては，オスとメスの交配が加わったものの，手投げ実習と同様に突然変異による DNA 配列の変化が羽の形を決める，交尾の方法に関しては，羽の形が類似していれば交配でき，類似していない場合は交配できないと説明した．

次の２つの数値条件のもとシミュレーションを行った．この２つの条件は個体数のみが異なり，１つ目の条件は「個体数が多い場合（突然変異率 0.005・個体数 50・世代数 30）」であり，２つ目の条件は「個体数が少ない場合（突然変異率 0.005・個体数 10・世代数 30）」である．１つ目の条件では２つの集団で種分化（生殖隔離）が起こることを確認し，２つ目の条件では自然選択の効果が遺伝的浮動により打ち消されてしまうことを確認させた．各条件ともに２～３回ずつシミュレーションを行った．

手投げオリガミバードのプロトコルの更なる変更および OBS の演示シミュレーションを通して，突然変異による DNA の変化，自然選択，地理的隔離による種分化を繋げて理解で

きるようになったかどうかを明らかにするため，10 の質問項目から成る質問紙を作成した（資料２－２）．回答方法は５件法（そう思う・どちらかと言えばそう思う・どちらとも言えない・どちらかと言えばそう思わない・そう思わない）を用いた．また実習後には，これらの質問項目とは別に，「オリガミバード実習を通して DNA，進化，生物多様性に関する認識に何か変化はありましたか」という質問を設け５件法（変化があった・どちらかと言えばあった・どちらとも言えない・どちらかと言えばない・変化はなかった）で回答を求め，「変化があった」と回答した場合はその理由（自由記述形式）を尋ねた．さらに，この実習の感想を自由記述形式で尋ねた．

資料2－2 実習前後テストの質問項目

① 突然変異とは，生物個体のもつDNAの塩基配列の変化である

② 突然変異とは，新しい種がうまれることである

③ DNAが変化しても表現型に影響しない場合がある

④ DNAの変化は遺伝子の多様性が生じるのに必要である

⑤ DNAの変化は変異（形質の変化）をもたらす場合がある

⑥ 進化は集団レベルで起こる

⑦ DNAの変化は自然選択による進化（小進化）が起こるのに必要である

⑧ DNAの変化は遺伝的浮動による進化（小進化）が起こるのに必要である

⑨ DNAの変化は種分化が起こるのに必要である

⑩ DNAの変化は種の多様性が生じるのに必要である

質問項目②以外は「そう思う」～「そう思わない」を５点～１点のように得点化し，②のみは逆転項目であるため「そう思わない」～「そう思う」を５点～１点のように得点化した．実習前後の得点を比較したところ，10 の質問項目のうち７つの質問項目（①③⑥⑦

⑧⑨⑩）において実験後に得点が有意に上昇した（図２－15，paired-t test）．一方，実験後に得点が有意に減少する質問項目はなかった．得点が有意に上昇しなかった３つの質問項目のうち（②④⑤），④と⑤の得点が上昇しなかったのは，実習前の段階での理解度が高かったためと考えられる（図２－15，実習前得点：④4.61 点，⑤4.60 点）．質問項目①は実習後に得点が上昇したものの，②は実習後に得点が上昇しなかったことから，突然変異を DNA の変化であるという理解を深める一方で，突然変異を種分化と混同していると言え，授業の際は注意が必要である．

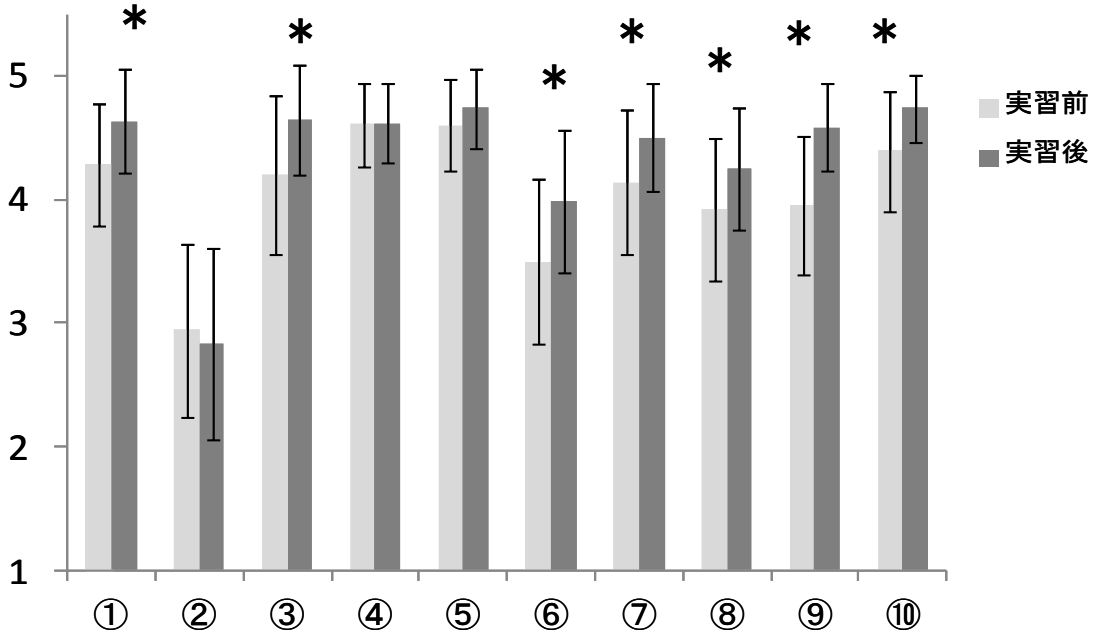


図2－15　実習前後の質問項目ごとの得点の変化

＊は$p<0.05$をしめす．

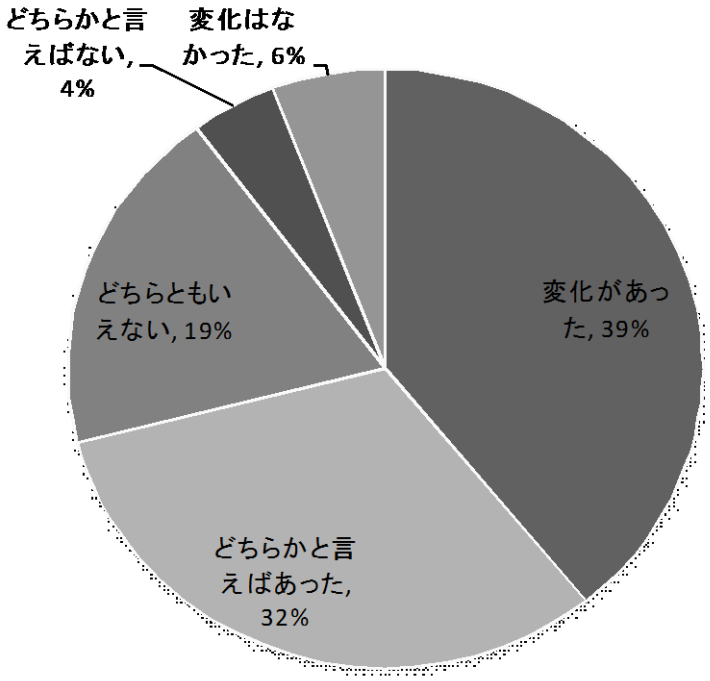


図2－16 実習後の感想

「DNA，進化，生物の多様性に関して理解に変化はあったか」

実習後，71%の生徒が DNA，進化，生物多様性に関して理解の変化があったと答えた（図２－16）．具体的な内容としては，種分化が起こるようすが個体数（や世代数）により変化すると分かった（n=6），遺伝的浮動について理解が深まった（n=5），進化のしくみがより詳しく分かった（n=4），突然変異と種分化の繋がりについて理解が深まった（n=3），シミュレーションの結果は確率的に変動することが分かった（n=3），DNA が変化しても必ずしも表現型が変化するとは限らないことがわかった（n=2），突然変異＝種分化ではないことが分かった（n=2），新しい種が思っていたよりも簡単に起こると分かった（n=2）があった．この他に少数意見として以下があった．「突然変異というと白ヘビや白スズメのようなアルビノ種，または足がなかったりとかするのみで，種の分化や新しく種が生まれることに直接つながりはないと思っていたが，今回の実習を通して突然変異も何千年，何万年と繰り

返していけば種の分化につながっていくのだと思った（A 高校，女子）」，「塩基配列の変化によって親個体と全く同じ個体ができたり，色や羽の長さが全く変わってしまうことは実験するまで考えたことがなかった．塩基配列が 1 つ変わるだけで色が変わったり，飛行距離に変化が見られたり，生物の突然変異（著者注：正しくは個体変異）にこんなにも塩基配列が大きく関わっているとは思いもしなかった．（H 高校，女子）」，「今までは，生き残るために必要な部分に DNA の変化が起こっていると思っていたが必ずしもそうではないことが分かった（A 高校，男子）」，「どのように DNA が変化していけばより進化していくかは偶然により決まるものに近いと思った．そして生物の種の幅を生み，適応したものが生き残る．これはそれほど環境に適応するのが大変であることを示していると思った（A 高校，男子）」，「DNA の変化が起こると表現型にも影響する．表現型が変化することで飛行距離も変化する．実際に実験してみると進化のしくみもわかったし覚えやすかったです．自分で作るというところが楽しかったです（H 高校，女子）」，「進化において自然選択以上に遺伝的浮動が大きな影響を持っていることが分かった．（R 高校，男子）」，「そんなに新しい種って生まれないかなと思っていたら，そうでもなかった．（R 高校，女子）」，「社会性昆虫のアリは目も見えず，声も出さないのに，我々のような分業性社会になっているのも，なんか納得できるような気がした．（H 高校，男子）」．これらの多くのは今回の実習を通して進化のしくみの理解が深まったことを支持している．今回の実習内容を社会性昆虫の進化にまで転移させる生徒もいたことは特筆すべき点である．しかしながら一方で，OBS の演示シミュレーションによって，種分化が短時間で起こるイメージを誘発することや，遺伝的浮動のはたらきを過大評価させてしまう危険性があることも分かった．そのため教師は，数十万年以上かかる種分化の過程を 2 コマ程度の授業で扱うという人工性について十分認識しておく必要がある．つまり，OBS を利用する際には種分化が起こるには少なくとも数十万年はかかることを補足説明することや，種分化のタイムスケールを理解させる教材（例えば Metzger 2011）と併用すること，以後の授業においても進化のタイムスケールについて

の誤理解を与えないような指導が必要である．また，遺伝的浮動と自然選択のどちらか一方だけがはたらいているのではなく，それらのバランスによって進化の方向が決まることを理解させるためには，OBS を用いた実習において，個体数が多い場合と少ない場合だけでなく，個体数を連続的に変化させた際の進化のようすを確認させることが有効と思われる．

自由記述による感想（n≧2）としては，楽しかった（n=20），進化のしくみが良く分かった（n=12），分かりやすかった（n=2）の他に，DNA のランダムな変化から適応が生じるのに驚いた（n=3）や，OBS を自分で操作しもっと色々な条件のもとでやってみたい（n=3），実際に飛ばすことで形が飛行距離に与える影響を実感し驚いた（n=2），進化を身近に感じるようになった（n=2）があった．これらの感想から，OBS を直接生徒が操作する実習にすれば，より楽しみながら進化のしくみを学習できると期待される．

2-4-5　まとめと今後に向けて

DNA の変化から種分化に至る過程までを繋げて理解できるよう，手投げオリガミバードのプロトコル（２－３）を改変し，さらにオリガミバード・シミュレータ（OBS）というPC ソフトを開発した．OBS を演示の形で利用する試行的な実践ではあったが，DNA の変化から種分化に至る過程に関する理解を部分的に上昇させることができた．

より学習効果を高めるための策として，演示ではなく生徒が直接 OBS を操作する実習に変更することが挙げられる．手投げの実習の後の短期間（20 分）に OBS の演示を行うというスケジュールは，生徒が実習内容を咀嚼する時間を十分設けていない可能性があるためである．多くの生徒は PC を使ったシミュレーションに慣れていないと考えられるため，手投げ実習を２コマで行ったあと，１コマの授業を使って OBS 実習を行い，地理的隔離による種分化のしくみを理解させるのが適当だと思われる．もちろん，OBS を直接操作する実習にすることで，ハンズ・オンの要素が増し，探究性が増す効果も期待される．その際に

は，突然変異と種分化の違い，種分化のタイムスケール，遺伝的浮動と自然選択の働き合いについても理解が深まるよう工夫する必要がある．特に，遺伝的浮動と自然選択の働き合いに関しては関連する実験・実習教材は Russo et al.（2012）を除いてほとんどなく開発が期待される．個体数が多い場合（n=100），少ない場合（n=10），中程度（n=30）の場合の３つの条件において，個体数が多い場合は相対的に自然選択の影響が強く生じるが，個体数が少ない場合は遺伝的浮動のはたらきにより自然選択の影響が強められたり，弱められたりすることを理解させる OBS 実習を計画している．

2-5　まとめ

高校生物Ⅱにおいて進化を学習した大学 1 年生を対象とした質問紙調査の結果，目的論的な進化観など通常の高校の授業では修正することができないミス・コンセプションが複数存在することが明らかとなった．このようなミス・コンセプションを修正し得る実験・実習教材として自然選択教材オリガミバードに注目し，DNA のランダムな変化とランダムでない選択の過程を繋げて理解できるよう改変を行った．その結果，実習後には目的論的な進化観を有している生徒の割合を減少させることができた．さらに，自然選択と種分化の過程を繋げて理解できるようオリガミバード･シミュレータという PC ソフトを開発した．授業実践前後に行った質問紙調査の結果，OBS を演示の形で利用する試行的な実践ではあったが，DNA の変化から種分化に至る過程に関する理解を部分的に上昇させることができた．

３章　実験・実習教材の提案②
中立説教材:
クジラの親戚を探る分子系統樹実習

3-1　目的

１－４－３－３で述べたように，これまで開発されてきた分子系統樹に関する実験・実習教材は多くは，形態形質から得られる情報と同様に分子情報を利用しても系統関係を復元できることを理解させることを主な目的としており，中立説と関連させた分子系統樹実習は開発されていない．前述したように，新学習指導要領に基づく生物教育はすでにスタートしており，新学習指導要領の理念に則した中立説に関する実験・実習教材の開発は急務である．そこですでに開発されている分子系統実習に，中立説に基づく分子系統樹の原理の要素を追加することで，新学習指導要領の理念に則した実験・実習教材を提案することにした．分子系統樹に関する実験・実習教材は複数あるものの，Kuzoff et al.（2009）によって開発された分子系統樹実習は他の教材にはない優れた特徴を有していると思われたため，この教材に分子系統樹の原理の要素を付加することで中立説を理解させる実験・実習教材を提案することを目的とした．

Kuzoff et al.（2009）によって開発された分子系統樹実習は，日本の高校生を対象として利用することを考えた際，以下の２点において優れていると考えられる．１点目は，フリーソフト MEGA を利用している点である．MEGA は初心者でも扱いやすいソフトであり，視覚的に分かりやすい（Kuzoff et al. 2009）．また，分子データのダウンロードと系統樹作成までの一連の過程を１つのソフトでできる．そのため，MEGA は高校生が扱うソフトとして適していると考えられる．２点目は，彼らの論文には MEGA を利用して分子系統樹を描く際の手順が非常に詳細に書かれている点である．手順は１～64 まであり，イラストや写真を交えて３ページに渡り説明されている．そのため，彼らの実験書は高校生～大学生用ものであるが，日本語に翻訳すれば日本の高校生でも実践可能と考えた（詳細は３－３参照）．

ここで，Kuzoff らの開発した実習教材が３章で挙げた（１）～（４）の条件の多くを満

たしていることを確認しておく（表３－１）．まず（１）理科の教材に求められる必要条件に関して，中立説や分子系統樹に関する内容は教科書（特に新学習指導要領に基づく教科書）で取り扱われているため（１－３－１参照)，「教科書の内容と関連している」と言える．MEGA を用いて分子系統樹を描く過程では，データベースからダウンロードしたアミノ酸配列を種間で比較し分子系統樹を描いていくので分子系統樹の「原理は良く分かる」と考えられる．中立説の説明と組み合わせることでより深い理解が期待される．PC を使った実習であるため「丈夫」という基準には該当しないが，PC 以外はプリント資料のみを準備すれば実施可能であるため「実験材料は安価」であり「実験準備は簡単」であり「季節に関係なく実施できる」．次いで（２）現在の日本の理科教育の問題を克服」に関して，仮説検証型の実習であるため仮説が採択されるか棄却されるかの二元論に近い形になってしまう危険性はある．しかし，同じ分子データを用いても，確率的な計算過程によって分子系統樹の樹形は班によってやや異なる結果になるため「結果は単なる成功／失敗の二元論ではない」．分子進化のしくみや分子時計の計算，分類体系調べと組み合わせることで「分野横断」型の教材と成り得る．（３）構造化された探究に関して，生徒は自ら立てた仮説を検証するために分子系統樹を描くため「探究」の要素は十分含まれている．PC 操作が実習の中心になるため，１－４－１で紹介した定義「生徒が科学概念を学ぶとき，教材や実物に直接触れることができる学習活動は，すべてハンズ・オン学習と呼ぶことができる」をもとに考えると，PC を教材あるいは実物とみなすかどうかによってハンズ・オンの要素を含むかどうかの解釈は異なる．一方で．コールトン（1998）の挙げたハンズ・オンの特徴であるインタラクティビティ（学習者は手を動かすことにより自身で試して考え，発見するという能動的な心の動きを誘発する）に関しては MEGA の利用に伴う PC 操作に十分含まれていることから「ハンズ・オン」の要素は含まれていると考えた（実際，Kuzoff et al（2009）は開発した実習を hands-on activity と呼んでいる）．また，完成した系統樹に生物のイラストを添付する作業等を加えればハンズ・オンの要素を増加させることも可能である．

最後に（4）ミス・コンセプションの修正に関しては，１－４－２で述べたように中立説に関するミス・コンセプションはほとんど報告されていないので言及できない．だが，中立説に関して通常の授業では理解しにくい内容の存在が明らかとなった場合はそれを修正するよう教材を改良する必要があることは言うまでもない．

この章ではまず，中立説に関する質問紙を新たに作成し，中立説に関して高校の授業において進化の学習を終えた生徒であっても理解しにくい点を，高校卒業直後の大学１年生を対象とした質問紙調査により明らかにすることを目的とした．続いて，その内容の理解を改善できるよう Kuzoff らによって開発された分子系統樹実習に変更を加え，改変版プロトコルの教育効果を実習前後テストにより明らかにすることを目的とした．

表3-1　中立説教材　分子系統樹実習（Kuzoff et al. 2009）の特徴

（1）理科の教材に求められる必要条件					
教科書の学習内容と関連	原理が良く分かる	丈夫	実験材料が安価	実験準備が簡単	季節に関係なく実施可能
○	△	―	○	○	○

（2）現在の日本の理科教育の問題点を克服	
結果が失敗・成功の二元論でない	分野横断
△	△

（3）構造化された探究	
ハンズ・オン	探究
△	○

（4）ミス・コンセプションの修正
–

3-2　中立説に関して高校生物Ⅱの授業では理解しにくい内容に関する調査

3-2-1　はじめに

1960 年代頃から進化学は分子生物学の知見を取り込み，分子レベルでの分析手法で進化現象を解析する研究が盛んに行われてきた．その過程で，分子進化学と系統学は強力に接続し，分子データから系統関係を推定する分子系統学が誕生した．その分子進化学を支える理論こそ木村資生によって提唱された「分子進化の中立説」である（Kimura 1983）．表現型レベルの進化は主に自然選択，分子レベルの進化は主に中立説によって説明可能である（１－２参照）．つまり，分子進化の中立説は自然選択と並んで，進化のしくみの理論的支柱となっており（嶋田 2007,Futuyma 2009），分子進化の中立説の理解なしに進化学の理解はできないと言っても過言ではない．実際，分子進化の中立説や，分子系統学の代表的な成果である３ドメイン説は各国で使用されている高校生物や大学教養レベルの教科書（BSCS Biology: A Molecular Approach，Modern Biology, Life: The Science of Biology）に記載されているほどである．

