

生物進化（共通性と多様性）で捉えた生命領域カリキュラム ー「遺伝的変異・多様性・自然選択説・系統進化・ウイルス」を中心とした調査よりー

名倉 昌巳*, 梶原 昌五*
(令和4年2月1日受理)

NAGURA Masami*, KAJIWARA Shogo*

Proposal for a Life Science Curriculum Based on Biological Evolution (Unity and Diversity of Biology)
: Survey Centered on "Genetic Variation, Biodiversity, Natural Selection, Phylogenetic Tree, Viruses"

I. はじめに

1 問題の所在

2020年12月に、国際教育到達度評価学会 IEA が主催する国際数学・理科教育動向調査 (TIMSS 2019) の結果が公表された。そのうち、小学校第4学年の理科において前回の2015年に比べ有意に正答率が低下していること、砂漠の絵の中に描かれた「生物と無生物」を区別する出題の正答率 (37%) が、国際平均 (45%) より低いことが指摘された (全国教育問題協議会, 2020)。実は、生物概念に関する出題への正答率が低いことは以前から指摘されていた (TIMSS2007; 2011)。生物概念についてこのように低い正答率が出てくるということは、日本の教育課程や学習指導には、TIMSS が求めている生物概念の育成につながりにくい何らかの要因が潜んでいる可能性が示唆される (中山・松本・猿田, 2021)。

一方、2020年2月から始まった我が国のコロナ禍では、次々と遺伝的変異を繰り返す「ウイルス」を、生きているもの (生物) として捉えた言動が目立ったように思われた。生物の定義 (共通性) は、ふつう次の3つ¹⁾で表現される (福岡, 2007)。

① 細胞 (細胞膜でおおわれた細胞質),

② 代謝 (呼吸などでエネルギーを得、不要物を排出する),

③ 複製 (生殖によって遺伝情報を複製し、次世代に受け継ぐ際に変異すると「進化」につながる)

この生物学上の「共通性」に照らせば、ウイルスには①と②はなく、細胞内に侵入しなければ複製 (③) できない「無生物」と考えられるが、しばしば細菌などの微生物 (多くは病原体) と混同されるようである。ウイルスが「生物と無生物の間」といわれる所以である。

しかしながら、ウイルスを「進化」の観点から生物に含めようとする見解もある (Villarreal, Luis P., 2014)。この見解から演繹的に推論すれば、上記の①と②が除かれ、③の複製によって生体内で広がり、「変異」を繰り返し、「進化」しながら蔓延するため、ウイルスは生物に含めてよいという論理になる。つまり、この論に立脚すれば、ウイルスを含めた全生物の「共通性」は変異による「進化」が唯一と結論付けられる。

また、すべての「多様な生き物は歴史の産物」である (長谷川, 2015)。つまり、「共通な祖先」から現存の「多様な生物」が出現してきたのは「進化」の結果である。「生物多様性」には、時間的

* 岩手大学教育学部

視点である「進化」がその根底にある。そして、すべての生物は遺伝情報を受け継ぎ、更新することによって生命を維持しているという「共通性」も保持している。換言すれば、生物の「多様性」と「共通性」を統合的に理解することを目的とした総合的な学問分野は、進化生物学であるといえる（深津，2002）。因みに、平成29年告示の新しい学習指導要領における小学校から高校までの、生命を柱とする領域では、その見方（様々な事象を捉える各教科ならではの視点）として「共通性」と「多様性」を重視するように改訂された（文部科学省，2018a；2018b；2019）。今後、小学校から大学に至るまでの生命領域の学習においては、「進化」が重要視されてくることが予想される。

他方、巨大な知識の海に漂う現代生物学の統一的理解には、生物学の4つのなぜ²⁾（至近要因・究極要因³⁾・発達要因・系統進化要因⁴⁾）と、生物の階層性（遺伝子～細胞～個体～生態系）、並びに「進化」によって生物教育を統一すべきとする知見がある（長谷川，2020）。また、その生物学の統一的理解（4つのなぜ）及び生物の「多様性と共通性」によって、中学校における全「生命」領域（分類・細胞・遺伝・進化・生態系）を統合したカリキュラムを提案し、その有用性を検証した研究がある（名倉・松本，2021）。それ以前では、ダーウィンの「自然選択説⁵⁾」を中心とする「進化の総合説⁶⁾」を用いた仮説の設定、並びに「系統樹」を明示した「遺伝的変異」に関する学習が、中学生の獲得形質の遺伝⁷⁾（ラマルク説）などの誤概念⁸⁾の払拭に効果的であることが明らかにされている（名倉・松本，2019；名倉・松本，2020a；2020b）。多くの生徒や学生の「進化」に関する理解は不十分であり、「進化」に関する授業を受けた後でさえ、彼らは根強く素朴進化論（誤概念）を持ち続け、科学的進化理論を習得することが困難であると従来から指摘されてきた（Bishop & Anderson, 1990; 杉本，2014）。我が国でも獲得形質の遺伝などの素朴進化論は、小学生から高校生・大学生に至るまで保持していることを明らかにした調査研究もある（福井・鶴岡，

2001）。今後は、このような誤概念から科学的生物概念に転換する学びを中学生だけでなく、高校生や大学生に拡大していく必要性が考えられる。

2 研究仮説とその意義

以上をまとめると、現代生物学の理解には現行学習指導要領（平成29年告示）に明記された「共通性」と「多様性」の視点のみならず、「遺伝的変異」、「自然選択説（進化の総合説の中心理論）」、「系統樹（系統進化）」、並びに「ウイルス」を含めたカリキュラム設計が、生物学の中心概念である科学的進化・遺伝概念の形成に有効であるという仮説が導き出される。この仮説を検証する意義は、生物とは何か？ 生きているとはどういうことか？ という疑問や、TIMSSの課題に正しく答えることにつながることも見込まれる。言い換えれば、このような科学的な生物概念を子どもたちに育むことこそ、理科・科学教育にとって特に重要な課題になってくることが今後予想される。さらに、このような生物の「共通性と多様性」で捉えた生命領域カリキュラムの提案は、「理科の見方・考え方」を働かせて思考力・判断力・表現力を育成する意味でも、意義ある提案であると思われる。

II. 研究の目的

本研究では、今後の生命領域におけるキーワードは「進化」にあり、「共通性」と「多様性」を兼ね備えた「進化」の学習によって、複雑な現代生物学の総合的な理解が可能となり、生命教育のカリキュラムは「進化」的視点で統一されるべきであることを、次の2つの検証方法から明らかにすることを目的とした。

その検証方法の1つは、内外の理科教科書の調査によって、上記の「共通性」と「多様性」、「遺伝的変異」、「自然選択説」、「系統樹（系統進化）」、「ウイルス」に関する記述内容を調査し、カリキュラムの検討をすることである（V-1）。

もう1つは科学的進化概念の獲得と、誤概念の払拭の観点から、特に大学生の持つ進化理論が、中学生などの他の世代と比較・分析することによって、科学的進化概念へどのような経緯で推移

していくのか、「進化の総合説（遺伝的変異を含む自然選択説が中心理論）」の理解の観点から明らかにすることである（V-2・3・4）。

加えて、以上の2つの検証結果から「進化」を中心に据えた、生物学を統一的に理解するための生命領域カリキュラムの在り方を提案することをめざした（VII）。

Ⅲ. 研究の方法

1 中学校理科教科書に関する調査

平成29年告示学習指導要領準拠の新しい中学校理科教科書5社について（有島ほか，2021；梶田ほか，2021；室伏ほか，2021；大矢ほか，2021；霜田ほか，2021），遺伝的変異（遺伝と進化の関連），多様性（進化の結果），自然選択説（「進化の総合説」の中心理論），系統樹（系統進化）など，先行調査で導き出された4つの観点から調査した（名倉・松本，2021；名倉，2021）。

加えて，比較的新しい米国の中学校生物教科書3社についても（Anderson, M. et al., 2017; Dispezio, M.A. et al., 2017; Padilla, M. J. et al., 2011），同様の観点から掲載内容を分析した。これらの分析に基づき，生命領域のカリキュラムの統合化と生物教育の改善には「進化」の視点が不可欠であることを明らかにしたい。

2 「進化学理論の枠組」に関する調査

本研究では，大学生（主に3年生）における誤概念払拭と科学的概念形成に資するカリキュラム改善の観点から調査・検証を行った。その調査結果を杉本（2014）の調査結果（小学生と大学生）や，名倉・松本（2021）の調査結果（中学生）と比較し（条件が異なるため単純比較はできないが），生命領域カリキュラムの検討を行った。尚，受講生の「高校生物基礎」履修率は76.5%，「高校生物」履修率は33.3%であった。

調査時期は，2021年前期4月に「地学教材」の講義（地史）を行った際に第1回目の調査を，後期11月に「生物教材」の講義（遺伝）を行った際に第2回目の調査を実施した（合計2回）。

検証方法は，第1回目は「水中から陸上への進

化」について，古生代の硬骨魚類（ユーステノブテロン）からイクチオステガやアカントステガ（初期の両性類）への進化のプロセスを，「適応」と「世代性」という進化の観点を踏まえて説明する課題において（名倉・松本，2018a），大学生の回答（N=18）による記述内容から分析した。

第2回目は，「自然選択説」を中心とした「進化の総合説」を用いて仮説を立てる課題（名倉・松本，2018b），すなわち表1（1）について，大学生の回答（N=15）による記述内容から分析した。

これら2つの分析に当たっては，表1（2）の「チーターの走力が進化した課題（Bishop & Anderson, 1990）」における回答結果を参考に，表2のように6つの「進化に関する誤概念の枠組」に，科学的進化学理論である「ネオ・ダーウィニズム」を加え，7つの「進化学理論の枠組」によって整理・分析した（杉本，2014）。杉本は，この「進化学理論の枠組」の作成にあたって，まず小学生と大学生の予備調査によって尺度構成し，内容的妥当性・構成概念妥当性などを吟味した上で，最終的に7つの「進化学理論の枠組」を紡ぎだしている。そのため本調査方法は妥当な検証手法であると思われる。

表2のうち，⑦のネオ・ダーウィニズムは，ダーウィンの「自然選択説」を基本に「突然変異」や「集団遺伝学⁹⁾」などの諸理論を統合した正統派の進化学理論であり，ここでは「進化の総合説」と同義とした。杉本はコレスポネンス分析によって，小学生の素朴理論（②ラマルキズムや③目的論的

表1. 「科学的進化学概念」を測定する進化学課題

※ (1) は本研究，(2) は先行研究における課題

(1) キリンの首はなぜ長いのか？ 進化仮説をつくろう。「自然選択」説を中心に，「突然変異」などによって生じる遺伝的「変異」を含めた「進化の総合説」を用いて，次第にキリンの首が長くなり「適応」進化したプロセスを，初期・中期・後期（地質学的時間）に分けて説明しよう（名倉・松本，2021）。

(2) チーターは獲物を追う時に時速60マイル（約96 km）で走ることができる。チーターの祖先は時速20マイル（約32km）でしか走ることができなかったと仮定すると，今日のチーターはどのようにしてそれほど速く走る走力を発達させたと思うか。あなたの考えを説明しなさい（Bishop & Anderson, 1990；杉本，2014）。

表2. 7つの「進化理論の枠組」とその概要
(杉本, 2014に基づき筆者ら再構成)

- ①【ブラック・ボックス】: 進化の事実だけでメカニズムの記述のない説明。
- ②【ラマルキズム】: ラマルクの進化説の1つ「獲得形質の遺伝」による説明。
- ③【目的論的説明】: 「～のために」「～しなければならない」などの目的や必要性を含んだ説明。
- ④【有利な形質発展説】: 自然選択説を考慮せず, 有利な形質の出現・蓄積による進化の説明。
- ⑤【組み合わせ説】: ラマルキズムとダーウィニズム(自然選択説)が混在している説明。
- ⑥【不十分な自然選択説】: 遺伝的変異や生存確率を考慮せず, 有利なものは全て生き残り, 他は全て死滅するような表現。
- ⑦【ネオ・ダーウィニズム】: 科学的進化理論としての説明。ここでは「進化の総合説」と同意。

説明)から大学生の科学的進化理論(⑦ネオ・ダーウィニズム)へと推移・発展してゆくと考察している。本研究においてもこの知見を援用して分析を進める。この途中経過にあたる⑥の「不十分な自然選択説」とは、遺伝的変異や生存確率を考慮しない自然選択であり、生存に有利な形質を持つ個体は全て生き残り、そうでない個体は全て死滅するような全か無かの回答など、説明が足りない回答はここに含めた。

3 進化概念に関する質問紙調査

先行研究に基づき、表3のような10項目の「質問紙(真偽法)」を準備し(名倉・松本, 2018a), 同一の大学生を対象に、第1回目は4月(N=18)に「地学教材」の講義(地史)の前・後において、第2回目は11月(N=10)に「生物教材」の講義(遺伝)の前・後において、合計4回にわたり表3の質問紙調査を実施した。第1回目の「地学教材」における調査は、先のⅢ-2でも述べたが、「水中から陸上への進化を『適応・世代性』に基づいて回答する課題」を実施した前・後にあたる。一方の第2回目の「生物教材」における調査は、先の表1(1)の「キリンの首はなぜ長いのかについて『変異・選択・適応』を踏まえて回答する課題」を実施した前・後にあたる。第1回目・2回目における講義の前・後での正答数と誤答数をそれぞれクロス集計し(表7・表8), McNemar検