分子進化の中立説に関する内容は，表現型レベルの現象に比べて，分子に起こる変異などミクロな内容であるためイメージすることが難しく，さらに中立な突然変異が遺伝的浮動により集団中に固定される過程などは確率論的な内容を含んでいるため，生徒は理解するのが難しい可能性がある． ところが，これまでのミス・コンセプションに関する研究は進化の定義や進化のしくみに関する内容に集中しており（１－４－２参照），分子進化の中立説に関する内容については，世界的に見ても調査がほとんど行われておらず，ミス・コンセプションはもちろんのこと，どのような内容が通常の授業では理解しにくいのかに関しても分かっていない．

平成 24 年度から先行実施されている高等学校理科の新学習指導要領（文部科学省 2009）に基づく生物教育において，進化を詳しく扱う新科目「生物（４単位）」では，教育内容の現代化を図るため，分子進化の中立説，分子系統樹，分子時計，ドメインなど分子進化や系統分類に関する内容が増加する（嶋田 2010，山野井・武村 2010，伊藤 2011，１－３－１参照）．現行課程（文部省 1999）の「生物Ⅱ（３単位）」の授業においてもこれらの分子進化や系統分類に関する内容は扱われているが，もし現行課程の授業後であっても理解が不十分な内容が存在することが明らかになれば，新学習指導要領において増加した内容をそのまま教えようとしても生徒が理解できないことが示唆される．そのため，新学習指導要領に基づく進化教育が本格的に始まる前に（新科目「生物」は 2013 年度から開始），現行課程（文部省 1999）の授業が分子進化や系統分類に関する内容の理解にどのような影響を与えているかを明らかにしておくことは意義あることと考えた．

以上の理由から，本節では，現行の生物Ⅱの授業によって進化を学習した高校生（以下，既習高校生）は，学習していない高校生（以下，未習高校生）と比べて，中立説を基盤とする分子進化および系統分類の理解にどのような違いがあるのかを質問紙調査により明らかにすることを目的とした．

3-2-2　方法

１　質問紙調査

（１）調査対象

調査は，２－２と同様に，生物学関連の講義を受講する大学 1 年生に対して行った．調査対象は以下の大学の１年生（計 373 名）である．なお，大学名を表すアルファベットは便宜的なものであり，２－２とアルファベットが同じでも同一の大学とは限らない．

・国立 A 大学　総合理系学部・理学部・獣医学部・医学部等　計 24 名（男 19 名・女５名）

・国立 B 大学　農学生命科学部　計 186 名（男 109 名・女 77 名）

・国立 C 大学　農学部・工学部等　計 122 名（男 67 名・女 54 名・未記入 1 名）

・公立 D 大学　理学部（生物科学科）計 41 名（男 22 名・女 19 名）

（２）調査手順

進化学を専門とする大学教員に質問紙を送付し，生物学関連の初回の講義（2011 年 4 月～５月）で調査を実施した．なお，質問紙調査を実施する前に以下の 4 点を学生に伝えた．「講義の成績には関係しないこと」，「中等教育段階でどのような進化教育が必要かを明らかにするという研究の一環で，アンケートを行うこと」，「大学名は公表しないこと」「所属および学年，履修状況等の記入漏れを注意すること」．

（３）質問紙の作成

質問紙の質問項目は，新学習指導要領（文部科学省 2009）や大学専門課程レベルの進化学の代表的な教科書（Futuyma 2009）を参考にし，分子進化や系統分類に関して基礎的な事項を抽出することで作成した．作成した質問項目は全 13 項目で，共同研究者全員（山野井・遠藤・佐倉・武村）で確認し，内容的妥当性を確保した．また，基準関連妥当性（併存的妥当性）を確認するため，進化を研究する大学院生 17 名（国立 E 大学大学院生命科学研究科）および進化以外の分野を研究する大学院生 20 名（国立 F 大学大学院学際情報学府「科学コミュニケーション」を受講した学生）を対象に予備調査を行い，進化を研究する大学院生の方が得点（採点方法は後述）の高い質問項目のみを選択した（Kraskal-Wallis One-Way ANOVA, $p < 0.05$）．その結果，３つの質問項目を除外し，質問項目は全 10 項目とした（資料３－１）．

資料3－1　調査に用いたアンケート用紙

学生に配付したものには解答は書かれていない.

次の①～⑬の問題のうち，（　）内には適語を記入し，[　　]内は当てはまるものに丸をつけて下さい.

① タンパク質は（　アミノ酸　）がペプチド結合してできた分子である.

② 生物は，界・（　門　）・（　綱　）・（　目　）・（　科　）・（　属　）・種の順に階層的に分類されている.

③ 学名は（　属　）名と（　種小　）名で構成される.

④ A 種と B 種で比較した場合、同じタンパク質であればアミノ酸配列は完全に同じである.
[　正しい　・　誤っている　・　わからない　]

⑤ 遺伝子の種類によっては，生物の種類によらず，タンパク質のアミノ酸配列や DNA の塩基配列は，進化の歴史において一定の速度で変化していることがある.
[　正しい　・　誤っている　・　わからない　]

⑥ 同じタンパク質で比較した場合、系統が近い（≒親戚関係にある）ものほどアミノ酸配列が類似している.
[　正しい　・　誤っている　・　わからない　]

⑦ 複数の種で、同じタンパク質のアミノ酸配列や同じ遺伝子の塩基配列を比較すると，進化の過程において変化しやすい部分と変化しにくい部分があることが分かる.
[　正しい　・　誤っている　・　わからない　]

⑧ 分子時計を利用して，ある生物とある生物が何年前に種分化したのかを計算することができる.
[　正しい　・　誤っている　・　わからない　]

⑨ 種分化が起こるには平均すると
[　1 年　・　100 年　・　1000 年　・　1 万年・　10 万年　・　100 万年以上　]　くらいかかる.

⑩ タンパク質のアミノ酸配列や DNA の塩基配列は遺伝的浮動によって進化する.
[　正しい　・　誤っている　・　わからない　]

除外した質問項目を下記に記す（回答方法は「正しい」「誤っている」「分からない」からの選択）.

ア．多くの生物が共通して持つ遺伝子・タンパク質が存在する．（$p = 0.186$）

イ．形態が似ているものほど系統が近い（≒親戚関係にある）とは限らない．（$p = 0.830$）

ウ．突然変異とは染色体や DNA の変化である．（$p = 0.243$）

この３つの質問項目のうち，アとウは進化を研究する大学院生の方が平均得点は高かったが統計的な差は検出されなかった．イは進化を研究する大学院生と進化以外の研究をする大学院生とで平均得点は僅差であり統計的な差は検出されなかった．

調査に用いた質問紙への回答方法は，質問項目①～③は記述式，⑨は６項目からの選択，そのほかは「正しい」「誤っている」「分からない」からの選択である（資料３－１）．採点方法は正解の場合１点，不正解もしくは分からないと回答した場合は０点とした．ただし，複数の小項目を含む質問項目②および③はそれぞれ，0.2 点×５＝１点，0.5 点×２＝１点とした．全 10 項目の得点を合計し「全体得点」とした．

資料３－１に示した質問項目と同時に，１．所属大学・学部・学科，２．性別，３．高校時代の文理選択，４．生物学への興味（「とてもある」「ある」「ふつう」「ない」「まったくない」から選択．），５．DNA やタンパク質を扱うミクロ生物学と、生態や進化などを扱うマクロ生物学のどちらに興味があるか（「ミクロ」「どちらかと言えばミクロ」「両方同じくらい」「どちらかと言えばマクロ」「マクロ」から選択．以下「ミクロ度」とする），６．高校で生物Ⅱを履修したか，７．履修した場合，「生物の分類と進化」と「生物の集団」のどちらを，あるいは両方とも履修（選択）したかについても調査した．

（４）統計解析

「所属大学」など全体得点（10 点満点）に影響を与えると予想される要因を除いても「進化を高校で学んだかどうか」が全体得点に影響を及ぼしているかどうかを明らかにするため，全体得点を従属変数とし，「進化を高校で学んだか」「所属大学」「性別」「生物学への興味」「ミクロ度」の５つを説明変数として重回帰分析を行った．なお，「生物学への興味」と「ミクロ度」はカテゴリカル変数として扱った．未習高校生と既習高校生の各質問項目の得点の比較は Kraskal-Wallis One-Way ANOVA を行った．重回帰分析は R（ver.2.14.0）を

用いて，それ以外の統計解析は systat （ver.8.0）を用いて行った．

3-2-3　結果

１　データの集計

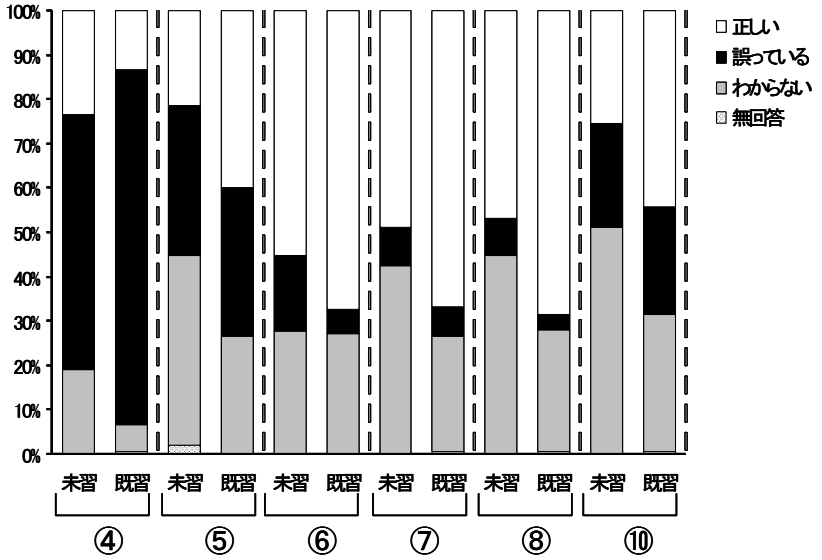
調査結果をもとに，高校生物Ⅱは履修したが「生物の分類と進化」を履修（選択）せず「生物の集団」を履修（選択）した高校生を「未習高校生」，高校生物Ⅱを履修し「生物の分類と進化」を履修（選択）した高校生を「既習高校生」とした．なお，「生物の分類と進化」と「生物の集団」の両方を履修（選択）した高校生も「既習高校生」とした．回答欄に空欄が３つ以上あるものを除外した結果，調査対象 373 名のうち，未習高校生が 47 名（13%），既習高校生が 181 名（49%）となった．

２　未習高校生と既習高校生の得点の比較

重回帰分析の結果，５つの説明変数のうち「所属大学」および「進化を高校で学んだか」のみが全体得点に有意な影響を与えていた（p <0.001）．すなわち，所属大学の違いによる学力の影響を除いても「進化を高校で学んだかどうか」が全体得点に影響を及ぼしていることが分かった．

各質問項目の回答パターンを図３－１に示す（ただし記述式の質問項目①～③は除く）．図３－１a において, 質問項目⑥を除いて, 既習高校生は未習高校生に比べて「わからない」という回答の割合が低かった．全体得点は既習高校生（5.6 点）の方が未習高校生（3.9 点）よりも高く, 各質問項目の平均得点においても, 10 の質問項目のうち７つ（②③④⑤⑦⑧⑩）で，未習高校生に比べて既習高校生の方の得点が高かった（表３－２）．逆に，未習高校生の方が既習高校生よりも平均得点が有意に高い質問項目は見られなかった．既習高校生においても平均得点が 0.5 点未満の質問項目が４つ（③⑤⑨⑩）あった．特に，質問項目⑨は未習高校生と既習高校生で平均得点に有意な差が見られず，回答パターンも類似していた（図３－１b）．その平均得点も 0.13 点と最も低かった（表３－２）．

a）質問項目④～⑧および⑩



b）質問項目⑨「種分化のタイムスケール」

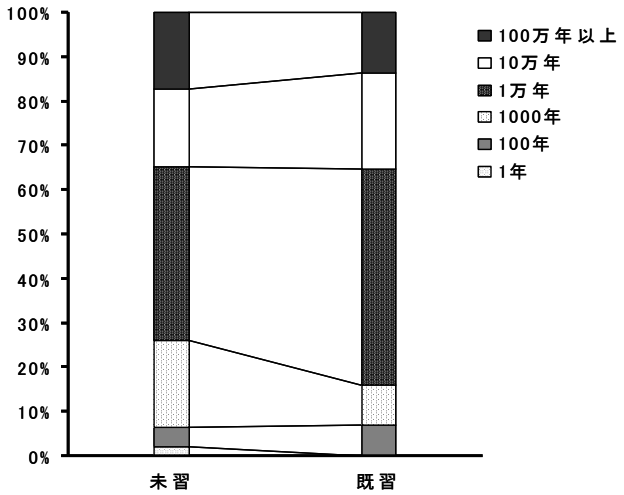


図3－1 各質問項目の回答パターン

a）各質問項目の正答は，④のみ「誤っている」，その他は「正しい」である．
b）正答は「100万年以上」である．

表3－2 各質問項目の平均得点

	未習高校生	既習高校生	*p*
①	0.87	0.91	0.418
②	0.22	0.59	**0.0001**
③	0.07	0.27	**0.001**
④	0.57	0.80	**0.001**
⑤	0.21	0.40	**0.019**
⑥	0.55	0.67	0.123
⑦	0.49	0.67	**0.024**
⑧	0.47	0.69	**0.006**
⑨	0.17	0.13	0.509
⑩	0.26	0.44	**0.02**
合計	3.9	5.6	**0.0001**

①～⑩の欄の数値は，各質問項目における，既習高校生および未習高校生の平均値を示す．合計の欄の数値は，既習高校生および未習高校生の全体得点の平均値を示す．なお，太字の数字は$p<0.05$を示す．

記述式の質問項目のうち得点の低かった質問項目②および③の小項目の正答率および誤答パターンを表３－３に示す．質問項目②の各小項目において誤答の多くは「無記入」であったが，正答が「綱（こう)」の小項目のみ，無記入より「網（もう)」という誤答の方が多かった．質問項目③においても各小項目の誤答の多くは「無記入」であったが，正答が「種小」の小項目は，「種」という誤答が 28 名とやや多かった．

表3－3 記述式の質問項目の小項目の正答率および誤答パターン

質問項目		②										③			
正答		門		綱		目		科		属		属		種小	
正答率（%）	未習高校生	27.7		6.4		21.3		27.7		23.4		10.6		6.3	
	既習高校生	76.2		24.3		65.1		67.4		60.8		38.1		29.3	
誤答例（人数）		無記入	63	綱	78	無記入	73	無記入	65	無記入	61	無記入	114	無記入	116
		綱	3	無記入	74	類	7	目	13	目	18	種	6	種	28
				こう	6	属	5	属	7	科	14	和	4	和	3
				類	4	科	5	属	3	族	6	科	4	科	3
				目	4	属	4			種	3				
				項	4										
				科	3										
				門	3										

誤答数が2以下のものは除いてある．

3-2-4 考察

重回帰分析の結果，所属大学の違いによる学力の影響を除いても「進化を高校で学んだか」が全体得点に影響を与えていたことから，高校生物Ⅱの授業では実験はほとんど行われていないものの（表１－１参照），その授業は分子進化や系統分類に関する内容への全体的な理解を向上させていると言える．しかしながら，質問項目の内容はすべて基礎的な内容であり，既習高校生には完全に理解させたい内容であるため，未習高校生よりも全体得点が高ければ良いというものではない．大きな課題と言えるのは，既習高校生と未習高校生で平均得点に差が見られなかった質問項目（①⑥⑨）や既習高校生であっても平均得点が 0.5 点未満の質問項目（③⑤⑨⑩）に関する内容であり，教授法を早急に検討する必要がある．

これらのうち分子進化に関連する質問項目は①，④～⑩であり，既習高校生と未習高校生で平均得点に差が見られなかったのは①，⑥，⑨，既習高校生でも平均得点が 0.5 点未満であったものは⑤，⑨，⑩である．ただし，①は未習高校生でも平均得点が 0.87 点と高いため，既習高校生との間に有意な差が見られなかったと考えられ，またその内容は分子進化や系統分類の単元でしか扱われない内容ではないため，下記の考察からは除外する．

⑥は「同じタンパク質で比較した場合，系統が近いものほどアミノ酸配列は類似している」（正答：正しい）という質問である．この⑥の内容と関連する質問項目④「A 種と B 種で比較した場合，同じタンパク質であればアミノ酸配列は完全に同じである」（正答：誤っている）に関しては，既習高校生の方が未習高校生よりも平均得点が高かった．つまり，既習高校生は生物Ⅱの学習を通して，同じタンパク質であってもアミノ酸配列が種間で異なることは理解しているが，その違いの程度は系統が離れるほど大きくなることは理解できていないと言える．そのため，新学習指導要領（文科省 2009）の新科目「生物（４単位）」において分子系統樹の内容が全面に出てくるが（嶋田 2010，山野井・武村 2010，１－３－１），これまでの教授法を踏襲すると，分子に見られる中立な変異の違いの程度を利用して，分子系統樹を描くことができることを理解させることが難しい可能性がある．

既習高校生でも平均得点が 0.5 点に満たなかった⑤は「分子時計」に関する質問であり，分子系統樹とともに新学習指導要領下では全面に出てくる内容である．⑧は既習高校生の方が未習高校生よりも平均得点が高かったことから「分子時計が種間の分岐年代の推定に利用できる」ことに関しては，生物Ⅱの学習を通して理解しているが，分子時計とは分子進化速度の一定性を意味することに関してはあまり理解していないと言える．これは，分子時計が分岐年代の推定に利用できることを中立進化と関連させて理解していないことを示唆している．中立進化に関する理解が不十分であることは，⑩「タンパク質のアミノ酸配列や DNA の塩基配列が遺伝的浮動によって進化する」の平均得点が既習高校生でも 0.5 点に満たなかったことからも伺える．

既習高校生と未習高校生で平均得点の差が見られなかった⑨は「種分化のタイムスケール」に関する質問項目であり，分子進化とは直接関係しないが，分子時計を利用し種間の分岐年代を計算する活動を通して，分子時計と種分化のタイムスケールの両方の理解が深まると考えられる．

系統分類に関連する質問項目は②と③であり，両方とも既習高校生の方が未習高校生よ

りも平均得点が高かった．しかしながら，質問項目③に関しては既習高校生でも平均得点が 0.5 点未満であり，また②に関しても全体の平均得点は 0.5 点以上であったが「綱」の正答率は 24.3%と低かった．③の二名法による学名の付け方や，②の界～種の分類体系を理解するには，図鑑やインターネットを利用した調べ学習が有効と思われる．校庭の植物や昆虫を採集し，分類体系を調べる活動も有効と思われる．細かいことではあるが，このような活動を行う際はもちろん，通常の授業においても，「綱」を「網」と書かないように指導をすることも大切である．

以上から，分子進化に関連する内容としては「タンパク質のアミノ酸配列や DNA の塩基配列が遺伝的浮動によって進化すること」「同じタンパク質であってもそのアミノ酸配列は系統が離れるほど違いが大きくなること」「分子時計とは分子進化速度の一定性を意味すること」「種分化のタイムスケール」，系統分類に関する内容としては「分類体系（綱）」「二名法」の理解を促進するような実習教材が必要と言える．次節３－３では，そのような実験・実習教材を提案するために行った分子系統樹実習（Kuzoff et al. 2009）の改変について述べていく．

3-3　中立説教材・クジラの親戚を探る分子系統樹実習

3-3-1　はじめに

分子系統樹はこれまで３ドメイン説（Woese et al. 1990），人類の起源（Cann et al.1987），HIV の起源（Stearns & Koella 2008），クジラの系統学的位置（Nikaido et al. 1999）など多くの画期的な生物学的知見をもたらし，もちろんこれらの内容は高校や大学で使用されている多くの教科書に掲載されている（例えば Cain et al. 2002, Campbell and Reece 2005, Raven et al. 2005, Sadava et al. 2009）．今や分子系統樹は生物学研究の必須ツールとなっており，今後も生物学的な知見を数多くもたらすことが期待される．そのため，中立説そのものを単独で教えるより，分子系統樹と関連させて教える方が実用性は高いと言える．しかしながら，中立説と分子系統樹の関係を理解させる教材や，通常の授業では理解にくい内容の修正を意図した教材はほとんど開発されていない（１－４－３参照）．また，これまで開発されてきた分子系統実習の多くは英語圏のものであり非英語圏で利用できる実習教材も開発されていない．

新学習指導要領に基づく生物教育はすでにスタートしており，新学習指導要領に基づく生物教育において利用できる中立説に関する実験・実習教材の提案は急務である．そこですでに開発されている分子系統実習に，中立説に基づく分子系統樹の原理の要素を追加することで，新学習指導要領の理念に則した実験・実習教材を提案することにした．Kuzoff et al.（2009）はフリーソフト MEGA （Tamura et al. 2007）を利用して分子系統樹を描く探究的で，かつ実習手順が詳細で分かりやすい教材を開発しており，またこの実習は１－４で述べた実験･実習の条件を満たしていると判断した（３－１参照）. よって本研究では, Kuzoff et al.（2009）によって開発された分子系統樹実習に変更を加えることで，中立説と分子系統樹の関係の理解および中立説に関連する通常の授業では理解しにくい内容（３－２参照）の修正を意図した，日本の高校生対象の分子系統樹実習を提案することを目的とした.「タ

ンパク質のアミノ酸配列や DNA の塩基配列が遺伝的浮動によって進化すること」や「同じタンパク質であってもそのアミノ酸配列は系統が離れるほど違いが大きくなること」に関しては，生徒にとって馴染み深く分子の機能（酸素を運搬する）が分かりやすいヘモグロビンを利用することや，分子系統樹の原理を実習前に説明することで中立説と分子系統樹の関係を理解させるで修正できると考えた．また，「分子時計とは分子進化速度の一定性を意味すること」，「種分化のタイムスケール」，「分類体系（綱）」，「二名法」に関しては，分子時計を用いた分岐年代の推定や，インターネットを利用した哺乳類の分類体系の調べ学習を分子系統樹実習に追加することにより理解を改善することができると考えた．なお，改良した実習教材の教育効果は実習前後テストにより検証した．また，日本の高校の生物教員を対象とした講習会を企画し，実習後にアンケート調査を行うことで，教員の観点からも改良した実習教材の評価を行った．

3-3-2 方法

3-3-2-1　Kuzoff et al.（2009）に加えた変更点

まず初めに Kuzoff et al.（2009）によるオリジナルの実験書について説明し，続いて彼らの実験書に加えた変更について述べる．彼らは，数量的な技術やコンピュータの技術を身に付けることを実習の目的とし，フリーソフト MEGA を用いて PaxNEB（RNA polymerase II Elongator protein subunit）のアミノ酸配列を利用して分子系統樹を描くことで「われわれの体の各部（左右対象・筋肉・四肢・背骨・胎盤など）はどれくらい古い（祖先的な）のか」を検証する探究型の実習教材を開発した．実習の対象は高校生から大学生である．実習はまず，グループで上記のテーマに関する仮説を立てる．次いで，進化や生物多様性に関するビデオおよび WEB サイトを通して，実習に関連する基礎的な知識を確認する．そして，MEGA を用いて分子系統樹を作成し，その樹形をもとに仮説が支持されたかどうかについてグループで議論するという流れである．前述したように，この実習教材の特筆すべき点

は MEGA を用いて分子系統樹を描く手順が詳細に書かれている点である．本研究では，日本の高校生を対象として，中立説による分子系統樹の原理を踏まえた分子系統樹を描く実習，通常の授業では理解にくい内容の修正を意図した実習教材の提案を目的としているため，彼らの実習に分子系統樹の原理に関する説明を加えるなどのいくつかの変更を行った．以下ではその変更点について述べていく．

１　探究学習のための生徒用仮説

本研究では，系統樹作成を通して形質の進化順序についての理解を深めることよりも，中立説を踏まえて分子系統樹に関する理解を深めることを実習の目的としている．そのため，「われわれの体の各部はどれくらい古いのか」ではなく，より生徒の興味・関心を惹きつけると考えられる「クジラは哺乳類の中でどの種に最も近いか？」を生徒用の仮説として使用した．これは Kuzoff et al.（2009）によって提案された生徒用仮説の１つであるが，この仮説と同様の話題は日本のある高校生物Ⅱの教科書にもコラムとして掲載されており，また哺乳類に親しみを感じている生徒が多い印象を受けることから，この仮説の方が日本の高校生に合うと考えた．以後，本実習教材をクジラの親戚を探る分子系統樹実習（クジラ分子系統実習と略する）と呼ぶ．

２　分子，種，樹形

Kuzoff et al.（2009）では「クジラは哺乳類の中でどの種に最も近いか？」を検証する際，シトクローム c 酸化酵素のサブユニット１（COX1）のアミノ酸配列を利用して分子系統樹を描くことを勧めていた．しかしながら本研究では，ヘモグロビンのα鎖のアミノ酸配列を利用することにした．なぜなら，この分子は，分子時計として利用できることに加えて（Barton *et al.* 2007， Futuyma 2009），高校生物Ⅱの教科書（８社中８社）にその構造や機能について掲載されていることから，日本の高校生にとってタンパク質の機能と中立についての理解がしやすいと考えたからである（詳しくは後述．「５　中立説を踏まえた分子系統樹の原理に関する実習前の説明」参照）．DNA の塩基配列ではなくアミノ酸配列を選択し

たのは，アミノ酸配列の方が DNA の塩基配列よりもデータベースにおける配列の登録数が少ないため，英語のデータベース（National Center for Biotechnology Information, NCBI）において日本の高校生が選択しやすいと考えたからである．

上述した生徒用仮説を検証するために，本研究では以下の哺乳類７種（ミンククジラ，マッコウクジラ，カバ，イエネコ，オオカンガルー，フクロネコ，カモノハシ）を選択し，その分子系統樹を描くことにした．この樹形から生徒用仮説の検証以外に，哺乳類の大まかな分類体系（有胎盤類，有袋類，単孔類）と収斂進化（イエネコとフクロネコ）の２点について学習することも期待した．ヘモグロビンのα鎖のアミノ酸配列はアミノ酸数が 141 程度と短く，妥当な樹形を描くのに必要な遺伝情報を含んでいない．そのため，この哺乳類７種に他の種（例えばヒトやラクダ）を加えた場合に樹形が大きく変化してしまう．つまり，この７種は上述した内容（生徒用仮説の検証，大まかな哺乳類の分類体系，収斂進化）を教えるのに恣意的に選んだものである．

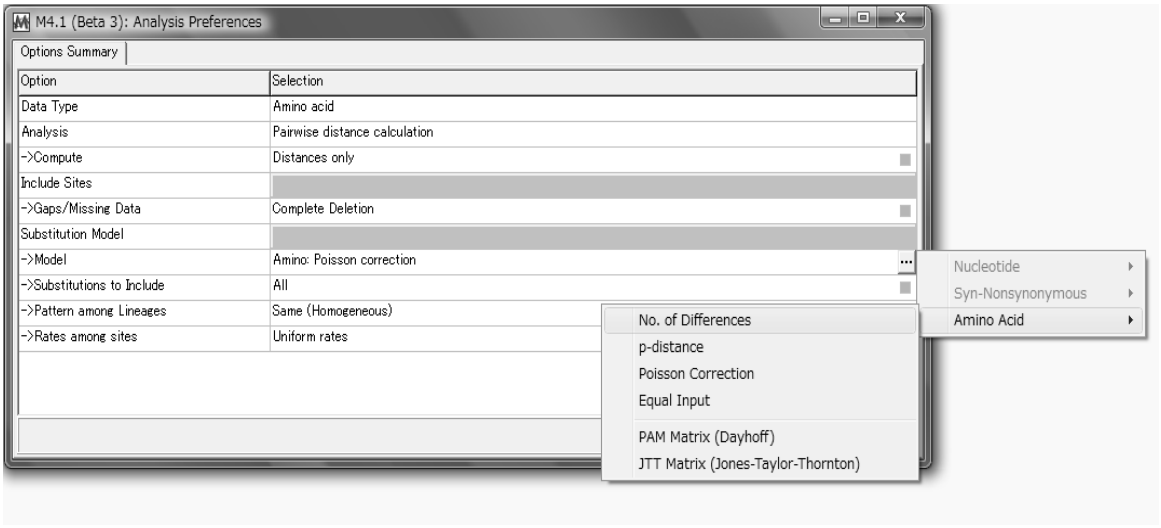
３　MEGA の利用に関する変更点

１つ目は，配列検索の際に BLAST（Basic Local Alignment Search Tool）を使わず，NCBI の検索バーに学名とタンパク質名を繰り返し入力するよう実験書を書き換えた．これは，NCBI のデータベースにおいて英語で書かれた多くの情報から適切なアミノ酸配列を選択することは日本の高校生にとって難しいと考えたからである．

２つ目は，分岐年代推定をするために，MEGA を用いて種間のアミノ酸配列の違いを調べる作業を追加したことである（図３－２）．系統樹を完成した後，生徒は，種間のアミノ酸配列の違いとヘモグロビンのα鎖の分子時計の性質を利用して分岐年代を計算した．ヘモグロビンのα鎖（アミノ酸数 141）のアミノ酸の進化速度は 1.2×10^{-9}（／アミノ酸／年）と推定されている（Kimura 1983, Barton *et al.* 2007）． この値からアミノ酸１つが置換されるのに必要な平均時間は約 600 万年と計算される．生徒はこの 600 万年という値を利用して「ミンククジラとマッコウクジラ」「これらのクジラの共通祖先と，残りの５種の中でク

ジラに最も近かった哺乳類（カバ）」の分岐年代を計算した.

a) Analysis Preferences window



b) Pairwise Distance window

	1	2	3	4	5	6	7
1. O. anatinus HBA							
2. B. acutorostrata HBA	45.000						
3. H. amphibius HBA	41.000	26.000					
4. M. giganteus HBA	46.000	39.000	28.000				
5. D. viverrinus HBA	46.000	42.000	32.000	22.000			
6. F. catus HBA	43.000	31.000	24.000	30.000	35.000		
7. P. catodon HBA	46.000	18.000	21.000	36.000	35.000	35.000	

図3－2　種間のアミノ酸配列の違いを調べる場合のMEGAの操作方法

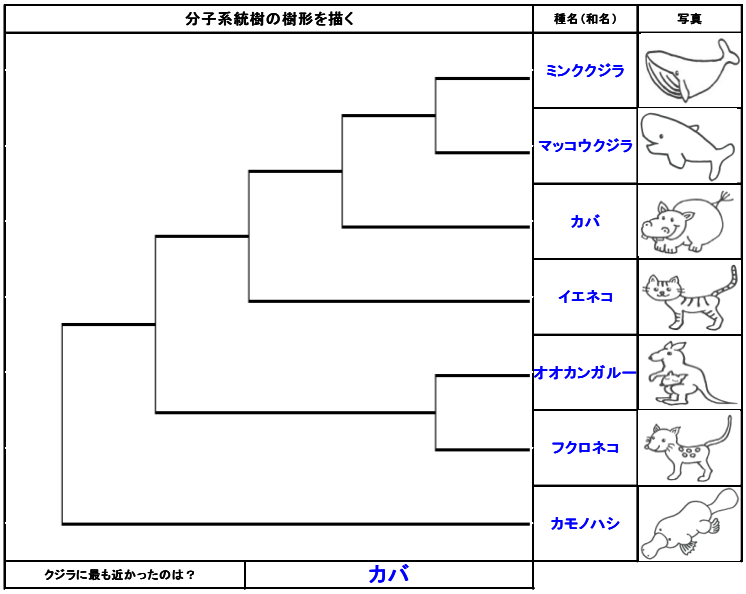
MEGAウィンドウの最上部にあるDistanceメニューからCompute Pairwiseを選択する．Analysis Preference Window（a）が開いたら，Modelバーの右端の■をクリックし，Amino acidとNo. of Differencesを選択する．すると，Pairwise Distance Windowが開き，種間のアミノ酸配列の違いを示す表（b）が表示される．

4　分類シートの導入

分類体系の理解を深めるため「分類シート」を作成，導入した（図３－３）．生徒はこのシートに，インターネットを利用して調べた哺乳類７種の分類体系（界，門，綱，目，科，属，種）を書き，また分子系統樹の樹形を描いた.

	界	門	綱	(類) 正式な分類体系ではない	目	科	属	種	
								和名	学名
1	動物界	脊索動物門	哺乳綱	単孔類	単孔目(カモノハシ目)	カモノハシ科	カモノハシ属	カモノハシ	*Ornithorhynchus anatinus*
2	動物界	脊索動物門	哺乳綱	有胎盤類(真獣類)	鯨偶蹄目	ナガスクジラ科	ナガスクジラ属	ミンククジラ	*Balaenoptera acutorostrata*
3	動物界	脊索動物門	哺乳綱	有胎盤類(真獣類)	鯨偶蹄目	マッコウクジラ科	マッコウクジラ属	マッコウクジラ	*Physeter macrocephalus*
4	動物界	脊索動物門	哺乳綱	有胎盤類(真獣類)	鯨偶蹄目	カバ科	カバ属	カバ	*Hippopotamus amphibius*
5	動物界	脊索動物門	哺乳綱	有胎盤類(真獣類)	食肉目(ネコ目)	ネコ科	ネコ属	イエネコ	*Felis catus*
6	動物界	脊索動物門	哺乳綱	有袋類	カンガルー目	カンガルー科	カンガルー属	オオカンガルー	*Macropus giganteus*
7	動物界	脊索動物門	哺乳綱	有袋類	フクロネコ目	フクロネコ科	フクロネコ属	フクロネコ	*Dasyurus viverrinus*

注意点)
・インターネット(Wikipediaなど)を使って調べること。
・科名・属名・和名は必ずカタカナで書くこと。
・学名は属名・種小名の下にそれぞれアンダーラインをひくこと。命名者名は省略すること。
・「類」の項目には、有胎盤類(真獣類)・有袋類・単孔類のいずれかを記入すること。※「類」は正式な分類体系ではなく、あくまで便宜的なものであることに注意よ



分子時計を利用して分岐年代を推定する

「ミンククジラ」と「マッコウジクラ」は何年前に種分化したかをα グロビンのアミノ酸配列は分子時計であることを利用して計算してみよう。…(1)
「クジラの共通祖先」と「クジラに最も近かった哺乳類」ついても計算してみよう。…(2)

参考)・α グロビンのアミノ酸配列は約600万年で1個の割合で変化する
・計算するときはアミノ酸数の違いを2で割ることに注意(なぜ2で割るかを考えてみよう)

(1)「ミンククジラ」と「マッコウクジラ」のアミノ酸数の違い…(18)個より　＜式＞ 600×18/2　答 5400万年

(2)「クジラの共通祖先」と「クジラに最も近かった哺乳類」アミノ酸数の違い…(23.5)個より　＜式＞ 600×23.5/2　答 7050万年

図3－3 分類シート

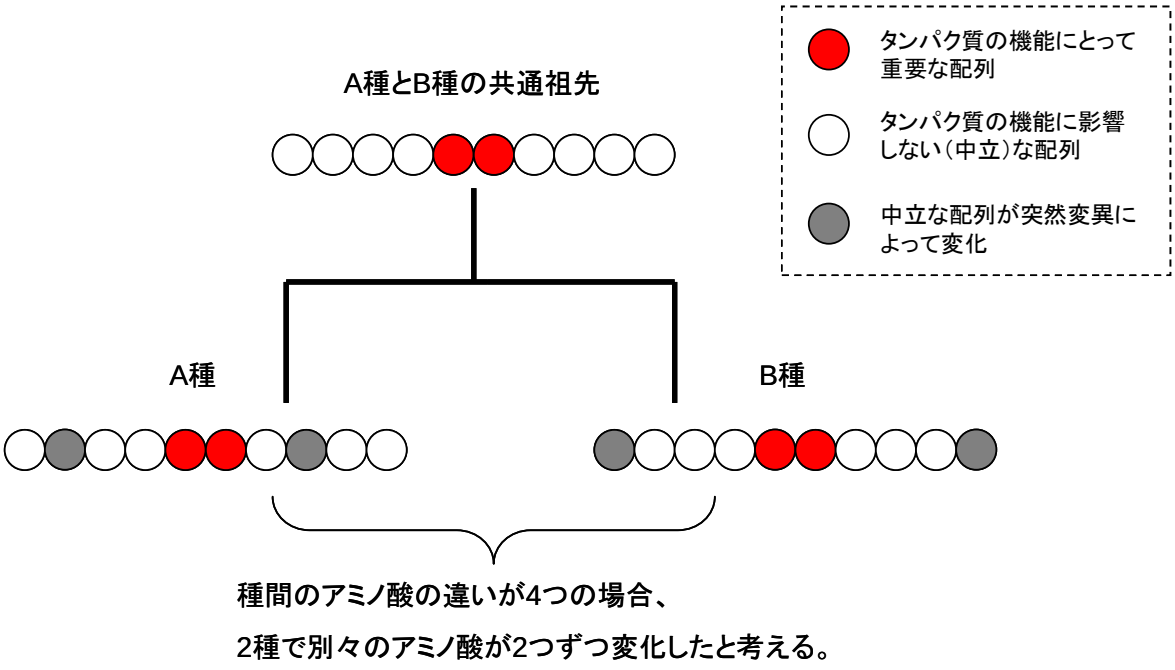
生徒はこのシート上部に哺乳類7種の分類体系を書いた．またシート中部に分子系統樹の樹形を描き，生徒用実験書から切り取った哺乳類の写真を貼り付けた（図中のイラストはサンプル）．さらにシート下部において、クジラ2種の分岐年代およびクジラの共通祖先とカバの分岐年代を、ヘモグロビンのα鎖のアミノ酸配列を利用して計算した．青字で書かれた部分および系統樹の樹形は例であり、生徒に配付したものには書かれていない。

生徒用の実験書に載せた哺乳類７種の写真を，分類シートに描かれた系統樹の先端に貼り付けるようにした（図３－３）．この作業を加えることにより，ハンズ・オンの要素が増え，教材とのインタラクティビティが促進されると考えた．