定を用いて、大学生の「科学的進化概念」の形成並びに「誤概念」の保持の様相を検証した。

表3. 進化概念の形成にかかる質問紙調査
: 真偽法(名倉・松本, 2018a; 2018b)

- 次のア～コの「進化」に関する設問のうち、正しいと思うものには○を、間違っていると思うものには×を書きなさい。
- ア. 生物進化の世界では、かならず強いものが弱いものに勝ち、強いものが生き残っていく。
 - イ. 昆虫では幼虫→さなぎ→成虫と、ヒトでは赤ん坊→少年→大人と、「進化」して成長していく。
 - ウ. 「鈴木一郎」選手は、プロ野球入団後2年目に「イチロー」と名乗ってから活躍が始まり、さらに大リーグに移籍後も彼の野球の能力は「進化」し続けている。
 - エ. 地球上の生物は何億年も大昔から「進化」し、動物では地質年代の順に三葉虫、恐竜、マンモスと変遷してきた。
 - オ. 電話はグラハム・ベルが発明してから、手回し式→ダイヤル式→プッシュホン→ケイタイ電話→スマートフォンと「進化」し続けている。
 - カ. 「進化」とは一代で起る変化ではなく、長い世代をへて起る変化である。
 - キ. どんな生物でも、長い年月のあいだにすぐれた性質をもつものに「進化」してゆく。
 - ク. まわりの環境が変化すると、それにあった性質をもつ生物が生き残っていく。たとえば、恐竜は寒い環境に「適応」できなかったため、絶滅したと言われている。
 - ケ. 生物の「変異」は生きていく間に起こり、その「変異」が次世代に受け継がれていくことにより「進化」が起こる。
 - コ. 生物の「変異」は新しく生まれ出るときに起こり、その「変異」した生物がその時代の環境に「適応」し、数多く生き残ることにより「進化」していく。
- (以上, 10問)

IV. 調査結果

1 中学校理科教科書に関する調査結果

我が国の新しい中学校理科教科書の調査結果は、表4のようなになった(各観点における記載の有無により、○-とした)。進化の引き金となる「遺伝的変異」や、「進化の結果」である「多様性」については全ての教科書に記載があった。「系統樹」については5社中4社に図示され、生物教育の動向を示唆する結果をみた。しかし、読み物や資料を含めてダーウィンの紹介記事はあるが、「自然選択説」に言及した教科書は5社中2社であった。

一方、表5の米国の中学校生物教科書では3社

ともに先の4つの観点すべてが記載されていた。また、日本の教科書と比較して生物進化を中心に編纂され、しかも「自然選択説」や「ウイルス」に多くの頁を割いていた。参考に調査した米国でよく使われている大学の生物学教科書にもこの傾向は受け継がれ、同様に「進化」を中心に編纂されていた（Simon, E. J. et al., 2016; Singh-Cundy, A. et al., 2012; Urry, L. A. et al., 2017）。

表4. 「進化」に関する我が国の教科書調査（名倉, 2021）
※ダーウィンの人物紹介のみ一，系統樹の未分化は△とした。尚，ウイルスについて本文中に明記された教科書はない。

	A社	B社	C社	D社	E社
遺伝的変異	○	○	○	○	○
多様性	○	○	○	○	○
自然選択説	○	—	—	○	—
系統樹	○	○	△	○	○
ウイルス	—	—	—	—	—

表5. 米国の中学校生物教科書調査（名倉, 2021）
※3冊共にウイルスが1項目として本文中に詳述されている。

	<i>Prentice Hall Science Explorer book C (2011)</i>	<i>Science Fusion book B (2017)</i>	<i>Life Science (2017)</i>
遺伝的変異	○	○	○
多様性	○	○	○
自然選択説	○ (10頁)	○ (12頁)	○ (10頁)
系統樹	○	○	○
ウイルス	○ (8頁)	○ (5頁)	○ (7頁)

表6. 「進化的理論の枠組」における各度数及びその割合
※上の数字は度数〔人〕，下の括弧内の数字は割合〔%〕

各学年と回数 ()は教示した内容	ブラック・ボックス	ラマルキズム	目的論的説明	有利な形質発露説	組み合わせ説	不十分な自然選択説	ネオ・ダーウィニズム
中学3年生① (遺伝・変異・系統樹)	13 (23.6)	8 (14.5)	9 (16.4)	7 (12.7)	1 (1.8)	9 (16.4)	8 (14.5)
中学3年生② (変異・選択・適応)	1 (1.8)	2 (3.6)	10 (18.2)	10 (18.2)	1 (1.8)	10 (18.2)	21 (38.2)
大学3年生① (適応・世代性)	2 (11.1)	5 (27.8)	7 (38.8)	4 (22.2)	0 (0.0)	0 (0.0)	0 (0.0)
大学3年生② (変異・選択・適応)	0 (0.0)	0 (0.0)	3 (20.0)	2 (13.3)	0 (0.0)	3 (20.0)	7 (46.7)

※ 中学3年生①は2018年5月 (N=55) , 同中学3年生②は2019年2月 (N=55) , 大学3年生①は2021年4月 (N=18) , 同大学3年生②は2021年11月 (N=15)

2 「進化的理論の枠組」に関する調査結果

大学生における表1の(1)の進化課題(キリンの首はなぜ長いのか)などに対する回答結果を、表2の「進化的理論の枠組」から整理したところ、表6の下2段のような結果が得られた。尚、参考のために表6の上2段には、中学校3年生におけるほぼ同様の調査結果を掲載した(名倉・松本, 2021)。

3 進化概念に関する質問紙調査結果

表3の「質問紙(真偽法)」について、同一の大学生を対象に、前期4月(N=18)における「地学教材」講義前・後の調査結果を表7に、加えて後期11月(N=10)における「生物教材」講義の前・後の調査結果を表8に掲載した。

先にも述べたが、これらの2つの表は、大学生の「科学的進化概念の形成」並びに「誤概念の保持」の様相を検証するために、講義の前・後での正答数と誤答数をそれぞれクロス集計し、McNemar検定を用いて統計分析を行ったものである。また、簡単のために、アは「弱肉強食」、イは「昆虫の変態」、ウは「ヒトの成長」、エは「大量絶滅」、オは「技術の進歩」、カは「世代性」、キは「優勝劣敗」、クは「環境適応」、ケは「獲得形質の遺伝(ラマルク説)」、コは「遺伝的変異(進化の総合説の1つ)」として、それぞれの表7・8に記載した。

表7では、「ウ ヒトの成長」では5%水準で、「コ 遺伝的変異」では1%水準で有意な差が生じた。「イ 昆虫の変態」と「カ 世代性」については元々正答率が高く、天井効果が示唆される。「オ 技術の進歩」以外の項目は、 χ^2 値が2.67~3.77の値を推移し、一定程度の正答率の上昇がみとめられるが、顕著な上昇ではなかった。