５　中立説を踏まえた分子系統樹の原理に関する実習前の説明

生徒実習の前に（１）「タンパク質のアミノ酸配列やDNAの塩基配列が遺伝的浮動によって進化すること」や「同じタンパク質であってもそのアミノ酸配列は系統が離れるほど違いが大きくなること」，および（２）アミノ酸配列のアラインメントに関して，板書を交えた説明を行った（図３－４）．（１）に関しては，中立説を踏まえて分子系統樹の原理を理解させるため，および３－２で明らかとなった通常の授業では理解しにくい内容を理解させるためであり，（２）に関しては高校生物Ⅱの教科書にはアライメントに関する記述がなされていないためである．（１）では，図３－４ａを板書し，「タンパク質のアミノ酸配列のある部分（ヘモグロビンでは酸素との結合に関係しないアミノ酸配列）はタンパク質の機能に中立な部分であるため遺伝的浮動によって進化してきた．一方，タンパク質の機能に関係する部分は安定化選択によって保存されてきた．タンパク質の機能に不可欠な部分が突然変異によって変化した場合，生物は死んでしまうためである．つまり，タンパク質のアミノ酸配列の中立変異を利用して分子系統樹を描くことになる．」と説明した．（２）では，図３－４ｂ を板書し，「哺乳類７種のヘモグロビンのα鎖のアミノ酸配列をダウンロードした後，アラインメントという作業を行う．欠失や挿入などの突然変異によってタンパク質のアミノ酸配列は変化するため，同じタンパク質であっても種間でアミノ酸配列の長さが異なっている．そのため，アラインメントという作業により，種間のアミノ酸配列の長さと位置を揃える必要がある．」と説明した．

a タンパク質の機能と中立進化を説明する際に用いたイラスト



b アラインメントを説明する際に用いたイラスト

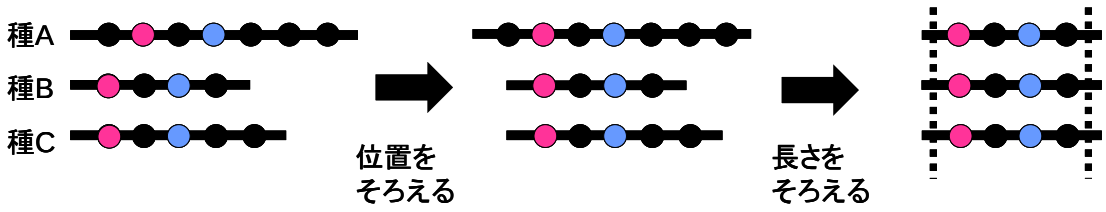


図3－4　実習前の板書内容

○はアミノ酸を示す．色の違いはアミノ酸の種類の違いを示す．

3-3-2-2　生徒実習の流れ

生徒実習を始める際，生徒を２人１組のグループに分けた．各グループにおいて，実験書の写真を見ながら，先に述べた「どの種がもっともクジラの近いか」という問いと「どの種とどの種は近縁か（複数可，例：イエネコとフクロネコ）」について考えるよう促した．

次に，各グループにおいて各自の役割（アミノ酸配列をダウンロードする／哺乳類の分類体系を調べる）を決めるよう指示した．なお，生徒の役割は３～４種のアミノ酸配列のダウンロードが終了したら交換させた．生徒は，これらの行程を，教師の特別な助けなしに，実験書を読みグループ内で協力しながらやり遂げた．分子系統樹が描き終わった後，完成した系統樹を班ごとに比較し，樹形やブートストラップ値がやや異なることを確認させた．

生徒が描いた分子系統樹の例を図３－３に示した．系統樹を描いた後，生徒は以下の式（種間のアミノ酸配列の違い÷２×600 万年）を使って分岐年代を計算した．この計算により，ミンククジラとマッコウクジラの分岐年代は 5400 万年前，クジラ２種の共通祖先とカバの分岐年代は 7050 万年前と算出された．Gastey (2009)によると，ミンククジラとマッコウクジラの分岐年代は 3300 万年前，これらクジラ２種の共通祖先とカバの分岐年代は 6000 万年前であることから，この実習において推定された値は妥当なものではない．しかしながら，大進化が起こるのに必要なタイムスケール（一般的には 100 万年以上）を生徒に理解させるには，これらの値は役に立つと考えた．ただし，生徒がこれらの値を知識として記憶するのを防ぐために，実習後教師は，これらの値は１つの分子時計から推定された大まかな推定値であり，より正確な値を知るには他の分子時計や化石記録を利用した推定などの多くの情報が必要となることを伝えた．

3-3-2-3　生徒実践と実習前後テストによる実習の評価

生徒実践は日本の３つの高校に通う高校生を対象に 2010 年 10～12 月の期間に行った（A 高校 20 名，B 高校 23 名，C 高校 17 名，計 60 名，男 16 名，女子 44 名）．この期間中の２コマ（各 50 分）の授業（１日）で行った．参加生徒は理系生物選択者で，教科書を使った通常の授業を通して，進化や分子生物学（分子系統樹，中立説，分子時計，ヘモグロビンの分子構造，分類体系）の学習を終えている．

実習前後に同一のテストを行い，その結果を比較することで実習の教育効果を検討した．13 の質問項目から成るテストを作成した（資料３－２）．テストの主な内容は分子進化，分

子時計，大進化のタイムスケール，分類体系に関するものであり，多くの質問項目は３－２の調査で使用した質問紙と共通している（質問項目②⑤⑧⑨以外の９つの質問項目は資料３－１と共通である．ただし，資料３－１の質問項目⑩は含まれていない）．このテストを実習前と実習後に行い，その結果を比較することで実習教材の教育効果を検討した．なお，生徒には実習後にもほぼ同一のテストを行うことは実習が終わるまで伝えなかった．採点は１問正解につき１点とした（13 点満点）．実習前テストと実習後テストの得点は統計ソフト Systat 8.0 を用いて paired *t*-test と Wilcoxon’s signed-rank test により比較した．また，実習後の感想をいくつかの質問項目（５段階）と自由記述を通して評価した（資料３－２）．

資料3－2 実習前後テスト

下記は実習後テスト．質問項目①～⑬は実習前テストと同一であるが，実習後テストには感想（５段階および自由記述）が含まれている．

分子系統樹実習　事後アンケート　　3年（　　）組（　　）番　氏名

次の①～⑬の問題のうち（　）内には適語を記入し，[　　]内は当てはまるものに丸をつけて下さい．

① タンパク質は（　　）がペプチド結合してできた分子である．
② 多くの生物が共通して持つ遺伝子やタンパク質が存在する．
［ 正しい ・ 誤っている ・ わからない ］
③ 生物は，界・(　　)・(　　)・(　　)・(　　)・(　　)・種の順に階層的に分類されている．
④ 学名は（　　）名と（　　）名で構成される．
⑤ 哺乳類は大きく（　　）類・(　　）類・(　　）類に分類される．
⑥ A種とB種で比較した場合、同じタンパク質であればアミノ酸配列は完全に同じである．
［ 正しい ・ 誤っている ・ わからない ］
⑦ 遺伝子の種類によっては，生物の種類によらず，タンパク質のアミノ酸配列やDNAの塩基配列は，進化の歴史において一定の速度で変化していることがある．
［ 正しい ・ 誤っている ・ わからない ］
⑧ 形態が似ているものほど系統が近い（≒親戚関係にある）とは限らない．
［ 正しい ・ 誤っている ・ わからない ］
⑨ クジラは哺乳類の中では（　　）に近縁である．
⑩ 同じタンパク質で比較した場合、系統が近い（≒親戚関係にある）ものほどアミノ酸配列が類似している．
［ 正しい ・ 誤っている ・ わからない ］
⑪ 複数の種で同じタンパク質のアミノ酸配列を比較すると，進化の過程において変化しやすい部分と変化しにくい部分があることが分かる．
［ 正しい ・ 誤っている ・ わからない ］
⑫ 分子時計を利用して，ある生物とある生物が何年前に種分化したのかを計算することができる．
［ 正しい ・ 誤っている ・ わからない ］
⑬ 種分化が起こるには平均すると
［ 1年 ・ 100年 ・ 1000年 ・ 1万年・ 10万年 ・ 100万年以上 ］ くらいかかる．

●今回の分子系統樹実験を通しての感想を５段階で評価して下さい（番号に○を付ける）

楽しかった　［ 5 ・ 4 ・ 3 ・ 2 ・ 1 ］ つまらなかった
理解が深まった ［ 5 ・ 4 ・ 3 ・ 2 ・ 1 ］ 深まらなかった
PC（MEGA）の操作　難しかった ［ 5 ・ 4 ・ 3 ・ 2 ・ 1 ］ 簡単だった
MEGAの英語表記　難しかった ［ 5 ・ 4 ・ 3 ・ 2 ・ 1 ］ 簡単だった

●今回の分子系統樹実験を通して気が付いたこと・理解が深まったことなど，自由に感想を書いてください。

3-3-2-4　高校生物教員による実習の評価

この実習が高校の教育現場に広まっていくには，生徒だけでなく教師によっても効果的

であると見なされなければならない．日本の高校生物教員を対象とする無料の講習会を開いた．講習会の案内は高校生物教員のメーリングリストを用いて行った．

講習会では，生徒の立場でこの実習を行ってもらうようお願いをし，また実習後のアンケートへの協力を依頼した（資料３－３）．アンケートではこの実習の良い点，改善した方が良い点，感想について自由記述形式で尋ねた．

資料3－3 教員による評価に用いた質問紙

分子系統樹実習アンケート

性別 （ 男 ・ 女 ） 教員歴（ ）年

●この教材は，高校の現場で実践しやすい教材だと思いますか.

そう思う [5 ・ 4 ・ 3 ・ 2 ・ 1] そう思わない

●来年度の生物Ⅱの授業で実践してみようと思いますか.

そう思う [5 ・ 4 ・ 3 ・ 2 ・ 1] そう思わない

●この教材を使うことにより，以下の内容に関する生徒の理解が促進されると思いますか.

①**分子系統樹** そう思う [5 ・ 4 ・ 3 ・ 2 ・ 1] そう思わない

②**分子時計** そう思う [5 ・ 4 ・ 3 ・ 2 ・ 1] そう思わない

③**収斂進化** そう思う [5 ・ 4 ・ 3 ・ 2 ・ 1] そう思わない

④**分類体系** そう思う [5 ・ 4 ・ 3 ・ 2 ・ 1] そう思わない

⑤**哺乳類の進化** そう思う [5 ・ 4 ・ 3 ・ 2 ・ 1] そう思わない

●この教材の良い点

●この教材の改善した方が良い点

●感想

3-3-3　結果

（１）実習前後テストによる評価

実習後テストの平均得点は実習前テストの平均得点よりも高かった（図３－５；paired *t*-test, $df = 59$, $t = -16.19$, $p < 0.0001$）．実習前テストの平均得点は 7.8，実習後テストの平均得点は 10.8 であった．13 のテスト項目のうち９つの項目において，実習後に平均得点が有意に上昇した．一方で，実習後に平均得点が有意に低下したテスト項目はなかった（図３－６，Wilcoxon’s signed-rank test）．

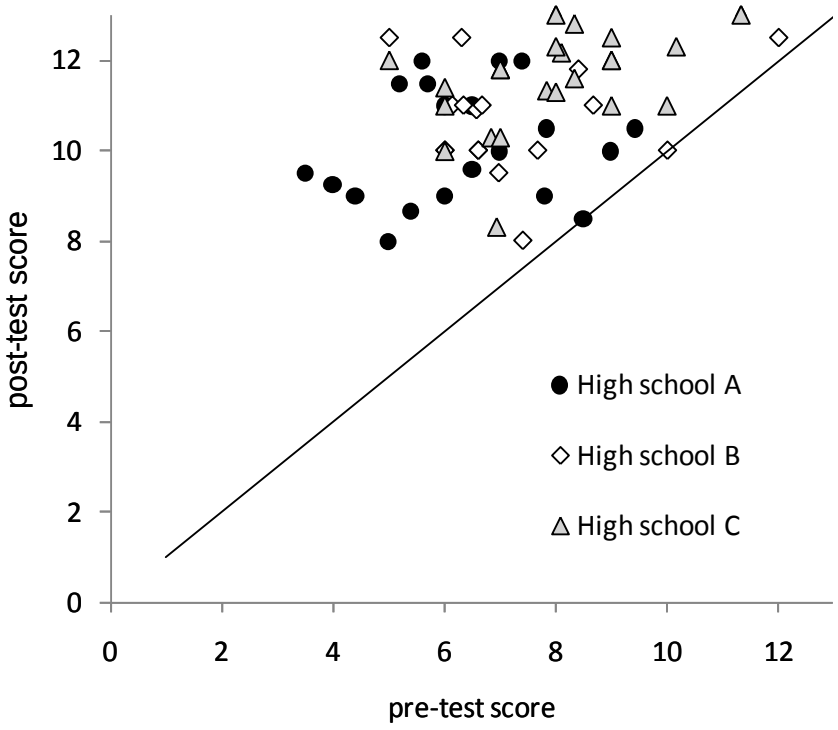


図3-5 実習前後テストの得点の比較

図中の直線はy=xを示す．つまり，この直線より上にある点は実習後に得点が上昇したことを示している．

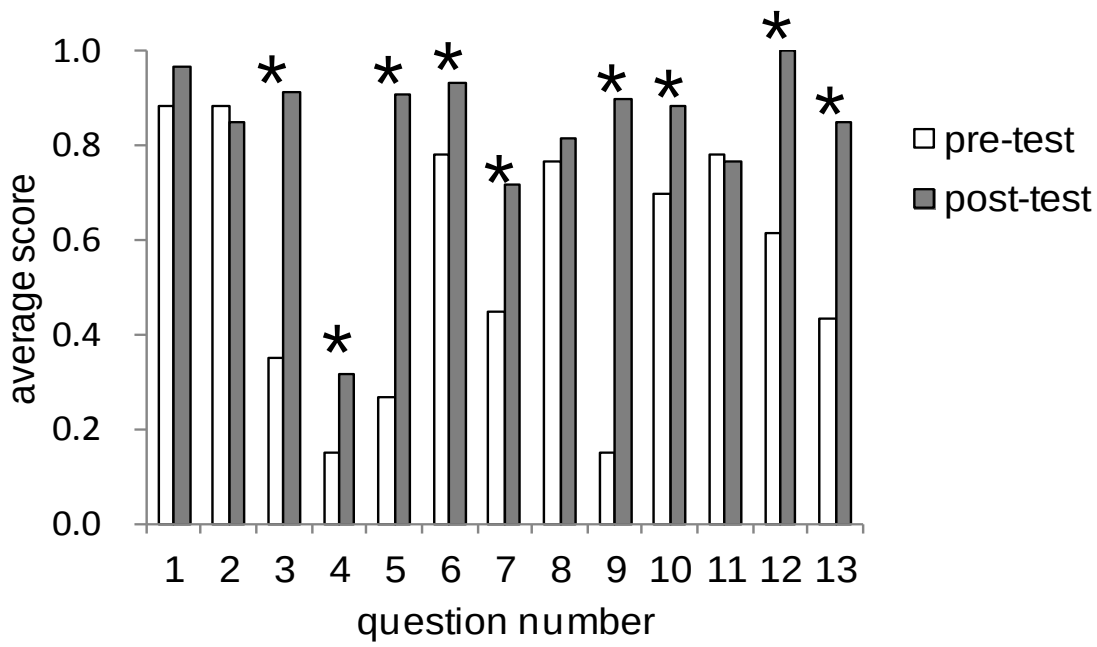


図3-6 各テスト項目ごとの得点変化

アスタリスクは実習後に有意（5%水準）に得点が変化したことを示す.

実習後の生徒の感想を図３－７に示す．多くの生徒はこの実習を通して分子系統樹に興味を持つようになり, また分子系統樹に関する理解も深まったと答えた(図３－７ a と b)．一方で，約半数の生徒は PC の操作や MEGA の英語表記が難しかったとも答えた（図３－７ c と d)．

また, 自由記述による生徒の感想に関して, 生徒の記述を複数回確認し, 共通の感想 (n>2) を抽出した．その結果，以下のような感想が見られた（何人かの生徒の記述は複数のカテゴリに分類された) : 外見だけで系統関係が判断できるとは限らない事が分かった (n=13)，生息環境が異なるのにクジラとカバが近縁であることに驚いた（n=11)，思ったより分子系統樹を描くのは簡単だった（n=7)，分子系統樹に関して理解が深まった（n=5)，別の分子系統樹も描きたかった（n=4)，コンピュータの操作は難しかった（n=4)．

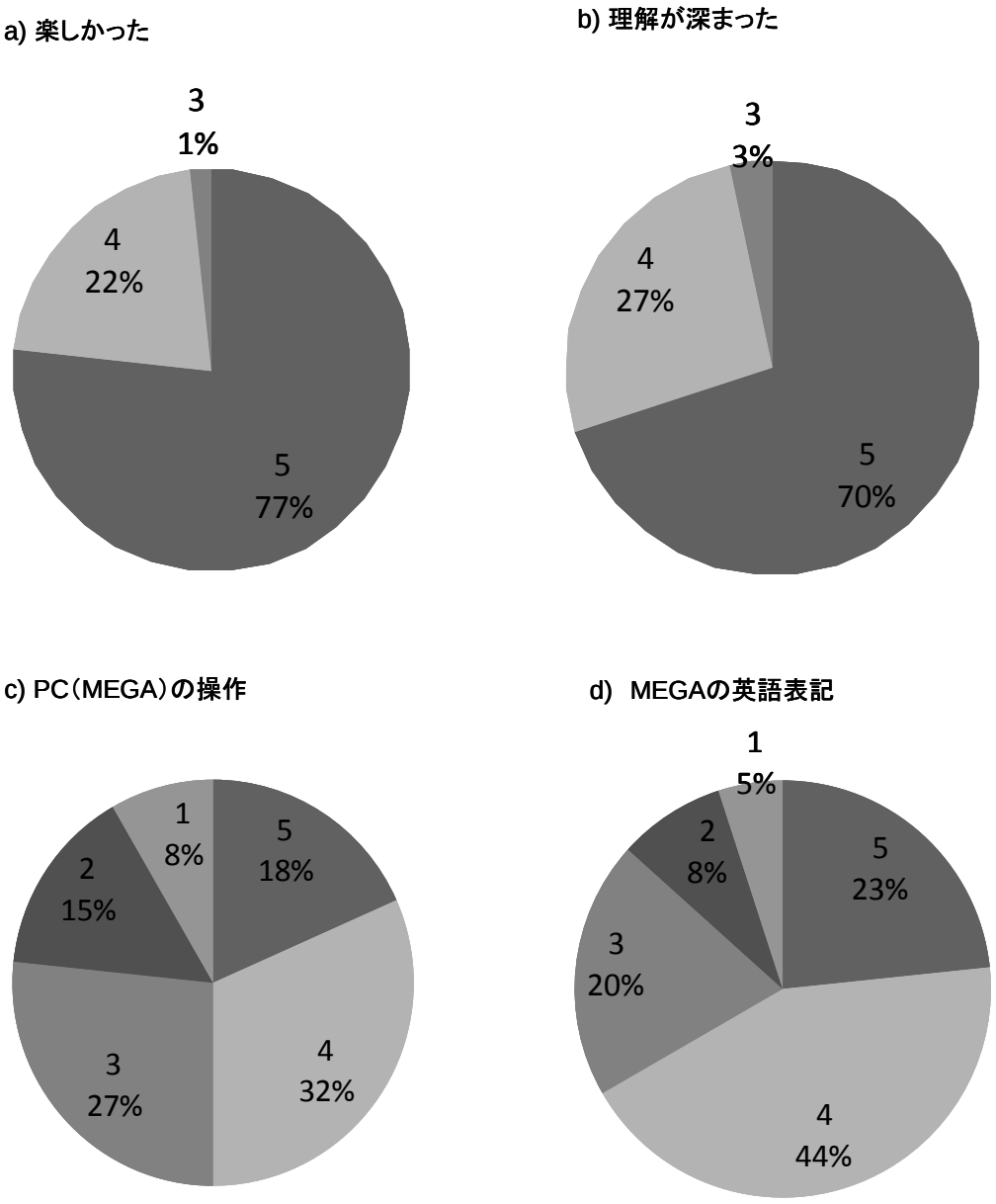


図3-7 実習後の生徒の感想

生徒は実習後の感想を５段階で評価した（1：否定～5：肯定，資料３－１参照）．

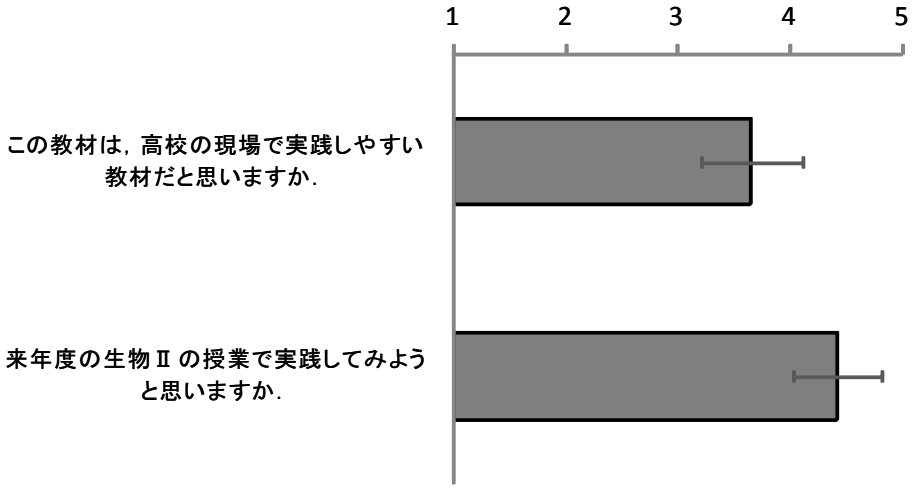
（２）高校生物教員による評価

26 人の教員が講習会に参加した（平均教員歴 16.2 年，男 16 名，女 8 名，性別無回答 2 名）．講習会後のアンケートにおいて，多くの教員が，来年度の授業で実施したい，分子系

統樹を教えるのに役立つ教材であると回答した（図３－８）.

この実習の良い点（n>2）として，生徒がハンズ・オン学習を通して分子系統樹に関連する内容を理解できる（n=8），研究者のような体験ができる（n=4），種間のアミノ酸配列の違いが色を使って分かりやすく可視化されている（n=3），日本には進化の教材はほとんどないがこの実習は進化の理解に役に立つ（n=3）が挙げられた. また改善した方が良い点（n>2）として，MEGA の英語表記は難しい（n=6），進学校の生徒にしか役立たない（n=3）が挙げられた．他の感想として，面白かった（n=5）やワクワクした（n=3）があった.

a) 実習全体の評価



b) 学習内容ごとの評価

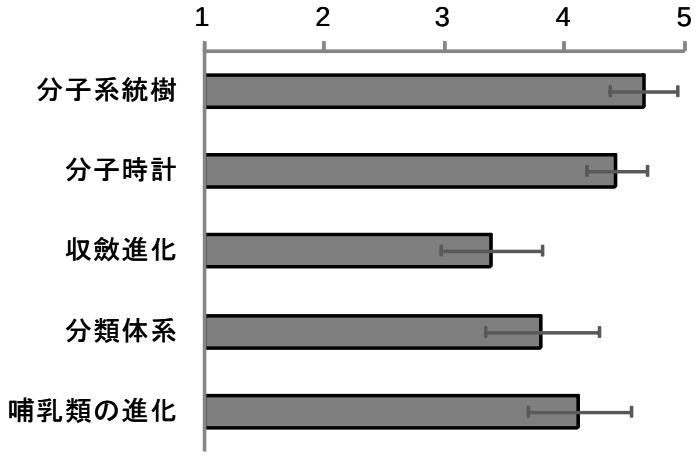


図3-8 講習会後の高校生物教員による感想

教員は感想を５段階で評価した（1：否定的，5:肯定的）．資料３－２参照.

3-3-4 考察

実習後に得点が上昇しなかった４つの質問項目のうち３つの質問項目①，②，⑧は３－１の調査において妥当性がないと判断した質問項目であり，それ以外の９つの質問項目に関しては，分子進化（⑥，⑦，⑩，⑫），大進化のタイムスケール（⑬），分類体系（③，

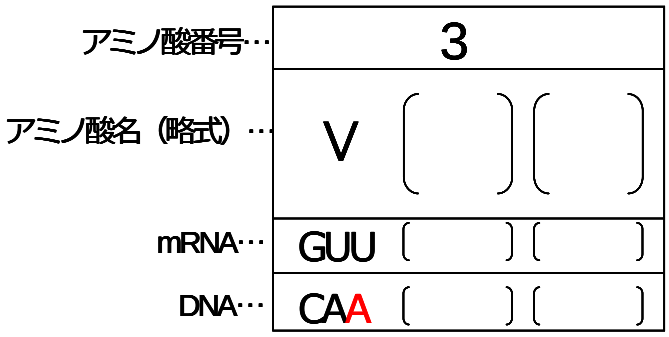
④，⑤）に関する理解度の高まりにより，その得点は実習後に上昇した（図３－６，資料３－２）．つまり，この実習教材は３－２で明らかとなった高校生物Ⅱの授業では理解しにくい内容のうち「同じタンパク質であってもそのアミノ酸配列は系統が離れるほど違いが大きくなること（質問項目）」「分子時計とは分子進化速度の一定性を意味すること（質問項目⑩）」，「種分化のタイムスケール（質問項目⑬）」，「分類体系（綱）（質問項目③）」，「二名法（質問項目④）」に関して，その理解を改善するのに役立つと言える．なお，３－２で明らかとなった高校生物Ⅱの授業では理解しにくい内容のうち「タンパク質のアミノ酸配列やDNAの塩基配列が遺伝的浮動によって進化すること」に関する質問項目は今回用いたテスト（資料３－２）には含まれていないため，この実習教材がその理解に影響するかどうかはわからない．だが，2012 年に行ったこの実習教材の実践ではその質問項目の理解が上昇する傾向が見られたことから（山野井　投稿準備中），その修正にも役立つと思われる．以上の結果と，実習後の生徒や教員による肯定的な感想を合わせて解釈すると，この実習教材は少なくとも日本の高校生が中立説と分子系統樹の関係の理解および中立説に関連する高校生物Ⅱの授業では理解しにくい内容を修正するのに役に立つものと考えられる．さらに，生徒の自由記述による感想から，この実習教材は収斂進化や相似の理解に関しても効果的であると思われる．これまでに開発されてきた分子系統樹実習の多くは英語圏の大学生用のものであったが（Kuzoff *et al*. 2009, Franklin 2010, Lents *et al*. 2010, Kvist *et al.* 2011），この分子系統樹実習は非英語圏の高校生においても効果的であることが分かった．大進化のタイムスケールや相似に関する誤理解に関しては，アメリカの大学においても報告されていることから（Catley and Novick 2009, Morabito *et al*. 2010），この実習教材は日本以外の国の高校生や大学生においても有効かもしれない．

一方で，生徒や教員の感想の中にはMEGAの英語表記は理解するのが難しかったという意見があった．この実習は日本の高校生に科学研究の世界における英語の重要性を気がつかせる貴重な機会を提供するものであるが，MEGA の日本語表記版が開発されればより多

くの生徒や教員に利用されるものになると期待される．

この実習では「タンパク質のアミノ酸配列の変異のうち中立な変異は遺伝的浮動によって集団中に固定する場合があり，集団が分岐してからの時間が経つにつれて，アミノ酸配列の種間変異が大きくなること」に関しては実習前に板書で説明した（図３－４）．実習後テストにおいて質問⑥や⑩の正答率が上昇していることから（資料３－１，図３－６），この点に関して実習を通してその理解が深まったと考えられるが，他の教材を追加するとより理解が深まるだろう．例えば Westerling（2008）はトランプを用いて，分岐してからの時間が経つにつれて種間のタンパク質のアミノ酸配列の変異（あるいは DNA の塩基配列の変異）が蓄積してくことを理解させる教材を開発している．この教材はトランプを用いているためトランプのカードが塩基配列を意味していることが分かりにくいと思われるが，トランプの代わりに図３－９a のようなカード（アミノ酸カード）を用いることでより理解が深まると思われる．この実習ではルーレットを使って突然変異によって変化する塩基を決め，その突然変異によってアミノ酸が変化するかどうかはコドン表を見て確認し，アミノ酸が変化する場合はカードにアミノ酸の変化を記入する（１世代あたりルーレットは１回とする）．５世代，１０世代，１５世代とこの過程を繰り返すことで（10 世代後に集団は２つに分かれる），生徒は時間が経つにつれて集団間のアミノ酸変異の程度が大きくなっていくことを体験する教材である．このカード教材を追加した分子系統樹実習（図３－９b）を行ったところ，分子系統樹の原理に関する理解がさらに深まるという結果が出ている（山野井　投稿準備中）．これらの教材に遺伝的浮動に関する教材（例えば Russo & Voloch. 2012）と組み合わせることで，中立説の理解は一層深まるだろう．

a)アミノ酸カード



b）授業のようす

図3-9 アミノ酸カード（a）とそれを用いた授業実践（b）

3-4　まとめ

高校生物Ⅱにおいて進化を学習した大学 1 年生を対象とした質問紙調査の結果，中立説を基盤とする分子進化および系統分類に関して「タンパク質のアミノ酸配列や DNA の塩基配列が遺伝的浮動によって進化すること」「同じタンパク質であってもそのアミノ酸配列は系統が離れるほど違いが大きくなること」「分子時計とは分子進化速度の一定性を意味すること」「種分化のタイムスケール」，「分類体系（綱）」「二名法」の理解が不十分であることが明らかとなった．このような内容の理解を改善し得る実験・実習教材として Kuzoff et al.（2009）によって開発された分子系統樹実習に注目し，生徒にとって馴染み深く分子の機能（酸素を運搬する）が分かりやすいヘモグロビンを利用する，分子系統樹の原理を実習前に説明する，分子時計を用いた分岐年代の推定やインターネットを利用した哺乳類の分類体系の調べ学習を分子系統樹実習に追加する等の改良を行った．その結果，実習後にはこれらの内容の理解を改善させることができた．さらに，中立説および分子系統樹の原理の理解を一層深める教材としてアミノ酸カードを紹介した．

４章　総合考察

4-1　本研究の要約

１章の１－１では，増え続ける科学の知識を「自然現象のしくみ」として連関させて扱うことを提案した．そして，生物教育では自然現象のしくみの中でも「進化のしくみ」（自然選択と中立説）を扱うことの重要性について論述した．その理由は，進化のしくみは生物学の知識の強力な接続装置であり，またその理解を転移させることができれば幅広い内容の理解へと繋がり得るからである（図１－１）．１－２では現代進化学における進化のしくみを小進化と大進化に分けて説明した．その中で分子レベルの進化は主に中立説によって，表現型レベルの進化は自然選択によって説明できることを述べた．また，ダーウィン以前の説としてラマルク説，自然神学，目的論的進化を説明した．１－３では，第１章で述べたように進化のしくみを教えることは重要と考えられるが，日本の公教育（主に中等教育に焦点）では進化の扱いが軽視されてきたため，進化を重視する新学習指導要領の本格実施を控えてはいるものの，実験・実習教材がほとんど開発されていないため授業においても実験・実習があまり実施されておらず，実験・実習教材の開発が急務であることを述べた．また，日本では現在でも社会進化論が広く蔓延していることにも触れた．１－４では，進化のしくみに関する実験・実習教材に求められる４つの条件として以下を挙げた．（１）理科の教材に求められる以下の必要条件（教科書で学習した内容と強く関連している，原理が良く分かる，丈夫である，実験材料が安価である，実験準備が簡単である，季節に関係なく実施できる）を満たしている教材．（２）現在の日本の理科教材の問題点を克服する教材（生徒実験の結果が失敗／成功の二元論ではなく，また DNA レベルから種レベルまでを接続する分野横断的な教材）．（３）ハンズ・オンの要素と「構造化された探究」の要素を取り入れた教材．（４）ミス・コンセプション，あるいは高校生物Ⅱの授業では理解しにくい内容を修正する教材．１－５では，本研究の目的は「アメリカを中心に蓄積されてきた進化のしくみに関するミス・コンセプションに関する研究や実験・実習教材の開

発研究を参考にしつつ, 高等学校理科の新学習指導要領に基づく生物教育の理念に則した, 進化のしくみ（自然選択・中立説）に関する実験・実習教材を，教材を用いた授業実践とその教育効果の測定を通して，提案すること」であると述べた．新学習指導要領に基づく生物教育はすでにスタートしているため，その理念に則した進化のしくみに関する実験・実習教材の提案は急務である．そのため，上述した（1）～（4）の多くを満たし，またこれまで開発されてきた実習教材にはない優れた特徴を有している自然選択教材オリガミバード（Westerling 1992）と MEGA を利用した分子系統樹実習（Kuzoff et al.2009）に変更を加えることでこの目的に応えることを述べた．

2 章では，まず自然選択に関するミス・コンセプションを，大学 1 年生（高校生物Ⅱにおいて進化学習済み）を対象とした質問紙調査によって明らかにしたことを述べた．次いで，そのミス・コンセプション（目的論的な進化観）を修正できるよう，自然選択教材オリガミバードに，配偶子突然変異 BOX の開発・導入を主とするいくつかの変更を加えたこと，その結果，実習後には目的論的な進化観を有している生徒の割合を減少させることができたことについて述べた．最後に，自然選択と種分化の過程を繋げて理解できるようオリガミバード・シミュレータ（OBS）という PC ソフトを開発し，実習後には DNA の変化から種分化に至る過程に関する理解を部分的に上昇させることができたことを述べた．

3 章では，2 章と同様に，中立説を基盤とする分子進化および系統分類に関して高校生物Ⅱの授業では理解しにくい内容を大学 1 年生対象（高校生物Ⅱにおいて進化学習済み）の質問紙調査によって明らかにしたことを述べた．次いで，その内容を正しく理解できるよう Kuzoff et al.（2009）によって開発された分子系統樹実習に中立説に基づく分子系統樹の原理の事前説明などの変更を加えたこと，その結果，実習後にはこれらの内容の理解を改善させることができたことについて述べた．最後に，中立説および分子系統樹の原理の理解を一層深める教材としてアミノ酸カードを紹介した．

以下では，これらの結果を踏まえて，本研究の新規性と意義について述べていく．

4-2　本研究の新規性・意義

4-2-1　新学習指導要領における高等学校の生物教育で有用な実験・実習教材

本研究の最大の意義は，新学習指導要領に基づく高等学校の生物教育において利用できる進化のしくみ（自然選択・中立説）に関する実験・実習教材を提案できたことである．新学習指導要領（文科省 2009）に基づく高等学校の生物教育では，進化のしくみは自然選択と中立説を中心に扱い，種分化や分子系統樹の扱いも重視されていることから，表現型や種などのマクロレベルの理解に留まることなく，DNA などのミクロなレベルからも連関させて理解できることが求められるようになった．その理念に則した実験・実習教材を提案するために，オリガミバードに，ランダムな突然変異による変異の創出と選択の過程の接続，さらに自然選択と種分化の過程の接続が理解できるようになることを意図した変更を行った．クジラ分子系統樹実習には，中立説による分子系統樹の原理を踏まえて分子系統樹を実際に描くように，中立説に関する理解を分子時計や分類体系まで連関できるように変更を加えた．その結果，本教材の有用性を示す２つの結果を得た．１つは，両教材ともミス・コンセプションの修正，通常の授業では理解しにくい内容の理解の改善することができたことである．２つめは，現職の高校生物教員からもその教育効果や授業での有用性を示す評価を得たことである（図３－８）．本論文ではクジラ分子系統樹実習についての教員評価のみを示したが，オリガミバード実習に対しても同様の評価を現職の高校生物教員から得ている（山野井　準備中）．以上から，日本の高校の授業で利用できる進化のしくみに関する実験・実習教材はほとんどなかったが（１－２－３参照），本研究において提案した２つの実験・実習教材は日本の高校の授業で利用される実験・実習教材となったと考えられる．さらに，本研究で提案した２つの実験・実習教材は新学習指導要領における新科目「生物（４単位）」の検定教科書（東京書籍）に掲載されることになったため，高校の教育現場で利用される可能性は高いと考えている．

4-2-2　本教材の教育効果を発揮するための注意点

ここで，その教育効果を発揮するために本教材を利用する際の注意点を２点述べたい．まず，通常の授業においても常日頃，進化のしくみへの興味を持たせる教授を心掛けることが大切である．当然のことであるが，進化のしくみに興味がなければ，それに関する実習にも興味を持てないだろう．生徒は生物界の変遷など進化自体には興味があったとしてもそのしくみにまで興味を持っているとは限らないため，進化のしくみに興味が向くような教授を心掛ける必要があると言える．元来ヒトはしくみへの興味を持ちやすいと言われている．例えば，子どもにボルト・ロックを動かし少し離れたところにあるベルが鳴ることを見せると，子どもたちはおもしろがってこの装置を触り続けるだけでなく，そのしくみに興味を持ち，内部に隠されたロックとベルをつなぐひもを探そうとする（Condry & Koslowski 1979）．この事例は平均年齢４歳のこどものものであるが，高校生に進化のしくみを教える際であっても共通する部分はあるだろう．具体的には，例えば「フィンチのくちばしの形状の変化は自然選択によって説明できます」ではなく「フィンチのくちばしの平均値はわずか数年の間に大きくなりました．いったい何が起こったのでしょうか？」や，「DNA 配列の比較によりパンダはクマに近いことが分かりました」ではなく「パンダとクマの DNA 配列の違いは彼らが系統的に近縁であることを意味しています．なぜそう考えることができるのでしょうか.」など問いかけ方を変えることで，進化のしくみへの関心を喚起できると思われる．そういった教授を常日頃心掛けていれば，オリガミバード実習や分子系統樹実習への生徒の取り組み方は積極的なものになり，より多くのことを学べると期待できる．

もう１つは，本実習を通して，科学の知識だけでなく科学についての知識（１－１参照）も身に付けることを意図した教授を心掛けることが重要である．高等学校理科の学習指導要領（文部科学省 2009）において実験・実習の実施が重視されているのは，科学的な考え方を身につけるのに不可欠だからである．しかしながら，高等学校の理科の授業を通して

科学的な考え方が身に付いているとは言い難いのが現状であり，この原因の１つに，教師が実験・実験を通して科学的な考え方を身につけさせることを意図していないことが挙げられる．本研究で提案したオリガミバードには，すべての班の飛行距離を集計し平均値を計算することで，各環境における進化の傾向を判断するという活動が含まれている．この活動を通して，科学的な判断をする際には，定性的でなく定量的な思考も必要であることを認識させることを心掛ける必要がある．一方分子系統樹実習においては，MEGA の作業を通して完成する系統樹を班ごとに比較し，樹形やブートストラップ値がやや異なることを認識させるという活動が含まれている．この活動を通して，データから導かれていたとしても科学的知見（実習を通して完成した系統樹）は現時点での１つの仮説に過ぎず，仮説の信頼性を増すにはさらに多くのデータで補強する必要があること，科学はそのようなプロセスを経て進展してきたことを認識させることを心掛ける必要がある．これまで開発されてきた分子系統樹実習（表１－３）の多くは，分子系統樹と他のデータ（染色体・形態・生理・行動など）をもとに描いた系統樹の樹形を比較するという活動を含んでおり（Singer et al. 2001，Parker et al. 2004，Cooper et al. 2006，Kalinowski et al. 2006，Campo & Garcia-Vazquez 2008，Franklin 2010，Lents et al. 2010，Zhang 2012），このような科学的な考え方を強化するには，クジラ分子系統樹実習に更なる変更を加えることも有効であろう．