表8では、表7において有意差が生じなかった「オ 技術の進歩」においても顕著に正答率の上昇が見られた。「ア 弱肉強食」、「イ 昆虫の変態」、「エ 大量絶滅」、「カ 世代性」、「キ 優勝劣敗」については天井効果が示唆される。「ウ ヒトの成長」や「ケ 獲得形質の遺伝」についても一定の正答率の上昇が示唆されるものの(ウ・ケ共に χ^2 値=3.00<3.841)が、有意な上昇はみとめられな

かった。

尚, 4月と11月の質問紙調査において人数が異なるのは, 対応のある統計的検定であり, 事前・事後においてどちらか欠席した場合は調査数から除外されるので, 表8のような有効回答数(N=10)になったためである。

表7. 第1回目の質問紙調査結果: McNemar検定
(2021年4月: 大学生N=18)

各質問項目	講義前〔人〕		講義後〔人〕		χ^2 値	分析結果
	正答	誤答	正答	誤答		
ア 弱肉強食 (誤)	13	5	16	2	3.00	n. s.
イ 昆虫の変態 (誤)	18	0	18	0	0.00	(n. s.)
ウ ヒトの成長 (誤)	14	4	18	0	4.00	*
エ 大量絶滅 (正)	14	4	17	1	3.00	n. s.
オ 技術の進歩 (誤)	4	14	5	13	0.14	n. s.
カ 世代性 (正)	16	2	18	0	2.00	(n. s.)
キ 優勝劣敗 (誤)	12	6	17	1	3.77	n. s.
ク 環境適応 (正)	14	4	17	1	3.00	n. s.
ケ 獲得形質の遺伝 (誤)	12	6	16	2	2.67	n. s.
コ 遺伝的変異 (正)	10	8	18	0	8.00	**

d f = 1 $\chi^2_{.05} = 3.841$ ($*p < 0.05$) $\chi^2_{.01} = 6.635$ ($**p < 0.01$)
n. s. (not significant), (n. s.) は元々高い正答率で天井効果と推察される

表8. 第2回目の質問紙調査結果: McNemar検定
(2021年11月: 大学生N=10)

各質問項目	講義前〔人〕		講義後〔人〕		χ^2 値	分析結果
	正答	誤答	正答	誤答		
ア 弱肉強食 (誤)	9	1	9	1	0.00	(n. s.)
イ 昆虫の変態 (誤)	10	0	10	0	0.00	(n. s.)
ウ ヒトの成長 (誤)	7	3	10	0	3.00	n. s.
エ 大量絶滅 (正)	8	2	9	1	1.00	(n. s.)
オ 技術の進歩 (誤)	5	5	9	1	4.00	*
カ 世代性 (正)	10	0	10	0	0.00	(n. s.)
キ 優勝劣敗 (誤)	9	1	8	2	1.00	(n. s.)
ク 環境適応 (正)	7	3	8	2	1.00	n. s.
ケ 獲得形質の遺伝 (誤)	5	5	8	2	3.00	n. s.
コ 遺伝的変異 (正)	6	4	8	2	2.00	n. s.

d f = 1 $\chi^2_{.05} = 3.841$ ($*p < 0.05$) $\chi^2_{.01} = 6.635$ ($**p < 0.01$)
n. s. (not significant), (n. s.) は元々高い正答率で天井効果と推察される

V. 考察

1 中学校理科教科書に関する分析

表4の我が国の中学校理科教科書の調査結果より, 「遺伝的変異」, 「多様性」, 「系統進化」が近

年重視されつつあることがみとめられた。ただし, 「自然選択説」の紹介については, 表5の米国の中学校教科書と比較して, 今なお少ないといえる。因みに, 旧課程の学習指導要領に準拠した以前のE社の教科書には, ダーウィンの紹介と共に, 「自然選択説」についても解説があった(塚田捷ほか, 2012)。ところが, 平成29年告示の新課程に準拠した理科教科書では, ダーウィンの紹介のみで「自然選択説」は記載されていなかった(大矢禎一ほか, 2021)。復活が切に望まれる。

また, 「ウイルス」について解説をした中学校理科教科書はなかった。冒頭では「ウイルスは生物と無生物の間」とみなされてきたことを述べたが, 昨今の新型コロナウイルスの蔓延に鑑み, 今後は中学校にもその導入を望みたい。アメリカの中学校教科書では5頁~8頁を割いて, 詳しくウイルスの生態について解説している。人類は, ウイルスがヒトからヒトへ(動物から動物へ)感染しながら, 「変異」を繰り返す, その体内環境による「自然選択」を経て, 新しい株(変異株)に「適応」進化していく事態に遭遇した。遺伝情報であるRNA(コロナウイルス以外ではDNA)をスパイク・タンパク質で包んだ塊を, 生物のなかまに何故含まないのであろうか。そして, 「ウイルス」や「自然選択説」をヒトの生物学(遺伝や細胞)として, 小・中学校などの生命領域カリキュラムの中に導入されることを望みたい。

先の表4と表5を見比べても明らかなことは, 我が国の中学校理科教科書には「自然選択説」と「ウイルス」が掲載されていないことである。冒頭で述べたTIMSSの生物概念についての正答率が海外に比べて低い事実は, 日本の教育課程にはTIMSSが求めている生物概念の育成につながりにくい要因が, ここに存在するのではないだろうか。

以上の考察により, 平成29年告示学習指導要領で示された生物の「共通性」と「多様性」を踏まえ, 生命領域の統一的理解をめざしたカリキュラムには, 「遺伝的変異」, 「自然選択説(進化の総合説)」, 「系統進化(系統樹)」, 「ウイルス」などを含めることが重要であると結論付けられる。

2 「進化学理論の枠組」に関する分析

表6の大学生における「進化学理論の枠組」の調査結果から明らかなように、「変異」、「選択」、「適応」を実施後の第2回目の回答では、それらを学習していない第1回目の調査と比較して、誤概念から科学的進化学理論である「ネオ・ダーウィニズム」へ移行したことがわかる。さらに、第1回目の調査（4月）では、ラマルキズム（獲得形質の遺伝）や目的論的進化（～のために進化したなど）による説明をしていた学生が、第2回目（11月）にはそれらの進化学理論（誤概念）は各段に減少していた。このことから、当初で設定した仮説通り（I-2）、「自然選択説（進化の総合説の中心理論）」や「遺伝的変異」の学習が影響していることが示唆される。第2回目の講義では遺伝についての教材紹介や「系統樹」についても解説していたことから、「系統樹（系統進化）」の有効性も示唆される結果である。加えて、表6の上2段に掲載した中学校3年生における結果とも似通い、上記の分析を支持することが伺われる。

その反面、このような学習が無ければ、大学生でも「獲得形質の遺伝（ラマルク説）」や「目的論的進化」など、以前から根強く保持されやすいといわれてきた素朴理論・誤概念が残ったままになるという懸念がある。人生で頑張った結果が次の世代に形質として遺伝することは生物学上では皆無である。「進化」には人生のようにめざす目的はなく、無目的かつランダムに起こる変化しかないことは、昨今における無方向に「変異」する新型コロナウイルスが、その環境にうまく「適応」できたものだけが「選択」されていくことから理解できる（佐倉, 2002b）。ヒトは1種類（*Homo sapiens*）でありながら多様である（個体差がある）ことから明らかである。ウィルスのように情報が自己複製するシステムであって一定の条件を満たしていれば、生物体でなくても（例えばコンピュータ上のウィルス¹⁰も同様に）ダーウィンの進化学理論（自然選択説）は遺伝的アルゴリズム¹¹としても適用可能であり、科学的な進化学理論であるといえる（佐倉, 2002b）。先の内外の中学

校理科教科書の調査から、我が国の中学校では「自然選択説」と「ウィルス」の記載がないことから、このような科学的な理解は困難であると推察される。

3 進化概念に関する質問紙調査の分析

表7における前期4月（N=18）の第1回目の講義前・後の調査結果から、各科学的進化概念の形成が一定程度みられ（特に「コ 遺伝的変異」）、「水中から陸上への進化」仮説を考える課題（適応と世代性の教示）の有用性が示唆される。最も重要な「ケ 獲得形質の遺伝（ラマルク説）」については有意な上昇はみられなかった。

表8における後期11月（N=10）の第2回目の講義（遺伝的変異・自然選択・適応進化の学習）前・後の調査結果から、第1回目に有意差が生じなかった「技術の進歩」において、正答率の上昇が有意にみられた。しかしながら、その他においては顕著な差はみられなかった。これは、第2回目の講義前・後での出席者（有効回答）が極少数になったためか、有意差の出現も最小限になってしまったことが原因と思われる。

然るに、表7～表8を通じて分析すると、第1回目の講義後に正答率の上昇が一定程度見られた「獲得形質の遺伝」において、第2回目の講義前では、正答率が50%に落ち込んでいた。講義後には正答が増えるが、有意差が出るほど顕著ではなかった（もちろん、先にも述べたサンプル数の問題もある）。これは、先行研究においてよく取りざたされていた状況と同様である（Shulman, 1999, p.12；名倉・松本, 2018b）。つまり、獲得形質の遺伝は学校教育で学習しても、その後学校を卒業すると、すぐに概念剥離が起こることと同様の現象と思われる。この調査結果が示す事実は、先にも述べたが、「努力によって獲得した形質は、世代を超えて遺伝し、子孫に受け継がれてゆく」ことを、人々は元々保持しやすいと考えられる。先にも登場した世界的な進化生物学者である長谷川（2015）は「キリンの首が長くなったのは、高い場所にある木の葉を食べようとして首を伸ばしていったため」という誤った説明を、多くの人は

想起しやすいという見解からも、この論は支持される。

本研究における検証手法で援用した「進合理論の枠組」を考案した杉本（2014）の調査では（表9）、小学生は「ラマルキズム（獲得形質の遺伝）」や「目的論的進化」での説明を多用することが多いことが報告されている。その理由について、小学生は自分の日常生活経験に基づいて説明したり、生物を擬人化して進化のメカニズムを推論したりする傾向があるためと考察している。つまり、「進化」の正式な授業を受ける前の小学生は日常的に、「ラマルキズム」的な素朴進化論や「目的論的」な素朴進化論を保持していたと推論できる。

この意味でも、本質問紙調査による多くの項目において、正答数の有意な上昇はみられなかったものの、「遺伝的変異」や「自然選択説」などを生命領域のカリキュラムに取り入れることが、「獲得形質の遺伝」などの誤概念の払拭につながり、その必要性があらためて示唆される。

表9. 「進合理論の枠組」における各度数及びその割合（杉本, 2014）
※上の数字は度数〔人〕, 下の括弧内の数字は割合〔%〕

各学年 ()は調査数	ブラック・ボックス	ラマルキズム	目的論的説明	有利な形質発展説	組み合わせ説	不十分な自然選択説	ネオ・ダーウィニズム
小学校3年生 (N=67)	42 (62.7)	14 (20.9)	8 (11.9)	0 (0.0)	1 (1.5)	1 (1.5)	0 (0.0)
小学校4年生 (N=60)	23 (38.3)	12 (20.0)	24 (40.0)	0 (0.0)	0 (0.0)	0 (0.0)	0 (0.0)
小学校5年生 (N=71)	36 (50.7)	20 (28.2)	14 (19.7)	0 (0.0)	0 (0.0)	1 (1.4)	0 (0.0)
小学校6年生 (N=151)	42 (36.5)	34 (29.6)	31 (27.0)	3 (2.6)	3 (2.6)	2 (1.7)	0 (0.0)
大学生 (非生物系: N=181)	15 (8.3)	12 (6.6)	13 (7.2)	2 (1.1)	4 (2.2)	14 (7.7)	121 (66.9)

※ このうち、以上の7つの「進合理論の枠組」に無関係な解答をした小学校3年生は1人、小学校4年生は1人いたが、表には含まれていない。

4 質問紙調査の時系列による分析

さらに、先の表7（第1回目講義前・後）と表8（第2回目講義前・後）の分析結果を補完し、これらの4回の質問紙調査を通した大学生の概念変容過程（推移）を調べるため、Cochran's Q検定を行った。この統計解析は対応のあるノンパラ

メトリック検定であるため、4回とも履修・出席した大学生しか調査することができない。そのため1度でも質問紙を提出していない学生は除かれるので、有効回答数が7名となった。検定に堪えない人数ながら、上記の分析結果に加味し多面的に検討するため、表10にその結果を掲載した。

表10. 4回の講義前・後における質問紙調査結果：Cochran's Q検定（2021年4月～11月：大学生N=7）

各質問項目	第1回講義前		第1回講義後		第2回講義前		第2回講義後		Cochran's Q検定 (p値)
	正答	誤答	正答	誤答	正答	誤答	正答	誤答	
ア 弱肉強食（誤）	4	3	6	1	6	1	6	1	n. s. (0.4625)
イ 昆虫の変態（誤）	7	0	7	0	7	0	7	0	—
ウ ヒトの成長（誤）	5	2	7	0	5	2	7	0	n. s. (0.1116)
エ 大量絶滅（正）	5	2	6	1	5	2	6	1	n. s. (0.5724)
オ 技術の進歩（誤）	3	4	3	4	3	4	6	1	n. s. (0.1899)
カ 世代性（正）	6	1	7	0	7	0	7	0	n. s. (0.3916)
キ 優勝劣敗（誤）	3	4	7	0	6	1	6	1	*
ク 環境適応（正）	5	2	6	1	5	2	6	1	n. s. (0.5724)
ケ 獲得形質の遺伝（誤）	5	2	6	1	3	4	5	2	n. s. (0.2228)
コ 遺伝的変異（正）	3	4	7	0	4	3	5	2	n. s. (0.1371)

df=3 $\chi^2_{.05}=7.815$ (*: $p<0.05$) $\chi^2_{.01}=11.345$ (**: $p<0.01$) n. s. (not significant)