4-2-3　生物学の知識の接続を促す実験・実習教材

アメリカを中心に開発されてきた進化のしくみに関する実験・実習教材（１－４－３）と比較した際，本研究で提案した両実験・実習教材は，生物学の知識の接続への貢献とミス・コンセプションの修正，科学コミュニケーションへの寄与という３つの新規性を有している可能性がある．

１章において「進化のしくみ」は生物学の知識の接続装置であると述べたが（図１－１①），本研究で提案した実験・実習教材は，進化のしくみの理解を通して，多くの生物学の

基礎的な知識（DNA，突然変異，中立，変異，適応度，自然選択，遺伝的浮動，小進化，地理的隔離，生殖隔離，生物学的種概念，種分化，大進化，分子時計，分類体系など）を連関させて理解するのに役立つ教材であると考えられる．まず，自然選択教材オリガミバードに関して，配偶子突然変異 BOX（GMB）を開発・導入したことにより，突然変異によって DNA が変化し，さらにその DNA の変化によって表現型（羽の形態・飛行距離）が変化し，適応度（生存率）が変化する過程を繋げて理解させることができる教材となった．さらに，オリガミバード・シミュレータ（OBS）を開発・導入したことにより，上述した過程と地理的隔離による種分化の過程をも繋げて理解させる教材となった．DNA の変化から地理的隔離による種分化の過程までを連関させて理解できるようになったことは，OBS 実習後の質問紙の結果から伺える（図２－１５および資料２－２　質問項目⑨）．世界的に見ても，１つの教材でこれほど多くの生物学的知識を連関させて理解出来得る教材は本教材を除いて見当たらず，本教材は自然選択に関連する知識を効果的に学習することができる貴重なものであると考えられる．次いで，クジラ分子系統樹実習に関しては，Kuzoff et al.（2009）の分子系統樹実習に，中立説との関連を意識した分子系統樹の原理についての実習前の説明，分子時計を利用した分岐年代の計算，分類体系の調べ学習を導入したことにより，中立なアミノ酸変異を利用して系統関係や分岐年代を推定できること，その系統関係を踏まえて分類体系が整理されていることを理解できる教材となった．オリガミバードと同様に，分子系統樹を描きながら，これほど多くの生物学的知識を連関させて理解させることが出来得る教材は世界的に見ても珍しく，中立説に関連する知識を効果的に学習することができる貴重なものであると考えられる．しかしながら，クジラ分子系統樹実習は中立説との関連に関しては板書で説明しているにすぎず，中立説と分子系統樹の連関に関する生徒の理解は十分ではないと思われる．そのため，３－３の最後に紹介したアミノ酸カードを使った実習（図３－９）を追加することで，DNA の突然変異とアミノ酸の中立な変異の関係，中立変異を利用して系統関係を推定できることに関する理解を深めることは

重要である．実際，このアミノ酸カードを使った実習を分子系統樹実習の前に導入することで，「分子進化の中立説を理解している」や「分子系統樹の原理を理解している」の肯定度が有意に上昇し，また自由記述の感想には「アミノ酸配列がどうやって変化するのか前半のカード実習で良く分かった」という意見が複数見られたことから（山野井準備中），このアミノ酸カードを使った実習は中立説と分子系統樹の理解を連関させる上で有効であると言える．

4-2-4　ミス・コンセプションを修正する実験・実習教材

２点目は，ミス・コンセプションの修正や通常の授業で理解しにくい内容の理解に繋がる実験・実習教材となったことである．これまで開発されてきた自然選択や分子系統樹に関する実験・実習は，探究性は重視されてきたものの教育効果の検討を伴っていないものが多く（表１－２，１－３），ミス・コンセプションや通常の授業で理解しにくい内容の理解に繋がるかどうかは不明であった．そのため，この点に関しても本研究で提案した２つの教材は新規性があると言える．オリガミバードに関しては，配偶子突然変異 BOX の導入により，突然変異のランダムな過程とランダムでない選択の過程が繋がり，通常の授業では修正しにくいことが多くの国で共通して報告されている「目的論的な進化観」を改善することができた点は大変意義がある．日本以外の国においても，この改良版オリガミバードが目的論的な進化観の修正に貢献するかどうかに関しての調査研究が進むことを期待したい．クジラ分子系統樹実習に関しては，本研究による質問紙調査の結果明らかとなった高校生物Ⅱの授業では理解しにくい内容である「タンパク質のアミノ酸配列や DNA の塩基配列が遺伝的浮動によって進化すること」「同じタンパク質であってもそのアミノ酸配列は系統が離れるほど違いが大きくなること」「大進化のタイムスケール」等の理解を改善することができた点は意義がある．将来，中立説に関して通常の授業では理解しにくい内容に関する調査が日本以外の国でも行われ，日本と共通性が発見されれば，この教材の価値は

一層高まるだろう.

4-2-5　科学コミュニケーションへの寄与

３つ目の本研究の新規性として，科学コミュニケーションへの寄与を挙げたい.

自然誌博物館の来館者は一般の中でも進化に関心が高く，関連する科学的知識も豊富であると考えられるが，対象とする種（特にヒト）によっては創造論的な考え方を示したり，自然選択に関するミス・コンセプション（目的論的な進化観やラマルク的な進化観）を保有していることが報告されている（Diamond & Evans 2007, Evans 2008）．これまで開発されてきた自然選択に関する教授法（表１－２）にはミス・コンセプションの修正に有効であるものがあるが，数日間の時間を要するものがほとんどであり，科学館の来館者に対してそれを利用した教授を行うのは難しい.

進化のしくみに関する理解を深めることを目的とした展示は行われているが，その教育効果はあまり期待できない．例えば，2003 年にアメリカ中西部の自然誌博物館が集まり企画した展示 Explore Evolution は，現在行われている研究を含む複数の種に関する進化研究（HIV の起源，珪藻の多様性と種分化，アリと菌類の共進化，ショウジョウバエの適応放散，フィンチのくちばしの進化，ヒトとチンパンジーの系統関係，クジラの起源）をインタラクティブかつマルチメディアな要素を多く含む形で紹介した画期的なものであり，すべての展示は変異，遺伝，自然選択，時間に関する理解が深まるよう配慮されたものであるが，その展示を見た来館者は多くのミス・コンセプションを含む形でそれらの展示の内容を説明した（Diamond & Evans 2007）．自然史博物館は一般の人が進化に関する理解を深める唯一の機会であると考えられるが，来館者のミス・コンセプションを科学的に正しいものに置き換える有効な手段は提案されていないのが現状である（Diamond & Evans 2007）.

これまで開発されたきた教授法（表１－２）と異なり，本研究で提案したオリガミバードは比較的短時間（90 分程度）で実施可能であるため，科学館などの科学コミュニケーシ

ョンの場でも利用できるという利点があり，この現状を改善できる可能性を有していると考えられる．我々（山野井・岩嵜）は科学啓蒙のイベントにおいて，オリガミバードを使った科学教室を開催しており，その活動を通して，本教材を利用した実習はこどもから大人までの幅広い年代で意欲的に取り組めることが分かった（図４－１）．今後，一般の人々のミス・コンセプションの改善にも有効であるかを調査していく予定である．

このように本研究で提案した実験・実習教材は３つの新規性を有すると考えられるが，その新規性を立証するには他の実験・実習教材との教育効果の比較が必要であり，今後の課題である．

図4-1　サイエンス・デイのようす

サイエンス・デイは東北大学にて毎年行われている科学教育推進を目的とする無料のイベントである．2012年7月15日，下記の内容で参加した．
山野井貴浩・岩嵜航（東北大学生態適応グローバルCOE feat. TY）
「架空生物オリガミバードを作って進化が起こるしくみを体験しよう！（中学生～大人対象）」

4-3　本研究の限界

本研究の限界として，提案した教材がどれほど転移に貢献し得るか不明であること，教材の教育効果の測定方法が不十分であることが挙げられる．

4-3-1　理解の転移について

１章において「進化のしくみ」は生物学の知識の接続装置であり，なおかつその理解を転移させることができれば生物学の幅広い内容の理解に繋がると述べた（図１－１②）．OBS 実習（２－４）後の感想において「どのように DNA が変化していけばより進化していくかは偶然により決まるものに近いと思った．そして生物の種の幅を生み，適応したものが生き残る．これはそれほど環境に適応するのが大変であることを示していると思った．」や「社会性昆虫のアリは目も見えず，声も出さないのに，我々のような分業性社会になっているのも，なんか納得できるような気がした．」があったことから，オリガミバード実習を通して自然選択を理解し，その理解を転移させることで，生物の適応的変化や生物の多様化に関する理解（図１－１②）が深まった可能性はある．しかしながら，クジラ分子系統樹実習を通して得た中立説の理解を，生物の適応的変化や生物の多様化の理解へと転移させることができるかについても不明であり，更なる調査が必要である．

Bransford et al.（2000）は「転移は，学習内容や問題解決の手順を記憶することによって生じるのではなく，課題を良く理解しながら学習することによって生じる」「文脈を超えた転移を生じさせるためには，学習の際に複数の文脈を用いたり，他の類似文脈での適用例を示すのが効果的である．」と述べている．前者の，課題の理解に関しては，本研究で開発した実習教材は実習前後テストの結果等から判断する限り優れていると考えられ，転移が生じる条件を備えていると言える．一方，後者の，文脈を超えた転移を促すためには，自然選択に関する教授法（Passmore & Stewart 2002）にもあるようにその理解を他の文脈で利

用する経験を重ねる場を設けること，つまり両教材を用いた実習授業後に扱う内容（例えばダーウィンフィンチのくちばしの進化，インフルエンザウィルスの進化，３ドメインの分子系統樹）が，実習教材で扱った自然選択や中立説で説明できることを理解させるような授業を意識することが大切だろう．

自然選択や中立説の考え方は，文化の進化（佐倉 2001，Aunger 2001），遺伝的アルゴリズム（Holland 1975, コーザら 2003, ミンデル 2009）, ハベルの生物群集中立説（Hubbel1 2001）など様々な学問分野に応用されている（図１－１③）．これらの学際的な内容を中等教育段階等でどこまで扱うべきかに関しては議論が必要になるが，その考え方を理解することは将来，研究そのものについて幅広く学際的な視野，つまり様々な角度から物事を吟味する視点を身につけることに繋がり得るのである．もちろんこれは科学リテラシーの重要な要素である．そのため，オリガミバード実習や分子系統樹実習で理解した進化のしくみに関する理解がこれらの学際的な内容を理解する際に役立つことも期待される．

4-3-2　教育効果の測定方法と長期の学習効果

さらに本研究の限界として，教材の教育効果の測定方法が不十分であることが挙げられる．本研究における実験・実習教材の教育効果の評価は，実習前後に行ったテストによるものであった．そのため，２つの大きな課題が残る．１つは，長期の教育効果である．質問紙調査の結果から実習直後には教育効果があったと言えるが，長期の教育効果に関しては言及できない．だが一方で，今年度（2012 年度）に行った実習では，実習後の感想において，両教材ともに「記憶に残る実習であった」と多くの生徒が回答しているため（Data not shown），詳細については更なる調査を必要とするが，長期の教育効果に関しても期待できるのではないかと考えている．Alters & Alters（2002）は「進化概念の理解には長時間、繰り返し、その考え方に触れさせることが必要であり、ある実践は踏み石の１つにすぎないかもしれない」と述べており，短期的な学習効果であったとしても，その理解を長期的な

ものへと変化させるための方法を考えることも大切である．試験の前だけでなく，毎授業において進化のしくみに関するコンセプトマップを描かせることで，その理解を長期的なものに変えることができる可能性はある（Alters & Alters 2002）．

もう１つは，他の教材と比較した際の教育効果である．理想的には，均質な集団に対して複数の実験・実習教材を用いた授業を行い，同一の質問紙等を利用して教育効果の比較を行うべきである．しかしながら，前述したように，日本においては進化のしくみ（自然選択・中立説）に関する実験・実習教材がほとんど開発されておらず，比較すべき実験・実習教材が見当たらなかった．今後，日本において自然選択や中立説に関する実験・実習教材を開発する際には，本研究で提案した２つの教材を比較対象とすることができるため，本研究は更なる研究の足場を整えたと言うことができるだろう．

4-4　結論と今後の展望

本研究では，進化を重視する新学習指導要領の理念に則した実験・実習教材として，自然選択教材・オリガミバードおよび中立説教材・クジラ分子系統樹実習を提案した．これらの教材は通常の授業では理解しにくい内容の理解に繋がること，その教育効果や教育現場での有用性に関する教員の評価も高いことから，新学習指導要領に基づく生物教育において利用されると考えられる．また，これらの実験・実習教材はアメリカを中心に開発されてきた実験・実習教材と比較しても，それを利用した授業を通して多くの生物学的知識を連関させて理解することができる，ミス・コンセプションを修正できるあるいは高校生物Ⅱの授業では理解しにくい内容の理解を深めることができる，科学コミュニケーションにおいて利用できるという新規性を有している可能性がある．さらに，本教材を利用した授業内容をその後の授業内容と関連させていくことで，本教材を利用した授業を通して学習した進化のしくみに関する理解を，生物の適応的変化や生物の多様化や生物学以外の学問分野の理解へと転移させることも期待される．これまで日本においては自然選択や中立説に関する教材はほとんど開発されてこなかったが，本研究で開発した両教材はその教育効果が長期的なものかどうかに関して更なる調査が必要になるものの，今後，自然選択や中立説に関する教材を開発する際の比較対象に成り得ることから，本研究は更なる教材開発の研究の足場を整えたと言える．

4-4-1　染色体・進化発生学

最後に，本研究で提案した２つの教材の更なる発展の方向について述べたい．まず両教材に共通して言えることは，両教材とも DNA やタンパク質レベルの突然変異を扱っており「染色体」の視点が含まれていない．染色体レベルの突然変異が種分化に寄与していることもあるため，オリガミバードに染色体レベルの突然変異も導入することも検討していき

たい．分子系統樹実習に関しても，染色体構造からも系統樹を描く実習（Lents et al. 2010）を追加することを検討していきたい．これらの改良による DNA と染色体を連関させて理解できるようになることが期待される．

また，進化発生学の知見を進化教育に導入することで，遺伝子の変化が大きな形態変化を引き起こし得ることを理解させることは進化の力を生徒に伝える上で効果的であると考えられるが（Gilbert 2003，キャロル 2005），オリガミバードに関しては，遺伝子の変化と発生をリンクさせることで，進化発生学の要素を加えることも可能である．

4-4-2　自然選択に基づく系統樹思考

さらに，もっとも重要な発展の方向として，両教材をリンクさせ，自然選択の理解を基にした系統樹思考（tree-thinking）を養成していくことを提案したい．

Catley（2006）はこれまでの進化教育の研究は，自然選択による小進化の教育に焦点を当ててきたために，大進化に関する教育研究がほとんどなされていないと警鐘を鳴らした．Catley の論文は Baum et al.（2005）が *Science* 誌に発表した論文の影響を受けていると思われる．Baum らはその論文の中で，系統樹の読み方に関する質問紙調査を大学生対象に行った結果，多くのミス・コンセプション（左から右に向かって進化が進んでいる，種の少ないクレードは進化が進んでいない）が広く蔓延していることを報告した．この原因として，これまで系統樹の読み方を教えることは高校や大学の生物学の授業で行われてこなかったが挙げられる（Phillips et al. 2012）．その反省を生かし，彼らの論文発表以来，進化教育の世界では系統樹の読み方に関するミス・コンセプションに関する調査や，それらのミス・セプションの修正を意図した教材の開発が非常に盛んになっている（Baum & Offner 2008，Perry et al. 2008，Halverson 2010，Meisel 2010，Morabito et al. 2010，Maroja & Wilder 2012）．例えば，Phillips et al.（2012）は与えられた系統樹を正しく読む力が，系統樹に関する講義の受講によって変化するかを大学生対象に調査した．その結果，クレードのネスト構造に

関する理解は深まったものの，系統樹の樹形からどの種とどの種が近いかを判断する力はほとんど変化しなかったことを報告し，効果的な教授法（実験・実習教材の開発を含む）の開発が必要としている．

このように系統樹の読み方に関する研究は盛んに行われているが，これらの論文の中では系統樹思考（tree-thinking）とは系統樹の読み方（tree-reading）のみを指していることは問題であると思う．確かに，Baum らや Catley の論文以降，系統樹の読み方に関する教育研究は多くの知見を生み出しているものの，これまで盛んに行われてきた自然選択の教育に関する知見とは独立に進んでいる印象が強いのは残念である．系統樹思考とは系統樹の読み方も含まれるが，それ以上に大切なことは「生物がそれまで辿ってきた歴史を踏まえて生物を理解しようとすること」ではないだろうか．そして，生物がそれまで辿ってきた歴史は系統樹として表すことができるため，「系統樹を踏まえて生物を理解しようとすること」と言い換えることができるだろう．Dobzhansky（1973）が述べた「進化の光なしでは生物学は何の意味もなさない」という言葉は生物教育に関わる者なら知らない者はほとんどいないほど有名なものであるが，まさにこの系統樹思考の大切さを主張していると思われる．この系統樹思考には自然選択の視点が欠かせない．ダーウィンが遺した descendant with modification という言葉は，生物の「由来をもちながら変化していく」性質を表わしており，その主要な変化をもたらすしくみこそが自然選択である．つまり，系統樹思考と自然選択は不可分であり，それらを連関させた教授が必要と言える．系統樹は分類学だけのものではない．生物の種を整理するためだけのものではない．系統樹を扱う際には，系統樹の幹や枝で起こってきた進化そして枝先で起こっている進化を自然選択の観点から考える力を養成することが大切である．

この自然選択に基づく系統樹思考の養成は小学校から始めた方が良いと思う．新学習指導要領（文科省 2009）に基づく生物教育は「生命の構造と機能」「生物の多様性と共通性」「生命の連続性」「生物と環境のかかわり」の４つの柱で内容が区分されている．このうち

「生物の多様性と共通性」では，生物は共通性を保ちながら進化によって多様化してきたことを扱う．生物の多様性と共通性に関して，小学校では３年生で「昆虫と植物」「季節と生物」を扱い，中学校では「植物の仲間」「生物と細胞」「動物の仲間」「生物の変遷と進化」を扱う．進化のしくみに関しては高等学校で扱うため，自然選択の理解を前提とした教育を行うことは難しい．各学年でどこまで扱うかに関しては今後の課題であるが，ただ昆虫・植物・哺乳類を観察したり，比較したり，分類するという分類思考ではなく，系統樹の視点で，つまり生物の系統で起こった重要な進化的変化に注目しながら，生物を見る視点を養うことはできるだろう．

そして高等学校では進化のしくみを扱うため，自然選択に基づく系統樹思考を本格的に養成することができる．その際，本研究で提案した２つの教材の内容を有機的にリンクさせることで，この系統樹思考の力を養成することができると考えている．オリガミバードは，GMB の開発・導入により，DNA の変化によって変異がもたらされること，DNA は変化しながらも自然選択を通して受け継がれていくことを理解できる教材となった．一方，クジラ分子系統樹実習は，中立説を踏まえた分子系統樹の原理に関する説明を導入したことにより，進化の過程で行った DNA やアミノ酸の変化を利用して系統を復元できることを理解できる教材となった．そのため，オリガミバードによる自然選択の理解を踏まえて，哺乳類の分子系統樹の樹形を読み，クジラとカバの共通祖先においてどのような遺伝子や形質の変化が起き，その変化がそれぞれの集団の繁栄にとってなぜ重要であったのかを考える学習活動が，両教材をリンクさせることで可能になる．

このように自然選択の視点から系統樹を読むという意味での「系統樹思考」の力を養成する教授法（実験・実習教材を含む）は世界的に見てもほとんど開発されていない．このようにオリガミバードとクジラ分子系統樹実習を有機的にリンクさせた教材を，日本発の「系統樹思考」の力を養成する進化教材として世界に発信していくことが今後の最大の課題である．今後はこれらの教材を進化させるとともに，小中高を通して進化的な見方を養

う教材の開発を行っていきたいと考えている.