この結果から、「キ 優勝劣敗」の設問の正答率が5%水準で有意に上昇していることがわかる。実はこの「必ず優れた者に進化する」という概念は、先の表2の④や表6の「有利な形質発展説」による進化の説明とも絡み、根強く保持される誤概念の1つで、中学生における調査では有意差の出なかった項目である（名倉・松本, 2018a;2018b;2020a;2020b）。「自然選択説」などの学習によって、科学的進合理論へ近づきつつあることを示唆する結果である。

また、「ケ 獲得形質の遺伝」においては、有意な差はみられないが、第1回目の講義後の正答数に比べ、第2回目の講義前の正答数が下がり、第2回目の講義後にやや上がっているように推移している。サンプル数が少ないため、憶測の域を出ないが、この事実から先のV-3と同様の考察が可能となる。つまり、学習後にはある程度この誤概念は払拭されたが、しばらく経つと概念剥離が起こったのではないかと推測される。やはり「獲

得形質の遺伝」は、根強く保持されやすい素朴進化理論であることが示唆される結果であった。

さらに、「コ 遺伝的変異」についても、第1回目の講義後に比べて、第2回目の講義前・後の方が正答率が減少したように思われる。表3の質問紙を確認すれば分かることであるが、「コ」は先の「ケ」とちょうど逆の概念であるため、そのことが影響したためか、大学生においても両者の選択に迷ったことが推測される。

VI. まとめ

本研究では、内外の中学校理科教科書の調査分析、「進化理論の枠組」による進化課題の回答結果の分析、並びに進化概念に関する質問紙調査の分析を行ってきた。

これらの分析結果から明らかになったことは、次の3点にまとめられる。

(1) 米国の理科教科書には「遺伝的変異」、「多様性」、「系統樹」が掲載され、我が国の理科教科書もこの傾向になりつつあるが、特に米国では「自然選択説」と「ウイルス」の解説に頁を割いていることが、我が国との相違点である。

(2) 進化課題の回答記述の調査から、学習者は「遺伝的変異」、「自然選択説」、「系統樹（系統進化）」、「適応」の学習によって、「獲得形質の遺伝（ラマルク説）」や「目的論的な進化」による記述が減少し、科学的な進化理論による記述へと推移していくことが示唆される。

(3) 質問紙調査による分析から、「獲得形質の遺伝（ラマルク説）」は保持しやすく払拭が困難なこと、その払拭や科学的進化概念の形成や獲得には、やはり「遺伝的変異」、「自然選択説」、「系統樹（系統進化）」などの学習の効果が示唆される。

以上の(1)～(3)の総括から、今後の生命教育には「共通性」と「多様性」の根底にある「進化」を基軸としたカリキュラムが必要であり、加えて、そのカリキュラム設計においては「遺伝的変異」、「自然選択説」、「系統樹（系統進化）」、「ウイルス」などを教科書に含めることばかりでなく、それらの相互の関連性を踏まえたカリキュラム設計が必

要となる。

尚、本研究における調査では、サンプル数が少なく、この結果によって母集団を推測することはできない。しかしながら、一事例として本稿のような調査データを積み重ねてゆくことにより、次第に再現性は担保されてゆくと思われる。

VII. 今後の展望

本稿では言及しきれなかったが、海外の大学の生物学教科書には、各単元（①分類・②細胞・③遺伝・④進化・⑤生態系）の末尾に、「進化」の視点に立った設問・課題がすべて準備されている(Urry, L. A. et al., 2017)。この①～⑤の単元構成を踏まえ、先の生物学の統一的理解における「生物の階層性」、並びに「共通性（細胞・代謝・複製）」と「多様性（複製⇒変異）」、加えて上記の4つの観点（遺伝的変異・自然選択説・系統樹・ウイルス）に立脚すれば、図1のような「進化（新しい共通性）」を中心に体系化した生命領域カリキュラムの提案が可能となる（名倉・松本, 2021）。

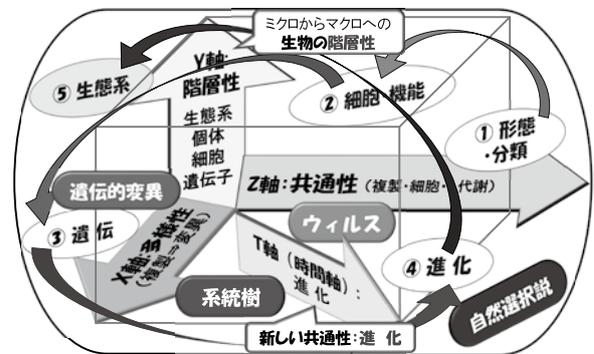


図1 本研究結果から提案する「進化（新しい共通性）」で体系化した生命領域カリキュラム（名倉・松本, 2021に基づき筆者ら再構成）※丸付き番号は単元の履修順(⇒)を示す

これを広げて我が国の生命領域における小学校から大学に至るまで、「多様性」を含めた5つの観点と「進化（共通性）」で体系化した生命領域カリキュラムの提案をすることが、今後の究極の目的となる。

附 記

本研究は、第71回日本理科教育学会全国大会(群馬大会)における発表内容(2021)、「ウイルスを含む全生物の共通性(進化)で捉えた生命領域の構想-『遺伝的変異・多様性・系統樹・自然選択説』の内・外理科教科書調査より-」を基に、大学生における調査結果などを加え、新たな視点から加筆し、大幅に修正を加えたものである。

注

1) アメリカの中学校生物教科書には生物の特徴を、①細胞、②化学物質で構成、③エネルギーの利用、④周囲への応答、⑤生育と発達、⑥生殖と記載され、ウイルスを生物とみなしていない(Padilla, M. J. et al., 2011)。進化生物学者の佐倉(2002a)によると、生物学上の普遍的原則として、①細胞説(生物は細胞を単位として生命活動を営んでいること)、②遺伝(生命現象にとって一番根源的なこと)、③進化(生物は別の種から進化してきたこと)の3つを挙げている。以上を整理して、本研究では福岡(2007)の著書の冒頭部分で述べられている①細胞、②代謝、③複製(遺伝情報の伝達)を採用した(pp.36-37)。近年では、ワトソンとクリックによるDNA発見以来、「生命とは自己複製を行うシステムである」というのが一般的になってきたため、ウイルスを生物とみなすような傾向もある。最終的に上記の福岡は「動的平衡」を生命の定義とみなし、ウイルスを生物から除外している(pp.164-168)。どちらにせよ、本研究における後の論考において、①細胞、②代謝、③複製を生物の定義として問題はないと思われる。