引用文献

Alters, B. J. & Alters, S. M. (2001) Defending Evolution: A guide to the creation/evolution controversy. Jones and Bertlett Publishers, Sudbury, Massachusetts.

Alters, B. J. and Nelson, C. E. (2002) Perspective: Teaching evolution in higher education. *Evolution*, 56 (10): 1891-1901.

Alters, B. (2005) Teaching biological evolution in higher education: methodological, religious, and nonreligious issues. Jones and Bartlett Publishers, Inc. Sudbury, Massachusetts.

安斎育郎，板倉聖宣，滝川洋二，山崎孝（1996）理科離れの真相．朝日新聞社.

麻柄啓一，進藤聡彦，工藤与志文，立木徹，植松公威，伏見陽児（2006）学習者の誤った認識をどう修正するかール・バー修正ストラテジーの研究ー．東北大学出版会.

Aunger, R. (2001) Darwinizing Culture. Oxford University Press.

Bardapurkar, A. S. (2008) Do students see the “selection” in organic evolution? A critical review of the causal structure of student explanations”. *Evolution: Education and Outreach*, 1(3): 299-305.

Barber, N. A. (2012) Clay caterpillars: a tool for ecology & evolution laboratories. *The American Biology Teacher*, 74(7):513-517.

Barton, N. H., Briggs, D. E. G., Eisen, J. A., Goldstein, D. B. and Patel, N. H. (2007) Evolution. Cold Spring Harbor Laboratory Press, New York, USA.

Baum, D. A., DeWitt Smith, S., and Donovan, S. S. (2005) The tree thinking challenge. *Science* 310(5750): 979–980

Baum, D. A. & Offner, S. (2008) Phylogenies & tree-thinking. *The American Biology Teacher*, 70(4):222-229.

Baumgartner, E. & Duncan, K. (2009) Evolution of students’ ideas about natural selection through a

constructivist framework. *The America Biology Teacher*, 71(4): 218-227.

Bishop, B. A., Anderson, C. W. (1990). Student conceptions of natural selection and its role in evolution. *Journal of Research in Science Teaching*, 27: 415-427.

Blount, Z. D., Borland, C. Z., Lenski, R. E. (2008) Historical contingency and the evolution of a key innovation in a experimental population of Escherichia coli. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 105(23):7899-7906.

Brumby, M. N., (1984). Misconceptions about the concept of natural selection by medical biology students. *Science Education*, 68: 493-503.

Bransford, J. D., Brown, A. L. & Cocking, R. R. (2000) How people learn. 森敏昭, 秋田喜代美（監訳）授業を変える. 北大路書房. 2007 年（第 5 刷）.

Brewer, C. A. & Zabinski, C. (1999) Simulating genetic change in a large lecture hall: The ultimate bean counting experience. *The American Biology Teacher*, 61(4): 298-302.

BSCS.(2006) BSCS Biology A Molecular Approach. Glencoe/McGraw-Hill Companies, Inc. Ohio, USA.

Buckberry, S. & da Silva, K. B.(2012) Evolution: improving the understanding of undergraduate biology students with active pedagogical approach. *Evolution: Education & Outreach*, 5:266-273.

Burton, S. R. & Dobson, C. (2009) Spork & Beans: addressing evolutionary misconceptions. *The American Biology Teacher*, 71(2):89-91.

Cain, M., Damman, H., Lue, R. and Yoon, C. (2002) Discover Biology, 2nd ed. Sinauer Associates, Inc., MA, USA.

Campbell, N. A. and Reece, J. B. (2005) Biology, 7th ed. Pearson Education, Inc., NJ, USA.

Campo, D. and Gracia-Vazquez, E. (2008) Inquiry-based learning of molecular phylogenetics. *Journal of Biological Education* 43(1): 15-20.

Cann,R. L., Stoneking, M. & Wilson, A. C. (1987). Mitochondrial DNA and human evolution. *Nature*, 325: 31-36.

ショーン・B・キャロル（2005）シマウマの縞　蝶の模様－エボデボ革命が解き明かす生物デザインの起源．渡辺正隆・経塚淳子（訳）．2007 年．光文社.

Catley, K. M. (2006) Darwin's missing link: a new paradigm for evolution education. *Science Education* 90(5): 767-783.

Catley, K. M., and Novick, L. R. (2009) Digging deep: Exploring college students' knowledge of macroevolutionary time. *Journal of Research in Science Teaching* 4(3): 311-332.

ティム・コールトン（著）染川ら（訳）（2000）ハンズ・オンとこれからの博物館．東海大学出版会.

Christensen-Dalsgaard, J., Kanneworff, M. (2008). Evolution in Lego®: a physical simulation of adaptation by natural selection. *Evolution: Education and Outreach,* 2: 518-526.

Clores, M. A. & Limjap, A. A. (2006) Diversity of students' beliefs about biological evolution. *Asia Pachific Journal of Education,* 26(1):65-77.

Condry, J. & Koslowski, B. (1979) Can education be made intrinsically interesting to children? In L. G. Katz (Ed.), Current topics in early childhood education, Vol.2. Ablex.

Cooper, S., Hanmer, D., Cerbin, B. (2006) Problem-solving modules in large introductory biology lectures. *The American Biology Teacher,* 68(9): 524-529.

Cummins, C. L., Demastes, S. S., Hafner, M. S. (1994) Evolution-biological education's under-researched unifying theme. *Journal of Research in Science Teaching,* 31(5):445-448.

Demastes, S. S., Settlage, J., Good, R. G. (1995) Students' conceptions of natural selection and its role in evolution: Case for replication and comparison. *Journal of Reseach in Science Teaching*, 32:535-550.

Derting, T. L. & Ebert-May, D. (2010) Learner-centered inquiry in undergraduate biology: positive relationships with long-term student achievement. *CBE-Life Science Education*, 9:462-472.

Dickinson, W. J. (1998) Using popular children's game to explore evolutionary concepts. *The American Biology Teacher*, 60(3):213-215.

Dobzhansky, T. **(**1973) Nothing in biology makes sense except in the light of evolution. *The American Biology Teacher*, 35:125-129.

Diamond, J. & Evans, E. M. (2007) Museums teach evolution. *Evolution*, 61(6):1500-1506.

Evans, E. M. (2008) Conceptual change and evolutionary biology: a developmental analysis. In Vosniadou, S. (ed.), "International handbook of research on conceptual change," Routledge, NY, USA.

Futuyma, D. J. (2009) Evolution, 2nd ed. Sinauer Associates Inc., MA, USA.

Franklin, W. A. (2010) Evolution and phylogenetic analysis: Classroom activities for investigating molecular and morphological concepts. *The American Biology Teacher* 72(2): 114-121.

Frey, F. M., Lively, C. M., Brodie III, E. D. (2010). Selection and evolution with a deck of cards. *Evolution: Education and Outreach*, 3: 114-120.

福井智紀（2000）高校生の進化概念についての調査研究－生物Ⅱ「生物の進化」学習後の生徒の進化概念の実態－．生物教育 40 (3,4):122-138.

福井智紀，鶴岡義彦（2001）主要な進化学説についての生徒の捉え方に関する研究－４つの進化学説に対する中学生・高校生・大学生の反応－．理科教育学研究 42(1):1-12.

福井智紀，鶴岡義彦（2002a）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.

福井智紀，鶴岡義彦（2002b）児童・生徒・学生の進化についてのイメージー進化をどのような現象と捉えているかー．千葉大学教育実践研究 9:35-44.

福井智紀（2006）進化教育の歴史と展望～進化の教授価値と今後の進化教育のあり方～. 理科の教室 2006 年 11 月号 pp.8-15.

布山喜章（2004）遺伝学からみた進化教育のあり方. 遺伝 58(4):67-72.

Futuyma, D. J. (2009) Evolution 2nd Edition. Sinauer Associates, inc. Massachusetts, USA.

Garvin-Doxas K., Klymkowsky M. W. (2008) Understanding randomness and its impact on student learning: lessons learned from building the biology concept inventory (BCI). *CBE-Life Science Education*, 7:227-233.

Gatesy, J. (2009) Whales and even-toed ungulates (Cetartiodactyla). In: Hedges, S. B. and Kumar, S. (eds), the Timetree of Llife, pp.511-515. Oxford University Press, Oxford, UK.

Gendoron, R. P. (2000) The classification & evolution of Caminalcules. *The American Biology Teacher*, 62(8):570-576.

Gilbert, S. F. (2003) Opening Darwin's black box: teaching evolution through developmental genetics. *Nature Review Genetics*, 4:735-741.

Green, J. F., Koza, A., Moshynets, O., Pajor, R., Ritchie, M. R. & Spiers, A. J. (2011) Evolution in a test tube: rise of the Wrinkly Spreaders. *Journal of Biological Education*, 45(1):54-59.

Gregory, T. R. (2009) Understanding natural selection: essential concepts and common misconceptions. *Evolution: Education and Outreach*, 2: 156-175.

Guerrierie, F. W. (1999) Beak adaptations. *Science Scope*, 22(4):19-21.

長谷川真理子（2004）進化を教える難しさ－進化の正しい理解の普及にむけて－. 遺伝 58 (4):78-81.

Heim, W. G. (2002) Natural selection among playing cards. *The American Biology Teacher*, 64(4):276-278.

Heitz, J. G., Cheetham, J. A., Capes, E. M., Jeanne, R. L. (2010) Interactive evolution modules promote conceptual change. *Evolution: Education & Outreach*, 3(3):436-442.

Hills, D. M. (2007) Making evolution relevant and exciting to biology students. *Evolution* 61:1261¯1264.

Holland, J. H. (1975) Adaptation in Natural and Artificial Systems. University of Michigan Press.

伊藤元己（2011）講座　生物の系統と新しい分類体系　第１回　五界説から３ドメイン体系へ．遺伝 66(1):2-7.

Halverson, K. L. (2010) Using pipe cleaners to bring the tree of life to life. *The American Biology Teacher*, 72(4):223-224.

早崎博之，鍋田修身，白石直樹（2011）あなたは「進化」をどのように教えますか？－新指導要領で「進化」はパワーアップ！－．日本生物教育学会第 90 回大会配布資料.

鳩貝太郎（2007）学習指導要領と生物教育の課題．*Anthropological Science*, 115:56-60.

鳩貝太郎（2010）現行学習指導要領から新学習指導要領へ．生物教育 51(special issue):5-8.

Hewlett, J. (2001) Trouble in paradise. *Journal of College Science Teaching* 30(6):366-369.

Heim, W. G. (2002). Natural selection among playing cards. *The America Biology Teacher*, 64: 276-78.

Heil, C. S. S., Manzanowinkler, B., Hunter, M. J., Noor, J. K. F., Noor, M. A. F. (2013) Witnessing evolution first hand: a K-12 laboratory exercise in genetics & evolution using *Drosophila*. *The America Biology Teacher*, 75(2): 116-119.

Heitz, J.G., Cheetham, J. A., Capes, E. M., Jeanne, R. L. (2010) Interactive evolution modules promote conceptual change. *Evolution: Education and Outreach*, 3(3): 436-442.

Herron, M. D. (1971) The nature of scientific inquiry. *School Review*, 79(2):171-212.

Hills, D. M. (2007) Making evolution relevant and exciting to biology students. *Evolution*, 61:1261¯1264.

平田泰紀（1994）歯列弓と進化の授業．遺伝48(9):58-64.

Hubbell, S. P. (2001) The Unified neutral theory of Biodiversity and Biogeography. Princeton

University Press.

井出耕一郎（1988）理科教材・教具の理論と実際．東洋館出版社.

池田博明（2004）高校『生物Ⅰ』でも進化を教えよう．遺伝58(4):40-44.

稲垣佳世子（2011）生物学の領域における概念変化．心理学評論54(3):232-248.

猪野俊平（1968）藻類から苔類へ．遺伝22(8):63-65.

板倉聖宣（1970）足はなんぼん？．国土社.

板倉聖宣（1986）理科教育史資料４．とうほう.

Jensen, M. S. & Finley, F. N. (1996) Changes in students' understanding of evolution resulting from different curricular and instructional strategies. *Journal of Research in Science Teaching*, 33(8):879-900.

Jensen, M. S. & Finley, F. N. (1997) Teaching evolution using a historically rich curriculum & paired problem solving instructional strategy. *The America Biology Teacher*, 59(4): 208-212.

Johnson, T. and Barton, N. (2005) Theoretical models of selection and mutation on quantitative traits. *Philosophical Transactions of the Royal Society B-Biological Sciences*, 360(1459):1411-1425.

Jones, T. C. and Laughlin, T. F. (2010). PopGen fishbowl: a free online simulation model of microevolutionary processes. *The American Biology Teacher*, 72(2):100-103.

Kalinowski, S. T., Taper, M. L., Metz, A. M. (2006a) How are human related to other primates?: A guided inquiry laboratory for undergraduate students. *Genetics*, 172:1379¯1383.

Kalinowski, S. T., Taper, M. L., Metz, A. M. (2006b) Can random mutation mimic design?: A guided inquiry laboratory for undergraduate students. *Genetics*, 174:1073¯1079.

亀田達也（2012）社会科学．日本進化学会（編）「進化学事典」共立出版.

川那部浩哉（監修）八尋克郎（編）（2008）オサムシ－飛ぶことを忘れた虫の魅惑．八坂書

房.

Kelemen, D. (1999) Why are rocks pointy? Children's preference for teleological explanations of the natural world. *Developmental Psychology*, 35:1440-1452.

Kelemen, D. & Rosset, E. (2009) The human function compunction: teleological explanation in adults. *Cognition*, 111:138-143.

Kimura, M. (1983) The Neutral Theory of Molecular Evolution. Cambridge University Press, Cambridge, UK.

北浦隆生（1984）血球の系統と分化．遺伝 38(8):63-66.

北浦隆生・濱脇英夫（1990）「人類の進化」指導上の工夫．遺伝 44(3):35-39.

加納圭（2010）科学の知識と科学についての知識の区別，及びトランスサイエンスを意識する重要性．生物教育 51(special issue):124-129.

加納圭，水町衣里，山水康平，田邊剛士（2012）高校生を対象とした萌芽的科学技術を生かした卓越性の科学教育プログラム開発．科学教育学研究 36(2):162-171.

清永嘉一・小山博靖・北村静一・横尾武夫（1971）自然科学教育の基本理念の検討−中等教育の場合−．大阪教育大学紀要20(5):1-26.

小林興（2008）科学リテラシーと新しい生物学教育の方向．生物科学 59(4): 244-252.

小林朋道（1998）カナヘビとハエの幼虫を使った自然選択の学習．遺伝 52(3):23-24.

小池達士，山口峰松，向平和，日詰雅博（2011）中学校における生徒が栽培や飼育を楽しみながら行う遺伝実験の実践報告．愛媛大学教育実践総合センター紀要 29:7-22.

コーザ, J.A.，キーン, M.A.，ストリーター, M.J.（2003）発明家に追いついた遺伝的プログラミング．日経サイエンス 2003 年 5 月号, 72-81.

小銭彩香・田中賢二（2011）日本の中学校における生物教育の歴史的分析－学習指導要領に基づいてー．岡山大学教師教育開発センター紀要 1:105-114.

Kuzoff, R. K., Kemmeter, S. B., McKinnon, J. S. and Thompson, C. P. (2009) Phylogenetic

Analysis: How Old are the Parts of Your Body? *Evolution: Education and Outreach*, 2(3): 405-414.

Kvist, S., Montanari, S. A., Yi, H., Fuks, B. and Siddall, M. E. (2011) Teaching biodiversity and evolutionary biology in a north American marine coastal environment. *The American Biology Teacher* 73(2): 72-77.

Lande, R. (1975) The maintenance of genetic variability by mutation in a polygenic character with linked loci. *Genetical Research*, 26(3): 221-235.

Lauer, T. E. (2000) Jelly belly jelly beans and evolutionary principles in the classroom: appealing to the students' stomachs. *The American Biology Teacher*, 62: 42-45.

Lederman, N. G. (1992) Students' and teachers' conceptions of the nature of science: A review of the research. *Journal of Research in Science Teaching*, 29 (4):331-59.

Lents, N. H., Cifuentes, O. E. and Carpi, A. (2010) Teaching the process of molecular phylogeny and systematics: a multi-part inquiry-based exercise. *CBE-Life Science Education,* 9(4): 513-523.

Lord, T. and S. Marino. (1993) How university students view the theory of evolution. *Journal of College Science Teaching*, 22(6): 353-357.

真船和夫・鷹取健（1981）生物指導法事典．むぎ出版.

Maier, C. A. (2001) Investing polar bear and giant panda ancestry. *The American Biology Teacher*, 63(9): 642-646.

Maier, C. A. (2004) Building a phylogenetic tree of the human & ape superfamily using DNA-DNA hybridization data. *The American Biology Teacher*, 66(8): 560-566.

Maroja, L. M. & Wilder, J. A. (2012) Where do I come from? Using student’s mitochondrial DNA to teach about phylogeny, molecular clocks, and population genetics. *Evolution: Education*

& Outreach, 5:501-507.

Mazur, A. (2005) Believers and disbelievers in evolution. *Politics and the Life Sciences*, 8(November):55-61.

Metzger, K. J. (2011) Helping students conceptualize species divergence events using the online tool "TimeTree: The Timescale of Life." *The American Biology Teacher*, 73(2): 106-108.

Meisel, R. P. (2010) Teaching tree-thinking to undergraduate biology students. *Evolution: Education and Outreach*, 3(4): 621-628.

見上一幸（2010）巻頭言　新たな生物教育の時代に向かって．生物教育 51(special issue):3-4.

Miller, J. D., Scott, E. C., Okamoto, S. (2006) Public acceptance of evolution. *Science*, 313:765-766.

ミンデル, D.P.（2009）実社会に生きる進化生物学．日経サイエンス 2009 年 4 月号，88-95.

三澤英一（1995）ヒトの進化への探究．遺伝 49(9):60-64.

宮田隆（1994）分子進化学への招待．講談社ブルーバックス.

宮下直，井鷺裕司，千葉聡（2012）生物多様性と生態学ー遺伝子・種・生態系．朝倉書店.

三宅征夫（2006）科学教育研究に携わった 34 年を振り返って．科学教育研究 30(1):48-50.

三好博親，向平和，日詰雅博（2011）探究型学習「シダ植物・コケ植物と種子植物の違いや共通点を観察から探ろう」の実践．愛媛大学教育実践総合センター紀要 29:23-28.

文部省（1989）高等学校学習指導要領解説　理科編　理数編．実教出版.

文部省（1999）高等学校学習指導要領解説　理科編　理数編．大日本図書.

文部科学省（2008）中学校学習指導要領解説　理科編．大日本図書.

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.

Morabito, N., Catley, K. M., and Novick, L. R. (2010) Reasoning about evolutionary history: The effects of biology background on post-secondary students' knowledge of most recent common ancestry and homoplasy. *Journal of Biological Education*, 44(4): 166-174.

森一夫（1971）教科書に現れた「進化論」の変遷について．科学史研究 II10:229-232.

森川久雄（1964）BSCS と日本の生物教育②BSCS の指導理念．遺伝 18(2):51-54.

森本弘一（1996）子供達の遺伝に対する認識．日本理科教育学会研究紀要 37(1):25-31.

村上忠幸（2005）理科・化学の探究学習を実現するために必要なこと．化学と教育 53(1):28-31.

村上忠幸（2011）授業「アゲハチョウの不思議を探る」をめぐってー探究学習という観点からみえることー．京都教育大学教育実践研究紀要 11:49-58.

村上陽一郎（1965）生物進化論に対する日本の反応―明治期のアウトライン．東京大学教養学部人文科紀要　比較文化研究 5:145-183.　村上陽一郎（1980）『日本人と近代科学』新曜社．に再録

武藤篤・北野日出男（1988）進化に関する教材開発．生物教育 28(3,4):194-201.

永田英治・田幡憲一（1992）生物探究入門⑥生物教育における測定教材ー何がどう測定されてきたか・されているのかー．遺伝 46(6):73-77.

中井咲織（2004）小学生でもすぐわかる進化の教え方ー中等教育での発想転換にむけてー．遺伝 58(4):56-66.

中井咲織（2010）進化でつづる『生物基礎』．生物教育 51(special issue):47-52.

鍋田修身（1994）現場教員の声ー進化教育に関するアンケートよりー．遺伝 58(4):50-55.

Nehm, R. H. and Reilly, L. (2007) Biology majors' knowledge and misconceptions of natural selection. *Bioscience*, 57(3):263-272.

Nehm, R. H et al. (2009) Does the segregation of evolution in biology textbooks and introductory courses reinforce students' faulty mental models of biology and evolution? *Evolution: Education & Outreach*, 2:527-532.

Nelson, C. E. (2008) Teaching evolution (and all of biology) more effectively: strategies for engagement, critical reasoning, and confronting misconceptions. *Integrative and*

Comparative Biology, 48(2):213-225.

Nikaido, M., Rooney, A. P. & Okada, N.(1999) Phylogenetic relationships among cetartiodactyls based on insertions of short and long interspersed elements: Hippopomamuses are the closest extant relatives of whales. *Proc. Natl. Acad. Sci. USA*, 96:10261-10266.

西岡正泰（1992）観察，実験のための教材論．日本理科教育学会（編）理科教育学講座６理科教材論（上）２章 pp.83-116.　東洋館出版.

O'Brien, T. (2000) A toilet paper timeline of evolution. *The American Biology Teacher*, 62(8):578-582.

OECD: PISA (2009) Assessment Framework: Key competencies in reading, mathematics and science.

Offner, S. (1994) Using chromosomes to teach evolution- II. Chromosomal rearrangements in speciation events. *The American Biology Teacher*, 56(2):86-93.

小川正賢（2010）これからの科学技術リテラシー．小林信一，小林傳司，藤垣裕子（編）社会技術概論．放送大学出版協会.

小倉康・松原静郎（2006）TIMSS1999 理科授業ビデオ研究の結果について．国立教育政策研究所紀要 136:219-232.

岡田典弘（2012）特集にあたって　種形成の現場－ビクトリア湖のシクリッドで何が起きているのか？**遺伝** 66(2):130-133.

Ondrej, V. & Dvorak, P. (2012) Bioinformatics: a history of evolution in silico. *Journal of Biological Education*, 46(4):252-259.

小野新平（1985）X 線写真を使った相同器官の観察実習．遺伝 39(1):89-92.

大石正芳・田幡憲一（1998）脊椎動物の呼吸器のつくりと進化．遺伝 52(3):14-18.

太田次郎，本川達雄（編）（2007）高等学校 生物Ⅱ．啓林館.

大鹿聖公，佐藤崇之，向平和，竹下俊治，鳥越兼治（2004）高等学校までの生物に関する

実験観察および飼育栽培経験についての調査分析．広島大学大学院教育学研究科紀要第二部 53:455-462.

オヤオ・シェラ，藤田剛志（2008）初等理科教育におけるハンズ・オン学習．千葉大学大学院人文社会科学研究科紀要　人文社会科学研究，第 17 号：35-46.

Park, S.B. (2012) South Korea surrenders to creationist demands. *Nature*, 486(7):14.

Parker, J. D., Ziemba, R. E., Cahan, S. H., Rissing S. W. (2004) An hypothesis-driven, molecular phylogenetics exercise for college biology students. *Biochemistry and Molecular Biology Education*, 32(2):108-114.

Passmore, C. & Stewart, J. (2003) A modeling approach to teaching evolutionary biology in high schools. *Journal of Research in Science Teaching*, 39(3):185-204.

Perry, J., Meir, E., Herron, J. C., Maruca S., Stal, D. (2008) Evaluating two approaches to helping college students understand evolutionary trees thorough diagramming tasks. *CBE-Life Science Education*, 7:193-201.

Phillips, B. C., Novick, L. R., Catley, K. M., Funk, D. J. (2012) Teaching tree thinking to college students: It's not as easy sa you think. *Evolution: Education & Outreach*, 5:595-602.

Posner, G. J., Strike, K. A., Hewson, P. W., Gertzog, W. A. (1982) Accomodation of a scientific conception: Toward a theory of conceptual change. *Science Education*, 66:211-227.

Raven, P. H., Johnson, G. B., Losos, J. B. and Singer, S. R. (2005) Biology, 7th ed. McGraw-Hill Companies, Inc., New York, USA.

Russo, C. A. M. & Voloch, C. M. (2012) Beads and dice in a genetic drift exercise. *Evolution: Education & Outreach*, 5:494-500.

Sadava, D., Hillis, D., Heller, C. and Berenbaum, M. (2009) Life: The Science of Biology, ninth edition. Sinauer Associates Inc. Massachusetts, USA.

Sakura, O. (1997) Similarities and varieties: a sketch on the acceptance of Darwinism and

sociobiology in Japan. *Biology and Philosophy*, 13: 341-357.

佐倉統（2001）遺伝子 vs.ミームー教育・環境・民族対立ー．廣済堂出版.

佐倉統，山野井貴浩（2010）知識ゼロからのダーウィン進化論入門．幻冬舎.

佐倉統（2012）社会と進化．日本進化学会（編）「進化学事典」．共立出版.

佐藤崇之，大鹿聖公（2005）教科書分析と教材研究から見た高等学校生物における進化の単元に関する一考察．広島大学大学院教育学研究科紀要第二部 54:17-24.

Schwendimann, B. A. (2011) Mapping biological ideas: Concept maps as knowledge integration tools for evolution education. Doctoral thesis. University of California, Berkeley.

瀬戸口明久（2004）日本における進化論の導入ー「受容」vs.「抵抗」モデルを超えてー．生物科学 56(1):23-30.

瀬戸口明久（2010）ダーウィンを記念する―日本における進化論受容をめぐる歴史認識の形成―．生物学史研究 83:1-19.

Settlage, J. H. (1994) Conception of natural selection: a snapshot of the sense-making process. *Journal of Research in Science Teaching*, 31(5):449-457.

Scharmann, L. C. (1993) Teaching evolution: Designing successful instruction. *The American Biology Teacher*, 55:481-486.

Sharp, J. (2002) Something's fishy in Paxton lake – a case on speciation in sticklebacks. *Journal of College Science Teaching*, 32(1):42-47.

嶋田正和（1997）高校で進化をどのように教えるか．科学 67(1):22-31.

嶋田正和（2004）進化をどのように教えるか？ー特集にあたって．遺伝 58(4):26-34.

嶋田正和（2007）進化の基本法則．細胞工学別冊 植物細胞工学シリーズ 23 「植物の進化ー基本概念からモデル生物を活用した比較・進化ゲノム学まで」 （監修： 清水健太郎，長谷部光泰），pp.27-34，秀潤社.

嶋田正和（2010）生態と進化を底流に置いた「生物基礎」と「生物」の捉え方．生物教育

51(1,2):23-33.

嶋田正和（2012）教科書における進化の取り扱い．日本進化学会（編）「進化学事典」．共立出版．

Sinatra, G. M., Berm, S. K., Evans, E. M. (2008) Changing minds? Implications of conceptual change for teaching and learnig about biological education. *Evolution: Education & Outreach*, 1:189-195.

Singer, F., Hagen, J. B., Sheehy, R. R. (2001) The comparative method, hypothesis testing & phylogenetic analysis. *The American Biology Teacher*, 63(7): 518-523.

塩川光一郎ら 他 11 名（2007）改訂版 高等学校 生物Ⅱ．数研出版．

Staub, N. L. (2002) Teaching evolutionary mechanisms: genetic drift and M&M's®. *BioScience*, 52(4):373-377.

Stearns, S. C. & Koella, J. C. (2008) Evolution in Health and Disease, 2nd edition, Oxford University Press.

鈴木宏昭（2008）理科教育における“Nature of Science”の教授・学習の意義－「科学的リテラシー」との関連を中心として－．白鴎大学教育学部論集 2(2):253-270.

Stohr-Hunt, P. M. (1996) An analysis of frequency of hands-on experience and science achievement. *Journal of Reseacrh in Science Teaching*, 33(1):101-109.

田幡憲一，成田智哉（2009）新しい高等学校学習指導要領とこれからの生物教育．遺伝 63(3):5-7.

武村政春（2005）DNA複製の謎に迫る．講談社ブルーバックス．

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.

安斎育郎・板倉聖宣・滝川 洋二・山崎孝（1996）理科離れの真相．朝日新聞社.

Tamura, K., Dudley, J., Nei, M. and Kumar, S. (2007) MEGA4: Molecular Evolutionary Genetics Analysis (MEGA) software version 4.0. *Molecular Biology and Evolution*, 24: 1596-1599.

Towle, A. (1999) Modern Biology. Holt, Rinehart and Winston, Texas.

筑波常治（1965）進化論の紹介．日本科学史学会編「日本科学技術史大系第 15 巻生物学」第一法規出版.

梅埜国夫，富樫裕，下野洋，上田博，滝沢利夫，白井馨，冷川昌彦，福田直（1989）ミニマム・エッセンシャルズの策定に基づいた高校「生物」教育課程試案．生物教育 29(1,2):3-16.

梅埜國夫（1992）生物教材論．日本理科教育学会（編）．理科教育学講座 7 理科教材論（下）第 3 章 pp.172-274．東洋館出版社.

梅埜國夫（1997）生物教育のミニマム・エッセンシャルズを求めて．遺伝 51(3):25-30.

畦浩二（1999）コケ植物の教材化．遺伝 53(8):52-57.

畦浩二（2003）光合成色素の定性分析から植物進化を考察する実践的研究．生物教育 44(1):10-18.

Vogt, K. D. (2002) A exercise to demonstrate the concept of an adaptive landscape & a simulation of complex systems. *The American Biology Teacher*, 64(8):605-607.

Vosniadou, S. (2008) International handbook of research on conceptual change.Routledge, NY, USA.

Wagner, G. P. (1989) Multivariate mutation-selection balance with constrained pleiotropic effects. *Genetics*, 122(1):223-234.

Ware, J. P. (2008) “Molecular clock” analogs: a relative rates exercise. *Bioscene* **34**(1): 30-35.

渡邊重義（2011）アメリカの高校生物教科書におけるデータ分析演習．科教研報 26(2):27-32.

Weiss, K. M. (2012) The Intelligent egg, and how it got that way: from genes to genius in a few easy

lessons. *Evolution Education & Outreach*, 5:194-202.

Welch, L. A. (1993) A model of microevolution in action. *The American Biology Teacher*, 55(6):362-365.

Welden, C. W. & Hossler, R. A. (2003) Evolution in the lab: biocide resistance in *E.coli*. *The American Biology Teacher*, 65(1):56-61.

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

Westerling, K. E. (2008) Using playing cards to simulate a molecular clock. *The American Biology Teacher*, 70(8):e37-e42.

Woese, C. R., Kandler, O. & Wheelis, M. L. (1990) Towards a natural system of organisms: proposal for the domains Archaea, Bacteria, and Eucarya. *Proc. Natl. Acad. Sci. USA* 87, 4576-4579.

矢島道子（1997）“進化”の授業がない．科学 67(1):37-38.

矢島道子（2001）科学史入門：お雇い外国人教師ヒルゲンドルフ．科学史研究 40:107-110.

矢島道子（2007）日本で最初の進化論の授業．学術の動向 8 月号:80-84.

矢島道子（2012）日本における進化学の発展：明治大正．日本進化学会（編）「進化学事典」共立出版.

八巻俊憲（2011）「ゆとり教育」政策と理科教育．吉岡斉・塚原修一・中山茂他（編著）新通史－日本の科学技術（第 3 巻），pp.213-232，原書房.

山野井貴浩（2008）進化のしくみの更なる理解のために－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－．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，佐倉統（2010）高校生物Ⅱの「進化」に関する教科書分析－進化の定義・突然変異・種・自然選択に注目して－ 生物科学 62(1):39-45.

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（2012）進化学の教材開発－高校の生物教育の現場から．遺伝 66(3):317-322.

Young, H. J. & Young, T. P. (2003) A hands-on exercise to demonstrate evolution by natural selection & genetic drift. *The American Biology Teacher*, 65(6):444-448.

湯澤正通（編）（1994）認知心理学から理科学習への提言．北大路書房

湯澤正通・稲垣佳世子（2011）日本における概念変化研究「概念変化研究」の特集にあたって．心理学評論 54(3):201-205.

Zhang, X. (2012) Teaching molecular phylogenetics through investigating a real-world phylogenetic problem. *Journal of Biological Education*, 46(2):103-109.

ウェブサイト

MEGA4: Molecular Evolutionary Genetics Analysis (MEGA)

http://www.megasoftware.net/ <Accessed 10/14/2011>

National Center for Biotechnology Information.

http://www.ncbi.nlm.nih.gov/protein < Accessed 09/30/2011>

謝辞

今から約５年前，私の進化教育研究はスタートしました．大学・大学院と進化に関連する研究をしていたのにも関わらず，進化の授業が上手くできないと感じたことが研究の始まりでした。いざ研究を始めようとしても何から手を付けたらよいのか分からず，とりあえずアメリカの高校生物の教科書を読んでいたところオリガミバードに出会い「これだ！」と思えたことは大変大きかったと思います．

現在，オリガミバードは見違えるほど良い教材になったと自負しています．もちろん，オリガミバードが現在の姿に成り得たのは多くの方々の協力があったからに他なりません．私一人の力では現在の姿にはとてもならなかったと断言できてしまいます。その中でも一番大きな出会いは，佐倉先生との出会いでした．何人かの大学の先生に研究指導のご相談をしても，受け入れをしてもらえず苦しんでいたところ，佐倉先生は私の研究に興味を持っていただき，評価していただき，研究室に所属しても良いというお返事をいただきました．あの時の嬉しさは今でも鮮明に覚えています．その後，指導教官として沢山のご指導いただきました．自分ではどうしたら良いのか分からず辛い時に優しい言葉をかけていただき，何度も救われ，研究へのモチベーションを維持することができました．正直，佐倉研の中では能力が著しく低く，がっかりさせてしまうことも多々あったかと思います．まだまだ先生のご期待に添えるようなレベルには達していないですが，いつの日か佐倉先生に感心していただけるような研究を出来ればと思っております．本当にお世話になりました．そして，今後とも研究に関してアドバイスを頂けたらと思っておりますので，引き続き宜しくお願い致します．

武村先生との出会いも本研究を進めるうえで不可欠なものでした．分子系統樹実習は当初は，校庭で採集したバッタの分子系統樹を描く教材にする予定でした．校庭で採集したバッタの分子系統樹を描くには，PCR やシークエンスができる環境が必要で，さらに生物

教育にも関心がある先生でないと受け入れてもらえないわけです．そう考えていたところ，運よく武村研の HP を発見し，駄目もとでご挨拶に伺ったところ，武村先生は快く受け入れてくださいました．あの時も佐倉先生との出会いと同じくらい嬉しかったことをはっきりと覚えています．武村先生にはそれ以降，たくさんのアドバイスをいただくとともに，大変恵まれた研究環境を提供していただきました．本研究のクジラ分子系統樹実習は武村研での論文紹介がきっかけであり，武村研に所属していなければ誕生していなかったと思います．また，武村研の院生である鈴木一臣君の貢献はオリガミバードの心臓部となった配偶子突然変異 BOX の誕生に無くてはならないものでした．クジラ分子系統樹実習に関しては特に風間智子さんに協力していただきました．

山内先生には一次審査からご指導をいただきました．毎回，厳しいコメントをいただき，どう直したら山内先生から OK をもらえるんだろう…と悩みながら改訂していました．特に「教材開発のレビューがない」というコメントは恥ずかしい気持ちになると同時に応えるのが難しいものでした．頂いたコメントはどれも本質的なものであり，先生にいただいたコメントがあったからこそ博士論文を完成させることができたと思っております．山内先生からいただいたコメントは今後も教材開発を行っていくうえで大切なものであると思っております．本研究は「教材開発」にも「教材改良」にも「評価」にも十分至らない研究ですが，いつの日か上記のカテゴリーを十分満たす研究を行いたいと思っております．

嶋田先生と金森先生には二次審査からご指導をいただきました．嶋田先生が中心となり企画されていた進化学会の夏の学校や，「科学」や「遺伝」の特集号からは大きな影響を受けました．私にとって進化学会・夏の学校は憧れの舞台であり，嶋田先生とシンポジウムでご一緒できたときはとても嬉しかったのを覚えております．また，博士論文に関しても嶋田先生に審査していただけたことはとても光栄でした．金森先生からいただいた「２コマ程度で進化を教えるという人工性」というコメントはとても印象に残っています．進化の教材を考える際はこの言葉をしっかりと覚えておこうと思っております．

岩嵜航氏（東北大学大学院生命科学研究科）との出会いも本研究を進めていくうえで大きなものでした．シミュレーションを作っては見たかったものの，自分ではその技術はなく，単なる妄想に終わってしまうところでした．そんな中，岩崎君が「俺，やります！」と言ってくれた時はとても感激でした．いつもこちらの期待を上回る仕事をしてもらえるので，その有能さに感心することばかりでした．出会いは進化学会夏の学校の後の飲み会．ノミニケーションはやっぱり大切ですね．

上記の先生方だけでなく，研究を進めていくに当たり多くの方から意見をいただけたことはとても幸せでした．特に，繁殖行動の進化に関する研究をされていた水島希さん（東京大学大学院情報学環助教）をはじめとする佐倉研の皆様，武村研の皆様には大変感謝しております．

教員を続けながら大学院での研究することを許可していただいた白鷗大学理事長・上岡條二先生，副理事長・上岡羊子先生，白鷗大学足利高等学校長・平野栄二先生に感謝申し上げます．また，教材を用いた授業実践に協力いただいた白鴎大学足利高校の先生方と生徒諸君，他校の先生方（都立両国高校・山藤先生，都立豊島高校・鍋田先生・都立新宿高校・佐藤先生，都立竹早高校・岡先生，都立上野高校・内山先生，埼玉県立熊谷高校・原先生・京都府立洛北高校・田中先生）と生徒諸君にも御礼申し上げます．

高校教員時代からの同僚の大木俊英氏（白鴎大学教育学部）には研究に関わる話をたくさん聞いていただきました．また，プライベートなことで落ち込んでいるときに心温まる言葉をかけていただきました．研究へと向き合う気持ちを作るうえで大木先生の存在はとても大きなものでした．心から感謝しております．大木先生が博士論文を書く時に恩返しができればと思います．また，博士論文執筆を根気強く応援してくれた高木梢さんにも感謝申し上げます．その思いやりに何度も救われました．ありがとう．

最後になりましたが，私の体調を気遣いながらも研究を全面的に応援してくれた父と母にはとても感謝しております．父と母の存在がなければこの博士論文は完成することはあ

りませんでした．この年になってまで研究に情熱を注ぐことができたのは父と母に理解があり，経済的にも精神的にも支援してもらえたからに他なりません．この感謝の気持ちを少しずつ，時間をかけて伝えていきたいと思っていますので長生きしてください．