2) 元々はニコ・ティンバーゲンが唱えた説であるが(Tinbergen, N., 1963)、長谷川(2007)は分かりやすく、次のように解説している。動物はなぜ、どのようにして、今見せているような行動をとるのだろうか?この質問には、次の4つの異なる回答の仕方がある。

① その行動はどのような直接的メカニズムによって引き起こされているのか?という「至近要因」にかかわる回答の仕方。

② その行動はどのような機能を果たしているのか、動物はその行動をとるのか?という「究極要因」にかかわる回答の仕方。

③ その行動は個体の成長と発達の過程でどのようにして完成されるのか?という「発達要因」にかかわる回答の仕方。

④ その行動はその動物の祖先のどのような行動から、どのような道筋を経て現在の形になったのか?という「系統進化要因」にかかわる回答の仕方。

3) 進化の説明では「究極要因」による回答(上記の注2)の②)が多くなると推察される。例えば、キ

リンの首が長くなった説明を、「高い所の木の葉を食べたり、遠くの敵をいち早く見つけたり、雌をめぐる雄間闘争で首をぶつけ合ったりするのに、長い方が役に立つから」という機能で説明しがちであり、この回答では結局、後に述べる小学生などが保持しやすい「目的論的な進化(～のために進化した)」の説明(表2の③)に陥ってしまう可能性が否めない。

4) 本稿では、「系統進化要因」による説明(上記の注2)の④)を求めたい。すなわち、「突然変異などで偶然に生まれた首の長いキリンが、高木の多い環境では生存と繁殖に有利なため生物集団に広がり、首の短い祖先種から枝分かれし、現在のキリンの姿となったから」という説明である。この説明は、以下の5)で述べる「自然選択説」を中心とした科学的進化理論、すなわち6)で述べる「進化の総合説(ネオ・ダーウィニズム)」による回答例となる。

5) 前回の平成20年告示学習指導要領準拠の中学校理科教科書にも、「自然選択説」を扱ったものがあった。「同じ種類の生物でも、少しずつ性質はちがっています。その中でより生き残りやすい性質を持つ個体は、多くの子孫を残す可能性が高くなります。すると、その性質は、親から子へと伝えられます。このようなことが何世代もくりかえされ、その性質がその生物集団の中へ広がり、生物は進化する」と記載されていた(塚田ほか, 2012, p.54)。

6) 「進化の総合説」は「ネオ・ダーウィニズム」と呼ぶこともあるが、厳密には「ネオ・ダーウィニズム」はワイズマンが提唱した「自然選択説のみで進化を説明する立場」を指す(横山, 2002)。「進化の総合説」の根底にはダーウィンの「自然選択説」があり、進化の素材としての「遺伝的変異」が個体に生じ、その小さな変異に「選択」が働いて漸進的変化をもたらすことが骨子であり、このとき「獲得形質の遺伝」は否定された(長谷川, 2005)。当初、このダーウィンの「連続説」は、メンデル遺伝の法則(不連続説)や突然変異説と対立するとされたが、集団遺伝学の成果である「自然選択の遺伝学的理論」により矛盾なく合体し、「進化の総合説」が成立した(Mayr, E., 1982)。これを生物学史上における「現代的総合(Modern Synthesis)」とよぶ。

7) J・B・ラマルクの学説の1つで、「努力や意志の力によって生存中に獲得した形質が、子孫に遺伝して進化が生じる」という「獲得形質の遺伝」を指すことが多い。よって、「獲得形質の遺伝」を認める立場が「ラマルキズム」や「ネオ・ラマルキズム」で、認めない立場が「ダーウィニズム」や「ネオ・ダーウィニズム」として対立してきた経緯がある。正確にはラマルク説の中心は「漸進的進化」にあり、環境の変化に適應する過程では「用不用説」も含まれる(横山, 2002)。しかしながら、本研究では分析方法で参考にした杉本(2014)の立場をとり、「獲得形質の遺伝」=「ラマルキズム」とした。

8) 誤概念(misconceptions)は素朴概念や素朴理論

ともいわれ、主に乳幼児が生得的または、日常の生活の中（日常知）から保持に至る誤った概念をいう。その種類には素朴心理学・素朴物理学・素朴生物学などがあり、誤概念の払拭には学校教育（学校知）による知識の再体制化（認知心理学上の概念的変化）が必要となる。その理由として、首尾一貫性、適用範囲の限定、未知の事態への予測、因果的説明を可能にするという点で、科学理論と類似しているから保持されやすいのである（波多野，2003）。特に、生物学上の光合成や進化などの科学的概念は、教授に基づく知識の再体制化がないと日常知から学校知（科学知）への転換は困難であるといわれている（稲垣，2003）。

9) ダーウィン理論の特徴の1つとして、偶然性の重視と統計的集団思考がある。自然選択を進化の中心概念とし、さまざまな変異をもった種の全体を、統計的にあるいは集団としてとらえていくダーウィンの考え方は、後の「集団遺伝学」へ発展した。すなわち、ランダムに生じた遺伝的変異がメンデル遺伝によって次第に生物集団に広がっていくことを意味する。換言すれば、フィッシャーらの「集団遺伝学における数学的理論」によって、メンデル遺伝とダーウィン理論が両立すること、すなわち現代的総合（注6）が成立した（横山，2002）。

10) コンピュータも生命現象も同様に情報システムであるから、生命体を対象とした進化理論で記述できる。近年のコンピュータ・ウイルスは、一旦他の端末内（例えばヒトの細胞内と同様に）に侵入すると、自分でプログラムを書き換えて（自己複製など）、情報システム（ヒトの遺伝子など）をダウンさせる（肺の細胞破壊など）。これを防ぐのがワクチン・ソフト（RNAワクチンなど）だが、いくらよいワクチンが開発されても、また新種のウイルス（変異株など）が出てくる。しかし、このような情報システムに自然選択理論を適用し、遺伝的アルゴリズム（注11）によってプログラム同士を組み合わせれば、環境により適した有利なプログラム（遺伝子）が自動的に残されていくことになる。さらに何回もかけ合わせれば、より有利なプログラムをどんどん進化させることが可能となる（佐倉，2002b）。

11) 遺伝的アルゴリズムとは、生物の遺伝の法則を模倣した学習アルゴリズムである。何らかの知識を表現する文字列を染色体として扱い、その染色体上の遺伝子（知識の構成要素）に交叉や突然変異などの遺伝的操作を加えることで、環境に最も適した染色体を残してゆく（自然選択）。その結果、動的に変化する環境に最も適した知識が獲得されることになる（植田，2002）。

引用文献

- Anderson, M. et al. (2017) . Life Science (Glencoe Edition) , Columbus, OH, McGraw-Hill Education.
- 有島朗人ほか70名 (2021) 『理科の世界3』 (令和2年3月検定済) 大日本図書.
- Bishop, B. A., & Anderson, C. W. (1990) . Student conception of natural selection and its role in evolution, *Journal of Research in Science Teaching*, 27, 415-427.
- DiSpezio, M. A. et al. (2017) . Science Fusion book B (Student Edition) , Orland, Florida, Houghton Mifflin Harcourt.
- 深津武馬 (2002) 「共生と共進化」, 石川統編著『生命環境科学 I - 環境と生物進化』 (放送大学大学院教材) 放送大学教育振興会, 128-139.
- 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」『理科教育学研究』42 (1) , 1-12.
- 福岡伸一 (2007) 『生物と無生物のあいだ』講談社.
- 長谷川真理子 (2005) 「進化論の歴史」, 石川統ほか3名編『進化学の方法と歴史』岩波書店, 7-31.
- 長谷川真理子 (2007) 『動物の行動と生態』 (放送大学教材) 放送大学教育振興会, 11-23.
- 長谷川真理子 (2015) 『ダーウィン種の起源 (100分で名著)』NHK 出版.
- 長谷川真理子 (2020) 「生物をどのように教えるか」『日本教科内容学会誌』6 (1) , 3-12.
- 波多野誼余夫 (2003) 「素朴理論」, 波多野誼余夫ほか7名編著『教授・学習過程論』 (放送大学大学院教材) 放送大学教育振興会, 41-50.
- 稲垣佳代子 (2003) 「知識の大幅な組み換え」, 稲垣佳代子ほか4名編著『認知過程研究』 (放送大学大学院教材) 放送大学教育振興会, 30-43.
- 梶田隆章ほか134名 (2021) 『新しい科学3』 (令和2年3月検定済) 東京書籍.
- 文部科学省 (2018a) 『小学校学習指導要領 (平成29年告示) 解説理科編』東洋館出版社.
- 文部科学省 (2018b) 『中学校学習指導要領 (平成29年告示) 解説理科編』学校図書.
- 文部科学省 (2019) 『高等学校学習指導要領 (平成30年告示) 解説理科編・理数編』実教出版.

- 室伏きみ子ほか32名 (2021) 『自然の探究中学理科3』(令和2年3月検定済) 教育出版.
- Mayr, E. (1982). *The Growth of Biological Thought: Diversity, Evolution, and Inheritance*. Cambridge, Massachusetts: The Belknap Press of Harvard University Press.
- 名倉昌巳・松本伸示 (2018a) 「形成的評価を加味したパフォーマンス課題を取り入れた理科授業開発」『理科教育学研究』58 (4), 355-365.
- 名倉昌巳・松本伸示 (2018b) 「中学校理科『生物・地学』領域を通じた科学的進化概念形成に関する授業開発」『理科教育学研究』59 (2), 205-215.
- 名倉昌巳・松本伸示 (2019) 「中学生の科学的進化概念の形成と誤概念の保持の様相について」『日本理科教育学会全国大会発表論文集』17, p.193.
- 名倉昌巳・松本伸示 (2020a) 「中学校『生命の連続性』における科学的進化概念の理解をめざす単元開発」『理科教育学研究』60 (3), 589-601.
- 名倉昌巳・松本伸示 (2020b) 「中学校3年『生物と環境』における『生態系の多様性』と『生物進化』を結ぶ単元開発」『理科教育学研究』60 (3), 603-613.
- 名倉昌巳・松本伸示 (2021) 「生物の階層性と系統進化による統一的理解を図る中学校理科カリキュラムの提案」『科学教育研究』45 (2), 234-245.
- 名倉昌巳 (2021) 「ウイルスを含む全生物の共通性(進化)で捉えた生命領域の構想」『日本理科教育学会全国大会発表論文集』19, p.390.
- 中山迅・松本聖奈・猿田祐嗣 (2021) 「TIMSS理科論述式課題の回答における日本の児童の生物概念の特徴」『日本科学教育学会年会論文集』45, 567-570.
- 大矢禎一ほか145名 (2021) 『未来へひろがるサイエンス3』(令和2年3月検定済) 啓林館.
- Padilla, M. J., Miaoulis, Ioannis, & Cyr, Martha. (2011). *Prentice Hall Science Explorer book A~E (International Edition, Student Edition)*.
- 佐倉統 (2002a) 「情報と生命科学」, 中島尚正ほか7名編著『総合情報学』(放送大学大学院教材) 放送大学教育振興会, 171-183.
- 佐倉統 (2002b) 『進化論という考え方』講談社.
- Simon, E. J., Dickey, J. L., Reece, J. B., & Hogan, K. A. (2016). *Campbell Essential Biology (6th Edition)*.
- Singh-Cundy, A., Cain, M.L., & Dusheck, J. (2012). *Discovery Biology (5th Edition)*.
- 霜田光一ほか33名 (2021) 『中学校理科3』(令和2年3月検定済) 学校図書.
- 杉本明子 (2014) 「日本の小学生と大学生の進化に関する素朴理論」『明星大学研究紀要』4, 33-50.
- Shulman, L.S. (1999). *Taking learning seriously, Change*, 31 (4), 10-17.
- Tinbergen, N. (1963). *On Aims and Methods in Ethology, Zeitschrift für Tierpsychologie*, 20, 410-433.
- 塚田捷ほか61名 (2012) 『未来へひろがるサイエンス2』(平成23年2月検定済), 啓林館.
- 植田一博 (2002) 「情報処理装置としての人間」, 中島尚正ほか7名編著『総合情報学』(放送大学大学院教材) 放送大学教育振興会, 113-127.
- Urry, L. A., Cain, M. L., Wasserman, S. A., Minorsky, P. V., Reece, J. B., & Campbell, N. A. (2017). *Campbell Biology (11th Edition)*.
- Villarreal, Luis P. (2004), *Are Viruses Alive?*, *Scientific American*, December. 邦訳『日経サイエンス』2005年3月.
- 横山輝雄 (2002) 『生物学の歴史－進化論の形成と展開』(放送大学教材) 放送大学教育振興会.
- 全国教育問題協議会 (2020) 『中2数学過去最高を更新:小4「理科楽しい」2019年国際調査』 Retrieved from <https://www.zenkyokyo.net/assert/appeal/2550> (最終閲覧2022.01.26)

謝 辞

本研究は JSPS 科研費補助金（奨励研究：課題番号21H03943）の助成を受けて行われたものである。